

# 群馬県立産業技術センター 研究報告

令和6年度

Reports of

Gunma Industrial Technology Center

2024

群馬県立産業技術センター

## 目 次

### 試験分析高度化研究

高周波誘導結合プラズマ発光分析におけるイオン化干渉の影響の確認 . . . . .	1
中曽根佑一、須藤忍、徳田敬二	
カメラを用いた産業技術センターのスマート化 . . . . .	5
高橋慶行、水沼一英、中島成継、新井宏章	
群馬県オリジナルのカプロン酸エチル高生産酵母の実用化検討 . . . . .	10
武田文宣、山本真揮、西岡義彦、石田一成	
動物培養細胞を用いた細胞毒性試験環境の構築 . . . . .	15
柳澤昌臣、近藤康人、石田一成	
計測機器の連携 . . . . .	19
小宅智史、林 和、黒崎紘史、 増田直也、狩野幹大、高橋勇一	
X線CT用治具の開発及び寸法計測精度向上の検討 . . . . .	25
小林興尚、高橋勇一、黒崎紘史、 小宅智史、中村哲也、川原潤也	
協働ロボットの活用による生産現場の自動化に関する研究 . . . . .	30
狩野幹大、小林興尚、坂田知昭、石黒聡	

### 次世代産業創出研究

宇宙ビジネス創出推進のための衛星データ活用に関する基礎的検討 . . . . .	34
川原潤也、須田高史、遠藤庸弘	

### 再 録

産業用X線CT装置による自由曲面を有する切削加工品の測定精度の高精度化に関する研究 . . . . .	38
高橋勇一	
導電性繊維を用いた体圧・接近センサによる車椅子への移乗時における体圧応答の評価 . . . . .	45
黒崎紘史、川原潤也	

# 試験分析高度化研究

# 高周波誘導結合プラズマ発光分析におけるイオン化干渉の影響の確認

中曽根佑一・須藤忍・徳田敬二

Initial study of ionization interference in ICP-OES  
NAKASONE Yuichi, SUTO Shinobu, TOKUDA Keiji

高周波誘導結合プラズマ発光分析ではイオン化干渉の影響がしばしば課題となっているが、その影響の有無等は文献から把握することは困難である。そこで、Li、Na について、共存元素の濃度を変化させて分析し、イオン化干渉の影響の有無等に関する知見を蓄積した。また、イオン化干渉の影響を抑制する手法についても検討した。その結果、アキシアル測光では発光強度が大きく増大しているが、ラジアル測光ではイオン化干渉の影響が小さいことが確認できた。また、Cs を添加することでイオン化干渉の影響を抑制できることが確認できた。

キーワード：高周波誘導結合プラズマ発光分析、イオン化干渉

Ionization interference is often an issue in inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES), but it is difficult to comprehend the effects of ionization interference from the literature. Therefore, we analyzed Li and Na by varying the concentrations of coexisting elements, and accumulated knowledge on the effects of ionization interferences. We also studied methods to suppress the effects of ionization interference. As a result, it was confirmed that the luminescence intensity was greatly increased in axial photometry, while the effect of ionization interference was small in radial photometry. The effect of ionization interference was suppressed by the addition of Cs.

Keywords : ICP-OES, Ionization interference

## 1 まえがき

高周波誘導結合プラズマ発光分析(ICP-OES)は、試料に含まれる測定対象元素を誘導結合プラズマ(Inductively Coupled Plasma)によって励起し、得られるスペクトル線の発光強度を測定することによって定量分析を行い、波長を同定することにより定性分析を行うこともできる<sup>1)</sup>分析手法である。多元素の同時測定が可能なこと、測定可能な濃度範囲が g/L から  $\mu\text{g/L}$  レベルまでと非常に広いことから、環境試料や鉄鋼材料など様々な試料の分析に活用されている<sup>2, 3)</sup>。群馬県立産業技術センターでは鉄鋼、銅などの金属材料の化学成分分析、洗浄水や各種製造プロセス水溶液中のイオン濃度の分析、温泉材料解析係

水中の金属元素の分析等に活用している。

試料溶液中に高濃度の共存元素が存在する場合、これらの元素がイオン化する際に発生する電子によって、プラズマ内の電子密度が増加し、イオン化率が変化する現象が生じる。特に、アルカリ金属、アルカリ土類金属などのイオン化エネルギーの低い元素が多量に存在すると、測定対象元素のイオン化率が大きく変化する<sup>4)</sup>。その結果、試料から得られるスペクトル線の発光強度が変化する現象(イオン化干渉)が生じ、定量の正確度を低減させてしまう。

イオン化干渉の影響の有無、大きさは測定対象元素と共存元素の組み合わせや測定条件によって異なる<sup>5, 6)</sup>。そのため、依頼試験の試料の分析において、文献等からどの程度のイオン化干渉の影響があるかを予測すること



は困難である。また、発光部からの光の観測方式によってもイオン化干渉の影響の大きさは異なる。ICP-OESには、横方向観測方式（ラジアル測光）と軸方向観測方式（アキシアル測光）がある（図1参照）が、アキシアル測光の方がイオン化干渉の影響を受けやすく、ラジアル測光の方が影響を受けにくい。一方で、アキシアル測光では発光強度が強いため微量元素の分析には適している。依頼試験で分析する際には、試料、測定対象元素及び目的とする分析精度により、適切な測定条件を選定する必要があるが、それには長時間を要することが課題となっている。

本研究では、依頼試験で ICP-OES をより効果的、効率的に活用するために、元素の組み合わせ及び各種測定条件におけるイオン化干渉の影響の有無等を確認した。さらに、イオン化干渉の影響を抑制する手法についても併せて検討した。

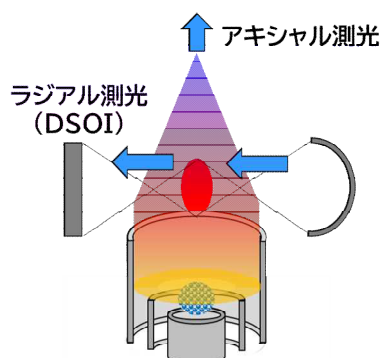


図1 アキシアル測光、ラジアル測光の概略図

## 2 方 法

測定装置は、日立ハイテクサイエンス社製誘導結合プラズマ発光分析装置 SPECTRO ARCOS を使用し、観測方式はラジアル測光とアキシアル測光を切り替えて測定した。プラズマ条件は RF パワー 1200 W、プラズマガス流量 13 L/min、補助ガス流量 1.2 L/min、ネブライザーガス流量 0.8 L/min とした。試料流量は 2 mL/min とした。

関東化学社製リチウム (Li)、ナトリウム (Na)、カリウム (K) の原子吸光分析用標準液を水で希釈し、測定対象元素の濃度を 1

mg/L、共存元素の濃度を 0、1、5、10、50、100 mg/L とし、硝酸を添加したものを測定試料とした。水は、ミリポア社製超純水製造装置 Milli-Q を通したものを使用した。

測定対象元素を Li、共存元素を Na、K とする組み合わせと、測定対象元素を Na、共存元素を Li、K とする組み合わせについて検討した。

測定試料をアキシアル測光、ラジアル測光のそれぞれで分析し、Li は 670.780 nm、Na は 589.592 nm の発光強度を確認した。この発光線はいずれも中性原子線であり、イオン化干渉の影響を受けると発光強度が強くなる。測定対象元素の濃度が 1 mg/L、共存元素の濃度が 0 mg/L のときの発光強度を 1 とした発光強度比を算出し、イオン化干渉の影響により発光強度がどのように変化するか確認した。

イオン化干渉の影響が大きかった組み合わせにおいて、イオン化干渉抑制剤として Cs 標準液を Cs の濃度が 100 mg/L となるように添加し、発光強度比がどのように変化するかを確認した。

## 3 結 果

### 3. 1 イオン化干渉の影響の確認

アキシアル測光では、共存元素の濃度とともに発光強度比は増大していき、Li の発光強度は共存元素が K (100 mg/L) のときに発光強度比が 1.6 (図2) であり、Na の発光強度比は共存元素が Li (100 mg/L) のときに 2.5 (図3) で最大となった。アキシアル測光はイオン化干渉の影響を受けやすいとされており、群馬県立産業技術センターの測定条件においてもその状況が確認できた。

これは、イオン化干渉の影響を受けていない標準液を用いて外部標準法で定量分析を行った場合、定量結果が Li では 1.6 倍、Na では 2.5 倍になることを示している。アキシアル測光はラジアル測光と比較して検出感度は高くなるが、イオン化干渉の影響を受けやすい元素の分析を行う際には注意を要することが確認できた。

対して、ラジアル測光では共存元素の濃度の増加に伴う発光強度比の増大は確認できな

かった（図 4、5）。発光強度比の変化は軽微であり、イオン化干渉の影響を回避するための手法として有効であることが確認できた。

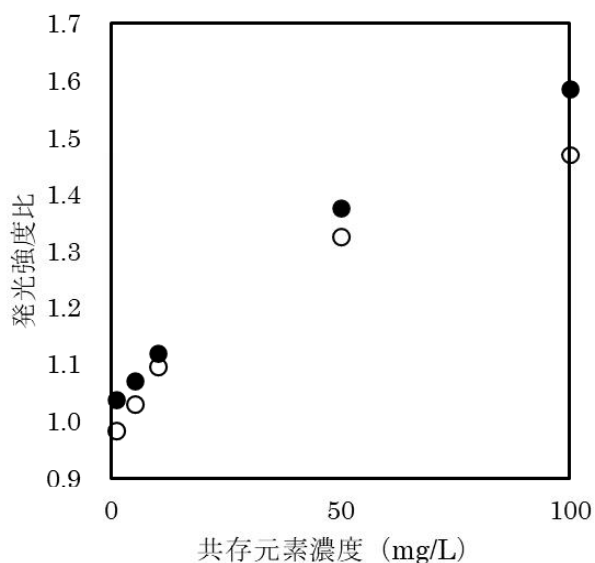


図 2 アキシアル測光での Li の発光強度比の変化（○：共存元素 Na、●：共存元素 K）

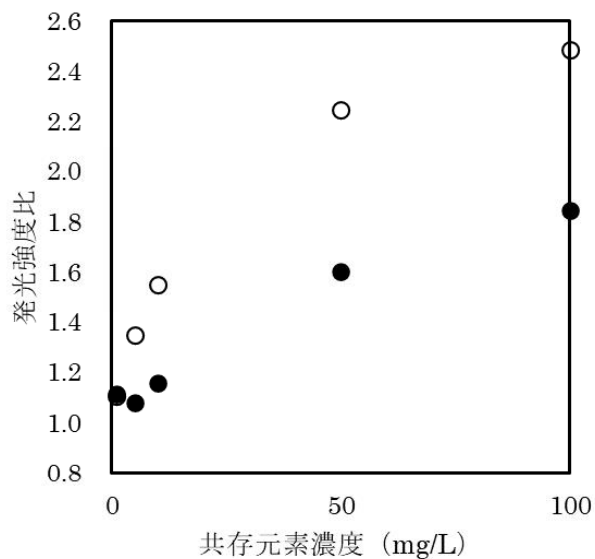


図 3 アキシアル測光での Na の発光強度比の変化（○：共存元素 Li、●：共存元素 K）

### 3. 2 イオン化干渉抑制剤の添加効果

イオン化干渉の影響の大きかった組み合わせにおいて、Cs を 100 mg/L となるように添加して発光強度比の変化を確認したところ、発光強度比は Cs を添加していない系よりも小

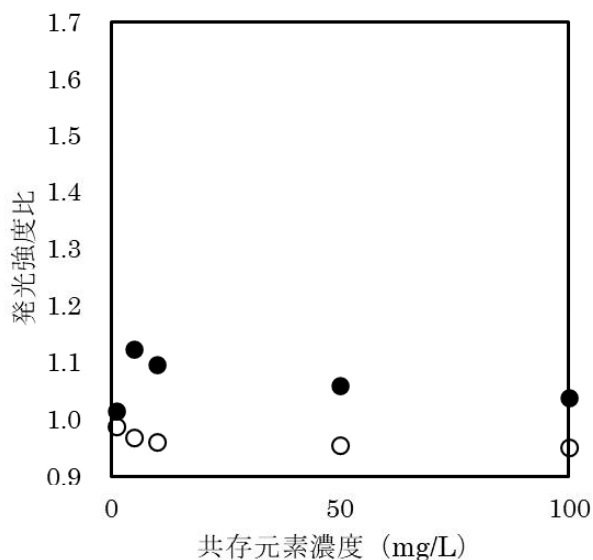


図 4 ラジアル測光での Li の発光強度比の変化（○：共存元素 Na、●：共存元素 K）

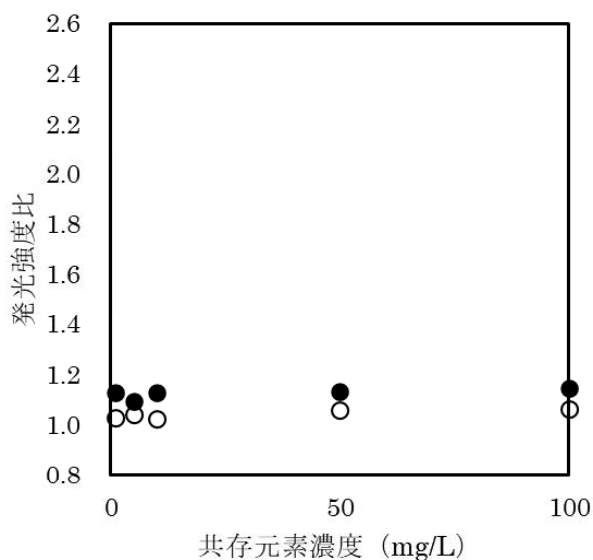


図 5 ラジアル測光での Na の発光強度比の変化（○：共存元素 Li、●：共存元素 K）

さく、発光強度の変化を Li では 51 %、Na では 61 %低減できた（図 6、7）。

イオン化干渉抑制剤の添加量は測定対象元素の 10 倍量程必要とされている<sup>7)</sup>が、今回の検討では Cs の物質濃度（7.5  $\mu\text{mol/L}$ ）が測定対象元素の物質濃度（Li : 140  $\mu\text{mol/L}$ 、Na : 43  $\mu\text{mol/L}$ ）より少ない。そのため、イオン化干渉抑制剤の効果が十分には得られていないと考えられる。Cs の添加量を十分に大きくすることで、アキシアル測光で

もラジアル測光と同程度までイオン化干渉の影響を抑制できれば、高感度で、尚且つ、イオン化干渉の影響を受けない分析が可能となるため、引き続き検討していきたい。

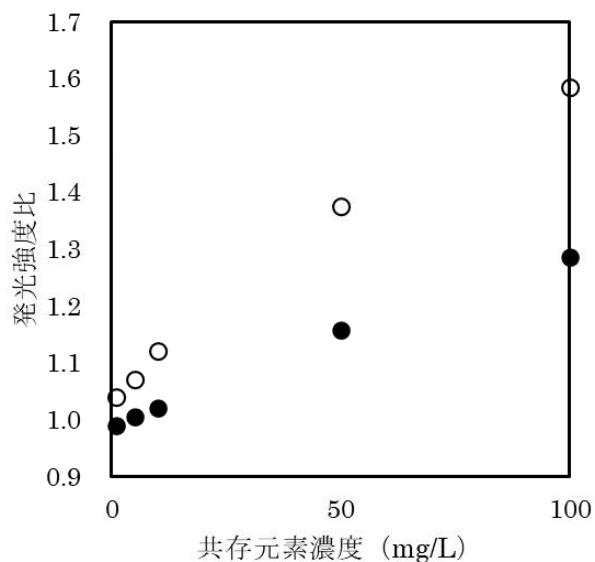


図6 Csを添加した際のLiの発光強度比の変化（共存元素：K、○：Cs添加なし、●：Cs添加あり）

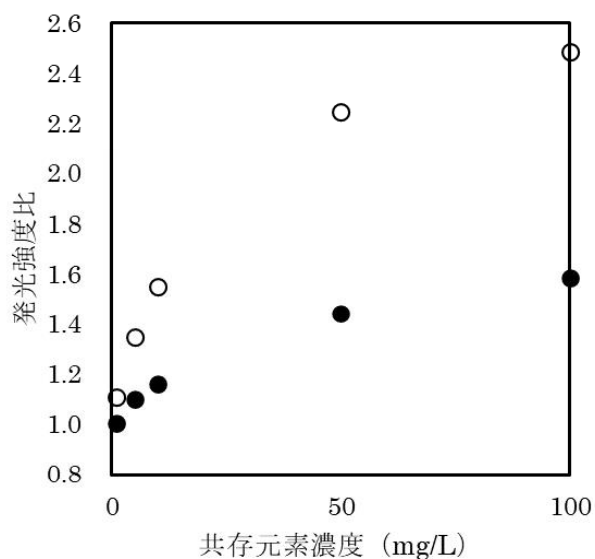


図7 Csを添加した際のNaの発光強度比の変化（共存元素：Li、○：Cs添加なし、●：Cs添加あり）

#### 4 まとめ

・Li、Na、Kにおいて、イオン化干渉の影響の大きさを確認した。

・アキシアル測光はイオン化干渉の影響を受けやすいことが確認できた。

・ラジアル測光とすることでイオン化干渉の影響は大きく低減できることが確認できた。

・Csを添加することで、イオン化干渉の影響を抑制できることが確認できた。

#### 文献

- 1) 早川康弘：ICP 発光分光/質量分析装置の基本特性の評価
- 2) 今井登：誘導結合プラズマ発光分析法による河川たい積物の分析
- 3) 大森敬久：ICP 発光分光分析装置の原理と分析事例
- 4) 森重陽介ほか：ICP 発光分光分析におけるイオン化干渉
- 5) 上本道久：ICP 発光分析法による石灰石中少量および微量成分定量の際の非スペクトル性主成分干渉挙動
- 6) 関浩子ほか：ICP 発光分光分析によるアルカリ金属分析に及ぼすイオン化干渉の影響について
- 7) PerkinElmer 社 HP : <https://www.perkinelmer.co.jp/support/labblog/icp/article57/>

# カメラを用いた産業技術センターのスマート化

高橋慶行・水沼一英\*・中島成継\*\*・新井宏章\*\*\*

Smart transformation of industrial technology center using cameras

TAKAHASHI Yoshiyuki, MIZUNUMA Kazuhide, NAKAJIMA Naritsugu, ARAI Hiroaki

産業技術センター職員の業務効率を向上させるため、カメラを活用した監視システムを構築した。設備状態を遠隔で監視することで、現場での確認作業が不要となり、業務負担を大幅に軽減した。

キーワード：カメラ、スマート化、デジタル、監視

To improve work efficiency for staff at the industrial technology center, a monitoring system using cameras was developed. The introduction of this system has made it possible to monitor equipment, eliminating the need for on-site inspections and significantly reducing the work burden.

Keywords: Camera, Smart transformation, Digital, Monitoring

## 1 はじめに

産業技術センター（以下「センター」）は、施設運営のために多くの設備を使用している。これらの設備は、電気や水道などのインフラを支え、安定した職場環境を維持するために24時間稼働している。設備は、使用環境や負荷状況により常に状態が変動し、急激な変化はトラブルの兆候となる。そのため、日常的な監視が必要である。

センターが保有する設備の特徴としては、最新のデジタル設備からアナログ設備まで、幅広く存在している。デジタル機能を持たないアナログ設備は、常時監視が出来ないため、職員の移動を伴う現場作業（目視確認）が不可欠となっている。

そこで本研究では、デジタル技術を活用した設備の監視を行い、センター全体の業務効率の向上を図る。

を活用した「スマート化」が必要となる。スマート化とは、現場での確認作業に対して、デジタル技術で代替し設備監視を行い、業務効率を向上させることを指す。スマート化に対する4つの要件を定義する。

- ① センター内で使用するネットワーク（以下、「センターネットワーク」という）を活用し、安全で信頼性の高い環境で構築すること。
- ② センターが保有する様々な設備を、同時に監視できる仕組みを構築すること。
- ③ 設備の稼働状況を正しく把握するため、監視時間を任意に設定できること。
- ④ 職員の要望に応じて、Web画面のレイアウトやデザインを変更できること。

以上、4つの要件を基に監視システムを構築する。

## 2 方法

### 2.1 スマート化の課題と要件

設備はセンターの様々な場所に設置されており、それぞれ使用環境や用途が異なる。これらは、センター職員だけでなく、多くの企業や団体が利用する場所にあるため、確認できる時間が不規則となり、業務時間内に設備状況を確認できないことがある。こうした予測できない想定外の作業は、職員の業務効率を低下させる要因となっているため、解決する必要がある。

このような課題を解決するため、デジタル技術

### 2.2 ネットワークを用いた監視システム

本研究では、センターネットワークを活用し、要件に基づいた監視システムを開発する。監視システムのフローを図1に示す。

はじめに、対象設備をカメラで撮影し、取得した画像データを、ネットワーク経由でサーバへ送信する。サーバには、ネットワーク接続型ストレージ（NAS）を使用し、画像データはNASに保存される。その後、NAS上で動作するWebサーバを通じて、職員が画像を閲覧する。

利便性向上のため、システム設定等の変更を容

易に行える、管理画面を設けた。さらに閲覧画面には、職員の作業性や要望等を考慮し、カスタマイズできる Web アプリケーションを搭載する。



図1 システムフローの概要

### 2. 3 監視設備

職員に対してアンケート調査を実施し、監視対象となる設備を16台選定した。選定された設備は、電気や水道メーターなど、施設運営に関わるインフラ設備である。これらの設備は、施設の安定した運営に不可欠であり、正常な状態を維持する必要がある。万が一、設備に問題が生じると、センター全体に支障をきたし運営が滞る。したがって、設備を監視することで、早期に変化や異常を検知し、迅速な対応や予防が可能となる。

表1に選定した設備と数量、確認回数および確認作業時間を示す。

表1 設備の詳細と確認頻度

	監視設備	設置場所	数量 (個)	確認回数 (回/月)	確認時間 (分)
1	電気メーター	溶接検定試験室	8	7	20
2	電気メーター	自動販売機	2	1	5
3	電気メーター	サーバールーム	1	1	10
4	電気メーター	東毛センター屋上	1	1	10
5	水道メーター	射出検定試験室	1	7	10
6	水道メーター	東毛センター内	1	毎日	5
7	正門	前橋センター北側	1	毎日	5
8	駐車場	東毛センター内	1	毎日	10

### 2. 4 デジタル機器

監視用のデジタル機器について、カメラの仕様検討を行った。スマート化の要件を踏まえ、市販の Web 対応監視カメラと、シングルボードコンピュータである Raspberry Pi およびカメラモジュ

ール（以下、「RasPi＋カメラモジュール」という）の2つを比較した。

昨今、市販の Web 対応監視カメラは、高精度で比較的安価に購入でき、撮影の解像度も高く、初めてのユーザーでも使いやすい。このようなカメラは、一般的な用途には十分対応できるが、センターの監視要件には合致しない点がある。まず、撮影方式について、市販のカメラは動画撮影が主流であり、保存されるデータ容量が膨大である。そのため、一定期間経過後に自動的に削除されるため、過去のデータを蓄積および確認することができない。また、撮影の時間指定が可能な機種は限られており、同時に接続できる台数が制限されている。さらに、セキュリティ面においては、センターネットワークと接続ができない機種がある。最も重要な要件である、職員の要望に応じたオリジナル性については、Web 画面のカスタマイズができず、柔軟な対応は困難である。

一方、RasPi＋カメラモジュールは、センターネットワークに複数台を同時接続し、カメラによる監視が可能である。撮影方式は、動画に加えてデータ容量の小さい静止画にも対応しており、プログラムを調整することで、撮影時間の自由な設定が可能である。さらに、職員の要望に応じて Web 画面のレイアウトやデザインを柔軟に変更できるため、カスタマイズ性にも優れている。

以上の特徴を踏まえ、本研究では、静止画を用いることで処理負荷を抑えた設備監視システムを構築する。RasPi＋カメラモジュールを活用し、センター職員のニーズに応じた、効率的な監視を実現する。本システムで使用する、機器と機能を表2、使用する製品を図2に示す。

表2 使用機器と機能

	使用機器	機能
1	Raspberry Pi Zero 2 W	シングルボードコンピュータ。Wi-FiとBluetoothを内蔵し、設備制御等ができる。
2	Raspberry Pi カメラモジュール V3	Raspberry Pi用の高性能カメラ。高解像度・オートフォーカス対応。
3	Raspberry Pi Zero用カメラケーブル	Raspberry Pi Zero 2 Wとカメラとのデータ送信や通信を行うためのケーブル。
4	ドライバー内蔵 リレーモジュール	低電圧で機器を制御できるリレーモジュール。LEDライトのON/OFFの制御を行う。
5	USB型LEDライト	USB接続のLEDライト。暗室時の監視の補助照明。
6	カメラV3用 超小型Pi Zeroケース	Raspberry Piとカメラを保護および固定するためのケース。
7	フレキシブルマグネット式 カメラマウント	マグネット式で金属面に固定・取り外し、およびカメラの角度を自由に調整できるマウント。



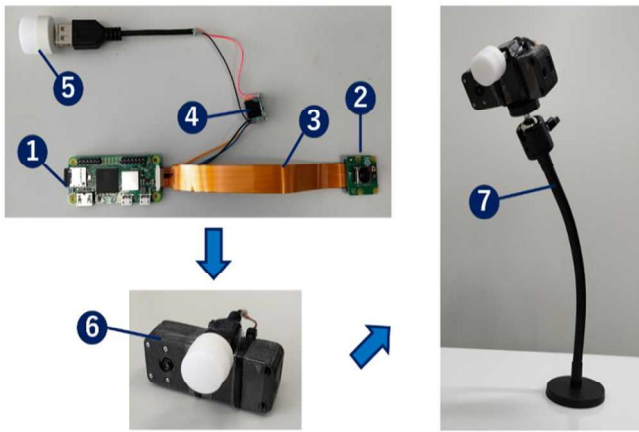


図2 使用する製品

### 3. 結果

本研究では、デジタル機器とセンサーネットワークを活用した監視システムを開発し、職員の要望に応じた機能を搭載した。具体的には、カメラの表示名や撮影角度、撮影時間、保存先のサーバ選択など、設定が容易に変更できる仕様にした。

職員は管理ツールを使用して、PCのWebブラウザを通じて設定変更を行う。この変更は、PHPを使用してRaspberry Pi上で処理され、反映される仕組みにした。これにより、様々な要望に応じたカスタマイズが可能となった。設定画面を図3に示す。

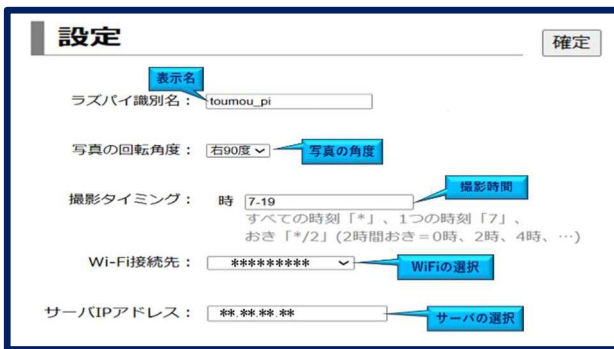


図3 Raspberry Pi+カメラの設定画面

加えて、NAS上のWebサーバを活用し、撮影した画像を閲覧できるWebアプリケーションを開発した。このアプリケーションには、カレンダー機能を搭載し、日付や時間を指定することで、過去のデータを容易に検索し閲覧できる。複数の監視設備に対しては、事業所ごとに分類し、まとめて表示できる機能を搭載した。これにより、利便性が向上し、職員の作業効率が大幅に改善された。

またWeb画面は、ネットワークに接続可能な場所であれば、いつでもPCやタブレットを用いて確認し、設備の状態を監視できるようになった。監視用のWeb画面を図4に示す。



図4 監視用Web画面

#### 3. 1 複数の設備監視

具体的な研究成果として、3つの事例を紹介する。まず、監視台数が多い電気メーター（溶接検定室）の状況について説明する。従来、電気メーターの確認は、設備が停止する夜間に行うことが望ましかったが、職員が不在のため夜間の現場確認は困難だった。

そこで、プログラム制御したRasPi+カメラモジュールを、電気メーターに設置し、夜間の自動撮影によって24時間の監視を実現した。これにより、従来の現場確認作業は不要となった。また、夜間撮影時には、自動でライトが点灯するよう制御することで、暗い環境でもディスプレイの数値は鮮明に記録できるようにした。監視カメラおよび撮影されたWeb画面を図5に示す。

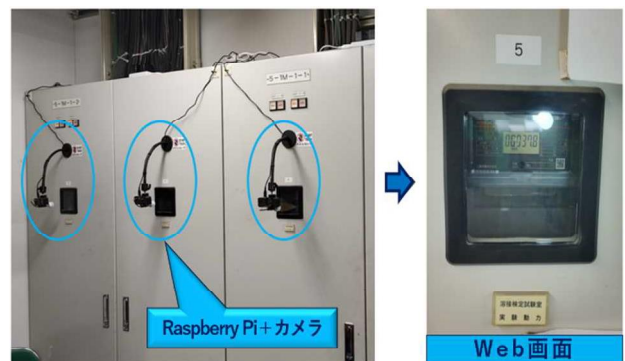


図5 電気メーター監視とWeb画面

#### 3. 2 WiFi環境と電源がない場所の監視

次に、駐車場の監視システムについて説明する。WiFi環境と電源が確保できない駐車場では、電源として、ソーラー発電式バッテリーを使用し、太陽光で発電した電気を蓄電および給電することで、電源のない場所でもデジタル機器の安定した使用を可能とした。

また、WiFi も利用できない環境のため、WiFi ルーターを導入することでネットワークを拡充し、遠隔監視を実現した。さらに、風雨や温度変化のある屋外に対応するため、RasPi+カメラモジュール本体を防水仕様に加工し、長期間の運用を可能とした。防水カメラとバッテリーを用いた、監視システムおよび Web 画面を図 6 に示す。

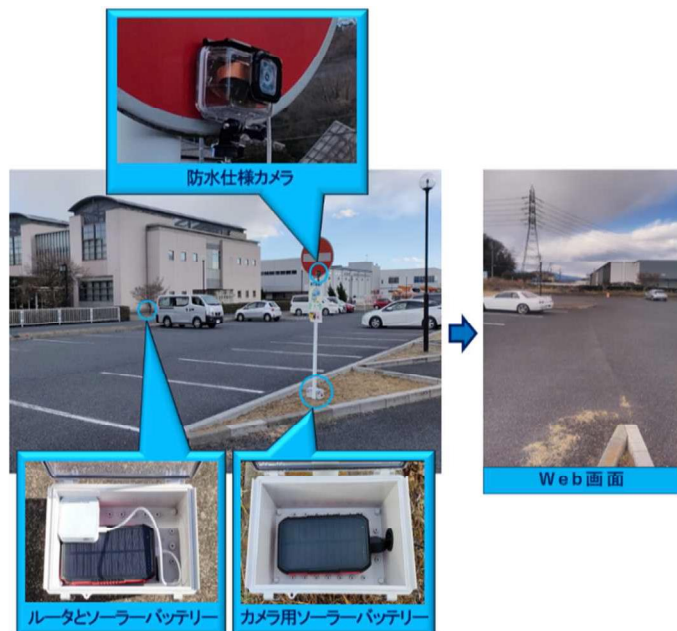


図 6 駐車場監視と Web 画面

### 3. 3 センターネットワーク外の設備監視

水道メーターに対する、監視システムについて説明する。本システムでは、Web 画面を通じてメーターの数値を確認し、水漏れなどの異常が発生した場合には、迅速に対応できる仕組みを構築した。水道メーターの監視状況と Web 画面を図 7 に示す。

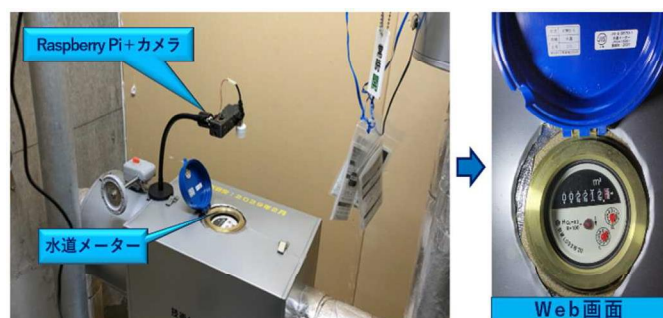


図 7 水道メーター監視と Web 画面

しかし本システムは、センターネットワーク内のみ監視が可能であり、自宅や外出先などのセンター外におけるネットワーク環境では、確認できないという課題があった。そのため、異常が疑われる場合にはセンターに戻り、確認する必要があった。

この課題を解決するため、デジタル技術を活用し、センターネットワーク外でも監視可能なシステムを構築した。具体的には、SNS の Slack、ノーコードプログラムの Node-RED、プログラミング言語の Python を組み合わせることで、センターネットワーク外からの監視を実現した。

まず、撮影された画像は、NAS のファイルサーバに保存され、Python プログラムにより最新画像が選定される。その後、Node-RED を用いて、指定した時間に Slack と連携し、画像を PC やスマートフォンへ自動送信するシステムを構築した。これにより、センターネットワーク外からでも設備状態を、いつでも把握できるようになった。また、送信のタイミングについては、時間の変更も容易であり、職員の要望に応じて柔軟に設定できる仕様となっている。図 8 に Slack を用いた通知画面を示す。

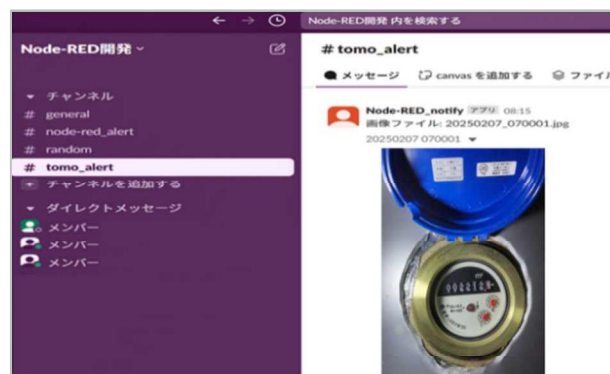


図 8 Slack を用いた通知画面

## 4 まとめ

本研究では、カメラとデジタル技術を活用し、産業技術センターの設備確認をスマート化するため、監視システムを構築した。このシステムにより、職員による現場確認作業を不要とし、設備状態を常時把握できるようになった。ネットワークと Raspberry Pi 等のデジタル機器を活用することで、遠隔地からも設備監視ができるシステムを実装できた。

その結果、職員の業務負担を大幅に軽減し、16 台の設備確認に費やした確認作業工数である、年間 135 時間を削減した。また、設備状態が可視化されることで、漏電や漏水などの異常を早期に発見できるようになり、センター運営の安全性を向上させた。

まとめとして、冒頭に挙げた 4 つの要件に対する成果を示す。

- ① センター内で使用するネットワークを活用し、安全で信頼性の高い環境で構築すること。  
→ 市販の Web 対応監視カメラでは、接続が困難だったセンターネットワークに対し、本シス

テムでは、センター内で承認された安全かつ信頼性の高い機器を用いることで、安定した接続を実現した。

- ② センターが保有する様々な設備を、同時に監視できる仕組みを構築すること。
  - RasPi＋カメラモジュールは、設置台数の制限なく、16 台の設備を同時に監視した。
- ③ 設備の稼働状況を正しく把握するため、監視時間を任意に設定できること。
  - 設定画面より、要望する確認頻度に応じて、容易に時間設定ができる仕様にした。
- ④ 職員の要望に応じて、Web 画面のレイアウトやデザインを変更できること。
  - 使用する職員の要望と利便性を考慮し、閲覧しやすいレイアウトやデザイン、文字の大きさなど、様々なカスタマイズができる仕様にした。

今後の展開としては、本システムを企業へ展開し、少ない人員でも効率的に現場確認が行える仕組みとして広げていきたい。特に、人手不足に直面する中小企業に対して、本システムを有効活用できるよう支援し、現場の課題解決を目指す。

また、現状の本システムでは、職員自らがデータや情報を確認する必要がある。今後は AI 技術等を活用し、自動識別や自動通知システムを開発する。デジタル技術を活用して、現場の負担を軽減し、より効率的かつ実用的なシステムの構築を図るとともに、現場業務の高度化とデジタル活用の推進を目指す。

## 参考文献

- 1) クジラ飛行机. シゴトがはかどる Python 自動処理の教科書. マイナビ出版, 2020.
- 2) 立山秀利. Python で Excel やメール操作を自動化するツボとコツがゼッタイにわかる本. 秀和システム, 2023.



# 群馬県オリジナルのカプロン酸エチル高生産酵母の実用化検討

武田文宣・山本真揮・西岡義彦・石田一成

Feasibility Study on practical application of Gunma original sake yeast  
with high ethyl caproate production

TAKEDA Ayanobu, YAMAMOTO Masaki, NISHIOKA Yoshihiko, ISHIDA Kazunari

近年、県独自酵母 G101 株を親株にイオンビーム照射を利用して、新規カプロン酸エチル高生産酵母の選抜を行ってきた。スクリーニングにより得られた候補株 5 株から、小仕込試験、パイロットプラントでの試験醸造を経て、最終選抜株の実用化を検討した。その結果、実用可能性が確認できたので、県内製造場の実地醸造の結果も添えて、報告する。

キーワード：清酒、群馬清酒酵母、カプロン酸エチル、イオンビーム

In recent years, ion beam irradiation has been used to select new yeast strains with high ethyl caproate production, using Gunma original sake yeast G101 as the parent strain. From the five candidate strains obtained through screening, small-scale brewing tests and test brewing using the pilot plant were carried out, and the practical application of the final selected strain was considered. As a result, the practical feasibility was confirmed, and we report the results of the actual brewing at sake factories of Gunma prefecture.

Keywords : Japanese sake, Gunma sake yeast, ethyl caproate, ion-beam

## 1 まえがき

当県では、平成 11 年より供用を始めた群馬 KAZE 酵母群<sup>1)</sup>、及び令和元年、2 年にそれぞれ泡無し株が実用化された群馬 G2 酵母<sup>2)</sup>、群馬 G1 酵母<sup>3)</sup>がある。また、過去には(国研)量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所(以下、量研)と共同で、世界で初めてイオンビーム照射を変異源に活用して群馬 227 酵母を開発している<sup>4)</sup>。近年では、量研のイオンビームを利用して KAZE 酵母の尿素低生産性酵母の育種、実用化を行っている<sup>5),6)</sup>。

これまで育種してきた KAZE 酵母群及び 227 酵母は、カプロン酸エチル高生産酵母であるが、カプロン酸エチルや有機酸の生成能などの醸造特性から、県内製造場において鑑評会出品酒となる大吟醸酒にはほとんど使用されていない状況である。

そこで、新規なカプロン酸エチル高生産株

の育種を目指して、令和 3 年以降、県独自酵母として頒布している泡なし G101 株を親株として用い、イオンビーム照射を変異源として、セルレニン耐性を指標に選抜を進め、独自性が高いカプロン酸エチル高生産性酵母の育種に取り組んできた<sup>7)</sup>。

本研究では、上述セルレニン耐性によるスクリーニングから得られた候補株の絞り込みを進めた中から、最終選抜株の実用性を評価することを目的としている。最終選抜株によるパイロットプラントでの試験醸造や実地醸造を通して醸造特性の把握や製成酒の評価を行い、当該酵母が実用性を備えていると判断したので、試験結果等を報告する。

## 2 方法

### 2. 1 供試酵母及び培地

前年度までにスクリーニングを進めていた中から候補株 5 株を用いた<sup>7)</sup>。対照には、日本醸

造協会より分譲されたきょうかい酵母®1801号（以下、対照株）を使用した。

酵母培養には（株）秋田今野商店より購入した冷凍濃縮麹エキスを Brix 1.7° 程度となるように希釈し、グルコース 50g/L、グルタミン酸ナトリウム 2g/L、リン酸二水素カリウム 0.15 g/L、リン酸水素二カリウム 0.15 g/L を加えた希釈麹エキス培地を用いた。

## 2. 2 総米 1 kg の小仕込試験

候補株 5 株及び対照株について、令和 4 年度兵庫県産山田錦 40%精米を用いて表 1 に示す条件で総米 1 kg の小仕込試験を行った。希釈麹エキス培地 5 mL に酵母を一白金耳接種し、25℃で 4 日間静置培養を行った。この培養液を遠心分離し、上清を除いた菌体を汲水で流し入れ添仕込を行った。麹は、Roots36（（株）秋田今野商店）を種麹として製麹したものをを用いた。掛米は、洗米後に 35%吸水率となるように浸漬し、蒸籠で蒸したものをを用いた。汲水は水道水を用い、添用の汲水には、リン酸二水素カリウム、硫酸マグネシウム、塩化ナトリウム等のミネラル塩添加を行った。三段仕込により 7℃で留仕込後、1℃/日ずつ昇温させ、最高温度 13℃とし 26 日後に上槽を遠心分離（旧工機ホールディングス（株）製 CR21N、5000rpm、20min）により行った。

表 1 総米 1kg の仕込配合

	添	仲	留	計
総米(g)	195	315	490	1000
蒸米(g)	140	250	410	800
麹米(g)	55	65	80	200
汲水(mL)	260	410	730	1400
仕込温度(℃)	15	9	7	

## 2. 3 分析方法

日本酒度、アルコール分、酸度、アミノ酸

度は国税庁所定分析法に従い、分析を行った。

グルコースは、グルコース CII-テストワコー（富士フイルム和光純薬（株））を用いて分析を行った。香気成分（酢酸エチル、酢酸イソアミル、イソアミルアルコール、カプロン酸エチル、イソブチルアルコール）は、ヘッドスペースガスクロマトグラフ（（株）島津製作所製 GC-2030AF）で分析した。ピルビン酸は、メガザイム社製ピルビン酸分析キット（日本バイオコン販売）を用いて既報<sup>8)</sup>に従い測定した。

## 2. 4 パイロットプラント試験醸造

総米 1kg の小仕込試験で選抜した③大-16 株及び対照株に対し、令和 4 年産及び 5 年兵庫県産山田錦 40%精米を用い、表 2 に示す配合で総米 80kg の試験醸造を行った。酵母の拡大培養は、前培養後、希釈麹エキス培地 500mL で 30℃、3 日間静置培養により行った。麹は、Roots36（（株）秋田今野商店）を種麹として 2. 2 小仕込試験用と同時に製麹したものを冷凍保存し使用した。掛米は、吸水率概ね添仲 36%、留 34% で吸水したものを 60 分蒸きょうで使用した。なお、酒母の汲水は水道水を加工し（リン酸二水素カリウム 0.4g/L、リン酸二水素カルシウム 0.2g/L、硫酸マグネシウム・七水和物 0.3 g/L、塩化ナトリウム 0.2g/L）、乳酸 30mL を添加した中温速醸酒母により 8 日目使用とした。また、もろみの汲水には全量水道水を用いた。

## 2. 5 官能評価

試験醸造を行った製成酒について、群馬県酒造組合主催の令和 6 年 9 月実施の持寄研究会（純米吟醸酒部門）に参考出品した。国税局鑑定官、県内清酒製造技術者及び当センター職員で構成する 13 名の審査員により、県内酒蔵の出品酒を交えて官能評価を受けた。品温は約 20℃、プラスチックカップを用いて 5 点法の総合評価と短評により評価した。令和 7 年 3 月実施の県清酒品評会（舞風の部）に出品したもの

表 2 パイロットプラントの仕込配合と試験条件

	酒母	添	仲	留	追水	計
総米(kg)	5.4	13.6	26	35		80
蒸米(kg)	3.6	10.4	21	29		64
麹米(kg)	1.8	3.2	5	6		16
汲水(L)	6	16	32	50	10~13	114~117
仕込温度(℃)	24	12	8	6		

は、上記同様の方法で、国税局鑑定官、近県公設試験研究機関職員、県内清酒製造技術者及び当センター職員で構成する 15 名の審査員により評価した。

## 2. 6 実地醸造

パイロットプラント試験醸造に用いた最終選抜株（③大-16 株）の使用を希望された 5 製造場において、精米歩合 60%以下の令和 6 年群馬県産舞風などを用いた総米 260～690 kg の実地醸造を行った。酵母は、当センターにて拡大培養を行い、使用希望製造場に提供した。酒母は、速醸もと、もろみは三段仕込みの通常の市販酒を造る方法で行った。

## 3 結果と考察

### 3. 1 総米 1kg の小仕込試験による最終選抜

既報のとおり <sup>7)</sup>セルレニン耐性株の一次、二次スクリーニングを行い選抜した 5 株による総米 1kg の小仕込試験の結果を参考に、発酵初期の立上りが遅く酸度が高くなった株を除き、総米 200g 小仕込試験で次点としていた株を加えた 5 株を用いて、再現性を含め候補株の醸造特性を評価するために、仕込配合等の条件を変えて、総米 1kg の小仕込試験を実施した。

まず、重量減少量の経日変化を見てみると、もろみ中盤以降対照株の発酵速度の鈍化に対して、全ての候補株が良好な重量減少を維持しており、対照株より発酵力が高いことが示された（図 1）。特に 2-22 株、⑦大-14 株は、もろみ初期か終始対照株を上回る発酵力であった。製成酒の成分値（表 3）から、2-22 株、⑦大-14 株の日本酒度が対照より大きくプラスに、アルコール分も高くなっており、発酵力の高さが見て

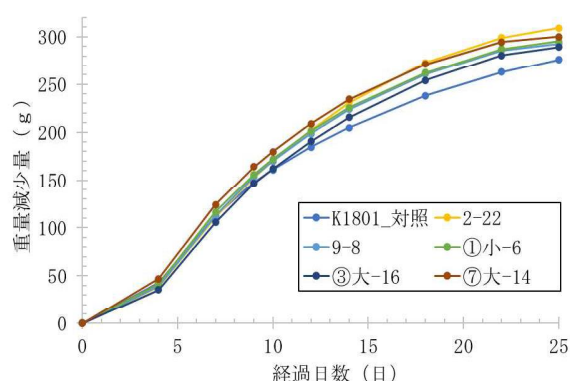


図 1 総米 1 kg 小仕込試験の重量減少経過

とれる。酸度は、全て候補株で対照より高かったが③大-16 で 0.05 差と僅かな違いであった。アミノ酸度も、対照に比して候補株が高い傾向にあった。グルコースは候補株ごとに差が見られた。一つの要因として、発酵初期の糖化と発酵のバランスの違い、即ち酵母の増殖速度、立上りの差による影響の可能性を考えている。その他、糖の資化性の違いや仕込ごとの原料や品温のバラツキの可能性も否定はできない。カブロン酸エチルは、全ての候補株で 8ppm 程度と同等であったが、対照よりはやや低かった。これらの結果は、条件の違いもあり既報 <sup>7)</sup>と全く同じ結果とは言いきれないが、総合的な判断としては、③大-16 が最終選抜株として最適であることを確認できた。

### 3. 2 パイロットスケールでの試験醸造

一般に、育種した酵母を実用化する場合、小仕込試験の検討で候補株を選抜した後、パイロットプラントでの試験製造を行い、酒母やもろみの経過や製成酒等の評価を行う必要がある。そこで、先述の総米 1kg の小仕込試験で最終選抜した③大-16 株と対照株を用いて、当センター内のパイロットプラントを用い、総米 80 kg の試験醸造を行った。

表 3 総米 1 kg の小仕込試験の結果

	重量 減少量 (g)	日本酒度	アルコール 分(%) (v/v)	酸度	アミノ 酸度	グルコース (g/100mL)	イソアミル アルコール (ppm)	酢酸 イソアミル (ppm)	カブロン酸 エチル (ppm)	酢酸 エチル (ppm)	E/A
K1801 (対照)	276.0	-7.4	16.7	1.96	1.15	3.2	108	1.9	10.6	54	1.7
2-22	309.0	8.8	18.4	2.24	1.13	1.9	109	2.6	7.7	67	2.4
9-8	292.8	-1.1	17.4	2.12	1.42	3.2	98	1.8	7.8	54	1.9
①小-6	295.0	±0	17.5	2.06	1.40	2.7	100	2.0	7.7	62	2.0
③大-16	289.1	-9.4	17.3	2.01	1.32	4.3	98	1.9	8.2	59	2.0
⑦大-14	300.2	6.5	17.8	2.04	1.51	1.9	103	2.0	7.1	63	1.9

酒母の仕込、品温管理を両株同様に言い、4日目ボーマはともに10.4であった。その後、同じタイミングで分けを行い、8日目に使用した。使用時の分析値は、対照株に比べ選抜株の酸度及びアミノ酸度がやや高かった（表4）。

もろみにおいても、両株とも同様の仕込、品温管理を行った。もろみ前半から中盤の経過は、両株で顕著な違いは見られなかったが、もろみ末期のボーマ（BMD）の切れは、選抜株の方が品温を下げてでも順調であった（図2）。グルコースは、サンプリングや分析のバラツキもあるだろうが、両株で大きな差はなく推移していた。一方、ピルビン酸は、選抜株の方が終始やや高めに推移し、もろみ末期、対照より品温を下げていっても高めであった（図3）。

表4 使用時酒母の分析結果

	日本酒度	アルコール分(%(v/v))	酸度	アミノ酸度
K1801 (対照)	6.5	10.0	5.0	0.4
③大-16 (選抜株)	6.7	9.3	5.3	0.6

製成酒の分析値（表5）より、日本酒度、アルコール分、酸度、カプロン酸エチル及び酢酸イソアミルには顕著な差はないと見ている。他方、ピルビン酸、イソアミルアルコールには酵母の特性の違いが出ていると考えている。グルコースについても、発酵力や糖質化性などの性質差が影響している可能性も考えている。その点については、今後の検討評価が必要かもしれない。

また、県持寄研究会で他の県産出品酒31点に交えて審査したところ、酸味、苦渋、ざらつきや香りクセなどの指摘も一部あったが、5点法で平均評点2.85点と無難な評価は得られ、及第点には達したといえる。

表5 パイロットプラントでの試験醸造酒の分析結果

	日本酒度	アルコール分(%(v/v))	酸度	アミノ酸度	グルコース(g/100mL)	ピルビン酸(ppm)	イソアミルアルコール(ppm)	酢酸イソアミル(ppm)	カプロン酸エチル(ppm)	酢酸エチル(ppm)	イソブチルアルコール(ppm)	E/A
K1801 (対照)	-4.8	16.0	1.65	0.75	2.5	147	90	1.0	4.7	51	32	1.1
③大-16	-5.2	16.2	1.65	0.90	2.8	169	74	1.2	5.2	55	24	1.6

これらの結果から、最終選抜である③大-16株は、吟醸酒用のカプロン酸エチル高生産酵母として実用性が高いとの判断に至った。今後も、試験醸造等を通して、更なる醸造特性の把握、製造条件の最適化などを検討し、県内製造場での利用促進に繋げたいと考えている。

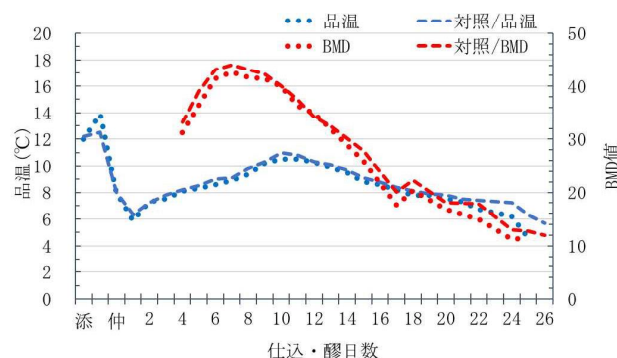


図2 パイロット試験の品温、BMD 経過

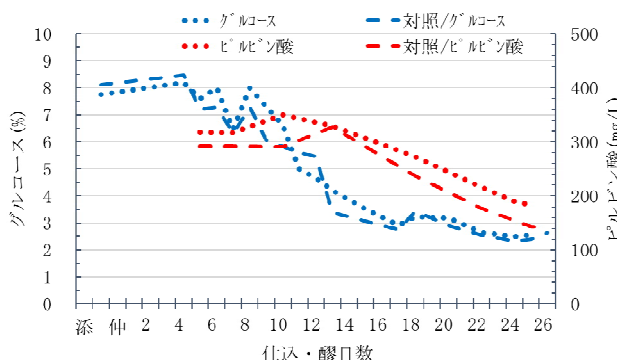


図3 パイロット試験の成分値経過

### 3. 3 県内製造場での実地醸造

実用化への最終段階として、最終選抜株の使用を希望された製造場に酵母を提供し、製成酒並びに製造に関する情報提供をいただいた。製造経過についてはA～E場では、それぞれ原料米

表 6 実地醸造による製成酒の分析結果

	日本酒度	アルコール 分(%(v/v))	酸度	アミノ 酸度	グルコース (g/100mL)	ピルビン酸 (ppm)	イソアミル アルコール (ppm)	酢酸 イソアミル (ppm)	カプロン酸 エチル (ppm)	酢酸 エチル (ppm)	イソブチル アルコール (ppm)	E/A
製造場A	+2.7	16.5	1.45	1.00	1.4	135	88	1.5	3.0	69	32	1.7
製造場B	±0	16.5	1.95	1.65	3.4	132	107	3.1	1.8	94	39	2.9
製造場C	-4.3	16.2	2.00	1.85	2.7	334	111	2.6	3.0	77	36	2.3
製造場D	+5.5	16.1	1.50	1.05	1.9	348	132	2.7	3.8	64	45	2.0
製造場E	+0.8	15.6	1.65	1.35	1.0	203	121	1.5	3.9	48	39	1.2

が異なっていたが、13～26 日のもろみ日数で上槽されており、選抜株の発酵力には実用的に問題無いことが確認された。製成酒の分析値（表 6）より、B 社ではカプロン酸エチルが低いものの、溶けにくい米質の舞風を使用した C～E 場の製成酒では 3.0～3.9mg/L であり、一定のカプロン酸エチル生成能を示していた。また、C～E 場のピルビン酸濃度は 200ppm を超えており、ジアセチルやアセトアルデヒドなどのオフフレーバーが危惧される結果であった。県清酒品評会舞風の部に出品した審査においても、カプロン酸エチル、華やかとのコメントがある一方で、ジアセチルの指摘がある製成酒もあった。原因として米質や製造条件の影響もあると思われるが、今後の製造時には留意すべき点であることが明らかになった。

#### 4 まとめ

本研究では、新規カプロン酸エチル高生産酵母の最終選抜及び実用化に向けた醸造試験に取り組んだ。

総米 1kg の小仕込試験の結果から選抜した③大-16 株は、パイロットスケールで対照とした K1801 と同様の発酵経過を示し、製成酒の分析値もカプロン酸エチル、酸度など概ね同等程度であることが確認された。さらに、実地醸造でも良好な発酵力と一定のカプロン酸エチル生成能があることは明らかであった。

以上より、最終選抜株は、十分実用性がある

と判断に至った。なお、最終選抜株は、既報<sup>7)</sup>に掲載のとおり群馬 QCI3 酵母（QCI3 株）と命名しており、今後、群馬県酒造組合との協議を進め、令和 7 年度より正式な県酵母ラインナップとして、県内製造場に広く頒布する方向で準備中である。

#### 謝 辞

群馬県持寄研究会及び群馬県清酒品評会の審査員、並びに最終選抜株を使用いただいた製造場の皆様には、ご協力感謝申し上げます。

#### 文 献

- 1) 上山修ほか：平成 13 年度群馬県工業試験場研究報告、39-43 (2002)
- 2) 渡部貴志ほか：令和 2 年度群馬産業技術センター研究報告、23-28 (2021)
- 3) 渡部貴志ほか：令和 4 年度群馬産業技術センター研究報告、56-61 (2023)
- 4) 増淵隆ほか：平成 21 年度群馬産業技術センター研究報告、12-14 (2010)
- 5) 渡部貴志ほか：平成 30 年度群馬産業技術センター研究報告、1-4 (2019)
- 6) 渡部貴志ほか：令和 5 年度群馬産業技術センター研究報告、47-52 (2024)
- 7) 渡部貴志ほか：醸協、120、288-298 (2025)
- 8) 三井俊ほか：あいち産業科学技術総合センター研究報告 2021、98-101 (2022)

## 動物培養細胞を用いた細胞毒性試験環境の構築

柳澤昌臣・近藤康人\*・石田一成\*\*

Establishment of a cytotoxicity test environment using animal cell culture

YANAGISAWA Masaomi, KONDO Yasuhito, ISHIDA Kazushige

動物実験は、人体への安全性を評価するために広く用いられてきた試験方法である。しかし、近年では倫理的観点から廃止に向けた運動が世界的に広がっている。今回、動物実験の代替法に使用される動物細胞の培養環境を整備し、既存の試験方法をもとに樹脂材料の細胞毒性試験を実施した。また、食の安全性評価への活用を目指して食品抽出物の安全性評価を試みたので報告する。

キーワード：動物細胞、細胞毒性試験、樹脂材料、食品

Animal testing is a method that has been widely used to evaluate safety for the human body. However, in recent years, there has been a worldwide movement to abolish it from an ethical perspective. In this study, we developed an environment for animal cell culture, which are used as an alternative to animal testing, and conducted cytotoxicity tests on resin materials based on existing test methods. We also attempted to evaluate the safety of food extracts for application in food safety assessment.

Keywords : Animal cell culture, Cytotoxicity, Resin, Food

### 1 まえがき

食品や工業製品に起因する健康被害は、意図せずとも時折発生してしまうため、製品の安全性を適切に評価しておくことは重要である。動物実験は、人体への安全性を確認するための手法として従来利用されてきたが、最近では動物の権利保護の観点から廃止に向けた運動が進んでいる。動物実験の代替法には、動物由来の細胞を人工的に培養した動物培養細胞による試験が挙げられる。この代替法は、動物個体にストレスをかけないことや細胞への毒性を直接確認できることが利点とされる。

そこで、本研究では動物培養細胞を用いた評価試験の立ち上げに向けて培養環境を整備するとともに、樹脂材料に対する細胞毒性試験を行うための試験環境を構築した。さらに、食品抽出物の安全性を評価する手法の検討に

ついても併せて行った。

### 2 方法

#### 2.1 供試細胞の培養及び試薬

哺乳類の肺由来線維芽細胞である V79 細胞 (JCRB0603) を使用した。ウシ胎児血清を 10% 添加したイーグル最少必須培地 (以降、増殖培地) 及び底面積 75 cm<sup>2</sup> の細胞培養用フラスコ (以降、培養容器) を用いて CO<sub>2</sub> インキュベーターで培養 (CO<sub>2</sub> 濃度 5%、37℃、6 日) し、試験に供した。

細胞の洗浄には、リン酸塩緩衝液 (塩化カリウム 0.02%、リン酸二水素カリウム 0.02%、塩化ナトリウム 0.8%、無水リン酸水素二ナトリウム 1.15%) を使用した。また、培養容器底面に付着した細胞を剥がす際には、トリプシン溶液 (トリプシン 0.05%、エチレンジアミン四酢酸二水素二ナトリウム二水和物 0.05% を含むリン酸塩緩衝液) を使用した。

フードイノベーション推進係

\*環境・エネルギー係

\*\*発酵醸造戦略係

**表 1 細胞毒性試験の対照材料**

対照材料	概要
陽性材料 A	ジエチルジチオカルバミン酸亜鉛を 0.1% 含有するポリウレタンフィルム
陽性材料 B	ジブチルジチオカルバミン酸亜鉛を 0.25% 含有するポリウレタンフィルム
陰性材料	高密度ポリエチレンフィルム

## 2. 2 樹脂材料成分の抽出

細胞毒性の指標として使用される 3 種類の対照材料（一般財団法人食品薬品安全センター製）を 2×15 mm 角程度に加工し、オートクレーブ滅菌した（表 1）。なお、陽性材料 A は中程度の、陽性材料 B は弱程度の細胞毒性を示し、陰性材料は細胞毒性を示さない材料である。加工した試料の片面 2.5 cm<sup>2</sup> あたり 1 ml の割合で増殖培地を加えて静置（CO<sub>2</sub> 濃度 5%、37℃、24 時間）し、樹脂材料の成分を抽出した。得られた抽出液を 100% 試料溶液として、増殖培地で 2 倍ずつ希釈した 6 段階の試料溶液を調製した（100%、50%、25%、12.5%、6.3%、3.2%）。

## 2. 3 食品由来成分の抽出

界面活性作用を示す食品由来の試料として「サポニン、大豆由来」（富士フィルム和光純薬（株）製）10 mg を MilliQ 水 10 ml に添加し、よく攪拌した。オートクレーブ滅菌してから遠心分離（3,000 rpm、5 分）し、上清を 0.1% サポニン液とした。増殖培地の調製に使用する MilliQ 水を 0.1% サポニン液に一部代替することでサポニンが 0.05% 含まれる増殖培地を調製した。得られた培地を 0.05% サポニン液として、増殖培地で 2 倍ずつ希釈した 6 段階の試料溶液を調製した（0.05%、0.025%、0.013%、0.0063%、0.0032%、0.0016%）。

食品試料としてジャガイモを日の当たらない保管庫（暗所）または日の当たる窓際（明所）でそれぞれ 2 か月間常温保管した。ジャガイモの皮 5 g に蒸留水 45 ml を添加して乳鉢で粉碎した後、全量をオートクレーブ滅菌してから遠心分離（3,000 rpm、5 分）した。上清を 10% ジャガイモ抽出液とした。増殖培地の調製に使用する MilliQ 水を 10% ジャガ

イモ抽出液に一部代替することでジャガイモ抽出液が含まれる増殖培地を調製した。得られた培地を 1% ジャガイモ抽出液として、増殖培地で 2 倍ずつ希釈した 6 段階の試料溶液を調製した（1%、0.5%、0.25%、0.13%、0.063%、0.032%）。

## 2. 4 細胞毒性試験

V79 細胞を培養した培養容器から培地を除き、リン酸塩緩衝液 4 ml を静かに加えて培養容器底面に付着している細胞層を洗浄した。トリプシン溶液を 1 ml 加えてから静置（CO<sub>2</sub> 濃度 5%、37℃、2 分）した後、培養容器を叩くことで底面に付着している細胞を完全に剥がした。増殖培地 10 ml を加えて十分にピペッティングしてから 50 ml 遠心管に移した。遠心分離後（1,300 rpm、10 分）に上清を捨て、新しいリン酸塩緩衝液 10 ml を添加して再度ピペッティングと遠心分離（1,300 rpm、10 分）を行った。上清を捨ててから増殖培地を添加し、適切な細胞濃度に調整したものを細胞浮遊液とした。細胞浮遊液 0.5 ml を 24 ウェルプレートの各ウェルに添加してから培養（CO<sub>2</sub> 濃度 5%、37℃、48 時間）することでプレート底面に細胞を接着させた。24 ウェルプレートの培地を捨て、2.2 節及び 2.3 節で調製した試料溶液、または増殖培地を 0.5 ml ずつ所定の穴に添加し、直ちに培養（CO<sub>2</sub> 濃度 5%、37℃、6 日間）した。24 ウェルプレートの培地を捨ててからメタノールを添加して細胞を固定した後、ギムザ希釈液で染色を行った。同じ試料溶液を添加したウェルを 3 つずつ作製し、ギムザ希釈液で染まった V79 細胞由来のコロニー数の平均値を求めた。増殖培地を添加したウェルで生じたコロニー数の平均値を 100% として、以下の式より試料溶液の相対コロニー形成率を求めた。相対コロニー形成率が 50% となる試料溶液の濃度（IC<sub>50</sub> 値）は、IC<sub>50</sub> 値を挟む 2 点の測定値から一次方程式に基づいて算出し、細胞毒性の評価に使用した。

・相対コロニー形成率（%）

=（各濃度の試料溶液を添加したウェル中のコロニー数の平均値）×100／（増殖培地を添加したウェル中のコロニー数の平均値）

# 3 結果

## 3. 1 供試細胞の培養



新たに導入した V79 細胞の培養条件を検討したところ、CO<sub>2</sub> インキュベーターを用いた培養条件下で細胞の増殖を確認することができた。同一容器内で長期間培養した細胞は、培養容器の底面いっぱいに分裂した後、やがて増殖を止めてしまう。そのため、一部の細胞を新たな増殖培地に植え継ぐ操作（継代培養）が必要となる。所定の操作に従って継代培養を行ったところ、植え継いだ細胞の増殖が確認できたため（図 1）、当センターで培養細胞を管理することができると分かった。

細胞毒性試験では動物細胞のコロニーを数える必要があるため、事前確認として 24 ウェルプレートで V79 細胞を培養し、ギムザ染色を行った。その結果、青く染まった V79 細胞のコロニーが確認できた（図 2）。そこで、まずは樹脂材料を試料として細胞毒性試験を行うこととした。

### 3. 2 樹脂材料の細胞毒性試験

培養細胞を用いた評価試験の環境を整備するため、樹脂材料に対する細胞毒性試験を実施した。今回は、第十八改正日本薬局方に記載されている樹脂製医薬品容器材料のための

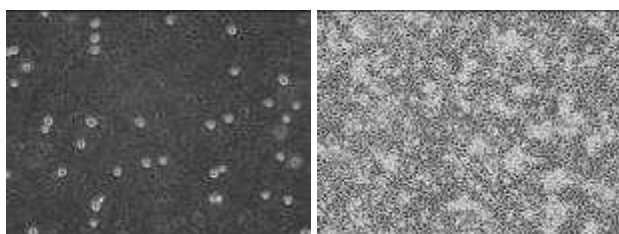


図 1 V79 細胞の倒立顕微鏡写真

（左：継代培養直後の細胞の様子、右：培養 6 日目の細胞の様子）

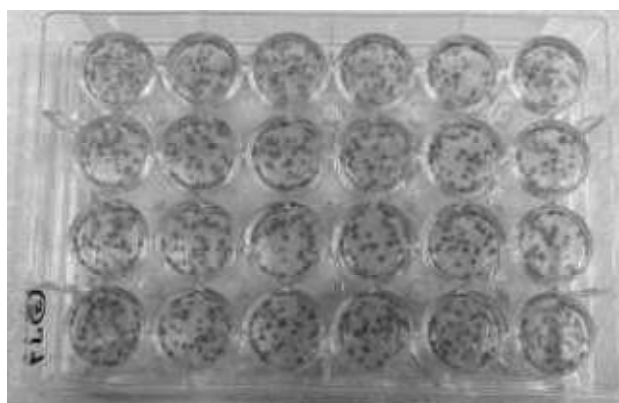


図 2 24 穴ウェルプレートの様子

（4 行×6 列に並んだウェルの中で青い点状に見えるものが V79 細胞由来のコロニー）

試験操作を参考にした<sup>1)</sup>。毒性既知の材料を使用して試験を行ったところ、V79 細胞の生育を阻害する濃度が樹脂材料ごとに異なることを確認した。（図 3）。中程度の細胞毒性を示す陽性材料 A は、6.3%以上の濃度条件で V79 細胞に毒性を示したため、ウェル中にコロニーが形成されなかった。一方、3.2%の試料溶液を添加したウェルでは、コロニー様に染まった箇所が確認された。染まった箇所の大きさは、他の条件下で形成されたコロニーと比較すると小さいため、細胞の生育阻害が起こっていると考えられたが、本試験ではコロニーとみなして計数した。弱程度の細胞毒性を示す陽性材料 B は 100%試料溶液で細胞毒性を示したが、50%以下の濃度条件ではコロニーが形成されたため細胞毒性は比較的弱いことがわかった。相対コロニー形成率が 50%となる IC<sub>50</sub> 値を材料ごとに求めたところ、陽性材料 A は 4.2%、陽性材料 B は 76%となった（図 5）。陰性材料は、相対コロニー形成率が 50%を下回ることはなかった。対照材料の頒布元が測定した各材料の IC<sub>50</sub> 値は、陽性材料 A が 0.72%、陽性材料が B 72%であった。試料の希釈濃度が今回行った試験とは異なるため単純な比較はできないが、各対照材料が示す毒

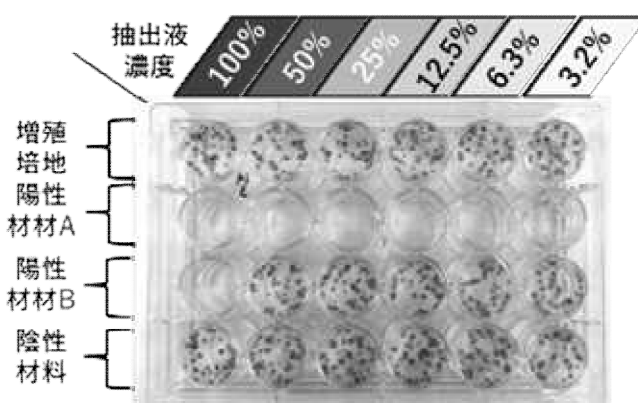


図 3 樹脂材料の細胞毒性試験結果

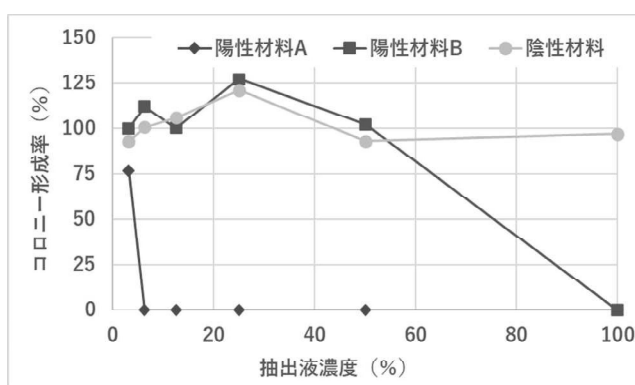


図 4 樹脂材料の相対コロニー形成率



性の程度は、同様な傾向を示していると考えられた。そのため、今回の試験では対照材料の細胞毒性を適切に評価できたと判断した。

### 3. 3 食品由来成分の細胞毒性試験

上述の細胞毒性試験を応用して、培養細胞による食品の安全性評価を試みた。今回は、食品試料としてジャガイモを選定した。ジャガイモは、日の当たる場所で保管することにより天然毒素であるソラニン及びチャコニンも多く生成する。そのため、不適切に保管したジャガイモは、食中毒の原因になることが報告されている。ソラニン及びチャコニンは、植物グリコシドであるサポニンの一種である。サポニンは界面活性作用により細胞膜を破壊して溶血効果を示すことが知られているため、ジャガイモに含まれる天然毒素も同様の作用により細胞毒性を示すと考えた。そこで、保管条件の異なるジャガイモの抽出液を増殖培地に添加して V79 細胞を培養した。また、サポニンの細胞毒性を確認するために市販の大豆由来サポニンに対照試料として使用した。

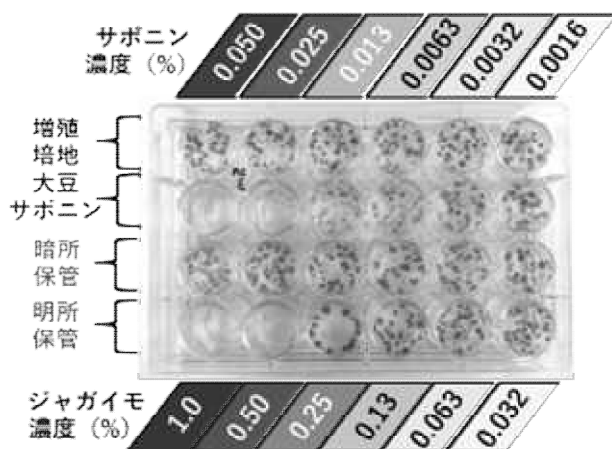


図5 食品由来成分の細胞毒性試験結果

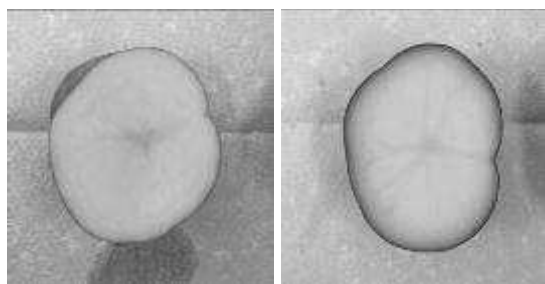


図6 保管条件の違いによるジャガイモ外観の変化

(左：暗所保管、右：明所保管)

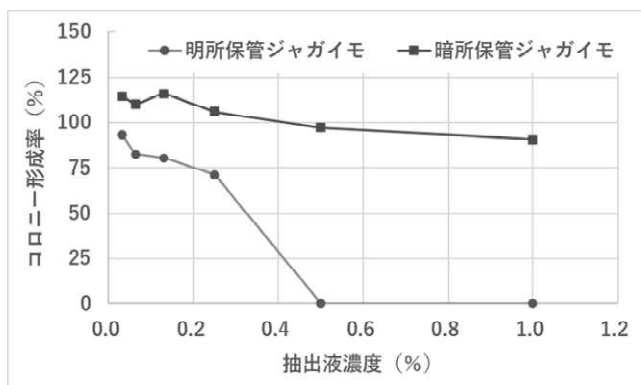


図7 食品抽出液の相対コロニー形成率

サポニン液を添加したウェルでは、コロニーの形成阻害が起こり(図5)、 $IC_{50}$ 値は0.034%であった。そのため、大豆由来サポニンが細胞毒性試験の対照試料として有効であることを改めて確認した。

明所で保管したジャガイモは、皮周辺が緑色に変色しており、天然毒素を多く生成していると考えられた(図6)。皮の部分粉碎した抽出液を用いて細胞毒性試験を行ったところ  $IC_{50}$ 値は0.32%となり、細胞毒性を示した(図7)。一方、暗所保管したジャガイモ抽出液は、V79細胞に対して毒性を示さなかった。このことから、ジャガイモは保管条件によって毒性成分の生成量を変化することを確認した。以上より、食品の安全性を確認する方法として細胞毒性試験が有効であると分かった。

## 4 まとめ

動物培養細胞のための培養環境を新たに整備し、細胞毒性試験を実施した。その結果、樹脂材料の毒性を定量的に評価することができた。また、保管条件の異なる食品の安全性を評価できるシステムを構築することができた。今後は、共同研究などに活用していきたい。

## 参考文献

- 1) 令和3年6月7日厚生労働省告示第220号 第十八改正日本薬局方

## 計測機器の連携

### ～デジタルデータに対するX線CTデータの合成法の基礎的検討～

小宅智史・林和\*・黒崎紘史・増田直也・狩野幹大\*\*・高橋勇一

Measuring instruments cooperation

～A fundamental study on integrating X-ray CT data with digitizer data～

OYAKE Satoshi, HAYASHI Yawara, KUROSAKI Hirofumi, MASUDA Naoya,  
KANO Motohiro and TAKAHASHI Yuichi

X線CTでは材質や形状に起因するアーチファクトにより高精度な寸法測定・形状評価が困難である。そこで外側形体はデジタルデータ、内側形体はX線CTデータを用いて両者を重ね合わせることでデジタルの高い測定精度を活かしつつ、X線CTによる内側形体情報を統合した形体データの構築が期待される。

本研究では、デジタルおよびX線CTデータから高精度な形体データを作成し内側形体の誤差を評価することで、形体データの構築可能範囲の確立を目的とする。その結果直径25mm、長さ15mm以下の評価範囲で約0.01mmの精度でデータ統合可能なことが示唆された。

キーワード：X線CT、デジタル、データ統合

X-ray CT struggles with high-precision measurements due to artifacts from material properties and geometry. To improve accuracy, this study integrates external shape data from a digitizer with internal shape data from X-ray CT. By evaluating internal shape errors, we established a feasible range for data integration, achieving approximately 0.01 mm accuracy within  $\phi 25$  mm and an evaluation range of 15 mm.

Keywords: X-ray CT, Digitizers, Data integration

#### 1 はじめに

企業の製品開発において、製品の寸法測定・形状評価のための形体データ取得の要望は高い。形状測定装置として、デジタル（光学式3Dスキャナ）およびX線CTが広く用いられている。デジタルは外側形体（以下、外形とする）を高精度に取得出来る一方で、内側形体（以下、内形とする）の測定は不向きである。これに対してX線CTはX線の透過が可能な試料であれば外形

および内形の同時取得が可能である。

しかしながら、X線CTでは材料固有のX線減衰係数の違いや試料の幾何学形状に起因するビームハードニングやストリークなどのアーチファクトにより、断面画像に歪みが生じる。これにより形状の膨張や収縮といった計測誤差が発生し、高精度な寸法測定・形状評価が困難になっている。金属や樹脂といった材質の違いに依ってもアーチファクトの影響は前者の方が大きくなるなど、寸法値や外形への影響の程度は異なる。

このような技術的課題を解決するため、外形はデジタイザの測定データを用い、内形についてはX線CTの測定データを用いて両者を重ね合わせることで、デジタイザの高い測定精度を活かしつつ、X線CTで取得した内形情報を統合した形体データの構築が期待される。

本研究の目的は、デジタイザにより取得した外形データとX線CTにより得られた内形データを統合した形体データを構築し、その際に生じる内形の誤差を定量的に評価することで、提案手法によるデータ構築可能範囲を確立することである。

## 2 実験方法

### 2. 1 実験概要

本研究では、デジタイザとX線CTデータを統合した形体データの構築可能範囲の確立を目的として、X線CT、デジタイザおよび三次元測定機を用いて試験片の計測を行った。

試験片はサイズの異なる5種類の部品と各サイズに対して材質が異なる2種類（アルミニウム合金A5056およびMCナイロン）の合計10サンプルである。試験片は形状の合成の影響を評価するサンプルを3種類（No. A1, A2, A3）、アルミ片の厚みの影響および形状の影響も考慮した評価を行うためのサンプルを2種類（No. B1, C1）作成した。

測定方法として、デジタイザとX線CTを用いて試験片の外形を測定した。また、X線CTにより試験片の内形も測定し、得られた形状データを三次元測定機で取得したデータと比較評価を行った。さらに内形においては、三次元測定機で取得した内形データとデジタイザとX線CTを統合したデータでの外形を基準にした際の同一位置における内形を比較することで、データを統合した場合の誤差の評価を行った。

以下に実験装置、測定条件、測定手順および形状データ照合評価手法の詳細を述べる。

### 2. 2 実験装置およびソフトウェア

#### 2. 2. 1 実験装置

外形の高精度な三次元データを取得するためにデジタイザ（ATOS Core、GOM社）を使用した。点間距離0.03mm、スキャン範囲は80mm×60mmであり、投影した光が当たり受光部に反射する範囲しかデータの取得が出来ないため、複数回角度を変更して測定を行い、形状全体の結合データを取得した。外形および内形データの取得には産業用X線CT（Phoenix v|tome|x m 240/180、日本ベーカーヒューズ株式会社）を用いた。

また、寸法測定には三次元測定機（LEGEX9106、ミットヨ株式会社）を使用した。本装置は、ポイント測定および触針測定が可能で測定精度は $(0.28+L/1000)\mu\text{m}$ （L=任意測定長（単位：mm））である。測定範囲はX軸900mm、Y軸1000mm、Z軸600mmである。実験装置外観を図1に示す。

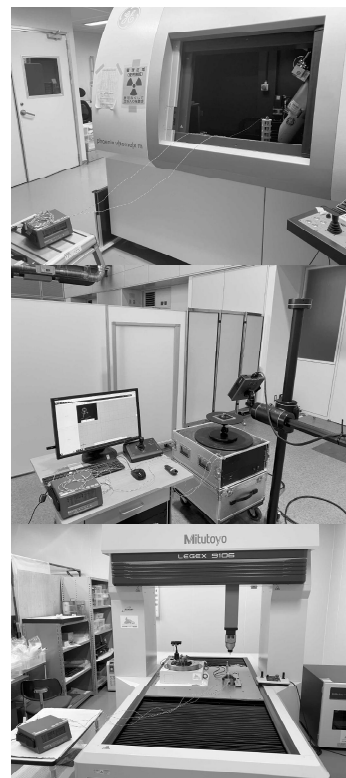


図1 実験装置（上からX線CT、デジタイザ、三次元測定機）

#### 2. 2. 2 ソフトウェア

断面画像の再構成およびSTL形式への変換にはVG Studio MAX3.2（ボリュームグラフィックス株式会社）を使用した。また、デジタイザで取得したデータの処理および形状データの照合評価にはGOMInspect2017（GOM社）を用いて評価を行った。

## 2. 3 試験片

製作した試験片を図2に、詳細を図3に示す。No. A2、A3の試験片に関しては、No. A1の直径25mm部分を各20mm、15mmとしている。

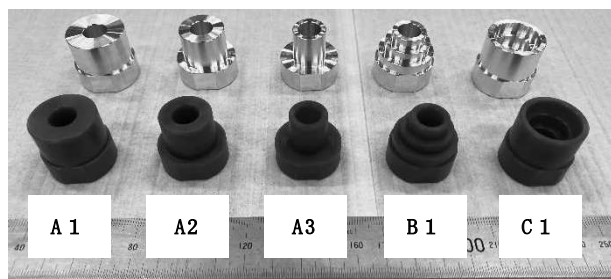


図2 製作した試験片

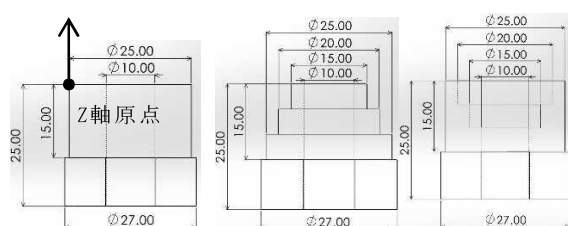


図3 試験片詳細（左からNo. A1, B1, C1）

試験片はX線CTとデジタイザで取得した各データに対して位置合わせの際に、位相が一意に決まるようDカットを付している。

## 2. 4 評価断面

外形および内形に対する評価は断面で行いZ軸原点からZ=-15mmの評価範囲において、各円筒の中央部とした。内形評価部はφ10mmにおける断面でありデータ合成時の評価断面も同様である。図4に評価断面を示す。なお、サンプルB1およびC1については、評価対象の円筒部分が各3か所となるため、以後のグラフではサンプルの評価箇所を識別するために便宜上、Z軸+側からup、middle、downの識別記号を割り当てている。

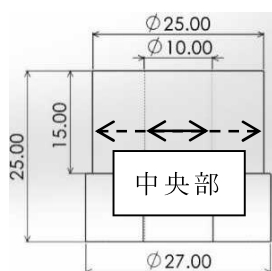


図4 評価断面について（内形評価断面：実線、外形評価断面：破線）

## 2. 5 測定条件

X線CTの測定条件は、管電圧100kV、管電流100uA、FODは100mmとした。その際のボクセルサイズは約20um/voxelである。デジタイザの測定では、反射防止用のスプレーを塗布した。また、三次元測定機での測定は直径4mm、長さ50mmのスタイラスを使用した。

## 2. 6 測定手順

### 2. 6. 1 X線CTによる測定

X線CTによる測定では、各試験片を回転台に配置し固定した後、フルスキャン（360°回転）を実施した（図5参照）。取得した断面画像をVG Studio MAX3.2に入力し三次元モデルを生成、STLデータを出力した。

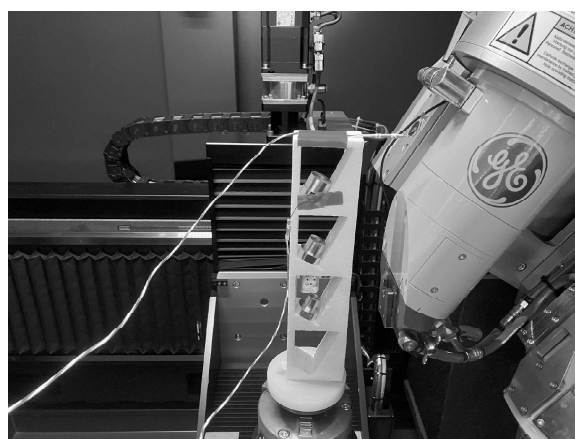


図5 X線CTによる測定

### 2. 6. 2 デジタイザによる測定

デジタイザによる測定では、各試験片を回転テーブルに配置し、試験片全体をスキャンした（図6参照）。そして外形の三次元点群データを取得し解析ソフトウェアGOMInspect2017を用いて、三次元モデルに再構成した。なお、光沢除去のため測定対象の試験片に反射防止スプレーを使用している。

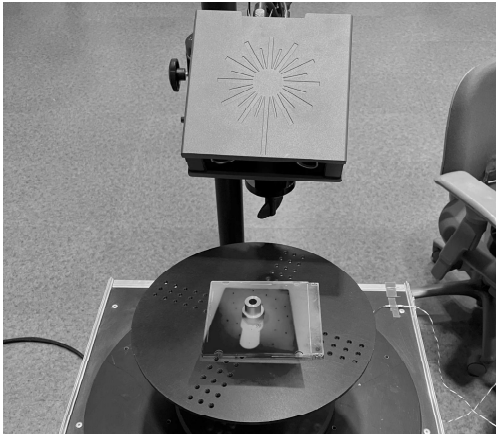


図6 デジタイザによる測定

### 2. 6. 3 三次元測定機による測定

三次元測定機での測定では、試験片を図7のように固定した。その後、評価対象である試験片の直径10mmの内形部分のZ軸原点からZ=-15mmまでの範囲において、各円筒の中央部について倣い測定を行い、形状データを取得した。

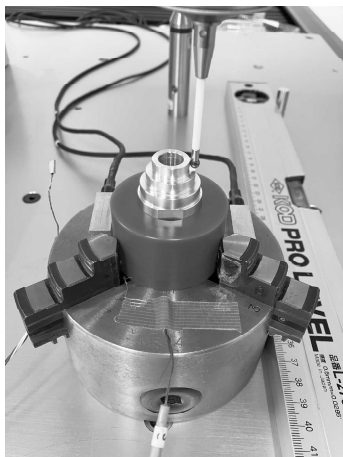


図7 三次元測定機による測定

### 2. 7 形状データの照合評価

三次元測定機で測定した内形および外形の点群データに対して内形はX線CT、外形はデジタイザおよびX線CTのデータとの差を材質および大きさの異なる試験片に対して求めた。その後同様に、デジタイザによる外形データを基準として用いてX線CT外形データとベストフィットした際のX線CT内形データとの差の評価を行った。

各種形状データとの照合および評価は、3次元CADソフトウェア(Rhinoceros7、McNeel&Associates)を用いて行った。

## 3 結果および考察

### 3. 1 各実験装置の測定結果

各実験装置による測定結果を図8に示す。

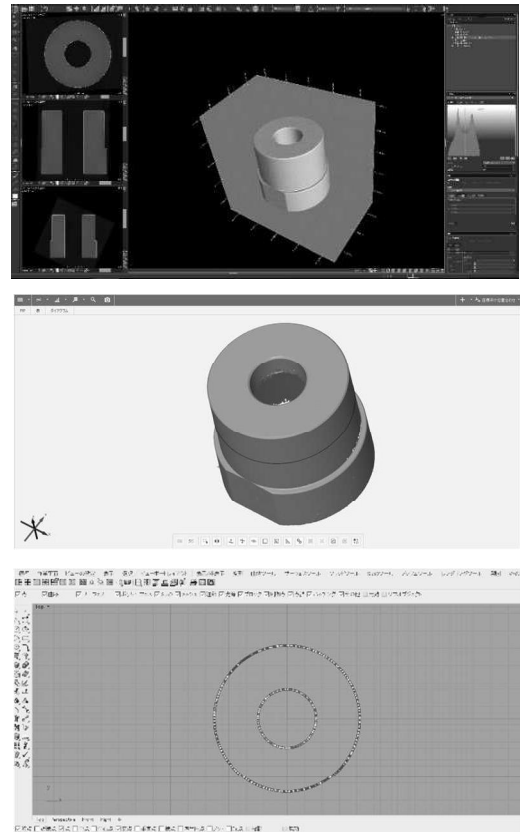


図8 各実験装置による測定結果(上からX線CT、デジタイザ、三次元測定機)

X線CTでは試験片の内形および外形データを取得することが出来、STLデータで出力した。デジタイザでは、一部の谷形状を除き外形データを取得した。また、三次元測定機では試験片の断面形状を点群データとして取得した。各種形状データとの照合および評価の様子を図9に示す。

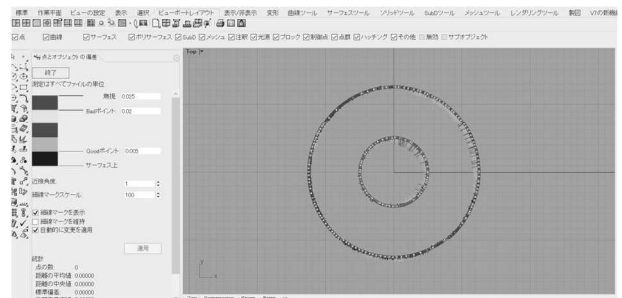


図9 三次元測定機測定データと各種形状データとの照合および評価の様子

### 3. 2 材質および大きさによる影響

各試験片に対して、三次元測定機による内形データに対するX線CTによる内形データの差を図10に示す。

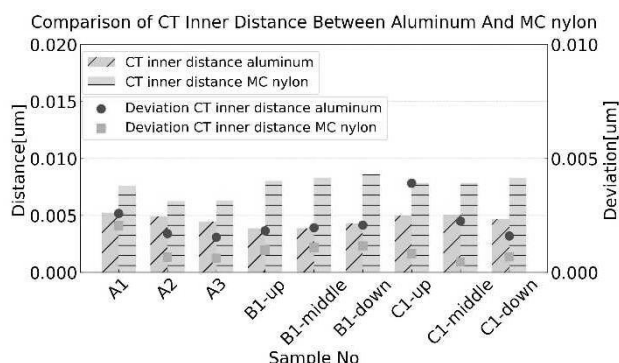


図 1 0 X線CTによる内形データと三次元測定機による内形データとの比較

棒グラフが三次元測定機で測定した内形の断面形状に対して、X線CTおよびデジタイザで取得したデータの半径方向の距離の差の平均値である。散布図が距離の差の標準偏差を表している。X線CTで測定した形状データについては、内形において材質や試験片の大きさに依らず0.01mm程の距離の差に収まることが明らかになった。

この結果から内形において、直径25mm、長さ15mm以下の評価範囲では、2種類の材質（アルミニウムおよびMCナイロン）および異なる大きさ（直径15、20、25mm）で三次元測定機の内形データと大きな差は見られないことが分かった。

また、標準偏差はアルミニウム製よりMCナイロン製の方が小さい結果となった。これは、材料のX線減衰特性に起因していると考えられる。MCナイロンはアルミニウムと比較して原子番号が小さく、X線の吸収係数が低いため、X線CTによる測定時にビームハードニング等のアーチファクトが生じにくい。その結果、測定値のばらつきが小さくより安定した形状データが得られたと推測される。一方、アルミニウムはX線の減衰が比較的大きいため、位置や厚みによって画像コントラストの変動が生じこれが標準偏差の増加に繋がったと考えられる。

また各試験片に対して、三次元測定機に

よる外形データに対するX線CTおよびデジタイザによる外形データの差を図11に示す。

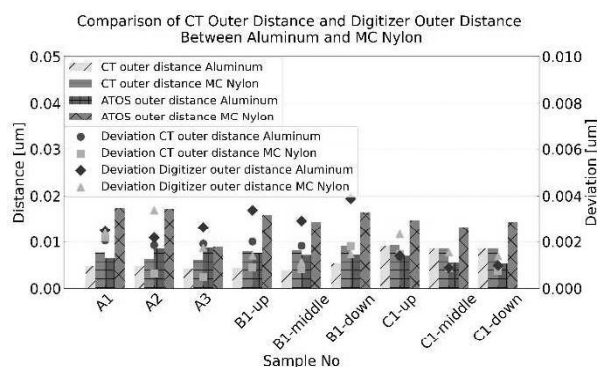


図 1 1 X線CTおよびデジタイザによる外形データと三次元測定機による外形データとの比較

外形については、アルミニウム製においてもMCナイロン製においても大きさや形状によらず、距離の差の平均値が約0.02mm以内に収まっていることが明らかになった。

このため外形においても直径25mm、長さ15mm以下の評価範囲では、2種類の材質（アルミニウムおよびMCナイロン）および異なる大きさ（直径15、20、25mm）で三次元測定機の外形データと大きな差は見られないことが分かった。また標準偏差も0.004mmと非常に小さい値を示した。

### 3. 3 データ合成による内形の変化

最後にデジタイザで取得した外形データとX線CTで取得した形状データを、デジタイザによる外形データを基準として用いてX線CTデータとベストフィットを行い合成した形状データの内形と、三次元測定機での内形データとの差を評価した。データ合成の様子を図12に、比較結果を図13に示す。

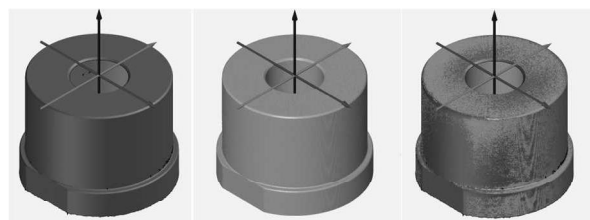


図 1 2 内形データ合成状況(左からデジタイザデータ、X線CTデータ、デジタイザおよびX線CTのデータ合成後のデータ)

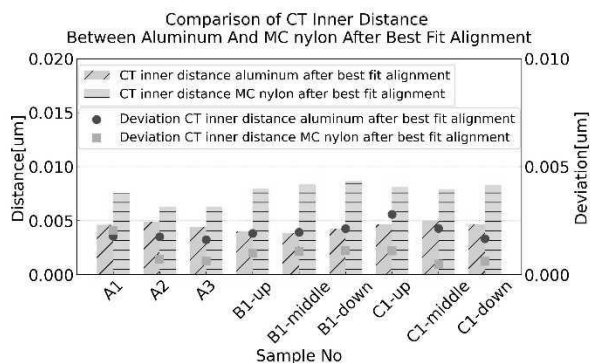


図 1 3 デジタイザによる外形データを基準として用いてX線CTデータとベストフィットした際のX線CT内形データと三次元測定機内形データとの比較

デジタイザによる外形データによりベストフィットさせた時のX線CTの内形について、材質や大きさに依らず0.01mm程の距離の差に収まることが分かった。そして両者の差分を取った結果を図14に示す。

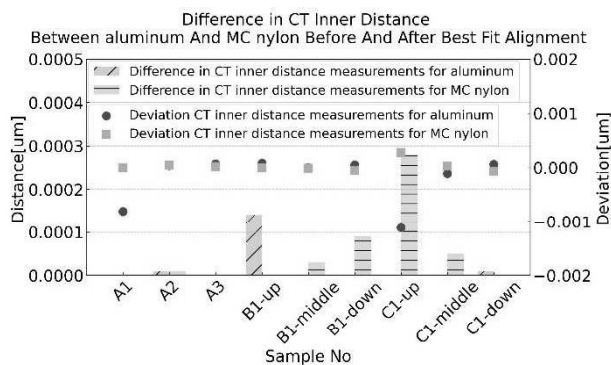


図 1 4 X線CTによる内形データとデジタイザによる外形データでベストフィットしたX線CTの内形データとの差

この結果から、データ合成時における内形の差はほとんど認められない。その理由としては、デジタイザで取得した外形データとX線CTで測定した外形データに大きな違いがなかったことで、外形を基準としたベストフィットによる位置合わせを行っても内形データに大きな誤差は生じなかったと考えられる。

よって、本研究で対象とした試験片の評価範囲における内形の誤差は約0.01mmであり、X線CTとデジタイザによるデータ合成が可能であることが示唆された。

## 4 まとめ

本研究により明らかになったのは以下の2点である。

- ・直径25mm、長さ15mm以下の評価範囲において2種類の材質（アルミニウムおよびMCナイロン）および異なる大きさ（直径15、20、25mm）でデジタイザおよびX線CTによる内形および外形データの誤差の程度を明らかにした。その結果、材質や大きさに依らずデジタイザでは外形、X線CTでは外形および内形において、三次元測定機で取得したデータとの差は0.02mm以下であり、大きな差は見られなかった。

- ・本研究で扱った試験片の評価範囲に対してデータ合成時の内形データ同士の誤差は約0.01mmであり、X線CTおよびデジタイザのデータ合成が可能ながことが示唆された。

本研究により、アルミニウムやMCナイロンなどX線の減衰が小さいワークに対する形状評価において、誤差の程度を把握できるようになると考えられる。これにより、試験の可否判断が容易になり、測定データの信頼性が向上して、実用的な品質評価が可能になることが期待される。

今後は、X線の減衰が大きい大型のワークや重金属（原子番号の大きい）製のワークを対象として、材質や形状およびアーチファクトの影響等を把握することで、どの範囲までデータ合成が可能か調査研究を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 戸田裕之（2019）. X線CT-産業・理工学でのトモグラフィー実践活用-(第1版). 共立出版

## X 線 CT 用治具の開発及び寸法計測精度向上の検討

小林興尚・高橋勇一\*・黒崎紘史\*

小宅智史\*・中村哲也\*\*・川原潤也\*\*\*

Development of stage for X-ray Computed Tomography (CT) and examination for improving dimensional measurement accuracy

KOBAYASHI Okihisa, TAKAHASHI Yuichi, KUROSAKI Hirofumi,  
OYAKE Satoshi, NAKAMURA Tetsuya, KAWAHARA Junya

産業用 X 線 CT は、近年では三次元 CAD データの生成や寸法計測にも活用が広まっているが、取得したデータには観察対象を保持する治具形状も反映されることが多い。このため三次元データ化や寸法計測を目的とする場合には、対象に適した治具の材質および形状を選定しなければ、取得データの質の悪化につながる。本研究では、汎用的に使用でき三次元データ生成の質を向上させるための X 線 CT 装置専用治具を開発し、さらに寸法精度向上のための検討を行った。

キーワード：X 線 CT、三次元 CAD、寸法計測

In recent years, industrial X-ray CT has been widely used for generating 3D CAD data and measuring dimensions, but the acquired data often reflects the shape of the jig that holds the observation target. Therefore, if the purpose is to convert to three-dimensional data or measure dimensions, the quality of the data will deteriorate unless the material and shape of the suitable jig are selected. In this research, we developed a jig for X-ray CT equipment that can be used for general purposes and improve the quality of 3D data, and further studied to improve the dimensional accuracy.

Keywords : X-ray CT、3D CAD、Measuring dimensions

### 1 まえがき

群馬県立産業技術センターでは産業用 X 線 CT を活用した、非破壊での依頼試験や研究を実施している。活用目的の多くは三次元透過画像による対象物（以下「ワーク」という。）の透過観察であるが、近年は一般的な計測機器では計測できないワークについての寸法計測や三次元データ化（.STL 形式）を目的とする活用が増加傾向にある。産業用 X 線 CT では装置内の回転テーブルによりワークを 360 度回転させて三次元透過画像を取得するが、回転中にワークが揺れ動くことと画質に悪影響を及ぼす

ことから、姿勢保持及びワーク転倒防止を目的とした粘着テープ（以下「固定テープ」という。）での固定を実施している。この固定テープは三次元透過画像にも写り込むが、観察目的であれば大きな影響はない。しかしながら寸法計測や三次元データ化を目的とする場合、固定テープの写り込みは精度の低下に繋がるため、固定方法の改善が望まれている。また、寸法計測にあたって、当センターの X 線 CT はドイツ技術者協会が規格化した VDE/VDI 2630 に準拠した、計測が可能な計測用 X 線 CT であるが、計測精度は球間距離で保証しているのみである。球径や穴径、端面間距離などは線量の強度、画像再構成時の設定で変化することが分かっているが、変化の度合いは不明であるため、端面間距離の寸

スマートファクトリー推進係、\*計測係

\*\*企画管理係、\*\*\*生産システム係



法精度把握が求められている。

本研究では、固定方法改善のため様々な形状の姿勢保持が可能で固定テープを要しない X 線 CT 専用の発泡スチロール治具を開発した。また端面間距離の寸法精度把握のため、材質の異なる定形直方体を使用し、マイクロメータでの計測結果と X 線 CT での計測結果の偏差を評価することで寸法精度の定量的把握を試みた。

## 2 方 法

### 2. 1 使用機器

本研究に使用した産業用 X 線 CT (Phoenix v|tome|x m 240/180 ; 日本ベークハーズ株式会社) を図 1 に示す。断面画像のボリュームデータ化に使用したソフトウェアは VG Studio MAX3.2 (ボリュームグラフィックス株式会社) であり、計測には座標計測モジュールを使用した。また、後述する定形直方体の寸法計測に使用したマイクロメータ (MDC-25M ; 株式会社ミットヨ) を図 2 に示す。



図 1 高分解能計測用 X 線 CT システム



図 2 マイクロメータ

### 2. 2 定形直方体

本研究では金属または樹脂でできた直方体をワークとして使用した。直方体の設計値は高さ 8mm、奥行き 10mm、幅 15mm と

し、材質は S50C、ANP79、A5052HP、POM、ABS の 5 種とした。5 種のブロックの外観を図 3 に示す。

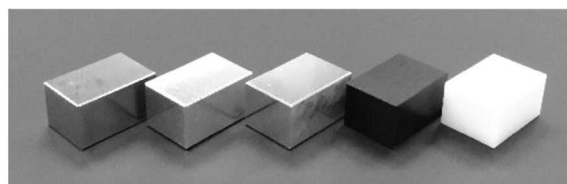


図 3 定形直方体（材質は左から順に、S50C、ANP79、A5052HP、POM、ABS）

### 2. 3 寸法計測精度把握

前述の定形直方体 5 種を対象に、高さ、奥行き、幅寸法についてマイクロメータでの計測及び X 線 CT での計測を行い、これらの結果から偏差を算出し、X 線 CT による計測精度の定量化を検討した。それぞれの計測方法手順を以下に示す。

#### 2. 3. 1 マイクロメータによる計測方法

マイクロメータをマイクロメータスタンドに保持し、定形直方体の対面する二面間の距離を測定した。一つの直方体について高さ、奥行き、幅の 3 方向について測定を行い、これらを基準値とした。

#### 2. 3. 2 X 線 CT 撮像条件

X 線照射条件を表 1 に示す。表 1 には管電圧、管電流の設定値のほか、X 線焦点の前に挿入した金属フィルタの材質及び厚さも記載した。また共通条件として、ボクセルサイズは 24.7 $\mu$ m、投影画像取り込み数を 1400 枚、FOD (Focus to Object distance) を 100mm、FDD (Focus to Detector distance) を 600mm とした。画像再構成の際には、ビームハードニング補正等のフィルタ処理は行わず、中心軸補正のみ行った。

#### 2. 3. 3 X 線 CT 計測方法

ボリュームレンダリング法を用いて、定形直方体を可視化し、ボリュームデータ抽出の

表 1 X線照射条件

材質	管電圧 [kv]	管電流 [μA]	フィルタ
S50C	190	120	銅 0.5mm スズ 0.5mm
ANP79	110	100	アルミ 2mm
A5052HP	90	110	なし
POM	90	110	なし
ABS	90	110	なし

ため、定形直方体の CT 値と空気の CT 値の中間に閾値を設定し等値面を定める。抽出した直方体について、幅方向が X 軸、奥行き方向が Y 軸、高さ方向が Z 軸となるように座標系を設定し、どこをとっても座標が正の値になるよう原点を設定し、抽出した直方体の対面する二面間の距離を計測値とした。なお、面のフィッティングは、設計上の面の中央座標を中心に 1,000 ポイント取得し実施した。

#### 2. 3. 4 計測値偏差の算出

X 線 CT による計測値から、マイクロメータで計測した基準値を減算した結果を、計測偏差とした。

### 3 結果及び考察

#### 3. 1 発泡スチロール治具開発

##### 3. 1. 1 治具形状

本研究にて開発した発泡スチロール治具の形状の一例を図 4 に示す。一例では直径 120mm、高さ 100mm の円柱に 80 度のすり鉢状の加工を施した形状を示したが、実際にはこのほかにも直径、高さ、角度の異なる治具を作製している。材質には X 線を透過しやすい発泡スチロールを選定した。本治具はワークの設置箇所をすり鉢形状にしたことで、ワークの自重で姿勢保持が可能であり、固定テープの使用を要さない。また副次効果として、ワークの置き直し、設置角度調整、X 線 CT 撮像時の中心軸合わせが容易となった。本治具は令和 4 年度に群馬県単独特許出願を行った。(X 線 CT 装置用ワーク保持治

具、特許出願番号：2022-63726 (2022)、開発主担当 計測係 高橋独立研究員)

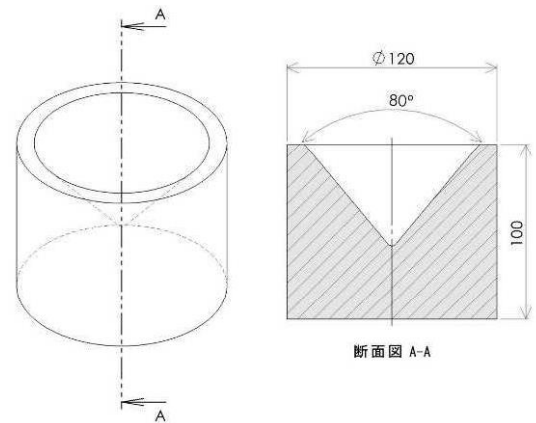


図 4 発泡スチロール治具形状

#### 3. 1. 2 治具開発の効果

治具開発の効果を示すため、図 5 に示す樹脂部品（概形寸法 86mm×73mm×30mm）を従来の方法で固定し等値面を定めた結果（図 6）と開発治具で保持し等値面を定めた結果（図 7）を図に示す。図 6 では部品中央部に固定テープを巻き付けて姿勢保持をしたため、テープを含めた形状が出力されている。対して図 7 では、治具のみでワークを保持したことで固定テープの写り込みのないデータを出力することができた。



図 5 樹脂部品

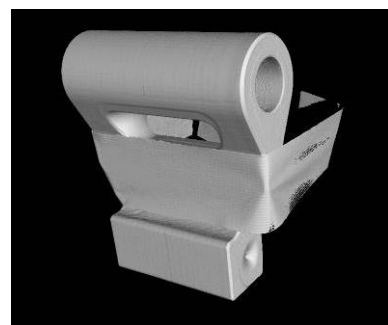


図 6 従来の固定方法で取得したデータ

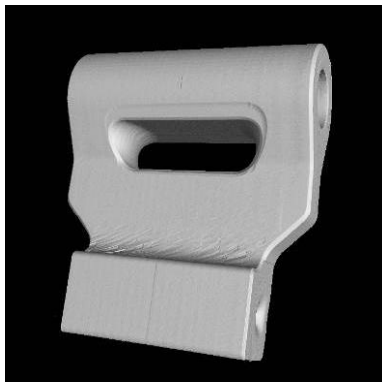


図7 開発治具を使用して取得したデータ

図4の発泡スチロール治具では、例えば直径20mm高さ200mmの円柱のような一辺が長い形状の姿勢保持は困難であり、一つの治具では、全てのワークには適用できない。しかし、すり鉢の角度、高さ直径を変更して複数の治具を作製することで、様々な形状のワークについて固定テープを使用せず質の高い三次元データを取得する事が出来る。また、このように複数の大きさの治具を作製する事にはメリットがある。例えば図4の治具を使用して直径10mm高さ10mmの相対的に小さなワークの三次元データを取得することは可能であるが、ワークに対して治具が相対的に大きいためワークを十分にX線減に近づけることができず、ボクセルサイズが大きくなり解像度の低いデータとなってしまう。それぞれのワークサイズに合わせた治具を使用することで、ワークをX線源に十分に近接させることができ、解像度を向上させたデータを取得する事が可能となる。

### 3. 2 寸法計測精度向上のための検討

#### 3. 2. 1 定形直方体の計測結果

マイクロメータでの計測値およびX線CTでの計測値から算出した偏差を図8に示す。グラフの縦軸は偏差(mm)、横軸は定形直方体の設計値(mm)である。S50Cにおいては計測距離が長くなるほど偏差が大きくなり、マイクロメータでの計測値よりもX線CTでの計測値の方が大きくなる傾向があった。POM及びABSについても、計測距離が長くなるほど偏差が大きくなったが、マイクロメータでの計測値よりもX線CTでの計

測値の方が小さくなる傾向があった。ANP79及びA5052HPにおいては計測距離が長くなっても偏差は一定であった。

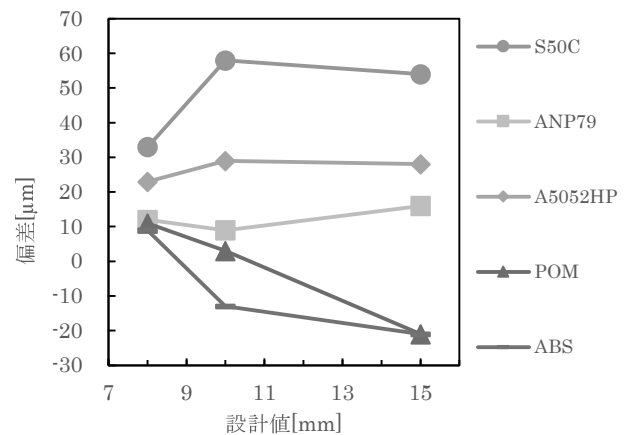


図8 設計値ごとの偏差

#### 3. 2. 2 計測結果に係る考察

X線CTでの計測値は、定形直方体のCT値と空気のCT値の中間に設定した閾値から定めた等値面から取得しているため、ANP79及びA5052HPの結果のように計測距離によらず一定の偏差が発生するものと予想したが、結果は材質ごと、計測距離ごとに異なる傾向となった。現時点で原因は解明できていないが、X線の散乱線の影響が大きいのではないかと考えている。S50CのX線CT画像を図9に示す。図9の四隅においては、空気の黒色とワークの白色が明瞭に分かれているが、各辺の中央に近い部分においては灰色で表現される領域が存在する。この灰色の部分はおそらく散乱線の影響を受けた領域であり、等値面生成の際に空気と材料の境界が空気側に偏ってしまう要因となったと考えられる。

以上より、計測精度の定量化のためには散乱線の影響を確認する必要があるが、その評価方法は確立していないことから、散乱線評価法の確立が課題となることが分かった。

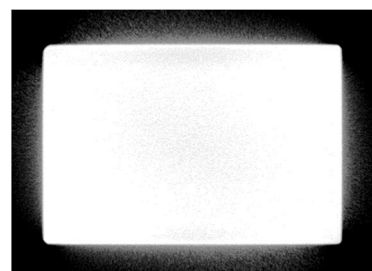


図9 S50CのX線CT画像

## 4 まとめ

本研究にて発泡スチロール治具を開発したことで、解像度を向上させ固定テーブルの写り込みのない三次元データを出力することが可能となった。また、X線CTを使用した寸法計測精度把握のためには、散乱線の評価が課題であることが分かった。

## 参 考 文 献

- 1) 戸田裕之：X線CTー産業・理工学でのトモグラフィー実践活用ー
- 2) 田中俊敬ほか：産業用X線CTの理解と活用、軽金属学会誌、第71巻、第9号、417(2021)

# 協働ロボットの活用による生産現場の自動化に関する研究

狩野幹大・小林興尚・坂田知昭・石黒聡\*

Research on Automation of Production Sites Utilizing Collaborative Robots

KANO Motohiro, KOBAYASHI Okihisa, SAKATA Tomoaki, ISHIGURO Satoshi

近年、ものづくりの現場では深刻な人手不足が問題となっている。この課題を解消する手段として、協働ロボットによる軽作業の自動化が注目を集めている。

当センターでは企業への DX 技術導入を推進するため、各種デジタルソリューションを展示し、見学を受け入れている。その一環として、協働ロボットの展示を行っており、本研究ではベルトコンベアと連携した動作デモを設計・構築した。これにより、見学者が生産現場に近い状況を視覚的に体験できるよう展示内容の改良を行った。

キーワード：協働ロボット、自動化

In recent years, a serious labor shortage has become an issue at manufacturing sites. Automation of light work using collaborative robots has been attracting attention as a means to solve this problem.

In order to promote the introduction of DX technology to companies, the Center exhibits various digital solutions and accepts visitors. As part of this effort, cooperative robots are exhibited, and in this study, we designed and built a demonstration of operation linked to a conveyor belt. This improved the content of the exhibit so that visitors can visually experience a situation similar to that of a production site.

Keywords : Collaborative robot, Automation

## 1 まえがき

近年、ものづくりの現場で深刻化している人手不足を解消するための手段として、協働ロボットが注目を集めている。

従来の産業用ロボットは、人の作業エリアと分離され、安全柵で囲んで設置する必要があった。そのため、設置スペースや導入コストの制約から導入できる企業はごく一部に限られていた。しかし、協働ロボットは一定の条件を満たせば、安全柵なしで設置することが可能であるという強みを持つ。また、アプリケーション開発が進展により直感的な操作が可能なロボットが登場したことや、ロボット本体のコスト削減が進んだなどの理由から、導入や運用の負担が大幅に低減し、中小企業でもロボットが導入しやすい環境が整いつつある。

こうした背景から、国内でも協働ロボットの開発や導入が進展している。

さらに、ロボットは夜間や休日にも稼働することが可能であり、単純作業をロボットで行う仕組みづくりを行うことにより、人手不足の解消や生産性の向上への効果が期待されている。

当センターでは中小企業の DX 化を加速させるため、5G・ロボット・IoT・AI などのデジタルソリューションを展示し、これらを実際に見て、触って体験できる場として、「デジタルソリューションラボ (DSL)」という施設を開設しており、多くの企業・団体に見学を頂いている。

協働ロボットの展示やデモを行っていることから、本研究では企業のロボット導入に向けた支援を強化することを目的とし、企業の方に関心を持っていただけるよう、より現場の状況に近い動作デモを構築する取り組みを実施した。

## 2 方 法

### 2. 1 協働ロボット

本研究では、協働ロボットとして(株)レステックス製 TM-REX5900(図 1)を使用した開発を行った。

本システムは TECHMAN ROBOT 社製、TM5-900 をベースとしたモデルであり、軸数は 6 軸、アーム長が 900mm、最大可搬質量（ハンド含む）は 4kg である。

特徴としては、標準装備のカメラによりランドマークを認識し座標系を作成する機能を有する点が挙げられる。また、パターンマッチングや色の認識を行いながらワークの認識を実施し、それに基づいて動作を制御することが可能である。



図 1 ビジョンシステム内蔵協働ロボット  
TM-REX5900

### 2. 2 協働ロボットとコンベアの連携

本研究で開発したシステムの構成イメージを図 2 に示す。

ベルトコンベア上にワークを配置し、コンベアに取り付けた光電センサがワークを検出したタイミングで、PLC からの制御によってコンベアを停止する。ワークを所定の位置で停止させ、協働ロボットに搭載されたカメラで認識して、ワークを掴みにいく。その後、把持したワークをトレーに整列させる動作を実現する。

そのために、協働ロボットと PLC のそれぞれに対して制御プログラムを構築した。なお、複数の作業の切り替えを想定し、協働ロボットとベルトコンベアがそれぞれ独立して動作することを目指し、信号線などの配線を行わない「配線レス」の設計を目標とした。

システムの構築後、実際にワークを配置しての動作検証を実施し、安定して動作することを確認する。

### 2. 3 対象ワーク

今回、対象とするワークは図 3 に示すアルミニウム製のブラケット形状の部品を選定した。

このワークをベルトコンベア上に流し、協働ロボットに搭載されたカメラで撮影・認識を行い、把持および搬送を行う。

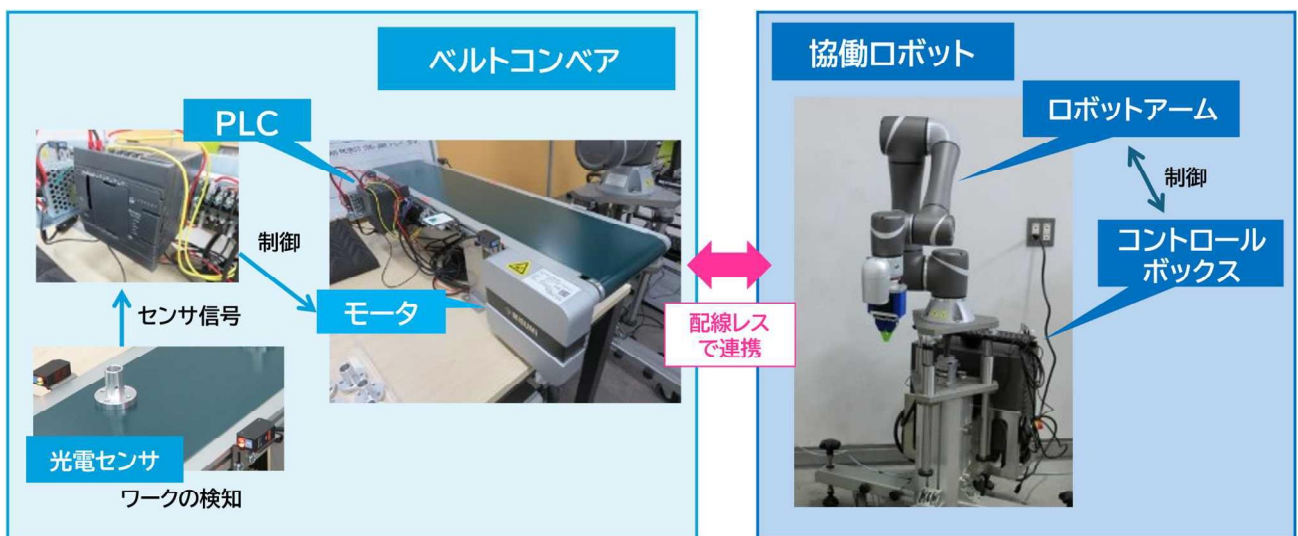


図 2 システム構成イメージ



材質	アルミニウム
穴径	12mm
外径	16mm
外径（フランジ部）	36mm

図3 対象ワーク

## 2. 4 ベルトコンベアの選定

ロボットと連携させるベルトコンベアの選定にあたっては、今後の運用を想定し、卓上に設置できること、ならびにある程度の大きさのワークに対応できることを考慮し、サイズおよび速度を選定した。

また、速度の安定性や動作の信頼性の観点から、モータはブラシレスモータを搭載したものを選定した。

コンベアの外觀イメージと仕様を図4に示す。



長さ	800mm
ベルト幅	150mm
ベルト速度	2~30m/min
モータ	ブラシレスモータ

図4 ベルトコンベア

## 3 結果

### 3. 1 システム構成及び制御

設計した機能を満たすため、協働ロボットおよびベルトコンベアと PLC の制御系を構築した。

PLC は(株)キーエンス製の KV-N14AR を使用し、ベルトコンベアのモータドライバおよび光電センサと接続し、デジタル信号の入出力を用いて制御を行った。回路を配線した結果を図5に、ラダープログラムの一部を図6に示す。



図5 PLCの配線



図6 ラダープログラム

また、協働ロボット側についてもワークを検出し、把持を行うような制御フローを構築した。プログラムのイメージを図7に示す。

前述の通り、協働ロボットとベルトコンベアは配線レスの設計となっており、それぞれ単独で動作するため、信号のやり取りは行わずに連携を実現している。

構築したシステムの外觀を図8に示す。



図7 制御フロー例

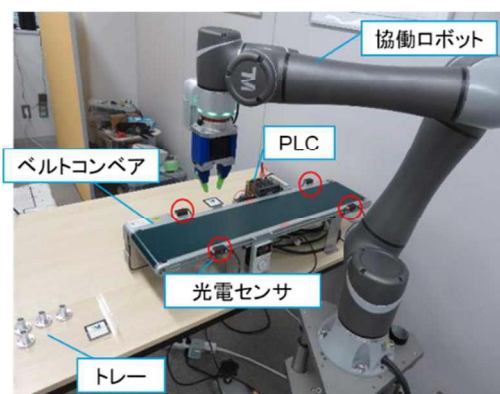


図8 構築したシステム

### 3. 2 ワークの認識と把持

対象となるワークの表面は金属光沢を有しているが、照明および画像処理のパラメータを調整することで、背景のベルトコンベアの



緑色と完全に区別することができた。

これにより、ワークの位置を高精度に認識をすることが可能となり、取得した座標を基に制御することで安定した把持を可能とした。(図9)

さらに、ランドマークを認識し、ランドマーク基準で座標系を作成することで、コンベアやトレーの位置がずれても補正を行いながら動作を実現することができる。これにより厳密な位置合わせが不要となり、複数の作業を切り替えて運用することを容易に実現することができる。

ランドマークを認識させた様子を図10に示す。



図9 ワークの認識

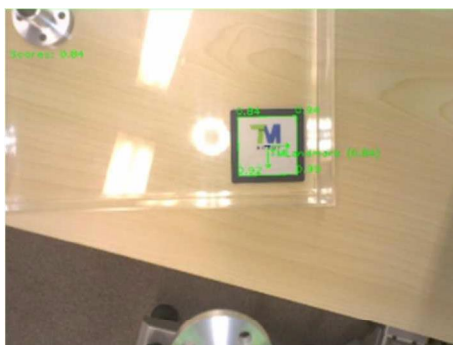


図10 ランドマークの認識

### 3. 3 動作検証実験

構築したシステムについて動作検証を行った結果、コンベア上にランダムに配置したワークを正確に認識し、位置を補正しながら確実に把持することができた。実際の動作の様子を図11に示す。

また、ワークを認識・把持した状態から、図12のようにトレーに整列して配置する制御を構築した。

トレーおよびコンベアにランドマークを

設置しており、このランドマークから作成した座標系を基準にロボットが動作することから、前述のとおり厳密な位置合わせは不要であり、初期位置においてカメラでランドマークを認識ができるように設置するだけで再現性の高い動作を実現できる。

複数回にわたり動作確認を実施した結果、認識および把持に関して安定した動作を得ることができた。

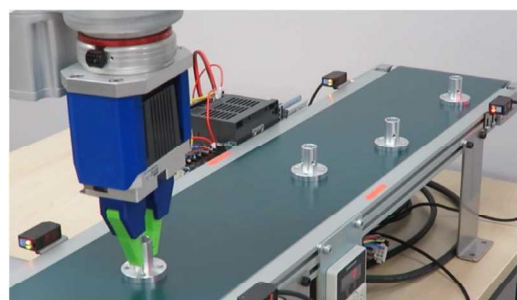


図11 ベルトコンベアとの連携

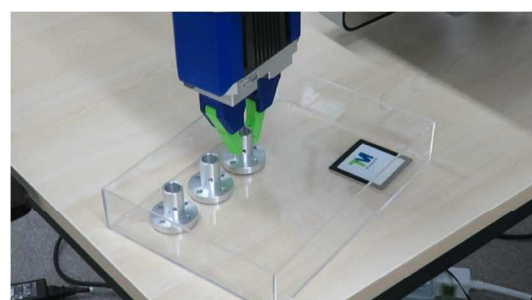


図12 トレーへの整列

## 4 まとめ

本研究では、協働ロボットをベルトコンベアと連携し、企業での利用に近い状況を再現した動作デモの構築を行った。

協働ロボットと周囲の機器は配線レスで連携を実現しており、複数の作業を簡単に切り替えて利用したいという企業からのニーズに応えるものとなっている。

ワークをトレーに整列させる工程など、製造現場での活用に近いイメージを持って見学していただくことで、企業に対してより効果的な導入支援が期待される。

本研究で得られた知見やノウハウを活かし、今後も共同研究等を通じて県内の中小企業への協働ロボット導入支援を進めていく。



# 次世代産業創出研究

# 宇宙ビジネス創出推進のための衛星データ活用に関する基礎的検討

川原潤也・須田高史\*・遠藤庸弘\*\*

Fundamental Study on the Utilization of Satellite Data for Promoting Space Business Creation  
KAWAHARA Junya, SUDA Takashi, ENDO Nobuhiro

本研究では、衛星データの活用用途に関する認知度の向上を目的として、災害状況調査における衛星データの活用可能性を検討した。群馬県吾妻郡嬭恋村周辺の Pleiades 画像を取得し、令和元年台風第 19 号による被災状況の画像判読を行った。その結果、Pleiades 画像は道路の白線や土嚢が並べられた様子を判読可能な解像度を有していることが確認された。また、道路や河川における土砂災害の状況も判読可能であることが明らかとなった。

キーワード：宇宙ビジネス創出、光学衛星データ、災害状況調査

This study investigates the potential applications of satellite data for disaster situation assessment, aiming to enhance awareness of its practical utility. High-resolution Pleiades satellite imagery was acquired for the area surrounding Tsumagoi Village, Agatsuma District, Gunma Prefecture, to analyze the impact of Typhoon No. 19 in 2019. The analysis confirmed that Pleiades imagery has sufficient resolution to distinguish road markings and the arrangement of sandbags. Furthermore, the imagery proved effective in detecting sediment-related disasters affecting roads and rivers.

Keywords : Promoting Space Business、Optical Satellite Data、Disaster Situation Assessment

## 1 まえがき

宇宙産業の世界市場は急速に拡大しており、2040 年代には 1 兆ドルに到達すると試算されている<sup>1)</sup>。冷戦以前の宇宙開発は官主導で進められていたが、近年では官民連携による宇宙産業の創出が世界的な潮流となっている<sup>2)</sup>。日本においても、内閣府が宇宙基本計画<sup>3)</sup>を策定し、官民連携による宇宙産業の創出を推進している。2025 年には、宇宙業界の「人的基盤の強化」を目的とした宇宙スキル標準の試作版<sup>4)</sup>が公開されており、宇宙人材の確保に向けた取り組みも加速している。

これに対して、群馬県は 2023 年に「宇宙ビジネス創出推進自治体」に選定され、衛星データを活用した宇宙ビジネスの創出を推進している。国内の動向を見ると、農林業や防災など様々な分野で衛星データが活用されており、衛星データを用いた事業を展開するベ

ンチャー企業も誕生している<sup>5)</sup>。しかし、群馬県内では、このようなベンチャー企業の創出は依然として少ないのが現状である。その要因の一つとして、官民双方において衛星データの具体的な活用用途が十分に認識されていないことが挙げられる。

そこで、本研究では、県政課題の解決に衛星データを活用することで、衛星データ活用のモデル事例を構築し、それを県内企業に展開することにより、衛星データの活用用途に関する認知度の向上を図ることを目的とする。本年度は、災害レジリエンスの強化を課題として設定し、災害状況調査における衛星データ活用に関する基礎的検討を実施した。本報では、高解像度の光学衛星画像を使用して、令和元年台風第 19 号による被災状況の調査を実施した結果について報告する。

## 2 方法

本年度は、令和元年台風第 19 号による被災状況（令和元年 10 月 11 日から 13 日の間に被災）の調査をテーマとして、災害状況調査における高解像度の光学衛星画像の活用に関する基礎的検討を実施した。本研究では、光学衛星画像として、Airbus 社の Pleiades が撮影した画像を使用した。Pleiades は、分解能が 50cm クラスの高分解能の光学衛星である。本研究では、パンシャープン処理された Pleiades 画像を取得した。表 1 に、取得した画像の仕様を示す。画像の解析には、無償のオープンソースソフトウェアである QGIS を使用した。

表 1 取得した Pleiades 画像の仕様

項目	取得データ仕様
撮影エリア	群馬県吾妻郡嬬恋村周辺
撮影日	令和元年10月28日
取得モード	モノ
ジオメトリック処理	オルソ (L3)
スペクトルバンドコンビネーション	PMS-パンシャープン 50cm 4-バンド
フォーマット	DIMAP-GeoTIFF
ビット数	16bits (GeoTIFF)
投影法/測地系	WGS84_GEOGRAPHIC_緯度経度
ラジオメトリック処理	リフレクタンス

### 3 結 果

本研究では、令和元年台風第 19 号による群馬県吾妻郡嬬恋村の国道 144 号沿いの被災状況を調査した。図 1 に、トゥルーカラー合成した嬬恋村周辺の Pleiades 画像を示す。本画像データと実際の被災箇所データを照らし合わせて、Pleiades 画像による被災状況の判読を実施した。

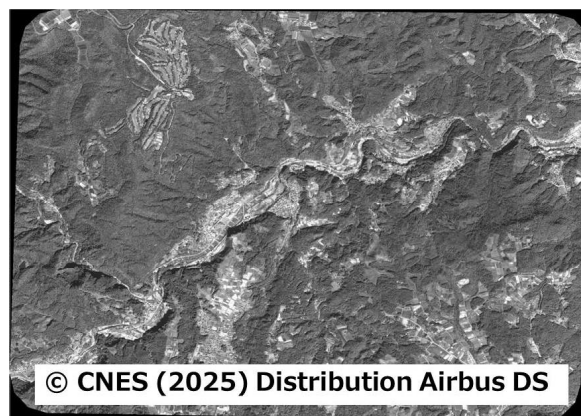


図 1 嬬恋村周辺の Pleiades 画像

まず、被災箇所（令和元年災 176 号・国 144 号）についての判読を実施した。当該箇所を拡大した画像を図 2 に示す。図 2 より、Pleiades 画像は道路の白線を識別可能な解像度を有していることが確認できる。被災状況の現地調査の結果によると、当該箇所では道路における土砂災害が発生したことが報告されている。これを踏まえ、図 2 の楕円で囲まれた領域を見ると、土砂災害による道路の異常が確認できる。



図 2 令和元年災 176 号の Pleiades 画像

さらに、楕円で囲まれた領域を拡大した図 3（左図）を見ると、当該領域の道路上に直線状の物体が置かれていることが確認できる。これに関して、当該領域では被災後に土嚢が設置されていたことが報告されている（図 3 右図）。したがって、この直線状の物体は、規則的に並べられた土嚢であると考えられる。このように、Pleiades 画像では、個々の土嚢の識別は困難であるが、土嚢が並べられた様子を判読可能な解像度を有していることが明らかとなった。

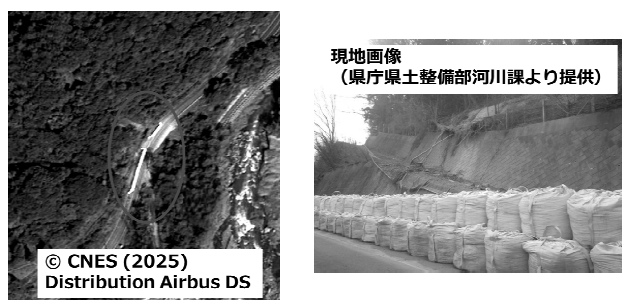


図3 現地画像との比較

つぎに、被災箇所（令和元年災 140 号・吾妻川右岸）についての判読を実施した。当該箇所を拡大した画像を図 4 に示す。当該箇所は通常時、吾妻川と小宿川の合流地点である。被災状況の現地調査の結果によると、当該箇所では河川における土砂災害が発生したことが報告されている。これを踏まえ、図 4 の楕円で囲まれた領域を見ると、土砂によって河川の合流地点が埋まった様子が確認できる。



図4 令和元年災 140 号の Pleiades 画像

最後に、被災箇所（令和元年災 175 号・国 144 号）についての判読を実施した。当該箇所を拡大した画像を図 5 に示す。被災状況の現地調査の結果によると、当該箇所では、令和元年災 176 号と同様に、道路における土砂災害が発生したことが報告されている。これを踏まえ、図 5 の楕円で囲まれた領域を見ると、道路の異常は確認されないものの、土砂災害により斜面が崩落した様子が確認できる。

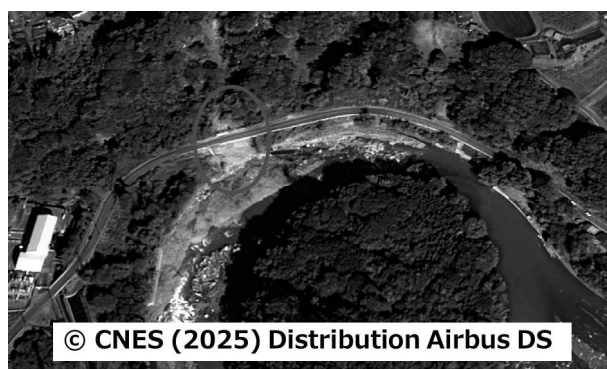


図5 令和元年災 175 号の Pleiades 画像

#### 4 まとめ

本研究では、嬭恋村周辺の Pleiades 画像を取得し、令和元年台風第 19 号による被災状況の画像判読を実施した。その結果、Pleiades 画像は道路の白線や土嚢が並べられた様子を判読可能な解像度を有していることが確認された。また、道路や河川における土砂災害の状況も判読可能であることが明らかとなった。これらの結果から、災害状況調査において高解像度の光学衛星画像を活用することは有効であると考えられる。

#### 謝 辞

衛星データの選定・取得に際しては、一般財団法人リモート・センシング技術センターよりご助言を賜りました。また、被災状況の調査に際しては、群馬県庁県土整備部河川課に被災箇所データの提供などのご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) 高田真一ほか：宇宙産業創出に向けた官民連携スキームに関する研究、日本機械学会論文集、90、939（2024）
- 2) 内閣府 宇宙開発戦略推進事務局：宇宙政策を巡る最近の動向と宇宙技術戦略の進め方（2023 年 9 月）
- 3) 内閣府 宇宙開発戦略本部：宇宙基本計画（2023 年 6 月）
- 4) 内閣府 宇宙開発戦略推進事務局：宇宙スキル標準（試作版）取扱説明書（2025 年 2 月）

5) 神武直彦ら：いちばんやさしい衛星データビジネスの教本ー人気講師が教えるデータを駆使した宇宙ビジネス最前線、インプレス（2022）

# 再録

再録の掲載原稿は、著作権を有する学会等の許諾を得た上で行ったものである。

研究課題名：

産業用 X 線 CT 装置による自由曲面を有する切削加工品の測定精度の高精度化に関する研究

高橋 勇一

群馬県立群馬産業技術センター 計測係 係長

## I 研究目的

自由曲面を有する切削加工品の測定において産業用 X 線 CT 装置（以下、産業用 CT）は接触式の三次元計測機や非接触デジタイザ等と比較して、スタイラスチップやレーザーの接触・照射が困難な箇所でも形状データを取得できるという利点を持つ<sup>1)</sup>。しかし、産業用 CT による測定では、ワークの X 線減弱係数が測定結果に大きな影響を与えることが知られており、VDI/VDE 2630 規格で規定されているルビー球を用いた球間距離測定誤差評価では、十分な精度保証ができない場合がある<sup>2)</sup>。また、アーチファクトと呼ばれるノイズが測定対象物の形状や内部構造を不明瞭にし、寸法測定や欠陥検出の精度を低下させる要因となる<sup>3)</sup>。

そこで本研究では、産業用 CT を用いた自由曲面を有する切削加工品の寸法測定の高精度化を目指し、以下の二つの課題に取り組んだ。

①深層学習による球間距離測定誤差補正手法の検討: SUS 球を用いた産業用 CT 用評価治具を作製し、深層学習を用いて球間距離測定誤差を縮小化する手法を提案し、その有効性を検証する。VDI/VDE 2630

規格の評価法に深層学習に展開。

②深層学習を用いたアーチファクトの低減: 教師なし学習である CycleGAN に基づいた画像生成モデルを構築し、産業用 CT による SUS 製歯車・ギヤの断面画像からアーチファクトを低減することで、寸法測定の向上を実現する。この研究独自のアプローチ。

## II 研究の過程及び成果

### II-1 深層学習による球間距離測定誤差補正手法の検討

#### II-1-1 評価器の作成

VDI/VDE 2630 規格では、球間距離測定誤差は、x 軸、y 軸、z 軸の 3 方向の評価が必須とされている。装置に付随する日本ベーカーヒューズ(株)製校正および評価治具は、ルビー球を 1 次元的に配列したものであるため、各軸方向の評価を別々の測定で行う必要がある。また、繰り返し精度はそれぞれ 3 回行うことになるため、3×3 回の測定を行う必要がある。

本研究では、1 回の測定で x 軸、y 軸、z 軸方向の評価が可能な図 1 に示す産業用 CT の校正器<sup>4)</sup>の評価治具として



SUS304 の球（以下、SUS 球）で作製し、球間距離測定誤差を計測した。この評価治具は、厚み 2 mm の CFRP を、 $\phi 50\text{ mm} \times 70\text{ mm}$  の円筒状に加工し、上端から 16 mm、34 mm、52 mm の高さに正五角形の頂点の位置に SUS304 球（ $\phi 2\text{ mm}$ ）を配置し、合計 15 個の球を使用した

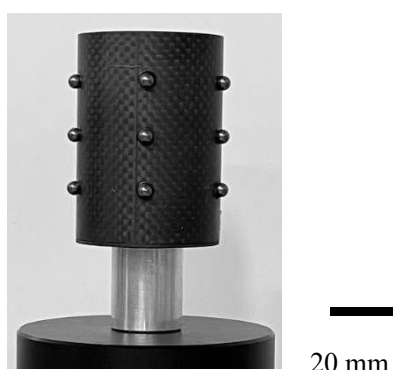


図1 本研究で使用した評価器

を図2に示す。グラフの縦軸が誤差(mm)、横軸が球間距離(mm)である。FOD (Focus to Object distance) を、320 mm、FDD (Focus to Detector distance) を 600 mm とした。球間距離測定誤差の計測結果から、SUS 球においては $\pm 13\text{ }\mu\text{m}$ の誤差が生じていることが分かった。

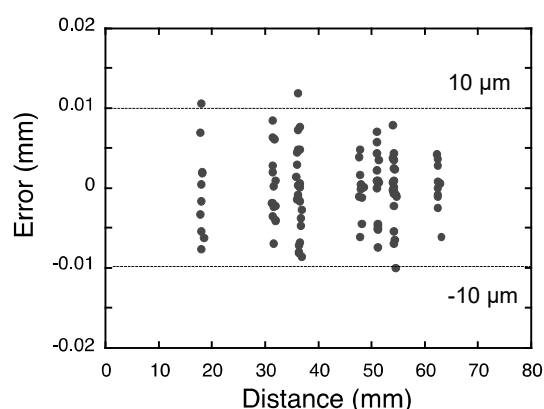


図2 球間距離測定誤差 (SUS 球)

## II-1-2 研究に使用した装置

本研究で、CT測定に使用した産業用CTは、高分解能計測用 X 線 CT システム (Phoenix v|tome|x m 240/180 ; 日本ベーカーヒューズ(株)) である。断面画像のボリュームデータ化、球間距離測定計測および表示は、VG Studio max3.2 (ボリュームグラフィックス(株)) を用いた。

評価具の値付けに使用には、高精度三次元座標測定機 (LEGEX9106 ; ㈱ミットヨ) を用いた。

## II-1-3 球間距離測定誤差の結果

評価器の CT 測定の測定条件は、管電圧 : 200 kV、管電流 : 200  $\mu\text{A}$ 、金属フィルタ : Cu 0.5 mm、ビュー数 : 1800 枚である。

SUS 球の球間距離測定誤差の計測結果

## II-1-4 球間距離測定誤差補正

この誤差を小さくするため、三次元空間上の点群データにおける実測値とノミナル値の誤差を最小化する手法を実装した深層学習に基づく誤差補正モデルを開発した。入力データとして、各点の実測値 (x, y, z) およびノミナル値 (a, b, c) を持つデータセットを用いる。まず、特徴量エンジニアリングにより、各点の平均距離、距離の標準偏差、方向角度、クラスタ内の平均距離を算出する。これらの特徴量は、実測値とノミナル値の差異を捉える指標となる。

次に、これらの特徴量を用いて、実測値とノミナル値の距離の誤差を予測するよ

う学習させる。学習には、損失関数として平均二乗誤差、最適化アルゴリズムとして Adam を用いる。

最後に、補正後の実測値を含むデータセットを出力する。これにより、ノミナル値との誤差が最小化された実測値を得ることができる。加えて、補正前後の点間距離を計算することで、SUS 球の球間距離測定誤差は $\pm 10 \mu\text{m}$  に低減可能であった。図 3 に球間距離測定誤差の補正結果を示す。

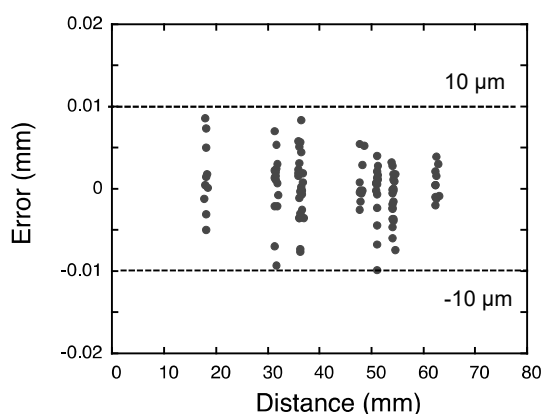


図 3 深層学習による球間距離測定誤差 (SUS 球) の補正結果

深層学習を用いた誤差補正モデルにより、球間距離測定誤差は $\pm 10 \mu\text{m}$  に低減可能であることを確認した。この結果は、深層学習を用いることで球間距離測定誤差を補正できる一方で、ルビー球を用いた評価治具の球間距離測定誤差が $\pm 5 \mu\text{m}$  であることから、誤差補正モデル以外の SUS 球のメタルアーチファクトの低減等の補正方法を用いる必要性が示唆された。

## II-2 深層学習を用いたアーチファクトの低減

### II-2-1 研究に使用した施設、装置

本研究では、大型放射光施設 (SPring-8) の放射光 CT は、BL28B2 ラインの高エネルギー X 線<sup>5)</sup>を使用した。図 4 に測定系を示す。

産業用 CT は、高分解能計測用 X 線 CT システム (Phoenix v|tome|x m 240/180 ; 日本ベーカーヒューズ株)、断面画像の表示は、VG Studio max3.2 (ボリュウムグラフィックス株) をそれぞれ使用した。

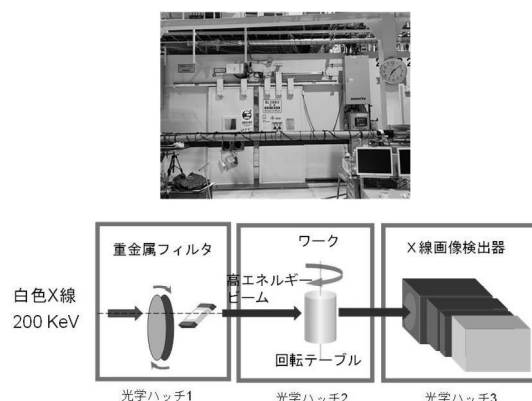


図 4 大型放射光施設 (SPring-8) BL28B2 ライン

### II-2-2 歯研平歯車の断面画像

メタルアーチファクトの低減は、高エネルギーの放射光 CT の利用が有効である。本研究では、自由曲面を有する切削加工品として SUS 製歯車を取り扱う。図 5 に歯研平歯車 (MSG1-18 ; 小原歯車工業株) を示す。

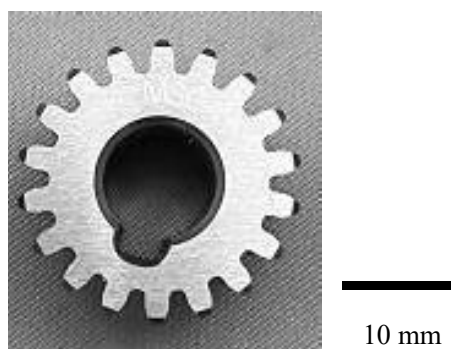


図 5 歯研平歯車

図 6 に歯研平歯車の産業用 CT による断面画像、図 7 に歯研平歯車の放射光 CT による断面画像をそれぞれ示す。

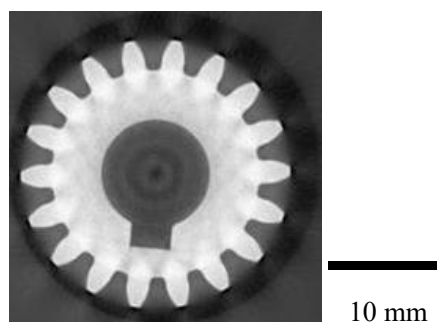


図 6 断面画像（産業用 CT）

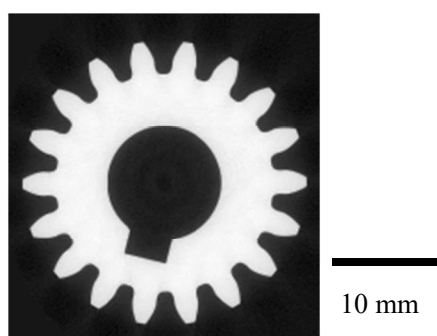


図 7 断面画像（放射光 CT）

産業用 CT の測定条件は、管電圧：200 kV、管電流：100  $\mu$ A、金属フィルタ：Ag

0.5 mm、撮像枚数 1200 枚である。

放射光 CT の測定条件は、白色 X 線：200 keV、金属フィルタ：W 0.5 mm+Pb 2 mm、撮像枚数 3600 枚である。

アーチファクト、とりわけメタルアーチファクトの低減は、高エネルギーの大型放射光施設の高エネルギー X 線 CT（以下、放射光 CT）の利用が有効であるが、コストやアクセス性の観点から、日常的に利用可能な測定方法が求められる。一方、産業用 CT は安価で普及しているが、得られる断面画像はアーチファクトの影響を受けやすい。

本研究では、深層学習を用いた画像生成モデルにより、SUS 製歯車の放射光 CT の断面画像と産業用 CT の断面画像からアーチファクトを低減し、測定精度向上を試みた。

## II-2-3 深層学習による画像生成モデルの構築

本研究は、放射光 CT と産業用 CT の利点を組み合わせ、高品質な断面画像を生成することで、自由曲面を有する切削加工品として SUS 製歯車のその寸法や形状の計測精度を向上させる技術を開発する。

本研究で特に重要となるのは、深層学習の教師なし学習を用いて、少数の放射光 CT による断面画像と大量の産業用 CT による断面画像というアンペアなデータから学習が可能な画像生成モデルを構築することである。

## II-2-4 画像生成モデルの訓練データ、学習

本研究では、放射光 CT の高品質画像と産業用 CT の利便性を組み合わせ、少数の放射光 CT による断面画像と大量の産業用 CT による断面画像というアンペアなデータから学習が可能な教師なし学習である CycleGAN<sup>6)</sup>を用いて、カップリングアーチファクトやメタルアーチファクトを低減させた。

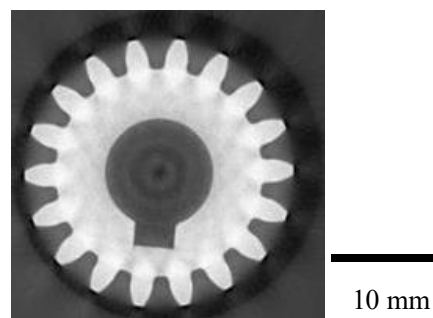
使用したワークは、歯研平歯車 (MSG1-18 ; 小原歯車工業(株)) に加え、歯研はすば歯車 (KHG1-20R ; 小原歯車工業(株))、歯研平歯車 (SSG1-15; 小原歯車工業(株)) を用いた。

ターゲットドメインのデータは、放射光 CT で測定した歯車の断面画像 100 枚とオフラインデータ拡張を用いて生成した 900 枚の合計 1000 枚を用いた。ソースドメインのデータは、CT 測定した歯車の断面画像 8000 枚とオフラインデータ拡張を用いて生成した 72000 枚の合計 80000 枚を用いた。

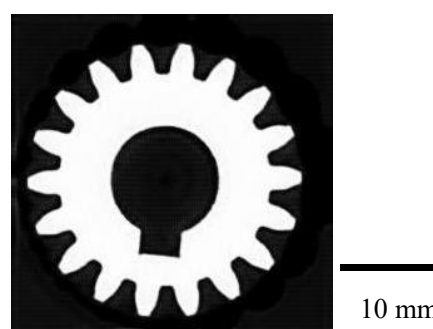
訓練データは 128px×128px に圧縮・変換し、Adam optimizer を用いて学習を行った。学習は epoch 数 10 まで行った。

## II-2-5 生成画像のアーチファクト低減効果

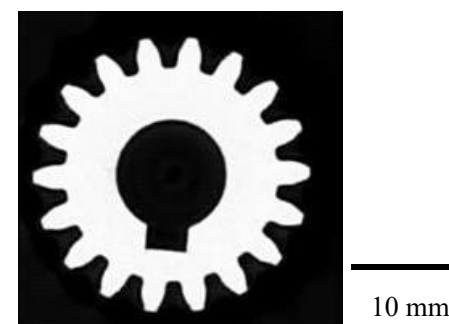
学習を行った画像生成モデルに図 6 の産業用 CT の断面画像を入力した結果を図 8 に示す。epoch 数は 1、2、5 である



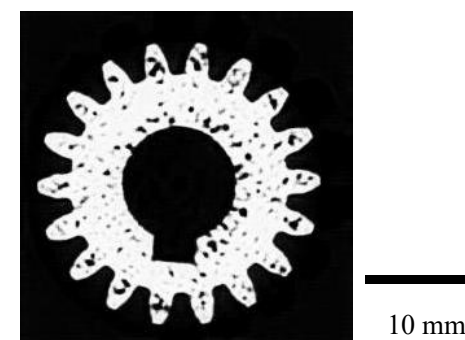
(a) 産業用 CT 断面画像



(b) epoch 数 : 1



(c) epoch 数 : 2



(d) epoch 数 : 5

図 8 画像生成モデルの出力

epoch1 で、産業用 CT の断面画像と比較してメタルアーチファクトが低減された画像が生成された。epoch5 で、メタルアーチファクトの低減と同時に形状に変化や変形が生じることが分かった。本研究で作成した画像生成モデルは epoch1 を最適な結果とした。

## II-2-6 生成画像の評価

産業用 CT の断面画像と生成画像について、赤い直線上の画素値を測定（ラインプロファイル測定）した。図 9 は産業用 CT の断面画像、図 10 は生成画像でラインプロファイル測定結果である。

図 9、図 10 から、表 1 に示す画素値の均一性の指標となる標準偏差を求めた。画像生成モデルによる生成画像は、断面画像比較し、空気、SUS とともに均一性は増し、面画像とアートファクトを低減させ、SUS およびその周辺の形状の鮮明化が実現できた。

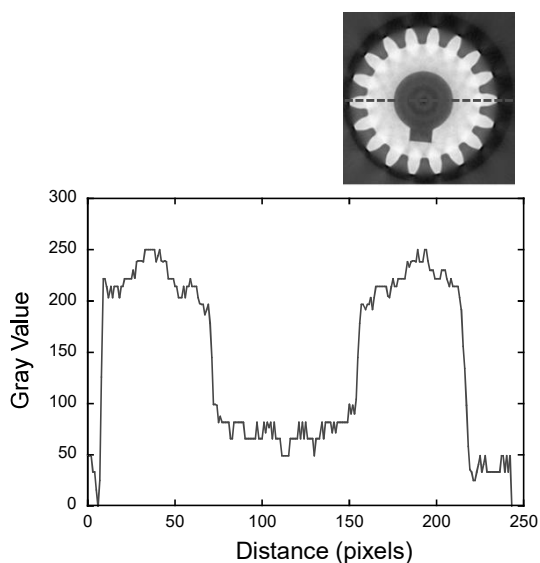


図 9 ラインプロファイル測定  
(断面画像)

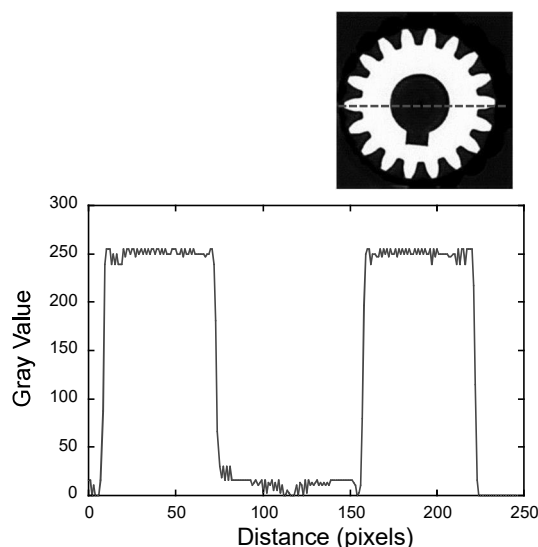


図 10 ラインプロファイル測定  
(生成画像)

表 1 画素値の標準偏差

	Air	SUS
断面画像	21.69	24.56
生成画像	16.34	10.42

## II-3 結論

本研究では、深層学習を用いた球間距離測定誤差補正手法の検討を行い、SUS 球を用いた評価治具により、球間距離測定誤差が $\pm 10 \mu\text{m}$ に低減可能であることを確認した。この結果から、深層学習を用いることで、X 線減弱係数の影響による測定誤差を効果的に補正できる可能性が示唆された。

さらに、深層学習技術を用いた画像生成モデルにより、産業用 CT で測定した SUS 製歯車の断面画像上のアーチファクトを低減し、形状の鮮明化を実現できた。また、内部欠陥の抽出精度の向上を確認

した。

これらの成果は、産業用 X 線 CT 装置を用いた自由曲面を有する切削加工品の測定精度の高精度化に貢献するものである。

### III 研究発表

1) 高橋勇一、小谷雄二、中村哲也、須田高志、小林正和：深層学習による断面画像上のメタルアーチファクト低減方法、非破壊検査協会、2023 年度秋季講演大会講演概要集 pp.263-264

2) 高橋勇一、小谷雄二、中村哲也、小林正和：Deep Learning による X 線 CT 断面画像上のアーチファクト低減効果、日本鑄造工学会、第 183 回全国講演大会講演概要集 pp.98

### 参考文献

1) 鈴木宏正、大竹豊、長井超慧、堀田淳、松川光彦：精密工学会誌 84 (2018)2,118

2) 高橋勇一、小谷雄二、中村哲也、黒岩広樹：計測用X線CTの寸法計測結果に及ぼすワークの平均原子番号の影響、鑄造工学、第93巻、第10号 (2021)

3) 戸田裕之：X 線 CT-産業・理工学でのトモグラフィー実践活用、共立出版、東京、(2019) pp.7-9.

4) 高橋勇一、中村哲也、小谷雄二：X 線 CT 装置の校正器、特開 2014-190933 (日本)、2014.10.6

5) 上杉健太郎、星野真人、竹内晃久：放射光を使った X 線 CT による 3D 観察、まてりあ、61 巻、2 号 69-71 (2022)

6) Jun-Yan Zhu, Taesung Park, Phillip Isola, Alexei A. Efros: IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), (2017)

### 謝辞

本研究の遂行するあたり、公益財団法人大澤科学技術振興財団のご支援をいただいたことに深く感謝申し上げます。

導電性繊維を用いた体圧・接近センサによる  
車椅子への移乗時における体圧応答の評価

正員 黒崎 紘史<sup>\*,\*\*a)</sup> 非会員 白畑 紘夢<sup>\*</sup> 正員 川原 潤也<sup>\*\*</sup>  
非会員 近藤 健<sup>\*\*\*</sup> 非会員 李 範爽<sup>\*\*\*\*</sup> 正員 小田垣雅人<sup>\*5</sup>

## Evaluation of Seating Position During Wheelchair Transfer using Body-pressure and Proximity Sensors with Conductive Texture

Hirofumi Kurosaki<sup>\*,\*\*a)</sup>, Member, Hiromu Shirahata<sup>\*</sup>, Non-member, Junya Kawahara<sup>\*\*</sup>, Member,  
Ken Kondo<sup>\*\*\*</sup>, Non-member, Bumsuk Lee<sup>\*\*\*\*</sup>, Non-member, Masato Odagaki<sup>\*5</sup>, Member

(2021年8月18日受付, 2022年1月4日再受付)

Patient transfer during nursing care imposes a heavy burden on long-term caregivers, frequently causing back pain. It is therefore necessary to improve nursing skills in order to reduce the burden on caregivers so as to prevent accidents. In this study, we fabricated capacitive body-pressure and proximity sensors that use conductive texture for detection, in order to evaluate nursing care movements. To investigate the response of the sensor, an experiment was conducted in which a stainless block was brought close to and then placed in contact with a simulated living body. The results show that the sensor can detect the distance to a living body, in addition to the applied pressure. Based on these response characteristics, a sitting experiment was conducted in which 10-channel body-pressure and proximity sensors were installed. The results indicated that the proposed sensor can be used to analyze the seating position of patients in a wheelchair based on the pressure on the seat surface.

**キーワード** : 導電性繊維, 移乗介助, 体圧・接近センサ

**Keywords** : conductive texture, patient transfer, body-pressure and proximity sensors

## 1. はじめに

介護現場において、介護者が被介護者を車椅子やベッドに移乗させる動作（介護移乗動作）は頻繁におこなわれている。介護移乗動作は、介護者の身体に大きな負担を与えるため、腰痛などを引き起こす原因になっている。また、介護者の技能が未熟な場合は、被介護者の転落などの事故を生じる可能性がある。このため、介護者の負担軽減や事

故防止の観点から、介護者の介護技能を客観的に評価し、その結果に基づいて適切な指導をおこなうことで、介護技能の向上を図る必要がある<sup>(1)~(5)</sup>。

これに対して、介護技能の評価に関する先行研究の多くは、第三者の観察など主観的な手法に基づいておこなわれているのが現状である<sup>(6)(7)</sup>。近年では、三次元動作解析装置を

a) Correspondence to: Hirofumi Kurosaki. E-mail: hirofumi.kurosaki@gmail.com

\* 公立大学法人前橋工科大学大学院  
〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1  
Graduate School of Maebashi Institute of Technology  
460-1, Kamisadori, Maebashi, Gunma 371-0816, Japan

\*\* 群馬県立群馬産業技術センター  
〒379-2147 群馬県前橋市亀里町 884-1  
Gunma Industrial Technology Center  
884-1, Kamesato, Maebashi, Gunma 379-2147, Japan

\*\*\* 学校法人群馬パース大学

〒370-0006 群馬県高崎市間屋町 1-7-1

Gunma Paz University

1-7-1, Tonyamachi, Takasaki, Gunma 370-0006, Japan

\*\*\*\* 国立大学法人群馬大学

〒371-8511 群馬県前橋市昭和町 3-39-22

Gunma University

3-39-22, Showamachi, Maebashi, Gunma 371-8511, Japan

\*5 公立大学法人前橋工科大学

〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1

Maebashi Institute of Technology

460-1, Kamisadori, Maebashi, Gunma, JAPAN



用いた介護技能の定量的な評価方法が提案されている<sup>(8)~(11)</sup>が、計測機器が高価であることからほとんど普及していない。また、計測系が大規模になることから、一般住宅には設置することも困難である。

そこで、我々は、介護技能の評価を安価かつ簡易的に実現することを目的として、導電性繊維を用いた静電容量方式のセンサを使用した体圧の評価方法を提案した<sup>(12)</sup>。本センサは、導電性の銀不織布で絶縁体の布を挟み込んだ構造をしており、銀不織布間で生じる静電容量の変化から体圧の変化を検出できる。しかし、本センサの原理上、接触しない限り生体の状態を検出できないため、車椅子の移乗動作など動きをとともう解析には十分な性能を発揮できなかった。

本研究では、体圧のみならず、センサと生体の間の距離の変化を検出可能な体圧・接近センサを製作する。本稿では、まず、体圧・接近センサに生体を模した導体を接近、接触させる実験を行うことで、本センサの応答特性を調べる。つぎに、体圧・接近センサを設置した車椅子への着座実験を行うことで、着座や立ち上がりを含む起居動作の解析や着座位置の検出における本センサの有用性について検証する。

## 2. 体圧・接近センサの原理

本研究で製作した体圧・接近センサおよび測定システムを Fig. 1 に示す。センサの検出部は、絶縁体の布の上に 40 mm 四方の導電性縫い糸 ((株) フジックス, Smart-X) の刺繍が施された構造となっており、ウォッシュابلで柔軟性を備えていることが特徴である。センサは、スイッチトキャパシタフィルタ (SCF) を内蔵した静電容量評価ボード (ルネサスエレクトロニクス (株), RX130) に接続されており、評価ボードを通じて検出部の静電容量の変化を計測する。

センサに生体が接近、接触すると、導電性を持つ刺繍部と生体の間に静電容量が発生する。このとき生じた静電容量の変化は、SCF により電流量の変化に変換され、電流量に応じて発振周波数が変化する回路から出力されるパルス数をカウントすることで評価される<sup>(13)</sup>。ここで、発振波形において 100 ms 毎に含まれるパルス数のことをカウント値とよび、このカウント値で生体の接近、接触にともなう静電容量の変化を評価する。これらの計測原理から、本研究で製作した体圧・接近センサは、静電容量方式に分類される。

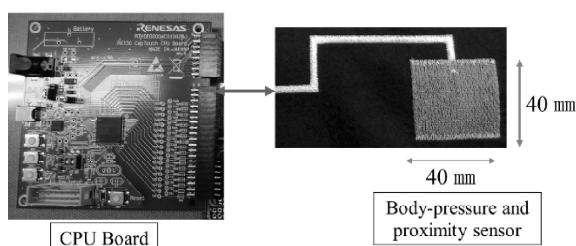


Fig. 1. Body-pressure and proximity measurement system.

## 3. 体圧・接近センサの応答特性の評価実験

**〈3・1〉 応答特性の評価実験** 製作した体圧・接近センサの応答特性を調べるため、クロスヘッドの変位や速度、対象物に加える荷重を機械的に制御可能な一軸圧縮試験機 ((株) エー・アンド・ディ, MCT-2150) のクロスヘッドにステンレスブロック (40 × 40 × 20 mm) を取り付け、センサの上に車椅子のクッション材と同じ絶縁物 (40 × 40 × 15 mm) を置き、ステンレスブロックを接近、接触させる実験を実施した (Fig. 2)。ここで、ステンレスブロックを生体として模擬するため、ステンレスブロックと生体表面を等電位にした。本実験では、ステンレスブロックと絶縁物の間の距離  $D$  を変化させたときに生じるカウント値の変化を調べた。

ステンレスブロックを  $D = 10.0$  mm の位置から絶縁物に接近させる方向に所定の距離間隔で移動させた。ステンレスブロックを移動させた後は、その位置での静止状態を少なくとも 5 s 以上保ち、その間に計測されるカウント値から 5 点を無作為に抽出し、その平均値と標準偏差をプロットした。ここで、ステンレスブロックが絶縁物の上面に接触し、一軸圧縮試験機が荷重 0.0 N の状態を、 $D = 0.0$  mm かつ圧力 0.0 Pa の状態とした。ステンレスブロックと絶縁物が接触した後は、一軸圧縮試験機が示す荷重が所定の間隔になるようにステンレスブロックを移動させ、それぞれの位置でのカウント値の平均値と標準偏差を接触前と同様に計測した。荷重が 130.0 N に達した後は、センサのヒステリシス特性を調べることを目的として、加圧時と同じ荷重間隔で減圧しながら同様の計測をおこなった。実験は計 3 回おこない、それぞれの結果を 1st, 2nd, 3rd の表記でプロットした。

**〈3・2〉 応答特性の計測結果** まず、ステンレスブロックと絶縁物が接触する前の距離  $D$  とカウント値の関係を Fig. 3 に示す。横軸は距離  $D$ 、縦軸はカウント値の平均値を示す。 $D = 10.0$  mm から  $D = 1.0$  mm までは 1.0 mm 毎、 $D = 1.0$  mm から  $D = 0.0$  mm までは 0.2 mm 毎にカウント値を計測した。計測の結果、体圧・接近センサにステンレスブロックを接近させるほど、カウント値が上昇することが明ら

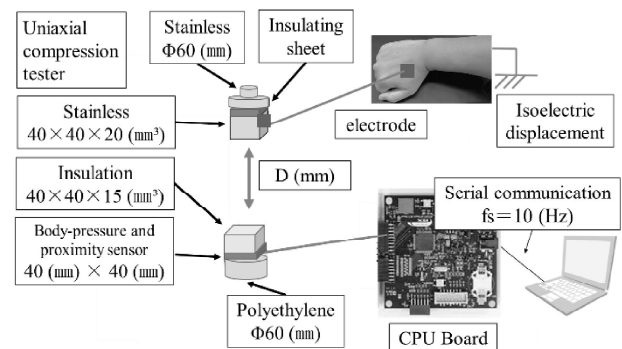


Fig. 2. Uniaxial compression test of body-pressure and proximity sensor.

かとなった。このことから、体圧・接近センサを使用することで、センサと生体の間の距離の変化を検出できることがわかった。

つぎに、ステンレスブロックと絶縁物が接触した後の荷重とカウント値の関係を Fig. 4 に示す。横軸は一軸圧縮試験機で与えた荷重を接触面積で除することで得られる圧力、縦軸はカウント値の平均値を示す。荷重は、20.0 N に達するまでは 2.5 N 毎、20.0 N 以降は 120.0 N に達するまで 20.0 N 毎、その後 130.0 N になるまで加えた。荷重が 130.0 N に達した後は、加圧時と同じ荷重間隔で 0.0 N まで減圧した。加圧時の結果を 1st, 2nd, 3rd の表記でプロットし、減圧時を 1st:re, 2nd:re, 3rd:re とした。計測の結果、加える圧力が 60.0 kPa を超えるまでは圧力に応じてカウント値が上昇するが、その後は飽和する様子が観察された。このことから、少なくとも 60.0 kPa までの圧力下においては体圧・接近センサを使用できることがわかった。また、10.0 kPa までは少なくとも 1.6 kPa 以上の分解能で圧力の変化を検出できることがわかった。また、Fig. 4 よりヒステリシス差を調べたところ、最大で 0.3% であることがわかった。ここで、計測値のばらつきを調べると、最大で 1.2% となっていることから、ヒステリシスの影響は計測値のばらつきよりも小さいといえる。

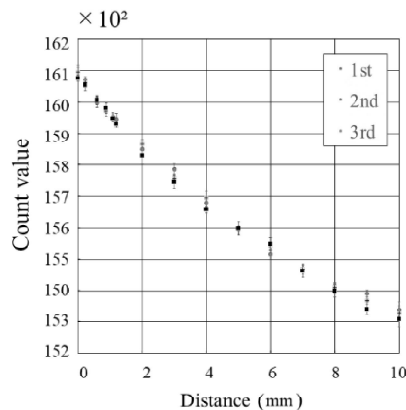


Fig. 3. Distance characteristics of body-pressure and proximity sensor.

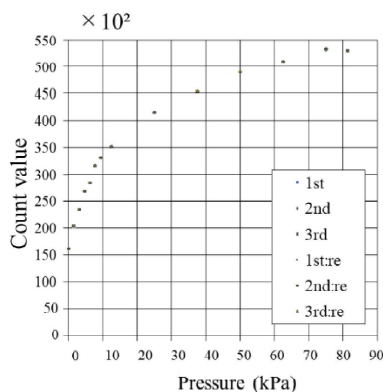


Fig. 4. Pressure characteristics of body-pressure and proximity sensor.

#### 4. 車椅子着座時のセンサ出力評価実験

〈4・1〉 実験方法 つぎに、3 章で応答特性を調べた体圧・接近センサを使用することで車椅子の起居動作の解析や着座位置の検出が可能か明らかにするため、本センサを設置した車椅子への着座実験を実施した。実験の被験者は、車椅子を利用したことがない 20 代から 40 代の男女 10 名とした。被験者の最大体重は 76 kg、最小体重は 44 kg であり、平均体重は 59 kg となった。実験は、前橋工科大学人間機能実験倫理審査委員会の承認を得て実施した（人 21 - 0004）。

Fig. 5 に被験者の着座位置を定めるために車椅子の座面上に設置した治具を示す。車椅子の座面が 450 mm に対し、幅 60 mm の治具を 2 個用いて着座位置を Left, Center, Right の 3 種類定め、着座可能な幅を 330 mm とした。Fig. 6 に車椅子着座時の実験系を示す。車椅子の座面には、導電性縫い糸で刺繍された体圧・接近センサを取り付けた。センサの詳細を Fig. 7 に示す。センサの検出部は、320 × 280 mm の絶縁体の布の上に 40 mm 四方の導電性縫い糸の刺繍が 10 チャンネル分施された構造となっている。センサの中心を原点とする座面座標（Fig. 7）を設定すると、刺繍部は座面座標上で左右対称となっている。センサは、車椅子の背もたれに絶縁布が接するように配置されている。ここで、被験者の体重がセンサ全面に均一にかかると仮定すると、センサにかかる体圧は 4.8 kPa から 8.3 kPa 程度と見積もることが

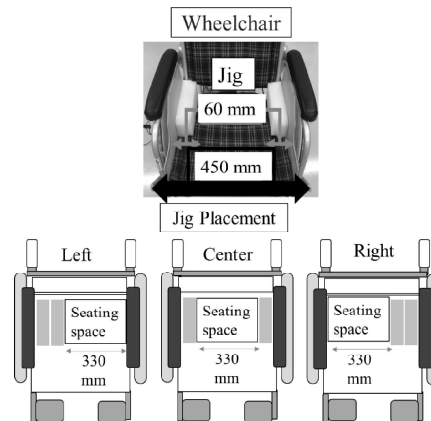


Fig. 5. Seating position on a wheelchair.

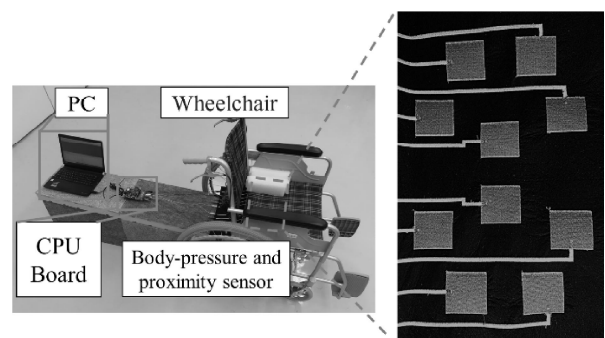


Fig. 6. Evaluation system of seating position during wheelchair transfer.

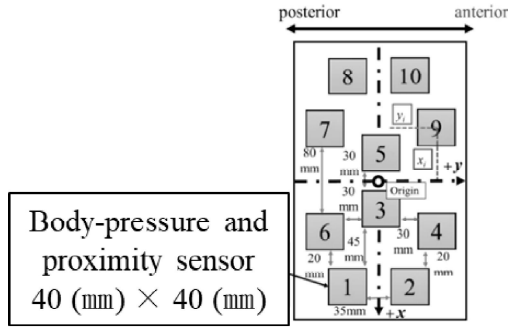


Fig. 7. Sensor position.



Fig. 8. Experimental procedure.

できる。これは、3章で示した体圧・接近センサを使用可能な圧力条件を満たしている。したがって、Fig. 6で示した実験系を使用することで、車椅子の座面上における被験者の体圧の変化を解析できるといえる。

実験手順をFig. 8に示す。実験の1試行を20sとし、実験開始から5s後に鳴らすベルで着座を開始、15s後のベルで立ち上がりを開始、20s後のベルで実験終了とした。実験は3回繰り返す、各チャンネルのセンサ応答を調べた。センサ応答は、時間 $t$ におけるチャンネル $i$ のカウント値を $C_i(t)$ としたとき、時間0sにおけるカウント値との差分値 $\Delta_i(t) = C_i(t) - C_i(0)$ により評価した。ここで、下添え字 $i$ はセンサのチャンネル番号 ( $i = 1, 2, \dots, 10$ ) とする。

〈4・2〉 実験結果および考察 Fig. 9に着座位置がRightの条件での被験者1名の着座時の応答データを示す。横軸は測定時間(s)、縦軸は $\Delta_i(t)$ を示す。各センサ応答の時系列を見ると、着座開始のベルが鳴った直後の6s付近で着座動作がおこなわれ、その後8sから15s付近までは安定した着座状態が継続し、立ち上がり開始のベルが鳴った直後の16s付近で立ち上がり動作がおこなわれたことが読み取れる。このことから、本研究で製作した体圧・接近センサは、車椅子の起居動作の解析に有用であるといえる。

さらに、本研究では、10チャンネルのセンサ全体の応答を総合的に評価する指標として、センサ応答評価値 $G_x, G_y$ を以下の式で定義する。

$$G_x(t) = \sum_{i=1}^{10} \Delta_i(t) x_i \quad (1)$$

$$G_y(t) = \sum_{i=1}^{10} \Delta_i(t) y_i \quad (2)$$

ここで、 $x_i, y_i$ はFig. 7の座面座標上におけるチャンネル $i$ の中心の位置座標とする。(1),(2)式は、座面座標上の原点から各チャンネルの中心までの符号付きの $x$ 距離または $y$ 距離によって重み付けをしたセンサ応答の総和を表している。本研究では、(1),(2)式で算出された評価値の符号が、臀部の中心が位置する座面座標の象限を表すものとして定義し

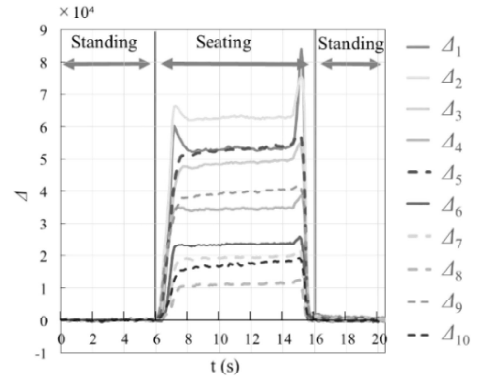


Fig. 9. Sensor response in seating motion.

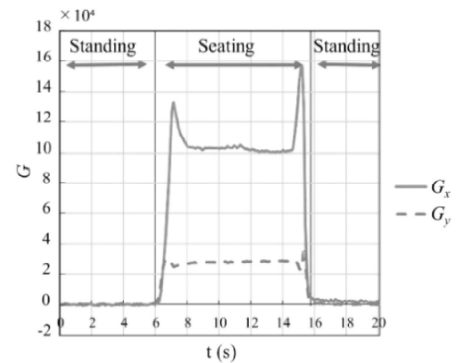
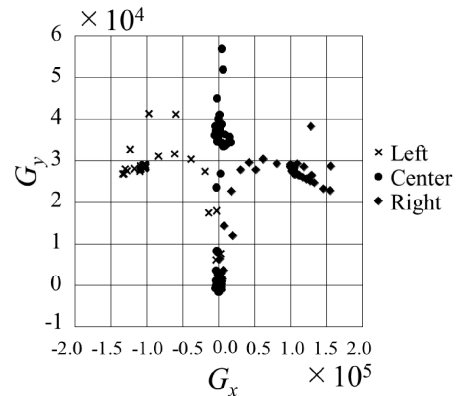
Fig. 10. Scatter plots of  $G_x$  and  $G_y$  in Left-Right discrimination test.

Fig. 11. Scatter plots of seating motion data in Left-Right discrimination experiment of seating motion.

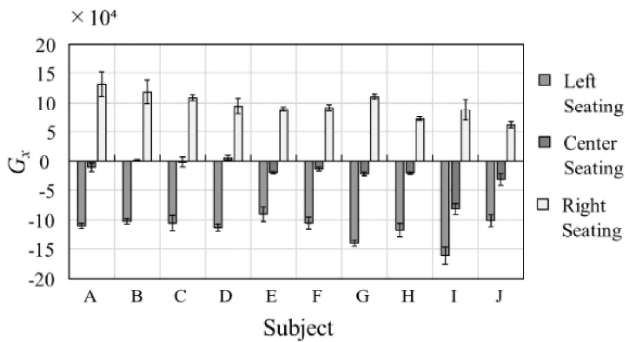
ている。

Fig. 9で示したセンサ応答から、センサ応答評価値 $G_x, G_y$ を算出した結果をFig. 10に示す。Fig. 10の横軸は時間(s)、縦軸はセンサ応答評価値を示す。着座位置がRightの場合、被験者の臀部の中心は座面座標上の $+x$ 側に位置することになる。これに対して、Fig. 10において、 $G_x$ は正の値を示しており、臀部の中心が $+x$ 側にあることを表現できていることがわかる。

Fig. 11に着座位置が異なる場合の $G_x, G_y$ の変化を示す。横軸は $G_x$ 、縦軸は $G_y$ を示す。 $\times$ のプロットは着座目標が

Table 1.  $G_x$  of Left-Right discrimination test of all subjects.

Subject	Seating (t = 10)			Standing (t = 20)		
	Left	Center	Right	Left	Center	Right
A	-110523±4701	-10193±7495	131698±20505	-1169±796	2060±1483	1438±2069
B	-102685±4588	1355±1845	118785±19208	-3889±2239	-1404±1425	4953±1980
C	-105875±12957	-1608±8663	108882±4801	-1953±3163	954±3379	1128±1944
D	-113700±6704	5962±3721	94417±13813	-964±4186	-871±625	3114±2406
E	-90884±12481	-20199±2054	89045±3782	1774±5077	-737±2207	2854±589
F	-105804±10431	-13300±3574	91531±5718	-2126±601	-1708±226	1389±565
G	-140570±4888	-22345±3833	110591±4060	-3600±673	-3204±1109	149±3755
H	-118138±11628	-21060±2604	72110±3455	-2276±1470	235±2679	1719±884
I	-161589±14163	-81821±9151	87908±18315	-600±1008	-1227±1097	-651±2281
J	-101610±9851	-31960±10508	61059±5170	7300±1201	-73±1407	-7025±7456

Fig. 12. Sensor response evaluation value  $G_x$  by subject.

Left, ●のプロットは Center, ◆のプロットは Right のときの結果をそれぞれ示す。プロットしたデータは、被験者 1 名の着座から立ち上がりまでの全ての計測データを使用して算出した値である。Fig. 11 より、臀部の中心位置に対応したセンサ応答評価値の変化が確認できた。Table 1 および Fig. 12 に 10 名の着座実験の結果から得られた  $G_x$  を示す。Table 1 は被験者毎の計測データをまとめた表である。Left, Center, Right のそれぞれの条件下において、着座状態におけるセンサ応答として  $A_i(10)$  および実験終了時におけるセンサ応答として  $A_i(20)$  を各 3 回計測したデータから  $G_x$  を算出し、その平均値および標準偏差を計算した。Fig. 12 の横軸は被験者、縦軸は  $G_x$  を示す。Fig. 12 を見ると、Left の条件下では  $G_x$  は負の値、Right の条件下では正の値となっており、臀部の中心位置を弁別できていることがわかる。また、Center の条件下では、Left, Right に比べ  $G_x$  の絶対値が小さく、臀部の中心が座面座標の原点近傍に位置することを表現できていることがわかる。

これらの結果から、本研究によって製作した体圧・接近センサは、車椅子の起居動作の解析や被験者の着座位置の違いの検出に使用できる性能を有しているといえる。

## 5. まとめ

本研究では、介護動作の評価に使用することを目的として、導電性縫い糸による刺繍を検出部とする静電容量方式の体圧・接近センサを製作した。製作したセンサの応答特性を調べるため、生体を模擬したステンレスブロックを接

近、接触させる実験をおこなった。実験の結果、本センサを使用することで、センサと生体の間の距離の変化やセンサにかかる圧力の変化を検出できることが明らかとなった。これらの応答特性を踏まえ、10 チャンネル分の検出部を持つ体圧・接近センサを設置した車椅子における着座実験を実施した。実験の結果、本センサによって、車椅子への着座や立ち上がりを含む車椅子の起居動作を解析できることが明らかとなった。また、車椅子の座面上における体圧の変化を検出することで、着座位置の違いが検出可能であることがわかった。

本稿では、被介護者一人による起居動作について、被験者 10 名を対象とした実験を行い、体圧・接近センサの有用性について検証した。今後は、介護者と被介護者の二人による車椅子の介護移乗動作の実験を行うことで、介護者の技能評価に本センサが有用であるか検証を進めていくことを展望としている。

## 謝 辞

センサ製作に協力頂いた（有）川島エンブ（群馬県みどり市）に感謝する。

## 文 献

- (1) B. Willy and C. M. Osterberg : “Strategies for Reducing Falls in Long-Term Care”, *Annals of Long-Term Care*® (2014)
- (2) C. Lin, T. Ogata, Z. Zhong, M. Kanai-Pak, J. Maeda, Y. Kitajima, M. Nakamura, N. Kuwahara, and J. Ota : “Development and Validation of Robot Patient Equipped with an Inertial Measurement Unit and Angular Position Sensors to Evaluate Transfer Skills of Nurses”, *International Journal of Social Robotics* (2020)
- (3) 鈴木みずえ・内藤智義・澤木圭介・金森雅夫 : 「高齢者施設入所の高齢者に対する転倒予防介入とケアスタッフ・組織への教育介入のエビデンス 〜システムティック・レビューに基づく課題抽出〜」, 日本転倒予防学会誌, Vol.7, No.1, pp.33-41 (2020)
- (4) W. Li, L. Xiong, Y. Pu, Y. Quan, and S. Li : “High-Performance Paper-Based Capacitive Flexible Pressure Sensor and Its Application in Human-Related Measurement”, *Nanoscale Research Letters* (2019)
- (5) N. Polhan, T. Charatrungol, W. Dacharux, J. Siriatsopon, and G. Guerra : “Provisional Outcomes of Affordable Custom Wheelchair Seating for an Individual with Cerebral Palsy: Case Report”, *CMU J. Nat. Sci.*, Vol.18, No.3 (2019)
- (6) P. Voyer, R. Verreault, G. M. Azizah, J. Desrosiers, N. Champoux, and A. Bédard : “Relevance of physical and verbal aggressive behaviours and associated factors among older adults in long-term care facilities”, *BMC Geriatrics*, Vol.5, No.13 (2005)

- (7) 森 和夫：「熟練技の特性と次世代への継承，育成における課題」，日本労働研究雑誌，特集 スキルの継承・伝承（2020）
- (8) S. Ohashi, A. Shiogo, K. Kaito, and A. Shionoya : “Measurement of Sitting Pressure Distribution with Gradient Changes for Wheelchair”, Users Information Engineering Express International Institute of Applied Informatics, Vol.3, No.2, pp.69-77 (2017)
- (9) 春名弘一・昆 恵介・稲垣 潤・佐藤洋一朗：「マーカーレスモーションキャプチャによる三次元動作解析の応用例」，日本義肢装具学会誌，Vol.35, No.1, pp.17-23 (2019)
- (10) 島上祐樹・堀場隆広・田中利幸・宮本晃吉・榎堀 優・間瀬健二・川部 勤・清水卓也・柳澤理子・水野寛隆・鈴木陽久：「圧縮または伸縮を検知できる布製のセンサを用いた生体計測システムの開発」，あいち産業科学技術総合センター研究報告（2016）
- (11) Y. Enokibori, A. Suzuki, H. Mizuno, Y. Shimakami, and K. Mase : “E-textile pressure sensor based on conductive fiber and its structure”, In Proceedings of the 2013 ACM conference on Pervasive and ubiquitous computing adjunct publication, pp.207-210, ACM (2013)
- (12) Y. Tsuda, M. Odagaki, and Y. Kondo : “Development of a Sensor with a Conductive Textile for Detecting Decubitus Ulcers”, IEEE Trans. on EEE, Vol.15, No.7, pp.1065-1069 (2020)
- (13) RENESAS Electronics : RX113 Group CTSU 静電容量タッチ検出の基礎（2014）

黒 崎 紘 史



（正員）2004年3月新潟大学機能材料工学科卒業。2006年3月同大学大学院自然科学研究科材料生産システム専攻博士前期課程修了。修士（工学）。2018年4月群馬県立群馬産業技術センター入庁。2021年4月前橋工科大学大学院工学研究科博士後期環境・生命専攻入学。現在，介護教育システムの研究に従事。

白 畑 紘 夢



（非会員）2021年3月前橋工科大学卒業。現在同大学大学院システム生体工学専攻博士前期課程在学中。現在，介護教育システムの研究に従事。

川 原 潤 也



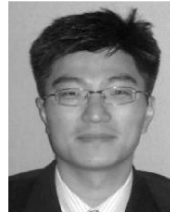
（正員）2011年北海道大学工学部機械知能工学科卒業，2013年同大学大学院工学院機械宇宙工学専攻修士課程修了，2016年同大学大学院工学院機械宇宙工学専攻博士課程修了。2014年日本学術振興会特別研究員（DC2）。2016年群馬県立産業技術センター。博士（工学）。主として，流体工学・計測工学に関する研究，日本機械学会等の会員。

近 藤 健



（非会員）2018年群馬大学大学院保健学研究科博士前期課程修了，2021年同後期課程修了。2020年群馬大学大学院保健学研究科リハビリテーション学講座助教，2021年群馬バース大学リハビリテーション学部作業療法学科助教。博士（保健学）。主として，医療機関における看護師と療法士間の連携に関する研究に従事。

李 範 爽



（非会員）2005年群馬大学大学院医学系研究科保健学専攻博士前期課程修了，2009年同後期課程修了。2007年群馬大学大学院保健学研究科リハビリテーション学講座助教，2012年同講座講師，2015年同講座准教授，2017年同講座教授。博士（保健学）。主として，上肢運動機能に関する研究に従事。

小田垣 雅 人



（正員）2004年東京電機大学大学院修士課程理工学研究科生命工学専攻修了，2007年同大学大学院博士課程先端科学技術研究科先端技術創成専攻修了。科創造科学専攻助教。2009年広島市立大学大学院情報科学研究科創造科学専攻講師。2014年前橋工科大学講師。2015年前橋工科大学准教授。博士（工学）。主として，生体磁気に関する研究，IEEE EMBS，日本生体磁気学会，日本応用磁気学会等の会員。

---

群馬県立産業技術センター研究報告  
令和6年度（2024）  
令和7年8月印刷

発行 群馬県立群馬産業技術センター  
〒379-2147 前橋市亀里町884番地1  
電話 (027) 290-3030(代)  
FAX (027) 290-3040

---