



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.322)

2023

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.322) 2023

目 次

一般論文

- | | | |
|--|--|----|
| 1 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の開発 | 飯島 俊匡, 藤澤 怜央, 近藤 正一
本間 稔規 | 1 |
| 2 AIによる意味的類似度を用いた日本語検索システムの開発 | 全 慶樹, 近藤 正一, 堀 武司 | 9 |
| 3 AIによる自律化を目指したハウス栽培管理作業向けフィールドロボットの開発 | 浦池 隆文, 今岡 広一, 伊藤 壮生
全 慶樹, 岡崎 伸哉, 佐野 亮
鈴木 廣明 | 15 |
| 4 見守りのための映像脈波計測技術の開発 | 泉 巖, 川崎 佑太, 前田 大輔
中島 康博, 桑野 晃希 | 21 |
| 5 セルロースナノファイバーの構造解析とガスバリア性評価 | 細川 真明, 山岸 暢, 吉田 昌充
瀬野修一郎, 可児 浩 | 27 |
| 6 モノマテリアル包材によるメロンの長期保存技術 | 細川 真明, 山岸 暢, 吉田 昌充
瀬野修一郎, 可児 浩 | 35 |
| 7 複数応力が作用する鋳造製品のトポロジー最適化計算を用いた軽量・高剛性化形状設計方法の開発 | 鈴木 逸人, 上田 修生, 本田 真也
武田 量, 佐々木克彦, 小椋 博樹
泉上 和範 | 41 |
| 8 生体情報にもとづく好意推定手法の開発 | 大久保京子, 安田 星季, 神生 直敏
今岡 広一 | 49 |

研究ノート

- | | | |
|-------------------------------------|--|----|
| 1 ソフトウェア無線による移動体向け無線データ伝送システムに関する研究 | 宮崎 俊之, 新井 浩成, 堤 大祐
日下 聖 | 55 |
| 2 コンブ漁場調査のための空撮画像解析技術に関する研究 | 浦池 隆文, 飯島 俊匡, 伊藤 壮生
宮崎 義弘, 湯浅 友典, 相津 佳永 | 61 |
| 3 曲げ加工しても剥離しにくい溶融亜鉛めっきの開発 | 飯野 潔, 宮腰 康樹, 中嶋 快雄
櫻庭 洋平 | 67 |
| 4 レーザー加工によるジルコニア板の表面改質 | 中嶋 快雄, 飯野 潔, 鈴木 逸人
櫻庭 洋平 | 71 |

CONTENTS

Regular Paper

- 1 Development of Automatic Measurement Technology for Smart Factories in Food Manufacturing Industry..... 1
Toshimasa IJIMA, Reo FUJISAWA, Shouichi KONDOU,
Toshinori HONMA
- 2 Development of Japanese Search Systems using AI-based Semantic Similarity 9
Keiki ZEN, Shouichi KONDOU, Takeshi HORI
- 3 Development of Field Robot for Greenhouse Cultivation Aimed at Autonomy by AI 15
Takafumi URAIKE, Koichi IMAOKA, Soki ITOU,
Keiki ZEN, Shin'ya OKAZAKI, Ryo SANNO,
Hiroaki SUZUKI
- 4 Development of Video Plethysmography Measurement Technology for Monitoring Service 21
Iwao IZUMI, Yuta KAWASAKI, Daisuke MAEDA,
Yasuhiro NAKAJIMA, Koki KUWANO
- 5 Evaluating Fiber Structures and Gas Permeabilities of Cellulose Nanofibers 27
Masaaki HOSOKAWA, Tohru YAMAGISHI, Masamitsu YOSHIDA,
Shuichiro SENO, Hiroshi KANI
- 6 Long-term Preservation Technology for Melons using Mono-material Packaging..... 35
Masaaki HOSOKAWA, Tohru YAMAGISHI, Masamitsu YOSHIDA,
Shuichiro SENO, Hiroshi KANI
- 7 Development of Lightweight and High-rigidity Shape Design Method using Topology Optimization
Calculation for Cast Products Subjected to Multiple External Stresses 41
Hayato SUZUKI, Shusei UEDA, Shinya HONDA,
Ryo TAKEDA, Katsuhiko SASAKI, Hiroki OMURA,
Kazunori IZUMIKAMI
- 8 Development of Estimation Method of Preference Emotion by Physiological Information 49
Kyoko OHKUBO, Seiki YASUDA, Naotoshi KAMIO,
Koichi IMAOKA

Research Note

- 1 Research on Wireless Data Transmission System for Mobile Devices using Software Defined Radio 55
Toshiyuki MIYAZAKI, Hironari ARAI, Daisuke TSUTSUMI,
Takashi KUSAKA
- 2 Research on Aerial Image Analysis for Surveying Kelp Fishing Grounds 61
Takafumi URAIKE, Toshimasa IJIMA, Souki ITOU,
Yoshihiro MIYAZAKI, Tomonori YUASA, Yoshihisa AIZU
- 3 Development of Hot-dip Zinc-galvanized Steel that can be Bent 67
Kiyoshi IINO, Yasuki MIYAKOSHI, Yoshio NAKAJIMA,
Yohei SAKURABA
- 4 Surface Modification of Zirconia Plate by the Laser Irradiation 71
Yoshio NAKAJIMA, Kiyoshi IINO, Hayato SUZUKI,
Yohei SAKURABA

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の開発

飯島 俊匡, 藤澤 怜央, 近藤 正一, 本間 稔規

Development of Automatic Measurement Technology for Smart Factories in Food Manufacturing Industry

Toshimasa IJIMA, Reo FUJISAWA, Shoichi KONDOU, Toshinori HONMA

抄 録

食品製造業は北海道経済において重要な役割を担う産業の一つであるが、製造工程における人手作業への依存度が高いため生産性が低いという課題がある。生産性向上のため作業工程の自動化や機械化が求められているが、食品製造業の原材料である農水産物は、工業製品とは異なり形状や品質が一様ではない。そのため、その技術的難易度の高さから農水産物の形状や品質を対象とした自動検査装置の開発、普及は進んでいない現状にある。加えて、食品を扱う全事業者を対象としてHACCPに沿った衛生管理が義務化され、製造工程における継続的な監視と記録が必要となっており、検査情報の電子化や、製造記録・品質記録の自動化が求められている。

そこで本研究では、食品製造業におけるスマートファクトリー化を推進するため、画像情報や分光情報から自動的に原材料の計数や品質検査などを行う計測・解析手法を開発し、現在手作業で行われている検査・管理業務の自動化を実現するための基盤技術を獲得したので報告する。

キーワード：スマートファクトリー、外観検査、異物検出、HACCP

Abstract

The food manufacturing industry is one of the most important industries in the Hokkaido economy, but its high reliance on manual labor in the manufacturing process has resulted in low productivity. The raw materials used in the food manufacturing industry are mainly agricultural and marine products, which are not uniform in shape and quality, so automated inspection systems have not been widely adopted. In addition, all food-related companies are required to follow HACCP for sanitation management, which requires continuous monitoring and recording of manufacturing processes. In order to promote smart factories in the food manufacturing industry, we have developed a measurement and analysis method that enables counting and quality inspection of raw materials based on image and spectral information, and have acquired the basic technology to automate inspection and control operations.

KEY-WORDS : Smart factories, Appearance Inspection, Foreign material detection, HACCP

1. はじめに

食品製造業は、北海道経済において製造品出荷額等が約4割を占める主要産業であるが、製造工程における人手作業への依存度が高いため生産性が低いという課題がある。そのため、重量選別機や色彩選別機などを用いた選別工程の自動化や、金属探知機やX線検査装置などを用いた検品工程の自動化が進められているが、いまだ多くの工程で人手による目視

検査が行われているのが現状である。その理由の一つとして、食品製造業の原材料は主に農水産物であることから、工業製品とは異なり形状や品質が一様ではなく、ある程度のバラツキがある中で農水産物を計測・評価しなければならないことが挙げられる。そのため、その技術的難易度の高さから農水産物の形状や品質を対象とした自動検査装置の開発、普及は進んでいない。

加えて、食品を扱う全事業者を対象としてHACCP (Hazard

事業名：経常研究

課題名：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の開発

Analysis and Critical Control Point：危害要因分析・重要管理点)¹⁾に沿った衛生管理が義務化され、製造工程における継続的な監視と記録が必要となっている。現状、検査結果は帳票に手書きで記録することがほとんどであり、人員削減や人手作業による食品汚染リスクを低減するため、検査情報の電子化や製造記録・品質記録の自動化が求められている。

このような課題を解決するための手段としてスマートファクトリーという概念がある。スマートファクトリーとは、一般的に工場内の設備や機器をネットワークで繋いで様々なデータを収集し、そのデータを記録・解析することで可視化や自動化を行い、品質の安定化や生産性の向上などを実現する工場とされている。経済産業省が2017年5月に示した「スマートファクトリーロードマップ」²⁾では、目的別にロードマップが示されており、(1) 品質の向上, (2) コストの削減, (3) 生産性の向上, (4) 製品化・量産化の時間短縮, (5) 人材不足・育成の対応, (6) 新たな付加価値の提供・提供価値の向上, (7) リスク管理の強化の7点を挙げている。そして、IoT、ビッグデータ、AI、ロボットを活用し、エンジニアリングチェーンやサプライチェーンをネットワーク化、最適化、自動化していくことでスマートファクトリー化が達成されるとしている。しかし、これら7つの目的は既製品で対応できる範囲に限られているため、対象に応じた要素技術の開発が不可欠である。

そこで本研究では食品加工工場のスマートファクトリー化に向け、品質検査や管理業務の自動化に用いる計測技術など、食品製造業において生産性や品質を向上するための基盤技術を開発したので報告する。

2. 食品加工工場のスマートファクトリー化に向けた課題

食品加工工場の作業工程は、原材料の入荷、保管、加工、梱包、出荷という流れが一般的である(図1)。この生産工程別の状況について、北海道経済産業局は2018年4月に「食品製造業へのロボット導入の促進」³⁾に関する調査報告書



図1 食品加工工場の工程例

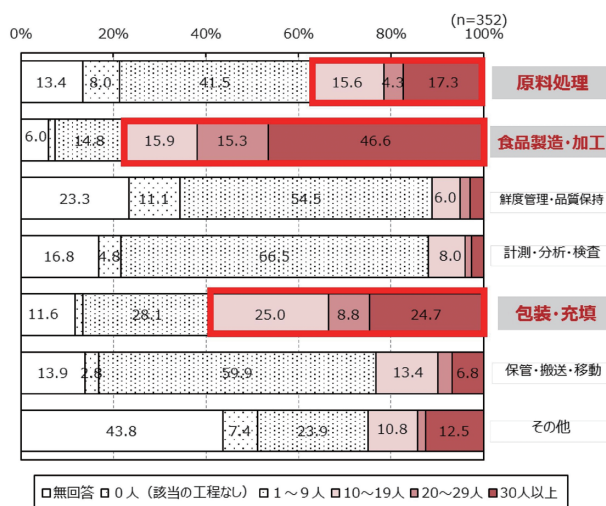


図2 生産工程別の人員分布

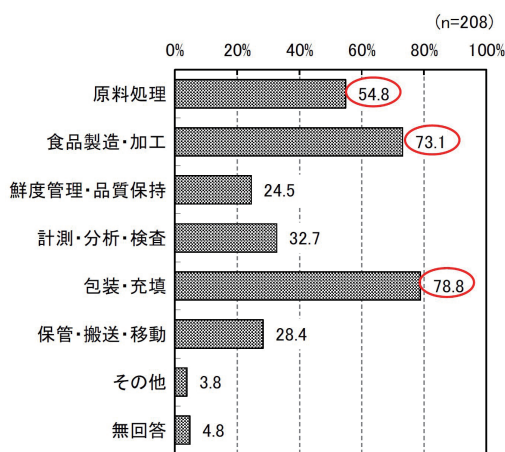
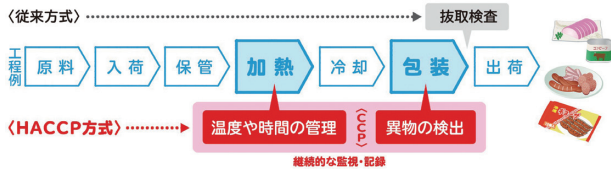


図3 生産工程別の機械導入率

を公表しており、機械化・ロボット化の現状と導入ニーズについてアンケート調査結果を掲載している。これによれば、食品加工工場の生産工程で人手が集中しているのは、多い順に、「食品製造・加工」、「包装・充填」、「原料処理」の3工程だった(図2)。また、専用機械の導入率が高いのは、高い順に「包装・充填」、「食品製造・加工」、「原料処理」であった(図3)。したがって、機械導入率の高いいずれの工程とも、多くの人員が分布していることから、専用機械では自動化・省人化が困難な作業内容が、製造現場に多く残されていることがわかる。

そこで自動化・省人化が困難な作業内容を食品加工に係る業界団体等にヒアリングしたところ、「原料処理」工程で行われる目視による品質検査と原料選別、「食品製造・加工」工程で行われる目視による異物検査が課題として挙げられ、その自動化に課題があることがわかった。同様に、生産管理や衛生管理作業が課題として挙げられた。例えば、HACCPに沿った衛生管理では、原料の入荷から製造、出荷までの各工程において重要管理点を定め、衛生管理状況を継続的に監



(厚生労働省の HACCP リーフレットより)
図4 HACCP に沿った衛生管理

視・記録する仕組みとなっている(図4)¹⁾。

現状の食品加工工場におけるHACCP対応では、各工程の重要管理点を定期的に巡回し、加熱・冷却温度や処理時間、検査結果などを手書きで帳票に記録している場合が多い。そのため、製造装置の表示画面から帳票への転記作業に加え、集約した帳票から製造記録を残すコンピュータへの手入力作業など、転記ミスや作業コストが生じている。

したがって、工場内の製造装置をIoTに対応したものに置き換えることでデジタル化することができれば、生産管理や衛生管理作業の自動化が可能となり、スマートファクトリー化を図ることができる。しかし、既存の製造装置のIoT対応装置への置き換えには多額の費用が必要となることから、その導入が進んでいないのが現状である。そこで、低コストにスマートファクトリー化を実現するため、既存の製造設備をそのまま活用してIoT化する技術が必要となる。

3. 農作物等の外観検査・教示装置の開発

食品加工工場のスマートファクトリー化に向けた課題である目視による品質検査と原料選別の自動化を実現するにあたり、基本的な考え方を図5に示す。

現状、原料の受け入れ工程では、目視により対象物の外観を検査し、手作業で選別等を行っている。目視による外観検査を自動化するためには、画像解析を行うための画像を取得することが第一段階となる。次に、様々な対象物や検査項目に対応可能な画像解析手法や分光計測手法を用いた自動計測技術を開発し、農作物等の欠陥を検出する外観検査を実現する(図5レベル1)。

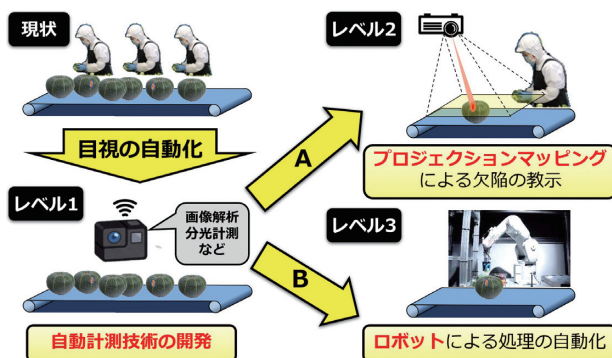


図5 外観検査の自動化に向けた考え方

そして、開発した自動計測技術で検出した欠陥の位置へプロジェクションマッピング技術を用いて光を投影し、作業員へ欠陥の位置を教示することで、現状作業員が行っている「目視+欠陥の判断」を自動化し、作業員の作業負担を軽減することができる(図5レベル2)。さらに、プロジェクションマッピングの工程をロボットで置き換えることで、「選別」の作業も自動化することが可能となり、食品加工工場のスマートファクトリー化を実現できる(図5レベル3)。

このスマート化のプロセスは、経済産業省が示す「スマートファクトリーロードマップ」²⁾に対応している。ロードマップではデータ活用のレベルを3段階に分けて推進していくことを想定しており、レベル1で「データの収集・蓄積」、レベル2で「データによる分析・予測」、レベル3で「データによる制御・最適化」と整理されている。本研究では、レベル1から2までを想定して開発を行った。

3.1 装置の基本構成

道内の複数の食品加工工場にヒアリングした結果、検査工程の自動化はコストや設置場所の観点から、現状設備への変更を最小限とする方向で進めることが望ましいことがわかった。そこで、既存の原料搬送路上にセンサを設置し、対象物を計測して外観検査する構成とした。また、原料が農産物の場合、搬送装置として主に幅1,400mm以内のベルトコンベアやローラーコンベアが使われていることから、幅1,400mmまで対応可能な撮影機構とすることで、汎用性を高めた。

また、目視検査の場合、欠陥の疑いがある対象物は手に取って様々な角度から検査することで検査漏れを防いでいる。そこで、カメラを複数台使用して対象物を複数の方向から撮影し、死角の少ない映像を用いて画像解析することで検査精度の向上を図った。試作機では、解像度3.2Mピクセル(2,048×1,536画素)、フレームレート55fpsで撮影可能なグローバルシャッターのUSB3.0カラーカメラを4台使用し、搬送路の上方及び側方から対象物を撮影できるレイアウトとした。また光源として、LEDライン照明を2本搬送路の斜め上方に配置した。さらに、プロジェクションマッピングを用いて外観検査の結果を搬送路上の対象物(欠陥品)に投影することで、作業員の「目視+欠陥の判断」を自動化し、作業員が視線を動かすことなく欠陥品除去作業に従事できるようにした。試作した外観検査・教示装置を図6に示す。

3.2 馬鈴しょを対象とした外観検査手法の開発

農作物等の外観検査では多種多様な原料が対象となり、その品質判定においては対象ごとに異なる検査項目や判定基準があるため、対象物に応じた自動計測技術が必要となる。ここでは、北海道で生産量の多い馬鈴しょを対象とし、生食用の馬鈴しょ選果場を想定した外観検査を行うための自動計測技術について述べる。

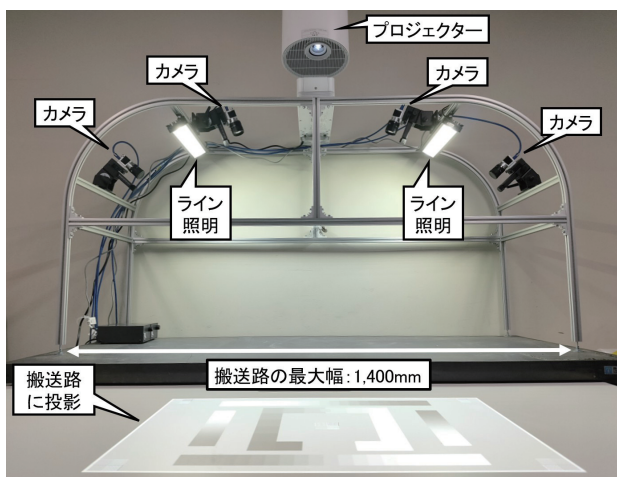


図6 試作した外観検査・教示装置

選果場では一般的に、馬鈴しょはローラーコンベア等を用いてバラ積み（重なりがなく密集した状態）で搬送され、その途中で目視による手選別が行われている。実験環境では、ベルトコンベアに馬鈴しょをバラ積みし、図6に示す外観検査・教示装置を用いて画像を取得した。上部カメラ及び側方カメラからの撮影例を図7に示す。

馬鈴しょの計数や個体ごとの欠陥検出を行うためには、個々の馬鈴しょを分離して1個ずつ認識する必要がある。ここでは深層学習を用いた画像の領域分割手法であるMask R-CNN⁴⁾を用いて馬鈴しょを個体分離した。Mask R-CNNは、入力画像からニューラルネットワークによって抽出した物体（ここでは馬鈴しょ）の特徴量をもとに、物体の位置検出、領域分割及び種類の分類を同時に行う手法である。事前に馬鈴しょの画像を学習させたモデルを利用し、Mask R-CNNを用いて個々の馬鈴しょを認識し、個体分離した結果を図8に示す。

馬鈴しょの個体分離については約98%の正答率が得られており、実用上の問題はないことを確認した。なお、Mask



図7 馬鈴しょの撮影例（左：上方カメラ，右：側方カメラ）



図8 馬鈴しょの認識結果（左：上方カメラ，右：側方カメラ）

R-CNNによる領域分割は、学習モデルを用意すれば汎用的に利用することが可能である。ブロッコリーの花蕾を学習させたモデルを用いて、ブロッコリーの花蕾を識別した結果を図9に示す。このように、Mask R-CNNは多種多様な農作物等の外観検査において、個体分離に有効であることを確認した。

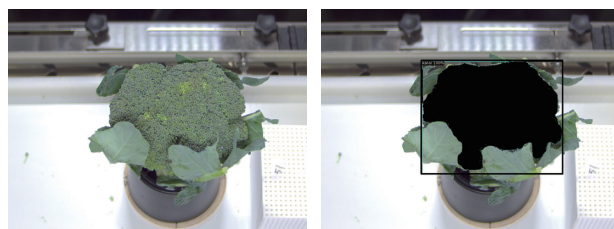


図9 ブロッコリーの識別例（左：撮影画像，右：花蕾の抽出）

次に、画像解析により馬鈴しょの欠陥を検出する手法について検討した。馬鈴しょ選果場での目視による手選別では、病害や腐れ、異形などの有無を各個体の状態を見て判断している。ここでは、馬鈴しょの欠陥の一つである緑化（馬鈴しょ表面が緑色に変色したもの）を対象とし、撮影して得られたカラー画像から緑化した個体を識別する方法を開発した。具体的には、撮影画像から馬鈴しょを個体分離した後、画面に写る全ての馬鈴しょ表面のRGB分布を解析する。画面全体に対して緑成分が相対的に高い領域を全体緑化領域とし、個々の馬鈴しょ内で緑成分が相対的に高い領域を個別緑化領域としたとき、これら全体緑化領域と個別緑化領域が一定面積以上を占める個体を緑化個体と識別した。図7の撮影画像から緑化個体を識別した結果を図10に示す。なお、他の欠陥である病害や腐れ、異形等については、それぞれ異なる識別手法が必要であることから別の研究で取組を進めている。



図10 緑化個体の識別（左：上方カメラ，右：側方カメラ）

前述した緑化個体の識別のように、1台のカメラ画像のみを用いて馬鈴しょの欠陥を検出する場合、その方向から撮影した画像に欠陥が写っていないと欠陥検出は不可能である。解決方法として、複数のカメラを用いて対象物を多方向から撮影し、得られた複数の画像のいずれかに欠陥を捉える方法と、対象物をローラーコンベア等で搬送する際に転動させ、全周の画像を撮影して欠陥を捉える方法が考えられる。前者の方法では異なる方向から撮影した複数の画像群に対して、後者の方法では転動する馬鈴しょを短い時間間隔で撮影した複数の画像群に対して処理を施し、異なる画像に撮影さ

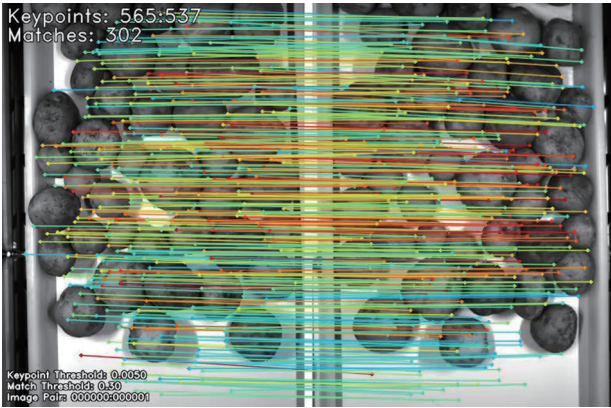


図 11 SuperGlue を用いた画像間の対応付け

れた同一の馬鈴しょ同士を対応づける必要がある。

そこで当場がこれまでに開発した多視点画像解析手法⁵⁾を活用した。具体的には、複数の画像に写る個々の馬鈴しょについて、撮影された方向が異なっている場合でもそれぞれの画像に撮影された同一の馬鈴しょを対応付けることが可能な特徴点マッチングアルゴリズムであるSuperGlue⁶⁾を用いた。異なる方向のカメラから撮影した馬鈴しょをSuperGlueにより対応付けした例を図11に示す。

異なる画像間で馬鈴しょを対応付けすることができれば、一方の画像又はある時点の画像で欠陥を検出した馬鈴しょについてその位置を追跡することが可能となる。図12はプロジェクションマッピングを用いて欠陥のある馬鈴しょへ光を照射し、その位置を作業者へ教示した例である。

本研究では、馬鈴しょを対象とし、欠陥については緑化のみを対象とした。しかし、本研究で開発した外観検査・教示装置は汎用的な構造としており、病害や腐れなど緑化以外の欠陥検出や、他の農作物の欠陥検出にも適用可能と考える。

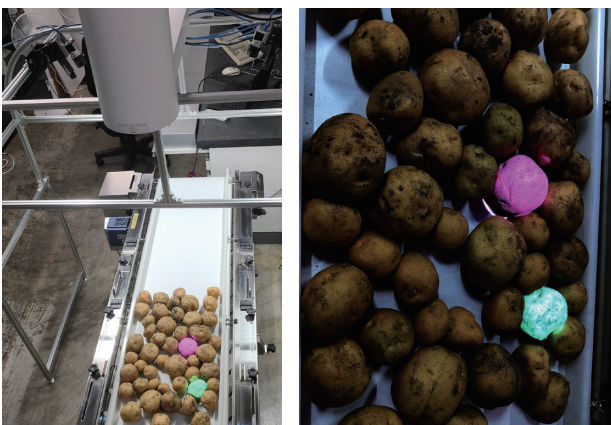


図 12 プロジェクションマッピングによる品質検査結果の教示

4. 鮭フレークに混入した小骨検出手法の開発

食品製造・加工の工程で行われる目視による異物検査手法について、魚を原料とした食品加工の場合、その異物として

は寄生虫をはじめ魚の骨や皮、血合い部分などが対象となる。加工工程で異物は全て取り除く必要があるが、それらは魚の身内部に存在する場合もあることから、異物検出の自動化の難易度は非常に高く、多くの人手に依存しているのが現状である。

そうした魚の加工食品のうち、鮭フレークでは加熱した鮭の身をほぐした後、小骨等の異物を作業者が目視で取り除く作業を繰り返し行っている(図13)。鮭の身をほぐした状態であれば、鮭の身の表面上に異物となる小骨が露出しやすくなる。そこで、鮭フレーク加工工程における小骨検出技術の開発に取り組んだ。



図 13 左：鮭フレークの検査工程 右：鮭の身と骨(異物)

4.1 検査対象の光学特性

まず、図13の鮭フレークの画像からわかるように、鮭のほぐした身と骨は色や形状が近いこともあり、可視画像を用いた異物検出は難易度が高いことが想定された。そこで、分光分析を用いて鮭の身と骨を識別する方法を検討するため、図14で示す計測光学系を構築し、鮭の身と骨それぞれについて波長365nmのUV(紫外領域)LED光源で紫外光を照射したときの蛍光スペクトルを計測した(図15)。その結果、鮭の身と骨は波長450nm付近で蛍光強度に大きな差が生じることがわかった。また、鮭の身と骨について波長365nm及び375nmのUV LED光源に対する分光反射特性を計測した結果、波長365nm付近で分光反射強度が高くなり、鮭の身の方が骨よりも強度が高くなった(図16)。

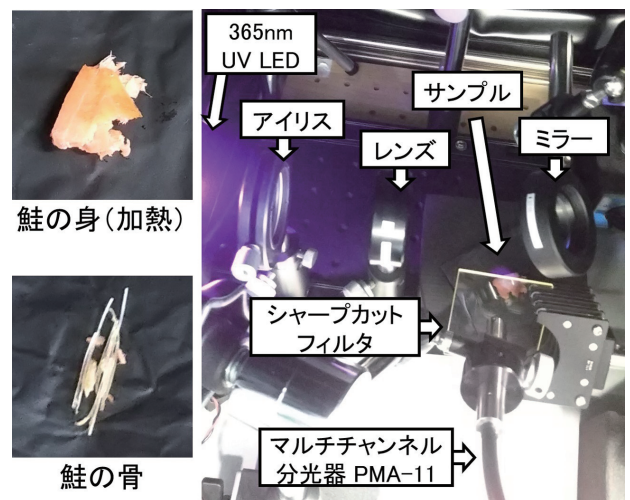


図 14 左：計測対象 右：構築した計測光学系

同様に波長365nm及び385nmのUV LED光源に対する分光反射特性を計測した結果、波長450nm付近で鮭の骨の方が身よりも分光反射強度が高くなることわかった(図17)。

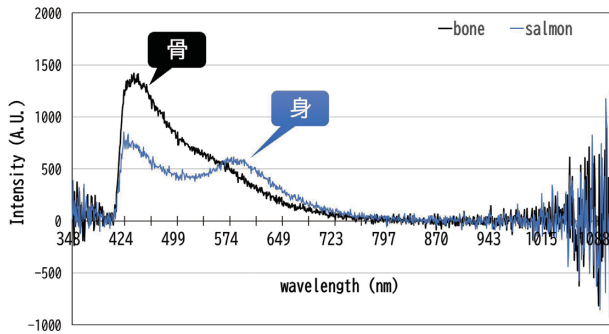


図 15 UV LED 光源 (365nm) 励起での蛍光スペクトル

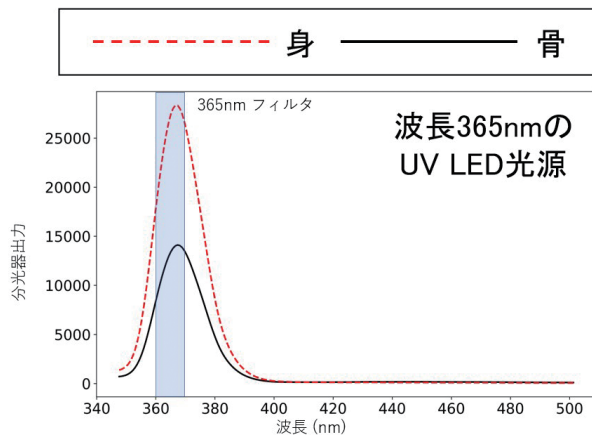


図 16 UV LED 光源 (365nm) における分光反射特性

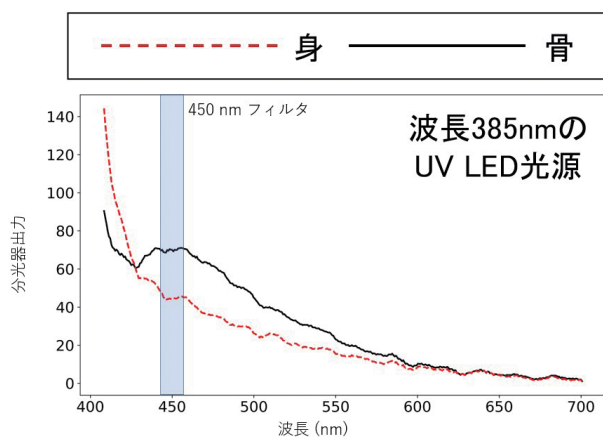


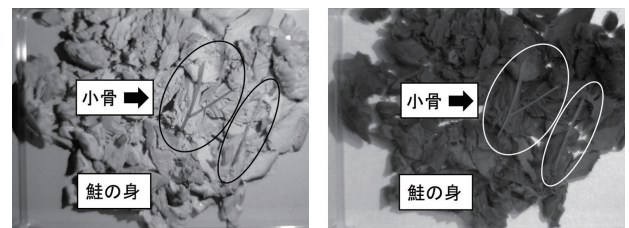
図 17 UV LED 光源 (385nm) における分光反射特性

4.2 小骨検出手法の開発

前節で得られた鮭の身と骨の光学特性から、それぞれの光源に対して、透過中心波長が365nmと450nmのバンドパスフィルタを通して分光画像を撮影した(図18)。その結果、

分光画像上では微差となっているが、365nmのバンドパスフィルタで得られた画像(図18左)では、鮭の身に対して骨の輝度が低くなっており、450nmのバンドパスフィルタで得られた画像(図18右)では、身に対して骨の輝度が高くなっていることが確認できた。しかし、その2組の分光画像だけでは鮭の身と骨の輝度差が小さく、正しく分離できない場合があった。そこで、UV LED光源の波長とバンドパスフィルタの組み合わせを4組(光源365nm+フィルタ365nm, 光源375nm+フィルタ365nm, 光源365nm+フィルタ450nm, 光源385nm+フィルタ450nm)に増やして4枚の分光画像を取得し、4枚の分光画像に対して機械学習の手法の一つであるランダムフォレストを用いてデータ解析を行うことで、鮭の身と骨の分離を可能とした。

カラーカメラで撮影した可視光の画像(図19)では、小骨を検出することが困難であったが、開発した手法を用いることで、図20のように鮭フレークから小骨を検出できることを確認した。



左: 光源 365nm + フィルタ 365nm 右: 光源 385nm + フィルタ 450nm
図 18 得られた分光画像

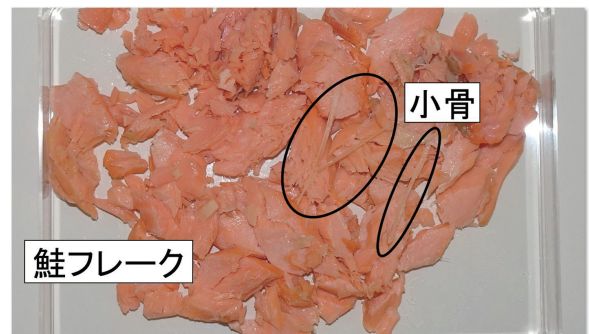


図 19 カラーカメラで撮影した鮭フレークと小骨の画像

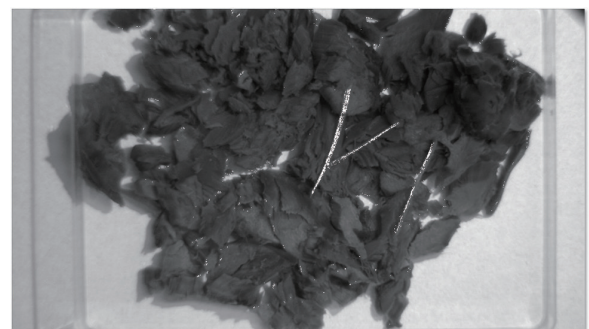


図 20 鮭フレークに混入した小骨の検出結果

5. 検査・管理業務の自動化技術の開発

5.1 道内食品製造企業における検査・管理業務の現状

道内の複数の食品製造企業にヒアリングした結果、生産管理や衛生管理に係わる作業が年々増加しており、特に大手スーパーマーケットやコンビニエンスストア向けのプライベートブランド商品では、報告用のレポート数が非常に多く、現場及び管理者に対する負担が大きくなっていることがわかった。加えて、HACCPに沿った衛生管理に対応するため、HACCPに対応した生産設備やセンサの活用を検討しているものの、既存設備の更新や管理工程の大幅な変更が必要となることから、コスト面に課題がありHACCP対応機器類の導入が進んでいないことがわかった。

そこで、既存の設備と管理工程のまま、生産管理情報や衛生管理情報をモニタリングし、自動記録する方法について調査した。

5.2 既存設備のメーター表示の読み取り

食品加工工場の製造工程では、生産管理や衛生管理のための情報を帳票（記録表）に手書きで記入し、作業終了後に当日分の帳票を集め、その記録情報をコンピュータに手入力する方法が多い。図21に、漬物製造工場におけるHACCPにもとづく衛生管理に必要なモニタリング記録のうち、重要管理点の一つである加熱殺菌工程の帳票の例を示す。

CCPのモニタリング記録		保管期限 記録日より1年間				
工程	加熱殺菌	記録担当者	工試 太郎			
管理基準 (CL)	加熱槽内を 85°C以上、20分間以上に保つ					
モニタリング方法	加熱担当者は槽内が80°C以上になったことを確認し、開始・終了 (20分後) 時間と温度を確認し記録する					
年月日	製品名	開始温度	開始時刻	終了温度	終了時刻	確認者
23/6/6	白菜漬 ^{4切}	85.1 °C	10:05	85.7 °C	10:37	倉反 島
23/6/6	福神漬	85.2 °C	11:09	85.9 °C	11:42	本間

図21 衛生管理用モニタリング帳票の記入例

このような帳票が、製造ラインごとに行われる生産管理情報の記録や、各重要管理点のモニタリング記録のために多数記入されている。帳票への記入は、製造工程のモニタリング箇所を定期的に巡回し、時計や温度センサーの表示、製造設備のメーターやインジケータ等を目視して行っているため、それらのメーター表示等をデジタル化して自動的に記録することで効率化を図ることができる。このような機能を有する市販のソフトウェアを調査したところ、数社からメーター読み取りのサービスが提供されていることがわかった。そこで、それらのサービスが食品加工工場に適用可能かどうか評価した。

当該サービスは、スマートフォンのカメラでメーターを撮

影し、クラウドに設置された画像解析サーバを用いてメーターから数値データを取得する仕組みとなっており、図22で示すようなアナログ針のメーターや回転メーター、デジタル表示のメーター等に対応している。既存の製造設備のメーターを対象として試験した結果、数値データのデジタル化が容易に行え、帳票記録の自動化に有効であることを確認した(図23)。

しかし、食品加工工場において帳票記入の対象となるメーターは多岐にわたり、装置の稼働状況を示すパイロットランプやインジケータなど、メーター表示ではない設備の記録や、2針アナログメーターや複数項目が表示されるメーターなど、既製サービスでは対応していないもの(図24)も多く、機能の追加が必要であることがわかった。



図22 既製のサービスで読み取り可能なメーター例



図23 メーター読み取りサービスによる自動記録



図24 既製サービスで読み取り不可能なメーター例

したがって、食品加工工場で帳票記録の自動化を実現するためには、既製サービスのAPI利用に加え、未対応のメーター類を読み取る機能のAPI開発が必要となる。システムの構成としては図25に示すとおりで、引き続き開発を進める予定である。

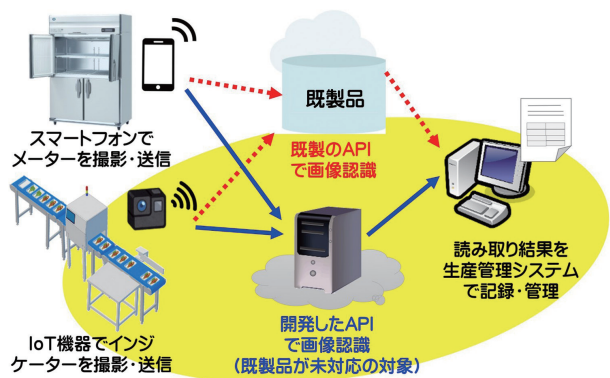


図 25 食品加工工場の自動モニタリングシステム

視点画像解析技術の開発」, 北海道立総合研究機構工業試験場報告 No.320, (2021)

- 6) P.E. Sarlin, D. DeTone, et al., “SuperGlue: Learning Feature Matching with Graph Neural Networks”, CVPR, (2020)

6. おわりに

本研究では、農作物等の外観検査・教示装置を試作し、馬鈴しょを対象とした実証試験を行った結果、良好な結果を得ることができ、実用化への見通しを得た。また、鮭フレークの異物混入について、分光画像解析により鮭の身から異物となる小骨を検出する手法を開発し、異物検出の自動化が可能であることを確認した。さらに、食品加工工場において生産管理や衛生管理のモニタリングを自動化するためには、既製のメーター読み取りサービスの利用に加え、追加機能の開発が必要であることがわかった。

以上のように、食品加工工場のスマートファクトリー化を推進するため、画像情報や分光情報から原材料の計数や品質検査などを実現する自動計測技術を開発するなど、検査・管理業務の自動化を実現するための基盤技術を獲得した。

生産者団体からの要望が強い馬鈴しょとブロッコリーについては、引き続き技術開発を行い自動検査工程の実用化を目指す。

引用文献

- 1) 厚生労働省, 「HACCPに沿った衛生管理の制度化について」, 2021年6月1日施行, https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/shokuhin/haccp/index.html
- 2) 経済産業省中部経済産業局, 「スマートファクトリーロードマップ」, 2017年5月31日改訂, https://www.chubu.meti.go.jp/b21jisedai/report/smart_factory_roadmap/
- 3) 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」, 2018年4月17日, <https://www.hkd.meti.go.jp/hokis/20180417/>
- 4) Kaiming He, Georgia Gkioxari, et al., “Mask R-CNN”, CV, (2017)
- 5) 飯島俊匡・岡崎伸哉・本間稔規, 「外観検査のための多

AIによる意味的類似度を用いた日本語検索システムの開発

全 慶樹, 近藤 正一, 堀 武司

Development of Japanese Search Systems using AI-based Semantic Similarity

Keiki ZEN, Shouichi KONDOU, Takeshi HORI

抄 録

ウェブ検索エンジンなどの情報検索 (Information Retrieval) システムでは、テキストの意味的な類似性 (Semantic Textual Similarity, STS) を正しく認識することが技術的課題の一つとされている。近年、このようなテキストの意味的な類似度を高品質に計算する技術が開発され、検索エンジンなどへの活用が進められている。しかし、英語を中心として研究が進められているため日本語を対象とした活用事例は少なく、道内中小企業や自治体における活用もこれからの状況にある。そこで本研究では、日本語で記述されたテキストの意味的類似度にもとづいた検索技術の活用に向けて、公開されている日本語データセットを使用した高品質な意味的類似度モデルを開発した。あわせて本モデルを使用したシンプルな検索システムを開発し、検索性能と処理速度を評価した。その結果、公開されている他の意味的類似度モデルより高い検索性能を有しているとともに、標準的なPCにおいて十分な処理速度を有していることを確認した。

キーワード：AI, 自然言語処理, 意味的類似度, 日本語, 情報検索システム

Abstract

In information retrieval systems such as web search engines, one of the technical challenges is correctly recognizing semantic textual similarity (STS). In recent years, technology has been developed to calculate high-quality semantic textual similarity, and its use in search engines and other applications is progressing. However, as research is focused on English, there are few examples of its use in Japanese, and its use by small and medium-sized enterprises and local governments in Hokkaido is still in the future. Therefore, in this study, we developed a high-quality semantic similarity model using publicly available Japanese datasets, aiming to utilize search technology based on Japanese semantic textual similarity. We also developed a simple search system using this model and evaluated its search performance and processing speed. As a result, we confirmed that it has higher search performance than other publicly available semantic similarity models, and has sufficient processing speed on a standard PC.

KEY-WORDS : AI, NLP, semantic similarity, Japanese, information retrieval systems

1. はじめに

ウェブ検索エンジンなどの情報検索 (Information Retrieval) システムでは、テキストの意味的な類似性 (Semantic Textual Similarity, STS) を正しく認識することが技術的課題の一つとされている。人間が行うのと同様の言語理解にもとづき2つのテキストがどの程度類似しているのかを定量化できれば、ユーザーの意図を反映した柔軟な検索が可能になると考

えられている。たとえば「ジャガイモ」と検索したとき、ユーザーは「ジャガイモ」に関する情報に加えて「馬鈴薯」などの同義語や類義語に関する情報も必要としている場合が多く、意味的な類似性を考慮した検索技術が重要となる。また、「病気に強いジャガイモ」と検索したとき、「病気のジャガイモ」に関する情報は不要な場合が多く、単語レベルではなくテキスト全体で意味を認識できる技術が必要とされている。近年、このようなテキストの意味的な類似度を高品質に計算

事業名：経常研究

課題名：AIを用いた自然言語処理による文書データからの情報抽出技術の研究

する技術が開発され、検索エンジンなどへの活用が進められている。これにより一種の情報検索とみなせる業務、たとえばFAQ (Frequently Asked Questions, よくある質問回答) データベースを参照してユーザーの問い合わせに回答するヘルプデスク業務などを自動化できると考えられている。しかし、英語を中心として研究が進められているため日本語を対象とした活用事例は少なく、道内中小企業や自治体における活用もこれからの状況にある。

そこで本研究では、日本語で記述されたテキストの意味的類似度にもとづいた検索技術の活用に向けて、公開されている日本語データセットを使用した高品質な意味的類似度モデルを開発し、検索性能を評価した。あわせて本モデルを使用したシンプルな検索システムを開発し、標準的なPCにおける処理速度を評価した。

2. 日本語を対象とした意味的類似度モデルの開発

本研究では、日本語Wikipediaデータセット等で事前学習済みの言語モデルにSentence-BERT¹⁾ アルゴリズムを適用し、日本語の意味的類似度モデルを開発した。日本語の意味的類似度モデルの学習と検証には、公開されているJSNLI²⁾、JSICK³⁾、JGLUE⁴⁾ から構築した日本語データセットを使用した。性能評価には、自治体業務で使用されている非公開FAQデータベースから構築したデータセットを使用し、他の研究機関から公開されている意味的類似度モデルと検索性能を比較した。

2.1 アルゴリズムの選定

テキストの意味的な類似度を計算するアルゴリズムの多くは、文章や単語などの自然言語の構成要素をベクトル空間上のベクトルとしてマッピングする「埋め込み」と呼ばれる変換を行う。埋め込みにより各テキストはベクトル化されるため、ベクトル間のコサイン類似度 (式1) やユークリッド距離、マンハッタン距離などの類似性尺度が適用可能となり、これをテキスト間の意味的類似度として利用する。たとえばコサイン類似度の場合、類似する2つのテキストに対応するベクトルの「なす角」が小さくなるため、類似性が高いほど値は1に近くなる (図1)。

$$\text{cosine similarity} = S(a, b) := \frac{a \cdot b}{\|a\| \|b\|} = \cos(\theta) \quad (1)$$

a, b : ベクトル, θ : a, b のなす角

自然言語処理分野では、これまでも様々な埋め込みアルゴリズムが提案されており、2層のニューラルネットワークを使用したWord2vec⁵⁾ は単語の埋め込みアルゴリズムとして広く知られている。しかし、複数の単語をそのまま埋め込む

ことができないため、テキスト全体の意味をどのように扱うかが課題とされていた。

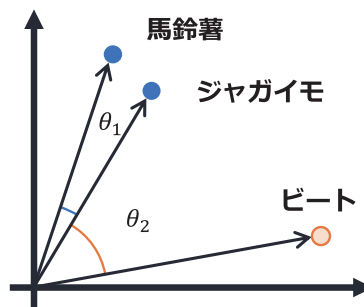


図1 Word2vecによる単語埋め込みのイメージ (類似単語のベクトルはなす角が小さい)

近年、ニューラルネットワークの一種であるTransformerを使用した言語モデルが自然言語処理の幅広いタスクに適用できることが明らかとなり、BERT⁶⁾などの言語モデルを再学習させることで文章などの複数の単語からなるテキストの意味的類似度を高品質に計算できるようになった。これは埋め込みを介さずに意味的類似度を計算するアルゴリズムであり、2つのテキストをモデルに入力して類似度を直接計算する (図2)。このアルゴリズムは大量のパラメータを持つ大規模な言語モデルを使用するため、コサイン類似度と比べて1回の類似度計算に多くの時間を要する。したがって、ユーザーの入力に応じてリアルタイムに類似度計算を行う情報検索システムでは、検索対象の増加に伴い処理時間が増大するため利用に適さなかった。

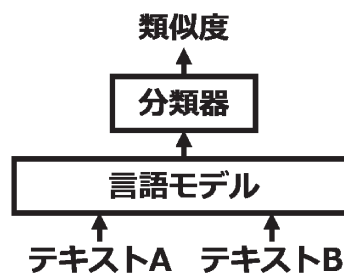


図2 言語モデルによる類似度の計算

一方、言語モデルの再学習を行わずに言語モデルの出力をそのまま埋め込みベクトルとみなして意味的類似度を計算するアルゴリズムが知られている。言語モデルはトークンと呼ばれる単位でデータの入出力を行っており、入出力はトークンの系列となる。このアルゴリズムでは、出力の先頭にあるCLSトークンや出力全体の平均を入力テキストの埋め込みベクトルとして利用する。埋め込みによる類似度計算は高速に実行できるため、情報検索システムでの利用も可能だが、再学習を行っていないため埋め込みの品質が低く、検索性能が十分ではなかった。

以上のアルゴリズムを踏まえて言語モデルを高品質な埋め込み表現となるように再学習させるSentence-BERTアルゴリズムが提案されており、情報検索システムにおいて高品質な意味的類似度が利用可能となった。本研究では、日本語の意味的類似度モデルの開発にSentence-BERTアルゴリズムを使用した。

2.2 Sentence-BERTアルゴリズムの詳細

Sentence-BERTは、高品質な埋め込み表現を獲得するために言語モデルの再学習を行うアルゴリズムである。学習時は、パラメータの共有された2つの言語モデルを出力部分で接続したネットワーク構造を持つ(図3)。学習済みモデルの利用時は、各テキストを学習済みモデルでベクトル化し、コサイン類似度などで意味的類似度を計算する。ベクトル化の計算方法として、CLSトークンを使用するCLSプーリング、最大のトークンを使用するMAXプーリング、すべてのトークンの平均を使用するMEANプーリングがあり、通常はMEANプーリングを使用する。

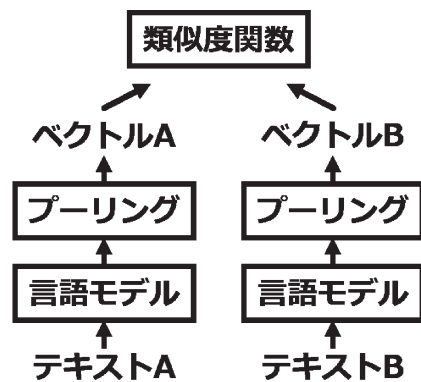


図3 Sentence-BERTのネットワーク構造

学習時の損失関数としてReimersらの論文では、Softmax Lossが使用されている。これは、ベクトルA、ベクトルB、及びその差分のベクトルを連結させ、ソフトマックス関数を計算する方法である。その他の損失関数としてMultiple Negatives Ranking Lossが知られている。これは、意味的類似しているテキストペアを複数同時に利用する計算方法であり、Softmax Lossより高品質な埋め込み表現を学習できるとされている。具体的には、類似テキストペアのデータセット (a_n, b_n) が与えられたとき、類似ペア (a_i, b_i) と同時に $(a_i, b_{j \neq i})$ を非類似ペアとして学習に利用する。空間上の

類似ペア (a_i, b_i) の距離を最小化すると同時に非類似ペア $(a_i, b_{j \neq i})$ の距離を最大化するように学習を進めることで埋め込み表現を獲得する(図4)。また、この損失関数ではテキストペアのかわりにテキストのトリプレット(三つ組)を使用することで性能を改善できる。その場合は、類似ペア (a_n, b_n) に語彙的に似ているが意味は異なるテキスト c_n を追加し、 (a_n, b_n, c_n) をトリプレットとして使用する(c_n はhard negativeと呼ばれる)。

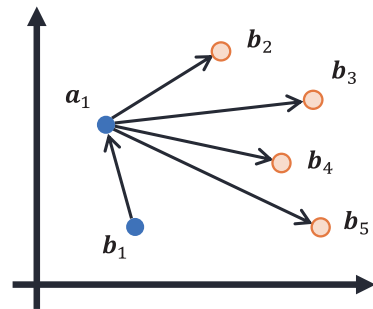


図4 複数の類似テキストペアを利用した学習

本研究では、ベクトル化の計算方法にMEANプーリングを、損失関数にMultiple Negatives Ranking Lossを使用し、学習には日本語データセットの類似テキストペアから作成したトリプレットを使用した。開発には、Reimersらが提供するSentence Transformers⁷⁾ フレームワークを使用した。

2.3 開発に使用したデータセット

Sentence-BERTによる意味的類似度モデルの開発には、意味的類似しているテキストペアのデータセットが必要となる。英語モデルの開発では、SNLIやMultiNLIといった自然言語推論(Natural Language Inference, NLI)の大規模なデータセットが利用される。本研究では、日本語の自然言語推論データセットとして利用可能なJSNLI, JSICK, JGLUEをデータセットの構築に使用した。各データセットの特徴は次のとおりである。

JSNLIは、英語のSNLIを日本語に翻訳したデータセットである。機械翻訳が使用されているが、機械翻訳の評価指標や人間による確認作業により、質の悪いデータをフィルタリングし、品質を高めている。フィルタリング後のデータ数は、学習用データが533,005ペア、評価用データが3,916ペアである。自然言語推論のデータでは、前提のテキストに対して仮説のテキストが正しければentailment, 矛盾していれば

表1 JSNLIデータセット

ラベル	前提	仮説
entailment	自転車で2人の男性がレースで競います。	人々は自転車に乗っています。
contradiction	5人の男の子が野球をしています。	バスケットボールをしている男の子のグループ。
neutral	白い犬が黒いロープを引く	犬は綱引きをしています。

contradiction, どちらとも判断できなければneutralのラベルが付与されている(表1)。entailmentラベルのテキストペアは意味が類似していることからSentence-BERTによる意味的類似度モデルの開発に利用できる。

次にJSICKは、英語のデータセットであるSICKを人手で日本語に翻訳し、ラベルを付与したデータセットである。データ数は、学習用データが5,000ペア、評価用データが4,927ペアであり、JSNLIと比べて少ないが人間による翻訳のためより高品質なデータセットであると考えられる。

最後にJGLUEは、日本語の言語理解能力を総合的に評価するためのベンチマーク(データセット群)である。英語の言語理解ベンチマークとしてはGLUEが広く使用されており、これに相当する日本語のベンチマークとして構築されている。翻訳を使用せず一から日本語のデータセットを構築しているため、自然な日本語テキストのデータセットであると考えられる。JGLUEは複数のデータセットから構成されており、文章分類タスクのMARCoA, JCoLA, QAタスクのJSQuAD, JCommonsenseQA, ペア分類タスクのJSTS, JNLIが含まれている。本研究では、JGLUEの中から自然言語推論のデータセットであるJNLIを使用した。データ数は、学習用データが20,073ペア、評価用データが2,434ペアである。

学習には、entailmentラベルのテキストペアをそのまま使用するのではなく、2.2節で述べたトリプレットを使用する。トリプレットの作成には、同じ前提テキストを持つentailmentラベルのテキストペアとcontradictionラベルのテキストペアを使用した。具体的には、entailmentペア(s, e)とcontradictionペア(s, c)から、(s, e, c)と(e, s, c)を作成した。JSNLIには同じ前提テキストを持つテキストペアが複数存在しており、この方法によりトリプレットを大量に作成できることから、学習用データセットの構築にはJSNLI(学習用)を使用した。同じ前提テキストを持つentailmentペアの選択方法には、ランダムに選択する方法とすべて選択する方法の2通りを検討した(表2)。

表2 学習用データセット

選択方法	データ数
ランダム	294,580
すべて	401,077

学習中のモデル選択で使用する検証用データセットの構築には、JSNLI(評価用), JSICK(評価用), JGLUE-JNLI(評価用)を使用した。検証は、テキストの集合から意味の類似したテキストを見つけるタスクで行うため、トリプレットの作成は不要である。データセットは対象のすべてのテキストとentailmentラベルから抽出された類似テキストペアのリストから構成される(表3)。

表3 検証用データセット

テキスト数	類似ペア数
13,202	2,873

学習済みモデルの性能評価には、モデル選択でを使用した検証用データセットとは異なるものを使用する必要がある。本研究では、自治体業務で使用されている非公開FAQデータベースから性能評価で使用するテスト用データセットを構築した。FAQデータベースは、質問文と回答文のペアから構成されており、性能評価用に作業者1名に各質問文を文章(20~40字程度)とキーワード(2~5個程度)に要約してもらいデータセットを構築した(表4)。これらの要約された文章またはキーワードから質問文を検索するタスクにより検索性能を評価した。

表4 テスト用データセット

データ数	115
質問文平均文字数	65.6
要約文章平均文字数	36.3
要約キーワード平均個数	4.3

2.4 意味的類似度モデルの学習

Sentence-BERTによる意味的類似度モデルの学習には事前学習させたBERTなどの言語モデルが必要であり、本研究では公開されている日本語の言語モデルを使用した。表5に使用した言語モデルを示す。東北大学が公開している言語モデルの中から学習データセット、テキストのトークン化方法、モデルサイズが異なる複数のBERTモデルを使用した。また、rinna株式会社が公開している言語モデルの中から東北大学の言語モデルより大規模なデータセットで学習されている

表5 使用した日本語言語モデル

開発元	モデル名	学習データセット
東北大学	cl-tohoku/bert-base-japanese	日本語 Wikipedia (2019年9月1日)
	cl-tohoku/bert-base-japanese-whole-word-masking	
	cl-tohoku/bert-base-japanese-char	
	cl-tohoku/bert-base-japanese-char-whole-word-masking	
	cl-tohoku/bert-base-japanese-v2	
rinna 株式会社	cl-tohoku/bert-base-japanese-char-v2	日本語 Wikipedia (2020年8月31日)
	cl-tohoku/bert-large-japanese	
	cl-tohoku/bert-large-japanese-char	
rinna 株式会社	rinna/japanese-roberta-base	日本語 Wikipedia & 日本語 CC-100

RoBERTa⁸⁾ モデルを使用した。

すべての学習において、最大入力トークン数を256と設定したほか、学習プロセスを高速化するための自動混合精度 (Automatic Mixed Precision, AMP) を使用した。その他に意味的類似度モデルの性能に影響を与える設定項目が複数あり、検証用データセットでの性能を確認しながら手動で調整した (表6)。

表6 学習設定の調整

設定項目	調整範囲	調整後
言語モデル	表5参照	cl-tohoku/ bert-large-japanese
バッチサイズ	100~500	500
最大エポック数	1~20	15
データセット	表2参照	ランダム

上記設定で学習した際の検証用データセットに対する性能の推移を図5に示す。2エポック目の性能が最も高く、その後低下する。これは学習用データセットに対する過学習を検証用データセットにより検出できているためと考えられる。

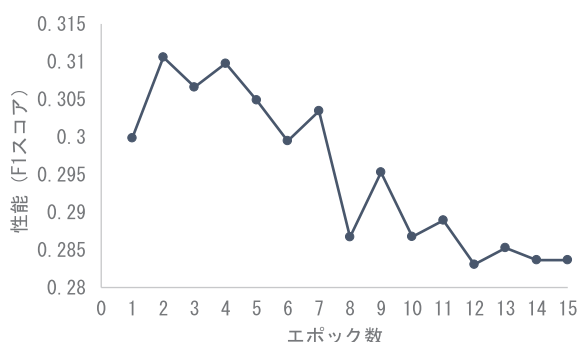


図5 検証用データセットに対する性能の推移

2.5 学習済みモデルの性能評価

学習済みモデルの性能をテスト用データセットにより評価した。性能指標として正解テキストの検索順位にもとづくMRR (Mean Reciprocal Rank) を使用し、文章とキーワードによる検索をそれぞれ評価した。また、公開されている意味的類似度モデルには日本語に対応しているものがあり、それらのモデルと性能を比較した。具体的には、Sentence Transformersの多言語モデルと日鉄ソリューションズのSonobe Isao氏の日本語モデルを比較対象とした。結果を表

表7 モデルの性能評価

開発元	モデル名	文章検索性能	キーワード検索性能
本研究	-	0.989	0.955
Sonobe Isao	sonoisa/sentence-bert-base-ja-mean-tokens-v2	0.968	0.877
Sentence Transformers	sentence-transformers/paraphrase-multilingual-mpnet-base-v2	0.971	0.899
	sentence-transformers/paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2	0.960	0.852
	sentence-transformers/distiluse-base-multilingual-cased-v2	0.950	0.865

7に示す。本研究で開発した意味的類似度モデルが、どちらの検索タスクにおいても高い性能を示すことを確認した。

3. 意味的類似度モデルを用いた検索システムの開発

開発した意味的類似度モデルはキーワード検索における性能が高いことから、検索エンジン等での活用が期待できる。そこで意味的類似度モデルを使用したシンプルな検索システムを開発し、標準的なPCにおける処理速度を評価した。

3.1 検索システムの開発

検索システムは、ウェブブラウザから利用できるウェブアプリケーションとして開発した。検索システムの概要を図6に示す。具体的には、ウェブサーバーであるnginxとPythonのHTTPサーバーであるGunicornがウェブアプリケーションを提供する。ウェブアプリケーションフレームワークにはPythonのFlaskを使用し、Sentence Transformersフレームワークを使用した意味的類似度モデルによる検索を実行する。

検索対象のテキストは、あらかじめ意味的類似度モデルでベクトル化されデータベースに保存されているため、検索時のベクトル化は不要である。検索時は、ユーザーが入力した検索キーワード (テキスト) をベクトル化し、データベースの中からコサイン類似度の高いテキストを検索結果として提示する。

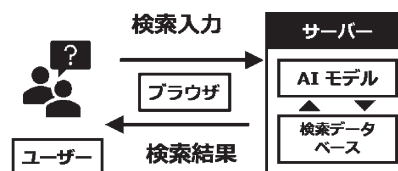


図6 検索システムの概要

実際の検索画面を図7に示す。この例では、子育てに関連するFAQのデータセット (CC-BY 4.0 子育てオープンデータ協議会) を検索対象としている。ユーザーが「子供に必要なワクチン」と検索したとき「子どもの予防接種について教えてください。」というFAQが検索結果として提示されており、「子供」と「子ども」や「ワクチン」と「予防接種」の意味的な類似性を認識できていることが確認できる。



図7 システムの検索画面

3.2 検索システムの処理速度評価

本システムを標準的なPC内で構築し、処理速度を評価した (表8)。検索対象として子育てFAQデータセットと和英辞書EDICT2の日本語見出しを使用した。計算には、CPU (Intel Core i5-10210U 1.6GHz) を使用し、ニューラルネットワークの計算を高速化するためのGPUアクセラレーションは使用していないが、PyTorchフレームワークによる動的量子化を検討した。毎秒処理できる検索の問い合わせ数は検索対象のデータ数の増加に伴い低下するが、小規模なシステムの運用であれば十分な処理速度であると考えられる。

表8 システムの処理速度評価

検索対象	データ数	処理性能 [query/s]	
		量子化なし	量子化あり
子育てFAQ	661	0.59	14.34
EDICT2	202,253	0.51	1.84

4. おわりに

本研究では、公開されているデータセットを使用して日本語を対象とした意味的類似度モデルを開発した。自治体業務で使用されているFAQを対象に検索性能を評価し、公開されている他の意味的類似度モデルより高い検索性能を有していることを確認した。あわせて検索エンジン等での活用を検討するため、ウェブブラウザから利用できる検索システムを開発し、標準的なPCにおいて十分な処理速度を有していることを確認した。開発した意味的類似度モデルは幅広い場面で活用可能であり、特にインターネット上のクラウドサーバーなどで扱うにはリスクが高い機密情報を対象とした検索システムを、オンプレミスシステム (社内で構築し運用するシステム) やスタンドアロンPCで構築する場合に有用と考

える。また、OpenSearchなどの検索エンジンソフトウェアが埋め込みによる検索機能の開発を進めており、内部のモデルを本研究で開発した意味的類似度モデルに置き換えることで日本語に対する検索性能の改善が期待できる。

謝辞

本研究では、データ提供やシステムテストにおいて北海道総合政策部次世代社会戦略局情報政策課、北海道出納局総務課にご協力いただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Reimers, Nils, and Iryna Gurevych. "Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks." Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP). pp. 3982-3992. (2019)
- 2) 日本語SNLI (JSNLI) データセット 1.1 (2020年10月5日) <https://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/?日本語SNLI> (JSNLI) データセット
- 3) 谷中 瞳, 峯島宏次: JSICK: 日本語構成的推論・類似度データセットの構築, 人工知能学会全国大会論文集, 第35回, (2021)
- 4) Kurihara, Kentaro, Daisuke Kawahara, et al. "JGLUE: Japanese General Language Understanding Evaluation." Proceedings of the 13th Language Resources and Evaluation Conference (LREC). pp. 2957-2966. (2022)
- 5) Mikolov, Tomas, et al. "Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space." International Conference on Learning Representations (ICLR) 2013. (2013)
- 6) Devlin, Jacob, et al. "BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding." Proceedings of the 2019 Annual Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies (NAACL-HLT). pp. 4171-4186. (2019)
- 7) Sentence Transformers: Multilingual Sentence, Paragraph, and Image Embeddings using BERT & Co. <https://github.com/UKPLab/sentence-transformers>
- 8) Liu, Yinhan, et al. "RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach." arXiv preprint arXiv: 1907.11692. (2019)

AIによる自律化を目指した ハウス栽培管理作業向けフィールドロボットの開発

浦池 隆文, 今岡 広一, 伊藤 壮生, 全 慶樹, 岡崎 伸哉,
佐野 亮*, 鈴木 廣明**

Development of Field Robot for Greenhouse Cultivation Aimed at Autonomy by AI

Takafumi URAIKE, Koichi IMAOKA, Soki ITOU, Keiki ZEN, Shin'ya OKAZAKI,
Ryo SANO*, Hiroaki SUZUKI**

抄 録

農業分野では深刻な人手不足に対応するため、さまざまな作業の機械化・自動化が進んでいる。しかし、野菜や果物のハウス栽培では、整枝・誘引や収穫などの作業は依然として人手で行われており、過酷な環境での重労働となっている。そこで本研究では、ハウス栽培における作業の軽労力化を目的としたフィールドロボットの開発を行った。対象作業はイチゴ栽培における管理作業（不要な葉やランナーの除去）とした。将来的には完全な自律作業が可能なロボットの実現が求められるが、本研究では遠隔操作ロボットを開発し、自律化のための基盤技術の確立を図った。

ロボットは、四輪駆動・四輪独立操舵方式の台車に、6自由度のロボットアームを2機搭載する構成とした。作業者はロボットに搭載したステレオカメラの映像を三次元ディスプレイで確認しながら、アームや台車の操作を遠隔で行うことが可能である。また、ロボットの自律化に必要な、不要な葉とランナーを認識するAIの構築を試みた結果、適切なモデルの選択と学習を行うことで認識AIの構築と認識精度の向上が可能なることを確認した。開発した遠隔操作ロボットによる作業試験を行った結果、未経験者でも比較的短時間の試行で一連の作業を実施できることを確認した。

キーワード：ハウス栽培, 人手作業, ロボット, AI

Abstract

In order to deal with the problem of labor shortage in agriculture, mechanization and automation of various work are progressing. However, in greenhouse cultivation of vegetables and fruits, operations such as pruning and harvesting are still performed manually. It's hard work in a harsh environment. In this research, we developed a field robot to reduce manual work in greenhouse cultivation. The target work was management work (removal of unnecessary leaves and runners) in strawberry cultivation. In the future, the realization of robots capable of fully autonomous work will be required. In this research, we developed a remote control robot and tried to establish the basic technology.

The robot consists of two 6-DOF robotic arms mounted on a 4-wheel drive, 4-wheel independent steering mobile cart. The operator can remotely control the arm and cart while checking the image of the stereo camera mounted on the robot by the 3D display. We also tried to build an AI for recognizing unnecessary leaves and runners, which are necessary for autonomous robot. We found that by selecting and learning an appropriate model, it is possible to build recognition AI and improve recognition accuracy. When the developed robot was actually operated, it was confirmed that even an inexperienced persons could perform a series of tasks in a relatively short trial period.

KEY-WORDS : Greenhouse Cultivation, Manual Work, Robots, AI

* かもけいアグリ株式会社 * Kamokei Agri Co., Ltd.

** 加茂川啓明電機株式会社 ** Kamogawa Keimei Denki Co., Ltd.

事業名：重点研究

課題名：AIによる自律化を目指したハウス栽培管理作業向けフィールドロボットの開発



図1 イチゴの不要な葉とランナー

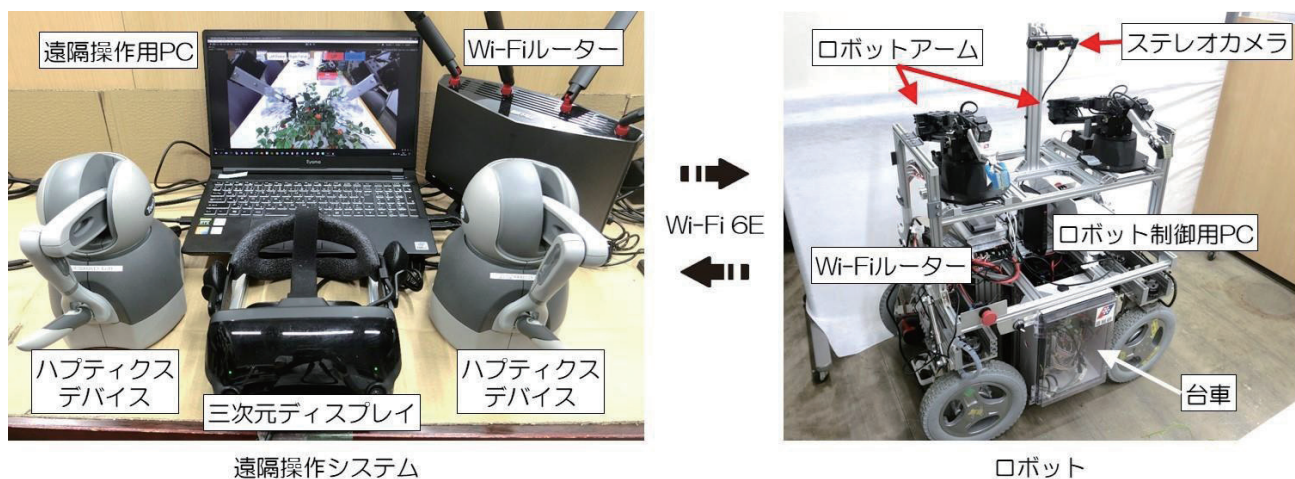


図2 遠隔操作ロボットシステムの概観

1. はじめに

農業分野においては人手不足が深刻な課題となっており、これを解決するためロボット技術の導入など、さまざまな作業の機械化・自動化が進められている。野菜や果物のハウス栽培においても、温度や日射などの栽培環境の計測・制御や液肥の調整・自動灌水といった、情報通信技術を活用した効率的な生育管理と品質の向上に向けた取り組みが進んでいる。その一方、整枝・誘引や収穫などの作業は依然として人手で行われており、猛暑下で作業せざるを得ないなど過酷な環境での重労働となっている。そこで本研究では、ハウス栽培における人手作業の軽労力化と将来的な自動化・自律化に向けた、遠隔作業型フィールドロボットの開発を行った。本研究で対象とする作業はイチゴ栽培における管理作業（不要な葉やランナーの除去）(図1)とした。これは、イチゴが高付加価値な作物であることと、イチゴ栽培では管理作業に最も多くの労力が必要とされていること¹⁾を根拠としている。

管理作業自体は人にとっては単純な作業だが、ロボットで代行する場合、人手に準じた複雑な動作を可能とする機構(ロボット本体)の開発や、AI等を活用した、作物の生育状態に応じた的確な作業判断の実現などが必要となる。本研究では、管理作業に必要な機能を有するロボット本体を開発する

とともに、これを作業者が遠隔で操作するシステムを構築することで、ハウス内作業の自動化・ロボット化に向けた基盤技術を確認した。ロボットの構成要素として、①管理作業を行うロボットアーム、②ハウス内を移動するための移動台車、③ロボットの操作を行う遠隔操作システム、④作業判断のためのAIを開発し、これらを統合したロボットシステムによる実証試験を行った。

2. 遠隔操作ロボットシステムの概要

図2に開発したロボットと遠隔操作システムの概観を示す。ロボット本体は、四輪駆動・四輪独立操舵方式の移動台車に6自由度のロボットアームを2機搭載する構成とした。作業者は、ロボットに搭載したステレオカメラの映像を三次元ディスプレイで立体的に視認しながら、ロボットアームと台車の操作を行う。ロボットと遠隔操作システムの通信は、無線LANの最新規格であるWi-Fi 6Eの6GHz帯で行うこととした。

3. ロボットアームの開発

イチゴの管理作業では、軸部直径1～5mmの不要な葉やランナーを確実に把持し、株元から引抜く必要がある。この

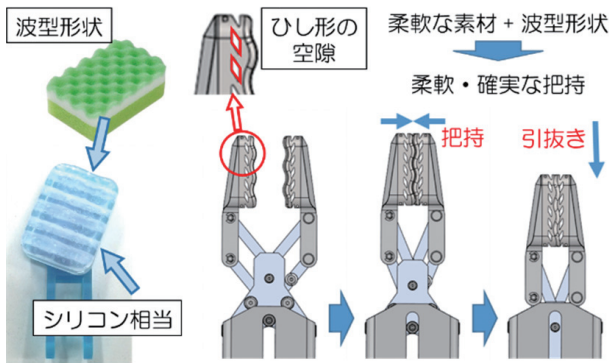


図3 開発したロボットハンド



図4 ロボットアームの構成



図5 不要葉除去の様子

ため、図3に示す2指のロボットハンドを開発した。ハンドの指先部はシリコン相当の柔軟な素材を使用して製作しており、表面に波型の凹凸と、ひし形の空隙を有することを特徴としている。これにより、対象物を柔軟かつ確実に把持することを可能とした。またロボットハンドに、直動機構と平行リンク機構を組み合わせた機構を内蔵することで、把持と引抜きの2段階の動作を1個のモーターで行うことを可能とした。

開発したハンドを既製のアーム（Trossen Robotics社製 ViperX 300 Robot Arm 6DOF、最大リーチ82cm、可搬重量750g）の先端に設置することでロボットアームを構成した（図4）。なお、ハンドは人の手と同様に空間上の任意の位置・姿勢で配置する必要がある。そのため、アームは6つ

の関節自由度を有する垂直多関節型を用いることとした。図5に動作試験の様子を示す。不要な葉の軸部を潰したり折損したりすることなく把持し、株元から引抜くように除去できることを確認した。同様の動作は、ランナーの除去においても可能であった。管理作業では、感染症の発生及び拡大の防止のため、植物体を潰すなどして傷付けないことが重要とされており、開発したロボットアームは管理作業に必要な機能の有していることを確認した。

4. 移動台車の開発

近年イチゴのハウス栽培では、栽培管理や収穫など作業性の向上を主な目的として、地上1m程度の架台（ベンチ）上に栽培床を配置して作業を行う高設栽培と呼ばれる方法が普及している。本研究では、共同研究機関が運営するイチゴハウス内（図6）においてロボットによる管理作業を行うことを想定し、移動台車の開発を行った（図7）。

台車の駆動は四輪駆動方式とし、電動車いす用ギヤモーター（Golden Motor Technology社製 PW12M、電源電圧24V、最大出力250W）を四輪に使用することで、十分な駆動力を確保した。また、前後の車軸にサスペンションを配置し、凹凸のある路面においても安定した走行を可能にした。

ベンチや灌水用配管など既設の構造物に接触することなくハウス内を自在に走行させるため、台車の進行方向は四輪操舵方式で制御することとした。前後の車輪の方向をそれぞれ図7のように制御することで、通常の旋回走行に加え、平行移動とその場旋回を行うことができ、限られたスペースのハウス内通路を自在に走行することを可能とした。

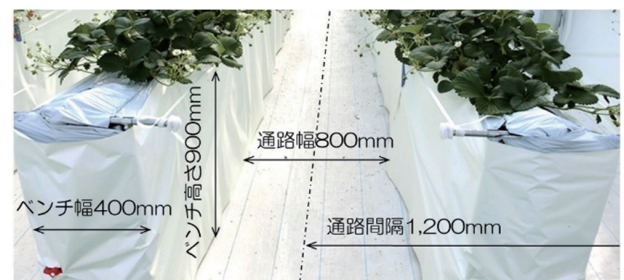


図6 ハウス内代表寸法

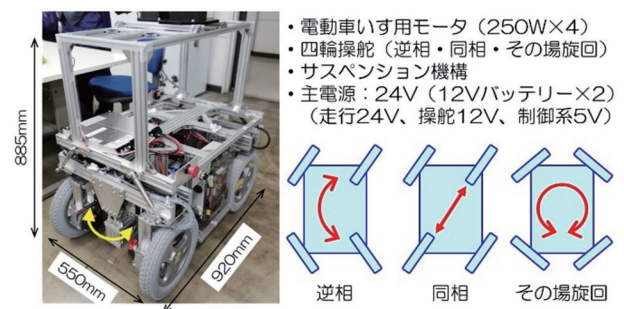


図7 開発した移動台車



図8 ハウス内走行の様子

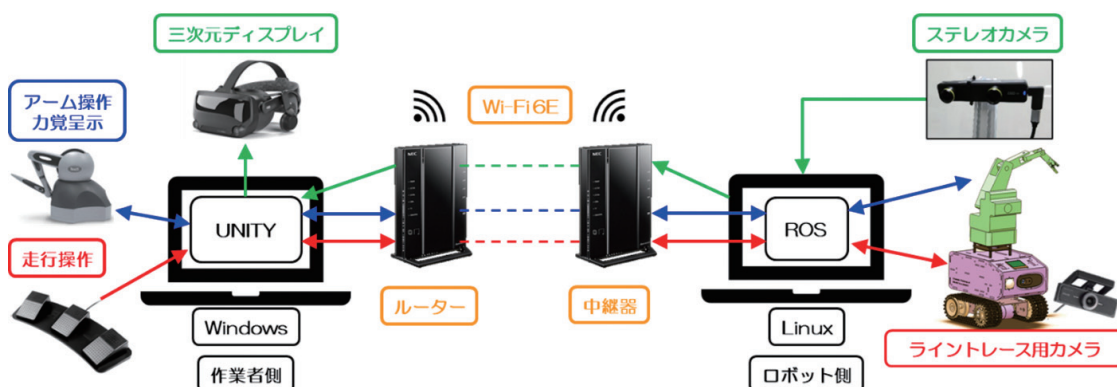


図9 遠隔操作システムの構成

通路に沿って自動走行するための制御方式として、路盤に敷設した走行ラインをカメラで認識しながら自動で追従走行する方式（ライトレース）を採用した。未知の環境における自動走行では、高度な自己位置推定手法にもとづいた走行経路の生成等が必要となる。しかし、整備が行き届き環境の変化も少ないハウス内で台車を自動走行させる場合、ライトレース方式は確実性の高い走行制御方式として有効である。ハウス内走行の様子を図8に示す。通路間に曲線状に敷設したラインに沿って、ラインから逸脱することなく、かつベンチ等の構造物に接触することなく通路間の移動が可能であることを確認した。

また実際の運用においては、図8のように決められた通路間を移動するだけでなく、作業内容に応じて任意の通路間を選択しながら移動する必要があるため、路盤に敷設する走行ラインには分岐点が存在する。このため、カメラ画像から通路分岐点の形状（T字、十字など）を認識のうえ作業員へ提示し、作業員から指示された方向へ自動で旋回する機能を組み込んだ。以上の走行操作（前後進・旋回）は、作業員の足元に設置したフットスイッチで行えるようにするなど、簡便な操作で台車を制御できる仕様とした。

5. 遠隔操作システムの開発

遠隔操作システムの構成を図9に示す。作業員は、ロボッ



ZED Mini
 ・片眼最高解像度：2208×1242ピクセル
 ・フレームレート：15fps、・視野角：90°×60°

図10 ステレオカメラ

トに搭載したステレオカメラ（図10、STEREO LABS社製 ZED Mini, 最高解像度2208×1242, 最大フレームレート15fps）から送られてくる作物周辺の映像を、三次元ディスプレイで立体的に視認しながらロボットを操作する。作業員側システム（遠隔操作側）ではWindowsPCを中心として、PCに接続したロボット操作装置やステレオカメラからの信号を処理し、作業員への映像提示やロボットへの制御信号の送信を行う。これらのプログラムの開発には三次元表示などの機能が充実したUNITYを使用した。ロボット側システムではLinuxPCを中心として、作業員側システムから送られてくるロボット制御信号を処理し、PCに接続したロボットアームや台車を制御するとともに、作業員側システムに対してロボットの動作状態やステレオカメラ映像を送信する。これらのプログラムの開発にはロボット開発で広く利用されているROSを使用した。

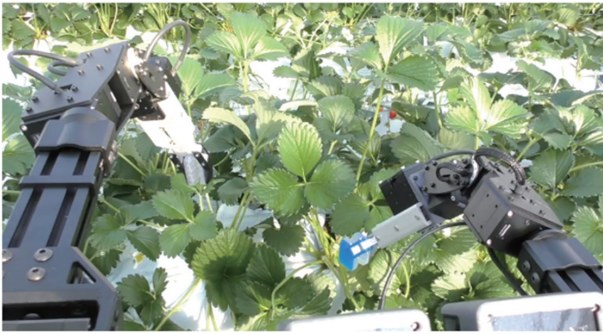


図 11 作業者へ提示される映像の例

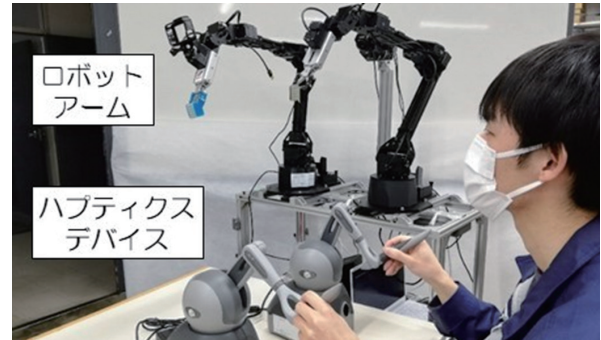


図 13 ロボットアームの操作



図 12 三次元ディスプレイ



図 14 ロボットアームの制御

図11に作業者へ提示される映像の例を示す。作業者は図のような視点の立体映像を確認しながら、ロボットアームを自分の手を動かすのと同様に動作させて作業を行うことが可能となっている。ここで三次元ディスプレイとして、ヘッドマウントディスプレイ、もしくは裸眼立体視ディスプレイの使用を想定するが、両者には視認性や没入感に異なる特徴がある(図12)ことから、作業者が選択して使用できるよう構成した。

ロボットアームの操作は、ハプティクスデバイスと呼ばれる入力装置を用いて行う(図13, 図14)。ハプティクスデバイスは、デバイスの先端に取り付けられたペンの空間的な位置と姿勢を取得可能であり、これをロボットアーム先端の位置と姿勢の指令値として出力する(リーダー・フォロワー制御)。すなわち、ペンを持つ作業者の手の動きがそのままロボットアーム先端に伝達され、その結果、ロボットアームが手の動きと同調して動作するため直感的な操作が可能となっている。また、ロボットアームに作用する外力を推定し、作業者が操作するデバイスへ反力として伝達する機能(力覚フィードバック)を組み込んだ。これにより、ロボットアームが何らかの構造物に接触した場合の過剰な負荷を作業者が感知することが可能となり、アームや構造物の損傷など危険な状況を回避することができる。

遠隔操作システムとロボット間の無線通信は、新たに利用可能となったWi-Fi 6Eの6GHz帯で行うこととした。これにより、既存の2.4GHz・5GHz帯で問題となる、他機器との干

渉などによる通信速度の低下や切断が発生することなく、安定かつ高速なデータ通信が可能となった。本システムでは、使用したカメラで設定可能な片眼あたり最高解像度2208×1242ピクセル、最高フレームレート15fpsの映像を、リアルタイムに伝送可能なことを確認した。

6. AIの構築

管理作業の自動化へ向けたAI認識機能開発の一例として、セマンティックセグメンテーションによる不要部(不要な葉とランナー)の認識技術を開発した。セマンティックセグメンテーションは、画像をピクセル単位で分類する手法であり、不定形な領域の抽出に適している。図15に、ランナーの学習と認識結果の例を示す。左図のように、人手によりランナーの輪郭を選択(アノテーション)した画像を複数作成して学習させたところ、右図に示すようにランナーと推定される領域の抽出が可能であることを確認した。



図 15 ランナーの学習と認識結果の例

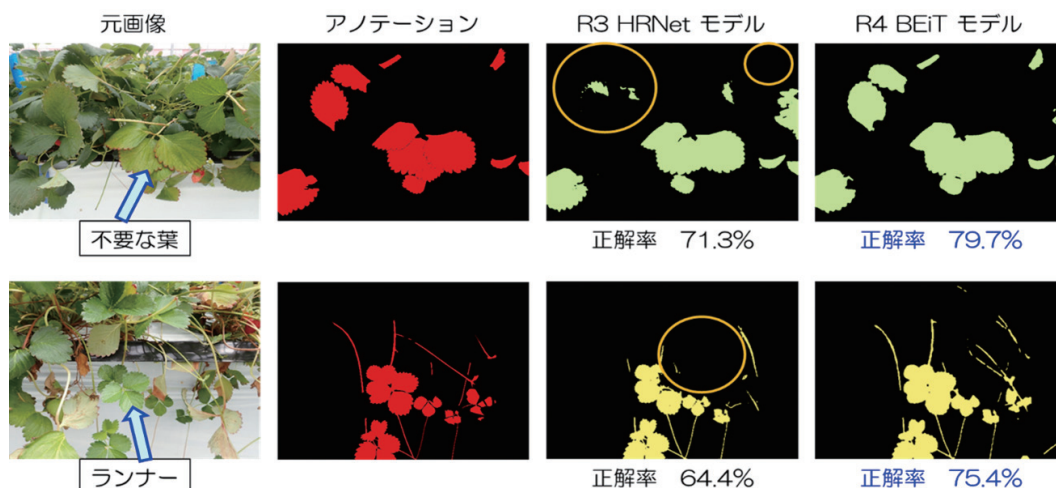


図 16 AI による不要な葉とランナーの認識例

本研究では、推定精度向上のためセマンティックセグメンテーションに使用するAIモデルの選定と改良を行った。R3年度は2019年に発表されたHRNetモデルを、R4年度は2021年に新たに発表されたBEiTモデルを用い、学習パラメータの改良などを行い不要な葉とランナーの学習を行った。図16に認識結果を比較して示す。不要な葉の認識結果(図16上段)では、HRNetモデルでは円形で図示した領域に未抽出部が見られ正解率71.3%となったのに対し、BEiTモデルでは正解率79.7%に向上した。ランナーの認識結果(図16下段)では、不要な葉の認識結果と同様にHRNetモデルでは円形で図示した領域に未抽出部が見られ正解率64.4%となったのに対し、BEiTモデルでは正解率75.4%に向上した。

以上より、不要部認識AIの構築が可能であること、また、適切なモデルを選択して学習を行うことにより認識精度の向上が可能であることを確認した。さらに、ロボットの自動化を想定し、ウェブカメラからWi-Fiで転送される画像をリアルタイムにAIで処理するシステムを開発した。ハウス内での試験により、毎秒約3フレームのAI認識処理が可能であることを確認した。

7. 実作業試験

以上のように構成した遠隔操作ロボットシステムにより、イチゴハウス内において実作業試験を行った。試験の様子を図17に示す。実際にイチゴ栽培管理作業に従事している熟練作業者と、作業未経験者を対象とした複数名による実作業試験を実施した結果、ハプティクスデバイスの操作や、三次元ディスプレイへの適応性に個人差はあるものの、比較的短時間の試行で一連の操作が可能であることを確認した。



図 17 実作業試験の様子

8. おわりに

本研究では、ハウス栽培における人手作業を代替するロボットの実現を目指し、その初期段階として遠隔操作型フィールドロボットを開発し、ロボットの自律化に必要な基盤技術の確立を図った。ロボットの自律化へ向けては、人が行っている作業の認識と判断を、AI技術等で可能とする必要がある。そのため、開発した遠隔操作システムを活用して、今後も継続的に人の動作をデジタル化し、学習データとして蓄積・活用することにより、AIの高度化に向けた取り組みを進める。また、本研究で確立したマニピュレーションや遠隔操作システムなどの要素技術は、他の栽培品目や作業に適用することが可能である。人手不足への対応や軽労力化を目指した機械化・自動化に対する現場ニーズの把握に努めながら、更なる応用展開を進める。

参考文献

- 1) 北海道農政部編:北海道農業生産技術体系(第5版),(公社)北海道農業改良普及協会, 538PP., (2019)

見守りのための映像脈波計測技術の開発

泉 巖, 川崎 佑太, 前田 大輔, 中島 康博, 栞野 晃希

Development of Video Plethysmography Measurement Technology for Monitoring Service

Iwao IZUMI, Yuta KAWASAKI, Daisuke MAEDA,
Yasuhiro NAKAJIMA, Koki KUWANO

抄 録

ICTの発展に伴い、見守りにおけるバイタルサインの活用が進んでいる。その中でもカメラによる映像脈波計測は、脈拍数を非接触でモニタリングすることができる技術として期待されているが、体動時は計測誤差が大きいたことが課題である。この対策として、計測波形から体動成分を分離・除去する方法がいくつか提案されているが、分離後の波形判別や適用条件等に問題点を有している。

本研究ではRGBカメラから得た輝度波形に差分処理を行うことで、既存の体動対策の問題点を解消した映像脈波計測技術を開発した。さらに、見守りを想定した環境で映像脈波計測を行った結果、独立成分分析による方法と比較して精度よく脈拍数を計測できることを確認した。

キーワード：見守り, カメラ, 非接触, 映像脈波, 脈拍数

Abstract

With the development of ICT, the use of vital signs in monitoring service is progressing. Video plethysmography measurement using camera devices is expected as a technology that can monitor the pulse rate in non-contact, but the problem is that the measurement error become large during body movement. As a countermeasure, several methods have been proposed for separating and removing the component of body movement from the signal, but there are problems in signal discrimination after separating and conditions for application.

In this research, we developed a video plethysmography measurement technology by differential process using luminance waveforms obtained from the RGB camera, that solves the problem of existing countermeasure technology against body movement. In addition, we measured video plethysmography in an environment assuming monitoring service, and confirmed that our method can measure the pulse rate more accurately than the independent component analysis.

KEY-WORDS : Monitoring service, Camera, Non-contact, Video plethysmography, Pulse rate

1. はじめに

ICTの発展により、見守りサービス等における生体情報センシングとデータ活用が進められており、なかでも生命兆候に関する情報であるバイタルサインの活用ニーズが増加している。バイタルサインは、脈拍数、呼吸数、血中酸素濃度、深部体温、血圧といった、医療現場等で日常的に計測される

基本的かつ重要な生体情報である¹⁾。このうち脈拍数は、カメラ映像を解析して得られる映像脈波を利用した非接触計測が可能である。映像脈波による脈拍数計測は、接触式センサの利用で生じる皮膚のかぶれや、ウェアラブルデバイスで必要となるこまめな充電といった問題点を解決できることから、見守りサービスへの活用が期待されているが、既存の計測技術では体動時の計測誤差が大きいたことが課題となっている。

事業名：経常研究

課題名：生活空間におけるバイタルサイン計測システムの開発

本研究では、RGBカメラによる映像脈波計測システムを試作し、体動時の脈拍数を高精度に計測するための技術開発に取り組んだので報告する。

2. カメラによる映像脈波計測

2.1 映像脈波とは

映像脈波は、皮膚の反射光を画像解析することで血流が変化する様子を波形として計測したものである。映像脈波をピーク解析することで脈拍数が得られ、健康状態や安否確認のための見守り情報として活用することができる。市販のWebカメラ等により非接触で連続的に計測できることから、脈拍数のモニタリング技術として活用が期待されている。

2.2 計測原理

映像脈波の計測は、血液に含まれるヘモグロビンの吸光特性を利用している。ヘモグロビンの吸光スペクトルは、緑色光の波長帯である550nm付近にピークを有しており²⁾、脈動により血流量が変化すると、これに応じて反射する緑色光も変化する(図1)。この現象は皮膚の上から観察できるため、皮膚の反射光に含まれる緑色光強度を解析することで映像脈波を計測することができる。

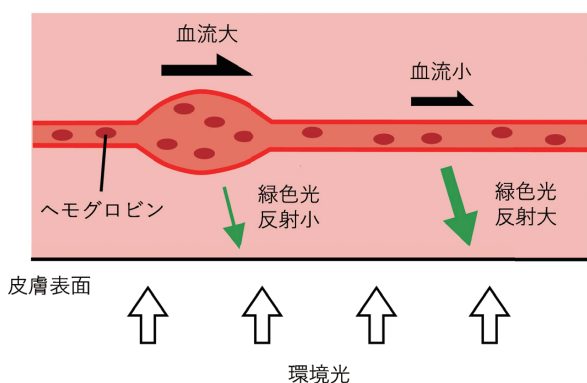


図1 血管で反射される緑色光のイメージ

2.3 映像脈波計測システムの試作

緑色光強度の計測には、RGBカメラを利用することができる。RGBカメラは、被写体で反射した光をR(赤)、G(緑)、B(青)の波長帯に応じたフィルタで分光し、それぞれの光の強度を輝度値として計測・出力する。よって、RGBカメラで撮影した皮膚画像のGチャンネルの輝度値を解析することで、映像脈波を計測することができる。

映像脈波は顔に安定して出現するとされており、頬や額の領域に注目した計測事例が多い³⁻⁵⁾。本研究では、Webカメラ(C930e, Logicoool社製)の撮影画像に顔の特徴点を検出可能なソフトウェアライブラリ(Dlib, C++ Library)を適

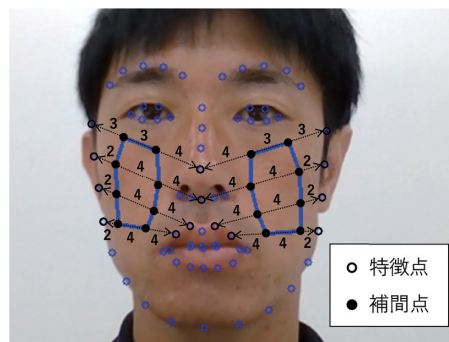


図2 顔の特徴点を利用した頬領域のトラッキング

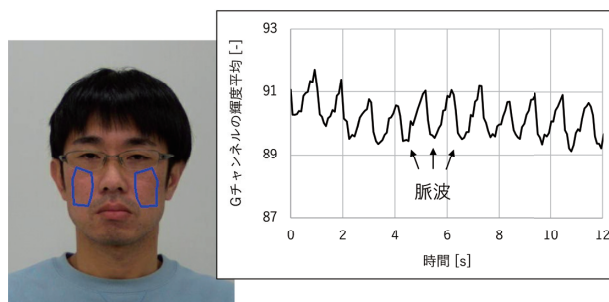


図3 頬の輝度解析により計測した映像脈波

用して両頬のトラッキングを行い、その領域内のGチャンネルの輝度値を解析することで映像脈波を計測した。具体的には、図2のように特徴点の内分により頬周辺を補間した点に囲まれる領域をトラッキングし、領域内におけるGチャンネルの輝度値を平均することで映像脈波を得た。実際に計測した映像脈波の例を図3に示す。

3. 体動時の映像脈波計測技術の開発

3.1 体動の影響

映像脈波計測における課題の一つが、体動の影響を受けやすいことである。図4は試作したシステムで体動時の映像脈波を計測した例であり、体動が発生したタイミングで輝度が大きく変動していることが確認できる。これにより、脈波成分の消失やピークの誤検出といった問題が発生する。

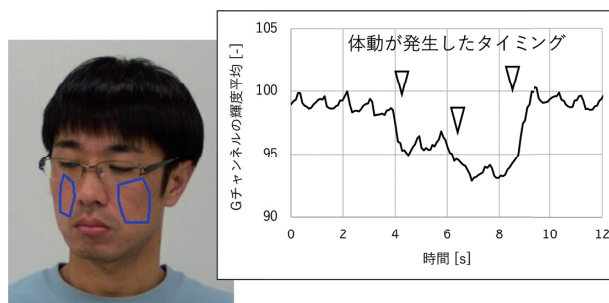


図4 体動の影響による輝度変動

3.2 既存の体動対策とその問題点

既存の体動対策としては、独立成分分析 (Independent Component Analysis : ICA)⁶⁾ やバンドパスフィルタ⁷⁾ による方法が挙げられる。ICAによる方法は、RGB画像から得られる3チャンネルの輝度波形を入力として、脈波成分と体動成分を分離した波形を出力する(図5)。しかし、ICAには分離した波形のどれが脈波成分であるか判別する機能がない。このため、ICAの後に脈波成分に該当する波形を判別し選択する処理が必要となるが、自動的に判別するアルゴリズムには限界があり、判別に失敗すると脈拍数に大きな誤差が生じる可能性がある。バンドパスフィルタによる方法は、脈波の周波数帯と異なる振動成分を除去するものであるが、体動が脈波と同じ周波数帯である場合は十分な計測精度を得ることが難しい。

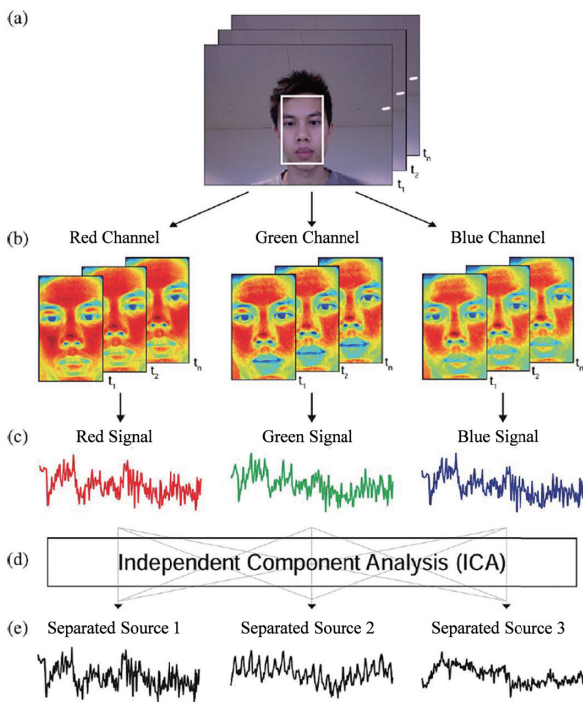


図5 ICAによる脈波成分の分離 (M.Z.Poh et al.(2011)⁶⁾ より引用)

3.3 差分処理による体動対策の検討

本研究ではRGB画像から得られる3チャンネルの輝度波形を用いた差分処理による体動対策について検討した。皮膚画像のR及びBチャンネルには、Gチャンネルより脈波が現れにくい。しかし、体動による輝度変動が各チャンネルで同様であれば、差分処理により脈波成分のみが残った波形を抽出できる可能性がある。

この方法にはICAのような波形の分離プロセスがないため、目的波形の判別と選択が不要である。さらに、脈波成分と体動成分が同じ周波数帯であっても体動成分のみが除去さ

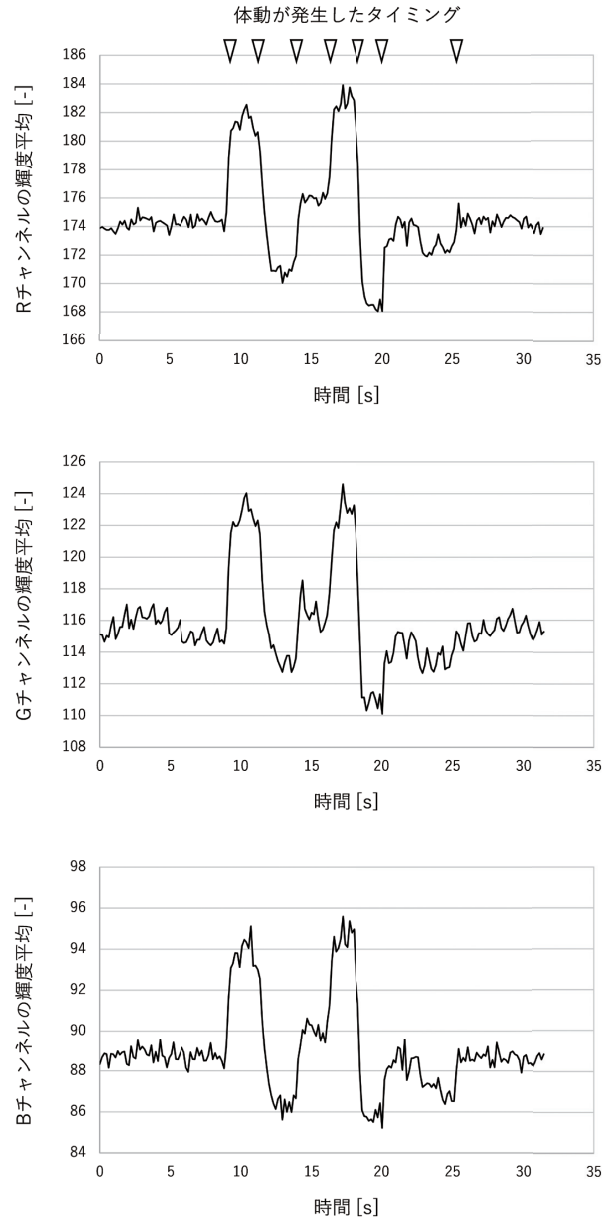


図6 体動に伴う輝度変動の比較 (上から R, G, Bチャンネル)

れるため、バンドパスフィルタによる体動対策の問題点を解消することができる。

差分処理による体動成分除去の可能性を確認するため、一定光源下における体動時の輝度変動を各チャンネルで比較した結果を図6に示す。R及びBチャンネルには脈波が現れにくい、体動に伴う基線変動はGチャンネルと類似する傾向にあることを確認した。

3.4 体動成分の除去と脈波成分の抽出

体動時の基線変動はR及びBチャンネルで類似していたため、今回はRチャンネルのみを利用した体動成分除去を検討した。Rチャンネルの波形に含まれる高周波成分を2.0Hzの

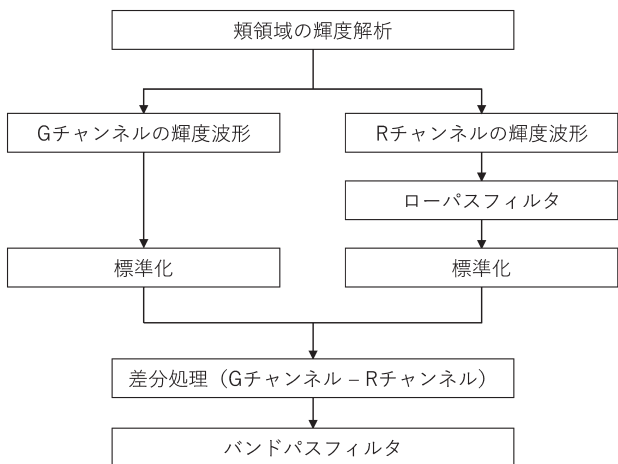


図7 差分処理と脈波成分抽出のフローチャート

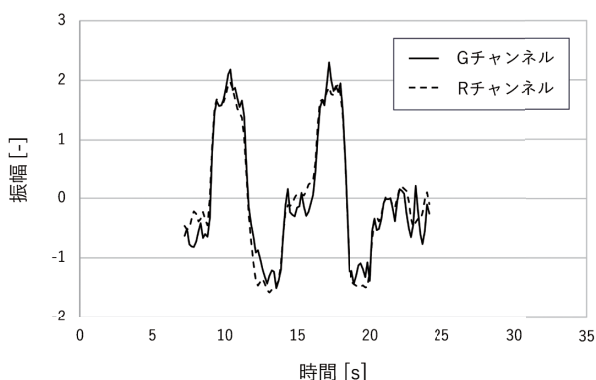


図8 標準化後の G チャンネルと R チャンネルの波形

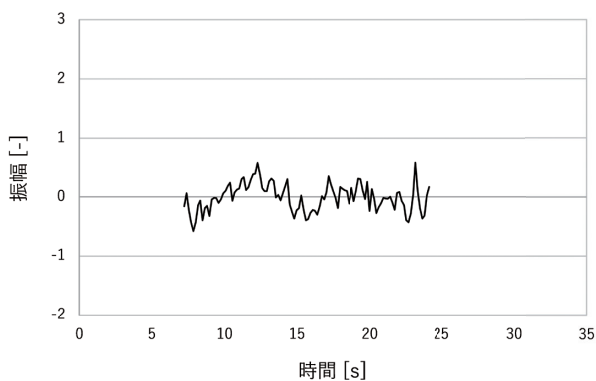


図9 差分処理による体動成分の除去

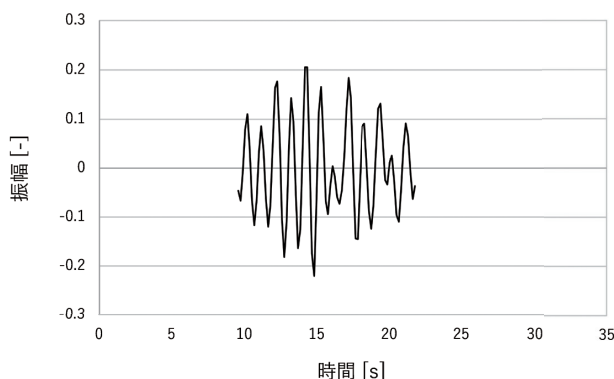


図10 バンドパスフィルタによる脈波成分の抽出

ローパスフィルタで除去し、GチャンネルとRチャンネルの波形をそれぞれ標準化することでスケールを合わせた。その後、GチャンネルとRチャンネルの波形で差分処理を行い、体動成分を除去した。さらに、0.5-2.0Hzのバンドパスフィルタにより脈波成分を抽出した。以上の処理をフローチャートにまとめたものを図7に示す。

参考までに、図6のGチャンネル及びRチャンネルのデータを標準化した波形、差分処理により体動成分を除去した波形、バンドパスフィルタにより抽出した脈波成分の波形をそれぞれ図8, 9, 10に示す。なお、各処理によりデータの両端部が消失するため、グラフに空白区間が生じている。

4. 開発した映像脈波計測技術の評価実験

開発した映像脈波計測技術（以下、提案法）を用いて、当場にニーズとして寄せられている医療機関での新生児見守りを想定した映像脈波計測実験を行い、その計測結果をICAによる既存の映像脈波計測技術（以下、ICA法）による計測結果と比較・評価した。

4.1 実験手順

医療機関での新生児見守りを想定し、実験室内において仰臥位の姿勢で顔を撮影可能な実験環境を構築した（図11）。部屋の照度は顔の位置で600lx程度であり、カメラの解像度は640×480pixel、顔とカメラの距離は1mとした。実験は安静及び体動の2パターンの条件で行い、安静時は正面から顔を撮影し、体動時は顔認識される範囲で左右へ顔を動かしながら撮影を行った。

各条件で計測した映像脈波に提案法及びICA法をそれぞれ適用し、30秒間の脈波成分波形を抽出した。抽出した波形に1階微分ガウス関数による畳み込み演算⁸⁾を行い、得られた微分時系列信号のゼロクロス点をもとに脈波成分波形のピークを検出し、ピーク間隔の平均値から1分あたりの脈拍数を算出した。



図11 実験環境

脈拍数の正解データは、指先に装着した光電式容積脈波センサ（M9008-3P）で計測した脈波から算出した。局所最大値処理⁹⁾により計測した脈波のピーク検出を行い、ピーク間隔の平均値から1分あたりの脈拍数を算出した。

4.2 被験者

20～50代の健康な男性3名に対し、安静及び体動の条件で5回ずつ実験を行い、計30データを計測した。なお、本実験は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の規定に基づく倫理審査委員会の承認後、被験者に研究概要を口頭で説明し、インフォームド・コンセントを得た上で実施した。

5. 実験結果

安静時及び体動時の実験結果を図12に示す。正解データに対する一致精度を相関係数（R）で評価した結果、安静及び体動の両条件において、提案法はICA法より高い相関がある

ことを確認した。さらに、正解データに対する平均二乗誤差を整理した結果を図13に示す。安静及び体動の両条件において、提案法はICA法より計測誤差が小さいことを確認した。以上より、提案法はICA法と比較して体動時の脈拍数をより正確に計測可能であることを確認した。

一方、体動時の脈拍数は正解データとおおむね一致しているものの、安静時ほどの精度は得られなかった。体動時の誤差が大きいデータを確認したところ、体動に伴う輝度変動を完全に除去できなかった箇所ではピーク波形が消失していた。今回使用しなかったBチャンネルの波形情報の活用や、各チャンネルの基線変動をより正確に一致させる方法等の検討により改善できる可能性が考えられるため、今後の検討課題として取り扱いたい。

6. おわりに

本研究では、体動時の脈拍数を正確に計測するための技術開発に取り組み、RGBカメラから得た輝度波形に差分処理

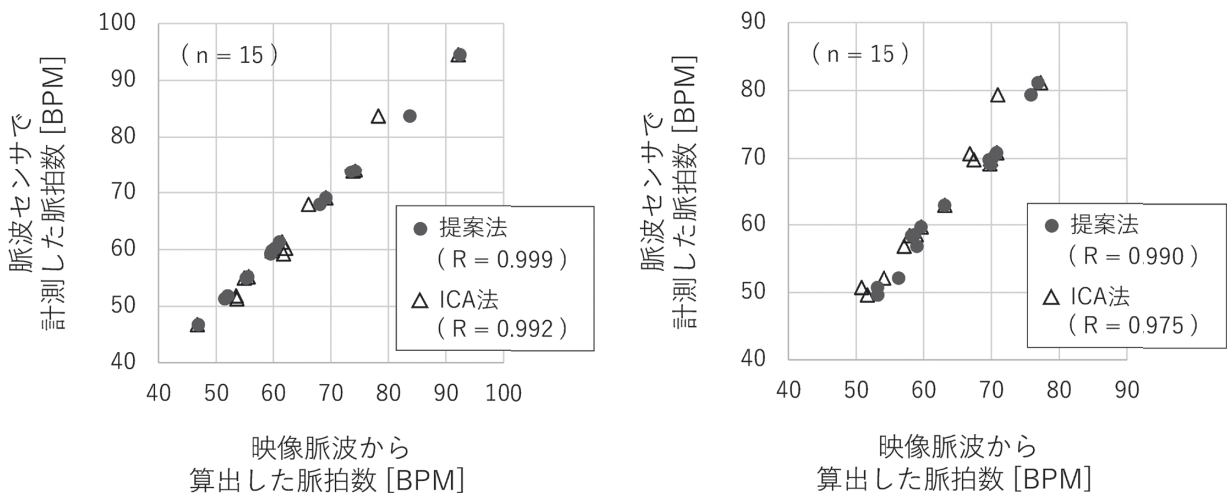


図12 映像脈波から算出した脈拍数と正解データの比較
(左：安静時，右：体動時)

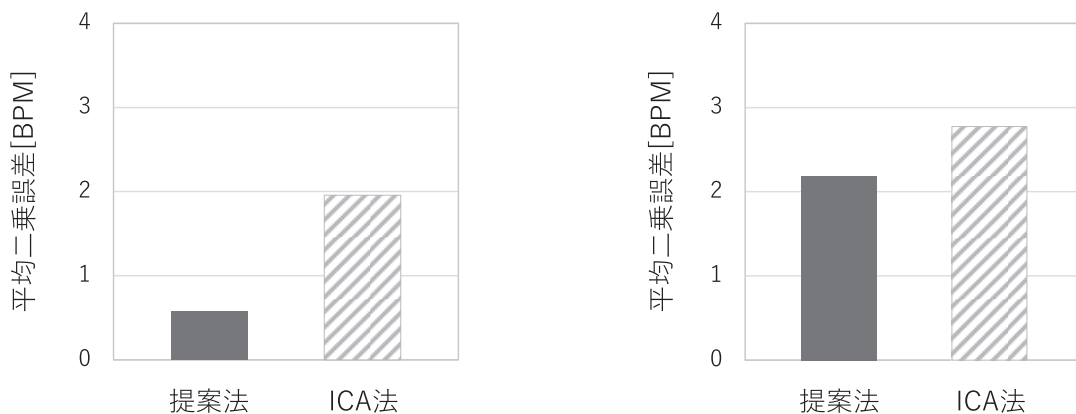


図13 正解データに対する平均二乗誤差
(左：安静時，右：体動時)

を行うことで、既存の体動対策の問題点を解消した映像脈波計測技術を開発した。さらに、医療機関での新生児見守りを想定した映像脈波計測実験を行い、開発した技術を適用することで体動時の脈拍数をICA法より正確に計測できることを確認した。

今後は、実際の見守り現場へ展開するための技術支援に取り組むほか、消灯時の利用を想定した映像脈波計測技術の開発等についても検討したい。

参考文献

- 1) 坂本すが, 井手尾千代美, 木下佳子, 他: “完全版ビジュアル臨床看護技術ガイド”, 第3版, pp.30-50, 照林社, (2015)
- 2) Prael Scott : “Optical absorption of hemoglobin”, <https://omlc.org/spectra/hemoglobin/>
- 3) Sungjun Kwon, Jeehoon Kim, Dongseok Lee, et al.: “ROI analysis for remote photoplethysmography on facial video”, IEEE Conf. EMBC, pp. 4938-4941, (2015)
- 4) Lakmini Malasinghe, Stamos Katsigiannis, Keshav Dahal, et al.: “A comparative study of common steps in video-based remote heart rate detection methods”, Expert Systems with Applications, 207, 117867, (2022)
- 5) Kun Zheng, Kangyi Ci, Hui Li, et al.: “Heart Rate Prediction from Facial Video with Masks Using Eye Location and Corrected by Convolutional Neural Networks”, Biomed. Signal Processing Control, 75, 103609, (2022)
- 6) Ming-Zher Poh, Daniel J. McDuff, and Rosalind W. Picard: “Advancements in Noncontact, Multiparameter Physiological Measurements Using a Webcam”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 58, No.1, pp. 7-11, (2011)
- 7) Chihiro Takano, Yuji Ohta: “Heart rate measurement based on a time-lapse image”, Medical Engineering & Physics, Vol. 29, Issue 8, pp. 853-857, (2007)
- 8) 鶴飼和歳, ラシェドゥーラ ラーマン, 小橋昌司: “多点計測投票法による時系列顔画像からの短時間R-R間隔推定”, システム制御情報学会論文誌, Vol.31, No.12, pp.402-411, (2018)

セルロースナノファイバーの構造解析とガスバリア性評価

細川 真明, 山岸 暢, 吉田 昌充, 瀬野修一郎, 可児 浩

Evaluating Fiber Structures and Gas Permeabilities of Cellulose Nanofibers

Masaaki HOSOKAWA, Tohru YAMAGISHI, Masamitsu YOSHIDA,
Shuichiro SENO, Hiroshi KANI

抄 録

セルロースナノファイバー (CNF) はセルロースを主成分とする極細の天然繊維である。植物や菌類から作られ、石油由来の汎用プラスチックと比較してガスバリア性と透湿性に優れていることが知られている。一方でCNFは原料や作製方法が多様であり、それらに応じて繊維の太さや長さが大きく変わるため、発現する物性も原料や作製方法に大きく依存する。そこで本研究では原料及び作製方法が異なるCNFの顕微鏡画像から繊維構造を統計的に比較し、実際にガスバリア性と透湿性の評価を行うことで、より高い性能を得られるCNFの構造を解析した。4種のCNFに対して繊維構造解析、ガス透過係数、青果物への塗布による鮮度保持効果に関する応用試験を一貫して行った結果、ガスバリア性はCNFの繊維径が、透湿性はCNF表面の親水基の置換度が寄与していることが示唆された。さらに青果物の鮮度保持試験において呼吸速度の高いメロンでは比較的ガスバリア性の低いCNF、バナナではガスバリア性の高いCNFで顕著な鮮度保持効果が認められた。

キーワード：セルロースナノファイバー、構造解析、ガスバリア性、鮮度保持

Abstract

Cellulose nanofiber (CNF) is an ultrafine natural fiber composed of cellulose. It is produced from plants or bacteria and is known to have superior gas permeability to general purpose plastics. On the other hand, CNFs are produced from a wide variety of raw materials and fabrication methods, which varies the fiber thickness, length, and also the properties. In this study, the fiber structures of CNFs made from different raw materials and preparation methods were statistically compared from microscopic images. Then, the structure of CNF with higher performance was analyzed by actually evaluating gas and moisture permeability. The tests on four types of CNFs regarding fiber structure, gas permeability, and freshness retention of fruits suggested that the fiber diameter of CNFs contributes to the gas barrier property and the degree of substitution of hydrophilic groups on the CNF surface contributes to the moisture permeability. In addition, freshness retention tests on fruits and vegetables showed that CNFs with relatively low gas barrier properties were effective for melons, which have a fast respiration rate, and CNFs with high gas barrier properties showed a remarkable freshness retention effect for bananas, which have a low respiration rate.

KEY-WORDS : Cellulose nanofiber, Structure analysis, Gas barrier property, Freshness retention

1. はじめに

プラスチックは現代社会の中で最も広く使用されている素材であり、同時に不適切な廃棄処理によって深刻な環境汚染を引き起こす。このことから脱プラスチックの考え方が浸透しつつある。日本においても2019年に策定された「プラスチック資源循環戦略」及び2022年に施行された「プラスチック資源循環促進法」に先駆けて、石油由来のプラスチックの代替となる天然素材の探求が積極的に行われている¹⁻⁴⁾。とりわけ、植物が水と二酸化炭素から光合成によって生産するセルロース類は地球上の天然高分子として最大の賦存量を有している⁵⁾。さらに植物から得られるパルプをナノスケールにまで解繊することで得られるセルロースナノファイバー(CNF)は機械的強度、熱安定性、生分解性に優れた画期的な循環型素材としてプラスチックからの代替あるいは複合化が注目されている。実際にCNFを活用した製品も既に製品化されており、星光PMC(株)が製造・販売する「STARCEL[®]」はCNFを各種樹脂に練りこんだ複合プラスチックペレットとして、製品の強度を保ちながら薄肉化、軽量化を実現することが可能となった⁶⁾。また、日本製紙(株)が販売する「セレンピア[®]」はCNFの水分散液であり、水中のCNF間の絡み合いを起因とする特異的な粘性挙動を示すことから食品の増粘剤として実用化されている⁷⁾。

上記のように、CNFの特異的な性質を利用した材料開発は大きく分けて繊維補強効果と増粘効果を意図したものが大半であるが、CNFにはこれらとは別にガスバリア性においても石油系プラスチックとは異なる性質を持つことが知られている。一般的に、汎用プラスチックとして広く使用されるポリエチレンやポリプロピレンは気体を透過する性質を持つ⁸⁾。これは気体分子が素材を構成する高分子の空隙に侵入できるためである。一方CNFを構成するセルロースは分子構造の中に親水基を多く有し、分子内及び分子間で強力な水素結合を形成するため、高い結晶性を持った素材となる。このためにCNFで作製したフィルムは高いガスバリア性を持つ⁹⁾。例えば、外気の酸素やエチレンに高い感受性を持つ青果物はフィルムで包装することで鮮度保持を行えるが、これをCNFで置き換えることでより高い鮮度保持機能を実現することが期待できる¹⁰⁾。

そこで本研究では原料や製造方法の異なる種々のCNFに対して、顕微鏡画像による構造解析、CNFをフィルム状に成形した際のガス透過係数の測定及び青果物の果皮に塗布した際に発現する鮮度保持効果を一貫して行うことによりCNFの構造とガスバリア性及び鮮度保持用コーティング剤としての可能性を調査した。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体として使用するCNFは化学解繊セルロース、セルロースナノクリスタル、物理解繊セルロース、発酵ナノセルロースの4種類である。2,2,6,6-テトラメチルピペリジン1-オキシド(TEMPO)を酸化触媒とする解繊方法(TEMPO酸化法)によりパルプを解繊した化学解繊セルロースは、第一工業製薬(株)製CNF(レオクリスタ I-2SX 2wt%水分散液)を蒸留水で1wt%に希釈したのち使用した。セルロースナノクリスタルは、既報の文献を参考に針葉樹晒クラフトパルプを22%次亜塩素酸ナトリウム水溶液により酸化し1wt%の水分散液に調製した¹¹⁾。物理解繊セルロースは、(株)スギノマシン製CNF(BiNF-i-s BMa-100 10wt%水分散液)を蒸留水で1wt%に希釈したのち使用した。発酵ナノセルロースは草野作工(株)製CNF(Fibnano 1wt%水分散液)をそのまま使用した。

2.2 顕微鏡観察

CNFの観察には走査プローブ顕微鏡(株)日立ハイテクサイエンス製L-trace II, NanoNavi II 以下SPMと称する)を使用した。探針にはDFM用マイクロカンチレバー(株)日立ハイテクサイエンス製, SI-DF3P2)を使用した。試料調製として、各種CNF1wt%水分散液を蒸留水で1 ppmに希釈し、超音波照射により分散を促進させた。希釈後のCNF分散液50 μ Lをへき開直後の15mm \times 15mm \times 0.15mmのマイカ基板表面に滴下し、室温で十分乾燥させたのち観察に用いた。

2.3 画像解析

SPM観察で得られた画像は既報の文献にて公開された繊維画像解析ソフト(FiberApp)で解析を行った¹²⁾。繊維長の解析には表1で示した数の繊維をSPM画像から集計し、得られた繊維長分布を対数正規分布曲線にて外挿した。繊維径の解析にはSPM画像の繊維部分の画素を集計し、各画素のコントラスト比を基板からの繊維高さに換算し、繊維径分布とした。化学解繊セルロース及び発酵ナノセルロースは正規分布曲線、セルロースナノクリスタルと物理解繊セルロースは対数正規分布曲線で外挿した。

2.4 ガスバリア性評価

各種CNFのバイオマスフィルムを作製するため、CNF水分散液を蒸留水で0.4wt%に希釈したのち50 $^{\circ}$ Cで1時間以上静置した。その後攪拌脱泡装置により脱泡し、150mm径のプラスチックシャーレに分散液150mLを移し替え、50 $^{\circ}$ Cのオーブンで7日間乾燥した。乾燥後、シャーレからCNFフィルムを脱型し、加熱プレスで各種フィルムを5分間プレスすることでバイオマスフィルムとした。

表1 集計した繊維データ

	繊維長		繊維径		総繊維長 ^{a)} μm
	観察視野	集計数	観察視野	集計数	
	μm	本	μm	pixel	
化学解繊セルロース	5×5	603	5×5	5504	28
セルロースナノクリスタル	5×5	158	5×5	2643	13
物理解繊セルロース	90×90	288	5×5	7122	36
発酵ナノセルロース	90×90	203	5×5	603	12

^{a)} 1pixelの辺長(μm) × 集計数

各種フィルムは自作のガス透過試験装置を用いてJIS K 7126-1(差圧法)を参考に室温23℃の条件下で測定を行った。また透湿度測定はJIS Z 0208(カップ法)に従い、室温20℃、相対湿度90%の条件下で測定した。比較対象の素材として、青果物の包装材として汎用的に使用されているプラスチックフィルムである分子配向ポリプロピレン(OPP)フィルム(膜厚20μm)を使用した。

2.5 青果物の鮮度保持試験

試験体として使用した青果物はメロンとバナナである。0.4wt%に希釈した各種CNF水分散液1Lに界面活性剤として50μLのポリオキシエチレン(30)ソルビタンテトラオレート(富士フィルムワコーケミカル(株)製)を添加攪拌したのち、

青果物果皮へのコーティング剤として使用した。刷毛を使用しコーティング剤を青果物果皮へ塗布し、十分乾燥させたのち風通しの良い暗室で室温保管した。図1に鮮度保持試験中の室温と湿度を示す。鮮度の評価については外観観察及び重量測定を行った。

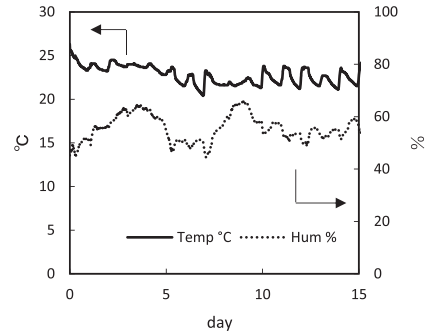


図1 鮮度保持試験中の温湿度推移

3. 結果と考察

3.1 CNFの繊維構造解析

各種CNFのSPM観察による繊維画像、繊維長分布・繊維径分布を図2に示す。繊維画像でも見られるように、繊維の太さと長さは種類によって大きく異なり原料と製造法に応じて多様な構造をとることが明らかとなった。また、各種CNFの繊維長分布は対数正規分布に近い分布挙動を示し、一方で繊維径分布は化学解繊セルロースと発酵ナノセルロー

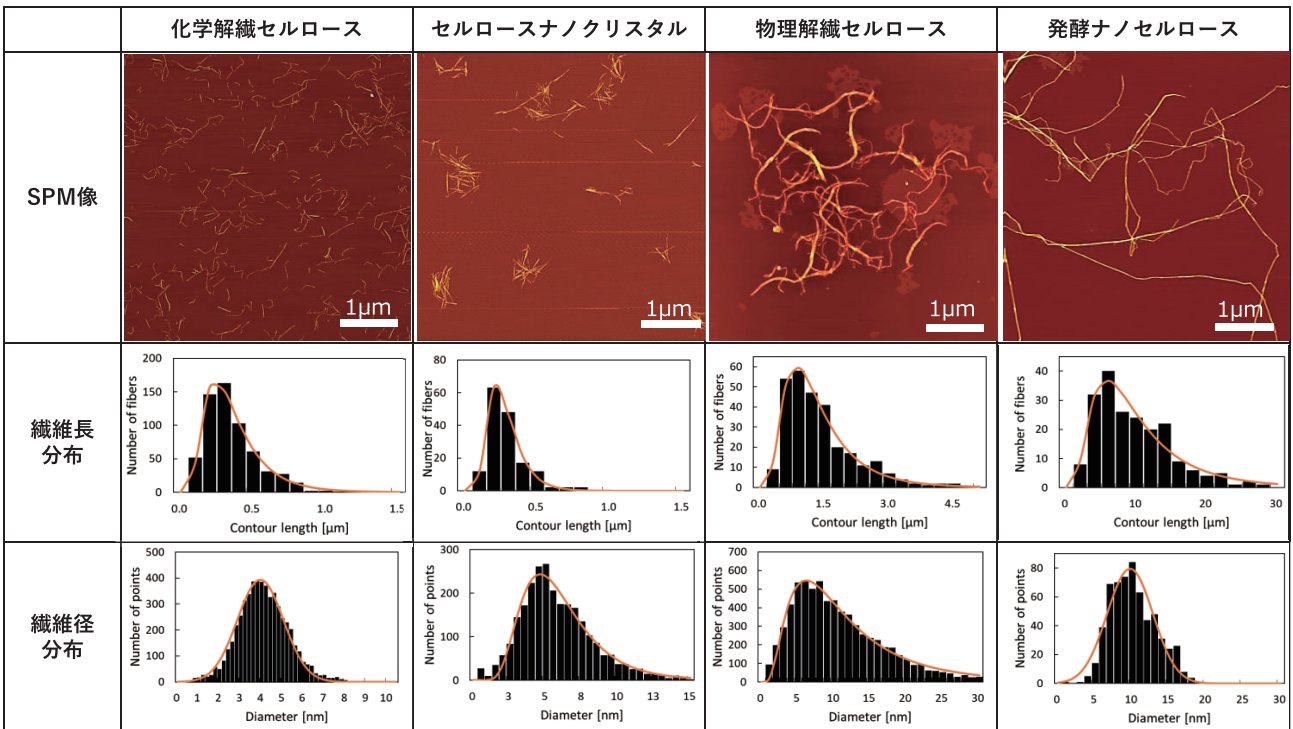


図2 CNFのSPM画像と構造解析結果
グラフ中の曲線は各分布図の外挿結果を表す

スに対しては正規分布，セルロースナノクリスタルと物理解織セルロースに対しては対数正規分布のような分布挙動をとっていることが示唆された。繊維種によって繊維径の分布が正規分布あるいは対数正規分布に分かれる原因は定かではないが，解織方法や製造方法が影響していると考えられる。それぞれの分布を対数正規分布あるいは正規分布の最小二乗法で近似し，次式で平均値，標準偏差を算出した¹³⁾。

$$f(L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma L} \exp\left\{-\frac{(\log L - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (1)$$

$$L_1 = \frac{\sum Li^2 \cdot f(Li)}{\sum Li \cdot f(Li)} \quad (2)$$

$$f(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(H-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \text{ or } \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma H} \exp\left\{-\frac{(\log H - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3)$$

$$H_n = \mu \quad (4)$$

(1) 式及び (3) 式において L は繊維長， H は繊維径， σ は分散に寄与するパラメータ， μ は平均に寄与するパラメータである。(2) 式の L_1 は長さ加重平均繊維長であり，単純平均繊維長とは異なり，各種物性に寄与しやすい長繊維側の影響を加味した算出方法である。一方，(4) のとおり，繊維径に対しては単純平均として平均繊維径 H_n を算出した。以上より計算された各種CNFの平均繊維長 L_1 及び平均繊維径 H_n を表2に示す。表2から，最も H_n が小さいのは化学解織セルロースであり，3.9nmであった。これは植物の細胞壁が構成する単位結晶であるセルロースマイクロフィブリルの3nmに近い値である¹⁴⁾。一方で最長の L_1 を有するCNFは発酵ナノセルロースであり，16 μm であった。発酵ナノセルロースが他のCNFより圧倒的に長い繊維構造を有しているのは，パルプ等から解織して作られる他CNFに対して，糖類の縮合によって作られ，長さ方向の切断が起こらないためであると考えられる。

図3には各種CNFの拡大SPM画像と繊維長方向に平行に

表2 各種CNFの平均繊維長 L_1 と平均繊維径 H_n

	L_1	σ_L	H_n	σ_H
	μm	-	nm	-
化学解織セルロース	0.53	0.73	3.9	1.1
セルロースナノクリスタル	0.38	0.41	6.0	0.42 ^{a)}
物理解織セルロース	1.7	0.58	12	0.68 ^{a)}
発酵ナノセルロース	16	0.77	9.7	3.1

^{a)}セルロースナノクリスタルと物理解織セルロースの σ_H は対数正規分布として算出している

切断した時の断面図を示している。化学解織セルロースは比較的均一な繊維径を有していることがわかる。これは図2においても言及したとおり，植物が持つセルロースマイクロフィブリル単位にまで繊維が解織されており，セルロースマイクロフィブリルの結晶構造に応じた繊維径となっているためである。一方，物理解織セルロースとセルロースナノクリスタルは一本の繊維の中でも様々な繊維径を有しており，すなわち繊維が凹凸を持っていることを表している。このような構造が繊維径分布の増大につながっていると考えられる。発酵ナノセルロースで特筆すべきなのが，一本の繊維中に400nm～500nm間隔の周期的な凸部を有していることである。CNFにおいてこのような特徴を説明する報告は現状見られないが，これは発酵ナノセルロースの繊維が断面方向に扁平な繊維構造を持っており，これがねじれることによって周期的な起伏になるためであると考えられる(図4)。

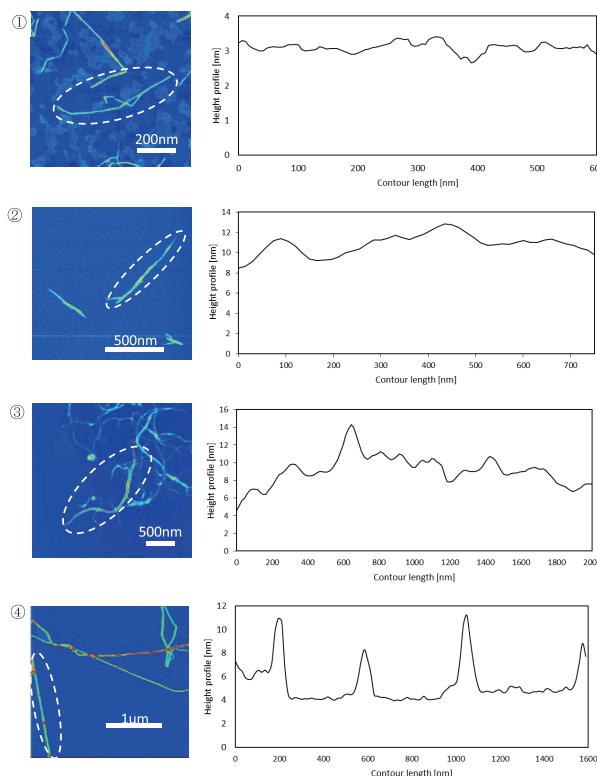


図3 CNFのSPM画像と繊維長方向に平行な断面図(①化学解織セルロース，②セルロースナノクリスタル，③物理解織セルロース，④発酵ナノセルロース)。画像中の破線部は右図の繊維断面と対応している

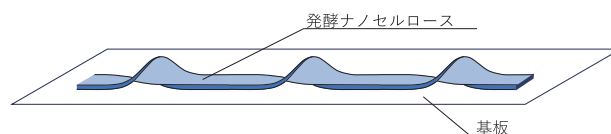


図4 発酵ナノセルロースのマイカ基板上での担持イメージ



図5 バイオマスフィルム (Φ 65mm) の外観画像
セルロースナノクリスタルは割れ防止のためろ紙上に製膜している

3.2 バイオマスフィルムのガスバリア性評価

各種CNFから作製したバイオマスフィルムの外観写真を図5に示す。バイオマスフィルムの厚みは40μm～70μmであり、透明～半透明の外観であった。各種フィルムのガス透過係数を表3に示す。化学解繊セルロースではいずれのガス種においてもガス透過係数が2cm³ cm / (m² 24h atom) 以下であり、高いガスバリア性を有していることがわかった。一方比較的繊維径の小さいセルロースナノクリスタルではガス透過係数が5倍ほど高くなっているが、これはセルロースナノクリスタルの繊維長が非常に短いために繊維同士の絡み合いが起こりづらく脆いフィルムとなったことから、測定中に微小な破壊が起こりガスの漏出(クロスリーク)が起こったことが原因であると考えられる。また、物理解繊セルロース及び発酵ナノセルロースではガス透過係数が近い値となっており、平均繊維径に近いことから、セルロースナノクリスタルを除くCNFに対してはより細い繊維ほど高いガスバリア性を発現することが確認できた。各種バイオマスフィルムの透湿度についても表3に示す。セルロースは親水性の高分子であり、バイオマスフィルムは非常に高い透湿度を有しているが、とりわけ化学解繊セルロースのバイオマスフィルムは最も高い透湿度であり、発酵ナノセルロース、物理解繊セルロース、セルロースナノクリスタルの順で透湿度は高くなっている。セルロースナノクリスタルのバイオマスフィルムが最も低い透湿度となったのは割れ防止のためセルロースナノクリスタルのみろ紙上に製膜していたため、ろ紙中への吸湿が起こったと考える。各種フィルムの赤外分光スペクトルを図6に示す。図6からわかるように各種バイオマスフィルムは同一のセルロースから構成されているが、作製方法に応じて繊維表面にカルボキシル基を含有している。例えば化学解繊セルロースでは1600cm⁻¹付近にカルボン酸塩に由来するカルボニル結合の伸縮振動ピークが大きく観測されている。セルロースナノクリスタル、発酵ナノセルロースに関しても同様に観測されるが化学解繊セルロースと比べて非常に小さいことがわかる。物理解繊セルロースではカルボキシル基に由来するピークは観測されず、親水基の濃度が他のCNFと比

べて低いことがわかる。以上の結果からバイオマスフィルムの透湿度は繊維構造よりもCNFが含有する親水基の密度が関与していると考えられる。

表3 各種 CNF のガス透過係数 P と透湿度 P'

	P				P'
	cm ³ cm / (m ² 24h atom)				g 100 μm / (m ² 24h)
	N ₂	O ₂	CO ₂	C ₂ H ₄	H ₂ O
OPP フィルム	3.7	7.6	17.0	5.0	1
化学解繊セルロース	1.7	2.0	1.9	1.7	1293
セルロースナノクリスタル	8.6	6.5	11.3	10.2	794
物理解繊セルロース	3.9	2.8	2.5	2.9	1096
発酵ナノセルロース	2.4	3.0	3.0	2.3	1182

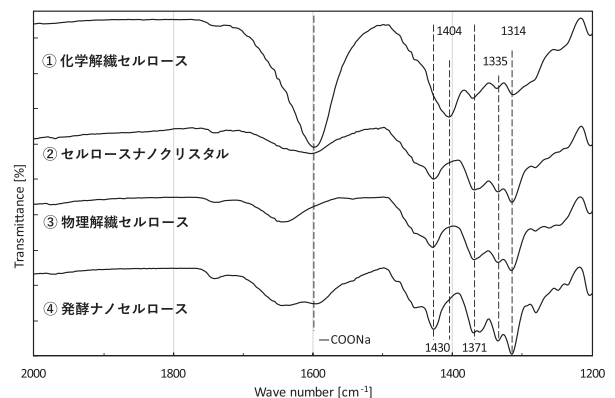


図6 バイオマスフィルムの赤外分光スペクトル
図中点線はフィルム中に含まれるカルボキシル基のピーク(1600cm⁻¹)を示す

3.3 青果物果皮への塗布による鮮度保持効果

以上の結果からCNFは高いガスバリア性と透湿性を持ち、繊維構造や繊維表面の親水性によってガスバリア性と透湿性が変化することが確認できた。そこで、これらCNF特有の性質を活用した応用実験として青果物果皮へCNFを塗布して貯蔵する鮮度保持試験を行った。これはCNFが持つガスバリア性により、エチレン及び酸素から果実を防御することが期待できるためである。メロンに対して鮮度保持試験を行った際の外観変化を図7に示す。メロンは果実の中でも非常に呼吸が激しく、低温下では呼吸障害、室温下では急速な腐敗を起しやすいため。CNFをコーティングしていない試験区（図7 Control）では急速に成熟が始まり、約1週間で果汁の漏出及び重度の腐敗が発生した。一方でCNFをコーティングした試験区ではいずれも1週間以上の鮮度保持効果が認められ、コーティングなしの試験区と同等の腐敗状態を発生するまでに約2週間を要した。特に発酵ナノセルロースを塗布した試験区で最も高い鮮度保持効果を認めることができ、2週間後の外観においても腐敗することなく、高い品質を保持していた。図8の重量変化の推移においても発酵ナノセルロースを塗布した試験区が最も重量変化が少なく、蒸散による水分の減少を防いでいることが確認された。以上の結果からメロンの鮮度保持試験において、発酵ナノセルロースが最も高い鮮度保持効果を有しており、CNFを塗布していない試験区より1週間以上鮮度を保持できることが確認できた。

バナナにおいても同様の試験を行った際の外観変化を図9に示す。バナナは室温下で追熟することにより成熟し、果皮に黒い斑点（シュガースポット）を生じる。これが果皮全体へと広がることで最終的には腐敗することがわかる。CNFを塗布していない試験区では3～4日かけてシュガースポットを発生させ、2週間後には果皮全体の約7割が黒く変色した。CNFを塗布した試験区では化学解繊セルロースで最も変色の速度が遅く、2週間後においても黒く変色した箇所は5割程度であった。図10の重量変化に対しては化学解繊セルロースで最も小さな重量変化であった。以上の結果から、バナナにおいても腐敗の進行を5日程度遅らせることがわかった。メロンとバナナでは鮮度保持に最適なCNFが異なったことに関しては、果実の呼吸速度が寄与していると考えられる。呼吸速度の大きいメロンに対してはガスバリア性の高い化学解繊セルロースを塗布した場合、呼吸を抑制しすぎるために呼吸障害による腐敗が発生したと考える。

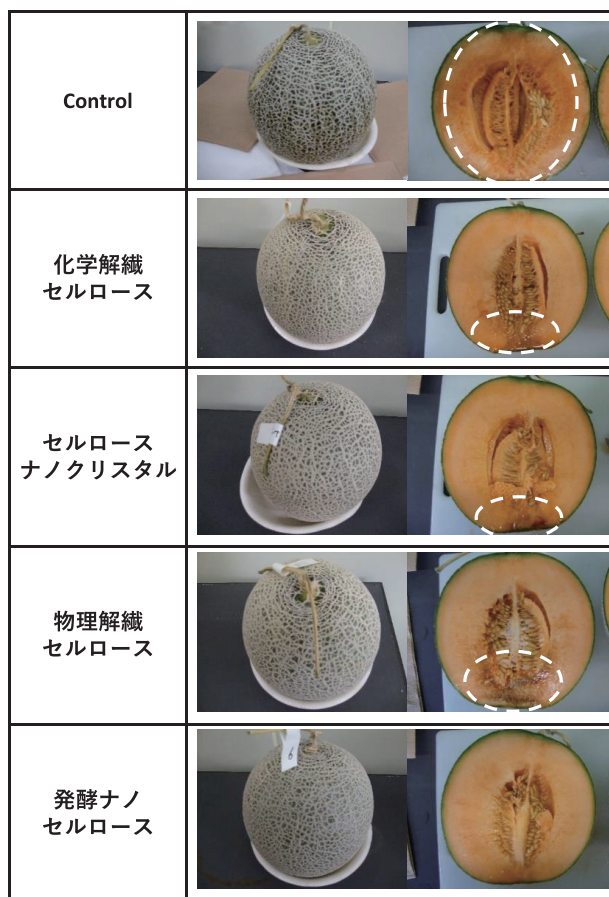


図7 CNFを塗布したメロンの14日後の鮮度保持試験結果
Controlは50ppmの界面活性剤を添加した蒸留水を塗布した試験区である。破線部は腐敗を生じている箇所を示す

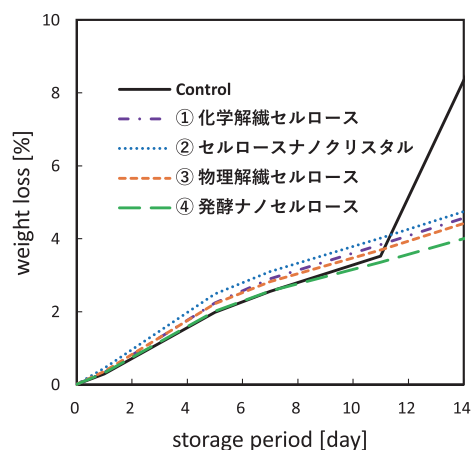


図8 メロンの鮮度保持試験における貯蔵期間中の重量減少率推移
コントロールでは保存から11日以降で果汁の漏出が起こったため、重量が急激に減少している















	初期	1週間後	2週間後
Control			
化学解繊セルロース			
セルロースナノクリスタル			
物理解繊セルロース	No data		
発酵ナノセルロース			

図9 CNFを塗布したバナナの鮮度保持試験結果
コントロールは50ppmの界面活性剤を添加した蒸留水を塗布した試験区である。

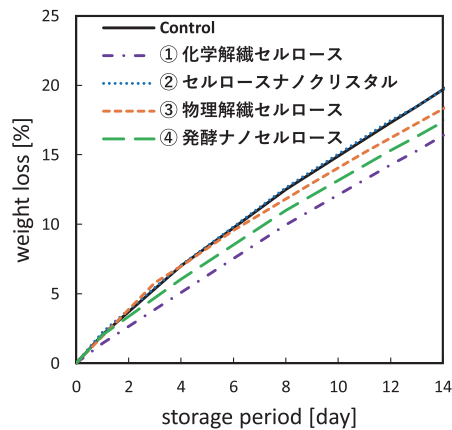


図10 バナナの鮮度保持試験における貯蔵期間中の重量減少率推移

4. おわりに

本研究結果では、CNFの構造解析とガスバリア性というCNFの珍しい特性に着目し、種類ごとの構造比較と特性比較を同時に行うことができた。以下が本研究の総括である。

- CNFのSPM観察と画像解析により、4種のCNFに対して繊維径と繊維長を統計的に比較することができた。
- CNFから作製したバイオマスフィルムでガス透過係数及び透湿度を測定することにより、4種のバイオマスフィルムのガスバリア性の違いを明確にすることができた。
- CNFのガスバリア性を応用し、青果物果皮への塗布による鮮度保持試験を行い、CNFが青果物に対して鮮度を保持する特性を有することを明らかにした。また、2種の青果物で鮮度保持試験を行い、青果物の種類によって最適なCNFの構造が異なることを明らかにした。

本研究はCNFの新しい活用方法の提案につながるものであり、CNFが付与するガスバリア性は食品、医薬品など生分解性が要求されるものにも適用できる見込みがある。引き続きCNFの用途探索を進め、実用化を図っていく。

参考文献

- 1) 佐藤俊輔, 有川尚志, 他: 微生物による生分解性ポリマー-PHBH製造法の開発, 生物工学会誌, 97(2), pp.67-74, (2019)
- 2) 名越 亮: バガスについて, 紙パ技協誌, 16巻131号, pp.13-25, (1962)
- 3) 川島信之: バイオベースポリマーとしてのポリ乳酸, 有機合成化学協会誌, 61(5), PP.94-103, (2003)
- 4) 原田英生: 生分解性プラスチック 河川や海に流出したら消えてなくなるプラスチック, SMBCマネジメント+, pp.24-25, (2019)
- 5) 前川英一: 〈総説〉セルロース質バイオマスとその有効利用, 木材研究・資料, 18, pp.12-33, (1983)
- 6) 宮西孝則: ナノセルロースの研究開発動向, 紙パ技協誌, 74巻3号, pp.88-98, (2020)
- 7) 日本製紙(株)HP, セルロースナノファイバー (CNF): cellenpia, <https://www.nipponpapergroup.com/products/cnf/>
- 8) Rokhani HASBULLA, Gardjito, et al.: Gas Permeability Characteristics of Plastic Films for Packaging of Fresh Produce. 農業施設, 31(2), pp.79-86, (2000)
- 9) Shiroshi Matsuki, Hidenari Kayano, et al.: Nanocellulose Production via One-Pot Formation of C2 and C3 Carboxylate Groups Using Highly Concentrated NaClO Aqueous Solution, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 8(48),

pp.17800-17806, (2020)

- 10) Luana Amoroso, Kevin J. De France, et al.: Sustainable Cellulose Nanofiber Films from Carrot Pomace as Sprayable Coatings for Food Packaging Applications, *ACS Sustain Chem Eng.*, 10(1), pp.342-352, (2022).
- 11) Hajar Faraj, Nadège Follain, et al.: Gas barrier properties of polylactide/cellulose nanocrystals nanocomposites. *Polymer Testing*, 113, 107683, (2022).
- 12) Ivan Usov, Raffaele Mezzenga.: FiberApp: An Open-Source Software for Tracking and Analyzing Polymers, Filaments, Biomacromolecules, and Fibrous Objects, *Macromolecules*, 48(5), pp.1269-1280, (2015)
- 13) Ivan Usov, Gustav Nyström, et al.: Understanding nanocellulose chirality and structure-properties relationship at the single fibril level. *Nat. commun.*, 6, 7564, (2015).
- 14) 遠藤貴士：バイオ燃料を木材からハイテクで生産するーセルロースの構造特性を利用した酵素糖化前処理技術ー, シンセオロジー, 2(4), pp.310-320, (2009)

モノマテリアル包材によるメロンの長期保存技術

細川 真明, 山岸 暢, 吉田 昌充, 瀬野修一郎, 可児 浩

Long-term Preservation Technology for Melons using Mono-material Packaging

Masaaki HOSOKAWA, Tohru YAMAGISHI, Masamitsu YOSHIDA,
Shuichiro SENO, Hiroshi KANI

抄 録

メロンは北海道各所で栽培されており、全国的に有名な道産青果物の一つである。道産メロンは高い人気があるものの、主に夏期に多く収穫され、秋にかけて急激に生産量は低下するため、冬期に道産メロンが出回ることはほとんどない。これまで現場を含めて多くの研究機関で、メロンを長期間にわたり鮮度保持することで出荷時期を調整する試みが繰り返されている。一方で、鮮度保持のためにはメロン果実の前洗浄や高価な包材などが必要となり、汎用的な鮮度保持体系の確立には依然大きなハードルを伴う。そこで本研究では、特殊な工程を使用せず、汎用フィルムと冷蔵設備のみで道産メロンを2ヶ月保持することを目的とした鮮度保持試験を行った。具体的には、汎用フィルムとして二軸延伸配向ポリプロピレン（OPP）製フィルムを使用し、メロンを完全密封することで、内部を低酸素状態にさせ、さらに保存温度を2℃まで下げることでメロン自体の腐敗の抑制を図った。試験の結果から対象試験区として設置した無包装の試験区が約1か月でカビを発生させたのに対し、本保蔵条件で保存したメロンでは2か月の保存が可能であった。

キーワード：ポリプロピレン, メロン, 鮮度保持

Abstract

Melons are grown throughout Hokkaido and are one of the most famous products in Japan. Although Hokkaido-grown melons are popular year-round, they are harvested mainly in the summer, and production declines sharply in the fall, so Hokkaido-grown melons are rarely available in the winter. Many research institutes, including ours, have repeatedly attempted to adjust the shipping time by keeping melons fresh for a long period of time. However, the establishment of a general-purpose freshness preservation system still faces major obstacles, since pre-washing and expensive packaging materials are required to keep melons fresh. In this study, A freshness retention test was conducted to keep Hokkaido-grown melons fresh for two months using only general-purpose film and refrigeration equipment, without using any special processes. Specifically, biaxially oriented polypropylene (OPP) film was used as the general-purpose film, and melons were completely sealed to allow them to absorb the oxygen, and the storage temperature was lowered to 2°C to prevent melon spoilage. The results of the test showed that the melons stored under this storage condition could be stored for two months, whereas the melon without packaging in the target test area developed mold in about one month.

KEY-WORDS : Polypropylene, Melon, Freshness retention

1. はじめに

北海道のメロンの国内生産量は茨城県、熊本県に次いで多く、北海道を代表する青果物の一つであるといえる。メロンは夏に多く収穫される作物であり贈答品（お中元、見舞品など）として主に夏期に出回ることが多いが、ケーキ、パフェといった加工品としても年中高い人気がある。こうした季節の違いの需要に応えるために、一部の農業従事者の中ではハウスを利用した抑制栽培やオーストラリア、メキシコからの輸入が行われている¹⁾。しかし、抑制栽培には暖房のため、輸入には輸送のために大量の石油を必要とし、その費用は間接的にメロンの売価に上乘せられるため基本的に冬に販売されるメロンは夏の最盛期と比較して高価であり、3倍以上の価格で取引される（図1）。こうした背景から、北海道メロンの冬期販売は非常に有意義でありながらも達成されていない課題であるが、これを解決するためにメロンの長期鮮度保持技術が多く研究されている²⁻⁴⁾。メロンは一般的に追熟型の青果物であり、未熟果で収穫され出荷、流通、保管の過程で追熟が行われる。メロンは収穫後も活発に呼吸代謝を行い、徐々に果肉が柔らかくなっていくため、こうした呼吸代謝を遅らせることでより長い期間未熟果の状態を保ち、成熟速度を遅らせることで鮮度保持を行うことが可能である。果実の呼吸を抑制する手段としては、低温下で保存する冷蔵貯蔵⁵⁾、果実周辺の酸素、エチレン濃度を下げるControlled Atmosphere (CA) 貯蔵⁶⁾、多層フィルムでガス透過性を向上させた包材で青果物を包装し、内部の酸素及び炭酸ガス濃度を適度に調整するModified Atmosphere (MA) 貯蔵⁷⁾がある。これらを適切に駆逐することで収穫から通常2週間程度で腐敗するメロンを4週間～6週間鮮度保持することが可能である。しかしながら、MA包装は高コストでありリサイクル不可能なことから使用は限定的である。

そこで本研究ではより汎用的な単層の包装フィルムを使い鮮度保持を行うことを目的として、メロンの新しい鮮度保持体系の確立を試みた。具体的には二軸延伸配向ポリプロピレン (OPP) 製フィルムを使用し、包材内の酸素及び炭酸ガ

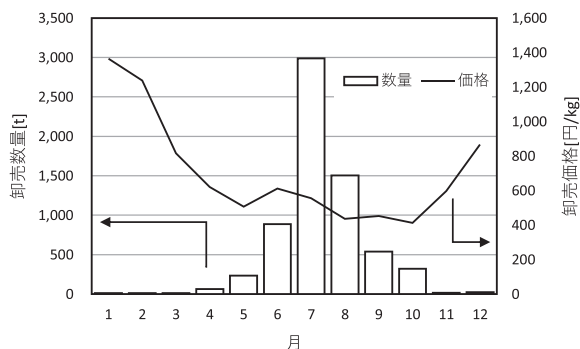


図1 R2年道産メロンの月別卸売数量及び価格（「北海道農林水産統計年報」より作成）

ス濃度を調整し、さらに保存温度を2℃まで下げることでメロン自体の腐敗の抑制を図った。

2. 実験方法

2.1 試験条件

今回設定したメロン貯蔵の試験区を表1に示す。密封状態の程度を評価するために設置した試験区①～③では道産メロン（レノン）を使用し、比較指標の測定のため、収穫日当日のメロン（初期）と1週間室温で追熟を行ったメロン（1週間追熟）を別途用意した。貯蔵と追熟の組み合わせによる鮮度保持効果を評価するために設置した試験区④及び⑤では道産メロン（レッド113）を使用し、こちらも初期及び1週間追熟のメロンを用意した。包材は、密封度合いと鮮度保持効果を比較するため、市販の青果物包装用OPPフィルム（容量：約2L、膜厚20μm）に、φ0.5 mmの針で上部に一か所のみ穿孔したもの（細孔あり）としていないもの（細孔なし）をそれぞれ用いた。当日に収穫されたメロンを低温室内で室温2℃で一晩予冷したのち、そのままOPPフィルムに入れ、開口部をヒートシールし、貯蔵を開始した（図2）。

表1 貯蔵試験の各貯蔵条件

試験区	包材	細孔	初期鮮度	鮮度評価時期
① なし	無し	-	未熟	貯蔵直後
② 細孔なし	OPP	無	未熟	貯蔵直後
③ 細孔あり	OPP	有 (0.5mmφ)	未熟	貯蔵直後
④ 追熟後 9週間貯蔵	OPP	無	完熟	貯蔵直後
⑤ 9週間貯蔵 後追熟	OPP	無	未熟	貯蔵後5日後

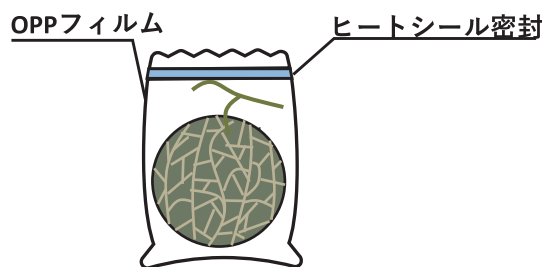


図2 メロンの新規包装体系

2.2 各種鮮度指標の評価

貯蔵期間中の包材内の温度及び湿度推移を評価するため、温度湿度データロガー（㈱ティアンドデイ製、RTR507S）を各試験区に同梱し、15分おきに温湿度をモニターした（図3）。測定50日付近で停電による一時的な室温上昇が起きているが、試験をそのまま継続している。外観は1週間おきにカビや変色の度合いを観察した。貯蔵中の包材内ガス雰囲気を測

定するため、ハンドヘルド型エチレン分析計（東横化学㈱製，F-950）を用いて，9週間の貯蔵中の包材内の酸素，二酸化炭素及びエチレン濃度を測定した。蒸散による水分の減少量を比較するため，貯蔵前後のメロン果実の重量を測定し，その比を重量損失とした。貯蔵前後の果肉硬度を比較するため，フォースゲージ（日本電産シンボ㈱製，FGP-5）に外径20mmのステンレス押し治具を取り付けて使用し，果肉中心部から表皮側へ治具を約15mm押し込んだときの最大応力を果肉硬度とした。貯蔵前後の果肉糖度を比較するため，ポケット糖度計（㈱アタゴ製，PAL-1）を使用し，果肉断面の果梗，赤道，花痕付近の果汁から3か所のBrix糖度を測定した。

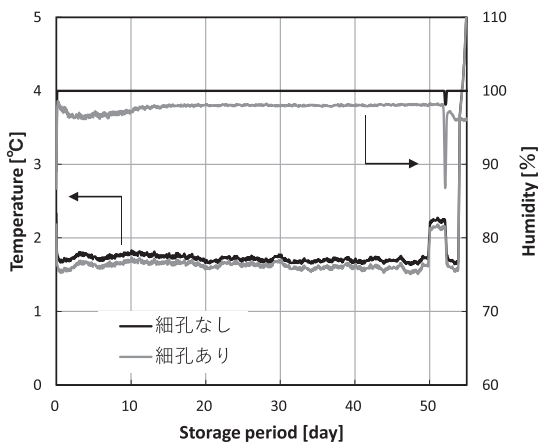


図3 貯蔵中の温湿度推移

3. 結果と考察

3.1 貯蔵中の外観変化

メロンの鮮度保持試験での外観を図4に示す。①（包装なし）は，約一か月で低温障害にみられる黒いピッチングが確認された（図中破線部）。③（細孔あり）の試験区では低温障害は見られなかったが，約4週間で表皮上部に黒カビを生じており，鮮度保持は不可能であった（図中破線部）。一方で，②（細孔なし）の試験区では低温障害，カビの発生はともに確認されず貯蔵から9週間後もきれいな外観を保っていた。果肉断面についても①及び③の試験区では低温障害とカビの浸食による果肉の腐敗が進行していた。

3.2 貯蔵前後のメロンに関する鮮度指標の評価

表2に各試験区での貯蔵前後での鮮度保持指標を示す。外観については3.1節で言及したとおり9週間の貯蔵で腐敗やカビを発生しなかったのは試験区②のみであった。また，果肉糖度に関しては試験前後，試験条件にかかわらず大きな変化を示さなかった。重量損失においては，包装なしの試験区①では1週間追熟と同様蒸散よりメロン重量が減少していることがわかる。一方で細孔なしの試験区②と細孔ありの試

験区③では目立った重量損失の差が見られなかった。これは細孔の有無にかかわらず包装することにより内部が高湿状態になり，蒸散が起こりづらくなったためである。また，一般的にメロンの果肉硬度は2～4kgfで完熟果としてちょうどよい状態であるが，未熟果であっても追熟することで果肉が柔らかくなる。しかし，外観及び重量測定で最も高い鮮度保持効果を得られた試験区②においては果肉硬度の減少は小さく，すなわち追熟が進行していないことを示していた。貯蔵中のメロンの呼吸を極端に抑制することができた試験区②の場合は，腐敗だけでなく追熟も同時に阻害するためであると考えられる。

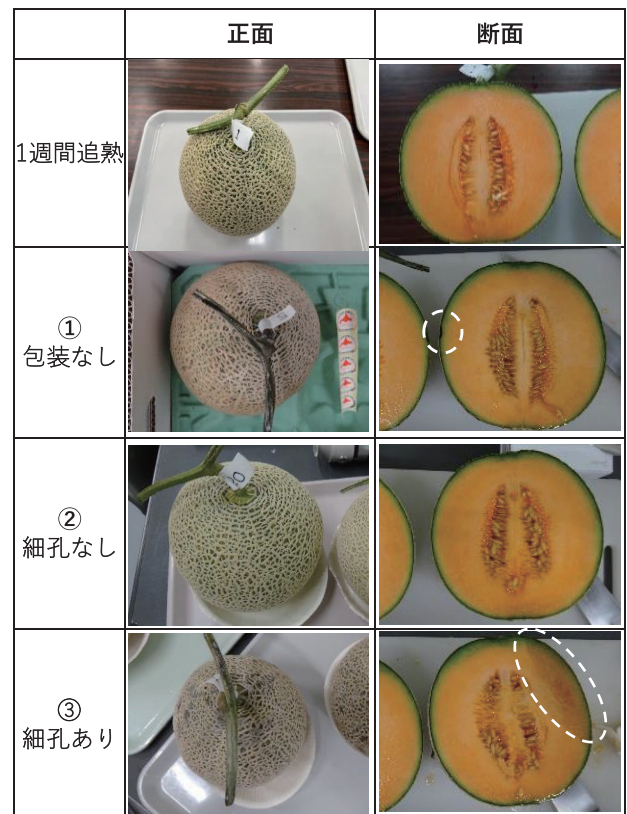


図4 9週間貯蔵後のメロンの外観
破線部は腐敗またはカビの発生箇所を示す

表2 貯蔵試験前後の各種試験

	外観	重量損失	果肉硬度	果肉糖度
	-	%	kgf	Brix %
初期（レノン）	良好	-	7.7	16.4
1週間追熟（レノン）	良好	3.5	3.4	16.0
① 包装なし	不良	3.4	4.0	15.6
② 細孔なし	良好	1.4	7.8	16.1
③ 細孔あり	不良	1.7	1.8	16.4

図5には貯蔵から9週間経過後の包装内部のガス雰囲気濃度を示す。試験区①は包装されていないため冷蔵室内部のガス雰囲気を示している。試験区①では、酸素濃度、二酸化炭素濃度は大気とほぼ同等の値である。一方でフィルム包装を行った試験区②、③では、エチレン濃度及び二酸化炭素濃度がより高く、酸素濃度がより低くなっていることから、メロンの呼吸により包装内部の酸素が消費され、エチレンと二酸化炭素が放出されていることがわかる。このような条件下に長時間メロンを保存しておくことは、メロンの呼吸速度を下げるため、鮮度保持に有効な保存条件となる。特に試験区②の細孔なしの試験区ではメロンを完全に密封しているため、酸素濃度が7.9%と非常に低くなっている。これによってカビの繁殖に必要な酸素が極端に少ない雰囲気となり、カビの繁殖を防止することにつながったと考える。一方でメロンの貯蔵における極端な低酸素、高二酸化炭素雰囲気ではメロンが嫌気呼吸を行い、腐敗（発酵）を引き起こす要因となることがあるが、本試験で採用した2℃という低温条件では発酵による腐敗臭や食味の悪化は認められなかった。

を保っていたが、その後室温（約22℃）で5日間追熟した結果、急激に腐敗を生じ、果実下部から果汁を滲出させ、それによりカビも同時に発生した。一方で試験区④では5日間の追熟によって蔓がしなびていたが、9週間の貯蔵後も腐敗やカビの発生もなく高い品質を保っていた。また、両試験区の貯蔵後の果肉硬度を表3に示す。いずれの試験区も2～4kgf

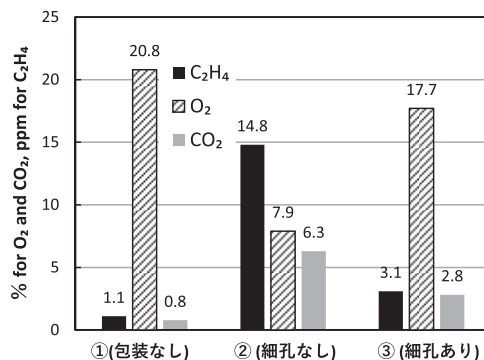


図5 貯蔵から9週間経過後のガス組成

3.3 追熟を組み合わせた鮮度保持効果の検証

3.2節ではメロンをOPPフィルムで完全密封することで9週間という高い鮮度保持ができることを示した。一方で貯蔵後の果肉は比較的硬く、成熟していないことが判明したため、貯蔵時期の調整による鮮度保持試験を試みた。すなわち、未熟果のメロンを追熟させたのち鮮度保持を行った場合と、鮮度保持を行った後追熟させた2条件による食味改善の可能性を検証した（表1 ④、⑤）。図6には5日間追熟した完熟メロンの9週間の貯蔵（試験区④）と、9週間貯蔵後に5日間追熟したメロン（試験区⑤）の外観を示している。試験区⑤は9週間の貯蔵後も試験区③と同様にカビや腐敗がない状態

表3 追熟と9週間貯蔵試験後の各種試験

	外観	重量損失	果肉硬度	果肉糖度
	-	%	kgf	Brix %
初期 (レッド113)	良好	-	7.7	15.5
1週間追熟 (レッド113)	良好	2.2	2.7	14.9
④ 追熟後 9週MA貯蔵	良好	3.0	2.2	14.9
⑤ 9週MA貯蔵 後追熟	不良	3.0	3.0	15.6

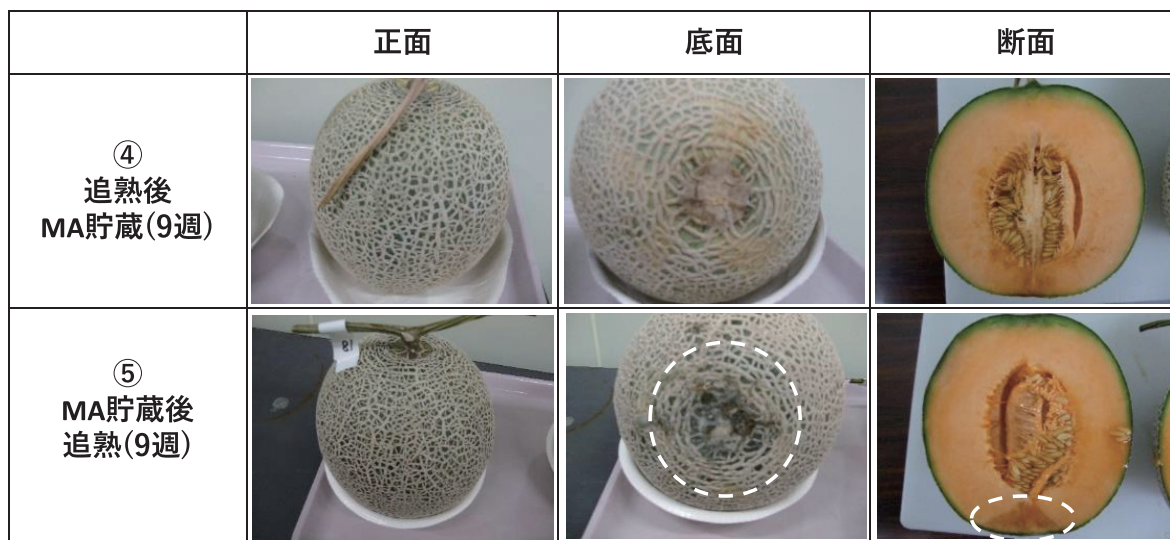


図6 追熟と9週間貯蔵試験後のメロンの外観

⑤ MA貯蔵後追熟した試験区では果実下部の表皮にカビ、内部（破線部）に腐敗が認められる。

と完熟果に等しい硬度であったことから追熟が進行していることを確認した。以上の結果から、メロンの事前の追熟によって果肉硬度を下げつつ9週間の鮮度保持が可能であることが確認できた。一方で、貯蔵後のメロンは未熟果、完熟果にかかわらず急速に腐敗が進行するため、貯蔵後の追熟は困難であった。

4. おわりに

本研究結果では、本来高価な鮮度保持フィルムを使用して行われていたメロンの長期鮮度保持を汎用フィルムで行い、さらに従来の手法よりも長期の鮮度保持が可能であった。以下に本研究の要点を示す。

- OPPフィルムによる完全密封と2℃以下の冷蔵貯蔵を組み合わせるにより、メロンの9週間（2か月）にわたる長期鮮度保持を達成した。
- 貯蔵後のメロン果肉が柔らかくならないという課題に対して、メロンを事前に追熟させることで鮮度保持効果を失うことなく、果肉を柔らかくすることができた。

これらメロンの鮮度保持に関する技術は材料費、設備費の観点からも導入が容易であるため、各地の農業従事者に公開することで実用化を目指していく。

参考文献

- 1) 財務省貿易統計
<https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kokusai/index.html>
- 2) 沢村正義, 宮本裕子, 他: 季節別マスクメロンの保蔵特性及び鮮度保持紙の効果について, 園芸学会雑誌, 61巻1号, pp.167-174, (1992)
- 3) 執行達弘, 森 武士, 他: メロンの長期輸送・貯蔵への調湿材の適用, 第31回日本吸着学会研究発表会講演要旨集, p.54, (2017)
- 4) 伊藤和彦, 樋元淳一: 野菜の鮮度保持に関する研究 (第2報), 農業機械学会誌, 56(5), pp.43-50, (1994)
- 5) 永田雅靖: 青果物の鮮度に関する収穫後生理学, 食糧, 56巻, pp.43-56, (2018)
- 6) 邨田卓夫, 上田悦範: 青果物のCA-貯蔵に関する研究, 園芸学会雑誌, 36巻4号, pp.449-454, (1967)
- 7) 伊藤和彦, 樋元淳一: 野菜の鮮度保持に関する研究 (第2報), 農業機械学会誌, 56巻5号, pp.43-50, (1994)
- 8) Rokhani Hasbullah, Gardjito, et al.: Gas Permeability Characteristics of Plastic Films for Packaging of Fresh Produce. 農業施設, 31(2), pp.79-86, (2000)

複数応力が作用する鋳造製品のトポロジー最適化計算を用いた 軽量・高剛性化形状設計方法の開発

鈴木 逸人, 上田 修生*, 本田 真也*, 武田 量*, 佐々木克彦*,
小椋 博樹**, 泉上 和範**

Development of Lightweight and High-rigidity Shape Design Method using Topology Optimization Calculation for Cast Products Subjected to Multiple External Stresses

Hayato SUZUKI, Shusei UEDA*, Shinya HONDA*, Ryo TAKEDA*, Katsuhiko SASAKI*,
Hiroyuki OMURA**, Kazunori IZUMIKAMI**

抄 録

トポロジー最適化は、外力に対して必要最低限の構造を計算することで、製品形状の軽量化や高剛性化を行う形状最適化方法である。しかし、複数の外力や応力が作用する状況に対するトポロジー最適化理論は確立されておらず、製品に対する応用例が非常に少ない。そこで本研究は、外力と熱応力が同時に作用する鋳物製品に対して、汎用のソフトウェアを用いてトポロジー最適化を行う方法について検討を行った。検討の結果、製品使用環境を再現した予備解析の結果から求めた代替荷重を用いて複数の応力により生じる変形を表現し、トポロジー最適化を行う方法を開発した。また、本方法を用いることで、軽量・高剛性な形状設計が可能であることを解析により示した。さらに、計算した最適形状について、鋳物として製作可能であり、従来の形状よりも熱応力による変形が少ないことを確認した。

キーワード：トポロジー最適化, 鋳造, 最適化設計, CAE

Abstract

Topology optimization is a shape optimization method that reduces the weight or increases the stiffness of a product shape by calculating the minimum necessary structure against external forces. However, topology optimization theory for multiple external forces and stresses has not been established, and there are very few applications to products. Therefore, this study investigates a method of topology optimization for cast products under external forces and thermal stresses using general-purpose software without modifying the theoretical equations. As a result, a topology optimization method was developed to represent the deformation caused by multiple stresses using alternative loads obtained from the results of a preliminary analysis that reproduced the product's operating environment. Also, it was possible to design a lightweight and high-rigidity casting product shape capable of tolerating thermal stresses and external forces using this method. Furthermore, the casting with the optimal shape was manufactured and a heating test under restraint conditions were conducted. As a result of the test, it was confirmed that there was less deformation due to thermal stress than the conventional shape.

KEY-WORDS : Topology optimization, Casting, Optimum design, CAE

* 北海道大学 * Hokkaido University

** 札幌高級鋳物株式会社 ** Sapporo Kokyu Imono Co., Ltd.

事業名：重点研究

課題名：AM技術を用いた高性能鋳ぐるみ部品製作法の開発

1. はじめに

製品設計において、3D-CADやCAEなどコンピューターを使用した設計技術の活用が進み、多くの企業等で使用されている。3D-CADは、設計者が形状をコンピューター上で設計し、三次元モデルとして出力する。近年では、設計支援のため、製品の形状を半自動的に最適化することが可能となる最適化ツールが汎用のCADやFEM (Finite Element Method) ソフトウェアパッケージに内蔵されることが多くなった。半自動的に形状を最適化するツールの一つにトポロジー最適化がある。

トポロジー最適化は製品の寸法設計に限らず、設計領域内の材料分布を変化させ、孔の数(位相)の変更も可能とする自由度の大きい手法として着目されている。トポロジー最適化を設計手法として用いることで、構造の軽量化、材料の節約、製造性の向上、設計者の知識だけでは考えつかないような形状の提案が期待されている。トポロジー最適化手法の提案初期は、機械的な外力に対するトポロジー最適化が開発されていた。現在、トポロジー最適化を構造物の固有振動数に関する問題や高温環境の伝熱、熱応力に関する構造設計問題、翼や流路の流体力学の問題など適用範囲の拡大に関して研究が行われている¹⁻³⁾。

トポロジー最適化手法を用いた設計は、これまでの設計者主観の「最適と思われる」設計に対して、構想設計の段階で下流工程における設計要件を包括した制約条件を導入することで、理論的に正しい解を得ることが可能である。しかし最適化は、目的関数、制約条件の設定、結果検証方法等の組み合わせごとに無限の答えが得られるため、これらを適切に設定しなくてはならない。この解析設定の複雑さや解析結果の検証の難しさ、最適化結果の再現モデル作成の困難さ等から、実際の製品にトポロジー最適化が適用される機会は未だ少ない。特に、機械的な外力のみではなく、外力と熱応力が同時に作用する製品に対してトポロジー最適化を適用した最適化工程に関する報告はない。

そこで本研究では、外力と熱応力を考慮したトポロジー最適化の実製品への応用例として、高温炉内で用いられている運搬用トレー鋳物製品について、トポロジー最適化を適用し、境界条件の設定方法、最適化結果を参照した改良モデルについて検討した。

2. トポロジー最適化理論と課題

構造最適化は、ある設計領域に対して境界条件を与え、所望の性能が最大となるような構造・形状を求める。構造最適化は、寸法最適化、形状最適化、トポロジー最適化に大別される(図1)。寸法最適化は、板厚、断面形状特性が設計変数となり、内部の肉抜きなど構造の大幅な変更はない。形状

最適化は、外形形状が設計変数となり、形状や設計領域内部設置した穴形状を変化させることができる。トポロジー最適化は、3つの手法の中で最も自由度が高い手法であり、外形形状の変化に加え、元形状に設定していない穴等の空間の追加、穴の数と形状を変化させることができ、設計領域内の材料分布問題ともいえる手法である。このように外形形状変更だけでなく、穴の数などの形態変更も許容させることで、外力に対する剛性を保持したまま構造物の軽量化が可能な手法である。

トポロジー最適化の計算手法は、対象とする設計領域 Ω を包含する固定された設計領域(固定設計領域) D と、次式の特性格関数 χ を導入する⁴⁾。

$$\chi(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in \Omega \\ 0 & \text{if } x \in D \setminus \Omega \end{cases} \quad (1)$$

図2に概要を示す。ここで、 x は固定設計領域における任意の位置座標を表す。特性格関数 χ は固定設計領域 D における材料の有無を表していることから、 χ に関する最適化問題を考えると、トポロジー最適化は固定設計領域における材料分布問題に帰着する。これにより、固定設計領域において任意の形状と形態を表現することができる。

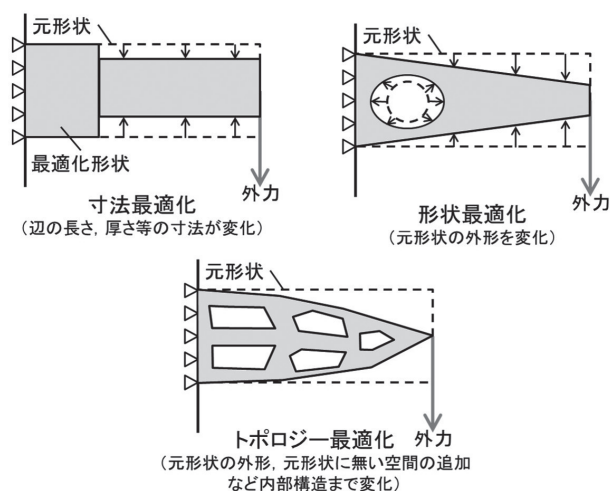


図1 寸法最適化、形状最適化、トポロジー最適化の各手法における形状変化イメージ

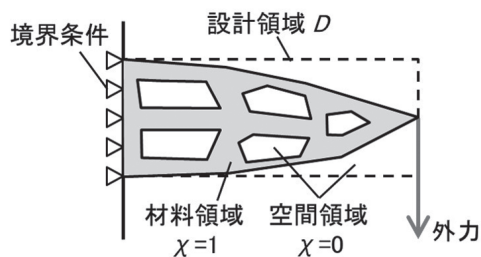


図2 トポロジー最適化の設計概念

トポロジー最適化は目的関数にコンプライアンスを設定することが主流となっており、決められた領域体積、制約条件下で構造物のコンプライアンスを最小化している。コンプライアンスは一定外力のもと次式で定義される⁵⁾。

$$Compliance = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV \quad (2)$$

ここで、 σ_{ij} は応力、 ε_{ij} はひずみ、 V は領域の体積を表す。すなわち、コンプライアンスは、一定外力の下で弾性体内に蓄えられるエネルギーのことで、応力のした全仕事、外力のなす仕事に等しい。コンプライアンスを最小化することで構造物の剛性が最大化される。

トポロジー最適化は、基本的に設計領域に作用するある外力に対して理論的な最適解を提示する手法である。一方、この外力が熱応力と圧縮、曲げ応力のように複数種類の応力が作用する場合や動的な応力つまり作用する応力が時刻により変化する場合、これらを考慮可能な理論のソフトウェアへの実装が行われておらず、計算することができない。そこで本研究は、現状のソフトウェアを用いて、複数の応力が作用する設計対象において、適切に解析条件を設定する方法について検討した。

3. 計算方法

3.1 最適化対象

本研究では、高温炉内を運搬されるトレー製品を設計対象とした。図3にトレー外観と使用環境、現行形状の模式図を示す。本トレーは、運搬物を積載した状態で高温炉内をプッシャーにより押し込まれながらレール上を移動する耐熱鋳鋼 JIS SCH42を用いた鋳造品である。トレーには、高温炉内と室温環境がラインにより連続的に運搬されることで発生する繰り返しの熱荷重、プッシャーによりトレー同士が押し込まれることによる接触荷重、搭載物の重量、積載物の荷下ろし時にかかる荷重等、様々な外力が作用する。繰り返し使用し、一定以上の変形が発生した場合に使用不可となるため、長寿命化のための変形低減及びトレー持ち上げ工程の負荷低減のための軽量化を両立させる形状変更が求められている。本研究では、熱応力と外力が作用する環境下において軽量化と剛性向上の両立を目指し、トレー裏面に対してトポロジー最適化による形状設計を行った。なお、運搬物を積載する表面形状は設計変更ができないため、レールと接するトレー裏面が設計対象領域とした。裏面の現行形状は、設計者の経験により設計したハニカム形状が採用されている。

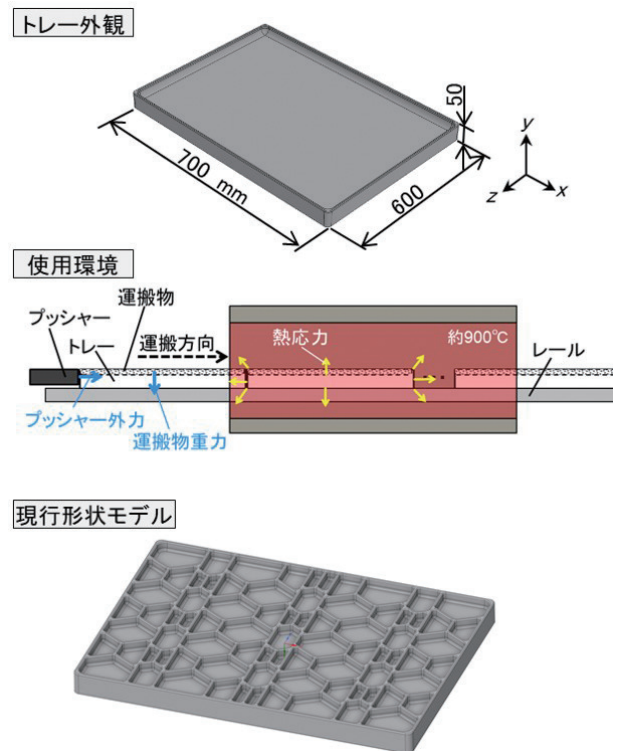


図3 トレー外観および使用環境、現行形状モデル

3.2 ソフトウェア・条件設定

本研究ではANSYS Workbench 2021 R1に搭載されているトポロジー最適化ツールを用いた。トポロジー最適化の解析を行うにあたって、本ソフトウェアには4つの最適化手法が用意されており、密度法、レベルセット法、モーフィング、ラティス最適化から選択する必要がある。今回の重量減少、高剛性化を目的とした場合、解析における目標値設定の特性から、手法として密度法、レベルセット法の2つが考えられる。密度法は材料のある、なしを示す関数を0から1までの正規化された密度で表現する本ソフトウェアでのデフォルトとなる方法である。レベルセット法は、領域の境界を移動させて最適構造を得る方法である。予備解析を、制約条件を反映した結果が得られた「密度法」を採用した。

次に、最適化の目的関数を選択する。コンプライアンス最小化、質量最小化、体積最小化、任意の判定値の4種類が用意されており、本研究では、高剛性化と質量低減の両立を目的とするため、すべての要素のひずみエネルギーの合計によって定義されるコンプライアンスが最小化されることで構造物の剛性が最大化される「コンプライアンス最小化」を採用した。

最後に、制約条件を指定する。制約条件には応答拘束、製造制約、AM張り出し拘束があり、さらに応答拘束には、質量、体積、重心、慣性モーメント、グローバルVon Mises応力、局所Von Mises応力、変位、反力、コンプライアンスがある。トレー設計では、現行のトレーの解析で得られた応力

と変位を基準にするため、「グローバルVon Mises応力」、「変位」を拘束した。また、製造制約には、寸法範囲を指定するメンバーサイズ、型製造を考慮した引き抜き方向、押し出し、回転、対称の5つがあり、設計対象のトレーは鋳造で製造されるため、「メンバーサイズ」、「引き抜き方向」の2つを制約した。

3.3 最適形状設計手順

本研究では、複数応力が作用する設計対象に対して現状のソフトウェアを用いてトポロジー最適設計を実現するための方法を検討した。図4に本研究で用いたトポロジー最適設計方法のフローチャートを示す。はじめに現行品の3D-CADモデルを作成する。解析に必要なトレー材料の材料物性値を導入する。次に、トポロジー最適化計算で必要となる荷重を求めため、予備解析を行う。解析コスト低減のため、本研究の解析はすべて1/4モデルを用いた。予備解析の結果が実際の現象と一致し、予備解析の再現性を確認したのち、予備解析結果を元にし、複数応力状態による変形を再現した代替荷重を求めた。この代替荷重を用いてトポロジー最適化計算を行った。最後に、現行形状の解析結果との比較による設計検証を行った。設計検証では、まずトポロジー最適化計算結果で得られたメッシュデータを参照し、設計検証用ソリッドモデルを作成した。次に、設計検証用ソリッドモデルに対して予備解析と同様の条件で解析を行った結果を現行形状モデルの解析結果と比較し、目標値を達成しない場合は、構造部材の配置（位置、角度）を変更し、再設計を繰り返した。目標値を達成した形状を本研究で得られた最適形状とした。

表1から3に本研究で用いた各種物性値を示す。本研究では、温度依存弾塑性性材料物性値を導入することで解析の高精度化を図った。本研究で使用した物性値は、試験片により各種試験を行った結果を用いた。

3.4 予備解析方法

予備解析は製品の使用環境を再現した解析を行い、トポロジー最適化計算に必要な代替荷重を決定することを目的として実施した。本研究では、予備解析として過渡伝熱解析、静的構造解析を行った。メッシュは、正四面体メッシュを用い、メッシュサイズは7mmとした。予備解析条件は、現行形状モデルに対して解析を行い、解析結果が現行の変形状態を再現できているかなどの妥当性を評価することで決定した。決定した予備解析条件において、トレー裏面が中実である中実モデルに対して予備解析を行い、代替荷重を決定した。次に、現行形状モデルに中実モデルで決定した代替荷重と同じ荷重条件を与え、このときの最大相当応力と図3に示すy方向最大変位をトポロジー最適化計算における制約条件として設定した。

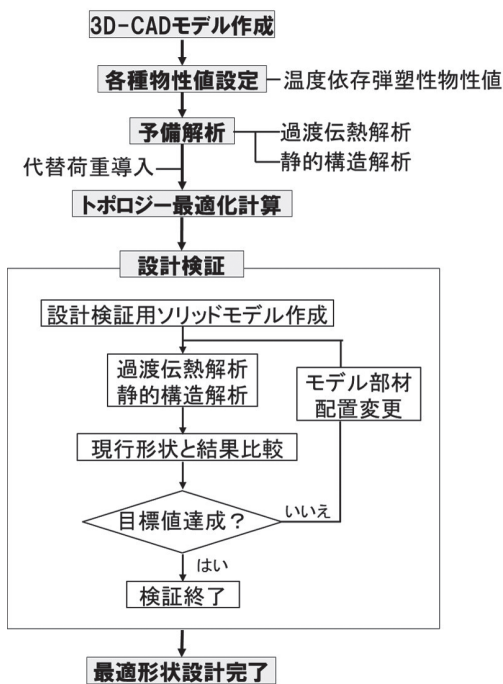


図4 本研究の最適形状設計手順

表1 解析に用いた密度 (SCH42)

温度 [°C]	密度 [kg/mm ³]
25	8.181×10 ⁻⁶
940	7.810×10 ⁻⁶

表2 解析に用いた各種材料特性値 (SCH42)

温度 [°C]	弾性率 [MPa]	ポアソン比 [-]	降伏強さ [MPa]	接線係数 [MPa]	線膨張係数 [°C]
20	2.17×10 ⁵	0.28	255.92	2977.4	1.33×10 ⁻⁵
50	-	-	-	-	1.33×10 ⁻⁵
100	-	-	-	-	1.35×10 ⁻⁵
150	-	-	-	-	1.37×10 ⁻⁵
200	-	-	-	-	1.39×10 ⁻⁵
250	-	-	-	-	1.41×10 ⁻⁵
300	-	-	-	-	1.43×10 ⁻⁵
350	-	-	-	-	1.44×10 ⁻⁵
400	85125	0.29	190.27	3255.8	1.46×10 ⁻⁵
450	-	-	-	-	1.48×10 ⁻⁵
500	-	-	-	-	1.50×10 ⁻⁵
550	-	-	-	-	1.53×10 ⁻⁵
600	-	-	-	-	1.56×10 ⁻⁵
650	-	-	-	-	1.58×10 ⁻⁵
700	-	-	-	-	1.60×10 ⁻⁵
750	-	-	-	-	1.62×10 ⁻⁵
800	54551	0.32	160.74	840.88	1.64×10 ⁻⁵
850	-	-	-	-	1.66×10 ⁻⁵
900	33246	0.33	91.008	422.9	1.68×10 ⁻⁵
940	-	-	-	-	1.69×10 ⁻⁵

表3 解析に用いた熱物性値 (SCH42)

温度 [°C]	熱伝導率 [W/mm·°C]	比熱 [mJ/kg·°C]
25	0.00959	4.49×10 ⁵
940	0.0259	6.55×10 ⁵

過渡伝熱解析は、最高温度950℃の炉内で2時間熱荷重を受けた後、20℃室内温度で5時間冷却されるものとした。対称面以外の表面の熱伝達係数は $5 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2 \cdot \text{℃}$ とし、対称面の2面は断熱条件とした。

過渡伝熱解析により得た温度履歴及び使用環境を再現した機械的な境界条件を導入し、静的構造解析を行った。モデルの拘束条件は、1/4モデルの対称面である2面に対称性を考慮した「摩擦なし支持」、トレー底面のレールと接触する部分と隣のトレーと接触する面に接触を再現した「圧縮のみ支持」、トレーの熱膨張を妨げないようトレー底面の一点に対して x 方向変位をフリー、 y 方向変位を0 mm、 z 方向変位を0 mmとなるように拘束した。

3.5 トポロジー最適化計算方法

トポロジー最適化は、設計領域の材料領域を減少させる計算を行うため、既に空間となっている設計空間に新たに物体を出現させることができない。このため、トポロジー最適化計算の開始モデルは、設計領域が中実形状の3D-CADモデル（中実形状モデル）を用いた。中実形状モデルに予備解析で決定した代替荷重を与え、3.2節で設定した条件に加え、現

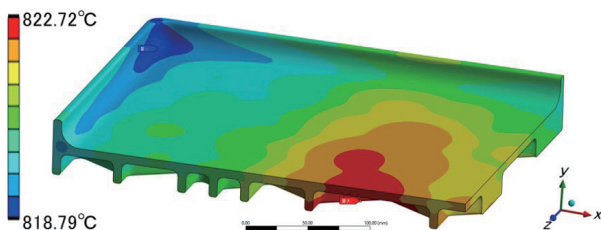


図5 現行形状モデルトレー温度分布（7200秒時点）

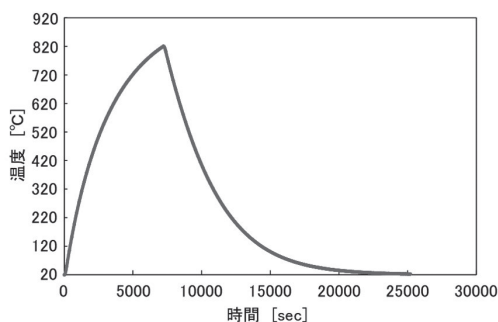


図6 現行形状モデルトレー平均温度

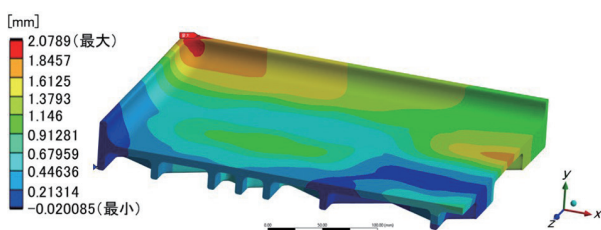


図7 現行形状モデル静的構造解析結果（25200秒、 y 方向変位分布）

行のトレーから設計領域重量の10%減少を目標の目安として質量拘束条件を中実モデルの46%、製造制約で「引き抜き方向」 y 軸と逆方向を与え、「メンバーサイズ」で部材の厚さの最小値を7 mmとして計算を行った。また、レールと接触する部位は、材料が残るよう設定した。

4. 解析結果

4.1 予備解析条件の妥当性検証

現行形状モデルに対して行った過渡伝熱解析結果を図5、図6に示す。図5は、950℃の環境温度の最終時刻である7200秒時点の温度分布である。肉厚が薄いトレー中心部付近の温度が若干高く、肉厚の厚いふち部分が若干低い傾向となるが、全体が818-822℃まで昇温した。図6は、0から25200秒のトレー平均温度の変化である。トレーは周囲環境に合わせて平均温度が高くなり、約2時間後である7200秒付近でおよそ820℃の最高平均温度となった。周囲環境温度が下がると平均温度が低下し、5時間後である25200秒には周囲環境温度の20℃におおよそ収束した。この過渡伝熱解析の結果をモデルの温度変化として静的構造解析へ導入し解析を行った。

図7に静的構造解析の最終25200秒時点の y 方向変形量の結果を示す。 y 方向は図中に示したようにトレーの受け皿面に垂直な方向である。トレーが熱膨張し、収縮した後の変位の結果であるため、弾性変形が取り除かれ、ほとんどが塑性変形による変位である。トレーの四つ角の部分が y 方向に最も変位した。この変位分布は、実際の製品と同じ変形であった。したがって、本予備解析条件は、現実の使用環境を十分に表現しており、実製品のトレーの四つ角の反り変形の原因は、高温炉の熱による熱変形と周囲環境の拘束による塑性変形であると確認することができた。

4.2 代替荷重・制約条件決定

図8に中実モデルの静的構造解析で得られた7200秒時点の最大主応力分布、図9に引張方向最大主応力ベクトル分布を示す。7200秒は、トレーの最大平均温度を示す時刻、つまり熱変形が最も大きくなる時刻である。隣のトレーと接触する面に x 方向に最大主応力が分布し、トレー四つ角の曲面に y 方向に最大主応力が分布した。この結果から、代替荷重を隣のトレーと接触する面に「 x 軸負の方向に5000 N」、四つ角の面に「 y 軸正の方向に5000 N」とした。また、2つの対称面に対称性を考慮した「摩擦なし支持」、対称面と対称面が交わる辺の1点を「固定」した。

この代替荷重を用いた静的構造解析を現行形状モデルに対して行い、相当応力、変位を取得した。図10に相当応力分布、図11に y 方向変形量分布を示す。この結果より、最大相当応力424.29 MPa、最大 y 方向変位4.7813 mmをトポロジー最適化の制約条件として与えることとした。

4.3 トポロジー最適化計算結果

図12にトポロジー最適化計算結果を示す。密度法を用いたため、荷重に対する構造の寄与度によって特性関数の値が0から1までの数値で表される。本結果では、表示される密度の閾値を0.5と設定し表示した。設計領域外のレール接触部の部材、レールと垂直方向の対称面付近の部材、四つ角に向かうように伸びる対角線状の部材が現れる結果となった。

4.4 設計検証

トポロジー最適化計算結果を参照し、再設計を繰り返した結果得られた本研究の最適形状モデルを図13に示す。トポロジー最適化計算結果で得た四つ角に向かうように伸びる対角線状の部材の配置及びこの部材を補強する部材の追加を検討し、鋳造品として必要な角Rを与えた。図14に最適形状モデルに対して予備解析と同条件で行った過渡伝熱解析及び静的構造解析により得た25200秒時点のy方向変位分布を示す。

また、表4に現行形状モデルとの解析結果の比較を示す。最終的な最適形状モデルは、現行形状モデルから設計領域重量が8.09%軽量化され、炉内環境を再現した過渡伝熱・静的構造解析のy方向最大変形量が11.2%低下し、四つ角の反り変形が減少することが確認された。

以上より、本研究で開発した複数応力により発生する変形を予備解析から求めた代替荷重を用いたトポロジー最適化計算を行う方法を用いることで、現行形状から重量を減らし、かつ、四つ角の反りの変形量を減少させる形状を設計できることが示された。

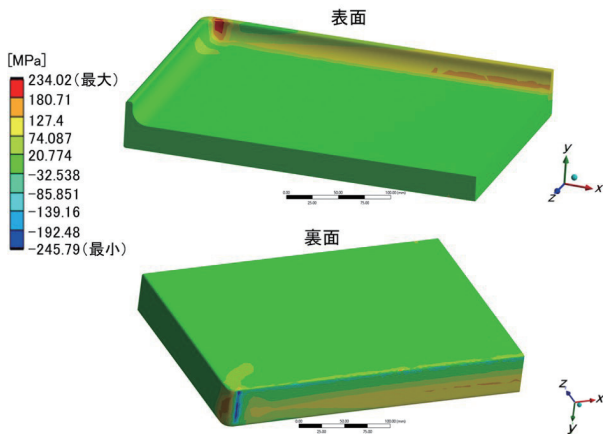


図8 中実モデル最大主応力分布 (7200 秒)

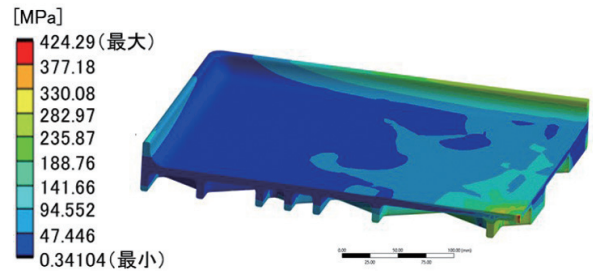


図10 代替荷重を与えた現行形状モデルの相当応力分布

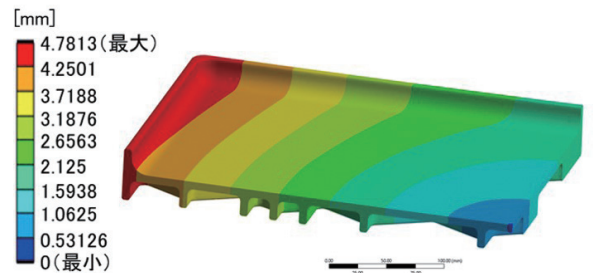


図11 代替荷重を与えた現行形状モデル y方向変位分布

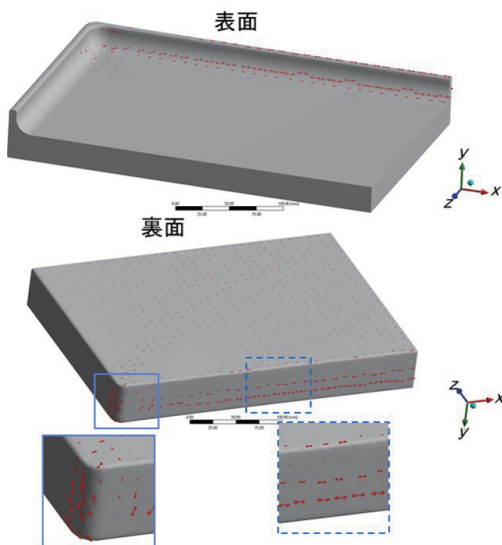


図9 中実モデル最大主応力ベクトル分布 (7200 秒)

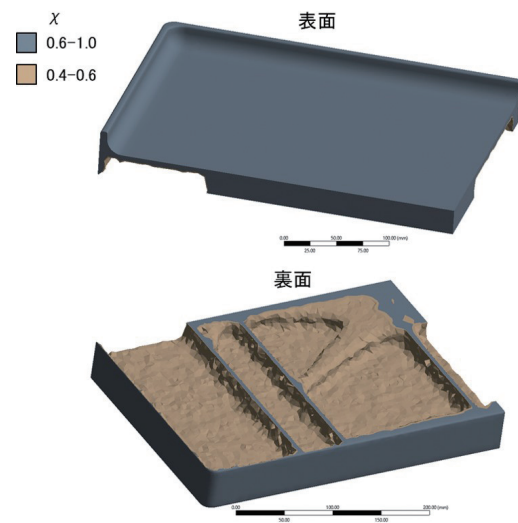


図12 トポロジー最適化計算結果

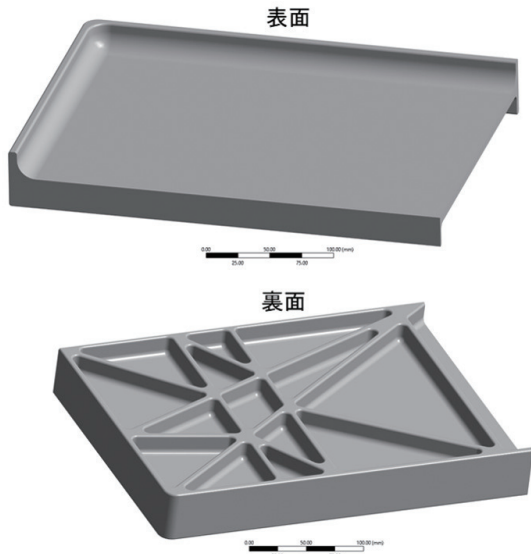
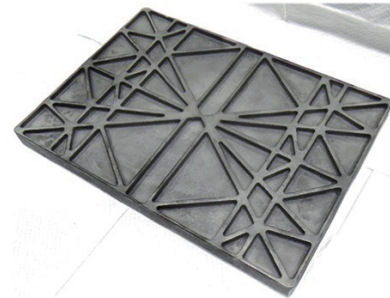
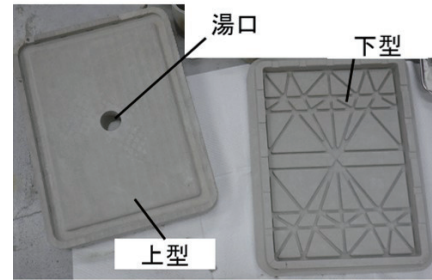


図 13 本研究で得た最適形状モデル



評価用鋳物(最適形状, 裏面)
図 15 鋳型及び最適形状の評価用鋳物

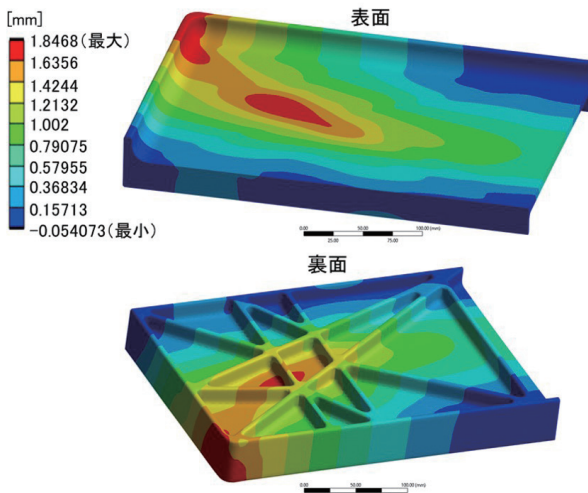


図 14 最適形状モデル解析結果 (y方向変位分布, 25200 秒)

表 4 現行形状モデルと最適形状モデルの解析結果比較

	現行形状	最適形状
体積 [mm ³]	1.094×10 ⁶	1.064×10 ⁶ (-8.09%)
y 方向最大変位 [mm]	2.079	1.847 (-11.2%)

5. 最適形状の評価用鋳物製作及び加熱変形試験

5.1 評価用鋳物製作方法

本研究で求めた最適形状の製造性と铸造品による性能検証を行うため、実製品40%サイズの評価用鋳物を製作した。評価用鋳物は、結合剤噴射法の積層造形装置 (Projet 660 Pro, 3D Systems社) を用いてセメント系鋳型材料 (TCaST, 太平洋セメント社) により造形した鋳型に球状黒鉛鋳鉄を注

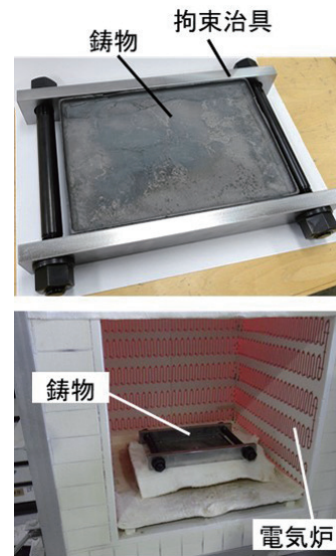


図 16 評価用鋳物拘束状態および炉内設置方法

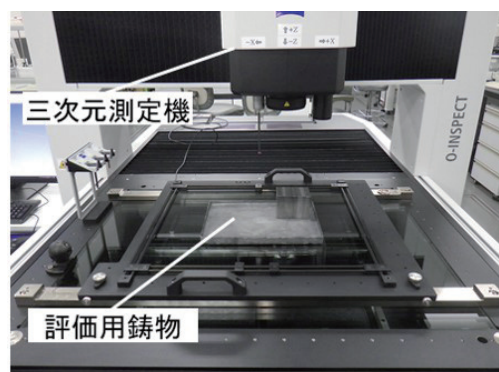


図 17 寸法計測方法

湯し製作した。図15に鋳型及び方案等を切断し仕上げ加工を行った鋳造品を示す。同様に現行形状についても鋳物を製作した。

5.2 加熱変形試験方法及び結果

使用環境を模擬した拘束状態において加熱試験を行った。加熱条件は、900℃に昇温した電気炉内に拘束状態の評価用鋳物を設置し、2時間加熱した後に炉内で冷却した。図16に鋳物拘束状態と炉内設置状況を示す。加熱試験前後において3次元測定機（O-INSPECT863, カールツァイス社）により四つ角の変形量を計測した（図17）。四つ角の変形量の平均と標準偏差は、現行形状が 1.5 ± 0.7 mm, 最適形状が 0.8 ± 0.4 mmであった。最適形状は現行形状に対して変形が少ないことを確認した。

本研究で得られた最適形状は、鋳造品として製作可能であり、解析結果と同様に熱応力に対して高剛性な形状であることを確認した。

6. おわりに

本研究は、熱応力及び外力の複数応力が作用する鋳造製品に対して、トポロジー最適化を用いて軽量・高剛性な形状を計算する方法を開発した。本研究の方法は、汎用の解析ソフトウェアを用いて、予備解析や構造再設計を行う解析方法の工夫により最適形状を求めることができる。トレー製品以外に対しても応用が可能な方法であり、他の製品を対象として今後研究を継続する予定である。また、道内鋳物製造業の高付加価値な製品開発への応用展開を目指し、本技術の普及に努める。

参考文献

- 1) 伊賀淳郎, 西脇眞二 他: 設計変数依存性を考慮した熱伝達問題に対するトポロジー最適化, 日本機械学会論文集 (C編), 74巻746号, pp. 118-127, (2008)
- 2) T. Borrvall and J. Petersson: Topology optimization of fluids in Stokes flow, International journal for numerical methods in fluids, Vol. 41(1), pp. 77-107, (2003).
- 3) 岸本直樹, 野口悠暉 他: レベルセット法に基づく複数材料を対象としたトポロジー最適化, 日本機械学会論文集, Vol. 83(849), p. 17-00069, (2017)
- 4) 西脇眞二, 泉井一浩 他: トポロジー最適化, 日本計算工学会編, 丸善出版, (2013)
- 5) 田村 武, 西藤 潤: 有限要素法および境界要素法による弾性体のコンプライアンス最小形状の探索, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp. 75-84, (2003)

生体情報にもとづく好意推定手法の開発

大久保京子, 安田 星季, 神生 直敏, 今岡 広一

Development of Estimation Method of Preference Emotion by Physiological Information

Kyoko OHKUBO, Seiki YASUDA, Naotoshi KAMIO, Koichi IMAOKA

抄 録

商品パッケージには、内容物の保護、使いやすさなどの取り扱い利便性のほかに、販促媒体としての役割がある。パッケージは商品のイメージに直結するため、機能を訴求するだけでなく、消費者に対して、視覚を通じて好意を抱かせるデザインにするなどの感性価値も重要である。パッケージなどの視覚媒体のデザイン評価は、現在では、主にアンケートやインタビューなどの主観評価が行われている。しかし、被験者が自身の感情や心理を正確に認識し、それを言語化することには限界がある。そこで、本研究では、生体情報に着目し、視覚刺激に対する消費者の好意感情を生体情報から客観的に評価する手法の開発を試みた。その結果、心拍情報のみを用いて、簡便に好意感情を評価可能な好意推定モデルを開発した。また、開発モデルの商品パッケージ評価への適用可能性を確認した。

キーワード：生体情報, 感情推定, パッケージ

Abstract

Product packaging has a role to play as a sales promotion medium, in addition to providing protection for the contents and convenience of handling, such as ease of use. As packaging is directly linked to the image of a product, it is important not only to promote its functions, but also to provide consumers with sensory value, for example, by designing it in a way that makes them feel good about the product visually. Currently, design evaluation of visual media such as packaging is mainly based on subjective evaluations such as questionnaires and interviews. However, there are limitations in the ability of subjects to accurately recognise and verbalise their own emotions and psychology. Therefore, this study focused on biometric information and attempted to develop a method to objectively evaluate consumers' good feelings towards visual stimuli from biometric information. As a result, a preference estimation model that can easily evaluate preference emotion using only heartbeat information was developed. Furthermore, the developed model was confirmed as potentially applicable to the evaluation of product packaging.

KEY-WORDS : Physiological Information, Emotion Estimation, Product Package

1. はじめに

消費者が入店前に購入を予定していた商品をそのまま購入する計画購買と、購入する商品あるいは購買自体を店舗内で決定する非計画購買の割合を調査した消費者行動に関する諸研究において、非計画購買の割合は60～80%に及ぶことが示されており^{1,2)}、消費者の購買意思決定の多くは、店舗内で

行われている。消費者の非計画購買行動における意思決定要因には、価格、店頭広告、陳列等様々な要因が考えられるが、「パッケージ」も重要な要素の一つである。

パッケージは誘目性に優れるよりも「好き」と感じられるデザインである方が商品選択に影響することが明らかにされており³⁾、パッケージデザインの「好ましさ」は商品選択に重要な要素であると考えられる。パッケージなどの視覚媒体

事業名：経常研究

課題名：生体情報に基づく好意推定手法の開発

のデザイン評価には、現在では、主にアンケートやインタビューなどの主観評価が用いられているが、消費者が自身の感情や心理を正確に認識し、それを言語化することには限界があるため、消費者の真意を十分に把握できないという認識が高まっている⁴⁾。

一方、音楽を聞いた際のアンケートによる好みの主観評価と脳反応に基づいて、音楽CDの売上を予測したところ、3年後の売上枚数は主観的な好感度よりも脳反応による予測結果と相関が認められたことが先行研究⁵⁾において知られており、生体情報を用いて感情を推定できることによって、さらに、人間の無意識の感性や意思決定プロセスまで評価できる可能性がある。

そのため、近年では、パッケージデザインのような視覚刺激においても、脳波を用いた印象評価手法の検討を行った既往研究⁶⁾もみられるが、脳波のみで予測した感情とアンケートによる購入希望順位は一致せず、評価手法としてはまだ確立されていない。

既往研究⁶⁾においては、脳波のみに着目しているが、本研究では、脳波以外の生体情報においても検討を行い、消費者から好意的に見られる商品パッケージなどの視覚媒体の開発を効果的に支援するために、アンケート等による分析の対象である主観に代わり、生体情報を活用した客観的に評価可能な好意推定手法の開発を試みたので、報告する。

2. 好意推定手法の開発

あらかじめ想起される感情が推定されている参照画像群を被験者に視覚刺激として与えて、各種の生体情報を取得した。併せて同じ画像群に対する主観評価を実施した。詳細を以下に記述する。

2.1 被験者

被験者は、健康な女性5名、男性15名の計20名（24歳～58歳、平均年齢38.9歳）とした。

本実験は、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の規程に基づき、倫理審査委員会の承認のもと、被験者全員の同意書を得た上で行われた。

2.2 実験に用いた感情モデル及び視覚刺激

生体情報から好意を推定するモデルを構築するためには、生体情報の計測に供する様々な強度の好意を想起できる画像群と、呈示画像と想起された感情を対応させるための感情モデルが必要となる。本研究では、感情モデルに、心理学研究でよく用いられるRussellの円環モデル⁷⁾を用いた（図1）。Russellの円環モデルは、感情価（Valence）と覚醒度（Arousal）の直行する二軸で感情を円環状に配置したモデルである。

実験に使用した刺激画像はRussellの円環モデルで分類できるフリーの情動喚起画像集OASIS⁸⁾から選択した。OASISには900枚の情動喚起画像があり、それぞれの画像には、7段階のリッカード尺度で評価された感情価（Valence）と覚醒度（Arousal）の値があらかじめ付与されている。実験にはRussellの円環モデルの第一象限～第四象限に位置する画像を各6枚選択し、各象限の画像セット（Qua1～Qua4）ごとに被験者に呈示し、計24枚の画像を観察してもらった（表1）。

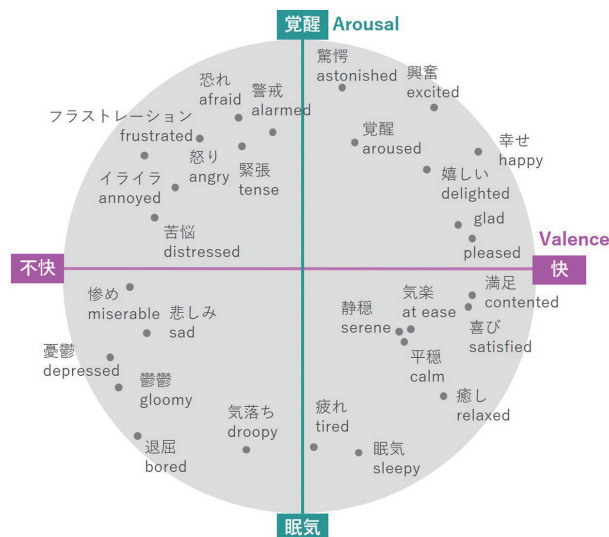


図1 Russellの円環モデル

表1 刺激画像一覧

第一象限 (Qua1)			第三象限 (Qua3)		
画像番号	感情価	覚醒度	画像番号	感情価	覚醒度
59	6.366	4.738	88	3.088	2.713
134	6.216	4.861	235	2.186	3.059
256	6.490	5.030	309	2.137	3.069
335	6.275	4.980	379	2.196	2.861
468	6.314	4.663	385	2.735	2.475
661	6.257	4.903	749	2.833	1.921
第二象限 (Qua2)			第四象限 (Qua4)		
画像番号	感情価	覚醒度	画像番号	感情価	覚醒度
234	1.608	4.980	37	6.046	3.654
274	1.892	4.772	63	5.593	3.356
306	1.824	5.455	74	5.907	3.010
322	1.735	5.287	349	5.944	3.010
439	1.971	4.703	457	5.963	3.221
871	1.716	5.139	461	6.093	3.587

2.3 刺激画像の呈示方法

顔や眼球をなるべく動かさずに刺激画像全体を観察してもらうために、画像は液晶モニター（Eizo ColorEdge CS2731）に横約150mm、縦約120mmのサイズで表示し、被験者は実験台に固定された顎のせいで顔を固定し、眼球とモニターの距離が約600mmの位置で画像を呈示した（図2）。

被験者の疲労や刺激画像に対する慣れを防ぐために、刺激画像の呈示は、無彩色画面に表示した「+」の注視点画像を10秒呈示した後、Russellの円環モデルの同一象限の刺激画像6枚のうち1画像を10秒呈示する試行を1試行とし、連続して6試行繰り返し、最後に注視点画像を10秒間呈示するまでを1セットとした。刺激画像の呈示順はランダムとした。

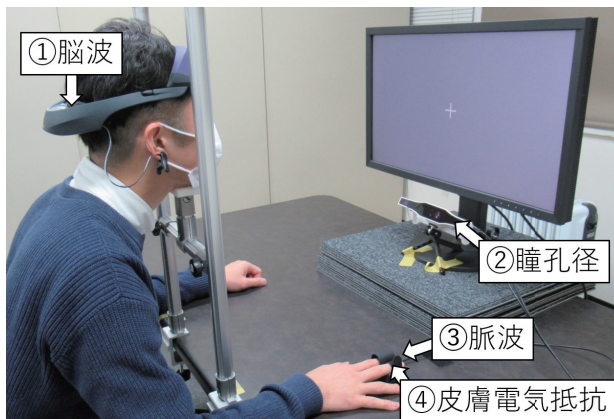


図2 実験風景

2.4 計測対象とした生体情報

本実験では、生体情報として、脳波、脈波、皮膚電気抵抗、瞳孔径を計測した。脳の前頭葉は感情を司っているといわれており、脳波は、覚醒度などの指標として感情研究ではよく用いられている。脈波、皮膚電気抵抗は自律神経活動の変化を捉えることができ、精神的ストレスやリラクスの指標として使われている。また、瞳孔の散大収縮は、快・不快感情、興味・関心、興奮等で変化することが多くの研究で報告されており、瞳孔反応は、無意識の情動反応であるといわれている⁹⁾。

2.5 実験手順

被験者が実験室内の一人がけ椅子に座った状態で、実験の概要を説明した後、脳波・脈波・皮膚電気抵抗を測定するための電極・センサを装着した(図2)。実験テーブルに固定された顎のせ台で顔を固定した状態で、非接触の視線計測装置のキャリブレーションを実施した。

被験者には、注視点画像を1分間見続ける開眼安静状態の各種生体情報を測定後、刺激画像1セットを呈示した。

その後3分間の休憩をはさみ、別の刺激画像セットの呈示を繰り返し、4セット(Qua1～Qua4)全てを呈示した。各被験者の刺激画像セットの呈示順はランダムとした。その後、生体情報計測の電極・センサを取り外し、呈示した24枚の画像を10秒間の注視点画像をはさみ、再度ランダムに呈示して、主観評価を実施した。

2.6 生体情報計測及び解析手法

脳波は、TOKAI-Orb TO-601(東海光学株式会社)を使用し、サンプリング周波数1000Hzで、頭皮上8部位(拡張10-20法, PO7, O1, Oz, O2, PO8, F3, Fz, F4)から測定した。基準電極、グランド電極はともに右耳朶(A2)を使用した。脳波の解析は、前頭 α 波パワーの左右差がネガティブ・ポジティブ感情間(または接近・回避的動機間)で生じることが報告されている^{10, 11)}ため、F3とF4の α 波(8-13Hz)の左右非対称性(FAI)を解析した。また、覚醒度の指標と言われている自発的脳波の α 波(8-13Hz)、 β 波(14-30Hz)のパワー値をOzとFzからそれぞれ求めた。

視線計測装置はGP3 HD(Gazepoint社)を使用し、サンプリング周波数150Hz、9点マーカーでキャリブレーションを実施した。瞳孔径は、刺激画像閲覧中の左右瞳孔径の平均値を算出した。

脈波、皮膚電気抵抗は、視線計測装置の付属品であるBiometrics(Gazepoint社)を用いて、右手の人差し指で脈波、中指で皮膚電気反応を測定した。脈波から心拍間隔(R-R間隔)を算出し、短時間フーリエ変換によって得たパワースペクトル密度から、低周波成分(LF, 0.04Hz-0.15Hz)と高周波成分(HF, 0.15Hz-0.40Hz)を求め、LF/HFを解析した。皮膚電気抵抗は、ローパスフィルター(30サンプルの移動平均)をかけて測定ノイズを除去したデータと、これにローパスフィルター(150サンプルの移動平均)をかけて抽出したベースラインとの差分を感情反応による変化量として求めた。

2.7 刺激画像の主観評価

刺激画像の主観評価は、先行研究を参考にRussellの円環モデルを8つの感情に分類¹²⁾して、「快-不快」「驚き-眠気」「興奮-退屈」「緊張-落ち着き」の4組(図3)を評価対象とし、これに「好ましい-好ましくない」を加えた5組の感情について、100mmの線分上で自由に回答できるVisual Analog Scale(VAS)法で実施した。

2.8 実験結果・考察

刺激画像が適切に評価されたかを確認するために、画像にあらかじめ付与されている感情価(Value)と覚醒度(Arousal)の値と、被験者の主観評価の相関を確認した(表2)。その結果、感情価と「快-不快」には高い相関が確認されたが、覚醒度と「驚き-眠気」の相関は低かった。覚醒度は瞬間的な感情と考えられるため、同じ画像を2回観察して主観評価を実施したことで、適切な評価ができなかった可能性がある。

また、先行研究⁸⁾を参考に、生体情報と主観評価の相関による適切なモデルを作成するために、画像の感情価と「快-不快」の主観評価の相関係数0.7未満の被験者7名を、OASIS作成の基礎となった被験者の集団と違った傾向を持つ群と判断し、その後の解析から除外した。

解析対象とした13名の被験者群では、「好ましい-好ましくない」と「快-不快」の主観評価、画像の感情価に高い相関が確認された（表3）。

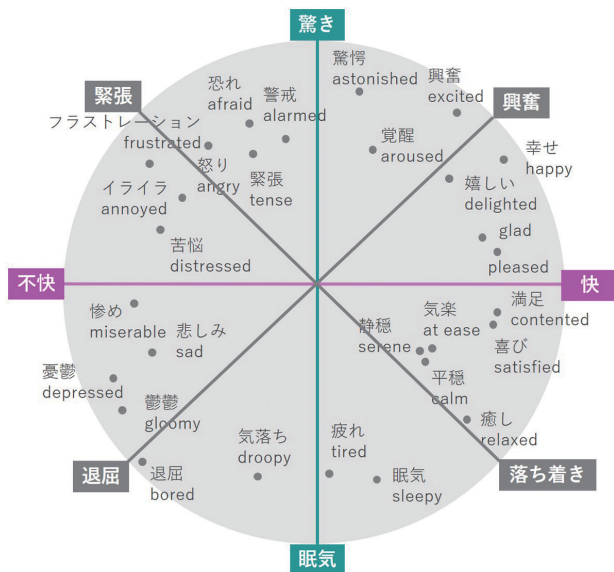


図3 Russellの円環モデルの8つの感情分類

表2 主観評価と画像値の相関係数（20名）

	快-不快	驚き-眠気	画像の感情価	画像の覚醒度
快-不快	1	-0.476	0.794	0.040
驚き-眠気	-0.476	1	-0.450	0.300
画像の感情価	0.794	-0.450	1	0.022
画像の覚醒度	0.040	0.300	0.022	1

表3 主観評価と画像値の相関係数（13名）

	好ましい	快	驚き	興奮	落ち着き	感情価	覚醒度
好ましい	1	0.949	-0.569	0.183	0.772	0.895	0.016
快	0.949	1	-0.548	0.178	0.756	0.853	0.051
驚き	-0.569	-0.548	1	0.298	-0.733	-0.529	0.276
興奮	0.183	0.178	0.298	1	-0.095	0.180	0.348
落ち着き	0.772	0.756	-0.733	-0.095	1	0.742	-0.112
感情価	0.895	0.853	-0.529	0.180	0.742	1	0.022
覚醒度	0.016	0.051	0.276	0.348	-0.112	0.022	1

脳波、皮膚電気抵抗、瞳孔径と種々の主観評価には明瞭な相関が見られなかったが、13名の被験者群のうち5名の被験者において、画像の感情価と自律神経の指標である心拍LF/HFに高い負の相関が確認された。

2.9 好意推定モデルの作成

画像の感情価と、被験者の「好ましさ」の主観評価の結果から、感情価と「好ましさ」の関係を表す感情モデルを作成した（図4）。

5名の被験者群の個別のLF/HF分布の標準偏差から2σの範囲外のデータを外れ値として除去し、最大値と最小値から正規化したLF/HFと感情価の相関から、計測モデルを作成した（図5）。

さらに、感情モデルと計測モデルを組み合わせて好意推定モデルを作成した（図6）。

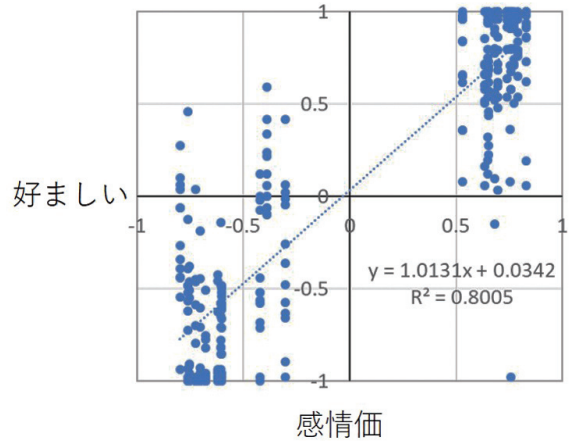


図4 感情モデル

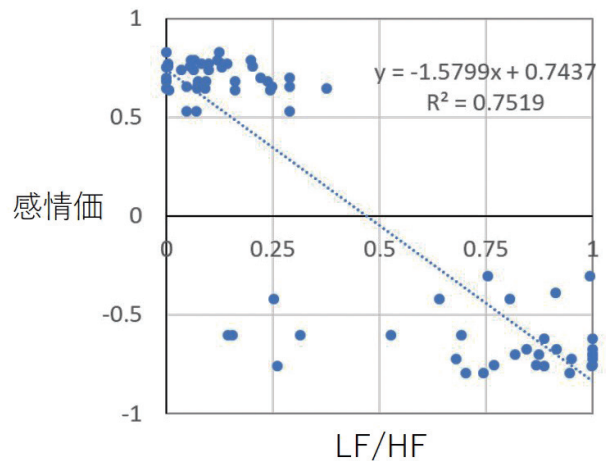


図5 計測モデル

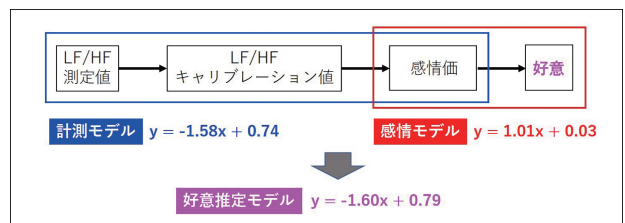


図6 好意推定モデル

感情価とLF/HFに相関があった5名の被験者群で、1名のデータをテストデータとし、残りの4名のデータを学習データとしてモデルを作成し、交差検証を実施して個々のモ

デルの汎化性能を確認したところ、相関係数は0.78～0.95と高い精度であることが確認できた（表4）。

表4 モデルの交差検証

モデル番号	係数1	係数2	相関係数
1	-1.58	0.79	0.95
2	-1.56	0.76	0.85
3	-1.61	0.77	0.85
4	-1.66	0.85	0.78
5	-1.61	0.78	0.83

3. 好意推定手法の検証

開発した好意推定手法を用いて模擬的な商品パッケージ評価試験を実施した。詳細を以下に記述する。

3.1 被験者

被験者は、好意推定モデル作成に使用した感情価とLF/HFに相関があった女性2名、男性3名の計5名（33歳～55歳、平均年齢41.4歳）とした。

本実験は、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の規程に基づき、倫理審査委員会の承認のもと、被験者全員の同意書を得た上で行われた。

3.2 実験に用いた視覚刺激

本実験では、デザインの異なる架空のアイスクリームパッケージ3種類を作成し（図7）、刺激画像として用いた。また、LF/HFの個別の正規化を行うために、情動喚起画像集OASISから感情価と覚醒度が異なる3枚の画像を選択し、キャリブレーション用の画像として用いた（表5）。

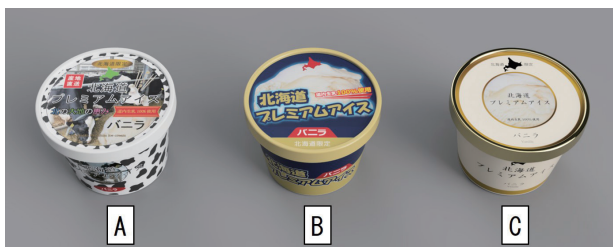


図7 刺激画像

表5 キャリブレーション画像一覧

画像番号	感情価	覚醒度
496	1.108	5.149
863	3.990	1.845
463	6.412	4.109

3.3 視覚刺激の呈示方法

画像は液晶モニター（Eizo ColorEdge CS2731）に横約150mm、縦約120mmのサイズで表示し、被験者の眼球とモニターの距離が約600mmの位置で画像を呈示した。

呈示した刺激画像は、無彩色画面に表示した「+」の注視点画像を10秒呈示した後、3種類のアイスクリームパッケージ画像のうち1種類を10秒呈示する試行を1試行とし、連続して3試行繰り返し、最後に注視点画像を10秒間呈示した。刺激画像の呈示順はランダムとした。

また、キャリブレーション用の3枚の画像も同様に呈示した。

3.4 実験手順

被験者が実験室内の一人がけ椅子に座った状態で、実験の概要を説明した後、脈波センサを指に装着した。注視点画像を1分間見続ける開眼安静状態の脈波を測定後、アイスクリームパッケージの刺激画像を呈示した。被験者には店頭でアイスクリームを選んでいるシチュエーションを想定して、画像を見るように教示した。

その後、脈波センサを取り外し、呈示した3枚のアイスクリームパッケージ画像を10秒間の注視点画像をはさみ、ランダムに呈示して、主観評価を実施した。

次に、キャリブレーション用の3枚の画像についても同様に実験中の脈波を測定し、主観評価を行った。

3.5 主観評価と生体情報による好意推定手法の検証

脈波は、視線計測装置の付属品であるBiometrics（Gazepoint社）を用いて、右手の人差し指で測定した。脈波から心拍間隔（R-R間隔）を算出し、短時間フーリエ変換によって得たパワースペクトル密度から、低周波成分（LF, 0.04Hz-0.15Hz）と高周波成分（HF, 0.15Hz-0.40Hz）を算出してLF/HFを求めた。また、本実験で呈示したキャリブレーション用の3枚の画像と、好意推定モデルを作成した際に呈示した24枚の画像観察中のLF/HFの最大値と最小値を用いて、被験者ごとに正規化したLF/HFを好意推定モデルに当てはめた。

刺激画像の主観評価は、「快-不快」「驚き-眠気」「好ましい-好ましくない」の3組の感情について、Visual Analog Scale（VAS）法で実施した。なお、好意推定、主観評価ともに、実験者の指示通り実験を遂行できなかった1名を除外した4名のデータで解析を行った。

3.6 実験結果・考察

3種類のアイスクリームパッケージの主観評価結果を図8に示す。主観評価の結果から、好ましさの評価に違いがあり、パッケージデザインが与える印象が異なっていることがわかった。また、パッケージデザイン観察中のLF/HFを用いて、好意推定モデルで推定した好意の推定値を縦軸、好ましさの

主観評価を横軸としてプロットした（図9）結果，72.7%が好意の推定と主観評価が一致しており，好意推定モデルは商品パッケージ評価に適用できる可能性が示唆された。

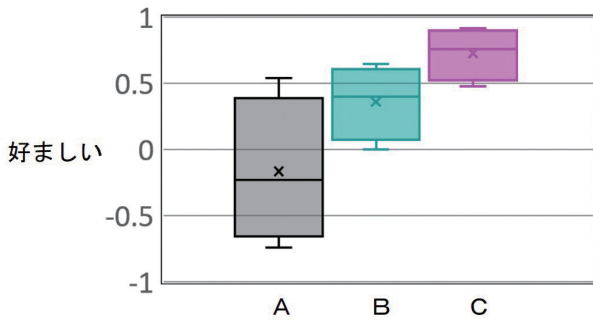


図8 パッケージ画像の主観評価結果

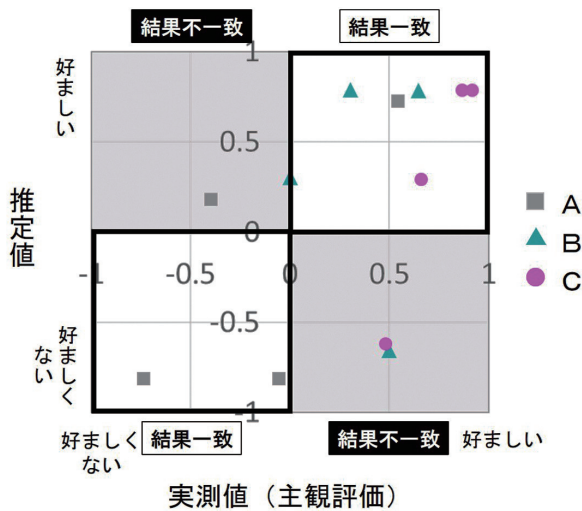


図9 パッケージ画像評価結果

4. まとめ

本研究では，Russellの円環モデルに基づく感情と生体情報の紐付けを行った結果，「好ましさ」の感情は感情価（快）と相関が高く，自律神経の指標である心拍LF/HFで推定できる可能性が示唆された。次に，LF/HFのみを用いた簡便でリアルタイム性を追求できる好意推定モデルを提案し，提案モデルの商品パッケージ評価への適用可能性を確認した。

しかし，生体情報は個人差やばらつきが大きいため，本研究において，好ましさと生体情報に相関が確認されたのは，被験者全体の3割程度であった。そのため，より多くの人に適用可能な好意推定技術の開発が課題である。

今後は，実験環境や，測定装置，新たな指標などの検討を行い，生体情報から好意推定可能な対象者の拡大を図り，客観的かつリアルタイムな評価手法として発展させることで，商品パッケージなどのデザイン評価手法としての活用を目指す。

参考文献

- 1) Point of Purchase Advertising Institute, デュポン社による調査 (1978)
- 2) 大槻 博：スーパーと消費行動，季刊消費と流通，第4巻4号，pp.37-45 (1980)
- 3) 鈴木隆之他：商品選択における誘目性に関する研究，日本デザイン学会研究発表大会概要集，pp.286- (2012)
- 4) 熊倉宏志：ニューロマーケティングの現状，課題そして展望，オペレーションズ・リサーチ，7月号，pp.421-428 (2016)
- 5) G. S. Berns : A neural predictor of cultural popularity, Journal of Consumer Psychology, Vol 22, pp.154-160 (2012)
- 6) 熊谷直也他：生理指標を用いたパッケージデザインの印象評価手法の検討，第24回感性工学会大会予稿集 (2022)
- 7) J. Russell : A Circumplex Model of Affect, Journal of Personality and Social Psychology, Vol 39, pp.1161-1178 (1980)
- 8) B. Kurdi et.al. : Introducing the Open Affective Standardized Image Set (OASIS), Behav Rcs, Vol 49, pp.457-470 (2017)
- 9) 和久井秀樹他：生体情報計測による感情の可視化技術，技術情報協会，391p (2020)
- 10) E. E. Smith et al. : Assessing and conceptualizing frontal EEG asymmetry: An updated primer on recording, processing, analyzing, and interpreting frontal alpha asymmetry, International Journal of Psychophysiology, Vol.111, pp.98-114 (2017)
- 11) F. S. Rawnaque et al. : Technological advancements and opportunities in Neuromarketing: a systematic review, Brain Informatics (2020)
- 12) 平松拓也他：生体情報による感情推定手法とステージの観客反応による評価，情報処理学会，pp.857-864 (2017)

ソフトウェア無線による移動体向け無線データ伝送システムに関する研究

宮崎 俊之, 新井 浩成, 堤 大祐*, 日下 聖**

Research on Wireless Data Transmission System for Mobile Devices using Software Defined Radio

Toshiyuki MIYAZAKI, Hironari ARAI, Daisuke TSUTSUMI*, Takashi KUSAKA**

抄 録

スマート農業や老朽化インフラの監視などに、移動体を用いたセンシング技術の活用が期待されている。移動体向けセンシングでは、画像、音声、LiDARなど様々なセンサ類を追加搭載し、これらセンサから得られるデータの無線伝送が必要となる。従来使用されてきたハードウェア無線と比較して、ソフトウェア無線は用途や使用条件、使用環境などに応じた最適な無線伝送方式を構成できる特徴があり、追加した様々なセンサ類に柔軟に対応可能である。ソフトウェア無線の開発においては、プログラマブルデバイスにソフトウェアを書き込むための開発環境と、それを実現するためのハードウェアが必要となる。本研究では、オープンソースで使用可能な開発環境とハードウェアプラットフォームを使用し、移動体に搭載したセンサのデータを無線伝送するために必要となる基礎技術を開発した。

キーワード：GNU Radio, ソフトウェア無線, OFDM, Hack RF One

1. はじめに

移動体の利用において、導入後に使用用途や使用環境に応じた様々な種類のセンサ類を新たに装備することで、飛行・走行制御の自動化や、各種環境情報などのセンシングを行う事例が増えている。例えば、農業生育状況監視用のドローンでは、あらかじめ搭載されているカメラに加えて温度センサやサーモグラフィを追加搭載することで環境情報を取得したり、野生動物監視用のロボットでは、マイクを追加搭載して動物の検出精度を向上させることが行われる。

ドローンなどの移動体は、標準で搭載されるカメラなどのセンサの情報伝送を行うために、専用の無線通信システムが搭載されている。一例として、あるドローン大手企業では、最大伝送距離 6 kmを実現した拡張Wi-Fi通信システムを搭載している。これらメーカー独自の無線通信システムは他社製品との互換性がなく、仕様が一般公開されていない。このように、従来の移動体に搭載されている無線通信システムでは、使用者が追加でセンサを搭載することが想定されておらず、センサの追加搭載のニーズに応えることができなかった。

そこで本研究では、これらのニーズに応えることを目的に、

ソフトウェア無線を用い、移動体に追加で搭載される様々なセンサからのデータを複数同時伝送するために必要となる基礎技術の開発を行った。

2. ソフトウェア無線

データ伝送用の無線通信システムでは、センサから得られたデータを無線信号に乗せるための各種処理が行われる。ハードウェアで構成される従来型無線通信システムの一般的な送信機の構成を図1に示す。移動体搭載のセンサデータを無線送信する場合、データの符号化、変調、増幅などの無線信号処理が必要となる。従来の無線機では、これらの無線信号処理のうち符号化以外の処理はハードウェア化された専用の高周波回路で行っている。

一方、FPGA (Field Programmable Gate Array) やCPLD (Complex Programmable Logic Device) などのプログラマブルデバイス (内部構成を変えることが可能な集積回路) が高速化したことで、これらの内部にある再構成可能なゲートを用いて周波数発生や変調処理をソフトウェア的に構成し、MHz (10⁶Hz) 帯からGHz (10⁹Hz) 帯程度の無線通信に必

* 道総研法人本部 * Hokkaido Research Organization Headquarters

** 北海道大学大学院情報科学研究院 ** Hokkaido University Graduate School Faculty of Information Science and Technology

事業名：経常研究

課題名：ソフトウェア無線による移動体向け無線データ伝送システムに関する研究 (令和3～4年度)

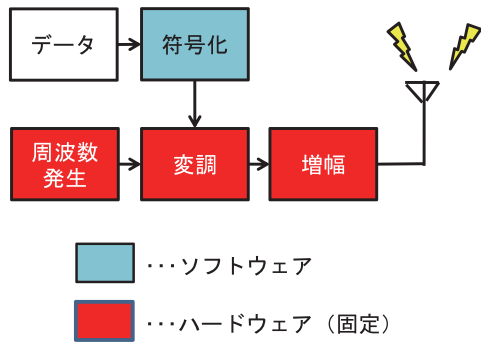


図1 従来型ハードウェア無線機の構成 (送信機)

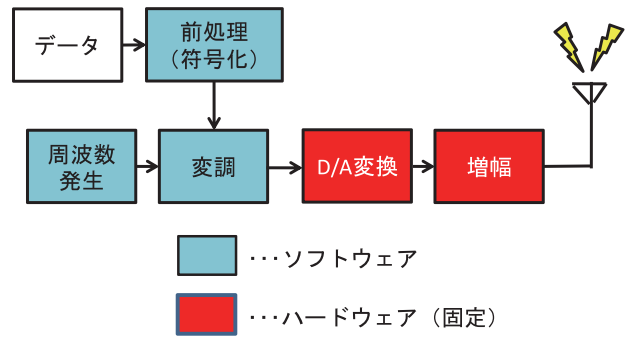


図2 ソフトウェア無線機 (送信機) の構成

要な無線信号処理を行うことが可能となった。このように無線通信システムの動作をソフトウェアで制御する新しい通信システムをソフトウェア無線 (Software-Defined Radio, SDR) と呼ぶ (図2)。ソフトウェア無線の大きな特徴として、FPGAやCPLDの内部構成 (内部回路) を変更することで、同一のハードウェアを異なる通信方式やプロトコルへ切り替えることができることが挙げられる。

3. 開発環境とハードウェアプラットフォーム

ソフトウェア無線システムを開発するためには、無線の送受信機能を設計するための開発環境と、高周波信号を処理する高速なFPGAやCPLDを内蔵したハードウェアプラットフォームが必要となる。本研究ではソフトウェア無線の開発

環境としてGNU Radioを使用した。

GNU RadioはGNU General Public License (GPL) のもとで公開されており、世界中の有志による開発、改良が進められているオープンソースのソフトウェアツールキットである。GNU RadioはGRC (GNU Radio Companion) と呼ばれるGUI上で各機能ブロックを結線することでソフトウェア無線システムを効率的に開発することが可能である (図3)。またGNU Radioは様々なハードウェアプラットフォームに対応しており、同一のプログラムを別のハードウェアプラットフォームに移植することも可能である。

本研究ではハードウェアプラットフォームとしてGreat Scott Gadgets社のHack RF Oneを使用した (図4)。Hack RF Oneはオープンソースのハードウェアプラットフォームであり、CPLDとしてザイリンクス社のXC2C64Aを、またRFト

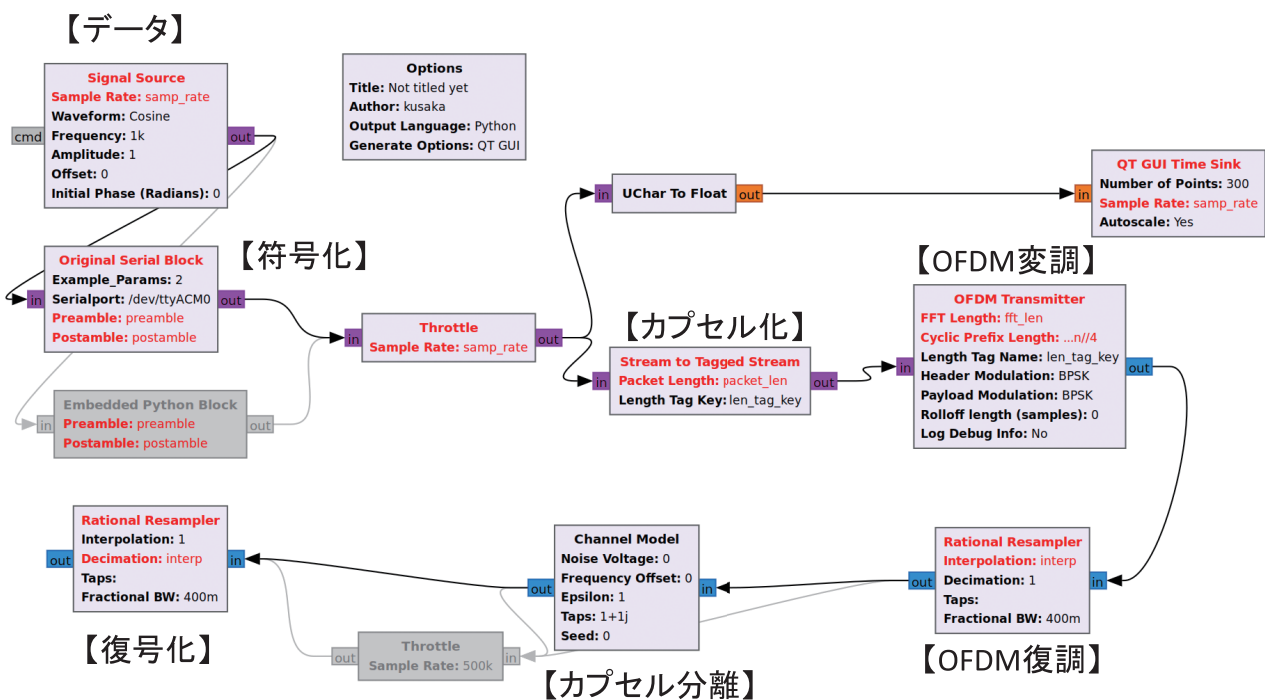


図3 GNU Radio Companion を用いたソフトウェア無線の開発画面

ランシーバとしてAnalog Devices社のMAX2837を搭載している。低価格だが、6GHzまでの無線信号を送受信可能であり、小規模な無線システム開発に適している。

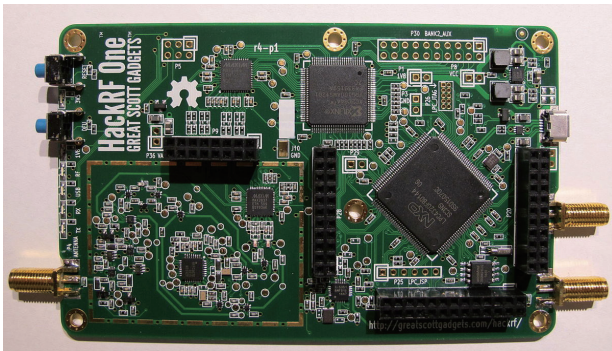


図4 ハードウェアプラットフォーム (Hack RF One)

4. OFDMの実装

GNU RadioとHack RF Oneを用いた実装例として、直交分割多重変調 (OFDM) を構築した事例を紹介する。OFDMは限られた無線帯域を効率的に使用することで高速通信を行うことが可能な変調方式で、地上デジタル放送や第4世代以降の携帯電話で使用されている。

Hack RF Oneのような小規模ハードウェアプラットフォームに複数のセンサを接続してデータを送信するためには、データ取りこぼしを起こさないような効率的な処理が必要となる。そのため、センサデータのカプセル化、フロントエンドの実装と多重化を行った。

4.1 センサデータのカプセル化

伝送時のデータ破損を防ぎ安定した無線伝送を実現するためにはデータをカプセル化することが望ましい。複数の様々なセンサから出力されるデータを同時伝送する方法の一つに、各センサからの信号をパケットで区切り時分割で伝送する時分割多重方式がある。時分割多重方式を用いる場合、データの長さを揃えたカプセル化を行うことで信号処理を効率化できる利点がある。

本研究ではJIS X5002-1975 (基本型データ伝送基準) に準拠したカプセル化プロトコルをGNU Radio上で開発した。カプセル長はHack RF OneのFPGAでの処理速度を考慮し64byteに設定した (図5)。これにより、加速度センサや画像など様々な種類のセンサを同一カプセル長で取り扱うことができるようになり、その結果、Hack RF Oneに様々なセンサを接続することが可能となった。

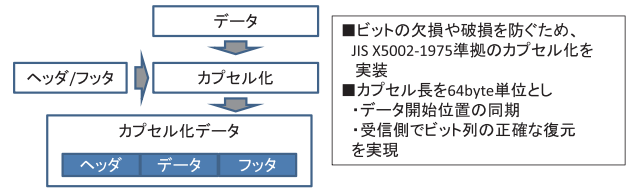


図5 センサデータのカプセル化

4.2 OFDMフロントエンドの実装と多重化

OFDMをGNU Radioを用いてHack RF One上で実現する際、送信側で必要となるパケットエンコーダと、受信側で必要となるパケットデコーダがHack RF One上に標準で搭載されていないという課題がある。そこで本研究ではパケットデコーダに必要となる位相のずれ (ビットの同期ずれなど) の抑制手法を開発することで、Hack RF One上で動作可能なパケットエンコーダとパケットデコーダを開発した。主な開発ポイントは下記の2点である。

- ①送信側においては、センサデータは時系列でばらばらに変調部に入力される (データの位相ずれの発生)。センサデータのバイト列からデータの区切り (ペイロード) 部分を自動抽出することでデータの同期を揃え、OFDMトランスミッタ部が扱える形式に変換するエンコーダを開発した。受信機側においても、データの位相ずれが発生する。これを補正するため、ビット列の区切りを自動判別し、OFDM変調信号からバイト列を復元する技術を開発した。
- ②Hack RF One搭載のRFトランシーバは伝送帯域幅が狭いため、これにOFDM変調波を収めるためのパラメータ調整を行った。サブキャリア数を63個、サブキャリア間隔を312.5kHzに設定することで、20MHzの伝送帯域幅でOFDMを実現した。

これらの技術開発によりHack RF OneでOFDMを実行するための処理部 (フロントエンド) を実装した (図6)。

上記の技術開発により、Hack RF Oneにおいて10kbpsの伝送速度を達成し、この無線伝送路を用いた時分割の多重伝送を実現した。開発したOFDMを搭載したHack RF Oneに9軸の慣性計測装置 (IMU) を接続し、3軸×3センサから出力されるセンサデータ (100msサンプリング、2.88Kbps) をエラーなく伝送できることを確認した。構築した無線伝送システムを図7に示す。

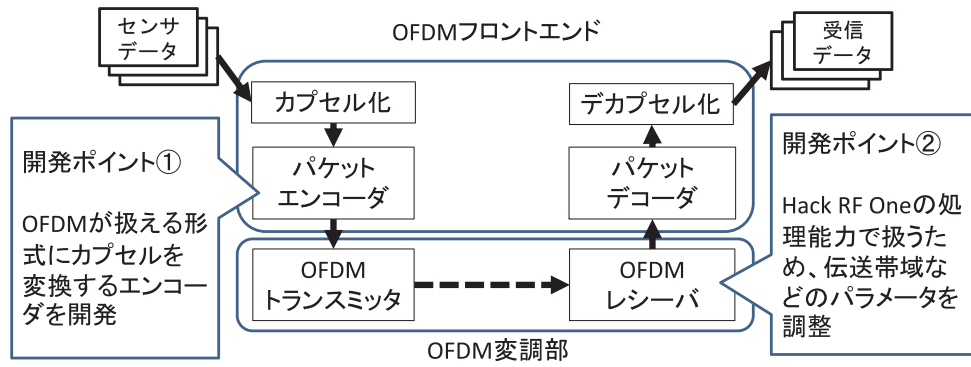


図6 OFDM フロントエンドの実装

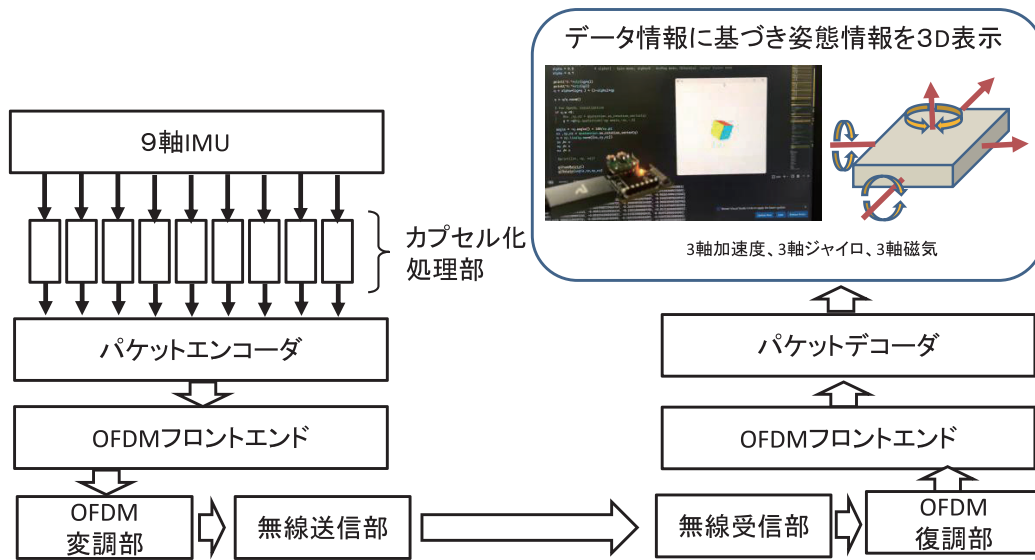


図7 9軸IMUデータ無線伝送システム

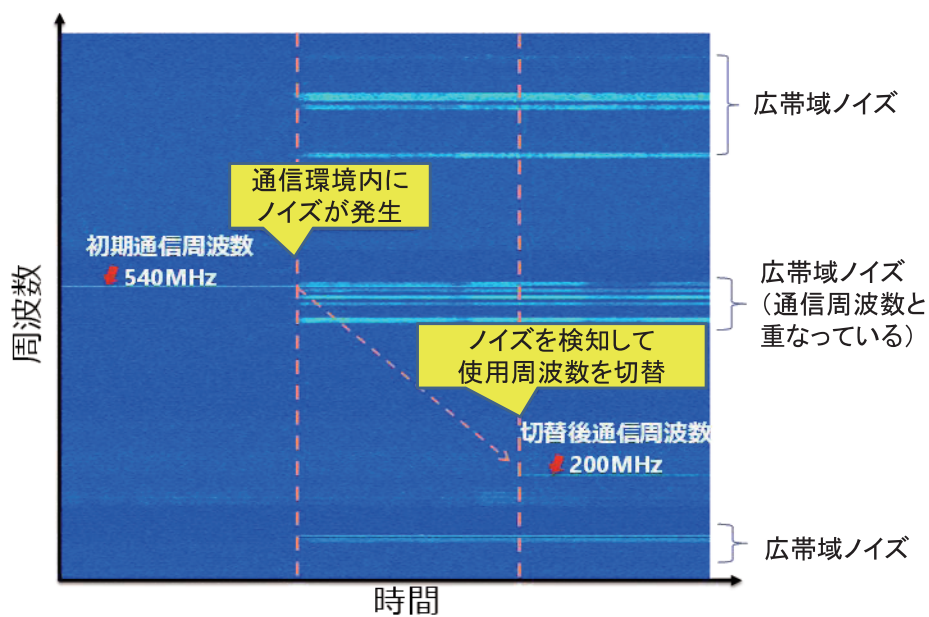


図8 電磁干渉発生時の自動周波数切り替え

4.3 通信安定化のための技術開発

ソフトウェア無線システムを移動体に搭載する場合、無線伝搬経路に発生する電磁ノイズによる妨害や、アンテナへの着雪による送信電力の減衰、降雨などによる無線信号の減衰などの通信環境の変動が通信データに及ぼす影響を軽減するための対策を考える必要がある。従来のハードウェア無線システムでは使用周波数が固定されているため、これらの通信環境の変動が発生すると通信が不安定になる課題があった。ソフトウェア無線システムは周波数を変更可能であるため、使用中の周波数の通信環境の変動を検知し、別の周波数に即時に変更し安定したデータ通信を行うことが可能となる。

Hack RF Oneを用いて、通信環境変動時に自動周波数切り替え機能を実現した例を図8に示す。この図では通信周波数(540MHz)を含め広帯域に電磁ノイズが発生している。データ送信側とデータ受信側は双方向の通信を行っており、データ受信側で観測した無線信号強度を送信側にフィードバックしており、電磁ノイズ発生により通信が不安定になると直ちに送信側でこれを検知し、これを回避することが可能となる。本研究では、送信側と受信側で通信不能時のプロトコル(次に使用する周波数、変調方式など)をあらかじめ取り決めておき、電磁ノイズなどで無線信号が途絶えた場合に周波数を自動的に切り替えることで通信安定性を確保する手法を開発した。図8の例では電磁ノイズ発生後に約10msで周波数切り替えが完了しており、ほぼ欠損なくデータを伝送できている。

5. おわりに

本研究では、ドローンなどの移動体における様々なセンサデータの通信手段としてソフトウェア無線を活用する際に必要となる基礎技術を開発した。またフィールドで無線通信を使う際に問題となる電磁ノイズなどの環境変動時でも安定した通信を行うための技術として、動作中に通信周波数を自動で変更できる技術を開発した。本研究の成果を活用することで、ユーザが様々なセンサを無線伝送システムに接続し、安定したデータ伝送を行うことが可能となる。

今後、移動体は多様な環境で多目的に使用されることが想定される。現在、環境計測などの分野を中心に、移動体に様々なセンサを搭載するニーズが高まっている。本研究で開発したソフトウェア無線の開発技術はこれらの需要に適用可能であり、引き続き応用研究を進めていく予定である。

コンブ漁場調査のための空撮画像解析技術に関する研究

浦池 隆文, 飯島 俊匡, 伊藤 壮生,
宮崎 義弘*, 湯浅 友典**, 相津 佳永**

Research on Aerial Image Analysis for Surveying Kelp Fishing Grounds

Takafumi URAIKE, Toshimasa IJIMA, Souki ITOU
Yoshihiro MIYAZAKI*, Tomonori YUASA**, Yoshihisa AIZU**

抄 録

北海道のコンブは全国生産量の約8割を占めており、道内ではホタテ、サケに次ぐ漁獲金額第3位の基幹漁業となっている。しかし平成元年以降生産量の減少が顕著であり、その要因として未利用のコンブ漁場が増加しているとの調査結果が出ているが、これは漁業者への聞き取り調査によるものであり、客観的な現況把握はなされていない。

そこで本研究では、コンブ生産の維持・増大に向けた効率的な漁場利用や適正な漁場管理を行うため、ドローンによる空撮と画像解析技術を活用して、沿岸域におけるコンブの繁茂状況を客観的、かつ定量的に把握する技術の開発に取り組んだ。コンブの主要産地である道内5地域（釧路、根室、日高、渡島、宗谷）を調査対象地域とし、ドローン空撮による画像の取得を行い、良好な海底画像を得るための撮影条件を整理した。画像の取得と平行して、コンブを含む海藻類の繁茂状況と底質のフィールド調査を行い、ドローン画像からコンブの繁茂状況を推定するための情報収集を行った。空撮画像に対し、RGB値などの色情報を基準とした特徴量の解析を行う画像解析手法を開発し、コンブのほか、ホンダワラ、スガモの分布推定を可能とした。空撮手法及び画像解析手法の改善を進めながら継続してデータ収集（3年間）を実施したところ、コンブ繁茂状況の経年変化を捉えることが可能となるなど、本手法によるコンブ漁場の現況把握の有効性を確認した。

キーワード：コンブ、ドローン、空撮、画像解析

1. はじめに

北海道のコンブは主に釧路、根室、日高、渡島、宗谷の5地域で生産され、全国生産量の約8割を占めている。道内ではホタテ、サケに次ぐ漁獲金額第3位の基幹漁業であり、漁業経営体数の半数がコンブ漁に従事するなど地域漁村経済を支える重要な産業となっている。しかし、コンブ生産量は平成元年以降の減少が顕著で、平成元年に約3万トンあったものが、近年では1万3千～5千トン前後で推移している¹⁾。コンブ漁場は全道で約32百万m²（平成12年のコンブ漁場面積の22%に相当）が使われていないという調査結果が出ているが、これは漁業者への聞き取り調査によるものであり、客観的な現況把握はなされていない。

そこで本研究では、効率的な漁場利用や適正な漁場管理を

実現することによりコンブ生産の維持・増大を図るため、北海道（水産技術普及指導所）及び室蘭工業大学と共同で、ドローン空撮と画像解析技術の活用により定量的にコンブ漁場の現況を把握する新たな調査手法の開発に取り組んだ。本報告では、工業試験場が主に担当したドローン空撮手法を中心に、開発した手法の概要を報告する。

2. ドローン空撮による沿岸画像の取得

コンブの主要産地である道内5地域（釧路、根室、日高、渡島、宗谷）を調査対象地域として、海岸線から沖合約300～500mの範囲において、事前に飛行経路を設定のうえ、ドローンの自動飛行機能により空撮を行った。空撮に用いた機材と空撮条件の概要を図1に示す。機体はカメラ一体型

* 渡島地区水産技術普及指導所 * Oshima Fisheries Technical Guidance Office

** 室蘭工業大学 ** Muroran Institute of Technology

事業名：一般共同研究

課題名：コンブ漁場調査のための空撮画像解析技術に関する研究



図1 使用機材と空撮条件の概要

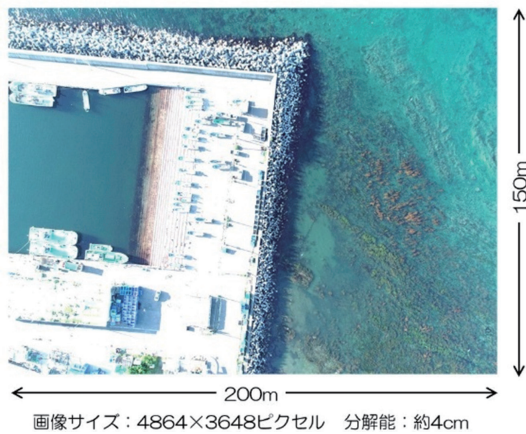


図2 空撮画像の例



図3 飛行経路の設定

ドローンのDJI製Phantom 4 Pro V2.0であり、飛行経路とカメラの設定には、専用アプリであるDJI Pilotを使用した。本機材はあらかじめ設定した飛行経路に従ってGPSによる自動飛行が可能となっている。

飛行高度は航空法で定められる最高飛行高度の150mとし、地上分解能約4cmで画像を取得した。撮影した画像の例を図2に示す。カメラ解像度は4864×3648ピクセルであり、約200m×150mの範囲を撮影可能である。後の画像結合(オルソモザイク画像の生成)における精度確保のため、画像の横方向に約60%、縦方向に約80%重なるようにクシ状の飛行経

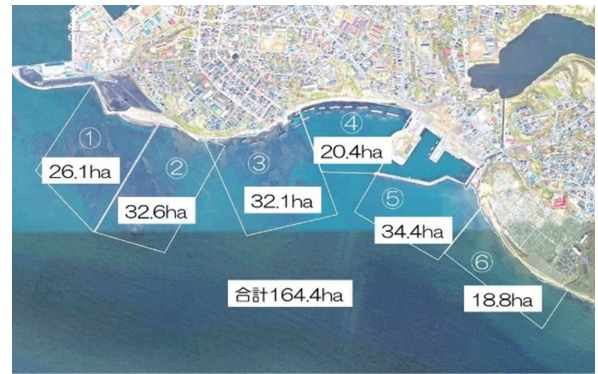


図4 釧路地区飛行区域

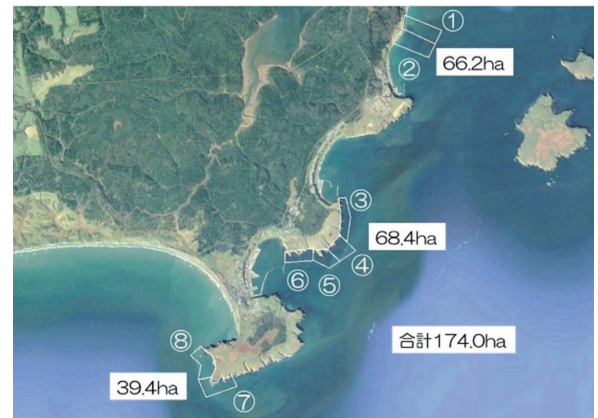


図5 根室地区飛行区域

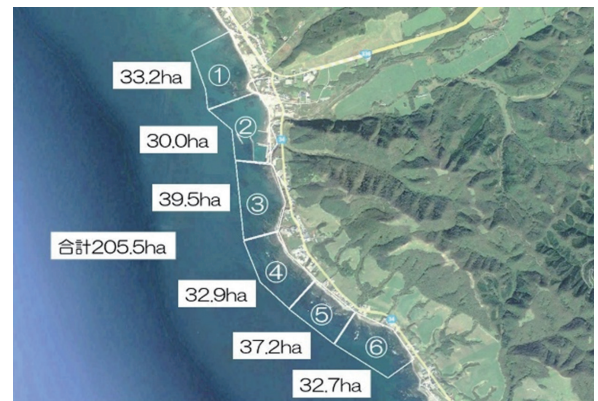


図6 日高地区飛行区域

路と撮影タイミングを設定し、自動飛行により空撮を行った(図3)。飛行速度約10m/s、バッテリー持続時間の制約から飛行時間が約15分となるよう飛行区域を設定し、一か所の飛行区域内で150~200枚程度の画像を取得した。本課題で調査対象とした道内5地域を図4~8に示す。それぞれの地区において、5~12か所の飛行区域を設定し、飛行区域近辺に設定した離着陸場所を移動しながら空撮を行った。

海上でのドローン空撮は環境条件の影響を受けやすく、太陽高度と天候・海況の変化は、画像の品質に大きく影響することがわかっている²⁾。取得した個別の画像の例を図9~12

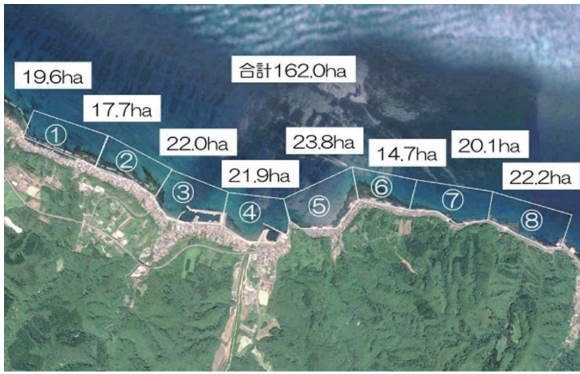


図7 渡島地区飛行区域

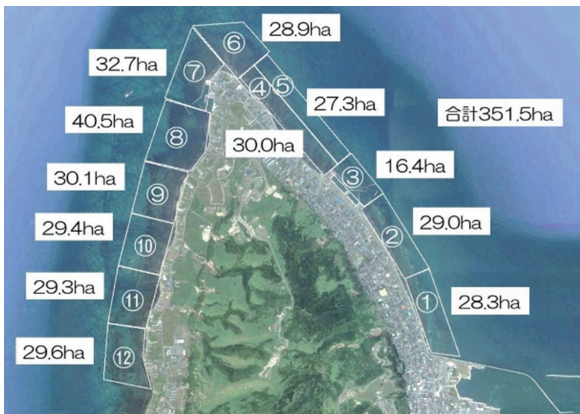


図8 宗谷地区飛行区域

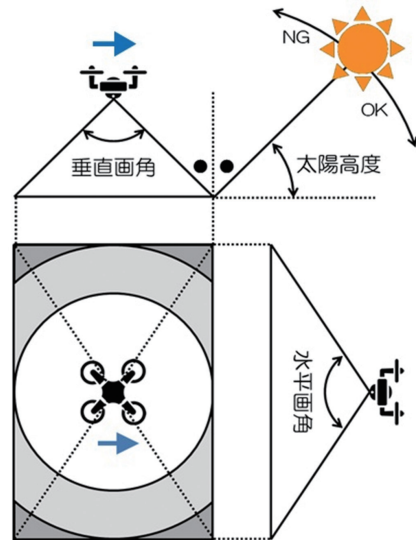


図13 カメラの画角と太陽高度の関係

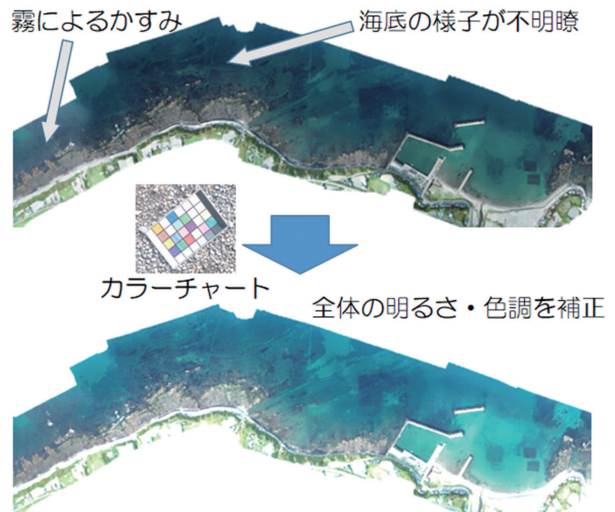


図14 カラーチャートによる画像の補正



図9 良好な画像



図10 太陽光の反射



図11 霧によるかすみ



図12 スジ状の波

に示す。図9は良好な画像の例であり、海底の様子が鮮明に記録されている。このような画像であれば、画像の結合が可能である。図10～12は画像の結合には不適となる画像の例である。太陽光の反射(図10)、霧による画像のかすみ(図11)、風の影響によるスジ状の波(図12)など、目視でも海底の様子を確認することが難しい画像では、画像の結合を適正に行うことが困難となる。この場合、撮影時の気象条件の確認と、太陽との位置関係を考慮することにより、空撮画像の品質をある程度確保することが可能である。

図13に、カメラの画角と太陽高度の関係を示す。撮影時の機体進行方向の正面に太陽がある場合、理論的には太陽高度が垂直画角に対応する角度より低ければ、太陽の写り込みを抑えることができる。しかし実際の飛行において機体の進行方向と太陽の方向が一致しない場合には、より低い太陽高度でも図13下図に示す中心円の外側(グレーの領域)に太陽の写り込みが発生する場合がある。このため、空撮を実施する時間帯としては、早朝もしくは夕方の方が望ましい。また、ある程度の明るさを確保する必要もあることから、日の出後1～3時間程度と、日の入り前3～1時間程度が空撮に適した時間帯となる。これに加え、色補正用のカラーチャートを離着陸時に撮影し、現像ソフト(本研究では市川ソフトラボラトリー社製SILKYPIX DEVELOPER STUDIOを使用)による後処理で明るさと色調の補正を行った後、画像の状態に応じてかすみ除去機能を活用することで良好な画像を得ることが可能となる(図14)。



図 15 生成した結合画像の例（渡島地区）

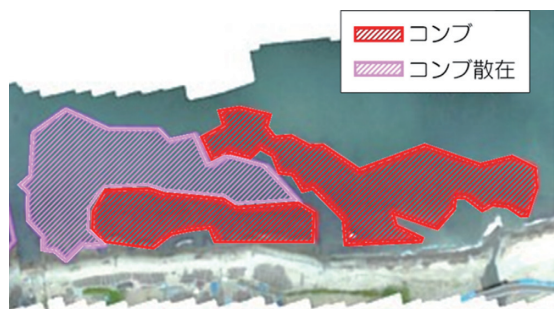


図 16 フィールド調査結果マッピングの例

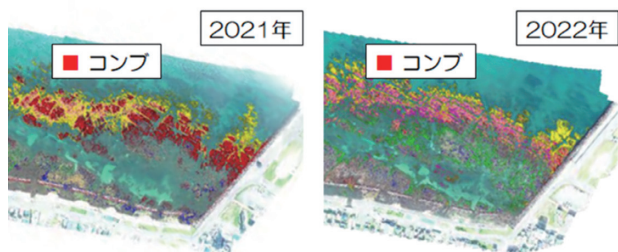


図 17 海藻類分布推定の例

以上をふまえ、道内5地域においてドローンによる空撮を実施し、コンブ繁茂状況を推定するための画像の取得を行った。取得した画像を用い、Agisoft社製Metashapeを使用して海域ごとに結合画像を生成した。図15に生成した画像の例を示す。

3. 漁場のフィールド調査

空撮画像の取得を行った各調査地域において、コンブのほか海藻類の繁茂状況と底質の状況を把握するため、水産技術普及指導所が中心となってフィールド調査を行った。調査は、漁船に搭載したGPSロガーによる航跡の記録、漁業者への聞き取り、備船による船上からの目視観察などにより行い、調査結果を空撮で取得した画像にマッピング（図16）することにより、画像解析のもととなるデータを作成した。

4. 画像解析手法の開発

画像解析手法の開発は、室蘭工業大学が中心となって行った。フィールド調査により海底の状況が特定された箇所において、ドローン空撮画像のRGB値など色情報を基準とした特徴量解析を行うことで、画素毎にコンブの他、ホンダワラ、スガモの検出を可能とする画像解析アルゴリズムを開発した。開発したアルゴリズムを画像全体に適用することで、各海藻類の分布を推定することが可能となった³⁻⁶⁾。図17にコンブ分布推定の例を示す。図は、同一地点での2021年と2022年の比較を表している。2021年は図示した部分にコンブが分



図 18 調査の手引き

布すると推定されたが、2022年にはほとんど推定結果が得られなかった。これは、フィールド調査や実際の漁獲状況と一致していた。このように、継続したデータ収集と解析により、コンブ繁茂状況の経年変化を捉えることが可能となった。

5. おわりに

ドローン空撮、フィールド調査、画像解析技術の開発により、コンブ漁場の客観的な現況把握を可能とする調査手法を確立した。今後は、本研究の成果を漁業者自らが活用・実施できるよう「手引き」（図18）として取りまとめるとともに、道内コンブ漁業の持続的な発展のため、漁場の維持管理体制の確立に向けた取り組みを進める予定である。

参考文献

1) 佐々木正義:北海道のコンブ漁業の現状, 北水試だより,

第94号, pp.5-10,(2017)

- 2) 浦池隆文, 飯島俊匡 他: UAVを活用した海草繁茂状況調査の効率化, 北海道立総合研究機構工業試験場報告, No.317, pp.1-8, (2018)
- 3) 持館 稜, 湯浅友典 他: UAV空撮画像を用いた海藻植生の解析方法の検討, 第55回応用物理学会北海道支部/第16回日本光学会北海道支部合同学術講演会, (2020)
- 4) 持館 稜, 湯浅友典 他: UAV空撮画像から海藻植生を探索する画像解析アルゴリズムの改良, 日本光学会年次学術講演会, (2020)
- 5) 高橋春香, 高橋育登 他: UAV空撮画像を用いた海藻植生の解析手法の構築～統一判定基準の設定方法の検討, 日本光学会年次学術講演会, (2022)
- 6) 高橋育登, 高橋春香 他: UAV空撮画像を用いた海藻植生の解析手法の改良～主成分分析を導入した判定基準の評価, 第70回応用物理学会春季学術講演会, (2023)

曲げ加工しても剥離しにくい溶融亜鉛めっきの開発

飯野 潔, 宮腰 康樹, 中嶋 快雄, 櫻庭 洋平

Development of Hot-dip Zinc-galvanized Steel that can be Bent

Kiyoshi IINO, Yasuki MIYAKOSHI, Yoshio NAKAJIMA, Yohei SAKURABA

抄 録

溶融亜鉛めっきの浴に、わずかな量のアルミニウムを添加すると、亜鉛-鉄合金層の形成が抑制されて純亜鉛層のみのめっき膜となる。この純亜鉛層のみからなる亜鉛めっきは硬い合金層が存在しないため柔らかく、めっき後に曲げ加工しても剥離しにくいことを確認した。めっき後に曲げ加工が可能であれば、酸洗時の応力集中部への水素侵入に由来する水素脆化（めっき脆性）のリスクを低減できる、新たなめっき技術となる。

キーワード：溶融亜鉛めっき, 密着性, 曲げ加工, 水素脆化

1. はじめに

溶融亜鉛めっきは、溶融した亜鉛浴に鋼板や鋼板を組み立てた半製品を浸漬し、表面に亜鉛のめっき膜を形成する表面処理技術である。溶融亜鉛めっきは、塗装しなくとも耐食性に優れるため、土木構造物や建築物、農業機械等に広く利用されており、北海道においても工業を支える重要な技術となっている。

溶融亜鉛めっきで問題になるのはめっき脆性（水素脆化）である。通常、曲げ部を有する溶融亜鉛めっき製品は、めっき後の曲げ加工は行わず、素材に曲げ等の加工を行い半製品として組み上げてから酸洗→フラックス処理→溶融亜鉛浴に浸漬という工程となるが、曲げ加工工程における残留応力発生部位に酸洗工程で水素が侵入するため水素脆化を引き起こすことがしばしば問題となる¹⁾。

溶融亜鉛めっき後に塑性加工を行えば、このようなめっき脆性のリスクを低減できると思われる。しかし、溶融亜鉛めっきではめっき膜中に亜鉛-鉄合金層が形成され、この合金層が硬くて脆く、変形を受けるとまず合金層に膜厚方向の縦割れが発生し、この縦割れが進展し、めっき膜/母材界面で横方向に伝搬してめっき膜が剥離することが知られている²⁾。

一方、亜鉛浴中に微量なアルミニウムが含まれる場合、鋼板と亜鉛めっき層界面に、鉄-アルミニウムあるいは鉄-アルミニウム-亜鉛の組成からなる薄い合金層が形成されて亜鉛浴の亜鉛と母材の鉄原子の相互拡散が阻害され、めっき膜中の亜鉛-鉄合金層が形成されず、軟らかい純亜鉛層のみのめ

っき層となる条件があることが知られている³⁻¹¹⁾。

微量なアルミニウムが含まれる亜鉛浴で溶融亜鉛めっきを行って亜鉛めっき層中に硬くて脆い亜鉛-鉄合金層が形成されない場合、曲げ加工を受けても母材に追従して変形し、剥離しにくいめっきとなる可能性があるが、このような観点での研究はほとんど報告されていない。さらに、めっき後に曲げ等の加工ができることがわかれば、酸洗→フラックス処理→溶融亜鉛めっき→曲げ等の加工という工程がとれるため、加工時の残留応力に随伴して起きる酸洗時の水素侵入による水素脆化のリスクが少なくなるメリットがある。本報告では微量なアルミニウムを添加した亜鉛浴で溶融亜鉛めっきを行い、このめっき試料を曲げ加工した場合のめっき膜の剥離挙動について検討を行った結果を報告する。

2. 実 験

微量なアルミニウムを含む亜鉛 (Zn-0.15 wt%Al) インゴットをバス中で溶解し、460～470℃で保持した。この浴中に120 mm×20 mm×t 1.6 mmの軟鋼板 (表1) を10分間浸漬し、試料を作製した (以下Al添加めっきと称す)。この試料を曲げ半径が試料の厚さの倍となるように調整しつつ180°

表1 軟鋼板の化学成分 (wt%)

炭素	ケイ素	マンガン	リン	硫黄	鉄
0.07	0.03	0.47	0.016	0.002	Bal.

事業名：経常研究

課題名：密着性に優れるZnめっき/鋼板界面の組織制御法

曲げてU字型に加工した(図1)。比較材として、軟鋼に溶融亜鉛めっきして市販されている板材(以下通常めっきと称す)を、同様に曲げ半径が試料の厚みの倍となるよう180°曲げてU字型に加工した。

試料の曲げ部先端付近を切断して樹脂に埋込、研磨して、めっき膜の剥離挙動を観察した。めっき膜の組織観察は光学顕微鏡(オリンパスGX71)を使用した。また、めっき膜の観察と組成分析は電界放出型走査電子顕微鏡(日本電子JSM-7001F)を使用した。めっき膜の硬さはマイクロビッカース硬さ計(マツザワMMT-X3)で測定し、荷重は5 gf、保持時間は15 sとした。

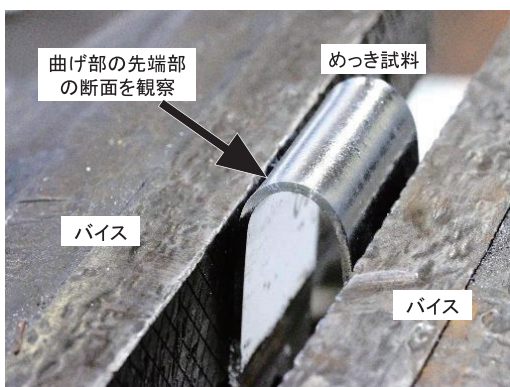


図1 180° 曲げ加工の様子

3. 結果

3.1 めっき膜の曲げ加工による剥離

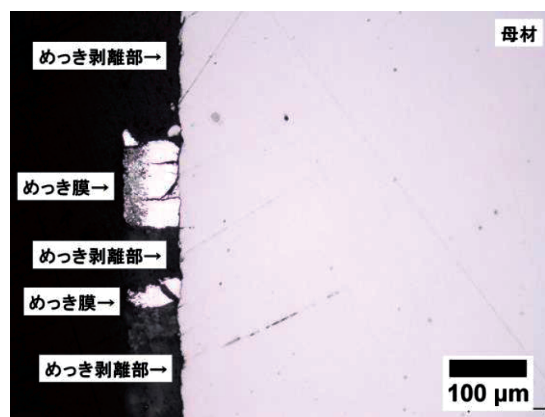
図2に通常めっき及びAl添加めっきの曲げ加工先端部付近の断面組織を示す。通常めっきでは曲げ加工によってめっき膜に縦割れが生じ、一部では母材からめっき膜が完全に剥離していることがわかる。一方Al添加めっきは曲げ加工してもめっき膜は剥離が観察されない。Al添加めっきは曲げ加工前のめっき膜厚が約30 μm 程度であったが、曲げ加工後は約10 μm となっている。一方通常めっきにおいては曲げ加工後の剥離していない部位のめっきの膜厚も曲げ加工前のめっき膜厚も約70 μm でありほとんど変化がなかった。この加工前後のめっき厚さの変化は、曲げ加工時にAl添加めっきのめっき膜は母材の曲げに追従して変形して薄くなることを示していると考えられる。

3.2 合金層とめっき膜の硬さ

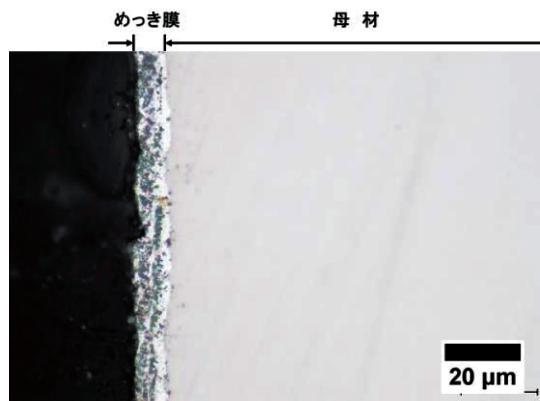
図3に通常めっき及びAl添加めっきのマイクロ組織を示す。また、図中にはめっき膜の各層で測定したビッカース硬さの値も示している。通常めっきでは、めっき膜は3つの層に分かれており、最も表面に近い層のみ純亜鉛層であるが、母材に近いところでは δ 1(デルタワン)層及び ζ (ツエータ)層と呼ばれる亜鉛-鉄合金層が形成されている¹²⁾。また、

表層に近い純亜鉛層の53HVに比べZn-Fe合金層は233HV、132HVと硬いことがわかる。

一方Al添加めっきでは、めっき膜中に硬い合金層がなく、通常めっきの純亜鉛層とほぼ同じ硬さ(55HV)である。Al添加めっきでは、Zn-Fe合金層が形成されておらず、めっき膜は柔らかい純亜鉛層のみからなり、このため曲げ加工時に母材の変形に追従して変形し、剥離しないものと考えられる。

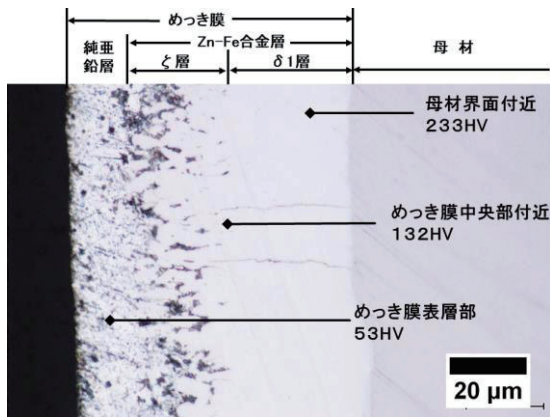


(a) 通常めっき

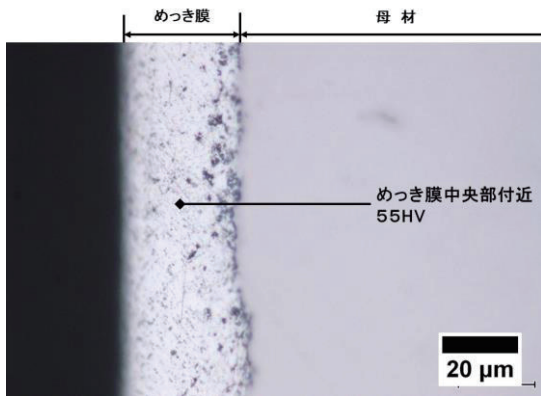


(b) Al 添加めっき

図2 曲げ加工部の断面

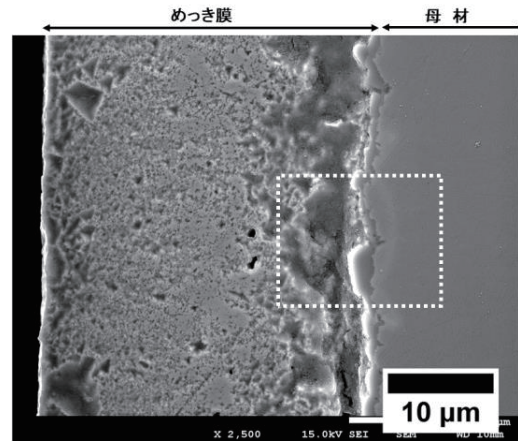


(a) 通常めっき

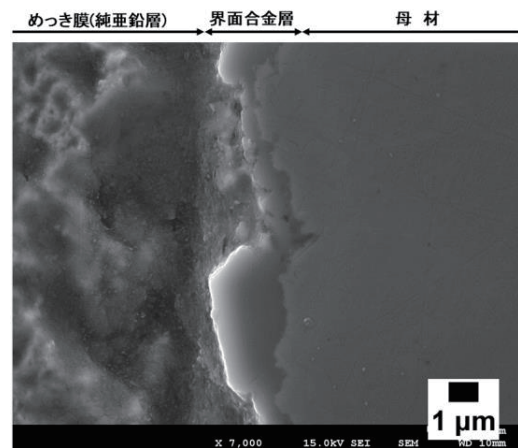


(b) Al 添加めっき

図3 めっき試料の断面組織



(a) めっき膜及び母材界面



(b) (a)の界面部拡大

図4 Al 添加めっきのめっき膜/母材界面の走査型電子顕微鏡写真

3.3 Al添加めっきの界面近傍のSEM観察と定性分析

図4にAl添加めっきのめっき膜/母材界面をSEM観察した結果を示す。Al添加めっきは、めっき膜/母材界面に $\approx 1\mu\text{m}$ 前後の合金層が形成されている(界面合金層と称す)。図5にめっき膜/母材界面近傍の元素分布を、図6にAl添加めっきの主要箇所における蛍光X線スペクトルを示す。Al添加めっきの界面合金層は鉄-アルミニウム-亜鉛-ケイ素で構成されていることがわかる。この層が一種のバリア層となって亜鉛と鉄の相互拡散を抑制し、めっき膜中で亜鉛-鉄合金層が形成するのを妨げたものと考えられる。ケイ素は界面合金層近傍のめっき膜側にも存在している。ケイ素は、めっき浴にも軟鋼母材にもごく微量しか存在していないが、わずかに存在するケイ素が何らかの理由で界面近傍に濃縮したと推定される。

文献3から11においては、この界面合金層の組成を鉄-アルミニウムまたは鉄-アルミニウム-亜鉛の合金と分析しているが、本研究では鉄-アルミニウム-亜鉛にさらに微量(半定量分析において約0.3wt%)のケイ素が含まれる鉄-アルミニウム-亜鉛-ケイ素という4元組成であることがわかった。これは先行研究の多くが純度の高い鉄を母材としてめっき実験をしているのに対し、本研究ではケイ素を含む実用鋼板を母

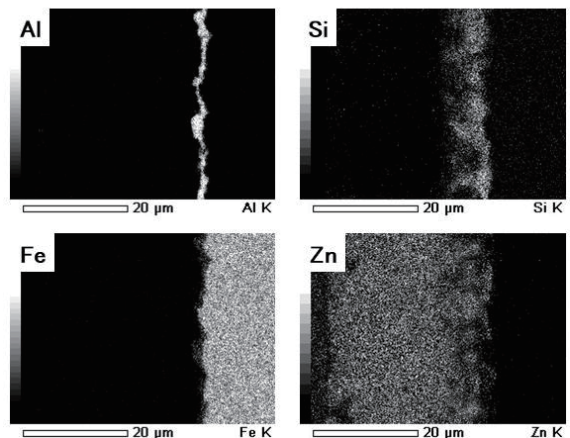
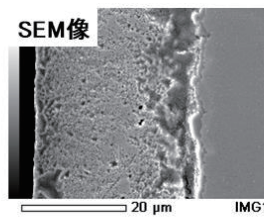
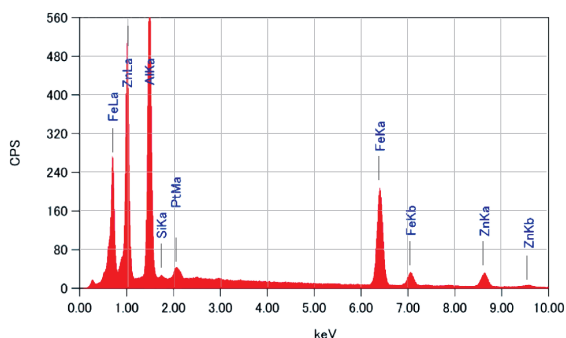
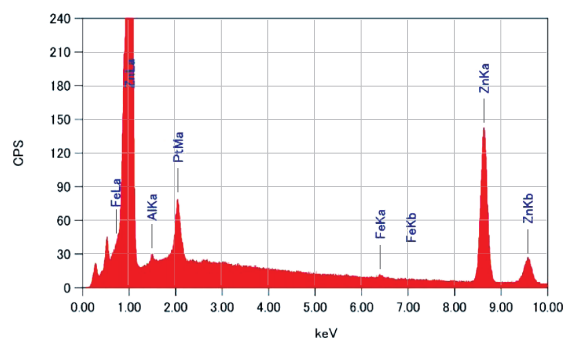


図5 Al 添加めっきのめっき膜/母材界面の元素マッピング

材として実験したためと思われる。母材及びめっき浴に微量に含まれるケイ素が、界面合金層の形成に関与する可能性があることは、本研究で得られた新しい知見である。



(a) 界面合金層から得られた蛍光X線スペクトル



(b) めっき膜から得られた蛍光X線スペクトル

図6 蛍光X線スペクトル

4. まとめ

亜鉛浴中に微量なアルミニウムが含まれる場合、鋼板（鉄板）と亜鉛めっき層界面に、鉄-アルミニウムあるいは鉄-アルミニウム-亜鉛の組成からなる薄い合金層が形成されて亜鉛浴の亜鉛と母材の鉄原子の相互拡散が抑制され、めっき膜中の亜鉛-鉄合金層が形成されず、純亜鉛層のみのめっき膜となることが知られている。この純亜鉛層のみのめっき膜は亜鉛めっき層中に硬くて脆い亜鉛-鉄合金層が形成されないため、曲げ加工を受けても剥離しにくいめっきとなる可能性を見出すことができた。めっき後に曲げ加工を行う工程に変更し、酸洗時に加工時の残留応力集中部に水素が侵入して発生するめっき脆性のリスクを低減することができれば、大きなメリットとなる。

参考文献

- 1) 宮腰康樹, 他: 高感度ガス測定装置による新しい水素脆化判別の研究, 工業試験場成果発表会プログラム・発表要旨, p30, (2017)
- 2) 坪田 大, 他: Fe-Zn系金属間化合物複相皮膜の破壊機構, 鉄と鋼, 102巻12号, p714-p721, (2016)
- 3) 高田尚記, 他: 熔融Znめっき鋼板のFe/Zn固液界面反応に及ぼす鋼板組織の影響, 鉄と鋼, 100巻9号, p1172-p1179, (2014)
- 4) T. Kato, et al: "Formation of the ζ phase at an interface between an Fe substrate and a molten 0.2 mass% Al-Zn during galvannealing." *Acta Materialia*, Volume 48, Issue 9, pp.2257-2262, (2000)
- 5) 大部 操, 他: 熔融亜鉛めっき鋼板の現状と将来, 鉄と鋼, 60巻6号, pp.101-118, (1974)
- 6) 浦井正章, 他: 合金化熔融亜鉛めっき鋼板のパウダリング特性に及ぼすめっきならびに合金化条件の影響, 鉄と鋼, 77巻7号, pp.113-120, (1991)
- 7) 稲垣淳一: ミクロ解析によるZn-Fe合金化反応の研究, 表面技術, 51巻6号, pp.32-38, (2000)
- 8) 稲垣淳一, 他: 合金化熔融亜鉛めっき鋼板製造プロセスにおける合金反応と皮膜構造, 鉄と鋼, 79巻11号, pp.1273-1277, (1993)
- 9) 山口 洋, 他: 薄鋼板の熔融亜鉛メッキにおける反応機構, 鉄と鋼, 63巻7号, pp.1160-1169, (1977)
- 10) 日戸 元, 他: 熔融亜鉛めっき鋼板の合金化におよぼす亜鉛浴中のAlの影響, 鉄と鋼, 70巻14号, pp.1719-1726, (1984)
- 11) 斎藤 実, 他: 熔融亜鉛めっきにおける初期合金層形成挙動, 鉄と鋼, 77巻7号, pp.947-954, (1991)
- 12) 柴山 裕: 熔融亜鉛めっきの技術と装置, 表面技術, 68巻11号, pp.598-603, (2017)

レーザー加工によるジルコニア板の表面改質

中嶋 快雄, 飯野 潔, 鈴木 逸人, 櫻庭 洋平

Surface Modification of Zirconia Plate by the Laser Irradiation

Yoshio NAKAJIMA, Kiyoshi IINO, Hayato SUZUKI, Yohei SAKURABA

抄 録

ジルコニアは一般に白色のセラミックスである。その製造時における焼結条件によっては黒色のものを製作できる。筆者らは、窒素雰囲気中で黒色ジルコニア板の表面にレーザーを照射すると、照射部位が金色の光沢を呈し、導電性を有する皮膜が形成されていることを見出し、ジルコニウム窒化物が生成したものと推定した。このことは、絶縁体であるセラミックスの表面に導電性皮膜を形成することで複合材料創製の可能性が示唆される。この技術を白色の汎用ジルコニアに適用できると、材料の入手が容易な分、活用の可能性が広がることとなる。本研究では、汎用ジルコニア板にレーザーを照射し、改質部の導電性及び耐環境性を評価した。その結果、波長1070 nm, 出力160 W, 集光径0.3 mm, 走査速度200 mm/s, 走査間隔0.2 mmの加工条件で形成した改質部は $10^2 \Omega/\square$ 桁の導電性を有し、食塩水に対する耐食性があることがわかった。

キーワード：ジルコニア (酸化ジルコニウム), レーザー照射, 導電性皮膜

1. はじめに

セラミックス材料は、耐熱性、耐環境性に優れる一方、その多くは電気伝導率が極めて小さく、絶縁体に分類される¹⁾。したがって、セラミックス材料に導電性皮膜を形成する技術が実用化できれば、セラミックス特有の熱や腐食環境下に耐える性質を持ち合わせた電気・電子デバイスなどへの応用展開も期待できる。

ジルコニアは、金属ジルコニウム (元素記号Zr, 原子番号40) の酸化物である二酸化ジルコニウム (ZrO_2) を主成分とするセラミックス材料であり、セラミックス材料の中ではじん性が高いため、工業材料のほか歯科材料や装飾品などに用いられる。特に融点が $2715^\circ C$ と高く、高温に耐えるため、耐熱性素材として多く用いられる²⁾。一般に白色であるが、焼結条件によっては黒色のものを製作できる。

筆者らは、黒色ジルコニア板の表面に窒素雰囲気中でレーザーを照射した実験により、照射部位が金色の光沢を呈し、導電性を発現する現象を見いだした。そこで、この照射部位を観察・分析すると、ジルコニウム窒化物の生成が推定された³⁾。

本研究では、汎用ジルコニア板の表面に窒素雰囲気中でレーザー照射し、生成した改質層の分析、及びその皮膜の特

性として熱や腐食に対する耐環境性を評価したので報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材料

実験には市販品のジルコニア板を供した。表1に供試材の成分を蛍光X線分析装置 (Rigaku製 ZSX Primus II) を用いて分析した結果を示す。この材料は、主成分ジルコニアにイットリア (Y_2O_3) 等の酸化物を添加した部分安定化ジルコニアである。

表1 成分分析結果 (mass%)

ZrO_2	Y_2O_3	HfO_2	Al_2O_3
91.4	6.0	2.2	0.4

入手した材料は、辺50mm, 厚さ3mmの角板である。これを、実験に適する寸法に切断して用いた。

2.2 試料の作製 (レーザー照射)

レーザー改質試料は、実験の目的に合わせて2種類のレーザー加工機で作製した。

事業名：経常研究

課題名：レーザー加工によるセラミックスの表面改質に関する基礎試験 (R3～R4)

一つ目は、レーザー照射部の基本的性状を観察するために、ジルコニア板の表面に1本の直線を描画した試料（以下「単線試料」）を作製した。図1に単線試料の模式図を示す。ジルコニア板は、12mm角に切出したものを使用し、表面の仕上げ加工は行わず研削面のままで、アセトンで洗浄して実験に供した。

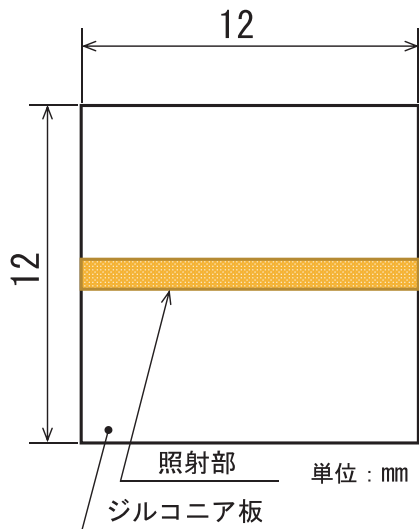


図1 単線試料の模式図

レーザー照射の設備は、ファイバーレーザー加工機（住友重機械工業製、レーザー発振器（IPG Photonics製 YLS-2000））及び専用チャンバーを乗せたXYステージを用いて、窒素置換雰囲気中で試料に照射実験を行った。図2に実験装置の外観を示す。試料の雰囲気は、専用チャンバーに20 L/minの窒素ガスを流入・置換させ、酸素濃度が0%になったところで実験を開始した。照射条件は、出力60～630 W、集光径0.5～1.5 mmの範囲で変化させて金色の光沢が生成される条件を絞り込み、表2の加工条件の試料を評価した。

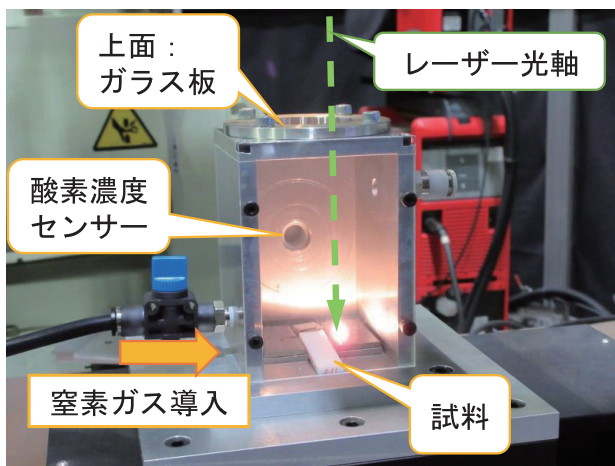


図2 専用チャンバーによるレーザー照射状況

表2 単線試料のレーザー加工条件

波長	1070 [nm] (固定)
出力	100 [W]
集光径	1.0 [mm]
照射角度	前進角 2°
走査速度	50 [mm/s]

二つ目は、レーザー照射部の導電性を正確に評価するため、面状にレーザー照射部を生成した試験片（以下「ハッチング試験片」）を作製した。図3にハッチング試験片の模式図を示す。供試材は前述と同様の12mm角の板である。照射は、ハッチング間隔を設定できる金属粉末積層造形装置（松浦機械製作所製 LUMEX Avance-25）を使用し、低酸素の窒素ガス雰囲気（酸素濃度2%以下）で照射実験を行った。まず加工条件を様々に変え（レーザー出力40～160 W、集光径0.3～0.5mm、走査速度200～2,000 mm/s）、明瞭な金色を呈した条件を選んでハッチング試験片を作製した。表3にハッチング試験片のレーザー加工条件を示す。

この装置を用いて、後述する導電性測定のため10mm角の面及び四探針法に対応する端子部を作製した。端子部は、面の加工直後に、直径0.6mmの円を1.5mmの等間隔に中心線上に4点を重ねて照射した。

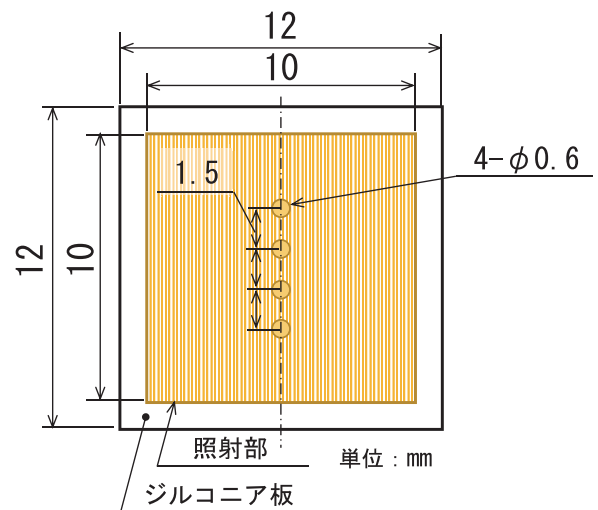


図3 ハッチング試験片の模式図

表3 ハッチング試験片のレーザー加工条件

	面状パターン	端子部
波長	1070 [nm]	1070 [nm]
出力	160 [W]	80 [W]
集光径	φ 0.3 [mm]	φ 0.2 [mm]
走査速度	200 [mm]	400 [mm]
走査間隔	0.20 [mm]	0.05 [mm]

2.3 レーザー照射部の評価

2.3.1 組織観察及び成分分析

レーザー照射部の表面及び断面について、実体顕微鏡（Olympus製 SZX16）により観察した後、走査型電子顕微鏡（以下「SEM」、日本電子株式会社製 JSM-6610LA）及び付属のエネルギー分散型X線分析装置（以下「EDS」）により、マイクロ観察と観察領域の元素分析を行った。また、試料表面については、電子プローブマイクロアナライザー（以下「EPMA」、日本電子株式会社製 JXA-8100）及び付属の波長分散型X線分析装置（以下「WDS」）により高精度な元素分析を行った。

さらに、X線光電子分光装置（KRATOS製 AXIS-HSi）（以下「XPS装置」）を用い、真空度 2×10^{-8} Torr の条件下で、レーザー照射部と非照射部の表面近傍における窒素原子を測定した。

2.3.2 導電性の評価

レーザー照射部の導電性は、表面抵抗率 ρ_s (Ω/\square) を測定することで評価した。表面抵抗率の測定は、低抵抗率計（三菱化学アナリティック製 MCP-T610）を使用し、四探針法（電圧90V）により算出した。

2.3.3 耐環境性（耐熱性及び耐食性）の評価

レーザー照射部の耐環境性評価として、耐熱性試験及び耐食性試験を行った。

耐熱性試験は、ハッチング試験片を大気雰囲気中の電気炉に装入後、 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ の昇温速度で加熱し、設定した温度（ $240 \sim 600^\circ\text{C}$ ）に到達後、6時間保持した。炉冷後に試験片を取出し、蒸留水で試験片を洗浄後、外観観察及び表面抵抗率の測定を行った。測定後の試料は再び炉に装入し、設定温度での加熱時間が積算で30時間になるまで繰り返した。ただし、表面抵抗率が $10^7 \Omega/\square$ 以上の試料は絶縁体と見なして試験を終了し、炉への再装入を行わなかった。

耐食性試験では、溶液として海水を模した食塩水（濃度3.5wt%）、化学プラントを想定した硫酸（濃度1.0 vol%）及び塩酸（濃度1.0 vol%）を選定した。試験は、常温下で各溶液を入れたビーカーに対し、1個のハッチング試験片を浸漬し、浸漬時間72時間、144時間、231時間及び322時間経過後に取出し、蒸留水で洗浄後、外観観察と表面抵抗率の測定を行い、再びビーカーに戻し、積算で392時間までの浸漬試験を行った。

また、食塩水については、積算21週間の長期浸漬試験を別途行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 レーザー照射部の基本的性状

3.1.1 組織及び元素分布

図4に単線試料の外観を、図5に実体顕微鏡で観察したレーザー照射部付近を、それぞれ示す。レーザー照射部のほぼ全線にわたって金色の光沢を有する改質層が形成されている。照射部の中央付近には約 $200 \mu\text{m}$ 幅の溶融・凝固部とみられる組織が観察される。また、表面にレーザー走査線を横断する方向の割れが多数観察されるとともに、金色部の外側はやや黒変しており、レーザー走査と同方向に割れが走っている。

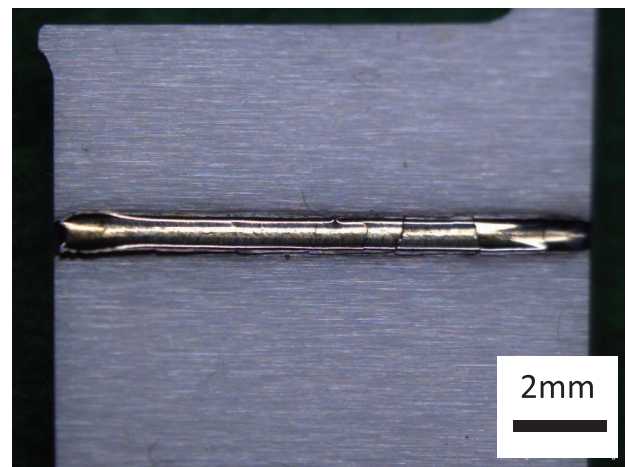


図4 単線試料の外観

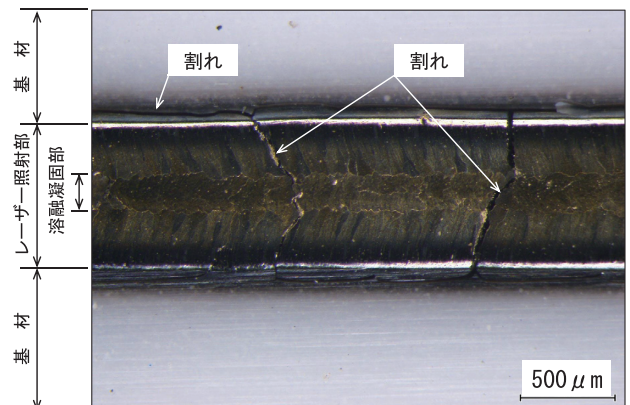
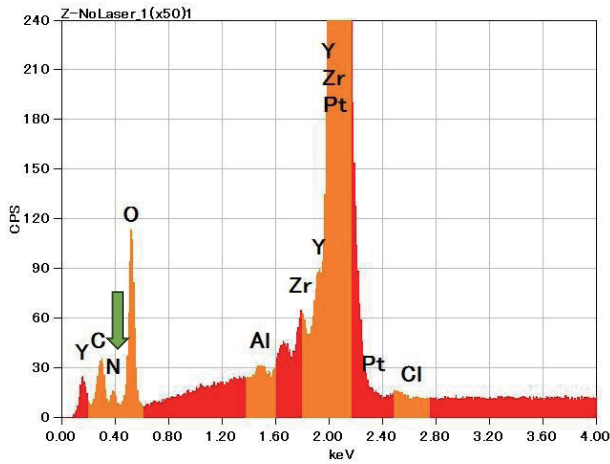
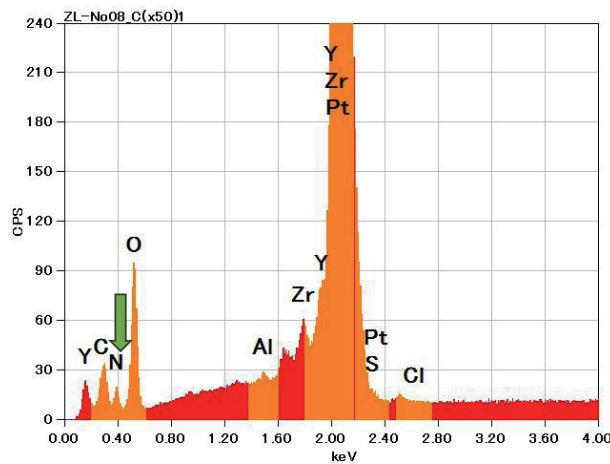


図5 レーザー照射部表面の実体顕微鏡観察

図6にレーザーを照射していない基材（ジルコニア）表面及びレーザー照射部のEDS分析結果を示す。基材の表面及びレーザー照射部からは、わずかではあるが窒素が検出された。



a) ジルコニア基材表面



b) レーザー照射部

図6 基材及びレーザー照射部のEDS分析結果

図7にレーザー照射部の断面を実体顕微鏡で観察した結果を、図8に同じ断面をSEM観察した結果を示す。レーザーによる改質組織は、レーザーの照射部を中心に半だ円状に深さ200 μ m程度まで黒色化する現象が観察されたが、金色光沢を呈する層はこの断面からは観察されない。金色光沢に相当する層は、SEM観察における倍率を10,000倍以上まで拡大しても観察されなかったことから、極めて薄い薄膜であると考えられる。また、黒色部の内側にレーザー照射時の急熱急冷による熱応力で生じたと推定される半だ円状の割れが観察される。図8のSEM像より、レーザー照射部は周りの基材組織と大きな違いが見られないが、表面付近は照射部中央が盛り上がり、レーザー照射時に基材が溶融したことをうかがわせている。すなわち溶融部が表面張力により中央がやや膨らんだ状態で凝固した痕跡と推測される。

断面組織のEDS分析では、表面からの分析結果と同様にレーザー照射部近傍のみならず基材内部でも窒素がわずかに検出された。

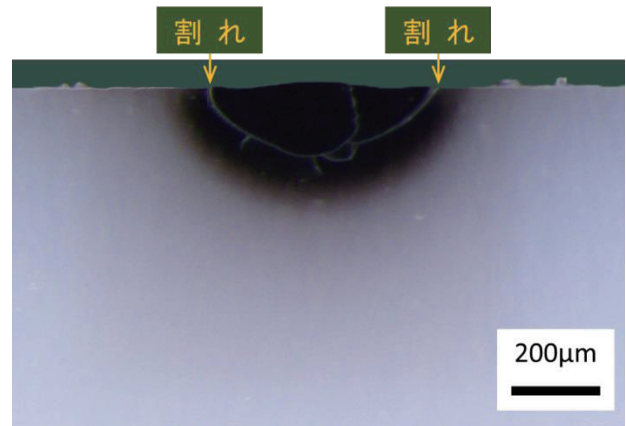
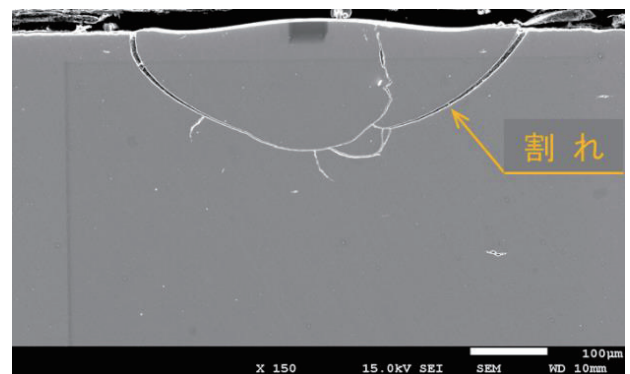
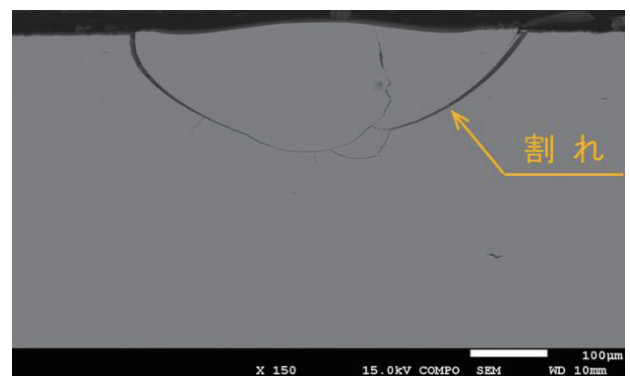


図7 断面観察（実体顕微鏡）



a) 二次電子像



b) 組成像

図8 断面観察（SEM）

図9にレーザー照射部と非照射部との境界をEPMAにより面分析した結果を示す。それぞれの図内の上側がレーザー非照射部、下側が照射部である。右上図(図内下端にNとあるもの)が窒素の、左下図(Oとあるもの)が酸素の結果である。1つの図内に限りコントラストの差異により検出量の多寡を比較でき、暗い部分は量が少なく、明るい部分は量が多いことを示す。N(右上図)の分析結果は、基材よりも照射部は明るいことから、照射部の方が多く窒素が検出されたことを示している。またO(左下図)については、基材よりも照射部は暗いことから、基材に比べ照射部は酸素が少ない結果であることがわかる。わずかな違いではあるが、照射部は窒素が多く酸素が少ないことが確認できる。

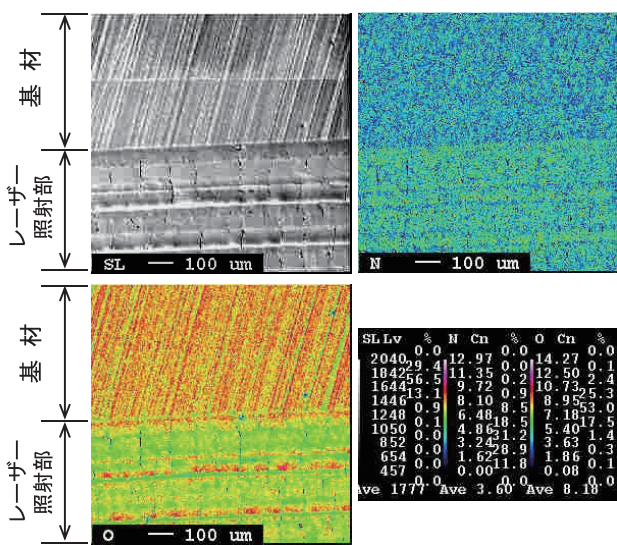


図9 EPMA分析結果

前報³⁾の黒色ジルコニアではジルコニア基材に窒素が存在していなかったため、レーザー照射部に窒素が確認できれば窒化された可能性が高いと考えられた。しかし、今回の汎用ジルコニアは、基材自体からも窒素が検出されている。そこで、レーザー照射部に窒素化合物が生成しているかを調べるために、レーザー照射部及び基材をXPSで分析し、レーザー照射部の窒素化合物の有無を比較した。図10にXPSによる分析結果を示す。上の実線がレーザー照射部の、下の実線がレーザー照射をしていないジルコニア基材表面の測定結果である。それぞれ、結合エネルギー398eV付近にピークがあり、窒素原子の存在を示している。これは、窒素がジルコニア内部に固溶していたことに起因すると考えられる。前報³⁾の黒色ジルコニアは真空中で放電プラズマ焼結法により作製されているため窒素が固溶していなかったのに対し、汎用ジルコニアは大気中で焼結されているため、焼結時に窒素が固溶したものと推測される。レーザー照射部のみ393~395eV付近にもピークがあり、窒素化合物が検出された。前報³⁾では、皮膜にジルコニウムの窒化物(例えば窒化ジルコニウム)が

形成されたために導電性を発現したと推定したが、今回の汎用ジルコニアにおいてもレーザー照射部に窒素化合物が検出され、これが導電性の発現に寄与したと考える。

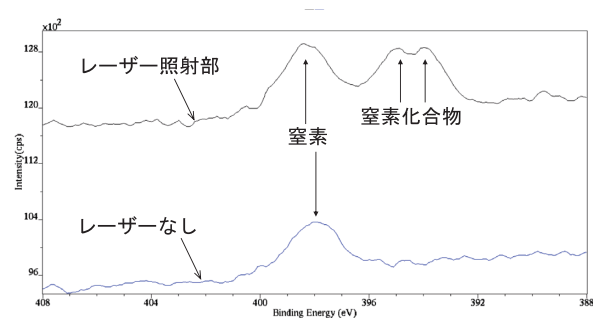


図10 XPS分析結果

3.1.2 レーザー照射部の導電性

図11にハッチングの外観を、図12に作製したハッチング試験片の外観と抵抗率計プローブ先端を示す。ハッチング部の中央に設けた端子部4ヶ所がプローブ先端の4探針の位置に対応している。

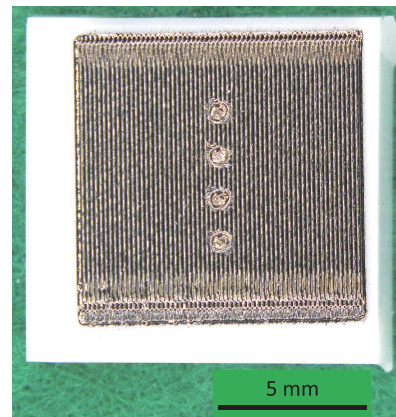


図11 ハッチング試験片の外観

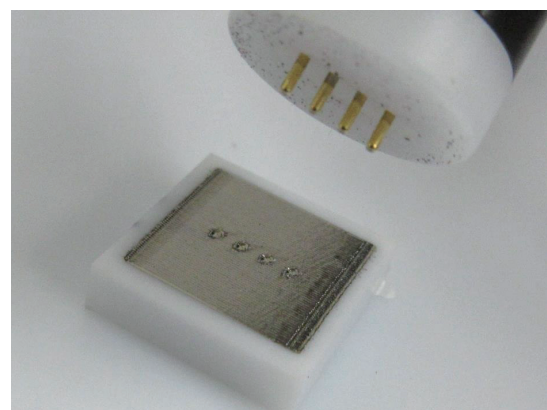


図12 ハッチング試験片とプローブとの対比

表面抵抗率を測定した結果、 $7.7 \times 10^1 \sim 1.8 \times 10^2 \Omega/\square$ であり、いずれの試料も導電性が確認された。

前報³⁾では、試料の観察結果及び熱力学データベースシス

テム (MALT for Windows) の計算結果から、レーザー照射によって黒色ジルコニア材表面にジルコニウムの窒化物 (例えば、窒化ジルコニウム / ZrN) が生成されたと推測され、窒化ジルコニウムの導電性についての報告⁴⁾ とから、レーザー照射部の導電性発現は窒化ジルコニウムの生成によるものと考えた。今回の汎用ジルコニアにおいても、窒化物の生成が確認されており、黒色ジルコニアのときと同様に窒化物によって導電性を発現したと考えられる。

3.1.3 レーザー照射部の割れの影響

単線試料のレーザー照射部には、図5で示したとおり、割れが多数あるにもかかわらず、導電性が確認された。この割れと表面抵抗率の関係を確認するため、割れを導電性樹脂 (ドータイト) で埋め導電性を比較した。割れを埋める作業は、試料表面に樹脂を塗布し、割れにすり込んだ後、表面に余った樹脂を乾燥する前に紙タオルで拭き取るにより行った。試料はファイバーレーザー加工機でハッチングした試料 (以下、三本線試料) を作製し、実験に供した。その結果、三本線試料の表面抵抗率は $10^3 \Omega / \square$ 桁であった。三本線試料は、セラミックス表面より凸状になっており、プローブ先端の電極も先端が丸みを帯びていることから、ハッチング試験片の端子のように電極先端を凹みで受け止めるのとは接触状態が異なるため、抵抗が高くなったと考えられる。

図13に導電性樹脂をすり込んだ三本線試料の実体顕微鏡写真を示す。割れ部は銀色を呈し、割れ内に導電性樹脂が充てんされているのがわかる。本試料の表面抵抗率を四探針法で測定したところ、 $10^3 \Omega / \square$ 桁の値を示し、樹脂充填前の試料とほとんど変わらない値となった。図7で示したレーザー照射部の黒色組織が導電性に寄与しているのであれば、導電性樹脂を充てんすることで導電性が向上すると予想されたが変化はなく、これより黒色組織の導電性はほとんどなく、レーザー照射部のごく表面に形成された窒素化合物層のみが導電性に関与していると推定された。割れがあるにもかかわらず導電性を示したのは、割れの表面にごく薄く窒素化合物層が形成していたためと推察される。レーザー照射時の早い段階で熱衝撃による割れが発生し、その時点ではまだ高温であるため、割れの表面も窒化し、導通の妨げにはならなかったものとする。

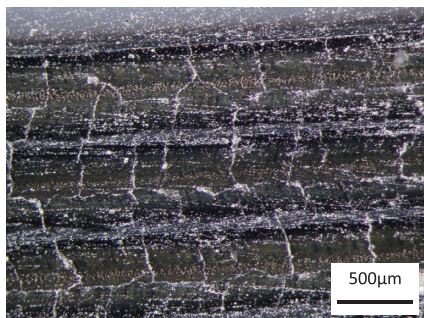


図13 導電性樹脂による処理後の試料表面

3.2 耐環境性の評価

3.2.1 耐熱性

図14にレーザー照射試料の表面抵抗率とばく露時間との関係を示す。300℃以上に加熱した試料では約6時間で表面抵抗率が $10^7 \Omega / \square$ 以上に増大している。240℃加熱では、24時間まではほぼ一定の表面抵抗率であるが、その後増大しており、240℃以上の温度に対して耐熱性は期待できないことがわかった。

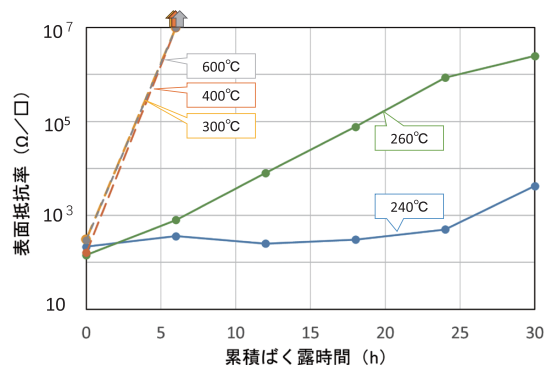


図14 表面抵抗率とばく露時間との関係

耐熱性試験後のハッチング部は、高温の試験片ほど金色の光沢が失われ、600℃試験のものは基材に近いほぼ白色に変化した。

ジルコニウムは、窒化物より酸化物の方が安定するため、大気雰囲気の高温度で窒化物が酸化物に変化し、これにより導電性が失われたと考えられる。

3.2.2 耐食性

図15にレーザー照射試料の各腐食液への浸漬時間と表面抵抗率の関係を示す。塩酸及び硫酸に浸漬したものは72時間で表面抵抗率が增大したが、食塩水では表面抵抗率の変化がほとんど見られない。また塩酸・硫酸に浸漬した試料は耐食性試験後にハッチング部の光沢面が黒ずんでいたのに対し、食塩水に浸漬した試料の光沢面には変化が見られなかった。

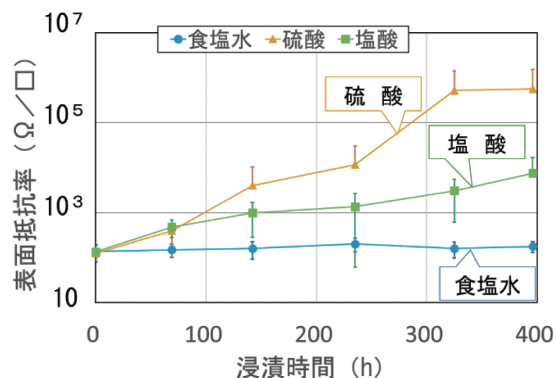


図15 表面抵抗率と浸漬時間との関係

浸漬時間が400時間までの実験では食塩水のみが変化しなかったことから、食塩水に対するさらなる長時間の耐食性試験を行った。図16に耐食塩水の試験結果を示す。21週間経過後もほとんど表面抵抗率が增大せず、改質部は食塩水に対して強い耐食性を有することが確認できた。

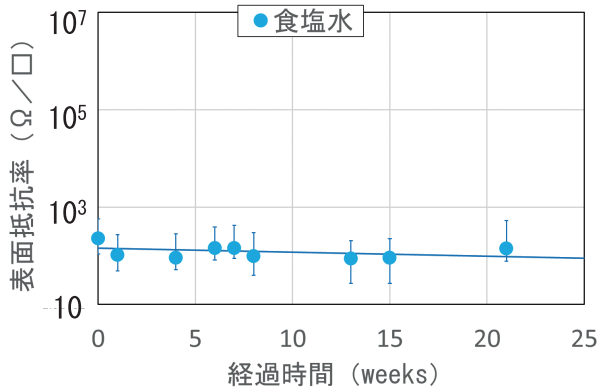
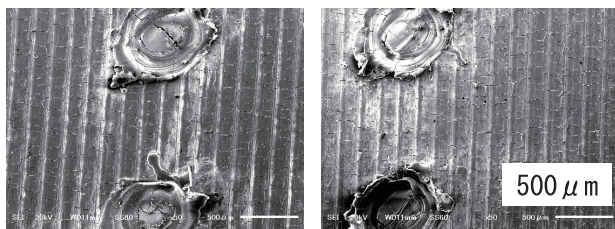


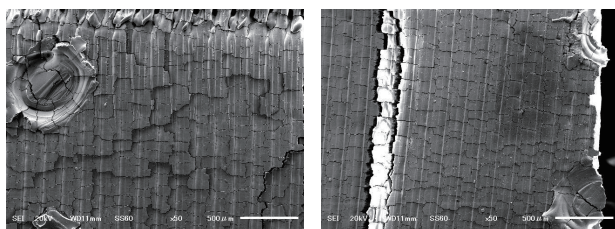
図 16 耐食塩水試験結果

図17に耐食性試験前後のレーザー照射部のSEM像を示す。食塩水に浸漬した試料に変化が見られないのに対し、塩酸及び硫酸に浸漬した試料に割れが生じているのが認められる。しかし、同視野をEDS分析したところ、特徴的な元素の偏在は認められなかった。

割れの発生要因は特定できていないが、硫酸と塩酸に浸漬した試料は、腐食試験後の割れ発生により導通経路が絶たれ、導電性の低下に至ったと考えられる。



レーザー照射のまま 耐食性試験 食塩水



耐食性試験 塩酸 耐食性試験 硫酸

図 17 腐食試験前後のレーザー照射部の表面 SEM 像

4. まとめ

白色汎用ジルコニア板にレーザーを照射することで、セラミックス表面に導電性皮膜を形成でき、レーザー照射部について外観観察、マイクロ観察及び元素分析を行った結果、金色の光沢を呈した部位はジルコニウムの窒化物であり、ごく薄い皮膜であること、外観に割れが見られるが導電性を有することがわかった。レーザー照射部の導電性は表面抵抗率 $10^2 \Omega/\square$ 程度であり、さらに耐環境性については、耐酸性はないが、食塩水に対する耐食性が良好であることがわかった。

本研究では、汎用ジルコニア表面に形成した導電性皮膜の応用や実用化に向けた検討を進める上で、改質部の性質やその生成メカニズムなどの知見を蓄積できた。

今後、実用化に向けた課題として、き裂を抑制するレーザー加工条件の最適化や、導電性皮膜の厚膜化による導電性向上の検討などが必要である。

謝辞

本報告で使用した走査型電子顕微鏡及び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。

参考文献

- 1) 素木洋一；ファインセラミックス製造技術，技報堂出版（1984）
- 2) 公開特許公報 P2007-308338A（特開2007-308338）
- 3) 中嶋快雄，他；レーザー照射による黒色ジルコニアの表面改質，北海道立総合研究機構工業試験場報告，No.321，pp31-38（2022）
- 4) 小林秀彦，星野浩邦，他；窒化ジルコニウム焼結体の製作と電極材料への応用，日本セラミクス協会学術論文集，Vol.97 No.10，pp.1189-1194（1989）

北海道立総合研究機構工業試験場報告
No.322 (2023)

発行 令和6年3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