



道総研

ISSN 2189-1230

CODEN HOKSA 9

北海道立総合研究機構 工業試験場報告

Reports
of
Hokkaido Research Organization Industrial Research Institute

(No.324)

2025

地方独立行政法人 北海道立総合研究機構
産業技術環境研究本部

工 業 試 験 場

北海道立総合研究機構工業試験場報告（No.324）2025

目 次

一般論文

1 農産物を対象とした目視品質検査の自動化技術の開発	飯島 俊匡、岡崎 伸哉、藤澤 怜央…………… 1 浦池 隆文、近藤 正一、本間 稔規
2 エッジAI向け異常検知モデルに関する研究	本間 稔規、全 慶樹…………… 9
3 画面認識における説明可能なAIに関する研究	全 慶樹、近藤 正一、本間 稔規…………… 17
4 抽苔人参の非破壊判別技術の開発	川島 圭太、井川 久、宮島 沙織…………… 23 吉田 道拓、中西 洋介、田中 彰
5 カボチャ収穫作業を軽労力化する軸切りはさみの開発	浦池 隆文、伊藤 壮生、泉 巖…………… 29 前田 大輔、今岡 広一、中西 洋介 森 雅宏、濱口 竜一
6 接触駆動式高速受動把持ハンドの開発	井川 久、川島 圭太、西村 齊寛…………… 35 渡辺 哲陽
7 人間中心設計のためのUXプロトタイピングに関する研究	高木 友史、万城目 聡、安田 星季…………… 41 大久保京子、印南 小冬
8 レーザ熱処理によって改質した金型用工具鋼の熱影響部組織の解析	櫻庭 洋平、川上 諒大、宮腰 康樹…………… 51 高橋 英徳、大津 直史

研究ノート

1 ARマーカーを追従する自律移動台車の開発	佐野 峻輔…………… 59
2 複数センサ統合による調理中の状態変化認識	宮島 沙織、井川 久…………… 63
3 水中保形性に優れたウニ養殖用配合飼料の開発	瀬野修一郎、細川 真明、可児 浩…………… 69 川崎 琢真、高原 英生、福田 裕毅 清水 健志
4 無機系徐放性肥料の開発	執行 達弘、森 武士、小川 雄太…………… 73 松嶋景一郎
5 ハイ・エントロピー合金の粉末焼結に関する研究	中嶋 快雄、宮腰 康樹、飯野 潔…………… 77

CONTENTS

Regular Paper

1	Development of Automated Visual Inspection for Agricultural Products	1
	Toshimasa IIJIMA, Shin' ya OKAZAKI, Reo FUJISAWA, Takafumi URAIKE, Shouichi KONDOU, Toshinori HONMA	
2	Research on Anomaly Detection Models for Egde AI	9
	Toshinori HONMA, Keiki ZEN	
3	Research on Explainable AI in Image Recognition	17
	Keiki ZEN, Shouichi KONDOU, Toshinori HONMA	
4	Development of Non-Destructive Discrimination Technology for Bolting Carrots	23
	Keita KAWASHIMA, Hisashi IGAWA, Saori MIYAJIMA, Michihiro YOSHIDA, Yohsuke NAKANISHI, Akira TANAKA	
5	Development of Stem Cutting Shears to Reduce the Labor of Squash Harvesting	29
	Takafumi URAIKE, Soki ITO, Iwao IZUMI, Daisuke MAEDA, Koichi IMAOKA, Yohsuke NAKANISHI, Masahiro MORI, Ryuichi HAMAGUCHI	
6	Development of a Contact-Driven High-Speed Passive Gripper.....	35
	Hisashi IGAWA, Keita KAWASHIMA, Toshihiro NISHIMURA, Tetsuyou WATANABE	
7	Study on UX Prototyping for Human-Centered Design	41
	Tomohito TAKAGI, Akira MANJOME, Seiki YASUDA, Kyoko OHKUBO, Kofuyu INNAMI	
8	Analysis for the Microstructure of Heat-Affected Zone at Tool-Steel for Die Treated by Laser Heat-Treatment ...	51
	Yohei SAKURABA, Ryota KAWAKAMI, Yasuki MIYAKOSHI, Hidenori TAKAHASHI, Naofumi OHTSU	

Research Note

1	Development of an AR Marker-Based Autonomous Following Cart	59
	Shunsuke SANO	
2	Cooking State Recognition Using Integrated Multiple Sensors	63
	Saori MIYAJIMA, Hisashi IGAWA	
3	Development of Compound Feed with Good Shape Retention in Water for Sea Urchin Farming	69
	Shuichiro SENO, Masaaki HOSOKAWA, Hiroshi KANI, Takuma KAWASAKI, Hideo TAKAHARA, Hiroki FUKUDA, Takeshi SHIMIZU	
4	Development of Slow-Release Fertilizers Coated with Inorganic Materials	73
	Tatsuhiro SHIGYO, Takeshi MORI, Yuta OGAWA, Keiichiro MATSUSHIMA	
5	Fabrication of MnFeCoNiCu High-Entropy Alloy by Spark Plasma Sintering Method	77
	Yoshio NAKAJIMA, Yasuki MIYAKOSHI, Kiyoshi IINO	

一 般 論 文

Regular Paper

農産物を対象とした目視品質検査の自動化技術の開発

飯島 俊匡、岡崎 伸哉、藤澤 怜央、浦池 隆文、近藤 正一、本間 稔規

Development of Automated Visual Inspection for Agricultural Products

Toshimasa IIJIMA, Shin'ya OKAZAKI, Reo FUJISAWA,
Takafumi URAIKE, Shouichi KONDOU, Toshinori HONMA

抄 録

食品製造業は北海道の製造業の約4割を担う基幹産業だが、その原材料は大きさや形が一律ではない農産物などであることから、受入検査の多くは作業員の目視と手作業に依存している。そのため食品製造工場は労働集約的な作業形態であることが多く、近年の働き手不足の影響を大きく受けており、生産性の向上が望まれている。

そこで本研究では、AIを用いて農産物を対象とした自動品質検査手法を開発して目視検査工程を自動化することで受入検査工程の省人化に取り組んだ。さらに、生産管理情報を自動モニタリングする装置を開発し、IoTを用いて生産管理情報を共有化することで、食品製造工場の省力化に取り組んだので報告する。

キーワード：農産物、AI、外観検査

Abstract

The food manufacturing industry is a key industry, accounting for approximately 40% of Hokkaido's manufacturing industry. However, because its raw materials are agricultural products that vary in size and shape, most incoming inspections rely on visual and manual inspection by workers. Therefore, food manufacturing plants are often labor-intensive forms of work and have been greatly affected by the recent worker shortage, making it desirable to improve productivity.

In this study, we developed an AI-based automated quality inspection method for agricultural products, aiming to streamline the visual inspection process and reduce labor requirements during the incoming inspection stage. Furthermore, we developed a device capable of automatically monitoring production management data, and implemented an IoT-based system to facilitate information sharing. These initiatives contribute to labor-saving and operational efficiency improvement in food manufacturing facilities.

KEY-WORDS : Agricultural products, AI, Visual Inspection

1. はじめに

日本の食料品製造業は、国内製造業全体の約1割を占めており、国民の食生活を支える重要な役割を果たしている。特に北海道における食料品製造業の出荷額は、製造業全体の出荷額の35.9%となる2,385兆円を占めている（図1）。さらに、食料品製造業における従業者は、製造業全体の従業者の44.6%となる7.3万人となっている。どちらも全国平均の4倍以上となっており食料品製造業は北海道にとって重要な産業となっている。しかし、北海道の食料品製造業は労働生産性が低く、製造業平均の7割程度であることが課題となっている。その理由の一つとして、北海道の食料品製造業では農水産物を原材料とする一次加工品の割合が高いため、労働集約的な作業形態であることが挙げられる。

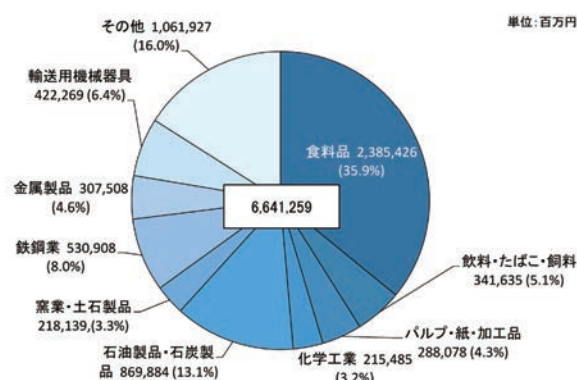


図1 北海道の製造業における出荷額¹⁾

食料品製造業における人員の分布を生産工程別に見ると、「食品製造・加工」「包装・充填」「原料処理」の順に人員が多くなっている（図2）。そのため、それらの工程は機械化やロボット化のニーズが高く導入比率も高い。しかし、「原料処理」は労働力が必要な工程にも関わらず機械化導入率が相対的に低くなっている。その理由の一つとして、「原料処理」における受入検査においては、依然として作業員による目視検査に大きく依存していることが挙げられる。一次加工品の原材料である農水産物は工業製品とは異なり大きさや形状、品質のバラツキが大きいため自動化の難易度を上げており、省力化の妨げとなっている。人手不足が深刻化する中、

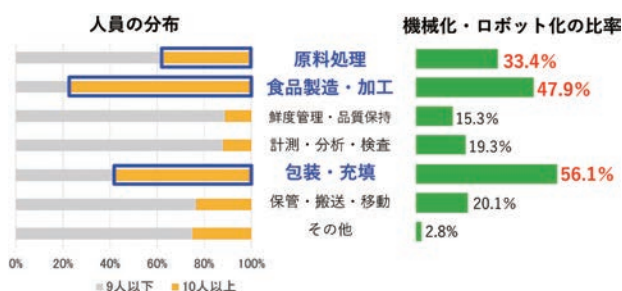


図2 生産工程別の人員分布および機械化導入率²⁾

検査工程の自動化は喫緊の課題となっている。

また、食品の安全性確保に向けた制度としてHACCP（Hazard Analysis and Critical Control Point）の義務化が進められ、食品トレーサビリティに対する社会的要求も高まっている。これに伴い、製造現場では、生産管理情報の自動取得および可視化・共有化を可能とするIoT対応型の装置導入が求められている。帳票に手書きで数値などを書き込む従来のアナログな管理手法では、迅速かつ確かな対応が困難であり、品質管理の精度や効率を高める新たな技術の導入が不可欠となっている。

このような背景から当場では、これまでに食品原材料の外観検査のための多視点画像解析技術³⁾やAI食品検査システム⁴⁾、食品製造業のスマートファクトリー化に向けた自動計測技術⁵⁾の開発に取り組んできた。本研究では、それらの知見を活用して国が掲げる「食品製造業における労働生産性の3割向上」を実現するための技術開発を行った。具体的には、ブロッコリー、馬鈴しょ、てん菜を対象としてAIを用いた画像認識技術を活用した自動品質検査手法を開発し、受入検査工程における人員の3割削減を目指した。そしてブロッコリーと馬鈴しょについては、食品加工工場において開発した自動品質検査手法の実証試験を行うことで、生産性向上について評価した。また、てん菜については、生産管理情報をリアルタイムで自動取得・共有化するIoT対応型のモニタリング装置を開発することで、生産管理工数の3割削減を図った。

2. ブロッコリー

2.1 ブロッコリーの自動品質検査手法の開発

ブロッコリーは近年、消費量および作付面積が増加傾向にあり、2026年度からは国が定めている指定野菜に追加されることが決定している農作物である。都道府県別のブロッコリーの生産量第1位は北海道であり、2023年度の生産量は2.7万トンで全国の生産量全体の15.5%を占めており、北海道では主として夏季にブロッコリーが栽培されている。ブロッコリーの可食部はドーム状のつぼみと茎であり、ドーム状のつぼみは「花蕾（からい）」と呼ばれる。ブロッコリーの加工



図3 ブロッコリー選果場

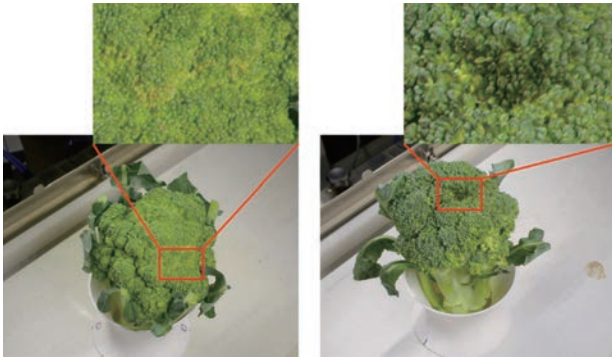


図4 花蕾表面の異常（左：黄変、右：腐敗）

工程では、生食用・加工用ともに、花蕾の大きさと品質によって等級分けが行われる。生食用ブロッコリーは、茎や枝などの不要部分をカットした上で箱詰めされて出荷されている。現在、これらの作業はすべて人の手によって行われている（図3）。

ブロッコリーの等級区分の基準は、加工事業者ごとに異なるが、大きさは花蕾の直径にもとづき、3～5段階に区分されることが多い。品質については、規格外品を含めて3～4段階に分類されるのが一般的である。規格外品と判断されるものは、黄変や腐敗（図4）、病変、キズなど、おもに花蕾表面に異常がある。これらの異常のうち、腐敗などの異常は花蕾の内部や茎の部分に発生する場合もあるが、その割合は比較的低い。そこで、開発する自動品質検査手法では、ブロッコリーを花蕾の上方から撮影し、花蕾表面を画像解析することで花蕾の大きさと品質を判定することとした。具体的には、深層学習を用いた画像の領域分割手法であるMask R-CNN⁶⁾を用いた。あらかじめ用意した512枚のブロッコリー画像から花蕾領域を学習させ、画像から抽出した花蕾領域の最小外接円の直径を求めて大きさを区分した。品質判定については、画像分類AIモデルの一つであるResNeXt⁷⁾を用いて行った。今回協力いただいたブロッコリー加工事業者では、品質を秀・優・規格外の3つに分類（図5）していたことから、各等級のブロッコリーを撮影して品質判定の学習モデルを作成した（図6）。

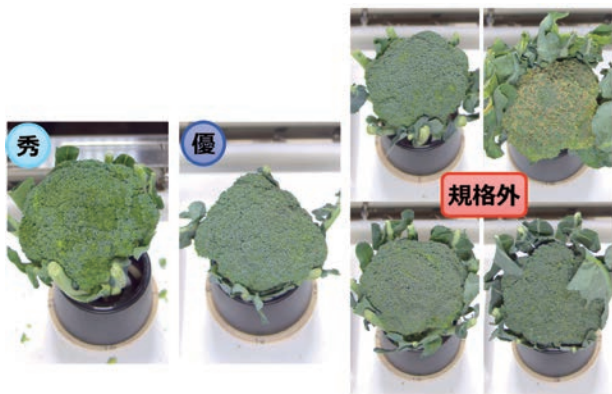


図5 ブロッコリーの品質分類



図6 ブロッコリーの撮像試験

AIを用いて花蕾を自動抽出した例を図7に示す。葉を除く花蕾領域のみを正しく抽出していることがわかる。抽出した花蕾領域を用いてブロッコリーの大きさをM・L・2Lサイズの3区分で評価した結果、Mサイズの正答率は87.5%、Lサイズは80.0%、2Lサイズは87.5%の結果となった（n=60）。また、自動品質判定の結果、秀の正答率は95.4%、優は55.7%、規格外は83.3%となった（n=301）。これらの正答率は別のデータセットについても同様の傾向であった。自動品質判定の結果は、優の正答率が突出して低くなっており、人が優と判断したものをAIが秀と誤判定したために正答率が下がっていた（表1）。AIが秀と誤判定した優のブロッコリーを確認したところ、いずれも秀と判定して問題ない品質であった。このことから、誤判定の原因はAIのみにあるのではなく、人の判定基準のバラツキが原因であることがわかった。また、AIは秀・優のブロッコリーを規格外と誤判定することはなかったが、規格外のブロッコリーを秀または優と誤判定する場合があった。これは腐敗などの異常が花蕾内部や茎にあるブロッコリーであった。花蕾表面を撮影した画像を用いて品質判定する本手法は内部異常を検出できない。そのため内部異常を検出するためには別の計測手法を用いる必要がある。

なお、今回協力いただいた加工事業者においては、内部異

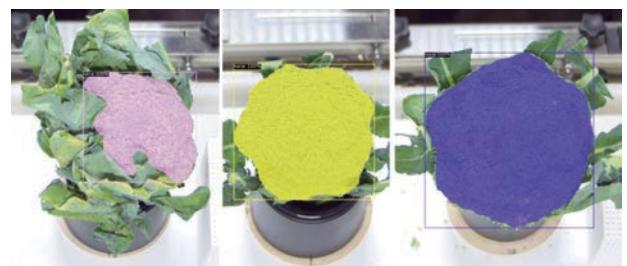


図7 ブロッコリーの花蕾抽出

表1 ブロッコリーの自動品質判定結果

		人の判断		
AIの判断	等級	秀	優	規格外
	秀	83	31	7
	優	4	39	17
	規格外	0	0	120

良品を規格外と間違える事は無い

優の判断が作業員ごとに異なる

異常が表面に無い場合に見落とす
(内部に腐敗があるなど)

常は人が判定することや現状の正答率は許容されとの判断もあり、開発した自動品質検査手法は実用上問題ないことを確認したが、引き続き正答率の向上を目指す。

2.2 ブロッコリーの自動品質検査手法の実証試験

前節で開発したブロッコリーの自動品質検査手法を搭載したブロッコリー自動品質検査装置を試作した（図8）。コンベアー上に外側に向かって転倒可能なブロッコリーを保持するカップを複数配置し、コンベアーは毎秒0.5個のブロッコリーが撮影可能な搬送速度とした。茎を差し込む形でブロッコリーをカップへ載せ、自動品質検査の結果に従って等級ごとの排出エリアでカップを外側へ転倒させることでブロッコリーを選別する機構となっている。協力いただいたブロッコリー加工事業者の工場で試作機の実証試験を行った結果、自動品質検査装置の処理速度は箱詰め作業に対して十分早く、1台の検査装置で複数の検査ラインに対応可能であることを確認した。

ブロッコリー加工工程では、品質検査と茎葉などの不要部除去作業を一人の作業員が行っているため、その省人化のためには品質検査に加えて不要部の除去作業も併せて自動化す



図8 ブロッコリー自動品質検査装置の試作機



図9 開発中のブロッコリー自動検査茎葉除去装置

る必要がある。そこで現在民間企業と共同でブロッコリーの自動品質検査機能を持つ茎葉除去装置の開発を進めている（図9）。本装置を用いることで、現状6名の熟練作業員が行っているブロッコリーの品質検査および不要部除去作業について、初心者の作業員2名で置き換えることを見込んでいる。すなわち60%の人員削減が可能であり、かつ初心者でも作業へ従事することが可能となることから、ブロッコリー加工事業者の生産性向上および人材確保の安定化が期待される。

3. 馬鈴しょ

3.1 馬鈴しょの自動品質検査手法の開発

馬鈴しょは北海道の生産量が国内生産の約8割を占めている本道を代表する農作物のひとつであり、年間生産量は190万t前後となっている。道内各地域で生産されており、生産量の約3割は生食用として出荷されている。生食用馬鈴しょは選果場において全数目視で選別作業を行っており、多くの人手を要している。今回協力いただいた馬鈴しょ選果場には選果ラインが3つあり、一次選別工程には2名、二次選別工程（図10）には6名の作業員が従事するなど、選別工程の作業員数が最も多くなっている。近年、労働者の高齢化や人手不足から熟練作業員を雇用することが困難になってきており、その省人化が喫緊の課題となっている。

馬鈴しょの選別工程では、ローラーコンベアー上を馬鈴しょが回転しながら毎秒0.1m程度の速度で搬送されており、作業員が目視で欠陥のある馬鈴しょを抜き取っている。そこで、選果ラインの直上にカメラを設置して馬鈴しょ画像を撮影し、画像解析することで自動品質検査を行うこととした（図11）。まず、画像から個々の馬鈴しょを抽出するため、ブロッコリーの花蕾検出と同様にMask R-CNNを用いて馬鈴しょ領域を学習させて個体抽出を行った（図12）。一枚の画像から馬鈴しょを抽出したときの正答率は約98%であったが、画像は毎秒3枚の速度で連続撮影しており、前後の画像を用いることで全ての馬鈴しょを抽出可能であった。

次に、欠陥のある馬鈴しょを検出するため抽出画像を拡大



図10 馬鈴しょ選果場の品質選別ライン



図11 馬鈴しょの撮像と規格外品の抽出

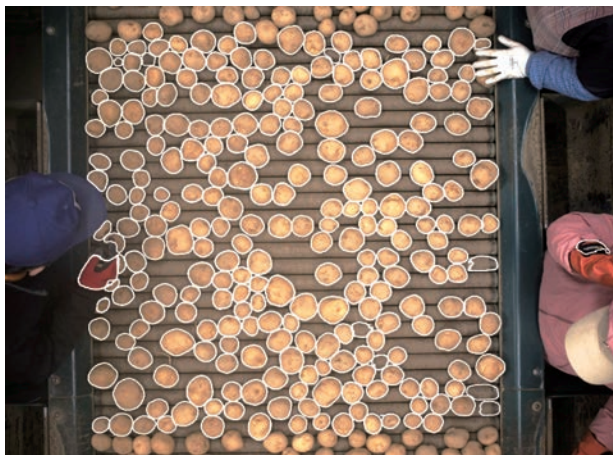


図12 AIを用いた馬鈴しょ抽出

し、Mask R-CNNを用いて画像分類を行った。欠陥のある馬鈴しょをAIに学習させるため、選果ラインの直上に設置したカメラで撮像した馬鈴しょ画像と、熟練作業員の不良品ピックアップ作業から欠陥のある馬鈴しょを確認した。そして、その確認時刻より前の時系列画像からその欠陥のある馬鈴しょを選択して学習させることで欠陥検出の学習モデルを作成した。馬鈴しょの欠陥は変色、病変、腐敗、裂開、キズ、変形など多岐にわたる（図13）。

協力いただいた馬鈴しょ選果場において、主力品種である男爵を対象として、開発した欠陥検出手法の精度検証を行った。学習データとして欠陥のある馬鈴しょ100個を用い、ロー

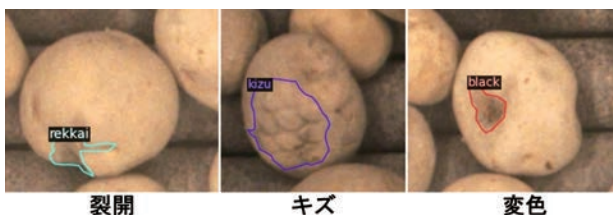


図13 馬鈴しょの欠陥例

ラーコンベアで回転して向きが異なるものを含めて244枚の画像から欠陥検出の学習モデルを作成した。検証データは欠陥のある馬鈴しょ84個を対象とし、学習データと同様に向きが異なるものを含めて313枚の画像とした。作成した学習モデルを用いて検証データの欠陥検出を行った結果、正答率は76.0%となった。自動検出した欠陥の例を図14に示す。開発した馬鈴しょの自動品質評価手法を選果場に導入するにあたり、この正答率の妥当性について引き続き検証が必要である。

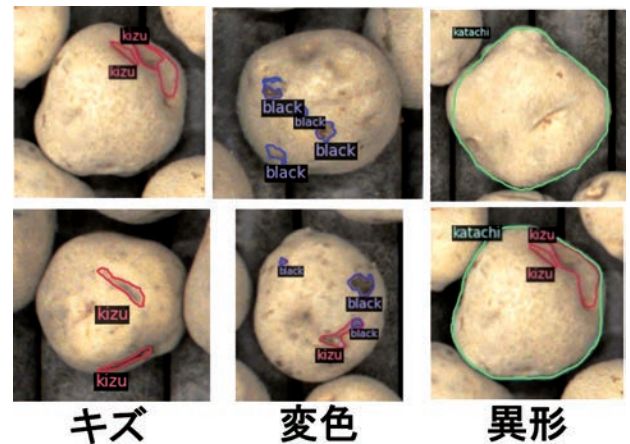


図14 馬鈴しょの欠陥検出結果

3.2 馬鈴しょの自動品質検査手法の実証試験

前節で開発した馬鈴しょの自動品質検査手法を搭載した欠陥馬鈴しょの自動指示装置を試作した（図15）。馬鈴しょ選果ラインの上方に設置したカメラの横にプロジェクターを設置し、自動品質検査手法で検出した欠陥のある馬鈴しょをプロジェクションマッピングで光を照射してその位置を作業員へ指示する仕組みである。協力いただいた馬鈴しょ選果場においてその視認性を確認した結果、プロジェクションマッピングにより欠陥のある馬鈴しょを選択して指示可能であることを確認した（図15右）。なお、今回の実証試験においては操業中にプロジェクターを稼働できなかったため、プロジェクションマッピングによる欠陥指示の有効性などについて十分な検証は出来なかったが、引き続き実証試験に取り組む予定である。

図16は欠陥馬鈴しょの検出例で、丸いマークが付いた馬鈴しょが自動品質検査により欠陥馬鈴しょとされたものである。そして、選果場担当者に実証試験の結果を提示してヒアリングしたところ、現状の二次選果の作業員を6名から4名に削減可能である見通しを得られた。また、開発した自動品質検査手法を馬鈴しょ選果ラインに適用することにより、ベテラン作業員でなくても選果作業に従事可能となることから、馬鈴しょ選果場の生産性向上および人材確保の安定性が期待される。

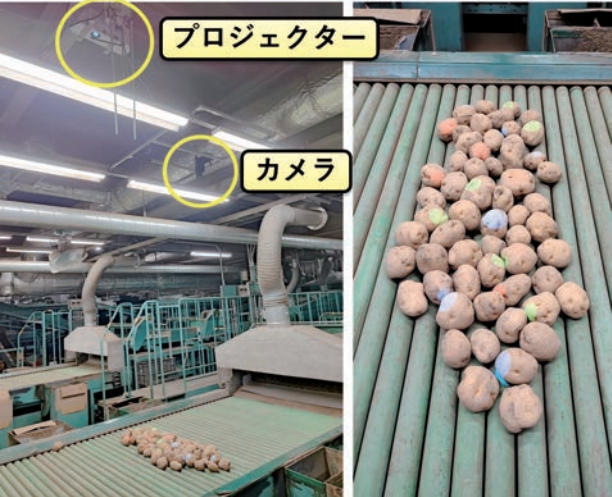


図15 欠陥馬鈴しょの自動指示装置

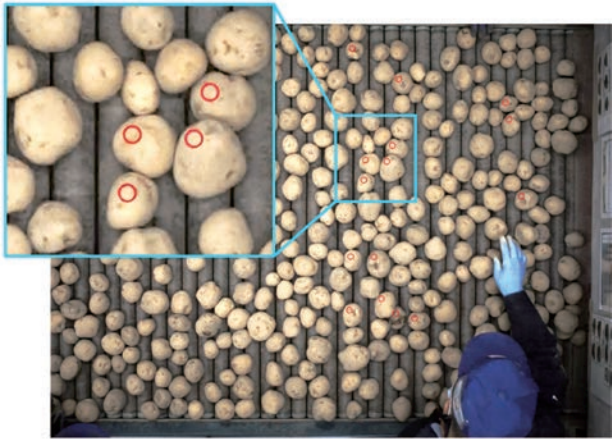


図16 欠陥馬鈴しょの検出例

4. てん菜

4.1 てん菜の自動品質検査手法の開発

製糖工場では原料となるてん菜を生産者から引き取る際、生産者立ち会いのもとで受渡査定を行っている（図17）。受渡査定では夾雑物（土塊、石、腐敗したてん菜など）の混入重量、タップ率（製糖に適さない茎葉冠部の割合）、てん菜に付着した土砂の割合を全数目視で確認し、取引対象外となる部分（図18）の重量を推定しているが、目視確認作業には熟練技術が必要である。加えて、立ち会う生産者の負担も大きいことから、当场では令和元年から製糖工場における受渡査定および立ち会い業務の省力化に関する技術開発に取り組んできた。

これまでに開発したてん菜取引対象外重量の推定技術では、屋内の査定場で撮影したてん菜を対象として一定の検出精度が得られている（表2）。しかし、製糖工場の受渡査定場所は屋外に設置されていることが多いため、時間帯や天候などの影響により撮像環境は明るさの変化が大きくなる。特に強い日差しにより画像の一部に白飛びが生じ、てん菜の輪

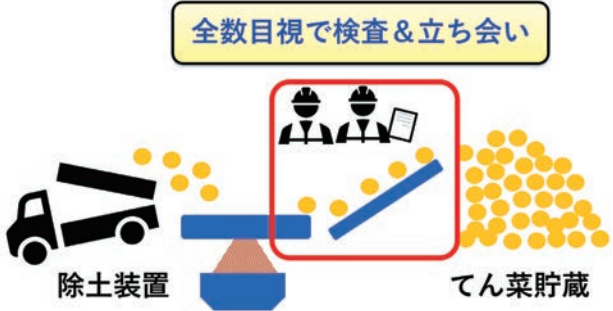


図17 てん菜受渡査定における検査と立ち会い



図18 てん菜の取引対象外部分

郭抽出が困難となる場合がある（図19）。そこで屋外環境での撮影においては、カメラのシャッタースピードなどを自動調整することで明るさの補正を行った。その結果、てん菜抽出の正答率は93.5%となった。てん菜の輪郭形状から推定するタップ率は、てん菜を搬入する運搬トラック一台分の平均値が推定できればよい。そのため、てん菜抽出の正答率が90%以上であれば実用上問題はないと考える。

4.2 てん菜受渡モニタリング装置の開発

てん菜の受渡査定では生産者がすべての受渡ラインに立ち会う必要がある上、製糖工場内の各受渡査定場所も離れた距離に散在している。そのため、立ち会い業務を担う生産者の

表2 てん菜取引対象外重量の推定

査定項目	冠部	検出精度
タップ率 糖分含有量が少ない冠部の重量割合		形状による判定 誤差：±1ポイント以内
付着土砂率 表面に付着した土砂の重量割合		EfficientNetによる判別 付着土砂有無の判別率：81%
石重量 混入した石の総重量		Mask R-CNNによる検出 検出率：58%
腐敗根重量 腐敗したてん菜の総重量		ResNetによる判別 判別率：81.4%

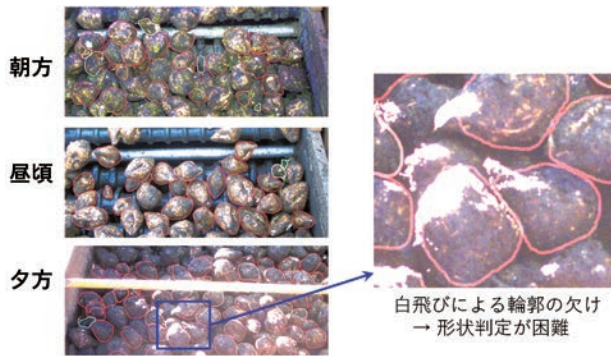


図19 屋外受渡査定における撮影画像

負担は大きい。加えて、道内各地のてん菜作付けは場から遠距離にある製糖工場まで移動する必要があることから拘束時間も長い(図20)。そこで、前節で開発したてん菜の取引対象外部分の重量推定手法による推定結果と、運搬トラックの識別番号、受渡査定時のてん菜画像などの生産管理情報を自動取得し、遠隔地からリアルタイムでそれらを確認可能なてん菜受渡モニタリング装置を開発した(図21)。

てん菜を搬入する運搬トラックには固有の識別番号が与えられており、受渡査定の際は荷台後方に掲示された識別番号プレートを目視で確認して生産管理台帳に記入している。そこでトラックの識別番号を自動取得するため、荷台のプレートが撮影可能な位置にカメラを設置した(図21左上)。そして画像データに写る文字列部分を認識するAI-OCR(AI Optical Character Recognition)を用いることで、撮影したプレート画像からトラックの識別番号を取得した。

また、モニタリング用カメラ(図21右上)を設置して受渡査定時のてん菜画像を取得し、遠隔地でリアルタイムに映像

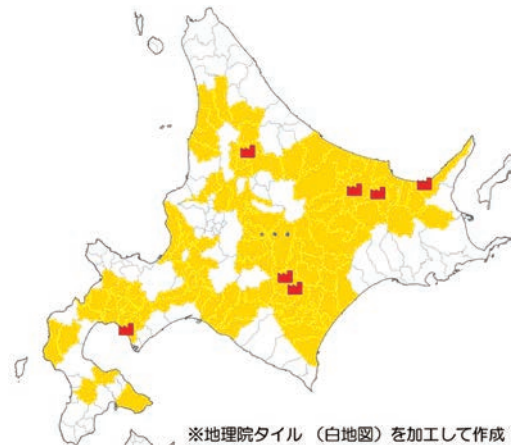


図20 てん菜作付市町村(黄色)と製糖工場(赤)

が確認できるよう、動画の画質を維持しつつデータ量を圧縮可能なHEVC(High Efficiency Video Coding/別名H.265)を用いてデータ化した。

さらに、重量推定用カメラ(図21中上)を用いててん菜の推定タップ率などから取引対象外重量を推定し、トラックの識別番号などをまとめて生産管理情報として取得する。そして生産管理情報を携帯電話網を介してクラウドサーバーへアップロードするソフトウェアをモニタリング装置に実装した。動作試験の結果、てん菜受渡モニタリング装置が接続するクラウドサーバーにWebブラウザを用いてアクセスすることで、てん菜の受渡査定時の生産管理情報をリアルタイムに確認可能となった(図22)。

複数のてん菜生産者団体の受渡査定において開発したモニタリング装置のデモンストレーションを行い、立ち会い業務における実用性についてヒアリングした結果、良好な評価が



図21 てん菜受渡モニタリング装置

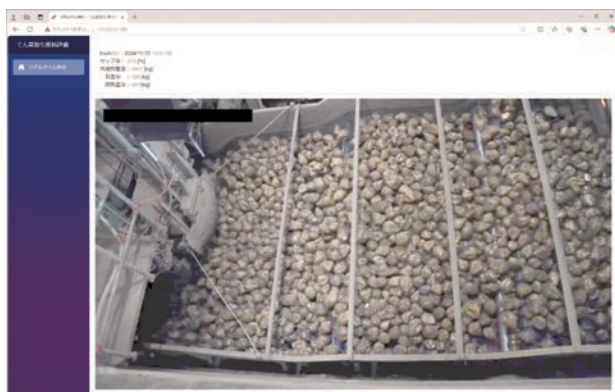


図22 Webブラウザによる生産管理情報のリアルタイム取得

得られた。さらに本装置を利用することで、一人で複数の受渡査定ラインの立ち会い業務に対応可能であることを確認した。また、開発した装置を製糖工場に設置して長期運用した結果、商用電源を用いて稼働させた場合では2ヶ月間の安定稼働を確認した。しかし、産業用発電機を用いて稼働させた場合はモニタリング中のでん菜動画にノイズが生じるなど、長期間の安定稼働に課題が残された。

以上のことから、てん菜生産者が遠隔地の製糖工場で行う受渡査定の立ち会い業務について、生産者が最寄りの農協事務所などでモニタリング画面と生産管理情報を確認しながら実施することが可能となった。図20の各市町村の代表地点から最寄りの製糖工場までの移動時間は平均して約70分かかるが、てん菜生産者から最寄りの農協事務所までは30分以内で移動可能であることから、各市町村の生産者数から試算した結果、製糖工場まで移動する現状と比べて移動時間を44%削減可能であることがわかった。

なお、本モニタリング装置を活用することで複数の受渡査定ラインへの同時立ち会いが可能となる。このことを考慮すると生産管理工数の50%以上削減が期待できる。

5. おわりに

本研究では、農産物を対象とした自動品質検査手法を開発し、ブロッコリーの大きさおよび品質の自動判定、欠陥のある馬鈴しょの自動検出、てん菜の受渡査定における生産管理情報の自動取得を行う装置を開発した。さらに、それぞれの農作物について実証試験を行った結果、てん菜については、受渡査定における立ち会い業務に開発したモニタリング装置を導入することで、生産者の移動時間を44%削減し、複数ラインで同時に立ち会い業務が可能となるなど、生産管理にかかる工数削減の見通しを得た。ブロッコリーについては、開発した自動品質検査手法を茎葉除去装置に組み込むことで60%の人員削減が可能となり、また、馬鈴しょについては、選果工程1ラインあたり33%の人員削減が可能となる見通し

を得た。なお、ブロッコリーおよび馬鈴しょの品質検査工程に開発した手法を導入することで熟練作業員ではなくても作業に従事可能となることから、食品加工現場における安定した人材確保が期待できる。

今後は、本研究で残された課題を解決するとともに、各農作物で開発した自動品質検査手法の性能向上を図り、民間企業との共同研究などを通じて実用化を進めていく。

引用文献

- 1) 北海道,「令和3年経済センサス-活動調査 産業横断的集計結果(確報)」, 令和5年7月28日, https://www.pref.hokkaido.lg.jp/ss/tuk/003ecc/03ks-katsudou_kakuhou_mokuji.html
- 2) 経済産業省北海道経済産業局,「食料品製造業へのロボット導入の促進に関する調査報告書」, 平成30年4月17日, <https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12232105/www.hkd.meti.go.jp/hokis/20180417/index.htm>
- 3) 飯島俊匡・岡崎伸哉 他, 北海道立総合研究機構工業試験場報告 No.320, pp.103-106, (2021)
- 4) 本間稔規・岡崎伸哉 他, 北海道立総合研究機構工業試験場報告 No.321, pp.9-15, (2022)
- 5) 飯島俊匡・藤澤怜央 他, 北海道立総合研究機構工業試験場報告 No.322, pp.1-8, (2023)
- 6) Kaiming He, Georgia Gkioxari, et al., "Mask R-CNN", CV, (2017)
- 7) Saining Xie, Ross Girshick, et al., "Aggregated Residual Transformations for Deep Neural Networks", CV, (2017)

エッジAI向け異常検知モデルに関する研究

本間 稔規、全 慶樹

Research on Anomaly Detection Models for Edge AI

Toshinori HONMA, Keiki ZEN

抄 録

近年、生産者人口の減少から人手不足が深刻であり、製造業において省人化、自動化のニーズが高まっている。一次産業が基幹産業である北海道では、農水産物の原料受入検査や食品製造業における異物の目視検査など、人手のかかる作業の自動化が望まれている。このため、AIを組み込んだ検査機械の開発などが活発に行われている。これまではエッジデバイス（たとえば、Raspberry Piなどの小型の組込計算機）で収集したデータをサーバー側のAIで処理していたが、通信による遅延のためリアルタイム処理に向かないこと、エッジデバイスの数が増えるとネットワークの通信帯域が逼迫すること、インターネット経由でデータをクラウドに送信することがセキュリティ上のリスクになるなどの問題があった。最近ではエッジデバイスにAIを実装し装置に組み込むケースが増えてきているが、計算能力の関係から学習はクラウド上のサーバーなどで行い、構築した学習モデルをエッジデバイスに組み込んで推論用として用いている。このようなAIを現場で運用する場合に、最初に組み込んだ学習モデルのままでは取り扱うデータの傾向の変化やセンサの経年変化などに対応できず生じてしまう予測性能の劣化が問題となっている。

本研究では、予測性能が劣化する前に、エッジデバイス上で学習モデルを適宜更新する機能を実現することを目指して、少数の訓練データのみで学習で学習モデルを構築する手法である、スパースモデリングやリザーバコンピューティングを用いた異常検知技術の開発を行った。画像や分光データ、音声などの少量のデータを対象として異常検知モデルを構築し、評価を行ったところ、少量の訓練データで十分な性能が得られることがわかった。

キーワード：異常検知、エッジデバイス、スパースモデリング、リザーバコンピューティング

Abstract

A shortage of workforce due to decreasing working age population have been getting severe in recent years, therefore, a lot of demands for labor-saving systems or autonomous systems are growing. Especially in Hokkaido, where major primary industry consisted of agriculture and fisheries, autonomous inspection systems for detecting foreign matter or deteriorations among agricultural crops or fishes in sorting facilities or food factories are strongly desired. Inspection machines have been evolved to have high performance in inspecting products, because of cutting edge deep learning implemented in those devices. Early AI systems implemented in edge devices require communication with cloud server to get prediction results, this procedure results in decreasing real-time performance because of network latency, also in short bandwidth on a network because a substantial number of edge devices all at once connect to network. In these days, AI estimation models build on cloud server have been implemented in edge devices such as Raspberry Pi. The performance of prediction with first implemented AI model is tend to gradually decline along with time passing, because of data drift or sensor deterioration over time. To maintain performance, updating AI model only in the edge device is getting most important to prevent network congestion.

In this research, we utilize anomaly detection techniques with sparse modeling for image data, and also with reservoir computing for time series data, and examined the performance in the condition of a small numbers of training data. We developed and tested several anomaly detection models, and ultimately achieved satisfactory performance.

KEY-WORDS : Anomaly detection, Edge device, Sparse modeling, Reservoir computing

1. はじめに

近年、生産者人口の減少から人手不足が深刻であり、製造業において省人化、自動化のニーズが高まっている。一次産業が基幹産業である北海道では農水産物の原料受入検査や食品製造業における異物の目視検査など、人手がかかる作業の自動化が望まれている。一方、深層学習などによりAIの性能が飛躍的に高まったことを受けて、AIを組み込んだIoT機器の開発が活発に行われている（図1）。最近ではエッジデバイス（たとえば、Raspberry Piなどの小型の組込計算機）にAIを実装し使われるケースが増えてきているが、計算機的能力が限られているため膨大な計算量を必要とする学習用途ではなく、主として推論用として用いられている。このようなAIを現場で運用する場合、エッジデバイス上では学習モデルを更新することが困難なことから、取り扱うデータの傾向の変化やセンサの経年変化などが原因で生じる予測性能の劣化が問題となる。これを防ぐためには、予測性能が劣化する前にエッジデバイス上で学習を行い学習モデルを適宜更新することが重要である。

本研究では、エッジデバイス上で学習・推論の機能を実現することを目指して、少数の訓練データのための学習で十分な予測性能を実現可能なスパースモデリングやリザーブコンピューティングによる異常検知技術に関して開発を行った。

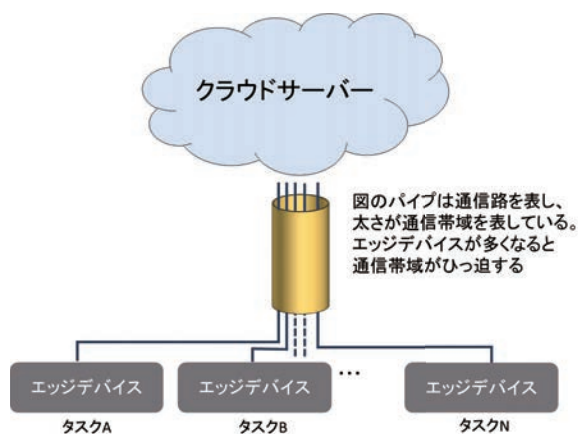


図1 エッジデバイスとクラウドサーバーのネットワークのイメージ

2. エッジデバイスへのAIの実装

2.1 エッジデバイスでのAI機能の実現方法

エッジデバイスにおいてディープラーニング等のAI機能を実現する方法の一つは、クラウドサーバーでAI機能を実行し、エッジデバイスはセンシングのみを行うというものである（図2）。初期のディープラーニングは学習モデルが大きいため、当時のエッジデバイスに実装できないことが多かった。そこで、エッジデバイスではデータの送受信だけ

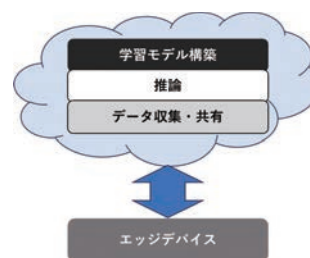


図2 クラウドサーバーで学習モデル構築と推論を実行する場合

を行い、AI推論はサーバーで実行する形態がよく使われた。この場合は通信時の遅延が発生するため、リアルタイム処理が困難であった。最近ではディープラーニングの研究が進み、モデル圧縮など軽量化技術が進展したことやエッジデバイスの性能向上により、エッジデバイスにAIモデルを組み込んで推論機能を実行することが可能となってきた（図3）。すなわち、エッジデバイスでデータをセンシングし、内蔵するAIで推論を行い、その結果にもとづいて制御を行うことができるようになった。この場合、AI処理の実行時にサーバーとの通信は発生しないためリアルタイム処理が可能である。

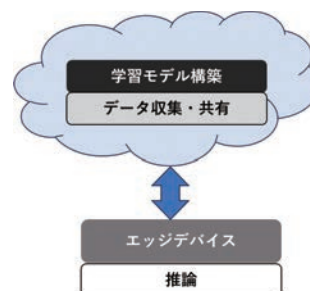


図3 学習モデル構築はクラウドサーバーで行い、推論はエッジデバイスで行う場合

2.2 AIモデルの劣化への対応

ディープラーニングによるAIモデルの学習では、まず訓練データを収集しモデルを構築することから始める。ディープラーニングではニューラルネットワークのパラメータ数が多いため、多くの訓練データが必要となる。すなわち、高い正解率と汎化性を実現するモデルを構築するには大量の訓練データを収集する必要がある。それらを学習して構築したモデルをエッジデバイスに実装して運用することになるが、データの季節変動や年次変動、またはエッジデバイスで使用しているセンサの経年劣化などが原因で機械学習モデルの性能が低下する可能性がある。たとえば、センサの劣化が原因で推論性能が低下した場合はセンサの交換を行うなどの対応も考えられるが、センサの特性にばらつきがある場合は同一型番のセンサでも再度キャリブレーションをし直す必要があったり、さらには機械学習モデル自体を構築し直す必要がある。ディープラーニングの機械学習モデルの構築は計算量

が多いため、GPUなどのアクセラレータを持たない、計算資源の限られたエッジデバイスでは対応が困難である。そのため、ネットワーク経由で訓練データをサーバーに送って機械学習モデルを再構築することになる。しかし、大量の訓練データの送信はネットワークの通信帯域を消費し、さらに、他の多数のエッジデバイスが学習モデルの構築を行うことは、たとえ高性能なサーバーでも負荷の高いタスクである。この問題を解決するには、エッジデバイス上で機械学習モデル構築が実行できるようにすればよい（図4）。具体的にはエッジデバイスの性能を上げる、もしくは計算量のかからないアルゴリズムを使うなどの方法が考えられる。エッジデバイスの性能を向上させる方法として、たとえばGPUを搭載したエッジデバイス（NVIDIA Jetson AGX Orinなど）を使うことが考えられるが、この製品は価格が30万円以上（2025年時点）であり、通常のPCよりも高価になってしまうため、コスト的な合理性は低くなる。

一方、計算量のかからないアルゴリズムとして近年注目されているのがスパースモデリングとリザバーコンピューティングである。スパースモデリングは画像データ等への適用事例が、またリザバーコンピューティングは時系列データへの適用事例が多い。これらのスパースモデリングおよびリザバーコンピューティングによる異常検知技術について次に説明する。

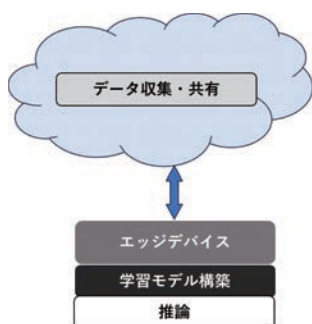


図4 学習モデルの構築、推論をエッジデバイスで行う場合

3. 異常検知手法

3.1 画像データに対する異常検知手法

機械学習を用いて、ある母集団に属するデータの異常を検知するには、その母集団での正常データを学習し、正常データを生成するような学習モデルを構築すればよい（すなわち、入力データと出力データが同じになるように学習モデルをトレーニングする）。この学習モデルに異常のあるデータを入力すると、異常部分は学習していないため、入力データと等しくなるような出力データの生成に失敗する。この生成に失敗した出力データと入力データの差を求めることによ

り異常を検知する。本研究では、少ない訓練データで異常検知を行うスパースモデリングの手法の有効性を確認するために、オートエンコーダ型のニューラルネットワークモデルであり異常検知が可能なVAE（Variational Auto Encoder）¹⁾、およびこれをベースとして中間層にスパースコーディング（スパース辞書学習）を組み込んだVSC（Variational Sparse Coding）²⁾を用い、性能を比較した。さらに、画像分類のニューラルネットワークモデルであるVGG16³⁾の中間層の出力を入力データとしてスパース辞書学習を行うMLF-SC（Multi-Layer Features to Sparse Coding）⁴⁾について訓練データ量と推論性能、異常検知性能などの評価を行った。

3.2 時系列データに対する異常検知手法

時系列データ用のネットワークモデルとしてリカレントニューラルネットワーク（Recurrent Neural Network、以下、RNN）がよく用いられる。このニューラルネットワークでは出力層の信号を入力層に接続することにより、時間的に過去の情報を反映したネットワークを構築することができる。リザバーコンピューティングは、このRNNをベースとした機械学習モデルである。リザバーコンピューティングでは中間層がランダムな固定の重みで結合された構造となっている。このようにランダムな結合重みでニューロン同士が結合された中間層はリザバー層と呼ばれ、過去の情報を含んだ高次特徴量を出力する。リザバー層では重みは固定であり学習する必要がなく、出力層のみ学習すればよいいため、通常のRNNに比べ格段に計算量が少なくなる。リザバーコンピューティングを用いた時系列データに対する異常検知手法も前述した画像データに対する異常検知手法と考え方は同じであり、目標信号と予測信号の差で評価する。具体的には、入力層に入力したデータについて、一定時間後の出力データを予測するように出力層の重み調整の学習を行う。予測したデータと実際の信号との差が小さければ正常、差が大きければ異常と判断する。本研究ではリザバーコンピューティングの実装としてEcho State Network（以下、ESN）⁵⁾を用いた。

4. VSCによるスパースモデリングの性能評価

VAE（図5）は、事前分布がガウス分布であるデータを対象として、データをその平均と標準偏差およびガウス分布で表現し、内部の潜在変数をランダムサンプリングするオートエンコーダである。VSCは中間層において潜在変数をサンプリングするための事前分布をVAEで用いているガウス分布からSpike & Slab分布（ガウス分布の中央部分の確率を高くした分布）に変更したものである（図6）。この変更によりデータ表現のパラメータを少なくすることが可能である。すなわち、少ないデータで機械学習モデルの構築が可能となる。

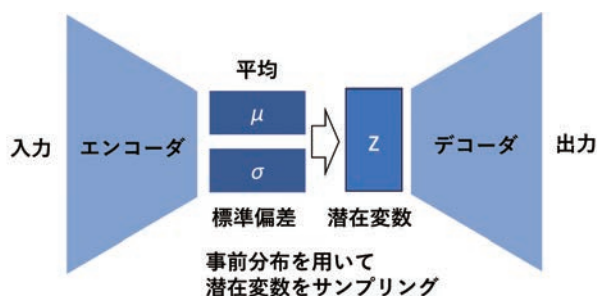


図5 VAEおよびVSCで用いるネットワーク構造

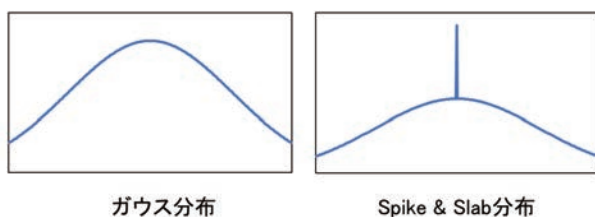


図6 VAEで用いるガウス分布（左）とVSCで用いるSpike & Slab分布（右）

4.1 MNIST手書き数字データセットを用いた性能評価

MNISTは米国のNIST（国立標準技術研究所）が整備している機械学習用のデータセット⁶⁾であり、ディープラーニングのネットワークモデルの性能評価に広く利用される。本研究では手書き数字データセット（訓練データ用：60000枚、テストデータ用：10000枚）の訓練データについて、ランダムに所定の数の画像を抽出し、データセットを作成してVAEとVSCに学習させ、訓練データのサイズとモデルの性能の関係を再構成誤差（ここでは平均二乗誤差、Mean Squared Error : MSE）により評価した。また、同じ条件においてVAEとVSCの学習における計算時間を比較し、リアルタイム処理への影響を評価した。さらに、計算資源が豊富なパーソナルコンピュータ（以下、PC）と計算資源の限られたエッジデバイスでVAE、VSCによる学習を行った場合の計算時間を比較した。

4.2 実験

VAE、VSCの各々のニューラルネットワークのハイパーパラメータ（入力層および出力層サイズ（=768）、中間層サイズ（=400）、バッチサイズ（=10）、エポック数）を同一とし、訓練データ数のみを変更して評価した。どちらもPythonで実装したコードをシングルスレッドで実行した。学習モデルを構築するにあたり、バッチサイズとエポック数を決める必要がある。訓練データ数の最小を50と設定したのでバッチサイズは訓練データ数よりも小さい10とした。エポック数については、事前の予備実験により再構成誤差の減少が収束する最小限の回数とし、ここでは1000に設定して評価を行った（図7、図8）。

訓練データ数を変更しながらVAEとVSCの再構成誤差の

変化を調べた（図9）。その結果、訓練データ数が少ない場合はVSCの方が高性能であることがわかった。訓練データ数を50としてVSC学習モデルを評価した場合のMNIST手書き数字の入力と出力を図10に示す。入力画像と出力画像の差が小さく、ほぼ同じ画像が生成できていることから、少ない訓練データで性能のよいAIモデルの構築ができることがわかった。

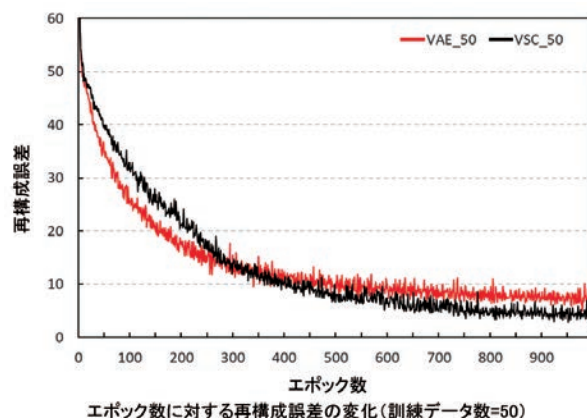


図7 エポック数と再構成誤差の関係（訓練データ数=50）

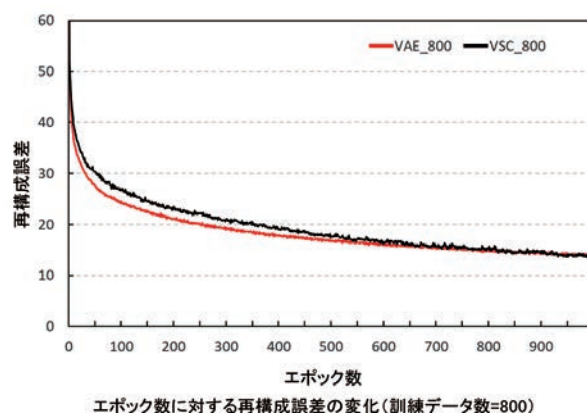


図8 エポック数と再構成誤差の関係（訓練データ数=800）

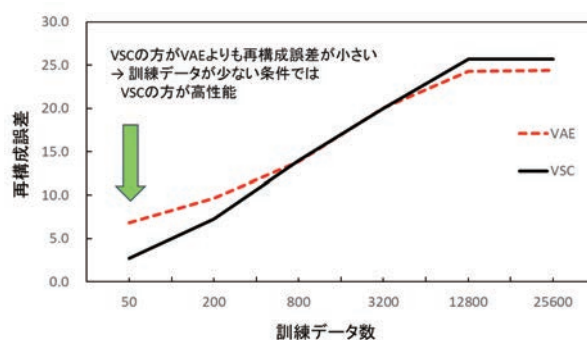


図9 訓練データ数と再構成誤差の関係（VAEとVSCを比較）

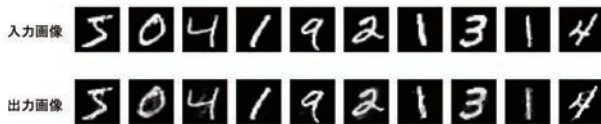


図10 手書き数字とVSC（訓練データ数=50）の学習モデルで推論した手書き数字の比較

4.3 計算時間

VSCとVAEでは、中間層の潜在変数を生成するときに用いる事前分布が異なる。事前分布による計算は学習モデル構築時や推論時で毎回行われるが、VAEで用いているガウス分布よりもVSCで用いているSpike & Slab分布の方が計算ステップが多いため、計算時間がかかると予想される。そこでPC（CPU：Intel Core i7 8700K）とRaspberry Pi 4B+（以下、RPi4）（CPU：ARM Cortex-A72）とを用いて、訓練データ数を変えながらVSCとVAEの計算時間を計測し、それらの比（VSC/VAE）を求めた。その結果、VSC/VAEの値はPC、RPi4のどちらの場合でも訓練データ数によらず1を超えていることから、VSCはVAEよりも計算時間がかかることがわかった（PCで約16%、RPi4で約8%程度）（図11）。VSC自体はVAEよりも10%ほど計算時間が多くなるデメリットがあるが、少ない訓練データで高性能な学習モデルを構築できることから全体的には処理時間の低減を実現できることがわかった。次に、1エポック数当たりの計算時間

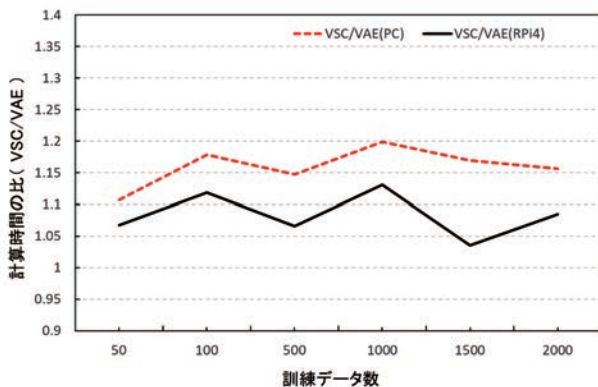


図11 VSCとVAEの計算時間の比較

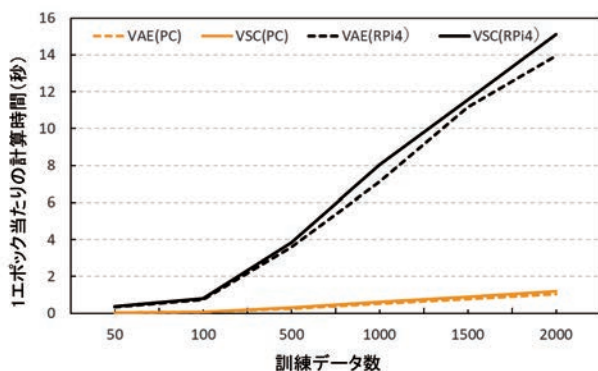


図12 PCとRaspberry Pi 4 B+の計算時間の比較

をPCとRPi4とで比較した（図12）。訓練データ数を50から2000まで変化させながら計測した結果、訓練データ数によらず、PCはRPi4よりも約13倍高速であることがわかった（計算時間については、たとえば訓練データ数=50の場合、PCが0.028秒に対し、RPi4は0.372秒）。また、推論時ではPCは1回の推論に要した計算時間は約0.0028秒、RPi4は0.02秒であった。この結果から、RPi4などのエッジデバイスの性能が向上してきているとはいえ、プロセッサやメモリの動作周波数の差から処理能力が大きく異なることがわかった。これから、エッジデバイスで学習を行う場合は計算量を削減するために、訓練データ数を減らすことは有効であると考えられる。

5. MLF-SCによる食品混入異物検出

次にスパースモデリングによる異常検知技術により、食品に付着する人毛の検出を試みた。具体的には、スパースモデリングによる異常検知実装の一つであるMLF-SC学習モデルを用い、分光画像データから豚挽肉に混入した異物（人毛）の検出能力について評価した。

5.1 MLF-SCの概要

MLF-SCはディープラーニングの画像分類モデルの一つであるVGG16をベースとし、VGG16の中間層で抽出された複数の特徴量を後段のスパースコーディング部の入力データとして学習を行う（図13）。この中間層に抽出される特徴量は入力画像そのものに含まれる特徴量と比較してノイズ等の不要な情報が減少している。この特徴量をスパースコーディングの辞書データとして学習に用いることで出力層での再構成誤差を最小にすることが期待できる。

MLF-SCを用いた異常検知技術においてもこれまでと同様に、正常なデータのみを訓練データとして使用する。出力画像の再構成誤差が大きくなる部分を異常として検出する。

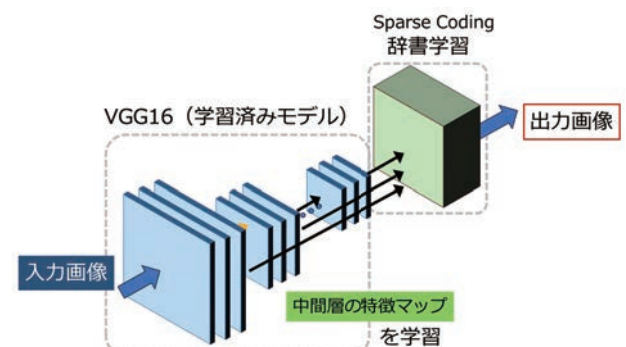


図13 MLF-SCのネットワークモデル

5.2 食品混入異物検出

MLF-SCの評価には、当场が開発した、任意の複数波長の分光画像を撮像可能な多眼式分光イメージングカメラ⁷⁾

(図14) で撮影した、表面に人毛を付着させた豚挽肉のデータを用いた。この多眼式分光イメージングカメラにより、617nm、697nm、796nm、900nmの4波長の分光画像を取得し、画素ごとの分光データを求めた。MLF-SCはVGG16をベースとしていることからRGB画像(3チャンネル画像)を入力データとする仕様となっている。そのため、本研究では4波長から3波長を抽出して学習モデルを作成し、最も異物検出性能が良くなる3波長(697nm、796nm、900nm)の組み合わせを選択した。次にこの異物検出用の学習モデル作成の具体的な手順を示す。まず分光画像の豚挽肉部分をブロック領域に分割し、人毛が含まれないブロックを「正常」として学習させて異物検出学習モデルを作成する。次に人毛が含まれるブロックをテストデータとして用いて性能を評価する(図15)。この手順にしたがい、50個の正常なデータを用いて学習を行った後、人毛を含むブロックを用いて検出性能の評価を行った。MLF-SCを用いて画素ごとに再構成誤差

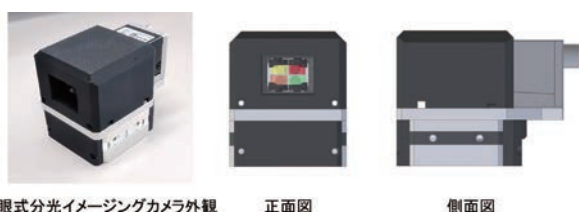


図14 多眼式分光イメージングカメラ

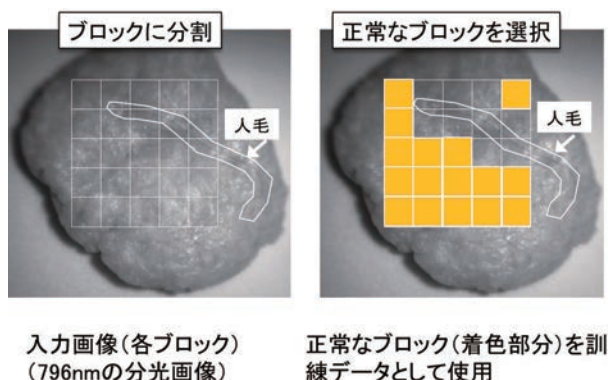


図15 豚挽肉の訓練データの設定
(異物を含まない、正常ブロックのみを用いて学習)

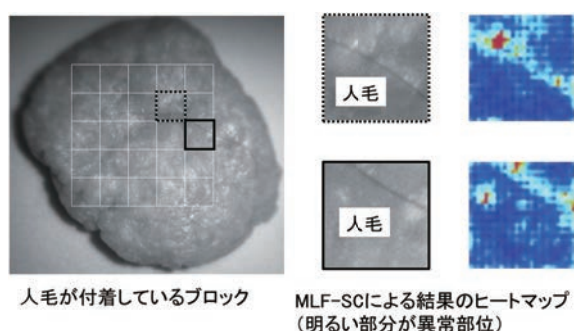


図16 MLF-SCによる豚挽肉の人毛の検出結果
(正常部分は暗く、異物部分は明るく表示)

を計算し、結果をヒートマップで表示した(図16)。異常がある部分は再構成誤差が大きくなる、すなわち、ヒートマップで明るく表示される部分の位置が人毛部分と一致することから、MLF-SCを用いることで異物検出が可能であることが確認できた。

6. リザーバーコンピューティングによる異常検知技術

リザーバーコンピューティングを用いて時系列データ向けの異常検知技術の開発を行った。3.2節で述べたように、正常音を正しく予測することができれば、正常音とは異なる異常を検知することが可能となることから、ここではリザーバーコンピューティングの実装の一つであるESNを用いて、工場の騒音を正常音としたときに正しく予測可能かを試みた。

6.1 ESNの概要

リザーバーコンピューティングには様々な実装が提案されているが、本研究では、図17に示すようなRNNをベースとしたESNを用いた。RNNは時系列データを扱えるように出力データを入力側のネットワークに戻す構造のニューラルネットワークモデルであり、音声認識や自然言語処理などへ応用されている。典型的なRNNでは中間層(隠れ層)が循環構造となっており、時間的に過去の情報を保持しながら現在の入力と組み合わせて学習を行うことで時系列データのパターンを学習することができる。リザーバーコンピューティングは中間層のニューロンの結合がランダム、かつ結合の重みが固定されているRNNである。出力層の重みのみを学習すればよい、計算量は少なくなり高速化を実現できる。

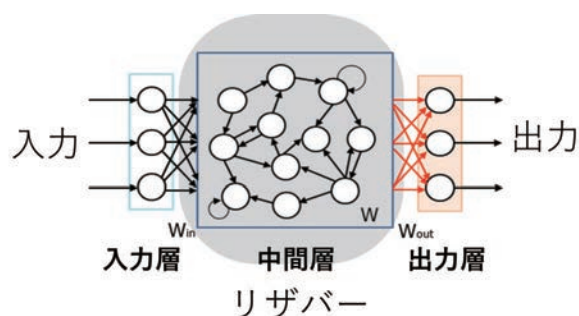


図17 ESNのネットワーク構造

6.2 ESNによる学習

多くの工場には、搬送や加工のための装置が多数設置されているが、外観から検知できない装置の異常はその動作音から検知されることが多く、長年の経験を積んだ熟練作業者が診断している。工場では複数の装置の動作音が重なり合い、工場内全体の騒音となっている。すべての装置が異常なく動作している時の騒音を予測するモデルを構築し、異常発生時

の騒音との差を評価することで異常を検知することができる。ここでは、ESNを用いて工場騒音を予測するモデルの構築を行った。具体的には、工場騒音を1次元の音響信号としてESNに入力し、出力層の重みはリッジ回帰を用いて学習を行った。

6.3 工場騒音の予測

工場内においてサンプリング周波数48kHzで録音した5000ステップ（データ長約104ミリ秒）の騒音データのうち、2500ステップ（データ長約52ミリ秒）のデータを使用して学習モデルを構築した。当該モデルを使用して2501ステップ～5000ステップのデータを予測したところ、音の強度に差はあるが周期のずれがない信号を予測することができた（図18）。この結果から、本学習モデルにより工場騒音を予測でき、工場騒音と異なる音（異常音）を判別可能であることを確認した。ただし、ネットワークの重みを調整するための学習期間において、背景音が不安定な非定常音である場合や、検出対象となる異常音の周波数やデータ長、背景音との強度差なども予測性能に大きく影響するため、ハイパーパラメータの調整や訓練データのデータ長などを十分調整する必要がある。

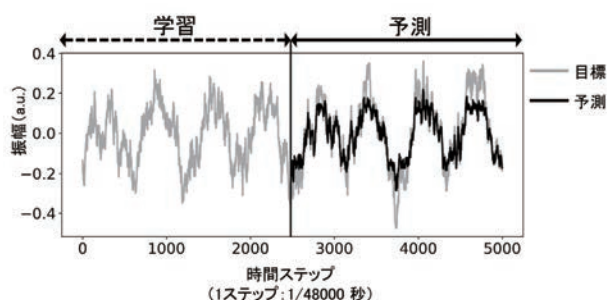


図18 リザーバーコンピューティングによる工場騒音の予測

7. おわりに

エッジデバイス上で学習・推論の機能を実現することを目指して、少数の訓練データのみの学習で十分な予測性能を実現可能なスパースモデリングやリザーバーコンピューティングによる異常検知技術の開発を行った。スパースモデリングではVSCおよびMLF-SCの2通りの手法についてPythonで

コードを実装し、MNIST手書き文字の認識や食品に混入する人毛などの異物の検出に適用して性能評価を行った結果、スパースモデリングを使用しない従来の方法に比較して少ない訓練データで学習モデルを構築でき、さらにその性能が向上することを明らかにした。また、リザーバーコンピューティングではESNをPythonでコードを実装し、50ミリ秒程度の訓練データで工場騒音の予測が可能であることを確認した。

今後、半導体の設計技術や製造技術がさらに発展し、最先端の計算機がクラウドサーバーに使われる一方で、工場で稼働するIoTシステムや自動車のADAS (Advanced Driver-Assistance Systems) などでは電力効率のよい小規模なエッジデバイスが使われ続けるものと考ええる。人手不足を解消するための自動化、省人化のためにAIを実装するニーズはますます増加していくことから、本研究で取り上げた小規模なエッジデバイスにAIを実装する技術はさらに重要になっていくものと考ええる。今後、改良を進め、当該技術の適用事例を広げるなど普及に向けた取り組みを進めていく。

参考文献

- 1) Diederik P. Kingma, Max Welling: *arXiv:1312.6114v1, Published as a conference paper at ICLR2014*
- 2) Francesco Tonolini, Bjørn Sand Jensen, et al.: *Proceedings of the 35th Uncertainty in Artificial Intelligence Conference, PMLR 115:690-700, 2020*
- 3) Karen Simonyan, Andrew Zisserman: *arXiv:1409.1556v6, Published as a conference paper at ICLR 2015*
- 4) Ryuji Imamura, Kohei Azuma, et al.: *arXiv:2104.04289 (2021)*
- 5) H.Jaeger: *German National Research Center for Information Technology GMD Technical Report, Vol.148, 34, (2001)*
- 6) Yann LeCun, Leon Bottou, et al.: *Proc. Of the IEEE, Nov. 1998*
- 7) 本間稔規, 岡崎伸哉, 他: 北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.321, (2022)

画像認識における説明可能なAIに関する研究

全 慶樹、近藤 正一、本間 稔規

Research on Explainable AI in Image Recognition

Keiki ZEN, Shouichi KONDOU, Toshinori HONMA

抄 録

近年、深層学習をはじめとする人工知能（AI）技術が急速に発展し、様々な分野でAIを活用した研究が進められている。しかし、近年のAIは膨大な量のパラメータから構成される巨大なモデルであり、モデルの内部構造が極めて複雑なため、なぜその認識や予測の結果が得られたのかという根拠を明確に説明できないという課題を抱えている。このような背景からAIの予測根拠を人間が解釈可能な形で説明するための技術である説明可能なAI（XAI: Explainable AI）に関する研究が注目されており、道内においてもAIを利用する企業から画像認識AIの予測の根拠に関する相談が当場に寄せられている。そこで本研究では、農作物の画像から良品と不良品を判別するAIモデルに対して画像認識AIの予測根拠を可視化して説明する、説明可能なAIの最新手法を適用することでその有用性を検証したので報告する。

キーワード：説明可能なAI、画像認識、可視化、概念抽出

Abstract

In recent years, artificial intelligence (AI) technologies, including deep learning, have developed rapidly, and research utilizing AI has been advancing across a wide range of fields. However, modern AI models are enormous systems composed of vast numbers of parameters, and their internal structures are extremely complex, which makes it difficult to clearly explain the rationale behind their recognition or prediction results. Against this background, research on explainable AI (XAI)—a technology that enables AI predictions to be explained in a human-interpretable manner—has been attracting increasing attention. In Hokkaido as well, our institute has received inquiries from companies using AI regarding the rationale behind predictions made by image recognition systems. In this study, we report on the usefulness of explainable AI by applying a state-of-the-art visualization method to elucidate the basis of image recognition AI predictions in a model that classifies agricultural products as either good or defective.

KEY-WORDS : Explainable AI, Image recognition, Visualization, Concept extraction

1. はじめに

近年、深層学習をはじめとする人工知能（AI）技術が急速に発展し、AIを活用した自動化等の研究が様々な分野で進められている。しかし、近年のAIは膨大な量のパラメータから構成される巨大なモデルであり、モデルの内部構造が極めて複雑なため、なぜその認識や予測の結果が得られたのかという根拠を明確に説明することができない。これは「ブ

ラックボックス問題」と呼ばれており、AIの信頼性の評価を困難にすることから、企業や自治体におけるAIの導入を妨げる要因になっている。

AIの開発では、収集したデータをAIに学習させてモデルを構築する。この学習プロセスでは、認識や予測の対象に関する「特徴」を入力データから自動的に学習するが、開発者の意図していない特徴を学習してしまうことがあり、その場合、期待した結果を出力しないなどAIモデルの性能は著し

事業名：経常研究

課題名：画像認識における説明可能なAIに関する研究

く低下する。このような現象は、特に実運用現場で取得されるデータにはない手がかりとなる特徴が学習用データに存在する場合に発生しやすい。例えば、農作物の良品と不良品を画像から判別するAIの開発において、学習用データの撮影に良品と不良品で異なる撮影台を用いるとAIは撮影台の違いを学習してしまい、農作物の一部が腐敗しているかなどの良品と不良品を判別するために必要な特徴を学習しない可能性がある。この場合、実運用現場では学習時の撮影台の情報を利用できないためAIの判別性能が極めて低くなる。AIの予測の根拠を説明できない場合、開発プロセスにおいてこのようなモデル内部に潜む問題を発見することは容易ではない。

このような背景からAIの予測根拠を人間が解釈可能な形で説明するための技術である、説明可能なAI（XAI: Explainable AI）に関する研究が注目されている。XAIは、AIが意図どおりに機能しているかを確認する上で重要な技術であり、認識や予測の妥当性の確認や誤判断の原因特定による性能改善など、AIの信頼性向上を可能にする。XAIは、開発者にとって有用であるだけでなく、AIの導入にあたってそのリスクと効果のより正確な評価を可能にすることから、企業等がAIを自社の業務に導入する際の意思決定支援にも有用である。ここ数年、AIを利用する企業から画像認識AIの予測の根拠に関する相談が当場に寄せられているなど、AIの認識や予測の根拠を説明する技術開発の重要性が高まっている。

そこで本研究では、農作物の画像から良品と不良品を判別するAIモデルに対し、画像認識AIの予測根拠を可視化して説明する最新手法を適用し、その有用性を検証したので報告する。

本稿では、まず説明可能なAIの概要と本研究で使ったアルゴリズムの詳細について述べる。次に当該アルゴリズムの実装および具体的なAIモデルへの適用事例として、ブロッコリーの良品と不良品を判別するAIモデルへアルゴリズムを適用した結果について述べる。最後に得られた予測根拠にもとづくAIモデルの妥当性評価について述べ、本研究で使ったアルゴリズムの有用性についてまとめる。

2. 画像認識モデルの予測根拠の可視化手法

本章では、まず説明可能なAIの概要と画像認識モデルの予測根拠を可視化する一般的な手法について述べる。次に本研究で使った可視化アルゴリズムであるCRAFT¹⁾ (Concept Recursive Activation Factorization for explainability) の仕組みと特徴について説明する。

2.1 説明可能なAI

説明可能なAIは、AIモデルが出力した認識や予測の根拠

を人間が理解できる形で提示する技術であり、AIシステムの透明性や信頼性の向上において重要な役割を果たしている。画像認識モデルに対して説明可能なAIを適用する場合、予測根拠を視覚的に可視化して提示する手法が広く知られており、大きく分けて二種類のアプローチが存在する。

一つは、AIモデルが予測の際に画像内のどの領域を特に重視したかを示す手法であり、通常はヒートマップ等による表現を用いてモデルが着目したピクセルレベルの情報を視覚的に提示する。代表的な手法としてGrad-CAM²⁾ (Gradient-weighted Class Activation Mapping) があり、これは畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Network) の最後の畳み込み層の勾配情報を用いることで、特定のクラス予測に最も影響を与えた画像領域をヒートマップとして可視化するアルゴリズムである。図1にGrad-CAMによる可視化の例を示す。図1左の入力画像に対してAIモデルが犬と認識した際に重視したと考えられる画像領域を図1右のヒートマップの赤い領域として可視化している。

また、モデルの構造に依存せずに入力的重要性度を推定できるLIME³⁾ やSHAP⁴⁾ のような汎用的手法を画像認識モデルに適用することも可能であり、Grad-CAMと同様にクラスの予測に最も影響を与えた画像領域を可視化することができる。

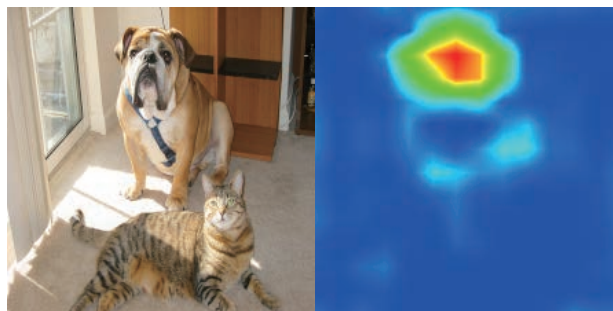


図1 Grad-CAMによる可視化

もう一つのアプローチは、モデルが予測の際に利用した「概念」(concept) を示す手法である。ここでの概念とは、モデルが学習により獲得した特定の視覚的パターンや特徴の集合である。概念にもとづく手法では、これらの概念が予測にどの程度寄与したかを示すことで、画像の「どこを重視したのか」ではなく「何を重視したのか」という観点からモデルの予測根拠を説明する。TCAV⁵⁾ 等の初期の手法では、開発者があらかじめ定義した概念（例えば「縞模様」や「尖った耳」等の特徴を持つ画像の集合）を用いて、特定の概念が予測にどの程度寄与しているかを計算するが、次節で説明するCRAFTのような新しい手法では、モデルの内部構造から自動的に概念を抽出することが可能である。これにより開発者が想定していない潜在的な概念の発見とそれにもとづく説明が可能になった。

2.2 概念に基づく可視化手法

本研究では、画像認識モデルの予測根拠を可視化する手法としてFelらによって提案されたCRAFTを使用した。CRAFTは、モデルが予測の際に重視した画像内の領域と概念を同時に提示できる手法であり、従来の二種類のアプローチを統合することにより詳細な可視化を実現している。

CRAFTの基本的な考え方は、深層学習モデル内部の活性化された中間層の出力を分析し、それらを人間が理解しやすい概念へと分解することにある。具体的には、画像認識モデル内部の最後の畳み込み層などの出力に対して多変量解析手法の一種である非負値行列因子分解（NMF: Non-negative Matrix Factorization）を適用することで、モデルの内部に構築されている潜在的な概念を自動的に抽出する。このプロセスは再帰的に実行されるため、抽出された概念はさらに細分化され、階層的な構造を持つ。例えば、動物の画像を分類するモデルにおいて「動物」という上位概念は、「犬」「猫」といった中位概念、さらに「犬の耳」「猫のひげ」といった下位概念へと分解できる。このような階層的概念の利用は、モデルが予測において重視した視覚的特徴に関する正確な理解に有用である。

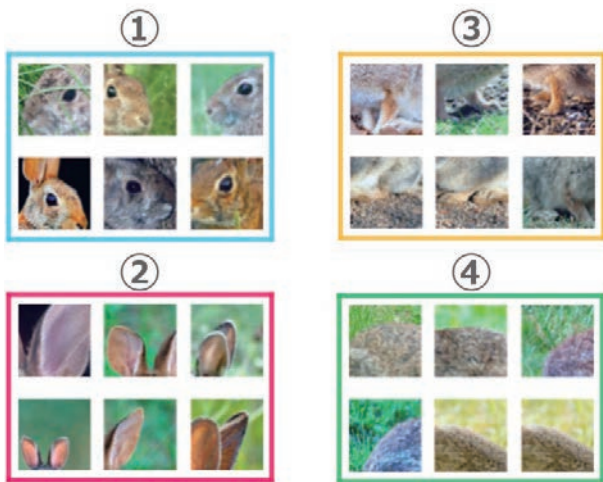


図2 CRAFTにより抽出された概念
(予測に重要なものから順に①～④)

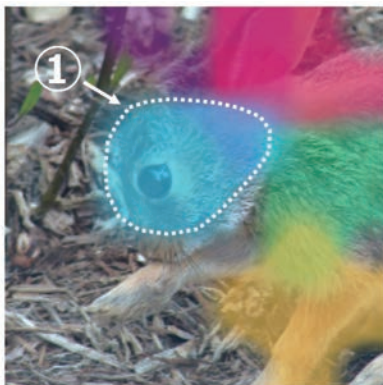


図3 予測において各概念が利用された画像領域

抽出された概念は、それぞれの概念に強く反応する代表的な画像の集合として可視化される。これにより数値的な指標ではなく、視覚的な情報からモデルが何を重視しているのかを把握することができる。また、CRAFTはどの概念が予測にどの程度寄与したのかを定量的に示すことができる。これらの寄与度の情報を用いることで、自動的に抽出された複数の概念から重要なものを選択的に提示することが可能になる。さらにそれぞれの概念に関してモデルが着目した画像領域を提示することが可能であり、以上をまとめると「予測で重要なこれらの概念を画像のこの領域で利用した」という詳細な説明を得ることができる。

図2および図3にCRAFTによる可視化の例を示す。画像認識モデルが入力画像をウサギと認識した結果を分析した例であり、図2では抽出された概念のうち予測に重要なものを4つ示し、図3では各概念が入力画像のどの領域で利用されたかをそれぞれ示している。最も重要とされた①の概念は、ウサギの顔の概念と考えられ、ウサギの認識に利用することは妥当であると考えられる。また、①の概念は図3においてウサギの顔の領域で利用されており、この点からもこの画像認識モデルの妥当性を確認することができる。

本研究では、Pythonの深層学習フレームワークであるTensorFlowと説明可能なAIのライブラリであるXplique⁶⁾を使用してAIモデルへCRAFTを適用するプログラムを実装し、農作物の良品と不良品を判別する画像認識モデルに対して適用した。

3. 農作物不良品判別モデルへの可視化手法の適用

3.1 農作物不良品判別モデル

実装したプログラムの適用対象は当场で開発を進めている、ブロッコリーの良品と不良品を判別する画像認識モデルとした。本モデルは、ブロッコリーの画像から良品か不良品かを判別する畳み込みニューラルネットワークモデルである。モデルの学習には、選果場で判別された良品および不良品を同一の撮像条件下で撮影した画像をそれぞれ約1,300枚用いた（図4）。不良品は主として腐敗により花蕾（食用とされるつぼみ）の一部が黒等に変色していた。学習後のモデ



図4 ブロッコリー画像
左：良品、右：不良品（腐敗）

ルはテストデータにおいて正解率90%以上の良好な性能を示した。

3.2 可視化手法の適用

学習後のモデルの妥当性を評価するため、テストデータの画像を不良品（腐敗）であると正しく判別した際の予測根拠を、CRAFTを適用して可視化した。結果を図5および図6に示す。図5に抽出された概念を予測に重要なものから順に①～④で示し、図6に各概念が入力画像のどの領域で利用されたかを示す。また、予測における概念の寄与率は、①の概念が約80%となり、最も重要であるとされた。

図5の各概念を代表する画像から、①はブロッコリーの茎および葉、②はブロッコリーの花蕾、③は容器、④は搬送台のフレームの概念であると考えられる。今回の腐敗ブロッコリーは花蕾に変色が生じているものであり、本来であればモデルは②の概念を重視して腐敗の有無を判別すると想定される。しかし、予測における寄与度が最も高い概念は①の茎および葉であり、想定と異なる。この不整合は、本来意図している腐敗ブロッコリーの特徴をモデルが学習できていない可能性を示唆している。

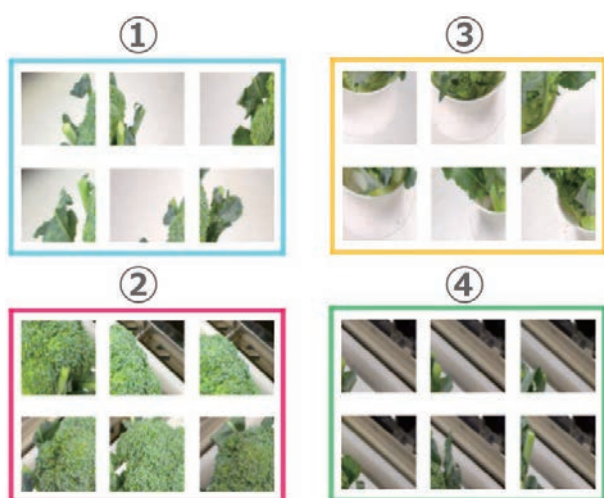


図5 抽出された概念
(予測に重要なものから順に①～④)

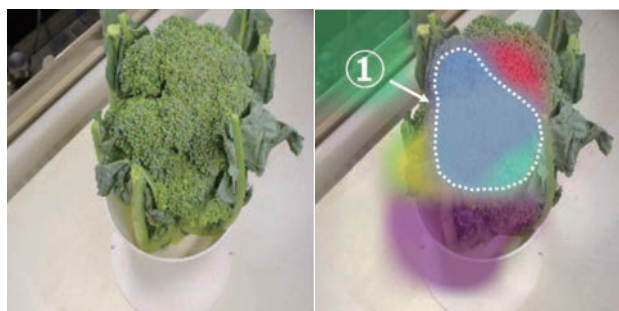


図6 予測において各概念が利用された画像領域

3.3 モデルの改善

予測根拠の可視化結果から、モデルが本来注目すべき腐敗の特徴が現れる花蕾ではなく、茎や葉といった部位に注目して腐敗を判別していることが示唆された。この原因について調査した結果、学習に使用した腐敗ブロッコリーの多くが撮影日程の都合により収穫から日数の経過した個体であり、葉や茎のしおれや乾燥など腐敗（花蕾の一部黒色化）とは直接関係ない視覚的特徴を併せ持っていたことがわかった。これにより、モデルは腐敗そのものではなく、しおれや乾燥といった異なる特徴を学習してしまっていた可能性が高いと推測された。

この問題に対応するため、学習データを見直し、しおれや乾燥等の特徴が強く現れていた画像約200枚をデータセットから削除し、モデルの再学習を実施した。再学習後のモデルに対して同様にCRAFTを用いた予測根拠の可視化を行った。結果を図7および図8に示す。

図7は、再学習後のモデルから抽出された概念のうち予測において重要とされた上位4つを示している。また、図8は各概念が入力画像のどの領域で利用されたのかを可視化したものである。今回の結果では、最も寄与率の高かった概念①がブロッコリーの花蕾に関する特徴を反映しており、図8においても当該概念が花蕾の部位で利用されていることが確認

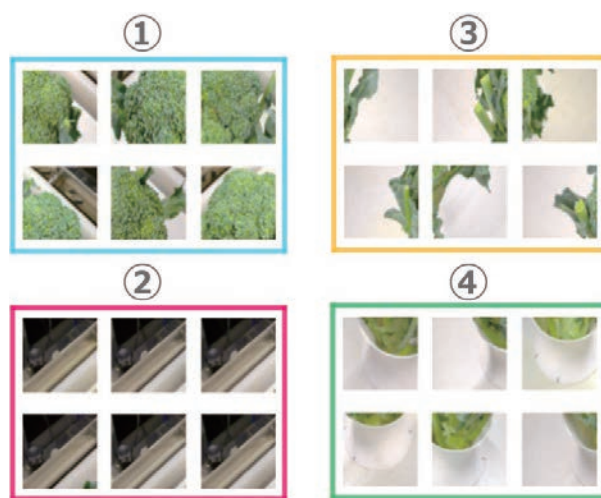


図7 抽出された概念
(予測に重要なものから順に①～④)

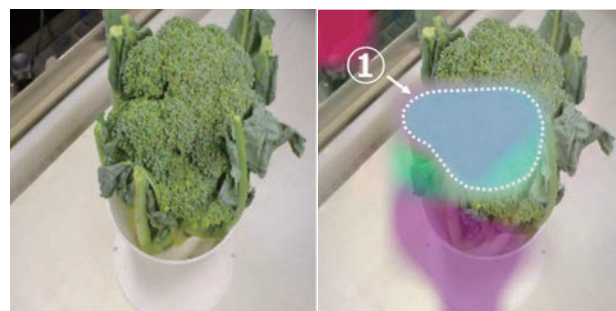


図8 予測において各概念が利用された画像領域

できた。このことから、再学習後のモデルは従来よりも適切な視覚的特徴にもとづいて不良品を判別していると判断できる。

一方で、モデルの予測性能を示す正解率は再学習の前後で大きな変化は見られず、いずれも90%以上であった。このことは、モデルが誤った特徴に依存して予測していたとしても、正解率といった性能指標からは学習の偏りに気づくことが難しいことを示している。特に学習データのみが存在する特徴が予測性能の向上に有利にはたらく場合は、見かけ上の性能が高くなるため、正解率等の性能指標ではモデルの内部状態を適切に評価することができない。

今回のように、概念にもとづく可視化手法を用いることで、モデルが予測において「何を重視したのか」を詳細に分析することが可能となり、正解率などの数値指標では見逃されやすいモデル内部の問題やデータセットの偏りの発見に有効であることが確認された。

4. おわりに

本研究では、農作物の画像から良品と不良品を判別するAIモデルに対し、画像認識AIの予測根拠を可視化して説明する最新手法を適用し、その有用性を検証した。具体的にはモデルが判別に利用した視覚的「概念」と画像内における注目領域を同時に可視化できるアルゴリズムであるCRAFTを農作物判別モデルへ適用し、開発中のモデルが予測において意図していない茎と葉の部位に着目していることを明らかにした。その結果、データの見直しによる再学習を通じて、モデルが本来注目すべき花蕾の部位に基づいて判断するようモデルを改善することが可能となった。これは、予測根拠を可視化することでモデル内部に潜在していた学習の不整合を把握し、改善につなげることが可能であることを示している。

また、モデルの正解率は再学習の前後で大きく変化しな

かったことから、一般的な性能指標のみではモデルの妥当性を評価しきれない場合があることも確認された。このことは、モデル開発において予測性能だけでなく、判断過程を可視化・分析する重要性を示すものである。

一方、今回使用したCRAFTには技術的な制限も存在する。特に、概念の抽出に非負値行列因子分解（NMF）を使用しているため、対象となるニューラルネットワークの出力が非負値である必要がある。したがって、活性化関数としてReLU等の非負性を持つモデルには適用できるが、Swish等の負の値を取る関数を用いる最新のモデルにはそのまま適用することができない。今後、NMFの代替として非負制約を緩和した行列分解アルゴリズムを組み込むなど、より広範なモデル構造へ適用可能な可視化手法の開発も検討する必要がある。

今後は、AIを使用する様々な研究開発において本研究の知見を広く活用することで、より信頼性の高いAIモデルの開発を図る予定である。

参考文献

- 1) Thomas Fel, Agustin Picard, et al. : *CVPR 2023*, pp. 2711-2721, (2023)
- 2) Ramprasaath R. Selvaraju, Michael Cogswell, et al. : *ICCV 2017*, pp. 618-626, (2017)
- 3) Marco Tulio Ribeiro, Sameer Singh, et al. : *KDD 2016*, pp. 1135-1144, (2016)
- 4) Scott M Lundberg, Su-In Lee. : *NIPS 2017*, (2017)
- 5) Been Kim, Martin Wattenberg, et al. : *ICML 2018*, pp. 2668-2677, (2018)
- 6) Thomas Fel, Lucas Hervier, et al. : *XAI4CV Workshop at CVPR 2022*, (2022)

抽苔人参の非破壊判別技術の開発

川島 圭太、井川 久、宮島 沙織、吉田 道拓、中西 洋介、田中 彰*

Development of Non-Destructive Discrimination Technology for Bolting Carrots

Keita KAWASHIMA, Hisashi IGAWA, Saori MIYAJIMA, Michihiro YOSHIDA,
Yohsuke NAKANISHI, Akira TANAKA*

抄 録

人参の加工現場では、抽苔人参（内部の木質化）を全数人手で検査しており、人手不足の影響から高速・高精度に抽苔を検査する装置の早期開発が求められている。本研究では、抽苔の蛍光特性を応用して判別する手法の開発を行った。具体的には人参の葉柄基部を除去した切断面に青色光を照射して撮影した画像をAIモデルで解析し、抽苔の有無の判別を行う。人参サンプルを用いた実験の結果、抽苔有無の判別精度として97.9%が得られた。このとき、抽苔人参を正常人参と誤判別することはなかった。さらに、人参の切断面を連続して撮影可能なコンベア式撮影装置および抽苔判別後の人参を除去する機構の開発を行った。実用化に向けた動作検証を実施し、その有用性を確認した。

キーワード：非破壊検査、自家蛍光、AI、抽苔、人参

Abstract

At carrot processing sites, the of bolting carrots (lignification) is currently inspected manually for all products. However, due to labor shortages, there is an urgent need for the development of equipment capable of inspecting bolting both quickly and accurately. In response to this need, a technology was developed to enable rapid and precise detection of bolting. This was achieved by analyzing images captured after irradiating the cross-section of carrots with blue light, following the removal of the petiole base. An AI model was employed to determine the presence or absence of bolting. The resulting accuracy of bolting identification reached 97.4%. Furthermore, the method did not falsely identify bolted carrots as normal ones. To facilitate practical application, a conveyor-type imaging device was developed, capable of continuously acquiring images of the cut surfaces of carrots, along with a mechanism designed to remove bolted carrots.

KEY-WORDS : Non-destructive testing, Autofluorescence, AI, Bolting, Carrots

1. はじめに

北海道において、食料品製造業は製造品出荷額の38.2%を占める主要産業であるが¹⁾、業種別の労働生産性の観点では他の製造業より低い生産性となっている²⁾。さらに生産年齢人口の減少による深刻な人手不足の影響で十分な作業人員を確保できない状況が続いており、機械化などによる人手作業の省人化・省力化は重要な課題である。

また、食料品製造業では、原料の外観による不良品の判別に加え、外観ではわからない内部欠陥の判別・除去作業に多くの人手を費やしている。特に北海道が国内生産量1位の人参³⁾の加工現場においては、図1に示すように抽苔人参を判別するために人手で人参を全数カットしながら、同時に硬さ検査を行っている。人参における抽苔とは花芽を形成する過程で根部の養分が消費され、維管束が硬化する現象である。加工した製品に抽苔部分が混入すると木材や石のような食感

* 道総研食品加工研究センター、* Hokkaido Research Organization Food Processing Research Center

事業名：戦略研究 ほか2件

課題名：食品の非破壊内部検査技術の開発 ほか2件

となり異物混入と間違えられる。抽苔人参の検査は加工する人参の全数に対して行っているが、作業者ごとに判別基準にばらつきがあることが、製品に混入してしまう原因の一つになっている。抽苔部分が混入しクレームとなった場合は、同一ロットは全数回収・廃棄となる。このようなことから抽苔人参を人手に頼らず、精度良く検出可能な装置の早期開発が望まれている。

本研究では、画像処理により高精度に非破壊で抽苔が判別可能な手法の開発、および当該手法の実用化に向けた、抽苔人参の有無を連続して判別可能とする装置や抽苔人参除去機構を開発した。

なお、当场では、これまでに振動や近赤外光、X線などを使用した抽苔判別手法について検討してきた。しかし、判別速度や精度、装置の製造コストなどに課題があった。本報では、紫外光および青色光を用いた判別手法について報告する。



抽苔人参検査の様子



抽苔人参

図1 人参加工工場における抽苔人参検査の様子と抽苔人参

2. 抽苔人参判別手法の開発

2.1 紫外光を用いた判別手法の開発⁴⁾

正常人参と抽苔人参の判別は、外観上からは困難である。また、葉柄基部の切断面による判別においても、正常人参と抽苔人参で切断面の色調が類似する場合が多く、可視光下における目視では判別が困難である。これまでに様々な波長の光を用いて抽苔部分の可視化を試みた結果、紫外光により抽苔部分が蛍光することを確認している。そこで、図2に示す試験環境下で撮影した人参の画像を解析し、抽苔人参が判別可能か確認した。試験に使用した機器の構成については、表

1に示すとおりである。使用した紫外光照明のピーク波長は385nmである。また、蛍光した抽苔部分の視認性向上のため、カメラのレンズには撮影画像の紫色成分を抑制するフィルター（カットオン波長475nm、エドモンド・オプティクス製）を装着した。

試験には、加工現場で使用されているスチームピーラーで皮を剥いた状態の人参を使用した。葉柄基部を除去した人参の切断面（図3）に紫外光を照射して画像を撮影し、画像処理で蛍光箇所を検出することにより抽苔を判別した。試験に供した人参の本数は正常人参20本、抽苔人参18本である。

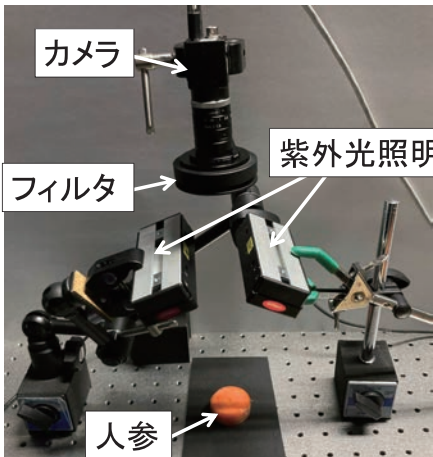


図2 紫外光を活用した試験環境

表1 紫外光を活用した試験環境の主な構成部品

機器	型式	メーカー
カメラ	STC-MCS163U3V	オムロンセンテック（株）
フィルター	#64-633	Edmund Optics
紫外光照明	IDBA-CH75L-UV-385	（株）レイマック

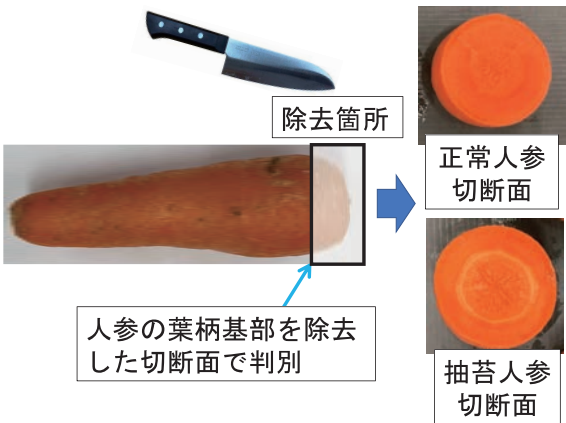


図3 葉柄基部を切断した人参の切断面

撮影した画像の一例を図4に示す。葉柄基部の切断面に紫外光を照射することで抽苔部分が環状に蛍光していることがわかる。このRGB画像の各チャンネルにおいて実験的に決

定した閾値で画像処理を実施した結果、抽苔人参の有無の判別精度は84.2%であった(表2)。判別精度の計算式は式(1)に示すとおりである。算出時に使用した本数は正常人参も抽苔人参もすべて合算した数である。

$$\text{判別精度}[\%] = \frac{\text{判別結果が正しかった本数}}{\text{試験した人参の総数}} \times 100$$

式(1)

本試験では、抽苔人参を正常人参と誤判別することはなかったが、正常人参が蛍光して抽苔人参と誤判別することがあり、これにより全体の判別精度が低下した。

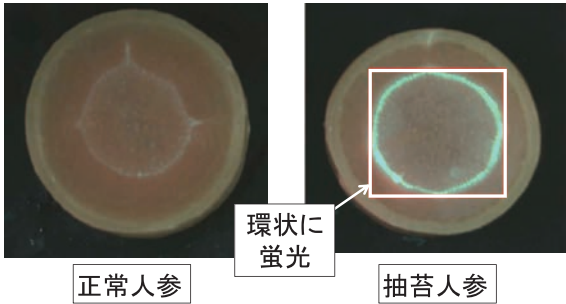


図4 紫外光による撮影結果の一例

表2 紫外光を用いた手法による抽苔の有無の判別結果

		人が人参切断時の 硬さで判別した結果	
		正常人参	抽苔人参
画像処理の 判別結果	正常人参	14	0
	抽苔人参	6	18

判別精度：84.2 %
※抽苔人参を正常人参と誤判別はしていない

2.2 紫外光による抽苔の蛍光について

抽苔部分が、紫外光によって蛍光する要因について詳しく検討した。文献調査から抽苔部分には、樹木に多く含まれ、紫外光で蛍光する特性のあるリグニンが含まれていると推測した⁵⁾。そこで、抽苔部分におけるリグニン含有の有無を確認するため定性試験を実施した。リグニン含有の有無は、人参の正常部分と抽苔部分の切片それぞれに、リグニンと反応して着色するフロログルシン-塩酸試薬を数滴滴下し、室温で15分静置した際の着色の有無で確認した。定性試験の結果は図5に示すとおりである。正常部分には色の変化が見られず、抽苔部分のみ赤紫色に着色し、抽苔部分にリグニンが含まれていることが確認された。

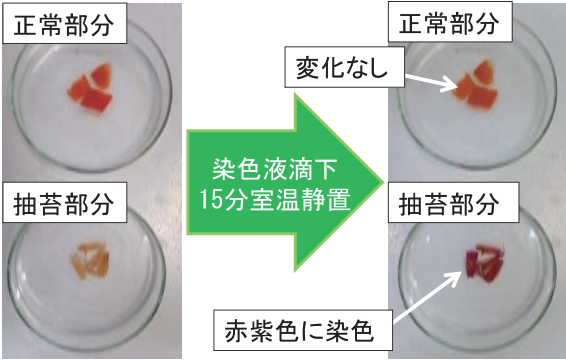


図5 人参におけるリグニンの定性試験の結果

2.3 青色光とAIを組み合わせた抽苔判別手法の開発⁶⁾

前節までに紫外光を用いた抽苔人参判別手法を開発したが、食品ロス低減のために食品加工業者からさらなる高精度化に対する要望が寄せられた。紫外光を用いた判別手法では、判別率の向上を図ることが困難であった。そこで、さらなる高精度化を目指し、正常人参が紫外光で蛍光する原因について調査を行ったところ、正常部分には、リグニン同様、紫外光に反応して蛍光するスベリンが含まれていることがわかった⁷⁾。スベリンは紫外光には反応して蛍光するが、青色光には反応しない性質を持つ⁸⁾。一方で、抽苔部分に含まれるリグニンは、紫外光にも青色光にも反応して蛍光反応を示す。そこで、正常部分と抽苔部分に含まれる成分による蛍光特性の違いを利用し、青色光を用いた抽苔人参判別手法の開発に取り組んだ。本手法では、光の輝度以外に蛍光箇所の分布状態も判別に使用するために、AIモデルによる画像認識を組み込むこととした。

第3章に示すコンベア式撮影装置で撮影した人参の蛍光画像をAIモデルで解析し、抽苔人参が判別可能か確認した。撮影装置の詳細については、第3章に記載のとおりである。青色光照明は、ピーク波長が420nmである。紫外光の手法同様に蛍光した抽苔部分の視認性向上のため、カメラのレンズにはフィルター(カットオン波長475nm、エドモンド・オブティクス製)を装着した。試験には、加工現場で使用されているスチームピーラーで皮を剥いた状態の人参を使用した。葉柄基部を除去した人参の切断面に青色光を照射して画像を撮影し、その画像を開発したAIモデルで解析して抽苔人参を判別した。本研究におけるAIモデルのデータセットのアノテーションは、画像内の人参の切断面を矩形で囲み、正常(OK)・抽苔(NG)のラベル付けすることにより行った。作成したデータセットを用いて、物体検出モデル「Ultralytics YOLOv11m」で学習を行った。データセット作成や判別精度検証のためのテストデータなど、本研究で使った人参画像枚数を表3に示す。また、AIモデルが人参断面だと判断した箇所に枠とAIモデルがOKもしくはNGと判断した結果、信頼度の数値が表示される。この信頼度は

AIモデルが検出の信頼性を評価した指標であり、0 から 1 で表記され、1 に近いほど検出の信頼性が高いことを示す。

表 3 AIモデル開発に使用した画像枚数内訳

	OK	NG
トレーニングデータ	247	71
バリデーションデータ	71	19
テストデータ	37	10

AIモデルによる判別結果の一例を図 6 に示す。AIモデルにおける抽苔の有無の判別精度は97.9%であった。判別精度の計算式は、式（2）に示すとおりである。算出時に使用した数は正常人参も抽苔人参もすべて合算した数である。

$$\text{判別精度}[\%] = \frac{\text{判別結果が正しかった本数}}{\text{AIが人参と認識した総数(枠が出た数)}} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

本試験時には、計算資源としてGPU（GeForce RT3070Ti・NVIDIA製）を搭載したノートパソコン（CPU：12世代Corei9-12900H・Intel製）を使用し、画像一枚の判別に要した計算時間は平均で19.5ミリ秒であった。本試験の判別結果を表 4 に示す。この際、抽苔人参を正常人参と誤判別することはなかった。判別精度が100%にならなかった原因は、図 7 に示すように、本来は背景として認識され、枠が表示されないはずの領域において、曲がった人参の一部が正常な断面と誤検出されたためである。特に、本システムでは1つの人参につき1つの判定枠（OKまたはNG）の出力が原則であるが、この誤判別により、同一人参にOKとNGが混在する結果が生じた。このようなケースでは、局所的な正常領域が存在しても、抽苔判定が一部でも出た時点でその人参全体をNGとすべきであり、OKの判定枠が出力しないように修正する必要がある。

この問題への対応として、単純な追加学習だけでなく、ポストプロセスとして人参全体の領域統合処理や、NG優先のラベリングルールの導入、あるいはマスクベースの領域分割と判定結果の集約を行うことで、より安定した判別精度の向上が期待できる。

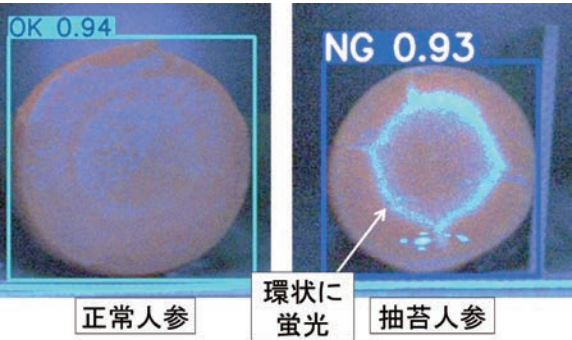


図 6 AIモデルによる判別結果の一例

表 4 青色光とAIを組み合わせた手法による抽苔の有無の判別結果

		人が人参切断時の硬さで判別した結果		
		正常人参	抽苔人参	背景
AIモデルの判別結果	正常人参	37	0	1
	抽苔人参	0	10	0
	背景	0	0	0

判別精度：97.9 %
※抽苔人参を正常人参と誤判別はしていない



図 7 背景を正常と誤検出した例

青色光を用いた抽苔人参判別手法は、紫外光を用いた判別手法と比較して正常人参の誤判別が大幅に減少し、結果として全体の判別精度が向上した。この誤判別の改善は、AIモデルの導入効果のみではなく、正常部分と抽苔部分の含有成分による蛍光特性の違いが主な要因と考えられる。

3. 実用化に向けた装置開発

3.1 コンベア式人参撮影装置の開発

前述した研究成果の実用化に向けて、人参切断面の画像を連続して撮影可能なコンベア式人参撮影装置を開発した。主要な構成部品を表 5、実際に開発した装置を図 8 に示す。

表 5 開発したコンベア式撮影装置の主要構成部品

機器	型式	メーカー
カメラ	a2a1920-51gcbas	Basler
レンズ	SV-1214HF	(株)ガイ・エス・テクノロジー
フィルター	#84-749	Edmund Optics
青色光照明	LED420-9VIS	オプトコード(株)
栈付コンベア	MB2S-VG-HS-106-300-100-L-IV40-O	マルヤス機械(株)



図8 開発したコンベア式人参撮影装置

開発したコンベア式撮影装置で撮影した画像を図9に示す。

開発した撮影装置のコンベアの処理能力は3本/秒であり、人参1本を150gと仮定すると1時間あたり1.6tの処理が可能である。

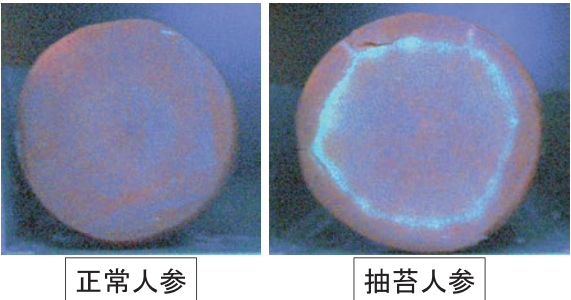


図9 コンベア式人参撮影装置で撮影した人参画像

3.2 抽苔人参除去機構の開発

次に、コンベア式撮影装置で抽苔人参を判別した後、抽苔人参を除去するための機構を開発した(図10)。コンベア式撮影装置からの信号をもとに、人参振り分け板で正常人参と抽苔人参を振り分ける。食品加工現場におけるメンテナンスなどを考慮して、人参振り分け板の駆動はエアシリンダで行うこととした。主要な構成部品については表6に示す。開発した除去機構の動作確認を行い、問題なく動作することを確認した。



図10 開発した抽苔人参除去機構

表6 開発した抽苔人参除去機構の主要構成部品

機器	型式	メーカー
エアシリンダ	CDG1TA32-50Z-NV-M9BWL	SMC
ソレノイドバルブ	VQ2201-51-02	SMC
レーザーセンサ	LR-ZB100N	キーエンス

4. おわりに

本研究では、青色光とAIを組み合わせた高精度な抽苔人参判別手法を開発し、実用化に向けたコンベア式撮影装置および抽苔人参除去機構の試作を行った。

今後は、AIモデルによるリアルタイム判別機能の実装や、人参加工現場での現地実証試験を通じて完成度の向上を図る。これらの技術的課題の解決と並行して、食品機械メーカー等への技術移転も進め、次年度以降の早期実用化と省力化への貢献を目指す。

謝辞

本研究において、試験片である人参の提供や助言などで株式会社北海道フーズ、クレードル食品株式会社、ハウス食品グループ本社株式会社、京都大学にご協力いただきました。

また、コンベア式撮影装置や除去機構の設計・開発に際し、美和電気工業株式会社にご協力いただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 総務省・経済産業省：令和3年経済センサス-活動調査-
- 2) 経済産業省：2022年企業活動基本調査速報-2021年度実

績一

- 3) 農林水産省：令和 3 年作物統計調査
- 4) 川島圭太, 井川 久 他：園芸学研究 第23巻 別冊 1, pp. 402, (2024)
- 5) Lloyd Donaldson : *Molecules*, 25 (10), 2393, (2020)
- 6) 川島圭太, 宮島沙織 他：園芸学研究 第24巻 別冊 2, pp. 476, (2025)
- 7) P.E.KOLATTUKUDY, KAREN KRONMAN, et al: *Plant Physiol*, 55, pp. 567-573, (1975)
- 8) Lloyd Donaldson, Nari Williams : *Plants*, 7 (1), (2018)

カボチャ収穫作業を軽労力化する軸切りはさみの開発

浦池 隆文、伊藤 壮生、泉 巖、前田 大輔、今岡 広一、中西 洋介
森 雅宏*、濱口 竜一*

Development of Stem Cutting Shears to Reduce the Labor of Squash Harvesting

Takafumi URAIKE, Soki ITO, Iwao IZUMI, Daisuke MAEDA,
Koichi IMAOKA, Yohsuke NAKANISHI
Masahiro MORI*, Ryuichi HAMAGUCHI*

抄 録

本道におけるカボチャの生産量は全国一位であり、国内生産量の約半分を占めている。しかし平成24年以降、高齢化や担い手不足などにより、生産量は減少傾向にある。カボチャ栽培は機械化がほとんど進んでおらず、特に収穫作業では、重い果実を持ち上げ、硬い軸を切断するなどの作業が必要であり、作業者にとって大きな負担となっている。そこで本研究では、収穫作業の軽労力化および効率化を図ることでカボチャ生産量の維持・拡大に資することを目的として、新たな軸切りはさみの開発を行った。

開発にあたっては、既存のカボチャ軸切り専用はさみと比べてより軽い力で軸の切断が可能なおとに加え、早期かつ低コストに開発を進めるため、市販の刃物を改良することを基本とした。様々な刃物について軸切り作業への適用性を比較したところ、樹脂パイプの切断に用いられる刃物が最適であることがわかった。しかし、そのままでは軸の切り残しが長く、農協への出荷基準を満たせないことなどが課題として挙げられたことから、改善点を整理のうえ新たなはさみの設計・試作を行った。ほ場での実証試験と生体情報計測による身体負荷評価、さらに人間工学にもとづいた形状最適化を進めた結果、十分な切断性能と優れた使用感を備えた新たなカボチャ軸切りはさみを開発した。

キーワード：カボチャ収穫作業、軽労力化、軸切りはさみ、生体情報計測、人間工学

Abstract

Hokkaido is the top producer of squashes in Japan, producing about half of the total. However, production has been declining since 2012 due to an aging population and labor shortages. Squash cultivation has not been mechanized. Harvesting, in particular, requires lifting heavy squash and cutting the hard stem, which is hard work for workers. In this study, we developed new stem-cutting shears to reduce the burden of harvesting squash and improve work efficiency, thereby contributing to the sustainability and expansion of squash production.

In this development, we aimed to create shears that would cut squash stems with less force than existing specialized shears for cutting squash stems. Furthermore, we developed shears, based on improving commercially available products, with the aim of achieving this development quickly and at low cost. When comparing the applicability of various edged tools to stem-cutting work, blades used for cutting plastic pipes were highly rated. However, issues were raised, such as the stems remaining too long and not meeting the shipping standards for agricultural cooperatives. After consideration of improvement points, new shears were designed and prototyped. Their usefulness was confirmed through demonstration tests at farms and an evaluation of the physical load using biometric measurements. By optimizing the shape based on ergonomics, new squash stem-cutting shears with sufficient performance and a high level of usability were developed.

KEY-WORDS : Squash harvesting, Reduce the burden, Stem-cutting Shears, Biometric measurements, Ergonomics

* 浅香工業株式会社、* ASAKA Industrial co., ltd.

事業名：戦略研究

課題名：近未来の社会構造や環境の変化を見据えた力強い食産業の構築
(北海道産農林産物の収穫作業省力化に関する基盤技術の開発)

1. はじめに

本道における令和5年のカボチャ生産量は約74,700トン、作付面積は約6,410ヘクタールとともに全国一位であり、全国の約半分を占めている。しかし平成24年以降は、高齢化の進行や担い手不足などにより、生産量・作付面積が右肩下がり傾向となっている（図1）。カボチャ栽培はほとんど機械化が進んでおらず、特に収穫作業は作業者にとって大きな負担となっている。カボチャ収穫作業においては、果実の軸を切断する刃物として、専用の「カボチャ軸切りはさみ」が広く使用されている。しかし、軸の切断には大きな力が必要であることから、長時間使用時の疲労蓄積などが課題となっている。

そこで本研究では、収穫作業を効率化・軽労力化することでカボチャの生産量を維持・拡大することを目的として、新たな軸切りはさみの開発を行った。開発にあたっては、既存の専用はさみと比べてより軽い力で軸の切断が可能になることに加え、早期かつ低コストに開発を進めるため、市販の刃物を流用もしくは改良することを基本とした。以下、開発の経緯と開発したはさみの特徴について紹介する。

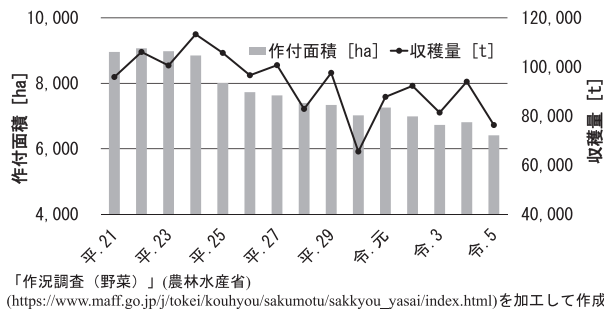


図1 カボチャの生産量と作付面積の推移

2. カボチャ軸切り刃物の検討

専用のはさみと比較して、効率的に軸切断が可能なのはさみに必要となる機能を確認するため、カボチャの軸切り以外の用途を含め、市販されている様々な刃物を用いた軸切り試験を行い、カボチャ軸切り作業への適用性を検証した。

2.1 市販刃物によるカボチャの軸切り

専用はさみのほか、園芸用剪定ばさみ、樹脂・パイプカッター、電動ハサミ、小型チェーンソーなど複数の刃物を用いた軸切り試験を行い、使用感として、①使いやすさ（切れ味・重さ・位置決めしやすさなど）と、②安全性（不安を感じないか）について5段階（5：非常に良い～1：非常に悪い）で評価した。具体的には量販店で容易に入手可能な刃物から軸切りに適用可能と判断した12機種を選定し、工業試験場職員4名（非農業従事者）による評価を行った。専用はさみと、

表1 市販刃物の使いやすさ・安全性評価

専用はさみ

項目 \ 作業者	A	B	C	D	平均
使いやすさ	3	3	3	3	3.00
安全性	4	3	3	3	3.25

剪定ばさみ

項目 \ 作業者	A	B	C	D	平均
使いやすさ	2	5	4	4	3.75
安全性	4	3	3	5	3.75

樹脂・パイプカッター1

項目 \ 作業者	A	B	C	D	平均
使いやすさ	5	5	3	2	3.75
安全性	4	3	3	5	3.75

樹脂・パイプカッター2

項目 \ 作業者	A	B	C	D	平均
使いやすさ	3	4	4	3	3.50
安全性	4	3	3	3	3.25

結果が良好であった上位3機種の評価結果を表1に示す。剪定ばさみと樹脂・パイプカッターの評価が高く、専用はさみを上回る結果であった。これらは円柱・円筒形状で硬質な素材を切断することを目的とした刃物であり、カボチャ軸切り作業への適用が有効であると考えられた。

2.2 市販刃物の軸切断能力

使用感に関して評価の高かった表1の市販刃物について、カボチャの軸に対する切断能力を評価するため切断時間と切断力の測定を行った。切断時間の測定は、軸を残したまま切るから切り離れたカボチャを、片手で把持した状態で行った（図2）。軸径35mm前後のカボチャ3個の軸を切断した際の平均時間を表2に示す。専用はさみと比較して、樹脂・パイプカッター2機種は1/3以下の時間で切断可能であった。剪定ばさみについては専用はさみより切断に時間を要する結果であった。

切断時間の測定結果が良好であった樹脂・パイプカッター2機種と専用はさみについて切断力の測定を行った。切断力の測定は、はさみを治具に固定し、荷重測定用のロードセルをはさみの柄に一方に押し付けることにより行った（図3）。切断時間と同様に、軸径35mm前後のカボチャ3個の軸を切断した際の平均切断力を表3に示す。専用はさみと比較して、樹脂・



図2 軸切断時間測定の様子

表2 軸切断時間測定結果（3個平均）

	専用はさみ	剪定ばさみ	樹脂・パイプカッター1	樹脂・パイプカッター2
時間[s]	2.6	3.8	0.7	0.7
軸径[mm]	37.7	34	32.3	31.7

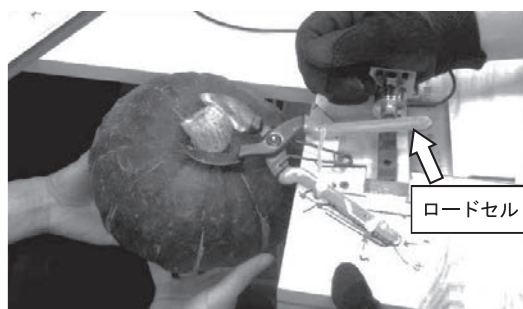


図3 軸切断力測定の様子

表3 軸切断時間測定結果（3個平均）

	専用はさみ	樹脂・パイプ カッター1	樹脂・パイプ カッター2
切断力[kgf]	32.1	12.2	15.8
軸径[mm]	34.3	32.7	35.7

パイプカッターは2機種とも1/2以下の力で切断可能であった。以上より、樹脂・パイプカッターを使用することで、カボチャの軸切り作業を効率的に行うことが可能と考えられた。

2.3 市販刃物の軸切り作業への適用性

切断力が最も小さかった樹脂・パイプカッター1（以下、樹脂カッターと記す）を用いた農業従事者によるカボチャ軸切り作業試験を行い、使用感について聞き取り調査を行うとともに、作業への適用性について検討した。2.1節で実施した、①使いやすさと、②安全性に加え、③力の入れ具合（切断に要する力）について5段階（5：非常に良い～1：非常に悪い）で評価したところ、表4に示す結果となった。20～70歳代の女性7名男性8名による評価は、力の入れ具合・安全性について非常に高い評価であったが、使いやすさについては若干低い評価であり、その理由としては以下が挙げられた。

- ①軸に刃物を当てづらい
- ②柄が掴みにくい
- ③もう少し軸を短く切りたい
- ④使い慣れない

表4 樹脂カッターの使用感評価結果

	使いやすさ	安全性	力の 入れ具合
女性平均	3.0	4.6	4.7
男性平均	4.0	4.6	4.4
全体平均	3.5	4.6	4.5



図4 軸の切り残し

これらは、元来用途の異なる刃物を使用したことに起因する。このうち③に関しては、農協の受け入れ基準として適切な軸の切り残し長さ（図4）の範囲が定められており、基準を満たさない（切り残しが長い）場合は出荷できない。

これまでの検討により、カボチャ軸切り作業において樹脂カッターの切断能力と安全性に問題はないことを確認できた。そこで、主として「使いやすさ」に関する指摘事項を要件として、樹脂カッターをベースとした新たな軸切りはさみを開発することとした。

3. 新たなカボチャ軸切りはさみの開発

3.1 設計要件

2章で行った聞き取り調査のほか、農業改良普及センターなど農業関係者から得られた意見をもとに、以下①～⑤を要件として軸切りはさみの設計・試作を行った。なお、これ以降の詳細設計と試作は、浅香工業株式会社が担当した。

① 小さな切断力

刃を樹脂カッターと同様に薄刃の平刃にすることで、カボチャ専用はさみと比較して小さな切断力で軸切りを行うことを可能とする。

② 短い軸の切り残し長さ

「刃面から下の形状寸法」を小さくすることで軸の切り残し長さを短くする。樹脂カッターでは「刃面から下の形状寸法」が7～10mmであるのに対し、試作はさみでは1mmとする（図5）。

③ 容易な軸の位置決め

切断時に軸を固定しやすいように「軸押さえ」機能を有する構造とする。

④ 安全性の確保

はさみを閉じたときに、刃先が隠れるようカバーを設ける。

⑤ 低コスト

刃を替刃式とすることで低コスト化を図る。

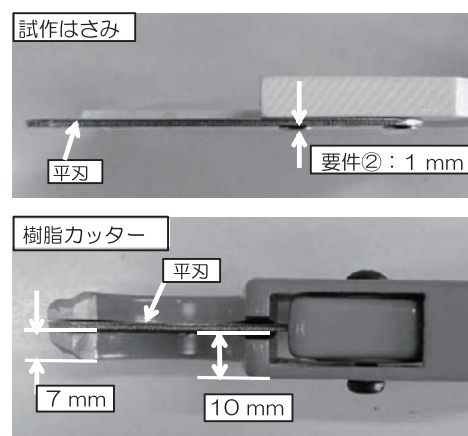


図5 刃面から下の形状寸法

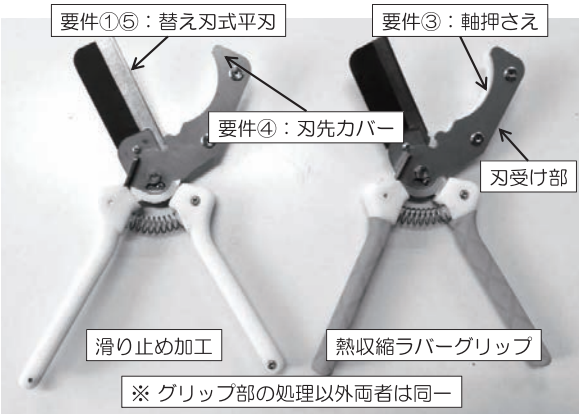


図6 試作したはさみの概観

試作したはさみを図6に示す。カボチャの軸を安定して把持・固定するための「軸押さえ」と、はさみを閉じた際に刃先を隠すことで安全性を確保するための円弧形状の「刃受け部」を有することを特徴としている。また、刃を安価な替え刃式とすることでコストの低減を図るとともに、性能（切れ味）の維持を容易にした。

3.2 ほ場でのテスト使用と使用感に関する聞き取り調査

試作したはさみの農業従事者によるテスト使用を実施し、使用感について聞き取り調査を行った。評価項目は2.3節と同様、①使いやすさ、②安全性、③力の入れ具合とし、5段階（5：非常に良い～1：非常に悪い）で評価を行った。テストの様子を図7に、聞き取り調査結果を表5に示す。各項目とも高い評価が得られ、特に使いやすさに関して樹脂カッ



図7 ほ場でのテストの様子

表5 使用感評価結果

性別	年代	使いやすさ	安全性	力の入れ具合
女	40	4.5	4	4.5
男	20	5	5	5
	30	5	5	5
	30	5	4	5
	40	4	5	5
	70	5	5	4
平均		4.8	4.7	4.8

表6 軸の切り残し長さ（20個平均）

	軸径[mm]	切り残し長さ[mm]
品種1	33.2	6.4
品種2	32.3	8.8

ターの使用感評価で指摘された不都合が解消されていることを確認した。加えて、テスト使用を実施したほ場で栽培されている2品種について、軸の切り残し長さの測定を行った。収穫した果実からランダムに抽出した20個の平均値は表6のようになり、それぞれの品種について農協の受け入れ基準を満たす結果が得られた。以上により、設計・試作と評価を通じて新たに開発したカボチャ軸切りはさみは、優れた使用感と機能性を有することを確認した。一方で評価に表れない感覚的な事項について以下2点が指摘され、さらなる改善に向けた課題として抽出された。

- ① グリップ幅が狭い（握り具合の違和感）
- ② 剛性感（がっちりした感じ）が低い

3.3 生体情報計測による身体負担評価

使用感と性能の評価に加え、開発したはさみを使用することによる軽労力化の効果を把握するため、軸切りの模擬動作試験を実施し、生体情報の計測を行った。カボチャの軸と同等の力で切断することが可能な樹脂パイプを対象として、カボチャ軸切り専用はさみと開発したはさみで切断し、前腕屈筋群および前腕伸筋群の筋電位と、手関節および示指MP関節の関節角度を計測した。試験の様子を図8に、計測箇所を図9に示す。試験は、20～60代の男女8名の被験者（工業試験場職員）を対象に行った。

図10に筋電位の計測結果を示す。グラフ縦軸のMVC比は、最大筋力を発生する際の筋電位（握力測定の要領で事前に計測）に対して、試験中に計測された最大筋電位の割合を示している。またグラフ中の○印は被験者ごとに計測された筋電位の最大値、■印は全被験者の平均値を示す。個人差はあるものの、前腕屈筋群・前腕伸筋群ともに開発したはさみにおいてMVC比が有意に低下、すなわち筋負担が低減することを確認した。



図8 模擬動作試験の様子



図9 生体情報計測箇所

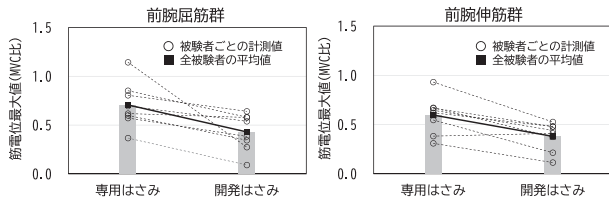


図10 筋電位計測結果

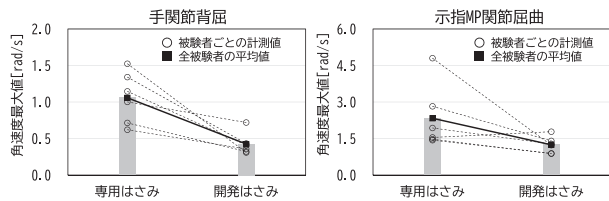


図11 関節角速度計測結果

関節角度から求められる角速度の計測結果を図11に示す。グラフ中の○印は被験者ごとに計測された角速度の最大値、■印は全被験者の平均値を示す。手関節背屈・示指MP関節屈曲ともに、専用はさみではばらつきが大きく、かつ最大値が大きくなっている。ばらつきが大きいことから動作が安定していないこと、最大値が大きいことからグリップを強く握っていることが伺える。

以上、生体情報計測の結果から、開発したはさみは専用はさみと比較して安定かつ楽に軸切り作業を行うことが可能なこと、すなわち軽労力化に効果的であることを確認した。

4. 新たなカボチャ軸切りはさみの実用化へ向けた改良

3章で試作したカボチャ軸切りはさみは十分な性能を有していることを確認したが、グリップ形状を改良することで更なる使用感の向上が見込まれた。そこで、グリップ形状の最適化を図るため人間工学にもとづいた形状評価を行い、これをもとにプロトタイプを製作した。その後、ほ場において収穫シーズンを通した使用テストを行い、製品化へ向けた課題を確認した。

4.1 グリップ形状の最適化

試作したカボチャ軸切りはさみは、3.2節で指摘された「グリップ幅が狭い（握り具合の違和感）」に起因して、握り込んだ際に力が伝わりづらい傾向があった。これを改善するため、人間工学的観点^{1,2)}にもとづいてグリップの基本形状と各部の寸法範囲を規定し、寸法を変化させたグリップモデルを用いた握りやすさの評価を行うことにより、グリップ形状の最適化を図った。

図12にグリップの改良案を示す。試作はさみはグリップが直線状であり、後端に向かってハの字となる形状であった。これに対し改良案ではグリップ中間部の幅を大きくし、グ

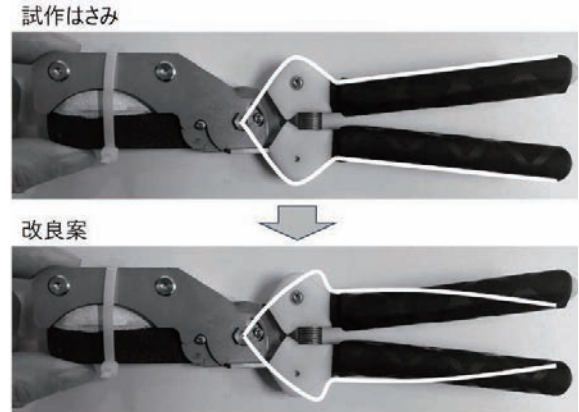


図12 グリップの改良案

リップ後端に向かって幅を狭くした。これにより、最大に開いた状態と最小に閉じた状態での力の入り具合の改善を見込んだ。図13に寸法案を示す。図中の固定寸法L1、L2、W2、W4（試作はさみをベースとした寸法）のほか、L3=35～55、L4=35～75、W1=22～24、W3=35～38、H=14～18として寸法範囲を定めた。

寸法範囲の最大・中間・最小で3パターンのグリップモデルを作製し（図14）、握りやすさに関するアンケート調査を行った。20～60代の男女7名の被験者（工業試験場職員）に対して行ったアンケート調査の結果を図15に示す。平均点が最も高く、自由意見においても否定的な意見が少なかったことから、グリップモデル2の形状を最適な形状とした。

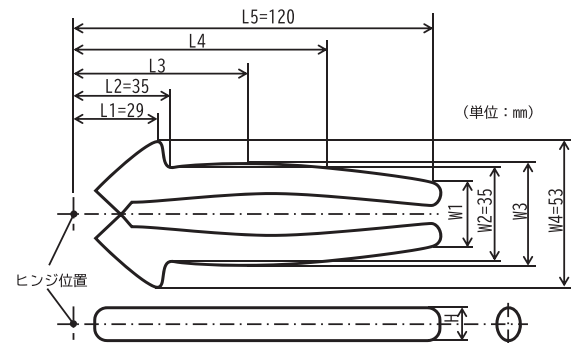


図13 グリップの寸法案



図14 作製したグリップモデル

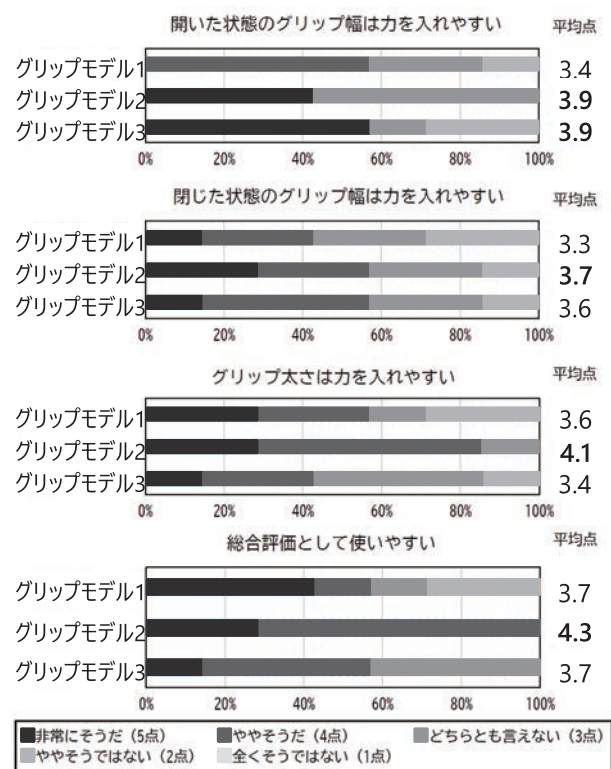


図15 アンケート調査の結果

4.2 プロトタイプの製作と使用テスト

力の入り具合の改善に向けたグリップ形状の検討結果をもとに、図16に示すプロトタイプを設計・製作した。グリップ形状の改良に加え、心材となるステンレスの板厚増加による剛性の向上と、刃部および刃受け部の形状変更による、デザインと重量バランスの改善を図った。

プロトタイプの農業従事者によるテスト使用を実施した結果、以下のような意見が得られた。

① 肯定的な意見

- ・前回から改良されている
- ・頑丈で歪みなどはない
- ・切れ味が良く軸を短く切りすぎることはない
- ・これまで使っていたはさみは1年で使えなくなる。替え刃式のメリットは大きい

肯定的な意見からは、使用感・剛性ともにプロトタイプの設計において考慮した改善点が効果的に反映されたと考えられる。

② 否定的な意見

- ・刃受けにゴミがたまる
- ・女性には少し大きい
- ・刃先を器用に使えない
- ・頂部が陥没している品種では軸の残りが長くなる
- ・軸が根本から変形している場合切りづらい



図16 製作したプロトタイプ

否定的な意見からは、カボチャの品種や形状によっては対応が難しい場合もあるが、はさみの形状にさらなる改善が求められていることが分かった。

5. おわりに

本研究では、カボチャの収穫作業を効率化・軽労力化することを目的とした新たな軸切りはさみの開発を行い、アンケート調査や生体情報計測等によりその有効性を確認した。さらに人間工学的観点をもとにしたグリップ形状の最適化と全体形状の改良により、十分な切断性能と優れた使用感を備えた新たなカボチャ軸切りはさみを開発した。

プロトタイプのテスト使用で指摘された否定的な意見は、開発したはさみの構造・形状（設計コンセプト）が、従来から使用されている専用はさみとは根本的に異なることに起因する。得られた全ての意見を反映したはさみ形状の創出は困難と考えられるが、今後も農業現場からの要望を実現できるよう可能な限りの創意工夫をかさね、製品化と普及に向けた取り組みを進める。なお、本研究成果は、共同研究機関である浅香工業株式会社による製品化を予定している。

参考文献

- 1) 日本産業衛生学会・作業関連性運動器障害研究会編：ワークデザイン第7版，労働科学研究所，pp.170, (2013)
- 2) 勝浦哲夫 他共編：人間工学基準数値数式便覧，技報堂出版，pp.122, (1992)

接触駆動式高速受動把持ハンドの開発

井川 久、川島 圭太、西村 斉寛*、渡辺 哲陽*

Development of a Contact-Driven High-Speed Passive Gripper

Hisashi IGAWA, Keita KAWASHIMA, Toshihiro NISHIMURA*, Tetsuyou WATANABE*

抄 録

近年、農業分野を含む屋外作業では人手不足が深刻化しており、省力化・自動化の導入が喫緊の課題となっている。一方で、アクチュエータ駆動型ロボットハンドは屋外環境の塵埃や風雨、泥汚れの影響を受けやすく、故障リスクの増大や保守・メンテナンス負担の増加が課題である。さらに、農作物の形状や大きさは品種や成長段階によって大きく異なるため、多様な対象物に柔軟に対応できる把持機構が求められている。

本研究では、アクチュエータを用いず、接触をトリガーとしてベルトに張力を生じさせ、指が受動的に閉じる高速受動把持ハンドを開発した。開発したハンドは、ベルト張力を機械構造に変換して指を閉じ、内部のラチェット機構により把持状態を保持する。さらに、指関節数の増加と指間距離可変機構の導入によって、床置き対象物への対応および多品種への適応を実現した。試作した第二世代プロトタイプによる性能評価では、従来の電動ハンドと比較して、高速性および汎用性の向上を確認した。

キーワード：受動把持、屋外作業ロボット、接触駆動、農業自動化、指間可変機構

Abstract

In recent years, labor shortages have become a critical issue in outdoor work environments, including agriculture, increasing the demand for labor-saving and automation technologies. However, outdoor environments are often affected by dust, rain, and mud, making actuator-driven robotic grippers prone to failure and requiring frequent maintenance. Furthermore, agricultural products vary significantly in size and shape depending on their type and growth stage, requiring versatile and adaptive gripping mechanisms.

In this study, we developed a high-speed passive gripper that operates without actuators, using a contact-driven mechanism. The proposed gripper initiates the grasping motion through belt tension generated by contact with the object and maintains the grasping posture using a ratchet mechanism. Additionally, we introduced a two joints finger structure and a variable finger span mechanism to improve adaptability to different product sizes and to enable gripping from floor surfaces. Performance evaluations of the second-generation prototype demonstrated improved gripping speed and versatility compared to conventional electric grippers.

KEY-WORDS : Passive grasping, Outdoor robotics, Contact-driven mechanism, Agricultural automation, Variable finger span

*金沢大学、*Kanazawa University

事業名：奨励研究

課題名：モーターレス型高速把持ハンドの開発（ファーストステージ）

指間距離を可変とするモーターレス型高速把持ハンドの開発（セカンドステージ）

1. はじめに

近年、国内製造業では人手不足が深刻化しており、各種工程の自動化・省力化が喫緊の課題となっている¹⁾。特に北海道では、製造業のみならず一次産業においても人手不足が深刻化しており、とりわけ農業分野においては、野菜などの収穫作業における労働力不足が顕在化しており、その省力化・自動化のニーズが急速に高まっている。このような背景には、労働人口の減少や高齢化といった構造的要因が存在し、農業の担い手不足は地域経済全体の持続可能性にも影響を与える深刻な社会課題である²⁾。加えて、近年はスマート農業の推進など政策的後押しも強まっており、生産現場へのロボット技術の導入は不可避の流れとなっている。

屋外作業の自動化を実現する上で特に課題となるのは、塵埃・雨風・泥汚れ・寒暖差などの過酷な環境条件である。このような環境下ではロボット全体の故障リスクが高まるが、特にハンドは対象物との接触頻度が高く、外力や汚れの影響を受けやすいため、モータなどのアクティブアクチュエータを使用しない構造が望ましい³⁾。実際に、アクチュエータ駆動型のハンドは防塵・防水構造のために高コスト化しやすく、頻繁なメンテナンスも必要となる。一方で、アクチュエータ不要の受動的な機構を用いたハンドは構造がシンプルであり、可動部の少なさから故障リスクが低減し、屋外でも安定した運用が期待できる。

さらに、生産性の向上の観点からは「高速把持」による作業効率化が重要である。特に農業現場では、把持完了までの時間が長いと全体の作業効率が低下し、コストの増大に繋がるため、これは一般的な産業現場にも共通するが、農業現場においては特に顕著である。従来のアクチュエータ駆動型ハンドでは、把持動作に数秒を要する場合も多く、十分な作業速度を達成できないことが課題となっていた⁴⁾。また、農作物は品種や成長段階により大きさが異なるため、固定された指間距離では対応できないケースも多く、把持対象に応じて指間距離を調整可能な機構が求められる。加えて、農業の収穫現場では地面に置かれた作物を直接把持する場合も多く、指先が対象物の下に自然に潜り込める構造でなければ実用には至らない。

ロボットハンドの研究分野では、制御性に優れたアクチュエータ駆動型ハンドの開発が進められてきた一方、前述した環境耐性や高速性、多品種対応の課題が残されている。受動的な把持機構に関しても研究例は存在するが、多くは特定の用途・対象物に限定されるものが多く、汎用性に課題がある。西村ら⁵⁾が提案したロボットハンド機構は、対象物との接触力を利用して受動的に把持動作を行うという新しいアプローチを提案しており、シンプルかつ高速な把持動作の可能性を示唆している。

本研究では、西村らが提案した受動把持機構を基礎として、

屋外作業および農作物への応用を目的とした接触駆動式高速受動把持ハンドを開発した。本ハンドは、対象物との接触によって指先のベルトに張力を生じさせ、その張力を指関節の駆動力として把持動作を実現する、受動的かつシンプルな構造を採用している。本研究における設計要件および構造上の特徴については、2.1節で詳述する。

2. 設計要件と基本概念

2.1 設計要件の定義

本研究の設計要件は以下の三点である。

第一に、屋外作業の厳しい環境条件に対応するため、モータ等のアクチュエータを用いない受動的な設計とする。塵埃や雨風、泥汚れ、寒暖差などの過酷な環境ではアクチュエータ系の故障リスクが高く、頻繁なメンテナンスを要する。一方、機械的なリンク機構と弾性要素のみで構成される受動システムは、耐環境性と信頼性の両面で優位性を持つ。

第二に、対象物との接触を契機として受動的に閉動作を開始し、迅速に把持を完了できることとする。従来のアクチュエータ駆動型ハンドでは把持に数秒を要する場合が多いが、本研究の方式では接触と同時に動作が始まり、作業サイクルタイムの短縮が可能となる。

第三に、多様な大きさや形状の農作物に対応できる汎用性を有することとする。単一品目専用設計では実用性が低く、作物ごとにハンド交換が必要となる。そこで、対象物の形状に柔軟に追従し、さらに指間距離の可変機構を備えることで、一台のハンドで複数種類の農作物を把持可能とした。

2.2 接触駆動受動把持の基本原則

本研究では、アクチュエータを用いず、対象物との接触によって生じる外力（押圧力）を関節の回転運動に変換して把持を行う「接触駆動式受動把持」の原理を構想した。この方式では、対象物との接触をトリガーとしてベルトに張力を発生させ、その張力を機械的に指関節の回転トルクへと変換することで、受動的な把持動作を実現する。

図1に示す概念図のように、2指間に張られたベルトが対象物に接触すると、ベルト張力が発生し、この張力が指先のプーリーおよび関節部の補助リンクを介して指関節を回転させる。この回転により、指が閉じる方向へ動き、対象物を包み込むように把持する。

本原理の利点は、動作に電力を要せず、構造が簡素で信頼性が高い点にある。また、ベルトが受動的に張力を調整するため、対象物の形状や剛性に応じた適応的な把持が自然に成立し、剛体・弾性体を問わず幅広い対象への適用が期待できる。

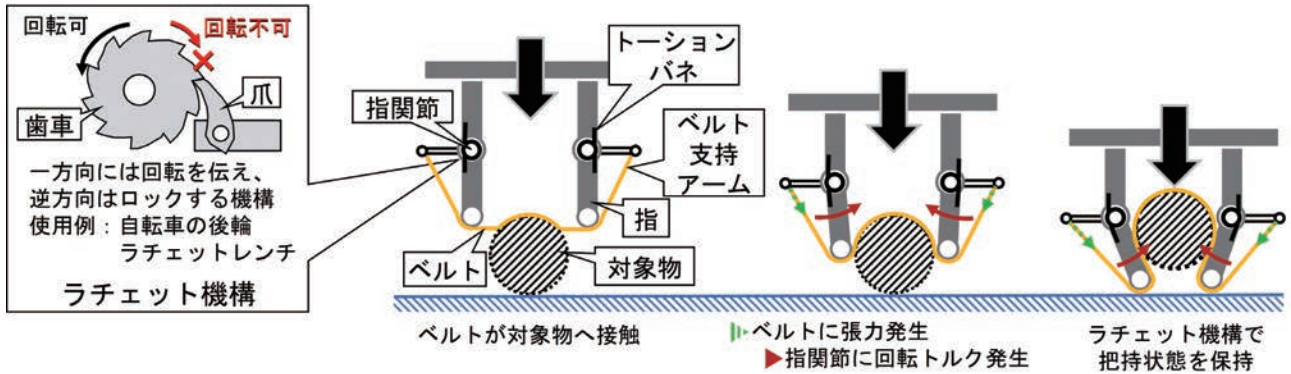


図1 接触駆動式受動把持ハンドの動作原理

2.3 ラチェット機構による把持後の姿勢保持の構想

把持後の姿勢を安定的に保持するため、本研究ではラチェット機構の導入を構想した。

ラチェット機構は一方方向の回転のみを許容し、逆回転を防止する機械要素であり、把持動作完了後に指の位置を機械的に保持することで姿勢を安定化できる。

図2に示す概念図のように、把持状態ではラチェットの爪が歯車に噛み合い、指関節の逆回転を抑制する。把持を解除する際には、リリースピンによって爪の拘束を解除し、トーションバネの復元力により指が開放状態へ戻る構造を想定している。このような受動的な姿勢保持機構を導入することで、把持後に外部から動力を供給する必要がなく、省エネルギー性と安定性の両立が可能になると考えた。

本原理にもとづく具体的な機構設計および試作結果については、3章にて述べる。

3. 第一世代プロトタイプの開発

3.1 基本機構の設計

前章で述べた接触駆動およびラチェットによる姿勢保持の構想をもとに、これらの原理を実際に具現化するための基本機構を設計した。具体的には、ベルト張力を利用した左右対称二本指の受動把持機構を設計し（図3）、各指の関節付近に配置したベルト支持アームにより、対象物との接触時に発生する張力を回転トルクへ変換する構造とした。さらに、歯

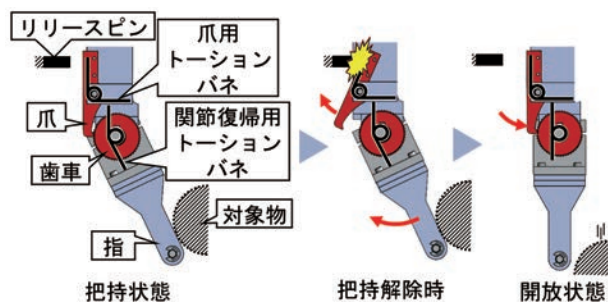


図2 ラチェット機構による関節角度保持と開放の動作原理

車・プーリー・タイミングベルトからなる同期機構を導入することで、左右の指が均等に閉じ、安定した把持姿勢を実現した。

指部には、対象物を傷つけず確実に把持することを目的として、弾性と摩擦特性に優れたシリコンベルトを採用した。特に農作物など傷つきやすい対象物への適用を考慮し、接触面の柔軟性を確保している。

また、指関節部には2章で構想したラチェット機構を実装した。指は閉方向のみに回転し、外力に対して把持状態を安定して保持できる。把持解除時にはリリースピンで爪を解除し、トーションバネの復元力により初期位置へ戻る構造とした。このように、受動的な動作による高信頼な姿勢保持を実現している。

3.2 試作と基本性能評価

以上の設計内容にもとづき、3Dプリンタ（PLA樹脂）を用いて第一世代プロトタイプを製作した。図4に評価試験環境と対象物の把持状況を示す。ベルト部には前述のシリコンベルトを用い、屋外使用を想定した安定した把持が可能な構成とした。

性能評価試験では、協働ロボットUR5eを用いてキュウリ、ニンジン、ナスの3種類の農作物を対象に把持試験を実施した。対象物に接触して把持した後、所定位置まで搬送する一連の作業時間を、市販の電動ハンド（2F Adaptive

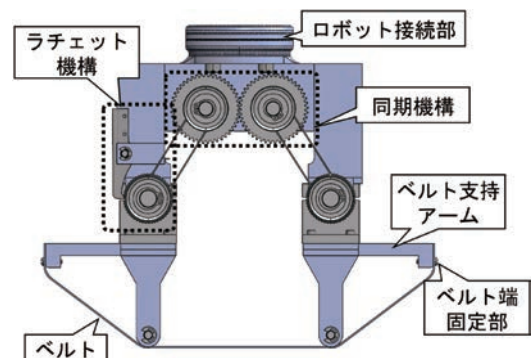


図3 第一世代プロトタイプの基本機構図

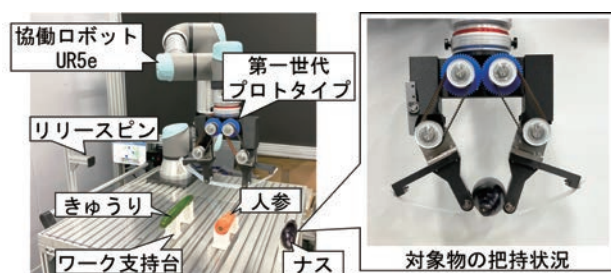


図4 第一世代プロトタイプの評価試験環境
対象物の把持状況

Gripper・ROBOTIQ社製）と比較した。その結果、第一世代プロトタイプでは総作業時間が20.2秒、市販ハンドでは24.6秒となり、約18%の作業時間短縮が確認された。すべての対象物で把持が成功し、把持後の保持状態も安定していた。

なお、本ハンドは床置き状態での把持が困難であったため、本試験では対象物をワーク支持台上に設置して評価を行った。この課題は、3.3節で述べる改良対象の一つとして抽出された。

3.3 課題の抽出

第一世代により、基本的な把持性能および把持速度の向上を確認した一方で、以下の課題が明らかとなった。

第一に、床置き状態の対象物に対する把持が困難であった。床面に置かれた対象物の下に指先が潜り込めなかったこ

とから、単関節構成であることおよび指先形状が太いことが主要因と考えられる。このため、収穫作業などの実環境では把持不能となるケースが想定された。

第二に、対象物の大きさに応じた柔軟な把持が難しかった。指間距離を固定構造としていたことが原因と考えられる。第一世代では指間距離を約80mmに固定していたため、サイズばらつきのある農作物への対応力が限定的であった。

以上の課題を踏まえ、第二世代プロトタイプの開発を行った。

4. 第二世代プロトタイプの開発

4.1 第二世代プロトタイプの開発方針

第一世代プロトタイプでは、「床置き対象物への対応困難」と「固定指間距離による汎用性の制限」という2つの課題が明らかとなった。これらの課題を解決するため、第二世代プロトタイプでは次の2点を改良方針として設定した。

- ・床置き対象物への対応：関節数増加・指先形状の見直し
- ・汎用性の向上：指間距離可変機構の導入

4.2 関節数増加による床置き対応

床置き状態の対象物を把持可能とするため、指構造および関節機構を改良した（図5）。

第一に、指先を薄型化し、床面との隙間が小さい対象物に対しても指先が下部へ自然に滑り込めるようにした。第二に、関節数を単関節から二関節構成へと増加させ、より柔軟な指先の動きを実現した。さらに、第一関節と第二関節が受動的に連動して動作する受動連動機構を新たに設計した（図6）。本機構では、第二関節軸に固定ギアを配置し、これに噛み合う可動ギアを第二リンク上に配置している。対象物との接触によってベルトに張力が発生すると、第二関節が回転し、可動ギアが固定ギアとの噛み合いにより受動的に回転する。その回転がタイミングベルトを介して第一関節に伝達される構造とした。本構成では、関節間のギア比を1:1に設定しており、第二関節が屈曲すると第一関節も同角度で屈曲す

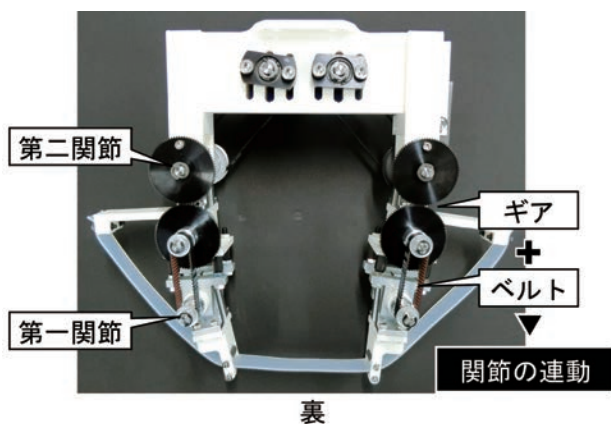
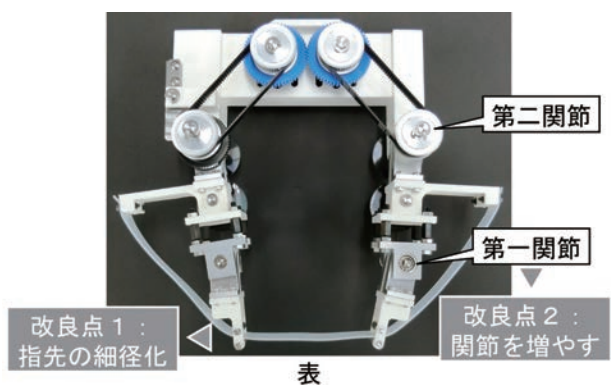


図5 第二世代プロトタイプの改良点

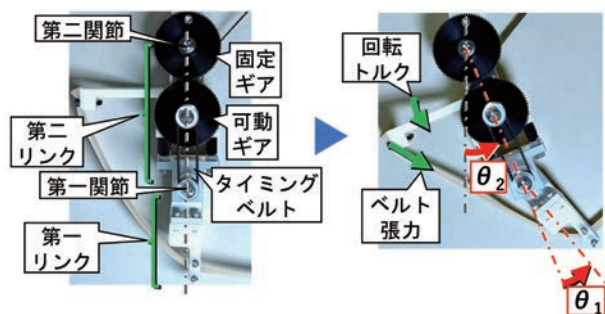


図6 二関節指の受動的連動機構（固定ギアと可動ギア、タイミングベルトによる連動動作）
対象物の把持状況

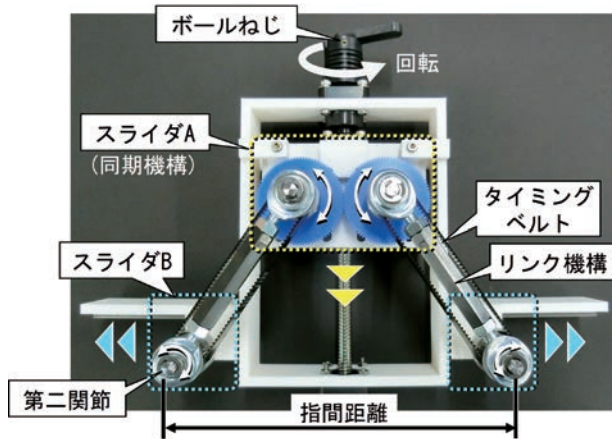


図7 第二世代プロトタイプの手間可変機構

る。これにより、対象物接触時のベルト張力のみで指先が自然に対象物下へ滑り込み、効率的かつ安定した受動把持が可能となった。

4.3 指間距離可変機構の開発

異なる大きさの把持対象に柔軟に対応するため、指間距離を可変とする新たな機構を開発した。図7に指間距離可変機構の構造を示す。

本機構では、上部に配置したボールねじを回転させることでスライダAが上下に直動し、リンク機構を介してスライダBが左右方向へ連動して移動する。この動作により、左右の指間距離を同時に拡張・縮小できる構造とした。さらに、リンク機構とタイミングベルトの長さを一定に保つことで、指間距離を変更しても左右の第二関節の動作が常に同期し、安定した把持動作を維持できるようにした。指間距離の可変範囲は60～120mmとし、ゴボウ、ニンジン、サツマイモなど、形状やサイズの異なる多様な農作物に対して柔軟に対応可能となった。

4.4 第二世代プロトタイプの設計・試作

4.1節で示した「関節数の増加による床置き対応」と「指間距離可変機構の導入による汎用性向上」の方針にもとづ

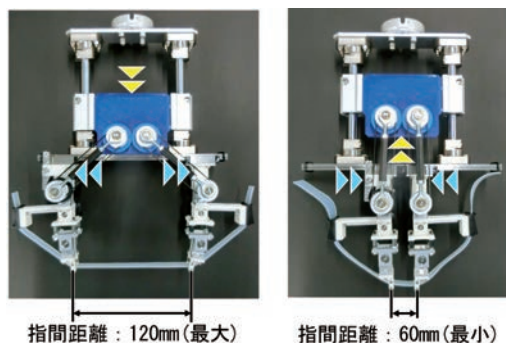


図8 第二世代プロトタイプの外観
(指間距離: 最大・最小)

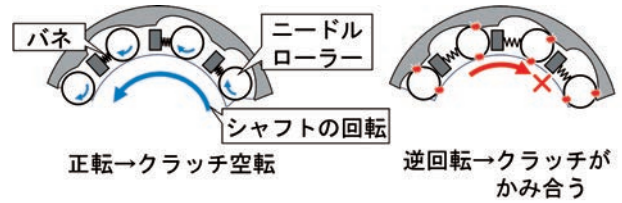


図9 ワンウェイクラッチの動作原理

き、第二世代プロトタイプの設計および試作を行った。図8に第二世代プロトタイプの外観を示す。基本構造は第一世代を踏襲し、主要構造部品には3DプリンタによるPLA樹脂製部品を採用した。指先にはシリコンベルトを用い、対象物への優しい接触と安定した把持を両立している。また、指間可変機構の摺動部にはリニアブッシュを組み込み、滑らかな動作と耐摩耗性の両立を図った。

一方、第一世代プロトタイプでは、把持状態の保持にラチェット機構を用いていたが、保持角度がラチェットの歯数に依存するため、特に床置き対象物など把持角度の微調整が求められる場面で課題が残っていた。そこで第二世代では、ラチェット機構を維持しつつ、その内側に逆回転を防止するクラッチ機構を組み合わせた構造とした。この構成により、把持方向への回転はワンウェイクラッチ(図9)を介してスムーズに動作し、反対方向の回転はラチェット機構によって確実に保持される。結果として、ラチェットの歯ピッチに依存しない無段階の関節角度保持が可能となり、より柔軟かつ高精度な把持保持を実現した。

5. 性能評価試験

5.1 試験環境と方法

第二世代プロトタイプの性能評価は、図10に示す試験環境で実施した。把持試験には協働ロボットUR5eを用い、開発したハンドをアーム先端に装着して行った。

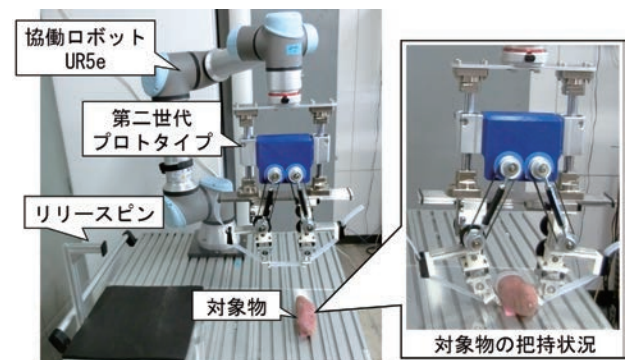


図10 第二世代プロトタイプの評価試験環境
対象物の把持状況

5.2 把持性能評価

第二世代プロトタイプの把持性能を評価するため、床置き

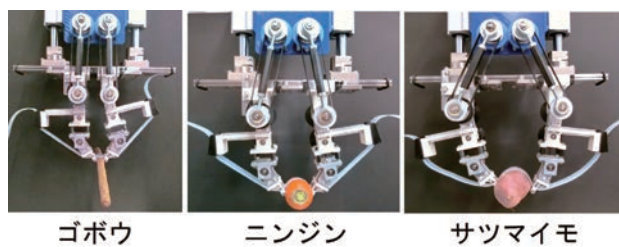


図11 把持試験の様子

状態での把持試験および多種類の農作物を対象とした把持試験を実施した。把持対象物はゴボウ、ニンジン、サツマイモの3種類とし、いずれも水平な平面上に直接配置して試験を行った(図11)。把持試験ではワーク支持台を使用せず、指先が対象物下部へ自然に潜り込む動作の有効性を検証した。

その結果、すべての対象物において安定した把持動作が可能であることを確認した。特に、第一世代プロトタイプで課題であった床置き状態での把持も問題なく達成でき、多様な形状・大きさの農作物に対して汎用的に対応可能であることが示された。さらに、ラチェット機構とワンウェイクラッチの組み合わせにより、把持後の姿勢保持も安定し、確実な把持保持が実現できることを確認した。

5.3 速度性能評価

把持速度性能を比較するため、開発した第二世代プロトタイプと市販電動ハンド(2F Adaptive Gripper・ROBOTIQ社製)による比較試験を実施した。把持対象物はサツマイモとし、協働ロボットUR5eを用いて、同一動作条件下で両者の把持および搬送動作を比較した。

比較試験では、ロボットの移動速度を両条件で統一し、市販ハンドではグripper開閉速度を最高速設定とした。図12に試験中の様子を示す。写真は把持動作を同時に開始した場面であり、開発ハンドが市販ハンドよりも早く把持を完了し、次動作に移行し始めている様子が確認できる。

試験結果として、開発ハンドの作業時間は6.9秒、市販ハンドでは8.1秒となり、開発ハンドは約15%の作業時間短縮を達成した。この結果から、接触駆動方式が把持速度の向上および作業効率化に有効であることが示された。

5.4 試験結果と考察

一連の性能評価試験の結果、開発した第二世代プロトタイプは、当初の開発目標である汎用性・高速性・床置き対応の各性能において十分な実用性を有することを確認した。

把持性能に関しては、ゴボウ、ニンジン、サツマイモを対象に把持試験を実施し、床置き状態を含むすべての対象物で安定した把持動作を確認した。特に、第一世代プロトタイプで課題であった床置き対象物の把持については、指先の薄型化と二関節構造の導入により改善が確認された。さらに、指間距離可変機構の導入によって、対象物の大きさに応じた柔

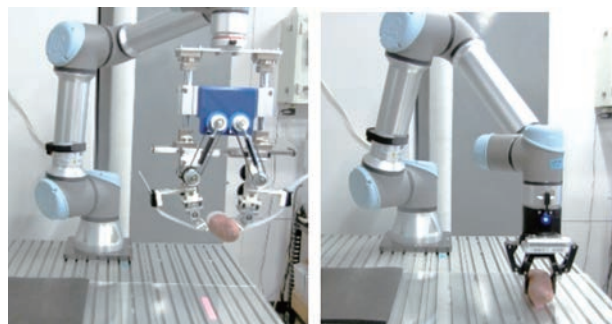


図12 開発ハンドと市販ハンドの速度比較試験の様子

軟な把持が可能となり、対応範囲が大幅に拡大した。

速度性能に関しては、市販電動ハンドとの比較試験により、開発ハンドが約15%短い作業時間を達成し、接触駆動方式の有効性が定量的に示された。

6. おわりに

本研究では、屋外作業の自動化を目的として、接触駆動式高速受動把持ハンドの開発を行った。特に、アクチュエータレスによる高耐環境性、床置き対象物への対応、多様な農作物に適応可能な汎用性の実現を目標とし、第一世代および第二世代のプロトタイプを段階的に開発した。

第二世代プロトタイプでは、指の二関節構造および指間距離可変機構を導入し、代表的な農作物(ゴボウ、ニンジン、サツマイモ)を対象とした性能評価を実施した。

その結果、床置き状態での把持、複数品種への柔軟な対応、そして市販ハンドと比較した高速な把持が可能であることを確認した。

一方で、現行プロトタイプでは指間距離変更時のベルト張力調整が手動であるなど、実用化に向けた課題も明らかとなった。今後は、張力調整の自動化機構の導入、さらなる耐久性評価、より複雑な形状を有する対象物への適応性向上を進め、実フィールドでの検証および実用化を目指す。

参考文献

- 1) 経済産業省：製造業を巡る現状と政策課題，(2017)
- 2) 農林水産省：スマート農業実証プロジェクト報告書，(2020)
- 3) 川島圭太，井川久，他：第24回計測自動制御学会SI部門講演会予稿集，3E3-01，pp.3431-3432，(2023)
- 4) 川島圭太，井川久，他：第25回計測自動制御学会SI部門講演会予稿集，3E3-02，pp.2855-2856，(2024)
- 5) Toshihiro Nishimura, Yoshinori Fujihira, et al.: *The ASME Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol.9, No.6, No. JMR-16-1232, pp.1-13, (2017)

人間中心設計のためのUXプロトタイピングに関する研究

高木 友史、万城目 聡、安田 星季、大久保京子、印南 小冬

Study on UX Prototyping for Human-Centered Design

Tomohito TAKAGI, Akira MANJOME, Seiki YASUDA,
Kyoko OHKUBO, Kofuyu INNAMI

抄 録

ユーザーズに適した製品やサービスの開発を目指す「人間中心設計」の取り組みでは、開発の初期段階でアイデアを紙や段ボールなどの身近な素材で素早く具体化する「簡易試作」が有効である。当場は簡易試作手法を開発し、様々な製品開発のプロジェクトに対して技術支援を行っているが、ラフな簡易試作だけでは開発メンバー間で、アイデアの詳細や発案者の意図の把握が難しいことや、次の段階に進むべきタイミングの判断に迷うケースが見受けられた。そこで、簡易試作に具体的なユーザ体験（UX）がわかる工夫を施すことで、開発メンバー間の共通理解や合意形成が促進でき、開発を円滑に進められると考えた。本研究では、人間中心設計の考え方と簡易試作手法をもとに、企業の企画・設計担当者など、デザイナーではない人たちでも手軽に活用しやすい「UXプロトタイピング手法」として、電子工作キットを用いてUXのリアリティを高める「拡張簡易試作」とミニチュアの簡易試作を用いてUXの全体像を表現する「ユースシーン試作」を開発した。

キーワード：製品開発、人間中心設計、簡易試作、ユーザ体験

Abstract

In the Human-Centered Design (HCD), which aims to develop products and services that satisfy user needs, simple prototyping which quickly materializes ideas using familiar materials such as paper and cardboard, is effective in the early stages of development. We have developed simple prototyping methods and provide technical support for various product development projects, but we have seen cases where rough simple prototyping alone makes it difficult for development members to grasp the details of the idea or the intentions of the proposer, and where it is difficult to determine when to move on to the next stage. Therefore, we thought that by incorporating measures in the quick prototyping that show the specific user experience (UX), it would be possible to promote common understanding and consensus among development members, and development could proceed smoothly. In this study, based on HCD and simple prototyping methods, we developed “Augmented Simple Prototyping” which uses an electronic work kit to enhance the reality of UX, and “Use Scene Prototyping,” which uses a miniature simple prototype to express the overall UX, as UX prototyping methods that can be easily used by non-designers, such as corporate planners and engineer staffs.

KEY-WORDS : Product Development, Human-Centered Design, Simple Prototype, User Experience

1. はじめに

ユーザニーズに適した製品・サービスの開発を目指す「人間中心設計」の取り組みでは、開発の初期段階で簡易的な試作（ラピッドプロトタイピング）を繰り返すことによるアイデアの具体化と検証が有効である¹⁾。当场では近年、道内の製造業などの中小企業に向けて、紙や段ボールなど身近な素材でアイデアを素早く簡単に具体化する簡易試作手法をとりまとめ²⁾、周知・普及に取り組んでいる（図1）。



図1 簡易的な試作の例

一方で、当场で道内中小企業が実施する様々な製品開発プロジェクトに対して技術支援を行うなかで、ラフな簡易試作だけでは「開発メンバー間でアイデアの詳細や発案者の意図の把握が難しい」、「次の段階に進むべきタイミングに迷う」といった問題に遭遇する場合があった。

具体的には、①一次産業に関連した製品・サービスや、日常生活またはデスクワーク以外の現場作業で使用される製品・サービスを、ユーザや要求仕様が不明確な状態で検討する場合、②通電使用する機械や電子機器でユーザの操作などに起因して動作するインタラクティブな機能を検討する場合などが挙げられる。

そのような場合、簡易試作に加えて製品・サービスが提供するユーザ体験（UX）を実際に体感・理解できるような試作（UXプロトタイピングと定義）を行うことで、開発メンバー間の共通理解や合意形成が促進され、より円滑に開発が進められると考える。

UXプロトタイピングは、サービスやアプリケーションなどのソフトウェア開発の分野で先行しており、ツールも豊富に存在する³⁻⁶⁾。一方で、ハードウェア開発の分野におけるUXプロトタイピングは、主に大企業のデザイン部署やデザイン研究者などによって試行錯誤しながら実践されているが⁷⁾、具体的な事例やノウハウが公開されることはなく、参照可能な情報は少ない。また、首都圏と比較して、道内には企業内デザイナーやデザイン事務所またはフリーランスのプロダクトデザイナーが非常に少ない^{8,9)}ことから、企業の企画・設計担当者自らが取り組める手法が求められる。

そこで本研究では、人間中心設計の考え方と簡易試作手法をもとに、製造業・サービス業の企画担当者や設計担当者など、デザイナーではない人たちでも有効活用できるUXプロトタイピング手法を開発した。

2. ユーザ体験（UX）と研究のアプローチ

UXとは、ユーザが製品・サービスを利用する際の体験全体であり、UXを考えるうえでは製品とユーザだけでなく、これらを取り巻く環境（場所・空間）や関係する他のモノ、ヒト、製品を使用する時間の経過等も考慮する必要がある。そのため、UXを「1.製品とユーザの関係を中心にUXの詳細を掘り下げる」、「2.製品とユーザを取り巻くUXの全体像を描く」、2つのアプローチで捉えることが必要と考えた（図2）。

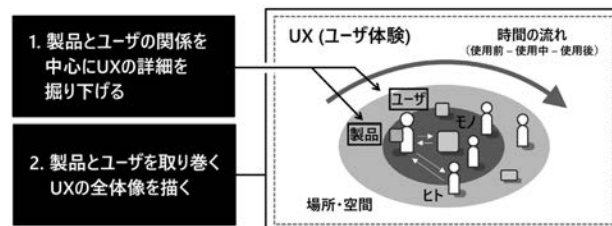


図2 UXを理解するためのアプローチ

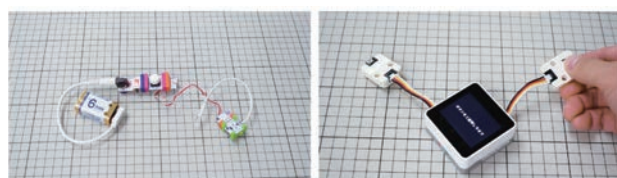
そこで、2つのアプローチを含むUXプロトタイピング手法の検討を行い、当场で取り組んでいる企業への製品開発支援の中で試行しながら手法の有効性を検証し、企業がUXプロトタイピング手法を活用できるようにツールをとりまとめることとした。

3. UXのリアリティを高める「拡張簡易試作」

3.1 手法の検討

初めに、1つめのアプローチである「製品とユーザの関係を中心にUXの詳細を掘り下げる」視点から手法検討を行った。なるべく手間と時間をかけず簡易試作に機能を実装して体験できるようにすべきと考え、様々な機能の実装に対応でき、ユーザと機器とのインタラクション（ユーザ操作やフィードバック等）について任意の条件を設定できるなど、汎用性が高い既存の電子工作キットを用いる手法を考案した。

さらに、簡易試作の特長である「素早さ、簡単さ」が活かせるよう、①簡便性（プログラミング不要または容易、部品接続の簡易さ）、②拡張性（実装可能な機能の豊富さ、組み合わせの自由度）の観点で比較検討を行い、マグネット式のモジュールをつなげていくだけで、機能を構成できる「LittleBits¹⁰⁾」と、多くの機能が一つにまとまったモジュールに様々な拡張ユニットをつなげて利用できる「M5Stack¹¹⁾」を選定した（図3）。



LittleBits M5Stack
図3 今回選定した既存の電子工作キット

以上の検討から、紙や段ボールなど身近な素材で素早く作成した簡易試作に、電子工作キットを用いて機能を追加し、実際に動作させることでUXのリアリティを高める手法を「拡張簡易試作」とする。

3.2 ケーススタディによる試行

製品開発プロセスのうち製品企画フェーズにおける拡張簡易試作を具体的に説明するために、「近づいたらフタが開く」を製品コンセプトとするスマートゴミ箱を例として下記に示す（図4）。段ボールでつくった簡易試作では、ゴミ箱のサイズ感や上面のフタが開閉可能であることはわかるが、「近づいたら開く」というのはどのように開くのかまではわからない。口頭で説明したり、手動で開いて演じてみても、相手に意図が伝わらない可能性が高い。

そこで、電子工作キットのセンサーやモーターを追加し、人の動きをトリガーにしてフタが開くギミックを簡易的につくることで、実際にフタが開く体験を検証できるようにした。

さらに、モーションセンサーで人の動きを検知する方法と、距離センサーで足元を検知する方法の2種類を体験することで、どのようなタイミングでフタが開くと良いのかを検証することが可能である。

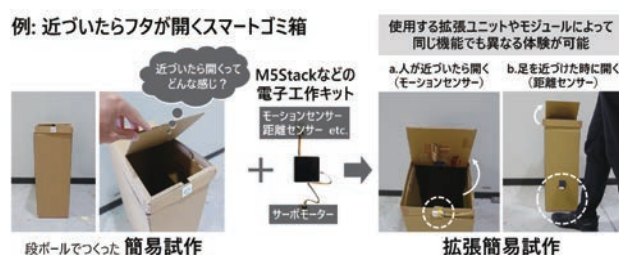


図4 スマートゴミ箱の拡張簡易試作

このような拡張簡易試作をケーススタディ（15件）で試行した結果、簡易試作だけでは体験が難しい「光る」「振動する」「振る」等の動的な機能について、ユーザは実体験を通じてより具体的かつ確かなコメントが可能となり、有益なフィードバックを得ることができた。

例えば、水素燃料を用いた調理用コンロの事例では、水素を燃焼させると通常、炎の色は無色だが、黄色や緑など普段見かけない色に炎色してはどうかといったアイデアが出た際、簡易試作した水素コンロにM5StackのLEDユニットを

取り付け、開発メンバーに炎の色を疑似体験してもらった。この体験により、普段見かけない色の炎の感触がつかめ、実際に水素燃料を用いたバーナーを使って炎色効果を確認する実験に進むことができた（図5）。



図5 水素燃料を用いた調理用の事例

また、片耳難聴者が音環境を認識するためのデバイスの事例では、ヘッドギア型の簡易試作にLittleBitsのモジュールを取り付け、デバイスが検出した音に対応して「首元に風が当たる」、「耳の後ろ（頭部）に振動が伝わる」、「首元に動く羽根が触れる」といった様々なフィードバックを開発メンバーやユーザに体験してもらった。この体験から「（ファンを用いた）風は、風の当たった感触は心地よいがフィードバックとしては弱い」「振動はフィードバックとして慣れていてわかりやすい」「羽根は不思議だが慣れたら意外と良い」等の具体的なコメントやアイデアが得られた。さらに、羽根のフィードバックのアイデアをもとに、アクセサリ感覚で身に着けたいというコメントから「羽根」を「尾」に変更し、M5Stackの拡張ユニットとサーボモーターを用いて、音を認識すると首元に尾が動いて触れるデバイスの拡張簡易試作を作製し体験してもらった。この体験から「尾が触れるのはくすぐったいけどとても良い」「尾がかわいくしてほしいですね」などのコメントが得られた。このように、開発メンバーやユーザの共感や納得を得ながら、プロトタイプを発展させることができた（図6）。



図6 音環境を認識するデバイスの事例

これらの事例を含めたケーススタディを通じて、拡張簡易試作は、「アイデアの深掘りや検証、ユーザ要求の抽出」に有効であることがわかった。ブレインストーミングにおいて採用されずに破棄されるようなアイデアでも、あえて試して体感することで、検討を継続できた事例もみられた。また、まずはマグネット式のモジュールをつなげるだけで動作できるLittleBitsで即興的に体感し、動作タイミングや強さをプ

プログラムで調整できるM5Stackで細かいところを体感する、といった検討段階に応じた電子工作キットの使い分けも可能である。

3.3 ツールの検討

ケーススタディの試行結果を踏まえると、電子工作キットを用いて拡張できる機能は、「ボタンを押したら光る」、「人を感じたら振動する」といったように、「〇〇 (INPUT) したら、×× (OUTPUT) する」のような形式の体験構造を用いて表現できる (図7)。

そこで、拡張簡易試作に使えるようなM5Stackの拡張ユニットやLittleBitsのモジュールを「INPUT (Sense & Action)」として65項目、「OUTPUT (Feedback)」として17項目に分類・体系化し、「簡易試作の拡張メニュー」として一覧表にとりまとめた (付録)。電子工作キットの拡張ユニットやモジュールの選定がスムーズになるよう、機能をOUTPUTとINPUTそれぞれ五十音順に並べ、実現可能な拡張ユニット・モジュールを紐づけて記載している。

さらに、電子機器の機能として活用頻度が多いと思われる組み合わせについては、14種類のサンプルプログラム (M5Stack/UIFlow) を用意し、プログラミングの知識がなくても参照・活用できるようにした。

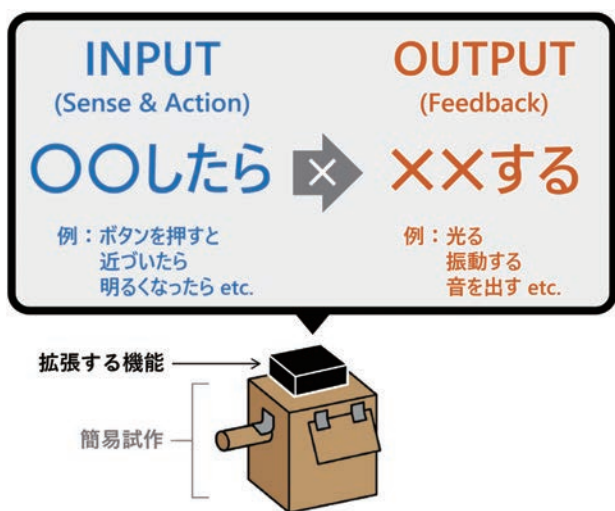


図7 拡張簡易試作の体験構造

3.4 製品企画フェーズから製品設計フェーズへの移行

拡張簡易試作は、開発メンバーに設計者が含まれていない場合において、3.2節で有用性を検証した製品企画フェーズのみならず、企画案を設計者に検討依頼するといった次工程の製品設計フェーズへ移行する際にも有効ではないかと考えた。

この仮説を検証するため、道内企業 (IoT開発会社) にヒアリングを実施したところ、対象企業からは「具体的な仕様

作の工数削減に有効である」との回答が得られた。そこで、同企業にケーススタディで製作した「音環境を探索するデバイス (図6)」の拡張簡易試作 (M5Stack) とプログラム (UIFlowコード) を提供し、これらをもとにした設計試作を依頼した (図8)。

例：音環境を探索するデバイス (M5Stack)

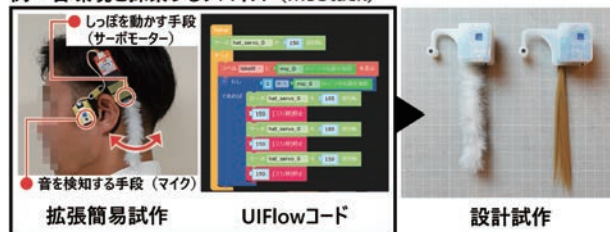


図8 設計試作

その結果、要求仕様は意図どおりに理解され、さらにM5Stackの拡張ユニットやプログラムを一部流用するなどして効率的に設計試作の開発ができたことから、拡張簡易試作が次工程への円滑な移行にも有用であるといえる。

4. UXの全体像を表現する「ユースシーン試作」

4.1 手法の検討

次に、2つめのアプローチである「製品とユーザを取り巻くUXの全体像を描く」視点から手法検討を行った。簡易試作はサイズ感などを確認するため、基本的に原寸大のサイズでつくることを推奨しているが、その場合、製品そのものの検証が主体となってしまう、製品とユーザを取り巻くUXの全体像まで把握することは難しい。

一方、公立はこだて未来大学では、スチレンボード上に雑誌等から切り抜いた登場人物や部屋・建物といったステージ、道具類をミニチュアとして並べる「箱庭法」という簡易的な表現方法が実践されている¹²⁾ (図9)。「箱庭法」は、主に学生が授業やワークショップなどで未来の活動を描く方法として用いられているが、手法としては体系化されていない。

そこで、箱庭法を参考に、ミニチュアサイズで作成した製品の簡易試作に、ユーザやその他必要なものを追加することで、製品やサービスの利用状況を再現し、UXの全体像を表現する手法を「ユースシーン試作」として、製品開発向けに応用できないか検討した。



図9 箱庭法



図11 工場見学の掲示物の事例

4.2 ケーススタディによる試行

ユースシーン試作を具体的に説明するために、「近づいたらフタが開く」を製品コンセプトとするスマートゴミ箱を例として下記に示す（図10）。段ボールでつくった簡易試作だけでは、生活空間の中でスマートゴミ箱をどのように配置して使うのか、周囲の環境やユーザの導線など、スマートゴミ箱を取り巻くユースシーンの全体像を把握しながら開発メンバー間でイメージを共有することは容易ではない。

そこで、ミニチュアサイズでスマートゴミ箱の簡易試作を作製し、あわせて什器や人物もミニチュアサイズで簡易試作を行うことで、キッチン・ダイニングでスマートゴミ箱を使用するユースシーンを検証できるようにした。このユースシーン試作では、キッチンのカウンター下にゴミ箱が置かれており、キッチンでの作業中は人とゴミ箱の位置関係が近く、食器や食材を取り出すなど、人の行き来が多いことが確認できる。そのような状況を開発メンバー間で共有した上で、人が近づいたらフタが開く機能を検討することが望ましい。

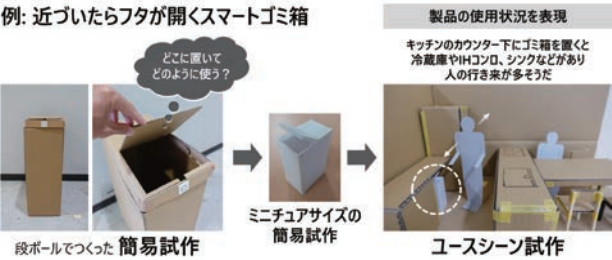


図10 スマートゴミ箱のユースシーン試作

ユースシーン試作をケーススタディ（7件）で試行した結果、ユーザの利用状況が俯瞰的に表現された状態を通じてより包括的な観点から具体的かつ的確な問いやコメントが可能となり、有益なフィードバックを得ることができた。

例えば、工場見学の掲示物の事例では、既存の見学通路を簡易試作し、フォトスポットやビデオ視聴スペースなどを配置した。開発メンバーで議論していくなかで、順路における展示のストーリー性やビデオ視聴中の騒音についてなど、ユーザが体験する空間や環境に対する具体的なコメントや改善アイデアが得られ、企画案の詳細を検討する段階に進むことができた（図11）。

これらの事例を含めたケーススタディを通じて、ユースシーン試作は、製品アイデアの利用状況だけでなく、「アイデアに至る背景や文脈の把握」に有効であることがわかった。また、住居や事務所、工場、サーバールーム、避難所など、屋内・屋外に関わらず様々な空間・場面の事例で試行できたことから、汎用性の高い手法として様々な分野で利用が可能である。

4.3 ツールの検討

ケーススタディの試行結果を踏まえると、ユースシーンを試作するための構成要素は、「製品」「関係物」「使用者」「関係者」「背景」「床面」の6つに分けられる（図12）。これらの要素を表現できれば、試作方法や表現の抽象度に関わらず、相手に製品の利用状況を伝える目的は達成できる。

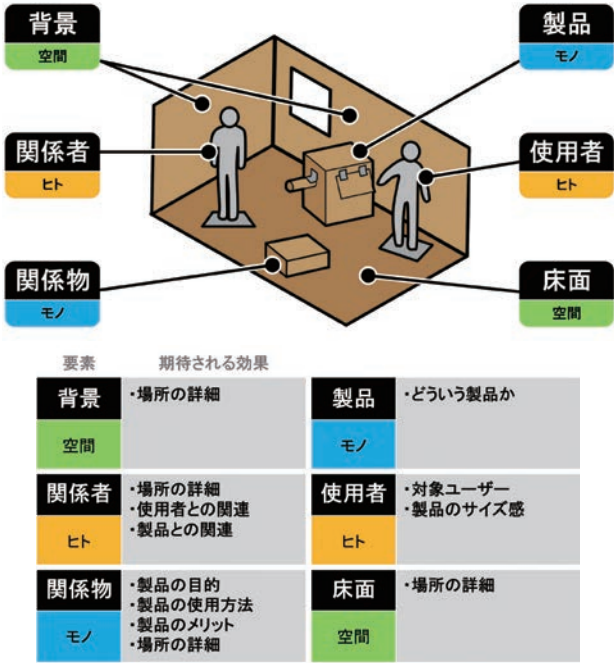
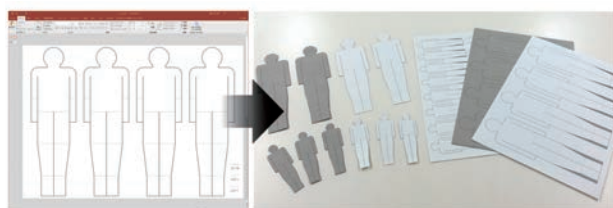


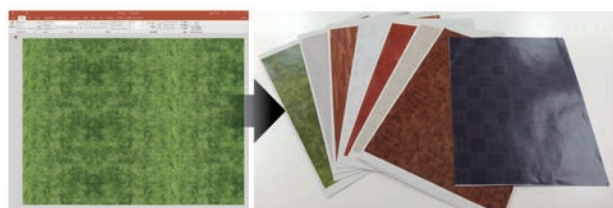
図12 ユースシーン試作の構成要素

そこで、6つの構成要素の中で利用頻度が高く、ユースシーン試作における作業効率化や質向上といった導入効果が見込まれそうな「人（1/10・1/20スケール）」と「床面（10種）」をツールキット化した（図13）。ツールキットは、汎用

的なファイルフォーマットであるMicrosoft PowerPoint形式やAdobe PDF形式で作成しており、プリンターで印刷して切り貼りするだけで使用可能である。



人（1/10スケール・1/20スケール）



床面（芝生、コンクリートなど10種）

図13 ユースシーン試作のツールキット

4.4 デザイン講座での検証とツールキットの追加

ユースシーン試作およびツールキットの有効性について、当场で毎年開催している「デザイン開発力向上講座」のなかで、道内企業4社7名にユースシーン試作を試行してもらった（図14）。作業時間30分に対して、どの企業も時間内にユースシーン試作を完成させることができ、事後アンケートのコメントからも、人と床面のツールキットが試作作業の負担軽減に寄与したことを確認することができた。

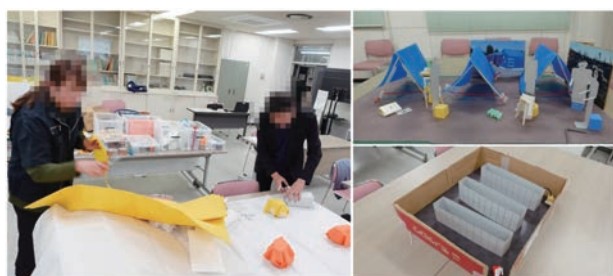


図14 デザイン開発力向上講座での試行

また、ユースシーン試作の効果についてアンケートをとったところ（図15）、「アドバイスや意見をもらいやすかった（5票）」、「ユースシーンを具体的に検討できた（4票）」などに多くの回答が得られ、ユースシーン試作の有用性が示唆された。

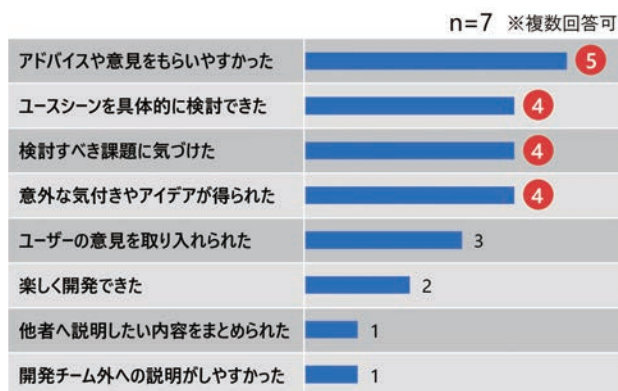


図15 ユースシーン試作の効果

さらに、デザイン開発力向上講座での参加企業のユースシーン検討過程および結果を考察したところ、多くの事例で、ユーザや関係物・関係者、要求仕様が不明確な状態から検討が始まり、グループワークでの探索を経て、製品企画案を具体化していた。そこで、ユースシーン試作を用いたグループワークでの議論を円滑化・活性化するために「問いカード」を作成し、ツールキットに追加した（図16）。

問いカードは「基本カード」が9枚と、「深掘りカード」が18枚で構成されており、表面には開発メンバーに投げかける「問い」、裏面には補足説明が記載されている。

「基本カード」は、いつ・どこで・誰が・どのようにして・なぜ使うのか、使った場合にどんなメリットがあるか、のように主にユースシーン試作をつくる前段階において製品コンセプトを検討する際に使用する。「深掘りカード」は、ユースシーン試作の前後で、「基本カード」を用いて検討したコンセプトからさらに使用状況や背景、文脈の深掘りを行う際の使用を想定している。



図16 問いカード

5. 企業に向けた研究成果の公開

これまでのUXプロトタイプング手法の検討で得られた知見をまとめ、当场で運営している「試作活用ガイド¹³⁾(Web)」に利活用の方法や、拡張簡易試作の拡張メニュー・サンプルプログラム、ユースシーン試作のツールキット(人・床面・問いカード)などのコンテンツを拡充し、企業が閲覧・活用できるようにした(図17)。



図17 拡充したコンテンツ

6. おわりに

UXプロトタイプング手法として開発した「拡張簡易試作」と「ユースシーン試作」が、製品開発における簡易試作の課題解決に有効な手段であることを確認した。また、道内中小企業の企画・設計担当者が活用できるように、Web上でのわかりやすい情報提供やサンプルプログラムやツールキットなどコンテンツの提供を行った。

今後は、さらなるWebコンテンツの拡充を図るとともに、技術支援やデザイン講座におけるハンズオン支援の中で本手法の技術移転を進めていく予定である。

7. 謝辞

最後に、本研究を進めるにあたり、拡張簡易試作のケーススタディやユースシーン試作の整理に関して公立はこで未来大学 岡本特命教授に、M5Stackの知見に関して金沢大学 秋田教授にご助言・ご協力をいただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) ティム・ブラウン：デザイン思考が世界を変える
イノベーションを導く新しい考え方, 早川書房, pp114-141, (2010)
- 2) 印南小冬 他：北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.321, pp47-51, (2022)
- 3) Figma <https://www.figma.com/ja-jp/>
- 4) Axure <https://www.axure.com/>
- 5) UXPin <https://www.uxpin.com/jp>
- 6) Canva https://www.canva.com/ja_jp/prototypes/

- 7) 蓮池公威 他：日本デザイン学会誌デザイン学研究特集
号通巻70号, pp24-29, (2011)
- 8) 経済産業省大臣官房調査統計グループ：平成30年特定
サービス産業実態調査報告書, デザイン業, 機械設計
業編, pp52-53, pp84-87, (2019)
- 9) 北海道経済部産業振興局産業振興課：北海道デザイナー
リスト (プロダクトデザイン関連), (2025)
- 10) LittleBits <https://littlebits.com/getting-started>
- 11) M5Stack <https://m5stack.com/>
- 12) 岡本 誠 他：日本デザイン学会研究発表大会概要集日
本デザイン学会第63回研究発表大会, pp46-47, (2016)
- 13) 試作活用ガイド <https://designproto.design.blog/>

付録

	INPUT	カテゴリ	M5Stack	LittleBits
あ	(環境・空間が)明るくなった	環境光測定	LIGHT	LIGHT SENSOR i13
い	色が【色名】になったら	色検出	COLOR	
	【色名】のときに			
	息を吹きかけたら			
お	音がしたら	音検出	MIC	SOUND TRIGGER i20
	【数値】g 重くなった	重量測定		
	重さが【数値】になったら	重量測定	WEIGHT	
	(環境・空間の)温度が【数値】℃上がった			
	(環境・空間の)温度が【数値】℃下がった	温度測定	ENV CO2L	TEMPRATURE SENSOR i12 (温度が高くなるにつれて出力が大きくなる)
	(環境・空間の)温度が【数値】℃になったら			
	(人の)温度が【数値】℃上がった			
	(人の)温度が【数値】℃下がった	温度測定	NCIR THERMAL	
	(人の)温度が【数値】℃になったら			
か	顔(人)を検出した	画像認識	UnitV	
	【数値】人の顔(人)を検出した			
	【数値】g 軽くなった	重量測定	WEIGHT	
き	【数値】hPa 気圧が上がった	気圧測定	ENV	
	【数値】hPa 気圧が下がった			
	気圧が【数値】hPa になったら			
	キーを押したら	ボタン操作	KEY	
	QRコードを検出した	画像認識	UnitV	
	【数値】個のQRコードを検出した			
く	(環境・空間が)暗くなった	環境光測定	LIGHT	LIGHT SENSOR i13
こ	声が聞こえたら	音検出	MIC	SOUND TRIGGER i20
さ	(環境・空間の)CO2濃度が【数値】ppm 上がった			
	(環境・空間の)CO2濃度が【数値】ppm 下がった	CO2濃度測定	CO2L	
	(環境・空間の)CO2濃度が【数値】ppm になったら			
	(環境・空間の)湿度が【数値】% 上がった	湿度測定	ENV CO2L	
	(環境・空間の)湿度が【数値】% 下がった			
	(環境・空間の)湿度が【数値】% になったら			
し	ジョイスティックを上を動かしたら	ジョイスティック操作	JOYSTICK	
	ジョイスティックを下を動かしたら			
	ジョイスティックを右に動かしたら			
	ジョイスティックを左に動かしたら			
	心拍を検出した	心拍数測定	HEART	
	心拍が【数値】になったら			
た	ダイヤルを回したら	ダイヤル操作	ANGLE	
	ダイヤルを【角度】° 回したら			
つ	つまみを【数値】動かすと	フェーダー操作	FADER	SLIDE DIMMER i5
	つまんだら	圧力検知		PRESSURE SENSOR i11
て	手を振ったら	ジェスチャー操作	GESTURE	
	電源をオン/オフする	ボタン操作 スイッチ操作	BUTTON M5 Display DUAL BUTTON	SLIDE SWITCH i1 TOGGLE SWITCH i2
な				
に	(対象を)振ったら	圧力検知		PRESSURE SENSOR i11
は	バーが押されると	リミット検知	LIMIT	
ひ	人が動いたら、人が来たら	人(動物)検知	PIR	MOTION TRIGGER i18
	人が近づいたら			
	人が離れたら	距離測定	ToF ULTRASONIC	
ふ	2つの対象物の間が【数値】mm になったら			
	2つの対象物の間が【数値】～【数値】mm の範囲で			
は	ボタンを押したら	ボタン操作	BUTTON	BUTTON i3
	(M5Stack画面内に表示した)ボタンを押したら	ボタン操作	M5 Display	
	(ボタンが2つあるうちの)ボタン1(青)を押したら	ボタン操作	DUAL BUTTON	
	(ボタンが2つあるうちの)ボタン2(赤)を押したら	ボタン操作		
ま	曲がったら、曲げたら	曲げ検知		VEND SENSOR i24
も	モノ(物体)を認識したら	画像認識	UnitV	
	【数値】個のモノ(物体)を認識したら			
や				
ゆ	指を【上】に移動させたら			
	指を【下】に移動させたら			
	指を【左】に移動させたら	ジェスチャー操作	GESTURE	
	指を【右】に移動させたら			
	指を【前】に移動させたら			
	指を【後】に移動させたら			
	指を【時計回り】に移動させたら			
	指を【反時計回り】に移動させたら			
ら				
わ				

	OUTPUT	カテゴリ	M5Stack	LittleBits
あ				
う	(対象が)【数値】° 動く(傾く)	動き	SERVO	
お	音を出す	音	BUZZER	BUZZER
か	風がくる(を出す)(が出る)	風	FAN	FAN o13
	画像を表示する	表示	OLED COLOR LCD M5 Display	
き	キーを光らせる	光	KEY	
く	グラフを表示する	表示	OLED COLOR LCD M5 Display	
け	警告する	音	BUZZER	BUZZER
さ				
し	時間を表示する	表示	DIGI-CLOCK	
	振動する(させる)	駆動	VIBRATOR MOTOR	VIBRATION MOTOR o4
す	(対象が)スイングする	動き	SERVO	SERVO MOTOR o11
た				
て	点滅して光る	光	RGB LED FLASH LIGHT	LED LONG LED o2 BRIGHT LED ROUND LED o29 LIGHT WIRE PLUSE i16 の組み合わせ
な	(数値・アルファベットなど)7seg表示する	表示	DIGI-CLOCK	NUMBER o21
は				
ひ	(LEDが)光る	光	RGB LED FLASH LIGHT	LED LONG LED o2 BRIGHT LED ROUND LED o29 LIGHT WIRE
	(LEDが)【色名】に光る	光	RGB LED	ROUND LED o29
	(対象が)開く	動き	SERVO	
ま	(対象が)回る、(対象を)回す	動き	SERVO FAN	DCMOTOR SERVO MOTOR o11
も	文字を表示する	表示	OLED COLOR LCD M5 Display	
や				
ら				
わ				

簡易試作の拡張メニュー

レーザー熱処理によって改質した金型用工具鋼の熱影響部組織の解析

櫻庭 洋平、川上 諒大、宮腰 康樹、高橋 英徳*、大津 直史**

Analysis for the Microstructure of Heat-Affected Zone at Tool-Steel for Die Treated by Laser Heat-Treatment

Yohei SAKURABA, Ryota KAWAKAMI, Yasuki MIYAKOSHI
Hidenori TAKAHASHI*, Naofumi OHTSU**

抄 録

エンジン部品や電子機器筐体の量産に用いられるダイカスト用金型は、鋳造時に繰返される熱応力によりヒートクラックが生じるため、損傷部を溶接補修で復元し再び使用される。しかし、溶接による組織変化で熱影響部の硬さや靱性が低下し型寿命が新作金型の1/5以下になることから、型寿命の向上には熱影響部に対する熱処理が必要であり、適切な熱処理条件を導くためには熱影響部の硬さ変化のメカニズムを冶金学的に解析する必要がある。

本研究では、熱影響部の硬さを制御する適切なレーザー熱処理条件を探るため、Mo量を改良したJIS SKD61鋼の熱影響部の硬さと組織の関係を解析し、マルテンサイト変態と過熱焼戻により熱影響部に硬さ分布が形成されることを明らかにした。これをもとに設定温度の異なるレーザー熱処理を熱影響部に加え、軟化領域を硬化させ熱影響部全体の硬さを平準化するレーザー熱処理条件を明らかにした。

キーワード：ダイカスト用金型、熱影響部、マルテンサイト変態、過熱焼戻組織、レーザー熱処理

Abstract

Die-casting mold that is used for mass production about the housing parts of car engine and electronic equipment, occurs a thermal crack caused by repeated thermal stress of casting. Therefore, damaged part is repaired by welding and then used again. Nevertheless, lifetime of repaired mold is reduced less than 1/5, because of the decrease in hardness and toughness of heat-affected zone (HAZ), caused by the structural changes for repair welding. To find the suitable heat-treatment conditions for HAZ, analysis the hardness changing mechanism of HAZ by metallurgically is necessary.

In this research, relations of hardness to microstructure of HAZ, which is the Mo content modified JIS SKD61 steel, is analyzed to reveal the suitable conditions of laser heat-treatment for control the HAZ hardness. As a result, hardness distribution of HAZ is formed by martensitic transformation and over-tempered conditions. Furthermore, several temperatures of laser heat-treatment are added to HAZ, and then revealed a laser heat-treatment condition which is changed a softened region to hardened and equalized of whole HAZ.

KEY-WORDS : Die-casting Mold, Heat-affected Zone (HAZ), Martensitic Transformation,
Over-tempered Microstructure, Laser Heat-treatment

* 北海道立工業技術センター、* Hokkaido Industrial Technology Center

** 北見工業大学、** Kitami Institute of Technology

事業名：経常研究

課題名：金型材料およびその溶接部への局所熱処理における冶金的メカニズムの解明

1. はじめに

ダイカスト casting は、金型に溶融したアルミニウム合金や亜鉛合金を圧入する casting 法であり¹⁾、寸法精度や強度が高く、また casting 工程を自動化しやすいことから大量生産に適している。このため自動車のエンジン部品や電子機器の筐体部品などの生産に幅広く使用されており²⁾、道内でもバルブボディやウォーターポンプボディなどの自動車部品が量産されている。casting 工程は、2 個以上に分割可能な金型をダイカストマシンに設置し、溶融金属を圧入して冷却後に金型を開いて casting 品を取り出し、離型剤を塗布して次の casting に移る (図 1)。

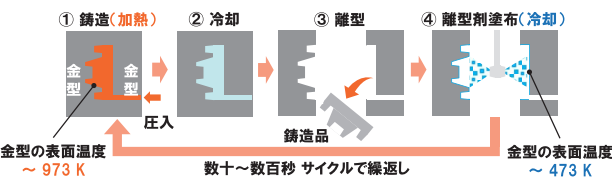


図 1 ダイカスト casting の casting 工程

このとき、金型の表面は 973K 付近の高温高压溶湯が接触した後、離型剤の塗布によって 473K 以下に急冷されることで熱応力が生じ、短時間でこれを繰り返すことでヒートクラックと呼ばれる網状の割れが生じる³⁻⁶⁾。

ヒートクラックが拡大すると casting 品の不良率が増加するため、損傷部を切削除去した後肉盛溶接で補修し元の形状に復元して再び使用される⁷⁾ (図 2)。



図 2 損傷金型の溶接補修工程

しかし、溶接補修後の金型は新作金型と比べ、一般的に型寿命が 1/5 ~ 1/10 に低下する⁸⁾。この原因は、熱影響部の組織変化によって軟化や靱性低下が生じ、これらの箇所がクラックの起点となるためである。このことから、金型を焼鈍、再熱処理し熱影響部を再び元の母材組織に戻すことで、型寿命を改善することができる^{9, 10)}。一方で、再熱処理は金型全体がひずみリスクが大きく、また、ひずみの修正に多大なコストや時間を要することから、製造現場では型寿命の低下を甘受して再熱処理が省略される場合も多い。

熱影響部のクラック防止と熱処理ひずみの低減を両立させる対策として、著者らは熱ひずみが小さく任意の箇所のみを選択的に加熱できるレーザー熱処理に着目した。レーザー熱処理は、レンズで集光したレーザー光を材料に照射し、これを走査させることで任意の箇所のみを選択的に熱処理する¹¹⁾ (図 3)。

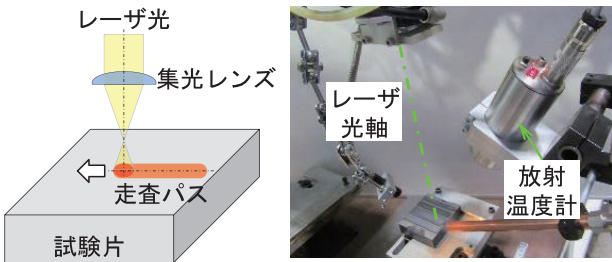


図 3 レーザー熱処理の模式図

先行研究において、ダイカスト用金型の熱影響部のみを硬化させ、熱影響部の軟化領域を金型母材と同等の硬さに回復することで、溶接補修後の型寿命が 50% 以上向上することを明らかにした¹²⁾。しかし、熱影響部の材料特性は熱間用工具鋼の種類や溶接条件の違いによって異なるため、適切なレーザー熱処理条件を導くには熱影響部の硬さ変化の原因となる材料組織の変化を冶金学的に分析することが不可欠である¹³⁾。

そこで本研究では、レーザー熱処理によって熱影響部を適切な硬さに制御するため、熱間用工具鋼 JIS SKD61 (AISI H13) の Mo 量を増加させ焼戻二次硬化性*を向上させた改良鋼 (Mo 改良鋼) の熱影響部の硬さと組織の関係を解析し、それをもとに設定温度の異なるレーザー熱処理を熱影響部に加え、適切な硬さが得られるレーザー熱処理条件を探った。

* 焼戻二次硬化性：鋼を焼入焼戻した時、一般的な鋼は焼戻温度が高くなるほど硬さが低下するのに対し、工具鋼など Mo や V を含んだ鋼を 773K 前後で焼戻した際に硬さが上昇する現象。

2. 実験方法

2.1 溶接試験片の作製

本研究では、ダイカスト金型の溶接補修を模擬した試験片を作製した。試験片の材料は、母材に大同特殊鋼 (株) 製 Mo 改良鋼：DH31-S の 80mm × 70mm × 20mm 平板を、溶加材に ϕ 0.8mm の Sthele 製溶接ワイヤ：GS-3 を使用して作製した。化学成分を表 1 に示す。Mo 改良鋼は標準鋼と比べ Mo が多いため、Mo 炭化物によって焼戻二次硬化性が向上し^{14, 15)}、また C、Si が少ないため靱性が向上する¹⁶⁾。

表 1 母材と溶加材の化学成分

{mass%}	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	V	Fc
母材	0.33	0.3	0.6	0.07	-	0.04	0.08	5.5	2.9	-	0.8	bal.
溶加材	0.25	0.5	0.7	-	-	-	-	5.0	4.0	0.6	-	bal.
JIS SKD61	0.32	0.8	0.2	~0.0	-	-	-	4.75	1.1	-	0.8	bal.
標準鋼	~0.45~1.25	~0.6	3	~0.03	-	-	-	~5.5~1.75	-	~1.2	-	bal.

試験片の作製手順 (図 4) は、片面に U 字状の溝を加工した母材を真空炉で 1303K、1h 焼入れ、その後靱性の向上と残留オーステナイトの除去を目的とした 1 回目の焼戻し

(843K) と、硬さの調質と焼戻二次硬化を目的とした2回目の焼戻し(878K)を各3h行った。その後、MIG/MAG溶接機(TPS4000MV・Fronius International製)でU溝に溶加材を溶接した。溶接条件は溶接電流160A、溶接電圧33Vとし、シールドガスとして80vol% Arと20vol% CO₂の混合ガスを25 l/min供給した。溶接前の予熱は623Kで1hとし、溶接後ただちに648Kで1h後熱した。最後に余盛部分を平面研削盤で除去し、これを試験片とした。溶接金属と熱影響部の境界線は硝酸とアルコールの混合液によるエッチングで現出させ、境界線を後述する硬さ分布測定の基準点(0.0mm)、基準点から母材方向を+方向とした(図5)。

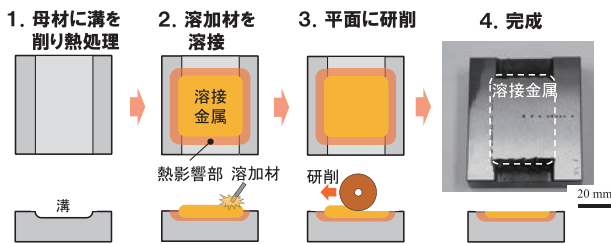


図4 溶接試験片の作製手順

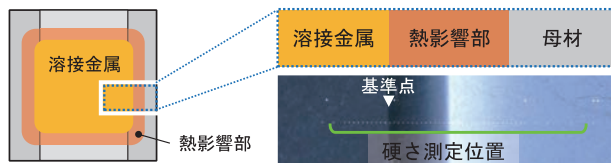


図5 溶接金属の境界線

2.2 熱影響部の材料特性評価

熱影響部の材料特性は、硬さ分布測定、組織観察、結晶構造解析により評価した。硬さ分布測定にはピッカース硬さ計(MMT-X3・マツザワ製)を使用し、基準点より-3.0～+10.0mmの範囲を0.2～1.0mm間隔で測定した。組織観察には金属顕微鏡(以下OM、GX71・オリンパス製)と電解放出型走査電子顕微鏡(以下FE-SEM、JSM-7001F・JEOL製)を使用した。FE-SEMの二次電子像は、加速電圧15kV、照射電流1.0nAで測定した。結晶構造解析にはX線回折装置(以下XRD、ULTIMA IV・Rigaku製)を使用し、Cu管球からK α 線を ϕ 400 μ mでスポット照射し、回折角30～120°の範囲で回折X線を測定した。組織観察と結晶構造解析の測定位置は、硬さ分析測定をもとに選定した。

2.3 レーザ熱処理実験

レーザ熱処理は、波長1070nmのYtterbiumファイバーレーザ発振器(YLS-2000・IPG Photonics製)を組込んだレーザ加工装置(住友重機械工業製)を使用し、光学スポット径を ϕ 4.0mmにデフォーカスさせレーザを照射した。レーザ出力はレーザスポットの中心温度を放射温度センサ(IGA6/23 MB 18・

LumaSense Technologies製)で測定し、制御コントローラの設定温度の差によりレーザ出力をフィードバック制御した。図6に制御回路の概略を示す。

レーザ熱処理の実験条件は、設定温度を873K、1073K、1273Kの3水準とし、レーザの走査速度は1.0mm/s固定とした。レーザは母材側から溶接金属側に15mm走査させ、シールドガスとして照射点にArガス30 l/minを供給した。熱処理後は空冷により冷却とした。

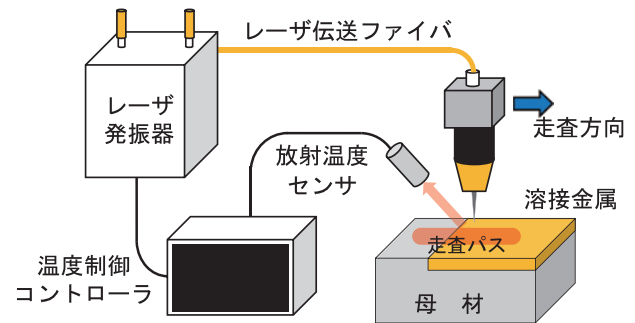


図6 レーザ熱処理温度のフィードバック制御回路

3. 実験結果と考察

3.1 Mo改良鋼の熱影響部組織の解析

3.1.1 熱影響部の硬さ分布

図7に、Mo改良鋼の溶接金属から母材部にかけての硬さ分布を示す。熱影響部の硬さは、基準点付近(+0.2mm)で最も硬化し、母材(+8.0mm)と比べ約140HV硬化した。硬さは母材に近づくにつれ徐々に低下するが、+2.0mmまでは母材以上の硬さを保持した。+2.2mm以降は硬さが母材以下まで急激に低下し、最も軟化した+2.8mmでは母材より約200HV軟化した。その後は硬さが徐々に上昇し、+5.0mm付近で母材と同等の硬さまで回復した。

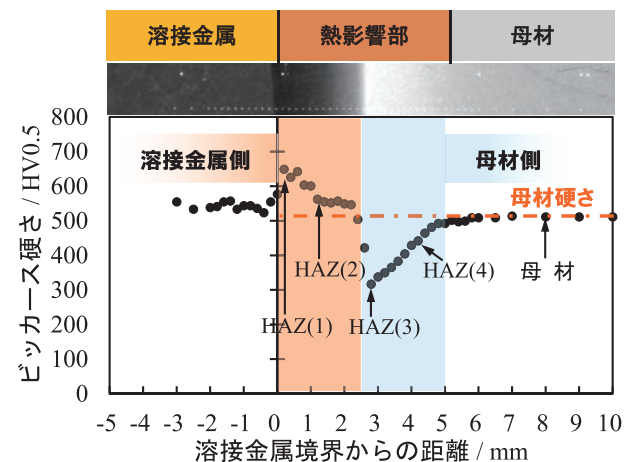


図7 溶接試験片の熱影響部周辺の硬さ分布

3.1.2 熱影響部組織の比較

材料組織の分析は、熱影響部の最硬化点(+0.2mm・HAZ(1))、硬化領域(+1.0mm・HAZ(2))、最軟化点(+2.8mm・HAZ(3))、軟化領域(+4.0mm・HAZ(4))、熱影響を受けていない母材部(+8.0mm・母材)の5箇所で行った。図8に、熱影響部と母材のOM像を示す。母材は粒径約10 μ mのパーライト組織であるが、HAZ(1)では直径数10 μ mの粗大な結晶粒(矢印実線)が、粒内には細長いラス(木摺)状の組織(矢印破線)が観察された。HAZ(2)、HAZ(3)およびHAZ(4)の粒径は母材と同等であり、HAZ(4)からはパーライト組織も観察された。

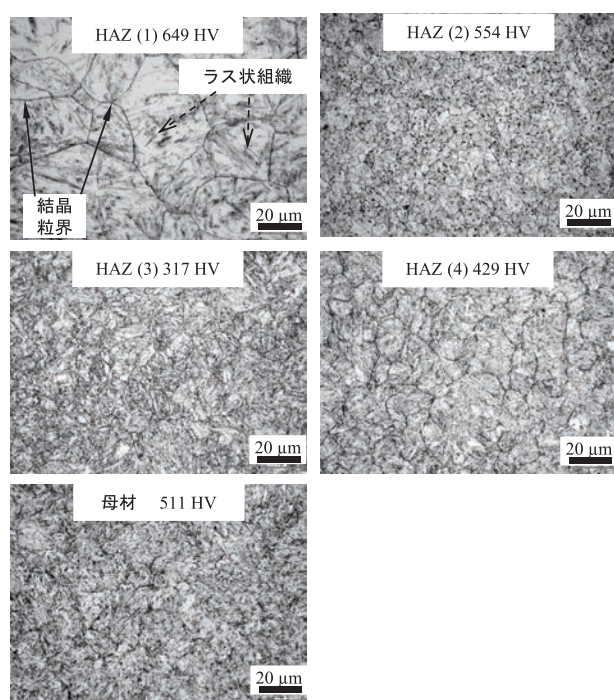


図8 熱影響部と母材の組織比較(OM像)

図9に、FE-SEMで観察した詳細な組織と析出物を示す。母材からは黒色の粒状析出物(矢印実線)が、HAZ(1)ではラス状組織(矢印破線)と板状析出物(矢印実線)が確認された。ラス状組織はHAZ(2)にも見られたが、HAZ(1)より微細化し、また粒状析出物(矢印実線)や黒色析出物も増加した。鋼のラス状組織はマルテンサイト変態の生じた焼入組織に見られることから、熱影響部がマルテンサイト組織に変化したと考えられる。これに対し、HAZ(3)からはラス状組織は観察されず、直径0.1 μ m以下の白色の微細粒状析出物(矢印破線)が多数見られるため、過熱焼戻組織と考えられる^{17, 18)}。HAZ(4)の組織は母材と似ているが、粒状析出物は母材よりも増加した。

4種類の析出物をEDSによる線分析で分析したところ、板状析出物(Line A)はMoやVの含まれないFe炭化物、黒色析出物(Line B)はFe、Mo、Vを含む複炭化物、白色の粒状析出物(Line C)はMo炭化物、微細粒状析出物(Line D)

はFe炭化物であることが判明した(図10)。

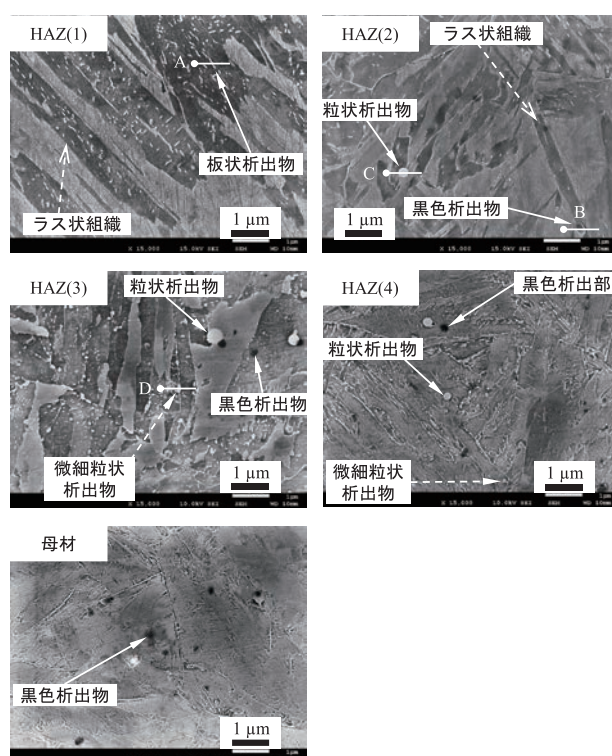


図9 熱影響部と母材の組織比較(FE-SEM像)

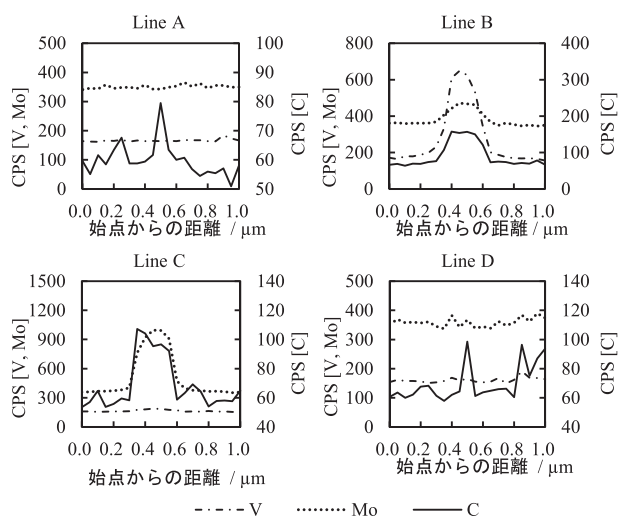


図10 析出物のEDS線分析

3.1.3 熱影響部の結晶構造解析

HAZおよび母材のX線回折パターンを、最もピーク強度の強いフェライト相 α_{110} と比較した。図11に硬化した領域のXRDパターンを示す。硬化したHAZ(1)と(2)では α_{110} ピークが母材よりも低角度側にシフトし、オーステナイト相を示す γ_{111} ピークも見られた。HAZ(1)のシフト量は、HAZ(2)と比べ増加し、半値幅(FWHM)も拡大した。

図12に、軟化した領域のXRDパターンを示す。軟化したHAZ(3)と(4)の波形は母材と類似し、 α_{110} ピークは母材より高角度側にシフトした。 γ_{111} ピークも見られなかった。

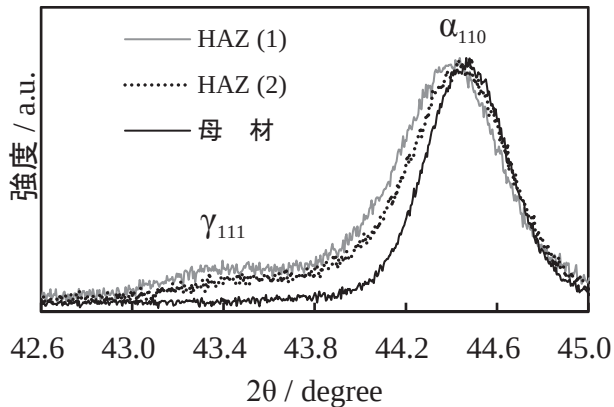


図11 硬化した領域のXRDパターン

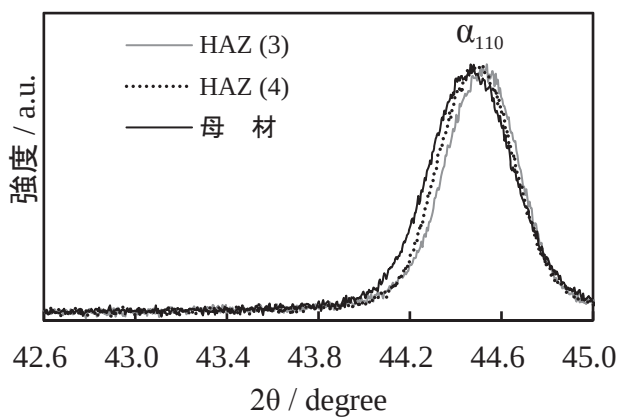


図12 軟化した領域のXRDパターン

3.1.4 熱影響部の硬さと組織の関係

熱影響部の硬さと組織の考察にあたり、熱影響を受けていない母材の組織を確認すると、母材は焼入焼戻による典型的な微細パーライト組織である¹⁹⁻²¹⁾。また、母材に析出した微細なMo、V、Feの炭化物は焼戻時に析出したものであり、これらにより焼戻二次硬化と呼ばれる析出硬化が生じている^{18, 22)}。

硬化したHAZ(1)と(2)のFE-SEM像からマルテンサイト組織が観察され(図10)、XRDパターンからもオーステナイト相を示す γ_{111} ピークの形成、FWHMの拡大、 α_{110} ピークの低角度側シフトといったマルテンサイト組織の形成を示す挙動が見られた(図11)。FWHMの拡大は転位密度の増加により、低角度側ピークシフトはC原子等の固溶による格子間隔の拡大によって生じるため、転位強化と固溶強化が硬化の主要因と考えられる^{20, 21, 23, 24)}。硬化した領域の溶接時の温度は、マルテンサイト変態に必要なオーステナイト変態開始点 A_{Cl} (1078K)以上に達したと推定される^{10, 16, 25)}。また、溶接金属に近いHAZ(1)は α_{110} ピークのシフト量がHAZ(2)より大きいため、固溶C量はHAZ(2)より多い^{23, 26)}。さらに、HAZ(2)で見られたMo炭化物やMo/V複炭化物がHAZ(1)では見られなかったことから、HAZ(1)の温度はこれらの炭化

物が固溶する1423K以上に達したと考えられる^{24, 27)}。

次に、最も軟化したHAZ(3)は、粒内にフェライト鋼と同様の組織が確認され(図9)、XRDパターンからも γ_{111} ピークは見られなかったことから(図10)、溶接時にオーステナイト変態開始点 A_{Cl} 以下であることが示された^{16, 26)}。FE-SEM像からFe、Mo、V析出炭化物が増加しており、 α_{110} ピークの高角度側シフトは析出炭化物の増加に伴う固溶C量の減少によるものと考えられる²⁸⁾。このような組織は典型的な過熱焼戻組織であり、過熱による固溶Cの析出によって焼戻二次硬化性が失われ、母材より硬さが大幅に低下したと考えられる^{14, 21, 26, 29, 30)}。また、HAZ(4)は母材とほぼ類似の組織であり、Fe、Mo、V析出炭化物がわずかに確認されたことや(図10)、XRDパターンがHAZ(3)と同様の傾向を示したことから(図12)、HAZ(3)と同じ過熱焼戻による硬さ低下と考えられる^{27, 31, 32)}。

3.1.5 熱影響部の温度勾配と組織の関係

本研究で扱う熱影響部は溶接時の加熱によって形成されるため、熱影響部の温度は溶接金属に近いほど高温となり、溶接金属の境界は融点(1756K)とほぼ等しく³³⁾、境界から離れるにつれ温度は徐々に低下する。溶接金属に近いHAZ(1)と(2)はマルテンサイト変態の生じる A_{Cl} 点以上に加熱されたと推定される^{23, 30, 34)}。また、HAZ(1)はMo炭化物やMo/V複炭化物の固溶温度以上に達し^{27, 35)}、これにより格子間の固溶C量が増加することで固溶強化が進んだと考えられる^{23, 36)}。

反対に、母材に近いHAZ(3)と(4)は A_{Cl} 点以下までしか加熱されないため、オーステナイト変態せずに過熱焼戻組織となり、既報と同様に A_{Cl} 点に近づくにつれ硬さが徐々に低下した^{21, 23, 26, 32)}。HAZ(4)は溶接前の焼戻温度(873K)をわずかに超えた温度と考えられ³⁷⁾、溶接前の母材組織は保たれたが、析出炭化物の増加によって硬さが低下したと考えられる^{24, 28, 30)}。

3.2 レーザ熱処理による熱影響部の硬さ制御

3.2.1 レーザ熱処理による熱影響部の硬さ分布の変化

図13に、異なる設定温度でレーザ熱処理を加えた熱影響部の硬さ分布を示す。比較用に、レーザ熱処理なしの硬さ分布も記載する。レーザ熱処理なしの熱影響部は、前述のとおり溶接金属側はマルテンサイト変態で硬化し、母材側は過熱焼戻により軟化する。レーザ熱処理の設定温度1073K以上では軟化領域が母材以上に硬化し、熱影響部全体の硬さが600～700HVに平準化された。これに対し、設定温度873Kでは熱影響部全体が軟化し、硬さも平準化されなかった。

材料組織の分析は、硬さの傾向が変化した1073Kと873Kに着目し、レーザ熱処理前の硬化領域(領域A)と軟化領域(領域B)のレーザ熱処理による組織変化を比較した。

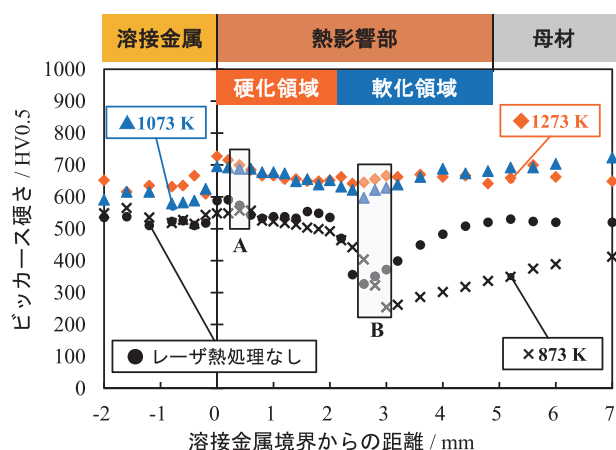


図13 レーザ熱処理による熱影響部周辺の硬さ分布の変化

3.2.2 レーザ熱処理による熱影響部組織の変化

図14に領域Aと領域BのOM像を示す。領域Aでは、結晶粒(矢印実線)の大きさについてはレーザー熱処理による明確な変化は生じなかった。しかし、粒内の組織はレーザー熱処理なしで多く見られたマルテンサイト組織が不鮮明になり、また全体的に粒状析出物が増加した。一方、領域Bでは、設定温度1073Kのときに斑状の組織が全体的に現れたのに対し、873Kではレーザー熱処理なしと類似の組織となり、硬さの低下を示唆する組織変化はOM像からは確認されなかった。

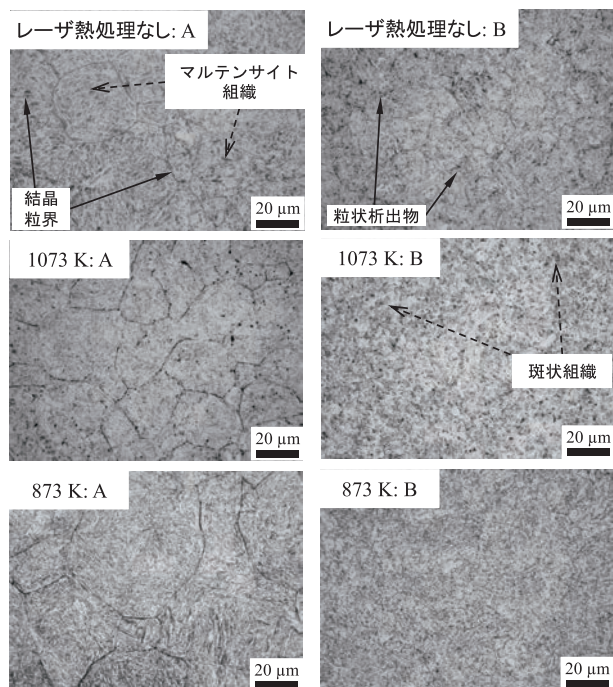


図14 レーザ熱処理前後の組織比較 (OM像)

それぞれの組織を拡大したFE-SEM像を図15に示す。1073Kの領域Aではマルテンサイト組織が不鮮明になり、代わりに粒径の異なる多数の析出物が現れた。EDS分析の結果、粒径の大きなものはMoまたはVの炭化物、微細なものはFeま

たはCrの炭化物である。また、析出炭化物の少ない領域では微細かつ不鮮明なラス状組織が確認された。これらの組織や析出物は領域Bにも現れたが、領域Aと比べてFeやCrの微細炭化物が増加した。領域Aのマルテンサイト組織は873Kにおいても見られなかったが、1073Kとは異なり粒状炭化物は増加せず、溶接前の母材と類似した組織に変化した。また、領域Bでは粒径の大きなMo炭化物やV炭化物が粗大化し、同時にFeやCrの微細炭化物も増加した。

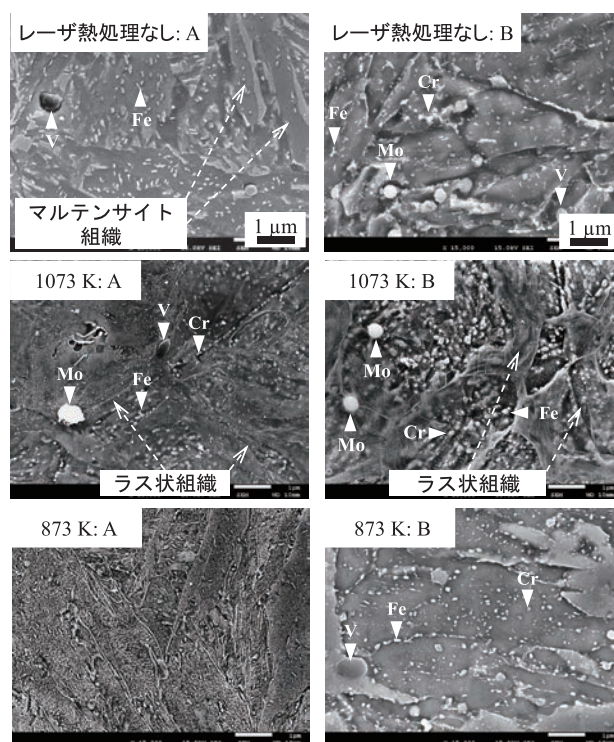


図15 レーザ熱処理前後の組織比較 (FE-SEM像)

3.2.3 レーザ熱処理による結晶構造の変化

レーザー熱処理によるX線回折パターンの変化について、図16に領域A、図17に領域Bの解析結果をそれぞれ示す。レーザー熱処理による α_{110} ピークの変化を比較すると、領域Aでは873Kのみが高角度側にシフトしたのに対し、1073Kのピーク位置はレーザー熱処理なしとほぼ同じであった。また、レーザー熱処理後はいずれもFWHMが拡大し、 γ_{111} ピークは消失した。これに対し、領域Bでは α_{110} ピーク、FWHMともに、1073Kと873Kとで真逆の変化を示した。

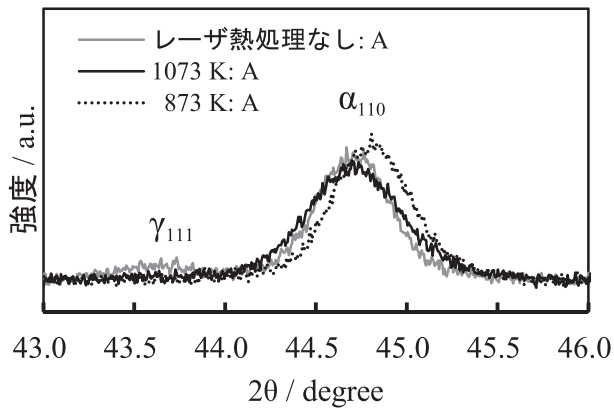


図16 レーザ熱処理前後のXRDパターン比較（硬化領域A）

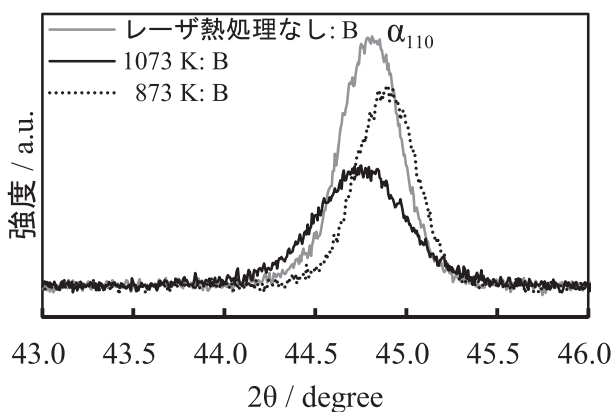


図17 レーザ熱処理前後のXRDパターン比較（軟化領域B）

3.2.4 レーザ熱処理の設定温度と組織の関係

レーザー熱処理前の熱影響部の硬さと組織の関係は、前述のとおり硬化領域はマルテンサイト変態によって焼入硬化し、軟化領域は過熱焼戻による固溶Cの析出によって軟化したと考えられる³⁸⁾。レーザー熱処理後の組織では、設定温度に関わらず析出炭化物が増加しており、これにより固溶C量が減少し過熱焼戻と同様に軟化することが予想される^{14, 21, 29)}。しかし、1073KのXRDパターンは領域A、Bともにレーザー熱処理前よりも低角度側にシフトしており、固溶C量は逆に増加している。設定温度1073Kは A_{C1} 点とほぼ等しく¹⁶⁾、FE-SEM像においても1073Kのみラス状組織が観察されたことから、レーザー熱処理によってマルテンサイト変態して焼入硬化したと考えられる^{22, 23)}。さらに、1073Kで確認されたFWHMの拡大や領域Aの γ_{111} 相消失は、転位密度の増加や残留オーステナイトの消失を示すものであり、いずれも硬さの上昇に寄与したと考えられる^{9, 19)}。

これに対し、873Kのレーザー熱処理ではマルテンサイト変態が生じないため、XRDパターンからは領域A、Bともに固溶C量の減少と転位密度の低下のみが確認され、過熱焼戻のみが進行し軟化したと考えられる。

3.2.5 適正なレーザー熱処理条件の考察

Mo改良鋼の熱影響部のヒートクラックを防ぐには、軟化領域を硬化させることで割れの発生と進展を遅らせ、また熱影響部全体の硬さを平準化し熱応力の集中を抑えることが重要である^{9, 10)}。 A_{C1} 点以上のレーザー熱処理は、図13のとおり軟化領域を再び焼入硬化させ、熱影響部全体の硬さの差も100HV以下に低減されたことから、耐ヒートクラック性を向上させる適切なレーザー熱処理条件と考えられる。さらに、レーザー熱処理によって耐ヒートクラック性を低下させる残留オーステナイト相が消失した点も、割れの防止に効果的と考えられる⁹⁾。ただし、レーザー熱処理の温度が過大になると結晶粒や粒界析出物が粗大化し、靱性の低下を招くことから注意が必要である⁸⁾。

4. おわりに

本研究では、ダイカスト鋳造に使用する熱間用工具鋼金型の溶接補修後の耐ヒートクラック性を、レーザー熱処理によって向上させることを目的に、Mo改良鋼の熱影響部で生じる硬さ変化のメカニズムを金属組織の解析によって明らかにし、これをもとに適切な硬さの得られるレーザー熱処理条件を求めた。

今後は、金型を使用するダイカストメーカや金型を供給する金型加工メーカに本技術を提案して実用化を進めるとともに、レーザー加工メーカに技術普及を進めることで、道外の金型メーカやレーザー加工メーカに対する競争力の向上を図る。

謝辞

本研究は、北見工業大学大学院博士後期課程の研究としても実施し、共著者ではありませんが指導教官の大津直史教授、および同研究室の平野満大助教、群馬大学の坂本広太技術職員（現・北海道立工業技術センター）には金属組織の解析について多大なるご指導を賜りました。ここに心より感謝を申し上げます。

また、本研究で使用したX線回折装置は、競輪の補助を受けて整備されました。記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 日原政彦：ダイカスト用金型の寿命対策，日刊工業新聞社，300PP.，(2003)
- 2) 新版 ダイカスト技能者ハンドブック，日本ダイカスト協会，345PP.，(2012)
- 3) 日原政彦：ダイカスト金型における寿命向上技術動向，素形材 2008.2，pp.18-24，(2008)
- 4) A. Persson, S Hogmark, et al.: *Surf Coat Technol.*

- 191, pp.216-227, (2005)
- 5) R. Ding, H Yang, et al.: *Eng Fail Anal*, 124, 105330, (2021)
- 6) 河野正道：湯流れ解析によるダイカスト金型のヒートチェック予測，電気製鋼，第85巻1号，pp.53-61, (2014)
- 7) M. Shah, M. Ali, et al.: *Metall Microstruct Anal*, 3, pp. 114-125, (2014)
- 8) D. Mellouli, N. Haddar, et al.: *Engineering Failure Analysis*, 45, pp.85-95, (2014)
- 9) 日原政彦，鈴木 裕：技術大全シリーズ 機械構造用鋼・工具鋼大全，日刊工業新聞社，308PP., (2017)
- 10) V. Braga, R. H. M. Siqueira, et al.: *Mater Today Commun*, 29, 102945, (2021)
- 11) 後藤光宏，レーザ焼入の基礎，富士高周波工業(株) 技術レポート2021.7.25, pp.1-3, (2021)
- 12) 櫻庭洋平，戸羽篤也 他：レーザ部分熱処理によるダイカスト金型の長寿命化技術の開発，北海道立総合研究機構工業試験場報告 No.320, pp.47-55, (2021)
- 13) 金型教本編集部会，金型技術シリーズ2 ダイカスト金型，素形材センター，516PP., (2001)
- 14) J. Zhang, J. He, et al.: *J Mater Res Technol*, 25, pp.2324-2332, (2023)
- 15) S. Amirabdollahian, F. Deirmina, et al.: *Mater Sci Eng A*, 814, 141126, (2021)
- 16) “DAIDO DH31-S” . 大同特殊鋼(株),
 <http://www.tekkosha.co.jp/product/pdf4/dh31s.pdf>
- 17) C. Zang, T. Zhou, et al.: *Opt Laser Technol*, 106, pp.299-310, (2018)
- 18) C. Chen, K. Yan, et al.: *J Mater Eng Perform*, 26, pp.5577-5589, (2017)
- 19) M. Katancik, S. Mirzababaei, et al.: *J Alloys Compd*, 849, 156319, (2020)
- 20) G. Telasang, J. D. Majumdar, et al.: *Metall Mater Trans A*, 46, pp.2309-2321, (2015)
- 21) S. Amirabdollahian, F. Deirmina, et al.: *Mater Sci Eng A*, 814, 141126, (2021)
- 22) Z. Wu, K. Ushioda, et al.: *J Mater Res Technol*, 26, pp.1151-1167, (2023)
- 23) G. Telasang, J. D. Majumdar, et al.: *Mater Sci Eng A*, 599, pp.255-267, (2014)
- 24) A. K. Gonzalez-Moran, M. Naeem, et al.: *J Mater Res Technol*, 25, pp.4139-4153, (2023)
- 25) G. Telasang, J. D. Majumdar, et al.: *Surf Coat Technol*, 261, pp.69-78, (2015)
- 26) D. P. Karmakar, M. Gopinath, et al.: *Surf Coat Technol*, 361, pp.136-149, (2019)
- 27) J. Zhang, M. Yu, et al.: *J Alloys Compd*, 856, 158168, (2021)
- 28) T. Wen, F. Yang, et al.: *J Mater Res Technol*, 22, pp.157-168, (2023)
- 29) X. Wang, J. Wang, et al.: *J Mater Process Technol*, 269, pp.26-34, (2019)
- 30) J. Wang, Z. Xu, et al.: *J Mater Eng Perform*, 29, pp.1849-1859, (2020)
- 31) H. Ding, X. Cheng, et al.: *Mater Sci Eng A*, 842, 143102, (2022)
- 32) X. Sun, Y. Wang, et al.: *Mater Sci Eng A*, 834, 142616, (2022)
- 33) K.-A. Chiang, Y.-C. Chen: *Mater Lett*, 59, pp.1919-1923, (2005)
- 34) X. Du, X. Liu, et al.: *Mater Sci Eng A*, 883, 145536, (2023)
- 35) T. Kojima, K. Hayashi, et al.: *ISIJ Int*, 35, pp.1284-1290, (1995)
- 36) A. Smith, M. Asadikiya, et al.: *Engineering*, 6, pp.644-652, (2020)
- 37) ISO 4957: 1999(E), Tool steels
- 38) Y. Sakuraba, R. Kawakami, et al.: *Mater. Trans.*, Vol. 66, 3, pp.358-365, (2025)

研 究 ノ ー ト

Research Note

ARマーカーを追従する自律移動台車の開発

佐野 峻輔

Development of an AR Marker-Based Autonomous Following Cart

Shunsuke SANO

抄 録

近年、労働力不足や省力化ニーズの高まりを背景に、人の移動に追従して物品を搬送する移動ロボットの需要が高まっている。特に物流・製造・サービス分野では、簡便に導入可能な追従機構の開発が求められている。本研究では、ARマーカーとUSBカメラを用いた追従機構を構築し、自律移動台車に搭載してその基本性能を評価した。追従対象に貼付したマーカーの相対位置を取得し、PID制御によって自律移動台車を対象に追従させる実験を行った結果、安定したマーカー追従動作、および認識・制御系の有効性が確認された。

キーワード：自律移動台車、ARマーカー、移動ロボット

1. はじめに

近年、少子高齢化の進行により、多くの分野で深刻な労働力不足が問題となっている。それに伴い、限られた人員で効率的に作業を行うための省力化や自動化のニーズが急速に高まっている。こうした背景のもと、物流、製造、サービス業などを中心に、現場作業を支援する移動ロボットの導入が広がっている。

なかでも、作業者の移動に追従して物品を搬送する「追従型移動ロボット」は、作業者にとって特別な操作や事前の操作習得が必要なく、普段どおりの作業者の動線に合わせて移動する点が大きな長である。日常業務の流れを妨げることなく現場へ導入することが可能であり、既存の作業環境に適応しやすい種類のロボットである。

この移動ロボットの走行を制御するためには、追従対象との相対位置を正確に把握する必要がある。屋内において追従対象と移動ロボットの相対位置を計測する手段として、Wi-Fi、BLEビーコン、IMES (Indoor MEssaging System)、モーションキャプチャ、UWBタグなど、さまざまな計測技術が提案されている。これらの方式は作業環境に送信機やセンサーを設置する必要があるため、初期導入や維持管理にかかるコストが大きいという課題がある。

一方で、作業環境に特別な機器を設置する必要がない相対位置計測技術として、LiDAR¹⁾ やステレオカメラ²⁾、画像認識ベース³⁾ の手法などがある。これらは拡張性に優れるが、

画像などからの情報量が多いため、一般的に高性能な演算装置を必要とする場合が多く、リアルタイム処理が困難となる場合がある。特に、機械学習にもとづく認識手法を用いる場合には、事前に学習用の大量のデータセットを準備する必要があり、その構築・調整にも多大な労力とコストを要する。

しかし、簡易なマーカーを単眼カメラで撮像し認識することはそれほど計算量を必要としないため、これらを用いて追従対象の位置を取得し、その情報にもとづいて自律的に対象を追従する移動ロボットを構築できれば、専用センサーや高価な通信機器を用いずに安価に実用的な追従動作が実現可能となる。

そこで本研究では簡易なマーカーとして、導入コストが低く利用実績が豊富なARマーカーに着目した。ARマーカーは一般的なプリンターで印刷でき、単眼カメラで撮像、認識することも容易である。この方式は低コストで導入できるため、小規模な現場での運用に適した、簡便かつ汎用性の高い追従方式として期待できる。

本報告では、ARマーカーと単眼カメラによる追従システムの開発に関して、その実装と評価結果について述べる。

2. システム構成

2.1 概要

本研究で構築した自律移動台車は、USBカメラ、制御用PC、移動台車で構成される(図1)。移動台車前方に取り付

けたカメラで追従対象物のマーカーを撮影し、制御用PCはその画像からマーカーの位置を算出する。制御用PCがマーカーの位置情報をもとに移動台車の移動方向と速度を計算し移動台車に送信し、移動台車が制御指令にもとづいてモーターを制御することで追従対象の動きに自動で追従する。

移動台車には市販の二輪駆動ロボットを用い、自動追従プログラムを実行する制御用PCとして汎用ノートPCを使用した。さらに、異なる計算機を搭載する移動台車でも同様に動作可能とするために、本研究ではコンテナ型仮想化技術であるDocker上にシステムを構築した。

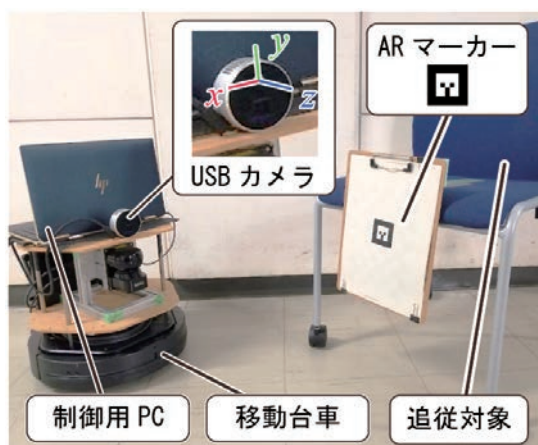


図1 ロボットハードウェア構成と座標

2.2 ハードウェア構成

本システムでは、小型の移動台車として市販の二輪駆動ロボット（Kobuki・Yujin Robot社製）を用いた。このロボットは左右の車輪を独立に駆動する方式を採用しており、比較的単純な構成ながら安定した走行を実現している。サイズはおおよそ幅35cm、奥行33cm、高さ15cm、重さ約5.6kgであり、内蔵バッテリーで動作する。

台車前方にはUSBカメラ（RealSense L515・Intel Corp. 製）を固定し、画角内のマーカーを検出する。解像度はフルHD相当で、水平画角約70度と広めの画角をもつため通常の移動速度であれば追従対象を十分に画角内に収められる。

移動台車の制御およびマーカーの認識処理は、ノートPC（Intel社製Core i7-1065G7搭載機）で実行した。台車およびカメラとの接続はすべてUSBとした。

2.3 ソフトウェアプラットフォーム

自動追従プログラムを実行するソフトウェア環境を、他のロボットやPCでも容易に再利用できるよう、再現性と可搬性に優れる手法で構築した。具体的には、プログラムはロボット開発の共通基盤として広く使われている「ROS(Robot Operating System)」に準拠して作成し、その実行環境をコンテナ型仮想化技術のDocker上に構築した。

ROSとは、センサー情報の取得、モーター制御、位置推定、

画像処理といったロボットシステムを構成する各種プログラム（ノード）を部品化し、それらをメッセージ通信によって連携させるためのフレームワークである。オープンソースとして提供されており、世界中の研究者や技術者によって開発が進められている。多数のハードウェアや外部ライブラリとの互換性があるため、実験用プラットフォームとしても汎用性が高い。ただし、ROSは多くの依存ライブラリや設定ファイルを必要とするため開発環境の構築が煩雑であり、バージョン管理や機材変更のたびに再設定が必要になるという課題がある。

そこでDockerと呼ばれる、コンテナ型仮想化技術を活用し、ROS環境をあらかじめ構築した仮想的な作業空間としてパッケージ化した。このコンテナを用いることで、ハードウェア構成が異なる別のPCでも、同一の動作環境を短時間で再現できる。これにより、実際の現場環境への導入が円滑になることが期待される。

本研究においては、LinuxベースのOS（Ubuntu 18.04）上でDockerコンテナを起動し、カメラ画像の取得、ARマーカーの検出、ロボットへの制御指令の生成と送信などを、コンテナ内部で自動的に実行する構成とした。これにより、コンテナの起動と数行のコマンド入力だけで、複雑な環境構築を行うことなくシステムを実行可能とした。

3. 認識および制御の設計

3.1 ARマーカーライブラリ

ARマーカーライブラリにはALVAR、AprilTag⁴⁾ や ChromaTag⁵⁾、LentiMark⁶⁾ など複数の方式があるが、本研究ではROS環境において安定して動作するラッパーライブラリ（ar_track_alvar）が利用可能であり、導入・運用が容易な、ALVARを採用した。

3.2 ARマーカーの認識処理

今回使用した52mm四方のマーカーを図1に示す。これを今回簡易的な追従対象としたキャスター付きの事務用椅子に貼り付け、以下の方法により認識処理を行う。

マーカーの認識処理に使用したARマーカーライブラリ（ALVAR）は、映像入力に加えてカメラの内部パラメーター（レンズの歪みや焦点距離など）をもとに、マーカーのIDと三次元空間における位置（x, y, z）および姿勢（3軸まわりの回転角度）を出力する。

出力されるマーカーの位置情報は、図1のようにカメラ中心を原点とし、前方を+Z軸、右方向を+X軸、上方向を+Y軸とする左手系の座標系で出力される。なお、位置・姿勢推定の精度を高めるためには、カメラ画像を補正するためのキャリブレーション情報を事前に取得する必要がある。具体的には、所定の寸法で作成した市松模様のプレートを様々な

角度・距離から撮影することで、ライブラリがレンズの歪みや焦点距離などのキャリブレーション情報を自動で算出する。

3.3 追従制御アルゴリズム

ARマーカの検出により取得した追従対象の位置情報は、自律移動台車の進行方向と速度の制御に利用した。処理の流れを図2に示す。

カメラから見た対象の位置を「左右方向のずれ(x軸方向)」と「前後方向の距離(z軸方向)」の2つの成分に分けて扱い、それぞれにもとづいてモーターの制御信号を生成した。左右方向のずれに応じて台車を旋回させ、前後方向の距離に応じて速度を調整することで対象に追従する動作を実現した。目標とする追従距離は50cmとした。

この制御には、目標値と現在値の誤差に応じて出力を調整するPID制御を用いた。高い汎用性があり実装が容易であるため広く普及している制御手法であり、今回の用途に適している。PID制御は、現の誤差だけでなく、過去の誤差蓄積や変化の速さをも考慮することで、過度な変動を抑えながら現在値を目標値に収束するよう調整する制御手法である。本自律移動台車では、滑らかな応答が得られるゲイン（調整係数）を実験により求めて設定した。

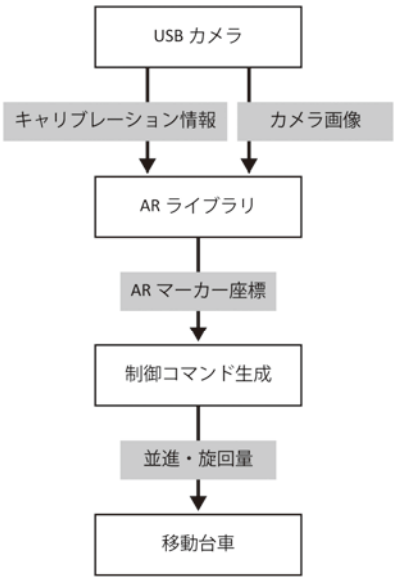


図2 移動台車の制御における処理の流れ

4. 性能評価および追従実験

4.1 実験の概要

はじめに、計測精度に関する基礎的な実験として、USBカメラをロボットに搭載せず、単体で静的な位置推定の精度を評価した。次に、USBカメラを自律移動台車に搭載し、追従対象に貼付したARマーカに対する追従動作確認実験に

より、本手法の有効性を確認した。

4.2 カメラ単体による距離計測精度の評価

4.2.1 実験方法

図3のとおりUSBカメラとARマーカをそれぞれ三脚に固定し、互いに向かい合う姿勢で距離精度を測定した。実距離と出力値との平均誤差を算出するため、カメラとマーカの距離をメジャーで測定し、1.0-2.5mの範囲において距離(z軸方向)の出力を取得した。



図3 ARマーカとカメラ

4.2.2 結果

計測結果を表1に示す。マーカの位置の計測値はメジャーで計測した真値とおおむね良好に一致し、誤差は全体として3%程度に収まった。

表1 ARマーカの距離測定精度

真値 [m]	計測値 [m]	誤差 [%]
1.00	1.018	1.80
2.00	2.063	3.15
2.50	2.494	0.24

4.3 ロボット搭載時における追従動作の確認

4.3.1 実験方法

追従動作を確認するため、前節で示した構成に従ってUSBカメラを移動台車の前面に固定し、マーカ検出・追従制御を実行可能な状態とした。効率的にシステム開発を進めるため、前後左右の移動、および旋回が可能なキャスター付きの事務用椅子にマーカを貼付した。

追従対象の最大の移動速度は台車の移動速度以内とした。台車の最大直進速度は0.7m/s、旋回角速度は180deg/sである。

4.3.2 結果

実験の様子を図4に示す。自律移動台車はARマーカが貼付された追従対象の移動に応じて、前進・旋回・停止といった動作を行って滑らかに追従する動作を示した。特に、追従対象が画角から外れる方向に移動した際にもロボットの向きが適切に変化し、ARマーカがカメラ画角に保たれる

状態が維持されることを確認した。



図4 ARマーカーに向かって追従する自律移動台車

5. 考察

本研究では、ARマーカーを用いた追従対象の位置計測システムと、それにもとづく自律移動台車の追従制御システムを開発した。実験により、簡易なハードウェア構成で一定の認識精度と追従性能が得られることを確認した。特に、ARマーカーを用いた追従制御の手軽さは、現場への簡易導入を目的とした自律移動台車の構築において有用である。

一方で、本システムにはいくつかの制約がある。特に、自律移動台車の走行経路が追従対象と完全には一致しないため、狭路など特定の状況では台車が通過できない場合がある。この点を改善するには、走行環境の地図にもとづく高度な処理が必要となる。

また、マーカー検出性能にも制約がある。現行のアルゴリズムでは、追従対象がその場で旋回するとマーカーを見失う場合がある。本研究では、マーカーを見失った場合には移動を停止し、再検出後に自動で移動を再開する設計とした。マーカー検出が途絶しにくい頑強なシステム構成の実現は今後の課題である。

6. まとめ

本研究では、USBカメラとARマーカーを用いた簡易な追従型自律移動台車の構築を試み、誤差約3%の測定精度と、基本的な追従動作の実現を確認した。汎用的なソフトウェアフレームワークを採用したことで、市販されている別のROS対応移動台車であっても容易に移植できるシステム構成とした。これにより、移動台車に追従機能を低コストで導入する際の有力な選択肢となることを示した。

一方で、移動台車の移動性能やマーカーの認識性能の制約が課題としてあげられた。実運用においては、導入する場面を精査のうえ、より高い自由度を有する台車を採用することや複数のマーカーを多方向に向けて配置するなどの対策が必要である。

参考文献

- 1) W. Chung, H. Kim, et al.: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 8, pp. 3156–3166, (2012)
- 2) Zhichao Chen and S. T. Birchfield,: 2007 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, USA, 2007, pp. 815–820 (2007)
- 3) Redhwan Algabri et al.: *Sensors (Basel, Switzerland)* (2020)
- 4) Olson, Edwin: *2011 IEEE international conference on robotics and automation*. IEEE, (2011)
- 5) DeGol, Joseph, Timothy Bretl, and Derek Hoiem: *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*. 2017.
- 6) Hideyuki Tanaka: 2020 *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, (2020)

複数センサ統合による調理中の状態変化認識

宮島 沙織、井川 久

Cooking State Recognition Using Integrated Multiple Sensors

Saori MIYAJIMA, Hisashi IGAWA

抄 録

労働力不足の解消には、人間の複合的な判断力が求められる作業にも適用できる、高度な状態認識技術の開発が不可欠である。状態認識技術の高度化の方法の一つとして、複数の異なる種類の情報を組み合わせるマルチモーダル化が挙げられる。

そこで本研究では、人間の五感のように、複数の異なるセンサから得られた情報を統合した状態認識の実現を目指し、具体的なタスクとして加熱調理されている肉の焼き加減の認識に取り組んだ。加熱による肉の状態変化を計測可能なセンサを選定し、加熱調理中のデータを計測する実験を行い、計測したデータを用いて長期短期記憶ネットワークを学習することで、3段階の焼き加減の認識を行った。さらに、単一のセンサ情報のみを使用した場合と認識精度の比較を行うことで、マルチモーダル化の有用性を検証した。

キーワード：状態認識、マルチモーダル情報処理、センシング、時系列情報処理、AI

1. はじめに

労働力不足を解消するためには、より幅広い作業に適用可能な自動化技術の開発が必要である。近年の深層学習の活用により、判断基準の数値化や定量化が困難な認識タスクについても自動化が進みつつある。しかし、未だに人間にとっては簡単でも、自動化が困難な認識タスクも多く存在する。例えば製造品の不良検査において、表面のゆるやかな凹凸や質感の違いなど画像上で判別することが困難な差異も、作業者は目視と手で触れた感覚を組み合わせで判別できる。また農作物の選果作業でも、撮影が困難な内部の腐敗に対して、作業者は柔らかさや匂いをもとに判別することが可能である。このように、人間は意識することなく五感を組み合わせで判断することで、画像など単一の情報のみを判別に利用している既存装置では検出困難な異常を認識することが可能である。そこで本研究では、人間の五感のように複数の異なるセンサから得られた情報を統合（マルチモーダル化）することで、単一のセンサ情報のみでは困難なタスクの状態認識を目指す。複数種類の感覚にもとづいて判断する作業には、農作物の選果作業、楽器の調整作業など様々あるが、特に身近な作業として調理作業が挙げられる。調理作業は、加熱や泡立

てなど、視覚情報のみでは正確な状態把握が困難な場合が多い。そのなかでも肉類の加熱調理においては、加熱が不十分の場合は食中毒を引き起こす恐れがあり、過度に加熱すると食感や風味を損なってしまうため、適切な加熱が求められる。先行研究においても、外観から内部が衛生上十分に加熱されたかを判断することは困難であることが示されている¹⁾。一方で人間が肉の加熱調理を行う際は、外観だけではなく音や加熱面の温度、香り、蒸気や煙の発生など、複数の要素を統合して焼き加減を判断している。

以上により、単一の情報では認識が困難な肉内部の加熱状態の認識は、マルチモーダルセンシングを活用した状態認識のタスクとして適切であると考え、本研究では加熱調理中の肉の状態変化、すなわち焼き加減の認識に取り組んだ。

2. センサの選定と計測環境の構築

2.1 認識対象とする状態変化

肉の状態変化を認識するためには、まず変化がどのように現れるかを把握した上でその変化を計測可能なセンサを選定する必要がある。食肉とは家畜の筋肉であり、タンパク質、水分、脂肪その他で構成される。したがって、加熱により肉

に生じる変化は、主に脱水とタンパク質の変性である。

食肉に含まれるタンパク質は大まかに、糸状の構造をもつ筋原線維タンパク質、結合組織を構成する筋基質タンパク質、液体である筋漿タンパク質に分けられる。筋原線維タンパク質の主成分であるミオシン・アクチンと、筋基質タンパク質の主成分であるコラーゲンは加熱によって収縮し保水性が下がる。この変化は肉の外観の変化のほか、水分の放出による音の変化および蒸気の発生として知覚可能である。

肉の色は筋漿タンパク質であるミオグロビンに含まれる鉄の状態に依存し、加熱により鮮やかな赤色になったのち、褐色へと変化する^{2,3)}。熱源に接している面は内部よりも高温となり、約140℃でメイラード反応を生じ、約160℃からカラメル化して褐色となり、約200℃で炭化して黒くなる。色の変化は肉の外観から知覚できるうえ、メイラード反応やカラメル化では香気成分の発生を伴うため⁴⁾、肉周辺の匂いから知覚できる。さらに、肉周辺の雰囲気温度は肉やフライパンなどの熱源の温度変化と関係していると考えられる。

2.2 センサの選定

先述のように、加熱により生じる変化は外観・湿度・温度・音・匂いの変化として計測可能と考えられる。そこで、これらの情報を計測するためのセンサ類を選定した。

外観の計測用として産業用カメラ（acA1300-200uc・Basler製）を、音の計測用としてマイク付きのWebカメラ（C922n・Logitech製）を使用した。匂いを計測する装置として、特定のガスを検出するセンサではなく、複数種類の匂い分子を検出可能な匂いセンサのうち、表1に示す3機種を候補として選定のための予備実験を行った。焼く前の肉・適度に焼いた肉・焦げた肉を常温の状態でも密閉可能な保存袋に入れ、匂いセンサの検出器を同じ袋に入れて10分程度放置し、匂いを計測した。計測後、3状態の肉について計測値を比較し、区別が可能であるかを検討した。

さらに、本実験では加熱中の匂いの変化を計測するため、加熱時に発生する蒸気をセンサ素子に触れさせる必要がある。そこで、肉の加熱中に発生した湯気の温度を計測したところ、60℃から70℃程度であった。

表1 匂いセンサの比較

製品	検出素子	使用可能温度	区別
空気質センサ / Bosch製	金属 酸化物	-45 ～ 85℃	○
MSSセンサ / Qception製	感応膜	0 ～ 55℃	△
nose@MEMS / I-PEX製	感応膜	0 ～ 40℃	○

予備実験の結果と各センサの使用可能温度を表1に示す。表の結果をもとに、各状態の肉の区別が可能かつ本実験で

想定する70℃程度の環境下での使用が可能であることから、本研究では空気質センサ（BME688・Bosch製）を採用した。このセンサでは、匂いの変化を電気抵抗値〔Ω〕として計測する。また、空気質センサには温度センサ・湿度センサが内蔵されており、これらを利用して肉周辺の空間の温度と湿度を計測する。

以上により、外観・湿度・温度・音・匂いから加熱中の肉の状態変化を計測する機器を選定した。これらの機器を使用し、実験環境を構築した。

2.3 実験環境の構築

肉の加熱調理中は油を含む蒸気や煙が発生し高温になることから、安全確保のためにドラフトチャンバー内に実験環境を構築し、電気式のホットプレートで調理器具として使用した。ホットプレートの周辺に前節で選定した機器類を配置し、図1に示す実験環境を構築した。図中の肉の内部温度を計測する温度計（ステンレス保護管温度センサTR-0406・T&D製）は、焼き加減の正解値を得るためのリファレンスとしてのみ使用し、状態認識の入力としては使用しなかった。



図1 構築した実験環境

3. 加熱中の肉の状態変化計測実験

構築した実験環境において、選定した装置により加熱調理中の外観・湿度・温度・音・匂いの変化を計測する実験を行った。加熱対象として、成分と大きさが均一な牛の成形肉（サイコロステーキ、1辺約20mmの立方体）を使用した。

実験では、次の手順に沿って成形肉を加熱した。

- ①ホットプレート十分に加熱する。
- ②半解凍状態の成形肉を5個ホットプレート上に並べ、うち1個に温度計のプローブを刺す。
- ③内部温度を確認しながら肉を加熱する。途中、全面に焼き色がつくよう適宜焼き面を変更する。
- ④推奨加熱条件を満たした時刻を確認後、2個の肉を回収して加熱を続ける。
- ⑤肉の内部温度が80℃を超え、肉全体が焦げて黒色になったら加熱を終了する。

このような加熱実験を9回実施し、次章で実施する焼き加減の状態認識に使用する学習データを収集した。なお、空気質センサは1回の計測ごとに外気に30分当て、リフレッシュを実施した。また、空気質センサとリファレンス用温度センサのサンプリング周期は1sとした。

加熱前の肉、手順④で回収した肉、加熱終了後の肉を図2に示す。図より、加熱により肉が収縮し、色が変化していることがわかる。また各状態の肉の重量を計測（10個平均）すると、加熱前は1個あたりの重量が9.9gであったのに対し、手順④で回収した肉は1個あたり5.9g、加熱終了後の肉は1個あたり3.4gと、加熱によって重量が減少した。



図2 加熱前後の肉の外観比較

実験中の湿度と音の変化、匂いと内部温度の変化、さらに実験初期・中期・後期の画像の一例を図3に示す。図上側の音波形は、後述するハイパスフィルタで調理音以外のノイズを除去したものである。計測した音、湿度、映像を確認すると、肉の焼き面を変えた時刻付近で音が変化し、湿度が一時的に上昇したことから、肉が熱源に触れたことで収縮し水分が放出された変化を計測したものと考えられる。また、匂いセンサの変化を確認すると、全9回の実験に共通して、加熱開始後から値が減少し、肉全体が焦げた時刻付近で値が増加する傾向が見られた。

以上の結果より、選定したセンサ類によって加熱による肉の状態変化がデータとして計測された。このデータを使用し、深層学習による状態変化の認識を行う。

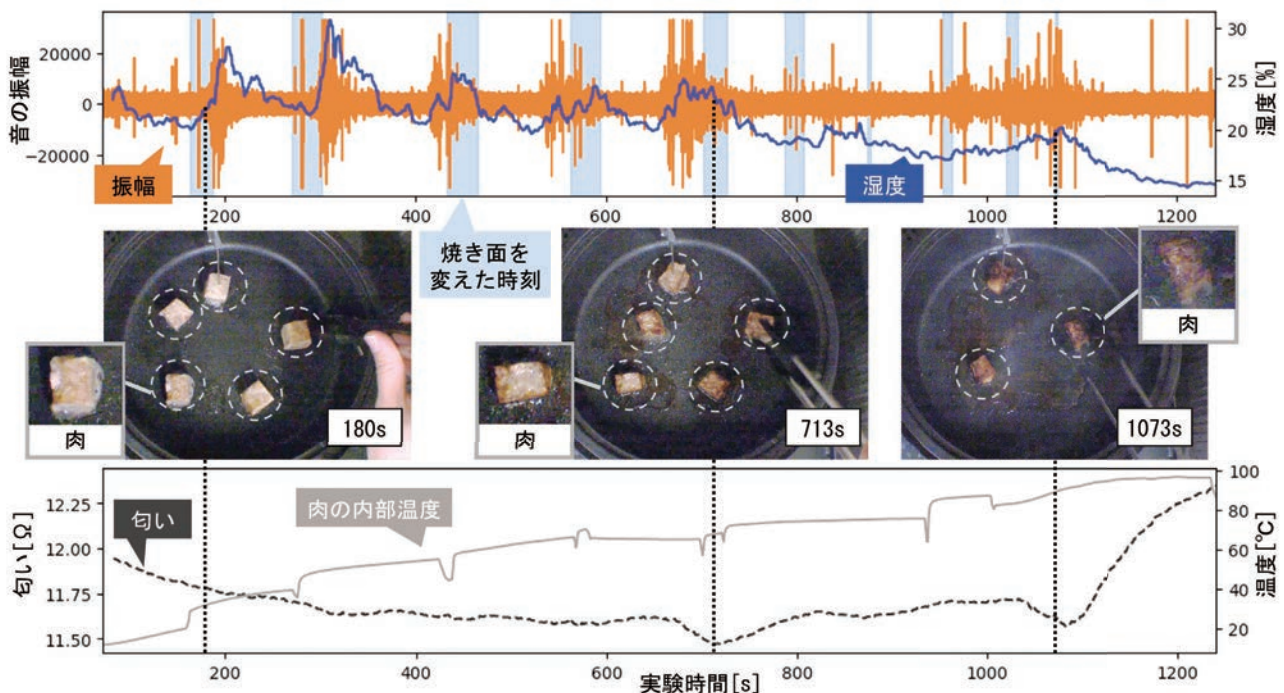


図3 音量と湿度の変化（上グラフ）、内部温度と匂いの変化（下グラフ）および撮影画像

4. LSTMによる状態変化認識

4.1 認識対象の状態定義

牛の成形肉には内臓などの部位も含まれているため、食品衛生の観点から内部温度70℃で3分またはそれに相当する温度・時間の組み合わせによる加熱が推奨されている。本研究ではこの推奨加熱条件にもとづき、認識対象とする状態を次の3状態と定義した。

- A. 生焼け：肉が内部温度70℃で3分加熱される前の状態
- B. 適度焼け：肉が内部温度70℃で3分加熱された後、内部温度80℃以下の状態
- C. 焼きすぎ：肉の内部温度が80℃以上の状態

計測した内部温度をもとに各時刻の状態をA～Cに分類し、状態認識の真値とした。

4.2 学習データの作成

計測した実験データを用いて、学習データを作成した。計測したデータのうち温度・湿度・匂い・音は1次元のデータであるのに対し、映像は1フレームあたり横1280画素・縦1024画素の高次元情報を持つため、そのまま使用すると含まれる情報の大部分が映像の情報となり、他の1次元センサーデータの特徴が反映されない可能性がある。また、音データも計測した波形データのままでは特徴の把握が困難である。そこで、音データと映像データの前処理を行い、それぞれ2次元の特徴量を抽出した。

a) 音データの前処理

スペクトログラム表示により調理中の音の変化を確認したところ、ドラフトチャンバーの換気音の音量が大きく、調理中の音が隠れてしまっている状態が確認された。そこで、まずはドラフトチャンバーの換気音である低周波数成分をハイパスフィルタで除去した。ハイパスフィルタ適用前後の音の振幅（音量）の変化を図4に示す。

次に映像と音を合わせて確認したところ、肉から水分が放出された際に音量と音の高さ（周波数成分）が変化する傾向が観測されたため、音量に相当する振幅の二乗和（RMS）と、音の周波数成分の特徴に相当するスペクトル重心の2つを特徴量として抽出した。

b) 映像データの前処理

2.2節で述べたように、加熱により肉は変色する。まず約40℃で色が鮮やかな赤色になり、高温になると褐色、灰褐色と変化する。また、肉の表面の焼き色は高温になると茶色から黒色に変化していく。したがって、加熱による色の変化は明度と彩度の変化に現れると考えられる。明度と彩度の変化を計測するため、画像から肉の領域を抽出し、肉の色の彩度と明度を特徴量とした。肉の領域抽出には物体検出用のAIモデルであるYOLOv11を学習し使用した。YOLOにより検出された肉の領域内について、各画素値をHSV表色系に変

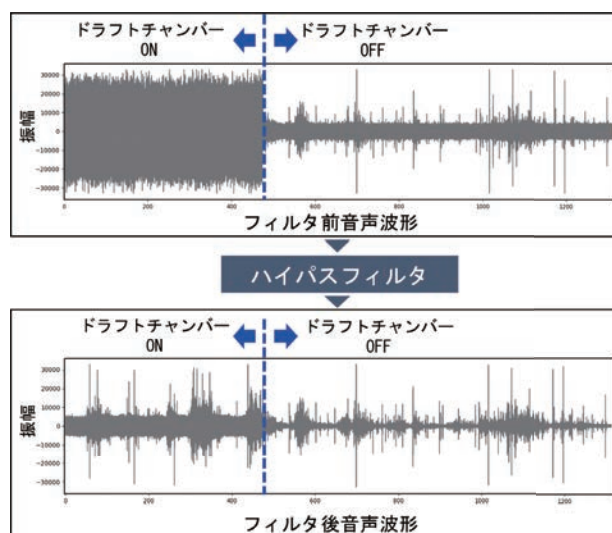


図4 ハイパスフィルタによる排気音低減効果

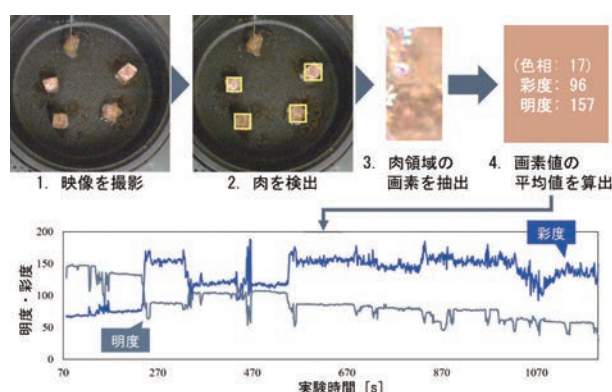


図5 映像から特徴量を抽出する手順

換し、その平均値を算出することで明度と彩度を求めた。明度と彩度を求める手順を図5に示す。

以上の処理によって抽出されたRMS・スペクトル重心・明度・彩度と、計測した温度・湿度・匂いを組み合わせた7次元のデータを使用して学習データを作成した。サンプリング周期は1sに統一した。

4.3 LSTMネットワークの学習

状態認識には時系列データ処理に適した長期短期記憶（LSTM: Long Short Term Memory）ネットワークというネットワークモデルを使用した。本研究ではTensorflowを用いて2つのLSTM層と1つの全結合層からなるネットワークを実装した。1秒の状態認識に使用する区間（Lookback）を直前の30秒分とし、9回分の実験データから約7000セットの訓練データを得た。このデータを使用して、バッチサイズ64、エポック数200としてLSTMネットワークの学習を行った。

実施した9回の実験のうち8回分を訓練データ、残り1回分はテストデータとし、訓練データ・テストデータの全組み合わせ9通りについて交差検証を行い、状態認識精度を評価した。

4.4 LSTMによる状態認識結果

認識精度を評価する指標として、機械学習分野において一般的に用いられる正解率（Accuracy）、適合率（Macro Precision）、再現率（Macro Recall）、F1値（Macro F1）を使用した。これらの評価指標はそれぞれ次の式(1)～(4)により算出される。

$$\text{Accuracy} = \frac{\sum_{l=1}^L \text{TP}_l}{N} \quad (1)$$

$$\text{Macro Precision} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L p_l, \quad p_l = \frac{\text{TP}_l}{\text{TP}_l + \text{FP}_l} \quad (2)$$

$$\text{Macro Recall} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L r_l, \quad r_l = \frac{\text{TP}_l}{\text{TP}_l + \text{FN}_l} \quad (3)$$

$$\text{Macro F1} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \frac{2r_l p_l}{r_l + p_l} \quad (4)$$

式中の N は全データ数である。 L は認識する状態の個数で、今回は4.1節で述べた3状態A～Cが認識対象であるため、 $L=3$ である。また $\text{TP}_l \cdot \text{FN}_l \cdot \text{FP}_l$ は認識結果の分類で使用される指標であり、認識対象A～Cのうちのある状態 l について実際の状態と認識結果の組み合わせから次のように定義されている。

- TP_l ：実際に認識結果も状態 l であるデータの数。
- FP_l ：実際は状態 l ではないが、状態 l と誤認識されたデータの数。
- FN_l ：実際は状態 l だが、状態 l と認識されなかったデータの数。

評価指標を計算した結果、全体の正解率は0.83、適合率は0.69、再現率は0.71、F1値は0.70であった。状態別（A・B・C）に適合率、再現率、F1値を求めた結果を表2に示す。表2より、状態別の評価指標を見ると、状態A（生焼け）の各評価指標は全て0.9以上だが、状態B（適度焼け）は0.5以下と低い値となっており、状態別の認識精度に差が生じていた。さらに、図6に示す混同行列より、データ全体に占める状態BとCの割合が低く、誤認識が起こりやすいのはAとB、BとCの隣り合った状態同士が多いことがわかる。

これらの結果より、提案手法によって生焼け（状態A）は精度よく認識されたが、適度焼けや焼きすぎを正しく認識するには改良が必要である。

4.5 マルチモーダル化の効果検証

次に、単一のセンサ情報のみを使用した場合と、提案手法である複数種類のセンサ情報を統合して使用した場合の認識精度を比較した。表3に、使用した入力情報別の正解率、適合率、再現率、F1値の算出結果を示す。表3より、正解率、適合率、再現率、F1値の全てにおいて、単一のセンサを使用した場合よりも提案手法の分類精度が高い結果となった。

一方で、交差検証の試行別に求めた評価指標を標本として

表2 状態別の認識精度

状態	適合率	再現率	F1値
全状態平均	0.697	0.713	0.703
A	0.962	0.924	0.942
B	0.371	0.476	0.417
C	0.759	0.738	0.749

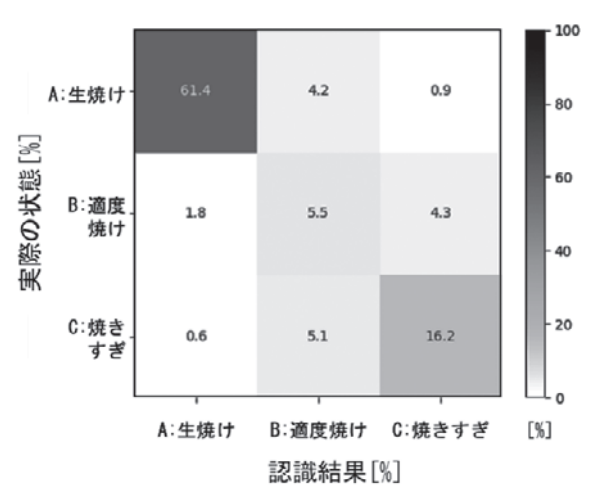


図6 全データ統合時の混同行列

表3 入力データ別の認識精度比較

入力	正解率	適合率	再現率	F1
全センサ	0.831	0.697	0.713	0.703
空気質	0.768	0.645	0.672	0.656
音	0.633	0.508	0.501	0.492
映像	0.801	0.667	0.653	0.660

優位水準を0.05とした有意差検定を行った結果、音データのみの場合と提案手法の比較では有意差が認められたが、映像のみ、空気質センサのみの場合と提案手法の比較では有意差が認められなかった。したがって、映像データと空気質データ（温度・湿度・匂い）については、他のセンサデータと組み合わせることで認識精度が有意に向上したとは言えない。

そこで、他の視点から提案手法であるセンサ統合の効果について考察する。有意差が認められない原因として、データのばらつきが大きいことが考えられる。試行別に求めた正解率の値を図7に示す。図7より、単一のセンサ情報のみの場合では試行により値のばらつきが大きい、提案手法では大きな上下は見られない。表4に示す各評価指標の標準偏差を比較すると、数値上でもセンサ統合により認識精度のばらつきが低減したことが確認できる。

また、状態別（A・B・C）に適合率、再現率、F1値を求

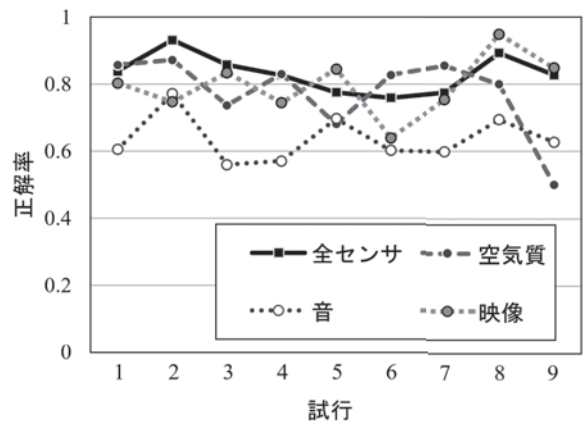


図7 試行別の正解率比較

表4 入力データ別の標準偏差比較

入力	正解率	適合率	再現率	F1
全センサ	0.057	0.081	0.121	0.095
空気質	0.120	0.119	0.122	0.123
音	0.070	0.082	0.071	0.066
映像	0.088	0.127	0.090	0.097

めた結果を図8に示す。図8より、映像のみの場合では状態B(適度焼け)の認識精度が低い、他のセンサデータと統合することで認識精度が向上したことが確認できる。

以上により、複数種類のセンサを統合(マルチモーダル化)して状態認識を行うことで、各センサの不得意な領域を補い合い、精度よく安定した状態認識が可能となった。

本結果より、マルチモーダル認識を活用することで、ネットワークの構造を複雑にすることなく、認識精度の改善が可能であることが確認された。マルチモーダル化の効果を向上するには、データ統合時の重みの検討や、センサの選定が重要である。今回は各センサデータのみでも一定の認識精度が得られたため重みの検討は行わなかったが、極端に認識精度が低いセンサデータが含まれていた場合は、重みを変える、またはそのセンサデータを除外することを検討すべきである。

5. おわりに

本研究では、人間のように複数種類の感覚にもとづく状態認識の実現を目指し、加熱調理中の肉の焼き加減の認識をタスクとして設定した。調理中に計測した映像・湿度・温度・音・匂いのデータを用いてLSTMネットワークを学習することで、83%の正解率で成形肉の焼き加減認識に成功した。

今回は調理作業を対象としたが、本研究で取り組んだ複数

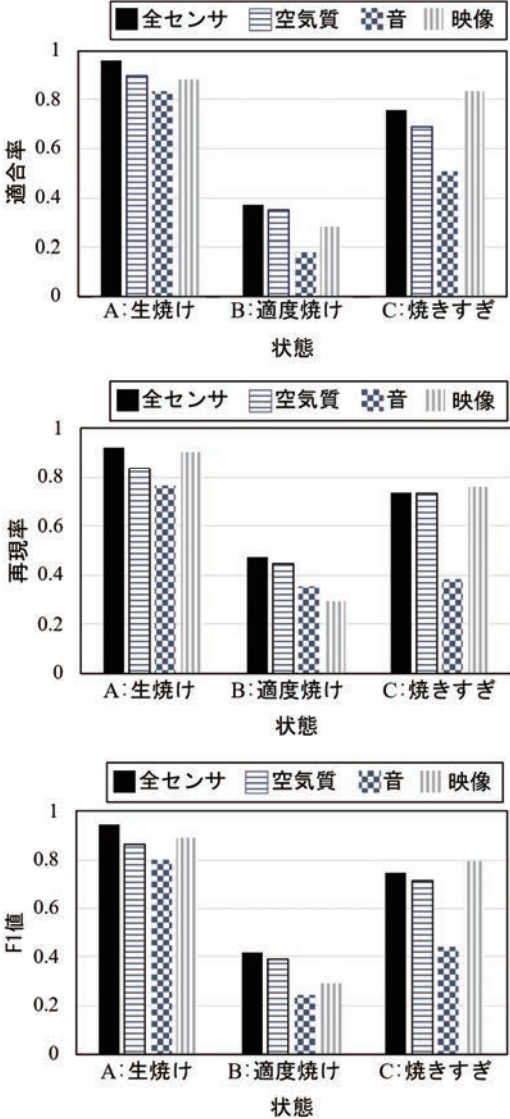


図8 状態別の認識精度比較

種類のセンサデータを統合する状態認識手法は、農作物の選果、プラントの異常点検など様々な作業における状態認識タスクに適用可能である。今後は、これら他の作業への適用や、ロボットの強化学習への展開などに取り組む。

参考文献

1) 内閣府食品安全委員会：令和2年度内閣府食品安全委員会調査事業報告書，cho20210040001，(2021)
2) 泉本 勝利：岡山大学農学部学術報告，Vol.81，No.1 pp.81-100，(1993)
3) 吉留 大雅，平井 経太，堀内 隆彦：日本色彩学会誌，Vol.41，No.6，p. 53-56，(2017)
4) 臼井 照幸：日本食生活学会誌，Vol.26，No.1，pp.7-10，(2015)

水中保形性に優れたウニ養殖用配合飼料の開発

瀬野修一郎、細川 真明、可児 浩
川崎 琢真*、高原 英生*、福田 裕毅**、清水 健志***

Development of Compound Feed with Good Shape Retention in Water for Sea Urchin Farming

Shuichiro SENO, Masaaki HOSOKAWA, Hiroshi KANI
Takuma KAWASAKI*, Hideo TAKAHARA*, Hiroki FUKUDA**, Takeshi SHIMIZU***

抄 録

農林水産省の令和5年海面漁業生産統計調査によると、国内ウニ類の年間水揚げ量は約7,200トンで、北海道が約4,100トンと過半数を占め、漁業産出額は106億円にのぼる。一方、国内需要は頭打ちであるが、海外では日本食の普及に伴い、輸出金額が過去10年間で約16倍に急増し、今後もさらなる需要拡大が見込まれている。市場の過半数を占める北海道のウニの生産は特に夏場に水揚げが集中し、秋～冬は品薄となるため高値で取引されており、この時期のウニ市場は利益拡大につながるから非常に可能性を秘めた市場である。北海道日本海沿岸には商品価値のない未利用のキタムラサキウニが多数存在し、近年開発された配合飼料でこの未利用ウニを畜養することにより、秋～冬のウニ市場に参入する養殖事業への展開が期待されている。しかしながら採算性のある持続可能な養殖事業の実現には飼料コストが課題であり、養殖カゴからの脱落による飼料ロスを可能な限り抑制した給餌量の低減が切望されている。そこで、本研究ではセルロースナノファイバーの添加によって、脱落ロスを抑制し、水中での保形性向上を目指したウニ養殖用配合飼料の開発を行った。その結果、波がある状況下やウニの摂餌圧にも耐えうる実用的な水中保形性を有する配合飼料の作製技術を確立できた。

キーワード：ウニ、養殖、配合飼料、水中保形性、セルロースナノファイバー

1. はじめに

農林水産省の令和5年海面漁業生産統計調査によると国内のウニ類の年間水揚げ量は約7,200トン（殻付き）で、北海道における年間水揚げ量は、国内の半分以上に当たる約4,100トン（殻付き）¹⁾、その漁業産出額は106億円となるが、水揚げ量は減少傾向、漁業算出額は横ばいである。しかしながら、国内需要は頭打ちである一方、海外での日本食の普及に伴い国産ウニ輸出金額は近年10年間に約16倍（2024年：約300億円、約80億円）に急増しており²⁾、今後もさらなる需要拡大が見込まれている（図1）。

北海道におけるウニの生産は金額ベースで8割が旬である夏場に集中しており、水揚げが少ない秋～冬は品不足により

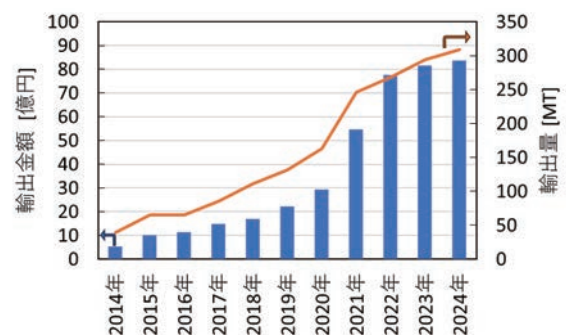


図1 国産ウニの輸出金額および輸出品量の推移

取引価格が3.6～4.9万円/kg（2024年）と夏場の1.8～2.5倍の高値で取引されている³⁾。

一方で北海道日本海沿岸部には、未利用なキタムラサキウニ

* 道総研栽培水産試験場、* Hokkaido Research Organization, Mariculture Research Institute

** 道総研中央水産試験場、** Hokkaido Research Organization, Central Fisheries Research Institute

（公財）函館地域産業振興財団（北海道立工業技術センター）、 Hakodate Regional Industry Promotion Organization (Hokkaido Industrial Technology Center)

事業名：重点研究

課題名：秋から冬に行うキタムラサキウニの養殖技術開発

ニが高密度に存在しており、この未利用ウニを有効利用しようとする試みがなされている。この未利用ウニに配合飼料を給餌した結果、可食部重量が大きく改善し、可食部の甘味と旨味が強くなり、平均歩留り（可食部重量/個体重量）も15%以上となる高い餌料効果が得られることが浦らにより報告されており⁴⁾、本技術を用いて、取引価格の高い秋～冬に水揚げすることで経済的に持続可能なウニ養殖事業の確立が期待されている。また、この開発された配合飼料は共同開発企業である(株)北三陸ファクトリーより“はぐくむたね[®]”という商品名で現在販売されている。

しかしながら、この配合飼料を利用したウニ養殖事業のコストの大半は配合飼料で占められており、ウニ養殖を持続可能な漁業として成立させるためには、飼料コストをさらに削減させることが不可欠であるとされている。飼料コストを削減させるには配合飼料の原料および製造コストを下げる、海水中での飼料の脱落ロスを減少させる等が考えられる。配合飼料によるウニ養殖は網目状のカゴ中で行われるが、これまでの実証試験により、ウニの摂餌やカゴの揺れ、海流による崩壊によって配合飼料が四散することで、網目からの脱落が起こることが知られている。さらに現在の配合飼料は給餌期間中に海水中で水に膨潤した後、次第に崩壊していくような性状のため、水中でのさらなる保形性の向上が求められている。

そこで本研究ではセルロースナノファイバー（CNF）と呼ばれる微細繊維を添加することで水中保形性の向上が可能であるか検討を行った。CNFは植物の細胞壁を構成するセルロースを繊維径がナノスケールとなるまで微細に解繊した繊維のことで、植物由来の新素材として様々な製品への応用が期待されている素材である⁵⁾。

CNFはナノスケールの繊維状の物質という形態的な特徴から様々な特性を有し、大きな比表面積もその特性の一つである。比表面積が大きいことから表面エネルギーを下げるために凝集しやすい性質を持つ。また、その凝集はセルロースの構成単位であるグルコース由来の水酸基同士の分子間水素結合によるため、非常に強固な凝集であることが知られている⁶⁾。本研究はその高い凝集力を利用して、配合飼料における水中保形性の向上を試みた。

さらにセルロースは配合飼料の結合剤としてしばしば用いられるカルボキシメチルセルロース等と異なり、水に不溶性の物質であることから、凝集で形成されたネットワーク構造は水への耐久性を有することも期待される。

2. 実験方法

2.1 CNF添加配合飼料の作製方法

水中保形性を評価するための配合飼料は浦らにより開発された“はぐくむたね[®]”の配合原料および割合をベースに北海道立工業技術センターで調製した原料に対して当场で

CNFを添加し、作製した。CNFにはセリッシュ（KY100S・ダイセルミライズ(株)製）を用いた。

水中保形性の評価は振とう装置を用いた実験室内で実施可能な簡易評価と道総研栽培水産試験場が保有する小型流動水槽を用いたより実用環境に近い評価を行った。小型流動水槽の試験には500g前後の試料量が必要となるため、ミンサーを用いた連続押出式の製造方法を選択した。

簡易水中保形性評価に用いた配合飼料は配合原料、水、およびCNFをかくはん脱泡装置（マゼルスター KK-250S・クラボウ(株)製）で混合した後、プラスチック製カップに流し込み、50℃で乾燥し、作製した。CNFの添加量は水中保形性との関係を調べるため、固形分に換算した添加量で0.5、1、2、4wt%添加とした。

小型流動水槽を使った保形性評価用の配合飼料は配合原料、水、およびCNFをプラネタリミキサー（ACM-20LAVT・(株)小平製作所製）で混合した後、家庭用電動ミンサー（SG-50・福島産業(株)）を用いて幅50mm、厚み4mmの押出口から吐出することで平板状に成形した後、乾燥して作製した。プラネタリミキサーのかくはん子はスパイラルフック形状のものを用いた。作製した配合飼料の外観は図2のとおりで、CNFの有無による差異はほとんど確認されなかった。

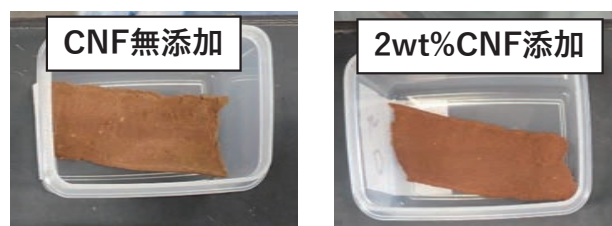


図2 平板状に成形したCNF添加配合飼料の外観

2.2 簡易水中保形性評価

2.1節で作製した配合飼料をプラスチック製容器に入れ、100mLの水中に浸漬した後、室温下で、振とう装置（SHAKER SRR-2・アズワン(株)製）を用いて、回転速度200rpm、振幅30mmで、30分間旋回振とうした。目開き1mmのメッシュの濾過により回収された固形分を乾燥して重量を測定し、乾燥重量当たりの残存率、すなわち、振とう後乾燥重量/初期乾燥重量（乾物当たり）を算出し、その残存率の値により水中保形性を評価した。

2.3 小型流動水槽を用いた水中保形性評価

配合飼料を使ったウニ養殖は網目状のカゴ中で行われており、そのカゴを設置する海中ではカゴの揺れや波、海流等の影響を受けて餌が崩壊することが想定される。そこで小型流動水槽を利用して、養殖中に実際に起こる波を再現した状態でのCNF添加配合飼料の水中保形性の評価を行った。

目開き10mmのメッシュで外壁を構成した養殖カゴ中に配

合飼料を入れた実験区と対照区を各3区画準備し、1区画あたり約100gの配合飼料を投入した(図3)。実験区には事前浸漬は行わず、周期6秒・最大流速0.1m/秒の流れを4時間作用させた。一方で、対照区は波浪のない海水中に4時間浸漬のみとした。カゴ内に残った配合飼料の試験後の重量はすべて湿重量で測定し、対照区に対する湿重量の残存率、すなわち、実験区の湿重量/対照区の湿重量を算出し、その残存率の値により波のある状況での水中保形性を評価した。

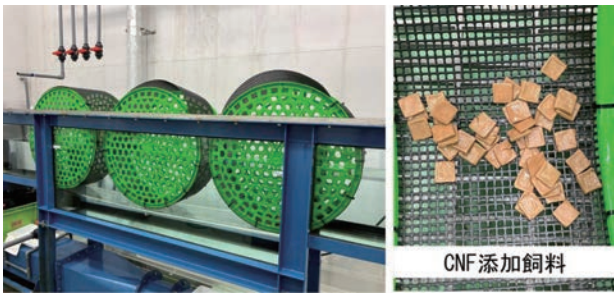


図3 用いた小型流動水槽(左)およびカゴ中のCNF添加配合飼料(右)

2.4 CNF配合飼料のウニへの給餌試験

配合飼料中におけるCNF添加量は4wt%以下とごく少量であるのに加え、ウニはセルロースの消化吸収が可能であるため、摂餌性やへい死の可能性への影響は軽微であると予想されるが、ウニに対するCNF添加の影響が不明であるため、CNF添加配合飼料を実際にウニに給餌して検証した。水槽中のキタムラサキウニ1個体に対してCNF添加量が1、2、4wt%と異なる配合飼料を同重量給餌し、8日間程度静穏な水槽内で経過観察を行った。

3. 結果と考察

3.1 CNF添加が水中保形性に与える影響

CNFを4wt%添加した配合飼料の簡易水中保形性評価の結果を図4に示す。CNF無添加の配合飼料の残存率が0.27であったのに対して、CNF添加配合飼料は0.61となり保形性が約2倍に向上した。これは配合飼料中でCNFの不溶性凝集ネットワークが形成され、配合飼料が水中で崩壊しがなくなったためと考えられる。

また、ナノ繊維の必要性を確認するために繊維径が30 μ m程度の製紙用パルプをマイクロファイバーの対照サンプルとしてCNFの代わりに添加して比較を行った結果、残存率が0.36と無添加の配合飼料よりはやや保形性が向上したものの、CNF添加配合飼料ほどは保形性の向上が見られなかった。このことから保形性の向上にはナノマテリアルの高い比表面積によって発揮される強い凝集力が必要で、ナノスケールの形状が重要であることがわかった。

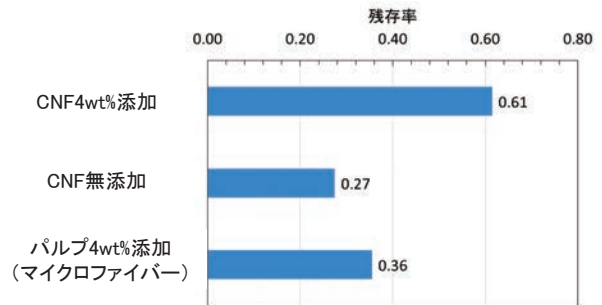


図4 簡易水中保形性評価におけるCNF添加配合飼料の残存率

3.2 CNF添加量と水中保形性の関係

CNFの添加量と水中保形性の関係を調べるために、CNFの添加量を0.5、1、2、4wt%と変えて作製した配合飼料の簡易水中保形性評価結果を図5に示す。CNF添加量の増加とともに単調に残存率の増加が見られ、水中保形性が向上することを確認できた。CNF添加量が増加することによって、凝集ネットワーク構造がより緻密で強固になったため、配合飼料の水中保形性が向上したものと考えられる。

一方で、製紙用パルプについても添加量を変えた配合飼料を作製し、水中保形性を評価した。その結果、添加量の増加とともに保形性の向上は見られたものの0.5、1wt%添加では無添加飼料に比べ保形性が低下し、2、4wt%添加でようやく無添加飼料と同程度の保形性に回復し、CNF添加のような無添加飼料以上の保形性向上は見られなかった。これはマイクロファイバー間での凝集力では水中での崩壊を抑制するほどの強固なネットワーク構造が構築されなかったためと推測され、ナノスケールの材料がもたらす凝集力を必要とする3.1節の結果を支持する結果であった。

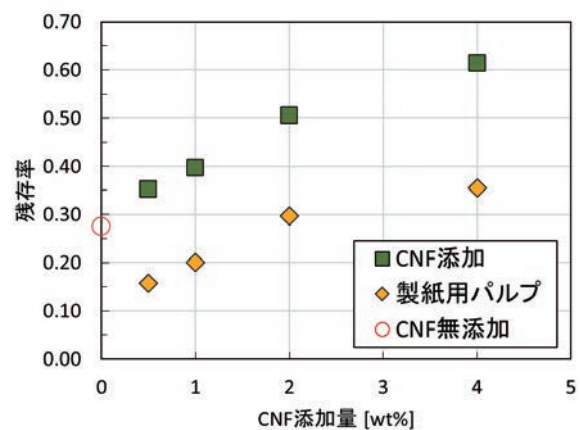


図5 簡易水中保形性評価におけるCNF添加配合飼料の残存率

3.3 波が想定される状況での水中保形性

CNF添加配合飼料の水中保形性評価結果を図6に示す。

水中で配合飼料が崩壊すると、崩壊した飼料はカゴの網目から脱落していくため、試験後の配合飼料の湿重量は小さくなっていく。したがって、残存率が大きいほど水中保形性が高いといえる。

CNF無添加の配合飼料の残存率が0.3程度であったのに対して、CNFを1、2、4wt%添加した配合飼料は0.8～0.9程度となり、いずれの添加量においても無添加のものより高い値となった。このことから波がある環境下においてもCNF添加により水中保形性の向上効果を発揮することが示された。

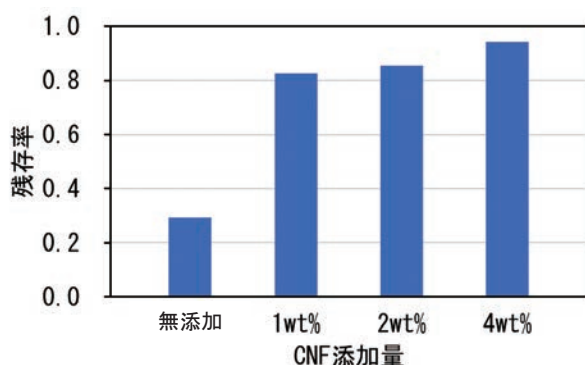


図6 小型流動水槽を用いた水中保形性評価におけるCNF添加配合飼料の残存率

3.4 CNF配合飼料のウニへの給餌試験

配合飼料の給餌開始から8日経過後の水槽中の様子を図7に示す。CNF無添加および1wt%CNF添加配合飼料を給餌したウニでは網の下に崩壊した配合飼料と摂餌した後にウニが排出したと思われる糞が見られ、網の上には配合飼料は全く残っていないかった。

一方で、2、4wt%CNF添加配合飼料を給餌したウニでは網の下にCNF無添加および1wt%CNF添加配合飼料と同様に崩壊した配合飼料と摂餌した後に排出したと思われる糞が見ら

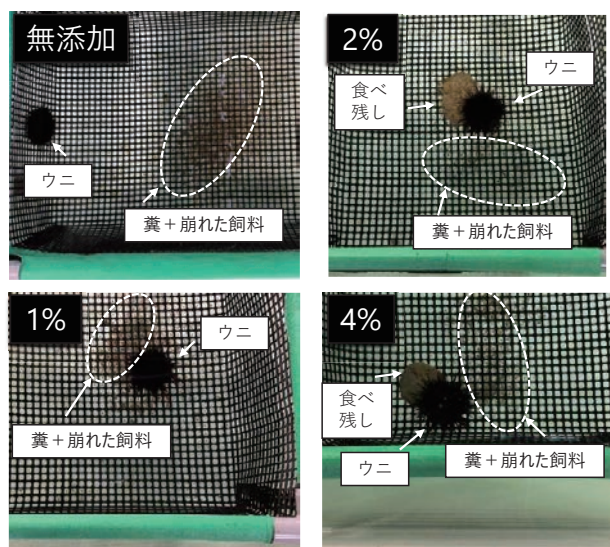


図7 CNF添加配合飼料のウニへの給餌8日後の様子(各写真内の左上の数字はCNFの添加量)

れたが、相違点として網の上には食べ残しの配合飼料の存在が確認された。

いずれの配合飼料においても網の下に糞が見られたことから、摂餌性に与える影響はほとんどないものと考えられる。さらに、CNF添加配合飼料を摂餌してもへい死が見られなかったことから、CNFの消化不良によって生存に影響を与える可能性が低いことがわかった。また、2、4wt%添加配合飼料においては網の上に食べ残しの飼料が残っていたことから2wt%以上のCNF添加によりウニの摂餌圧にも耐えうる実用的な水中保形性を有することが示唆された。

4. おわりに

本研究では水に不溶性のナノ繊維であるCNFを添加することで水中保形性を向上させたウニ養殖用配合飼料の開発を行った。市販の配合組成の飼料にCNFを均一に添加する混合技術を確立するとともに、CNF添加配合飼料におけるCNF添加量と水中保形性の関係、波がある状況下での水中保形性向上およびウニの摂餌性への影響を与えないこと等を明らかにした。以上より本研究の成果であるCNFの添加により水中保形性が向上した配合飼料を利用することでウニ養殖の給餌コスト削減が期待される。また、本研究で開発したCNF添加配合飼料については共同研究機関と共に特許を出願した。

今後はCNF添加配合飼料のラボ設備での押出成形から量産機での製造へのスケールアップの検討や、大量生産した配合飼料を用いて実海域での実証試験等を行い、CNF添加配合飼料のコスト削減効果を検証するとともに、展示会への出展や学会発表等を通じ研究成果の公表を図り、本技術の普及に努める予定である。

参考文献

- 1) 農林水産省海面漁業生産統計調査: https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/index.html#r
- 2) 財務省貿易統計: <https://www.customs.go.jp/toukei/info/>
- 3) 東京都中央卸売市場-市場統計情報(月報・年報): <https://www.shijou.metro.tokyo.lg.jp/torihiki/geppo>
- 4) 浦和寛, 萩野裕貴 他: 養殖ビジネス, 56(13), pp.41-44, (2019)
- 5) 矢野浩之: 構造用CNFの現状と将来展望, 工業材料, 第68巻, 第8号, pp.14-16, (2020)
- 6) 永田員也, 尾崎郁彦 他: 日本ゴム教会誌, 第96巻, 第4号, pp.100-105, (2023)

無機系徐放性肥料の開発

執行 達弘、森 武士、小川 雄太、松嶋景一郎

Development of Slow-Release Fertilizers Coated with Inorganic Materials

Tatsuhiro SHIGYO, Takeshi MORI, Yuta OGAWA, Keiichiro MATSUSHIMA

キーワード：非焼成セラミックス、ジオポリマー、強度、耐水性、造粒

1. はじめに

徐放性肥料とは、圃場で肥効成分を徐々に放出（溶出）する肥料である¹⁻³⁾。長期間にわたって農作物の成長を助けるだけでなく、施肥量の削減による省資源や環境負荷の軽減、施用回数の低減による省力化を実現している。徐放性の付与方法としては、化学的方法と物理的方法が開発されている¹⁾。なかでも、物理的方法のひとつである被覆法で製造された樹脂被覆肥料は、水溶性の肥効成分を安定な樹脂の被膜で覆うことで溶出挙動を高度に制御できることから²⁾、徐放性肥料の主流となっている。

近年、樹脂被覆肥料もマイクロプラスチック問題の原因として指摘されている⁴⁻⁷⁾。マイクロプラスチック問題とは、プラスチックが海洋に流出し、その過程で微細になることで海洋生物の生態系へ悪影響を与えることである⁴⁾。さらに、それらを取り込んだ魚や貝を食べることで人体へ影響することも危惧されている。樹脂被覆肥料においても、肥効成分を溶出した後の被膜が水路や河川を経て海洋に流出することが問題視されるようになってきている⁵⁻⁷⁾。したがって、樹脂被覆肥料の代替となる徐放性肥料の開発は喫緊の課題である。

一方、我々は二水石膏（硫酸カルシウム二水和物）とシリカゾルを混合、成形するだけで硬化体を作製できる「非焼成硬化技術」の開発に取り組んできた^{8,9)}。そのなかで、得られる硬化体が水中で7日間をかけて徐々に崩壊することを見出した^{10,11)}。この硬化体にさらなる耐水性を付与し、既報¹⁾と同様に30日以上残存するようになれば、被覆肥料の被膜への適用が期待できる。ここで、耐水性の付与方法としてジオポリマーに着目している。ジオポリマーとは、非晶質ケイ酸アルミニウムとアルカリ溶液を混合することで得られる硬化体であり、強度と耐水性に優れることが知られている¹²⁾。また、

二水石膏と同じくカルシウム成分を含むジオポリマーも報告されていることから¹³⁾、非焼成硬化技術とジオポリマーを組み合わせ、非焼成硬化技術で作製する硬化体に耐水性を付与できると考えた。

本研究では、無機系徐放性肥料の開発を目的とし、水中で30日以上残存する無機材料の開発および、開発材料と化学肥料からなる被覆粒子の作製と評価を行った。まず、非焼成硬化技術の原料（二水石膏とシリカゾル）とジオポリマーの原料（フライアッシュと水酸化ナトリウム）を用いて種々の配合割合、温度・時間・雰囲気で作製した硬化体を作製した。硬化体が水中で30日以上残存する作製条件を見出すため、これらの水中での崩壊挙動を評価した。次に、パン型造粒により開発材料で化学肥料（硫酸；硫酸アンモニウム、重過石；リン酸二水素カルシウム、硫加；硫酸カリウム）を被覆した後、肥効成分の水中への溶出挙動を調べた。

2. 実験方法

2.1 水中で30日以上残存する無機材料の開発

非焼成硬化技術の原料として二水石膏（GY；特級、関東化学株式会社製）とシリカゾル（SS；AT-30、株式会社ADEKA製）を、ジオポリマーの原料としてフライアッシュ（FA；JIS灰、株式会社札幌谷藤より購入）と10mol/L水酸化ナトリウム水溶液（NH；特級、キシダ化学株式会社製）を用いた。これらを種々の割合で混合した後、一軸成形で直径6mm、長さ6mmのペレットを作製し、60℃で24h乾燥することで硬化体を得た。硬化条件の検討では、23～80℃で3～168h、大気中・蒸気中・真空中で乾燥することで硬化体を得た。

水中での崩壊挙動を調べるため、浸漬試験を行った。既報¹¹⁾を参考に蒸留水500mLに硬化体500mgを浸漬し、23℃の恒

事業名：経常研究

課題名：樹脂被覆肥料の代替を目指した無機系徐放性肥料の開発

温室に静置した。24hごとに蒸留水を交換し、所定の時間後、硬化体を60℃で24h乾燥、秤量することで重量減少率を求めた。

硬化体について、X線回折（XRD；ULTIMA IV・株式会社リガク製）による生成相の同定および、走査型電子顕微鏡（SEM；JSM-6610LA・日本電子株式会社製）による微細構造の観察を行った。また、圧壊強度を硬度計（KHT-40N・株式会社藤原製作所製）により測定した。

2.2 開発材料と化学肥料からなる被覆粒子の作製と評価

原料として開発材料（GYとFAが重量比3：7の粉末に外割25mass%のNHを加えて作製する硬化体）と化学肥料（硫安・重過石・硫加）を用いた。パン型造粒機（PZ-01R・アズワン株式会社製）に化学肥料を投入し、続いて同重量の開発材料の粉末を投入、NHを噴霧することで被覆粒子を作製した。パンは傾き30度、速度35rpmとした。その後、60℃で24h乾燥することで硬化体を得た。

被覆粒子の硬化体について、2.1節の浸漬試験を行った後、原子吸光度計（ZA3300・株式会社日立ハイテク製）により蒸留水に溶出した肥効成分の濃度を求めた。

3. 結果と考察

3.1 水中で30日以上残存する無機材料の開発

SSは反応に寄与せず、GYの析出を促進する触媒の働きをすることから¹¹⁾、無機材料の開発に先立ち、本実験におけるSSの必要性を検証した。図1にSSあり、すなわち「GYに外割10mass%のSSを加えた粉末」と「FAに外割25mass%のNHを加えた粉末」を重量比3：7で混合して作製した硬化体（図1（a））と、SSなし、すなわち、GYとFAが重量比3：7の粉末に外割25mass%のNHを加えて作製した硬化体（図1（b））の水中での崩壊挙動を示す。SSありの方が常に重量減少率が低く、浸漬28日後でもSSありで43%、SSなしで57%と、SSありの方が残存した。しかし、その差は14%であったことから、材料組成の簡便さとコストの視点を優先し、NHを加える場合はSSを加えないこととした。

図2に、GYとFAが重量比10：0、3：7、1：9、0：10の粉末に外割10mass%のSS（10：0の場合）または外割25mass%のNH（3：7、1：9、0：10の場合）を加えて作製した硬化体の水中での崩壊挙動を示す。これより、非焼成硬化技術で作製した硬化体（10：0）は徐々にではあるが7日後に全量が崩壊するのに対し、ジオポリマーの原料であるFAを組み合わせた硬化体（3：7、1：9、0：10）は30日以上残存した。FAの割合が大きいほど、より長期間、硬化体が残存し、3：7の場合、浸漬28日後に重量減少率が57%と、徐放性肥料に適した崩壊挙動を示すことがわかった。圧壊強度も浸漬前は74Nであり、一般的な樹脂被覆肥料が示した43Nを上回る強

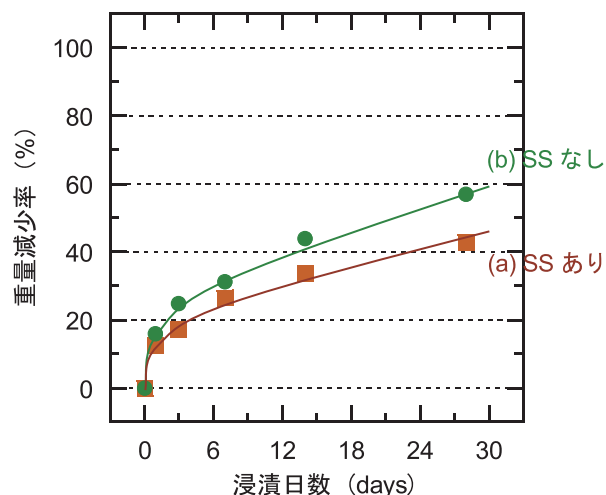


図1 SSの有無が異なる硬化体の水中での崩壊挙動

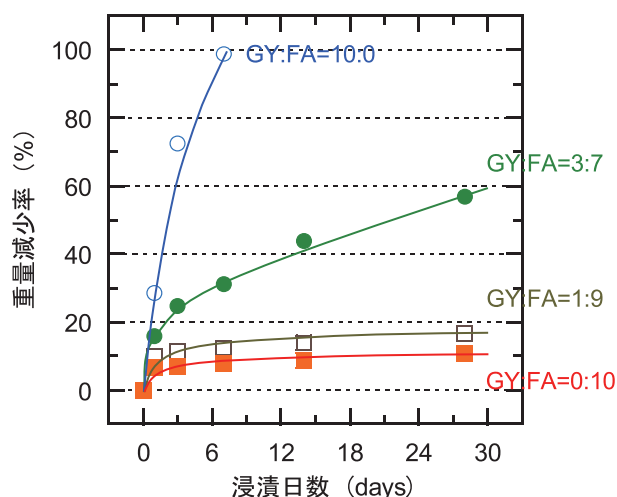


図2 GYとFAの重量比が異なる硬化体の水中での崩壊挙動

度であった。以降、これを開発材料と呼ぶ。

開発材料の硬化・崩壊機構を明らかにするため、浸漬前と浸漬28日後（浸漬後）の硬化体について、生成相と微細構造を調べた。図3にXRDパターンを、図4にSEM像を示す。まずXRDパターンに着目すると、浸漬前はGY由来の二水石膏（図3のG）、FA由来の石英およびムライト（図3のQおよびM）、それらの反応物と考えられるチャバザイト（図3のC）が検出され、浸漬後はFA由来の石英およびムライトさらには未同定相が検出された。これより、期待していた、GYがすべてジオポリマーに取り込まれることで耐水性が付与される反応は見られなかった。一部のGYがFAと反応してチャバザイトを生成し、浸漬することで、残りのGYとチャバザイトが溶出したと推察できる。次にSEM像に着目すると、浸漬前はGYに特徴的な棒状粒子¹⁴⁾、FAに特徴的な球状粒子¹²⁾、そして、チャバザイトと考えられる球状粒子表面に成長した粒子が観察され、浸漬後はFAジオポリマーと考えられる結合した球状粒子が観察された。SEM像からも、

GY、FA、チャバザイトの生成、溶出について同様の推察ができる。

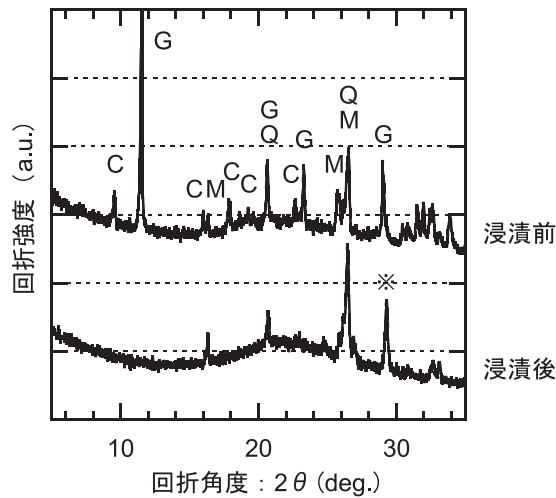


図3 浸漬前後の硬化体のXRDパターン
G：二水石膏 Q：石英
M：ムライト C：チャバザイト
※：未同定相

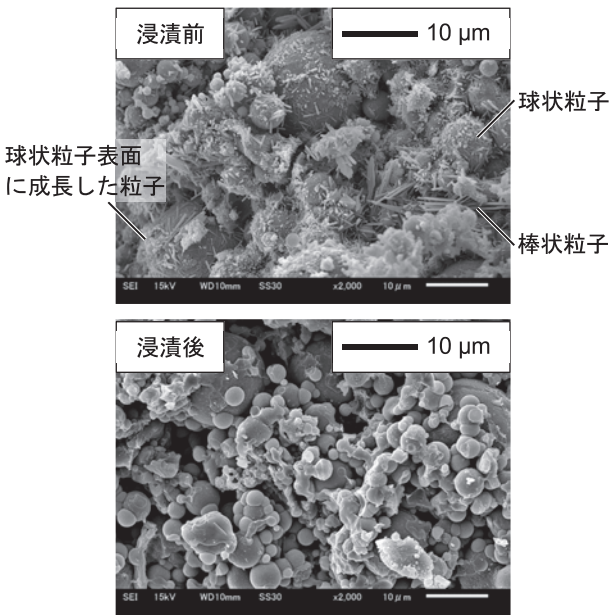


図4 浸漬前後の硬化体のSEM像

硬化条件が圧壊強度と水中での崩壊挙動に与える影響を明らかにするため、開発材料の条件で作製したペレットについて、23～80℃で3～168h、大気中・蒸気中・真空中で乾燥することで硬化体を作製し、評価した。表1に、それらの圧壊強度と浸漬7日後の重量減少率を示す。23℃はジオポリマー化する温度ではないため¹³⁾、圧壊強度は30Nと低く、浸漬により直ちに崩壊した。大気中、40～80℃においては、圧壊強度は温度が高いほど、時間が長いほど高くなる傾向が

見られた（最大77N）。ただし、重量減少率が31～41%と同程度であったことから、この範囲では温度、時間によらずジオポリマー化したと考えられる。蒸気中での乾燥は通常のジオポリマーの作製でよく採用される乾燥方法であるが、ここでも圧壊強度は144Nと最大値を、重量減少率は25%と最小値を示した。一方、真空中では、25Nと圧壊強度が低く、浸漬により直ちに崩壊した。23℃と同様にジオポリマー化していないと考えられるが、詳細を明らかにするにはさらなる実験が必要である。

表1 硬化体の圧壊強度と浸漬7日後の重量減少率

温度 ℃	時間 h	雰囲気	圧壊強度 N	重量減少率 %
23	24	大気	30	直ちに崩壊
40	24		50	34
60	3		60	41
	24		74	31
	72		62	35
	168		40	38
80	24		77	33
60	24	蒸気	144	25
60	24	真空	25	直ちに崩壊

3.2 開発材料と化学肥料からなる被覆粒子の作製と評価

図5に、3.1節で見出した開発材料で硫安・重過石・硫加を被覆した後、60℃で24h乾燥した粒子の外観を示す。硫安について、NHの噴霧時に強いアンモニア臭がした。硫安をアルカリ性にすることでアンモニアガスが発生したと考えられる。また、被覆粒子は不均一であり、圧壊強度も測定限界以下と硫安よりも低い値になったことから、硫安にはこの方法を適用できないことがわかった。重過石と硫加については、アンモニア臭はしなかった。また、比較的均一な被覆肥料を作製でき、圧壊強度も31N、38Nと一般的な樹脂被覆肥料に相当する強度を得ることができた。

開発材料で重過石または硫加を被覆し、硬化させた粒子について浸漬試験を行い、肥効成分の溶出挙動を調べた。いずれも浸漬1日で全量の約90%を溶出し、浸漬7日後には重過石の溶出濃度が4ppm、硫加の溶出濃度が1ppmまで減少した。3.1節より、開発材料は水中で30日以上残存する。しかし、より短期間のうちにGYとチャバザイトが溶出し、その空隙から肥効成分も溶出したものと推察できる。

重過石、硫加ともに、単独では直ちに全量が溶出するのに対し、期間は短い被覆による徐放効果が認められた。ただし、徐放性肥料とするには溶出期間を大幅に延ばす必要があることから、被覆条件に加え、肥効成分の溶出を抑制可能な被覆材料の検討も含めた基礎研究を継続している。

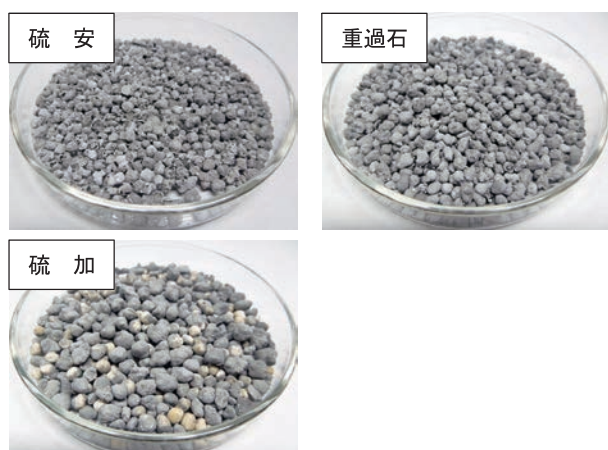


図5 作製した被覆粒子の外観

4. まとめ

無機系徐放性肥料の開発を目的とし、水中で30日以上残存する無機材料の開発および、開発材料と化学肥料からなる被覆粒子の作製と評価を行った。

我々が長年開発に取り組んでいる非焼成硬化技術にジオポリマーを組み合わせた、「GYとFAが重量比3：7の粉末に外割25mass%のNHを加えて60℃で24h乾燥することで得られる硬化体」を用いることで、浸漬試験で30日以上残存させることができた。

しかし、この開発材料で重過石または硫加を被覆した粒子は浸漬試験7日後にはほぼ全量を溶出した。より短期間のうちに開発材料からGYとチャバザイトが溶出し、その空隙から肥効成分も溶出したものと推察できることから、実用化に向けて、被覆条件に加え、被覆材料の検討も含めた基礎研究を継続している。

参考文献

- 1) 徐放技術と用途展開，東レリサーチセンター，366PP., (2002)
- 2) 菅野均志・西尾隆：日本土壤肥科学雑誌，Vol.86 No.1, pp.60-65, (2015)
- 3) 辻孝三：農薬製剤はやわかり，化学工業日報社，224PP., (2006)
- 4) 高田秀重：廃棄物資源循環学会誌，Vol.29 No.4, pp.261-269, (2018)
- 5) 令和2年度プラスチックを使用した被覆肥料の流出実態調査，農林水産省, (2020)
- 6) 令和3年度プラスチックを使用した被覆肥料の流出実態調査，農林水産省, (2021)
- 7) 令和5年度プラスチックを使用した被覆肥料の流出実態調査，農林水産省, (2023)
- 8) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構・株式会社加賀谷ブリック，特許第5070529号, 2012-11-14
- 9) 野村隆文・執行達弘他：北海道立総合研究機構工業試験場成果発表会発表要旨集，pp.30-32, (2013)
- 10) 執行達弘・森武士他：北海道立総合研究機構工業試験場成果発表会発表要旨集，p.31, (2022)
- 11) 執行達弘・森武士他：北海道立総合研究機構工業試験場報告，Vol.321, pp.57-60, (2022)
- 12) Joseph Davidovits：Geopolymer Chemistry & Applications, Institut Geopolymere, 623PP., (2015)
- 13) Sanjay Kumar・Rakesh Kumar et al.：J. Mater. Sci., Vol.45, pp.607-615, (2010)
- 14) セメント・セッコウ・石灰ハンドブック，無機マテリアル学会，750PP., (1996)

ハイ・エントロピー合金の粉末焼結に関する研究

中嶋 快雄、宮腰 康樹、飯野 潔

Fabrication of MnFeCoNiCu High-Entropy Alloy
by Spark Plasma Sintering Method

Yoshio NAKAJIMA, Yasuki MIYAKOSHI, Kiyoshi IINO

抄 録

ハイ・エントロピー合金（HEA）は5種類以上の金属をほぼ等量混合した合金であり、既存の材料にはない高強度や耐熱・耐食性が得られる新材料として注目され、近年研究が盛んに行われている。本研究では、放電プラズマ焼結法（SPS法）を用いてHEAを作製するため、低温環境下で高強度を示すMnFeCoNiCu系HEAを対象に、金属5元素の混合粉末から焼結体を作製し、焼結時間の違いによる組織変化や機械的性質を評価した。SPSにより40MPa、900℃で6min以上保持する条件で作製した焼結体は、材料組織が均質かつ単相の面心立方格子（FCC）構造を有するものであった。焼結体の室温における曲げ強さと硬さはS45Cより高い値を示し、低温衝撃試験では延性を示すディンプル破面が見られたことから、低温環境下で使用する構造物材料としての可能性が示された。

キーワード：ハイ・エントロピー合金、放電プラズマ焼結法、曲げ強さ、ディンプル

1. はじめに

ハイ・エントロピー合金（HEA）は、5種類以上の金属をほぼ等量混ぜた合金であり、従来からある鉄鋼材料などと比べ、強度や耐熱・耐食性に優れた合金が多数報告されている。特に、Cantor合金と呼ばれるCrMnFeCoNi組成の合金は、極低温における強度・延性がいずれも高いなどの性質が報告されており¹⁻³⁾、Cantor合金をベースに一部元素を置き換え、材料特性をさらに向上させた派生材料の研究も行われている⁴⁾。CrをCuに置換えたMnFeCoNiCu組成の合金もそのひとつであり、Cantor合金と同様に低温下での高強度を示すことから、国内においては丸山らによりMnFeCoNiCuの casting 合金について研究が行われている⁵⁾。

HEAの材料は主に casting 法やアーク溶解法、メカニカルアロイング法などにより成形される。先述の丸山らの研究では、MnFeCoNiCu合金は金属元素がデンドライト状に濃淡が認められたこと、また casting 時にMnが酸化することを防ぐため合金元素のほかに黒鉛（C）を添加したところ、C添加により引張強さは増加するものの、添加量5.5%のものは伸びが

小さくなったことが報告されている⁵⁾。当場が保有する放電プラズマ焼結（SPS）技術は、真空雰囲気での急速加熱（100℃/min以上）が可能なることから、酸化防止のC添加が不要となりこれらの問題を同時に解決することができる。また、一般的に金属は結晶粒径が微細なものほど機械的性質に優れることからSPS法の急速加熱により結晶粒が微細化し、機械的性質の向上も期待される。そこで本研究では、 casting 法より有利なSPS法によりHEAを形成するため、MnFeCoNiCu合金の金属5元素を等量（at%）となるよう混合した粉末から焼結体を作製し、焼結条件の違いによる合金組織の変化を分析するとともに、機械的性質の評価を行った。

2. 実験方法

2.1 混合粉末の作製

表1に、使用した原料粉末（いずれも㈱高純度化学研究所製）を示す。原料粉末の混合には自動乳鉢（石川式瑪瑙乳鉢AGA型・㈱石川工場製、以下「AG」）を使用し、5種類の金属合計25gを1h混合した。また、粉末焼結では焼結前に合

事業名：経常研究

課題名：ハイ・エントロピー合金の粉末焼結に関する研究（令和5～6年度）

金化されていると材料作製に有利であるため、焼結前の混合粉末の合金化を試みた。本研究では、回転運動などの機械的エネルギーで原料粉末を粉砕し合金化するメカニカルアロイング法を使用し、原料粉末を20at%ずつ秤量し、1つの容器（内面超硬合金）につき25gを、径13mmの球100個とともに入れ、遊星ボールミル（TYPE：05.101・Fritsch製、以下「PBM」）で同時に容器2個を処理した。PBMの回転数は公転360rpm、自転781rpmとして80～100h運転した。

表 1 原料粉末

元 素	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
粒 径	10 μ m	3～5 μ m	5 μ m	2～3 μ m	5 μ m
純 度	99.9%	99.9%	99%up	99.9%	99.9%

2.2 焼結体の作製

作製した混合粉末を、放電プラズマ焼結機（SPS-1050・住友炭鉱業（株）製、以下「SPS機」）を用いて焼結し、直径20mm、厚さ3mmの円板を作製した。型は黒鉛製で、パンチ径 ϕ 20mm、ダイ外径 ϕ 50mmのものを用い、これに混合粉末7.5gを充てんした。焼結条件は、軸方向圧力40MPa、焼結温度（ダイ表面温度）900℃で固定し、保持時間を1、3、6および30minとした（図1）。

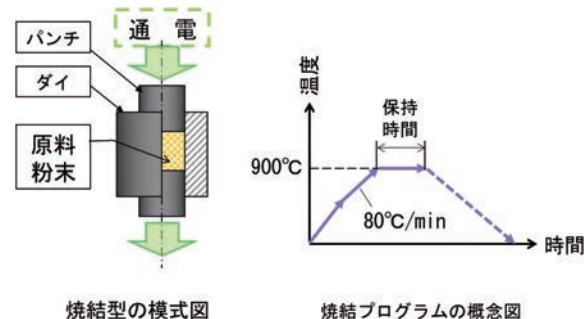


図 1 放電プラズマ焼結法の概念図

2.3 焼結体の評価

得られた焼結体の結晶構造を調べるため、焼結体の表面（平面部）をX線回折装置（ULTIMA IV・（株）リガク製、以下「XRD」）により分析を行った。また、焼結体の断面を研磨して光学顕微鏡（GX71・オリンパス（株）製）による組織観察を行い、走査型電子顕微鏡（JSM-6610LA・日本電子（株）製、以下「SEM」）、SEM付属のエネルギー分散型X線分析装置（EDS）により焼結体の元素分布を分析した。

機械的性質の評価は、硬さ試験、室温曲げ試験および低温衝撃試験を行った。

硬さ試験はビッカース硬さ試験機（MMT-X3・（株）マツザワ製）を用いて前述の試料断面の硬さを測定した。

室温曲げ試験は万能材料試験機（AG-100Xplus・（株）島津製作所製）を使用し、焼結体から厚さ2mm、幅3mm、長さ17mm以上の板状試験片を採取し、室温23℃に保たれた試験室において試験片に曲げ荷重を加えた。支点間距離は15mm、押し金具の先端半径2mm、試験速度（押し金具の降下速度）を1mm/minとし、試験片が破断するか、試験荷重が最大値を過ぎたところで負荷を停止させた。

低温衝撃試験には、アイゾット式衝撃試験機（No.258・ひょう量1J、（株）安田精機製作所製）を用いた（図2左）。試験片の寸法は、JIS規格では長さ80mm、幅10mm、厚さ4mmのものを採取し、試験機の取付位置から距離22mmの位置を打つことが規定されているが、直径20mmの焼結体から規定どおりの試料は採取できないため、試料の保持点から打撃点までの距離を5.5mm（規定の4分の1）に短縮する専用ホルダー（アルミニウム合金製）を作製した（図2右）。試験では、このホルダーに試験片長さ11mm以上、幅3mm、厚さ1mmに深さ約0.2mmのノッチを設けた試験片を固定し、液化窒素中にホルダーごと浸漬して-196℃近傍まで冷却した後、試験機に取付け、試験片近傍の熱電対の温度が-100℃になった時に衝撃荷重を与えた。試験片の破断面はSEM観察で評価した。



図 2 アイゾット衝撃試験機（左）と試験用ジグ（右）

3. 結果と考察

3.1 作製した混合粉末

図3にAGにより作製した混合粉末のSEM-EDS分析結果を、図4にPBMにより80h混合した粉末（80h）のSEM-EDS分析結果を、図5に粉末のX線回折（XRD）による分析結果を、それぞれ示す。

図3および図4から、いずれの混合粉末も各金属が単独で存在しており、AGとPBMによる粒径の違いも見られなかった。

また図5からも、AG、PBMのいずれも各金属ごとに回折ピークが現れ、合金化を示す回折ピークは見られず、PBMによる合金化は認められなかった。このことから、今回行ったPBMの条件ではAGに比べ長時間処理を行っても期待した

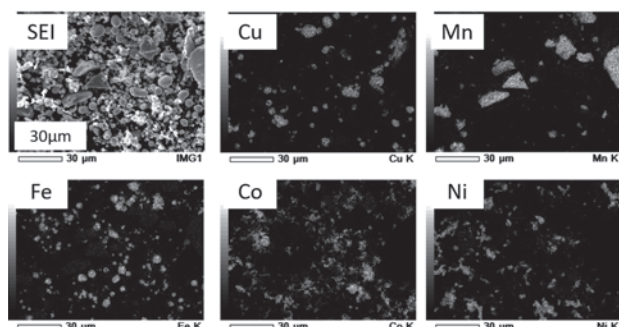


図3 AG混合粉末 (1h) のSEM-EDS分析結果

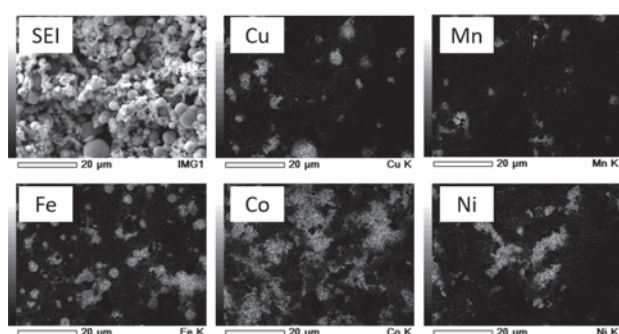


図4 PBM混合粉末 (80h) のSEM-EDS分析結果

合金化が見込めないと判断し、以後の実験はAG処理の混合粉末のみを使用した。

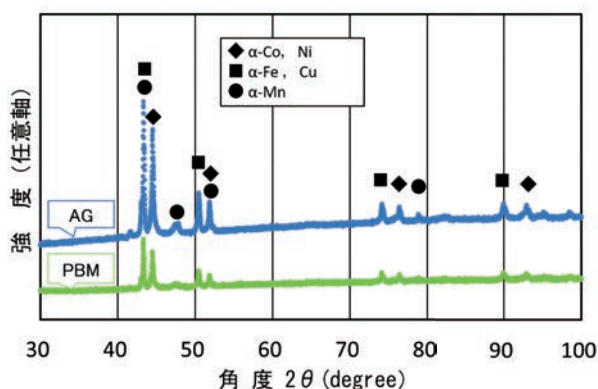


図5 混合粉末 (MnFeCoNiCu) のXRD分析結果

3.2 焼結体の外観

図6に、保持時間3minで焼結した焼結体の外観を示す。この試料は、型から取り出した後、ダイとパンチの隙間に少量浸入したバリを除去し、表面をブラストした後に切断して断面をあらわしたものである。表面近傍の形状は溶融・凝固の痕跡を示している。また断面に目立つ空隙はなく、金属光沢が認められることから、マクロ観察の段階でこの焼結条件により緻密な焼結体が得られたと言える。なお、保持時間を1、6および30minと変えた焼結体も同様の結果であった。



図6 焼結体 (40MPa、900°C、3min) の外観

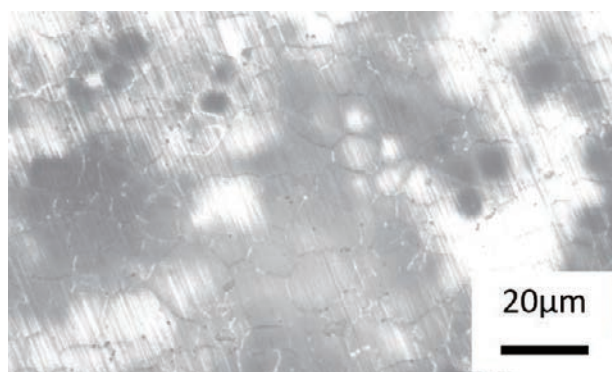
3.3 焼結体の断面組織

図7に断面の光学顕微鏡写真を示す。a) がエッチングなしの研磨面、b) が3%ナイトール液によりエッチングした研磨面である。a) からは、10 μm程度の多角形組織がかすかに観察できる。またb) の組織はエッチングむらが多いものの、a) と同様に10 μm程度の結晶粒が観察できる。

図3のAG粉末のSEM写真と比較すると、AG粉末の粒径と結晶粒の大きさに顕著な違いはなく、SPS法の特長の1つである、焼結前後で粒成長が抑えられたことを確認した。



a) エッチングなし



b) 3%ナイトール液、5s浸漬
図7 焼結体断面の顕微鏡組織

図8、9、10および11に、保持時間を1、3、6および30minと変えた焼結体断面の、SEM-EDSによる面分析結果

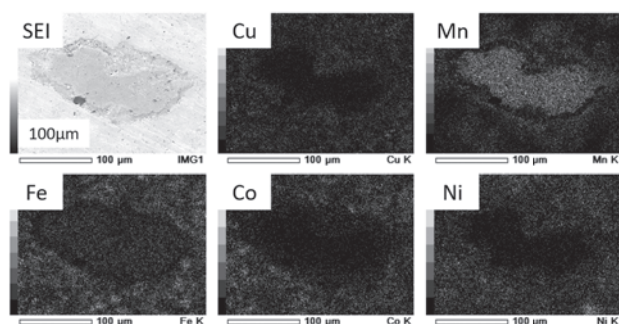


図8 焼結体断面のSEM-EDS分析
(AG 1h、1min焼結)

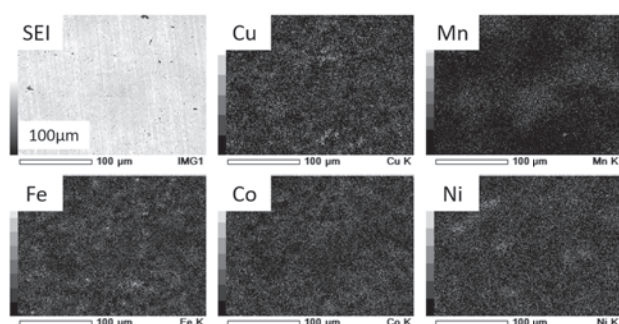


図9 焼結体断面のSEM-EDS分析
(AG 1h、3min焼結)

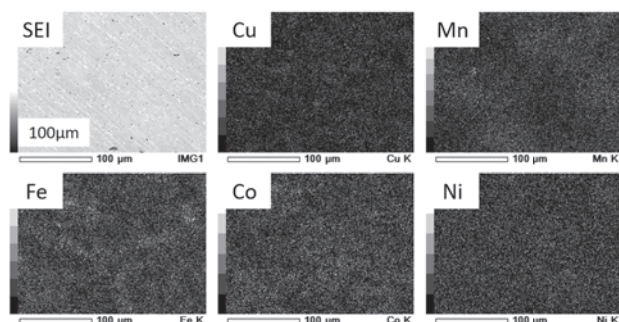


図10 焼結体断面のSEM-EDS分析
(AG 1h、6min焼結)

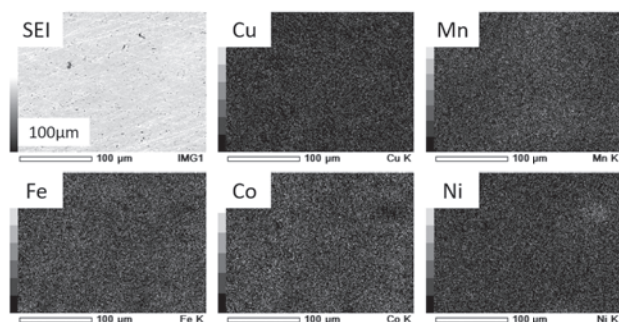


図11 焼結体断面のSEM-EDS分析
(AG 1h、30min焼結)

をそれぞれ示す。

保持時間1minおよび3minのものはMnが偏析し均一になっていないが、6minおよび30minのものは偏析がほぼみられない。したがって、均質な焼結組織を得るためには保持

時間6min以上を要することが明らかになった。

組織の均質化と保持時間の関係について、5元素のうちCuとMnに着目しCu-Mnの二元系状態図⁶⁾によると、Cu-Mnの共晶点温度は約940℃であった。SPS法の構造上、原料粉末の温度はダイ表面より高くなるため、型内でCu-Mnの液相が生じたと考えられる。また、他の3元素はCu-Mn液相と接することで液中に拡散し、徐々に均質化したと考えられる。

3.4 X線回折

図12に、各保持時間の焼結体表面のX線回折結果を示す。比較として、AG混合粉末（焼結前）の結果も掲載した。

前述のとおり、焼結前の混合粉末からは構成元素であるMn、Fe、Co、NiおよびCu各々のピークが認められる。

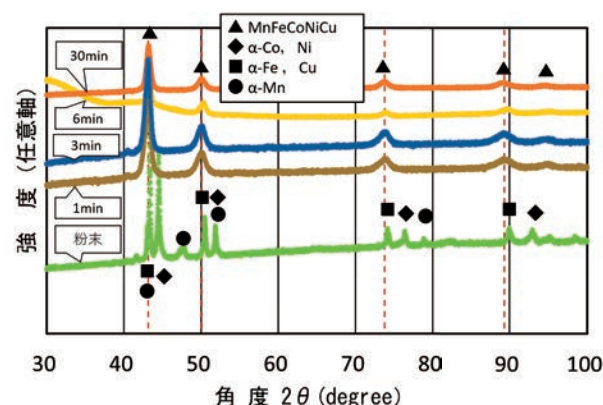


図12 MnFeCoNiCu合金のX線回折結果の比較

一方、焼結体は、AG粉末のピークとは異なる角度にピークが認められる。既報⁵⁾と比較すると、これらの回折ピークは面心立方格子（以下FCC）相を示すものである。このことから、焼結により単相のFCC構造を有する合金が形成されたと考えられる。

3.5 室温における機械的特性の評価

3.4節で得られた結果を踏まえ、組織が均一かつFCC単一相が形成された保持時間6min、30minの焼結体を使用し、以降の評価・試験を行った。焼結体断面の硬さ測定の結果、保持時間が6minでの硬さは264HV0.2、30minでは256HV0.2であり、機械構造用炭素鋼S45C（生材、以下同じ）の硬さ225HV0.2と比較すると、それ以上の値を示した。

次に、室温曲げ試験の結果を図13に示す。MnFeCoNiCu合金の曲げ強さは、保持時間6minでは1546MPa、30minでは1761MPaであり、S45C（生材）の1582MPaと比較すると、6minが同等、30minはより高い値を示した。破断面をSEM観察した結果、図14のとおり上記焼結体はいずれもディンプルと呼ばれる延性を示す破面が形成されており、破断時にエネルギーを吸収しながら破壊したことが伺える。

これらの結果から、作製したMnFeCoNiCu合金の焼結体は常温下でS45Cと同程度の強度を有していた。

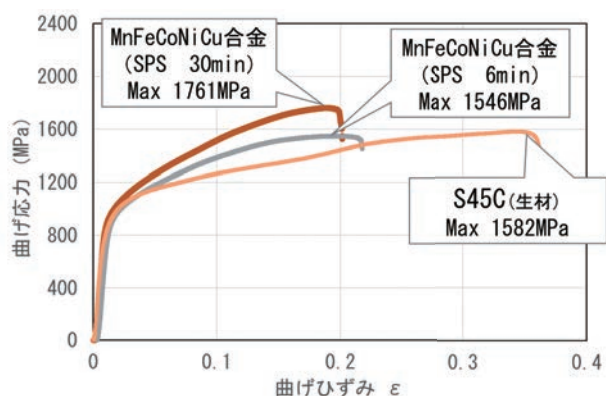
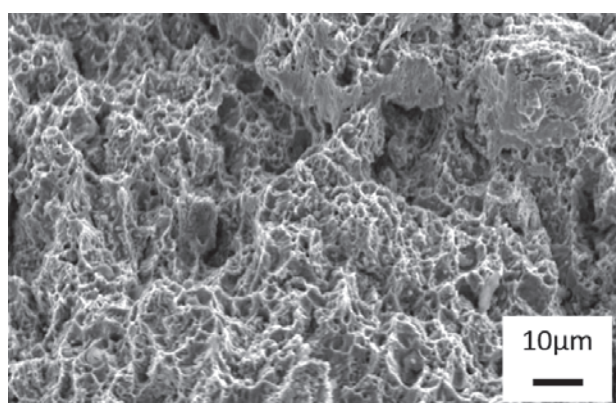
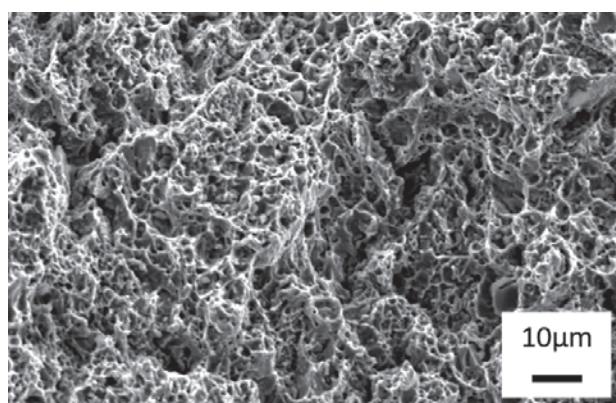


図13 MnFeCoNiCu合金の室温曲げ試験結果



a) 6min



b) 30min

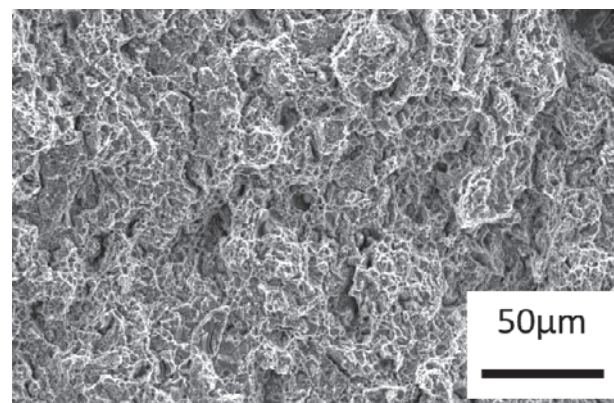
図14 MnFeCoNiCu合金の室温曲げ試験破面のSEM像

3.6 低温衝撃試験

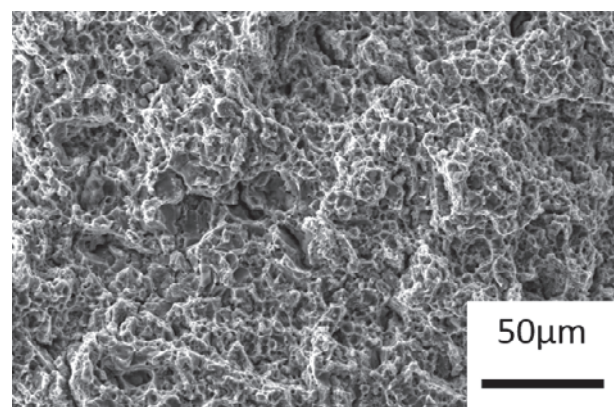
図15に、試験片温度-100℃の低温衝撃試験で使した試験片破面のSEM写真を示す。衝撃荷重により試験片は完全に分離し破断したが、破面にはディンプルが見られたことから、-100℃の低温環境下においても延性が示された。

これに対し、S45C（生材）の低温衝撃試験（-100℃）では

破面のほぼ全域がぜい性破面であり（図16）、このことから低温環境下ではS45Cよりぜい化されにくいことが示された。



a) 6min



b) 30min

図15 MnFeCoNiCu合金の低温衝撃破面のSEM像

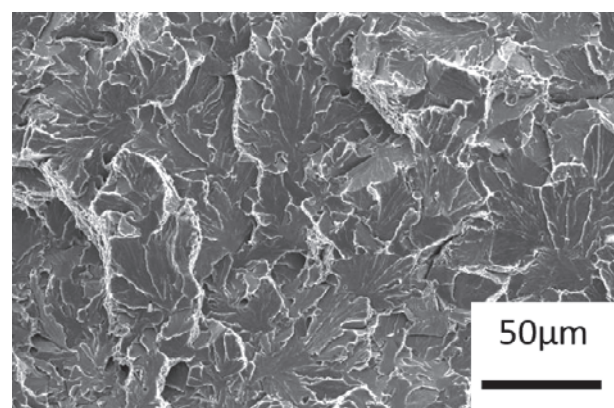


図16 S45C（生材）の低温衝撃破面のSEM像

4. おわりに

本研究では、単元素の試薬を混合した粉末から、SPS法により均質なMnFeCoNiCu系合金を作製できることがわかった。この合金は、常温における強度がS45Cと同程度であった。また低温衝撃に対しても延性が保たれたことから、低温環境

用の構造材料としての可能性が示された。

なお、作製した材料の低温における機械的強度について、低温ぜい化しない傾向が見られたものの、強さを数値で把握するには至らなかった。引き続き低温における材料強度の評価などの取組みを進めていく。

参考文献

- 1) 辻伸泰, 他: mater, 第57巻第7号, pp.317-322 (2018)
- 2) 朱修賢, 他: 第57巻第7号, pp.333-337 (2018)
- 3) 桑原孝介, 他: mater, 第57巻第7号, pp.328-332 (2018)
- 4) B. Cantor : *Progress in Materials Science*, 120, 100754 (2021)
- 5) 丸山徹, 他: 鑄造工学, 第94巻第9号, pp.536-541 (2022)
- 6) 日本金属学会編: 金属データブック, 丸善, pp.585, (1974)

北海道立総合研究機構工業試験場報告
No.324 (2025)

発 行 令和 8 年 1 月

発行所 地方独立行政法人 北海道立総合研究機構
産業技術環境研究本部
工 業 試 験 場
〒060-0819 札幌市北区北19条西11丁目
電話 (011) 747-2321 (代表)

印刷所 小南印刷株式会社

