

I S S N 0916-6726

令和5年度

長崎県工業技術センター研究報告

REPORT OF
INDUSTRIAL TECHNOLOGY CENTER OF NAGASAKI

No. 53

長崎県工業技術センター

INDUSTRIAL TECHNOLOGY CENTER OF NAGASAKI

目 次

1. サプライチェーン強化を目的とした航空機エンジン部品製造技術の高度化……………	1
機械加工科	主任研究員 福 田 洋 平
機械加工科	主任研究員 梅 木 宣 明
研究企画課	主任研究員 瀧 内 直 祐
2. 認知機能の維持・改善に資する、高溶解ヘスペリジン食品の開発……………	7
食品開発支援センター	主任研究員 中 山 久 之
食品開発支援センター	専門研究員 宮 田 裕 次
3. スマート工場実現のための作業工程監視装置の開発……………	13
基盤技術部	部 長 田 口 喜 祥
4. ディープラーニングを活用したロボット制御における安定性向上の研究……………	15
機械システム科	専門研究員 堀 江 貴 雄
5. プラント増設業務における既存設備モデリングシステムの開発……………	21
機械システム科	主任研究員 小 楠 進 一
6. 音源可視化技術の開発……………	27
基盤技術部	部 長 田 口 喜 祥
7. 3D-CADとシミュレーションを用いた設計変更技術適用による機械設計の高度化……………	33
機械システム科	研 究 員 西 村 学
機械システム科	研 究 員 小笠原 耕太郎
8. 光学式ガスセンサーの開発……………	35
電子情報科	主任研究員 田 尻 健 志
9. エネルギーの有効活用を目指した環境発電に関する研究……………	37
電子情報科	主任研究員 中 川 豪
10. レーザーによる異材樹脂溶着の高品質化に関する研究……………	40
電子情報科	主任研究員 田 中 博 樹

11. 生体組成の非侵襲計測技術の開発.....	43
電子情報科	研 究 員 下 村 義 昭
12. マルチスケール概念に基づく膜透過シミュレーションの研究.....	45
工業材料・環境科	専門研究員 重 光 保 博
13. 設計パラメータを用いたシミュレーション省力化システムの開発.....	51
工業材料・環境科	専門研究員 入 江 直 樹
14. バイオマス系弾性高分子の開発とシート材料への応用.....	56
研究企画課	課 長 市 瀬 英 明
15. 産業洗浄における微細気泡の効果的活用に関する研究.....	58
機械加工科	科 長 三 木 伸 一
16. 県内の製造現場に即した鋳物砂性状の管理手法に関する研究.....	60
機械加工科	主任研究員 大 田 剛 大
機械加工科	主任研究員 梅 木 宣 明
17. 県産地域資源に含まれるD-アミノ酸の解析と含有食品の開発	62
食品開発支援センター	専門研究員 玉 屋 圭
食品開発支援センター	センター長 河 村 俊 哉
食品開発支援センター	専門研究員 宮 田 裕 次
食品開発支援センター	研 究 員 三 島 朋 子

サプライチェーン強化を目的とした航空機エンジン部品製造技術の高度化

機械加工科	主任研究員	福 田 洋 平
機械加工科	主任研究員	梅 木 宣 明
研究企画課	主任研究員	瀧 内 直 祐
長崎大学大学院工学研究科	教 授	矢 澤 孝 哲
長崎大学大学院工学研究科	助 教	大 坪 樹

本研究は、長崎県内で構築されている航空機エンジン部品のサプライチェーンを強化することを目的としている。航空機エンジン部品の製造を行う県内企業からのニーズに基づき、①ブレードの高品位仕上加工技術の開発、②ブレード形状と加工条件から仕上面品質を予測するシステムの開発に取り組むとともに、宇宙・エネルギー産業への拡大を図りたいという県内企業の要望に応えるため、③超耐熱合金の加工技術開発に取り組む。本報告は、工作機械の主軸に取り付けられた工具のエッジを高精度に計測するシステムを開発し、評価した結果である。

1. 緒言

平成 30 年の長崎県航空機産業クラスター協議会の発足を契機に航空機産業進出に向けた県内企業の意欲が高まり、工業技術センターでは令和元年度から令和 3 年度の 3 年間、県内企業の航空機産業への新規参入を促すため、戦略プロジェクト研究「航空宇宙関連産業の市場獲得に向けた切削加工技術の高度化」に取り組んできた^[1-3]。しかしその間、新型コロナウイルス感染症拡大の影響により航空機機体部品の需要は一時的に減少し、新規参入への足踏みが余儀なくされた。一方、航空機エンジン部品は、定期的な部品交換による安定した需要が見込めることから、長崎県内でサプライチェーンが構築され、今後のアフターコロナにおいては需要拡大も見込める。本研究では、長崎県の航空機産業の拡大に向け、航空機エンジン部品の製造技術の高度化に取り組み、サプライチェーンの更なる強化を図る。

本研究は航空機エンジン部品のブレード加工における生産性の向上と表面性状の向上との両立を図るものである。県内企業は、表面性状と工具寿命の突発的なばらつきを抑えたいという課題を抱えており、①従来よりも高度なプロセス管理（切れ刃管理、主軸の動的振れ管理、切れ刃の転写性管理）を提案し、現場への適用を図る。また、②新製品立ち上げ時の NC プログラムのトライ&エラーを削減するため、AI 技術を活用し、ブレード形状と加工条件をインプットすることで仕上げ面の表面粗さを予測するシステムを開発する。更に、③宇宙・エネルギー産業への横展開を目指した超耐熱合金加工への技術応用を図る。

本報告は、工作機械の主軸に取り付けられた工具のエッジを高精度に計測するシステムを開発し、評価した結果を報告する。

2. 計測原理

前報^[4]において、工作機械主軸の振れを測定し、主軸の振れがエンドミル加工面の表面性状に及ぼす影響を評価した。一方、主軸の振れが無い理想的な条件においても、多刃工具の各切れ刃形状の不揃いや、工具と工具ホルダとの取り付け誤差などがあつた場合、図 1 に示すように表面性状の悪化を生じさせる。



図 1 各切れ刃の形状が不揃いな工具による加工面のイメージ

ボールエンドミルによるブレード加工においては、加工面に対する工具軸の傾斜を一定に保ちながら加工する方法が多く採用されている。表面性状の悪化を防ぐためには、加工面の創成に寄与する各切れ刃の一部分に対して、各切れ刃形状の不揃いと、工具と工具ホルダとの取り付け誤差などがどのように作用しているかを高精度に計測する必要がある。

開発する装置に求められる仕様として、①非接触、②高精度エッジ検出および③机上計測が挙げられる。これらを実現するため、空間周波数フィルタリング、長作動距離設計の無限補正対物レンズ、およびチュー

ブシステムを採用した計測装置の開発に取り組んだ。

2. 1 空間周波数フィルタリング

高精度エッジ検出手法として採用した、空間周波数フィルタリングを用いたエッジ検出法の計測原理を図2に示す。測定物にレーザを照射すると、エッジ部からは透過光と回折光が発生する。この時、受光素子上に像を結像させると、透過光と回折光が干渉し、測定物のエッジの判別が困難になる。輝度情報のラインプロファイルでは、エッジ付近がなだらかな曲線となり、エッジ位置の判別が難しい。そこで、空間周波数フィルタとして機能するアンチピンホールをレンズ1の後側焦点位置とレンズ2の前側焦点位置に設置する。これにより透過光が遮断され、回折光のみで像が結像される。取得画像上では、明—暗—明の像が得られ、エッジ位置は暗線となる。輝度情報のラインプロファイルでは、エッジ位置は二つの極大値の間の極小値となり、定量的なエッジ検出が容易になる。

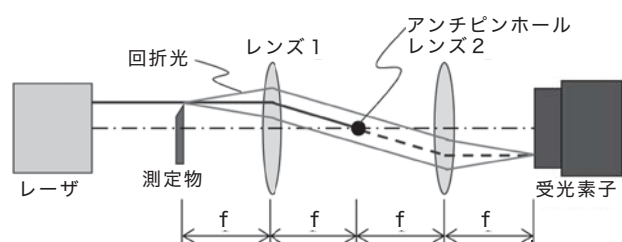


図2 空間周波数フィルタリング

3. 光学設計および定盤上での評価

3. 1 要求仕様

開発した装置の要求仕様を表1に示す。ブレードの仕上面には表面粗さRz1.6 μm よりも高い品位が要求され、工作機械上で1 μm の各刃の不揃いを確実に捉える必要があるため、計測分解能は0.1 μm とした。また、計測対象となるボールエンドミルのボール半径はR6 mmとR8 mmを想定しており、測定時の安全性と作業性を考慮して、対物レンズの作動距離は20 mm以上とした。装置サイズは、当センターの牧野フライス製作所製マシニングセンタD500のテーブル($\phi 500\text{ mm}$)上に設置可能であることとした。

3. 2 照明系

使用したレーザの仕様を表2に示す。装置を小型化する観点から光源はレーザダイオードモジュールとし、光学的なエッジ分解能を高めるため、波長は青色を採

用した。また、イメージング光学系鏡筒内での散乱による迷光を防ぐため、レーザダイオードモジュールと測定対象物の間にピンホールを配置し、受光素子の観察視野から外れる光を遮断した。

表1 要求仕様

計測分解能	0.1 μm
作動距離	20 mm 以上
装置サイズ	$\phi 500\text{ mm}$ 以内

表2 レーザ仕様

メーカー	THORLABS
型式	CPD405
ピーク波長	404.6 nm
出力	4.4 mW

3. 3 イメージング光学系

3. 3. 1 対物レンズ

開発する装置には、高倍率、高分解能、および長作動距離が要求されるため、長作動距離用無限補正対物レンズと結像レンズを組み合わせた構成とした。この構成によって、対物レンズを交換するだけで光学倍率を変更することが可能となり、装置の汎用性を高めることができる。対物レンズと結像レンズの仕様を表3に示す。

表3 対物レンズ仕様および結像レンズ仕様

対物レンズ	
メーカー	ミットヨ
型式	M-PLAN APO SL 20X
倍率	20 倍
作動距離	30.5 mm
分解能	1.0 μm
結像レンズ	
メーカー	ミットヨ
型式	MT-2
倍率	2 倍
焦点距離	400 mm

3. 3. 2 受光素子

使用した小型CMOSカメラの仕様を表4に示す。画素サイズは縦横ともに3.45 μm であり、光学20倍の対物レンズと光学2倍の結像レンズを組み合わせること

によって、1画素あたりの分解能は $0.0863\text{ }\mu\text{m}$ となる。ゲイン、露光時間、およびフレームレートは専用のソフトウェアを用いて任意に設定することが可能である。

表4 小型CMOSカメラ仕様

メーカー	オムロンセンテック
型式	STC-MBS163U3V
撮像素子	モノクロ CMOS
有効画素数	1440(H) × 1080(V)
セルサイズ	$3.45\text{ }\mu\text{m(H)} \times 3.45\text{ }\mu\text{m(V)}$
撮像エリア	$4.97\text{ mm(H)} \times 3.72\text{ mm(V)}$

3.3.3 リレーレンズ

空間周波数フィルタリングを実現するためには、結像レンズの後段に1組のリレーレンズを設ける必要がある。光学調整の容易性、瞳の伝播、および回折光取り込みの観点から、リレーレンズは焦点距離 100 mm で直径 25.0 mm の平凸レンズを採用した。

3.3.4 分解能の評価

設計した光学系の計測分解能を確認するため、定盤上にリレーレンズを含む光学系を組み、評価実験を実施した。評価基準には一目盛が $10\text{ }\mu\text{m}$ の反射型対物マイクロメータを用いた。

マイクロメータ目盛部の投影画像と輝度情報のラインプロファイルを図3に示す。反射型対物マイクロメータに光を透過させて取得した画像であるため、エッジ部は不明瞭であるが、輝度情報のラインプロファイルにおいて、4目盛分 ($40\text{ }\mu\text{m}$) の画素数は 460 pixels となっており、1画素あたりの分解能は $0.087\text{ }\mu\text{m}$ であることが確認できた。

3.4 アンチピンホール

空間周波数フィルタリングにおいて、ピンホールは透過光成分のみを通過させ、アンチピンホールは透過光成分のみを遮断する役割を果たす。ミラーの反射膜の一部を除去することで透過光成分のみを遮断し、空間周波数フィルタリングを実現できることが確認されており、開発する装置においてもこの手法を採用した。

設計した光学系に適したアンチピンホールのサイズを確認するため、ガラス基板にアルミコーティングを施した平面ミラーに対して、ボール半径が $R0.3\text{ mm}$ のCBN ボールエンドミルを用いて $\phi 200\text{ }\mu\text{m}$ 、 $\phi 300\text{ }\mu\text{m}$ 、

$\phi 400\text{ }\mu\text{m}$ のアンチピンホールを形成した。アンチピンホールの顕微鏡観察画像を図4に、各アンチピンホールを用いて取得した画像と、輝度情報のラインプロファイルを図5に示す。なお、測定対象にはカッターナイフの刃を用いた。

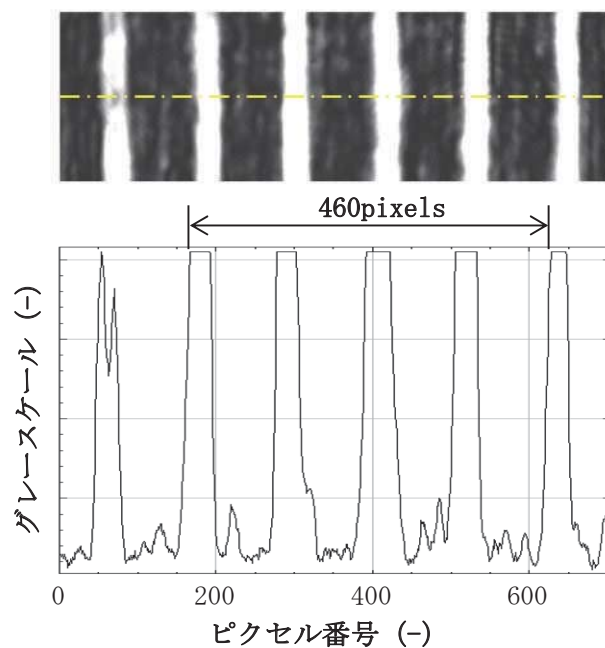


図3 分解能の評価

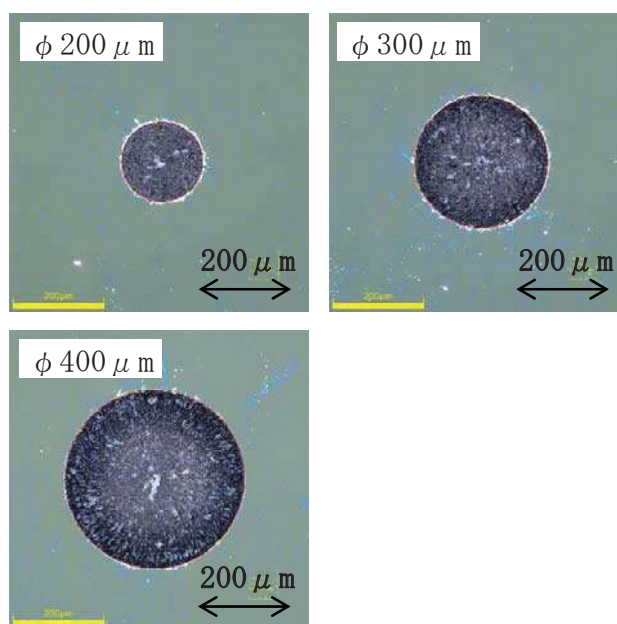


図4 平面ミラーに形成したアンチピンホール

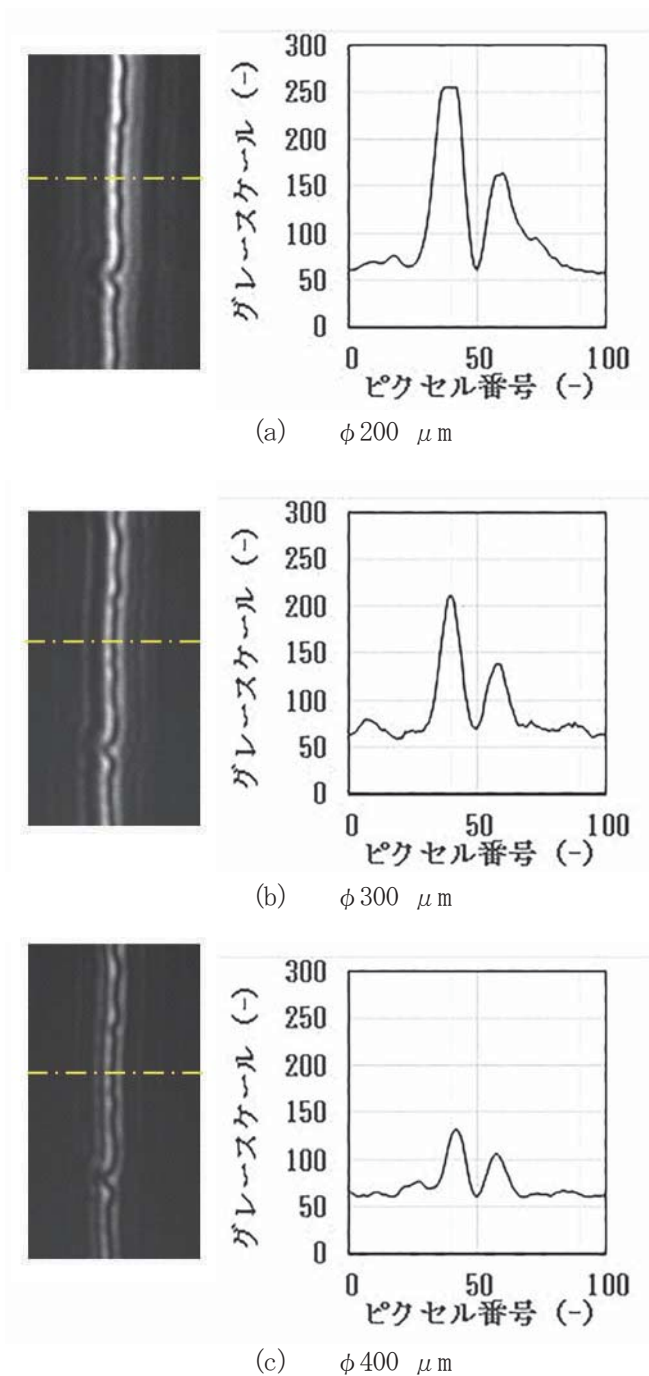


図5 アンチピンホール径が像に及ぼす影響

ラインプロファイル解析の結果において、二つの極大値とその間の極小値との差が大きいほど、カッターナイフのエッジを明瞭に捉えているといえる。3条件の実験結果から、開発するシステムには最も明瞭にエッジを捉えることができた $\phi 200 \mu\text{m}$ のアンチピンホールを採用した。

暗線幅について、二つの極大値の距離は約 $2.0 \mu\text{m}$ となっている。光学分解能 $1.0 \mu\text{m}$ の対物レンズと光学倍率2倍の結像レンズを用いていることから、本光学系の光学分解能は $2.0 \mu\text{m}$ 相当となっており、暗線

の細線化を図るためには対物レンズの変更が必要となる。

4. 計測手順およびソフトウェア

4. 1 計測手順

マシニングセンタの手動パルサを用いることで、テーブル上に設置した計測システムと主軸に取り付けられたボールエンドミルの相対位置を精密に調整し、座標情報を取得できる。

ボールエンドミルの任意の位置の切れ刃エッジを計測する手順を以下に示す。

1. ボールエンドミルのシャンク径は既知であり、主軸に取り付けられたボールエンドミルのシャンク部エッジ計測することによって、工具軸の座標を取得する。
2. ボールエンドミル先端のエッジを計測することにより、工具先端の座標を取得する。
3. ボールエンドミルのボール半径は既知であり、幾何学計算によって計測対象位置の座標を取得する。
4. 手動パルサを用いて計測対象座標に位置決めし、主軸を手で回して切れ刃エッジが明瞭に見える角度に調整する。
5. ラインプロファイル解析によってエッジを計測する。

4. 2 ソフトウェア

前述した手法によりエッジを計測するにあたって、ソフトウェアに要求される仕様を以下に示す。

1. 取得画像をリアルタイム表示できること
2. 任意の角度でのラインプロファイル解析が可能であること
3. リアルタイムで取得画像のラインプロファイル解析が可能であること

上記の3つを実現するソフトウェアとして、本システムではオープンソースの画像処理ソフトウェア ImageJ を採用した。また、リアルタイム解析には WebCam Capture プラグインを使用した。

5. 機上計測システム

開発した装置の外観写真を図6、光学部品配置図を図7に示す。リレーレンズを含む長い光路を工作機械のテーブル上に配置するため、4枚の平面ミラーを用いて光路を蛇行させ、幅385 mm、奥行き200 mmのメインプレート上に納めた。また、チューブシステムを採用することで光学部品を可能な限り一体化し、装置移設時の光学部品のズレ、工作機械上における振動の影響、および外乱光の影響を低減している。さらに、アンチピンホールを形成した平面ミラーを一軸ステージでスライドすることにより、投影画像とアンチピンホール画像を容易に切り替えることができる。

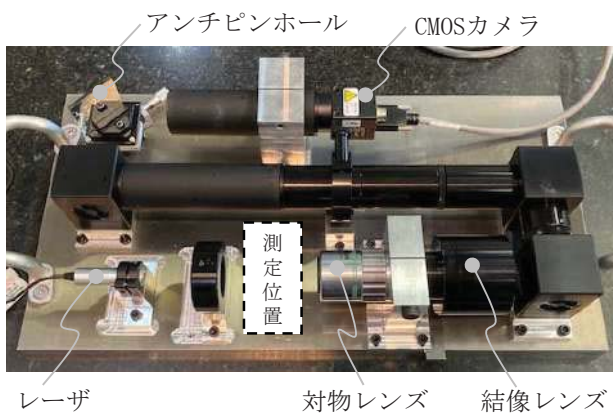


図6 装置外観

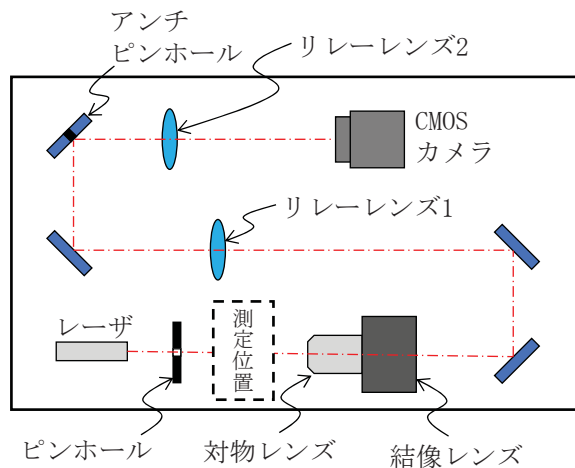


図7 光学部品配置

6. 加工実験

開発した装置の効果を検証するため、振れ調整機構を備えた工具ホルダを用いたボールエンドミルによる平面加工実験を実施した。加工実験の条件を表5、振れ調整前後のエッジ計測結果を図8、加工面の断面プロフィールを図9、加工面の拡大写真を図10に示す。

開発した装置を用いることで、調整前の2枚の切れ刃の不揃いが $1.8 \mu\text{m}$ であることを確認できた。また、輝度情報のプロフィールを見ながら工具の振れを調整することによって、2枚の切れ刃の不揃いを $0.3 \mu\text{m}$ に低減することができた。

断面プロフィールと観察写真から、2枚の切れ刃の不揃いを精密に調整することによって、表面粗さが良好な加工面を生成できることが確認された。

表5 実験条件

工具ホルダ	大昭和精機 振れ調整式RAホルダ
工具	2枚刃ボールエンドミル
ボール半径	R3 mm
工具傾斜	20° (チルト角)
主軸回転数	5000 min^{-1}
一刃あたりの送り	0.2 mm/tooth
切込み	0.1 mm

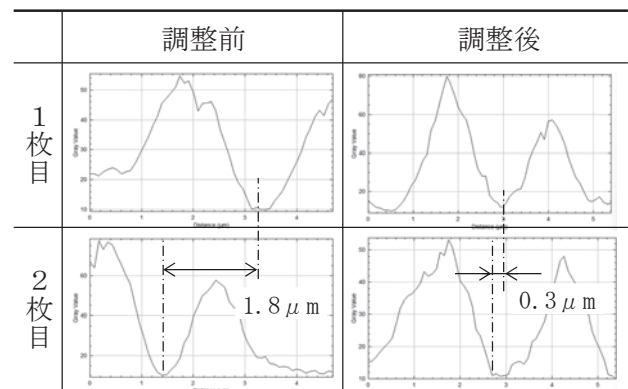


図8 エッジ計測結果

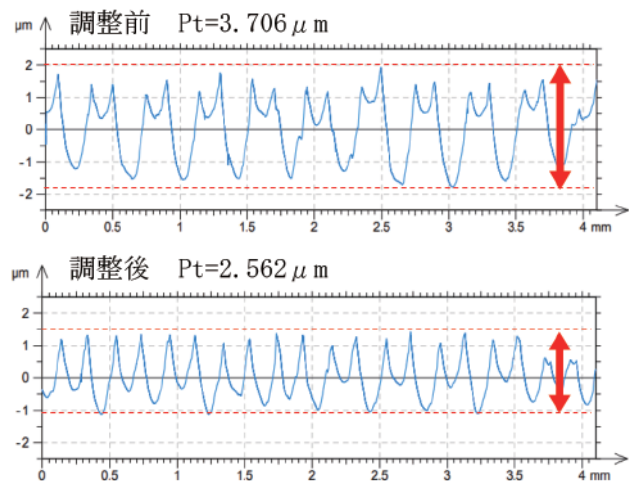


図9 断面プロフィール

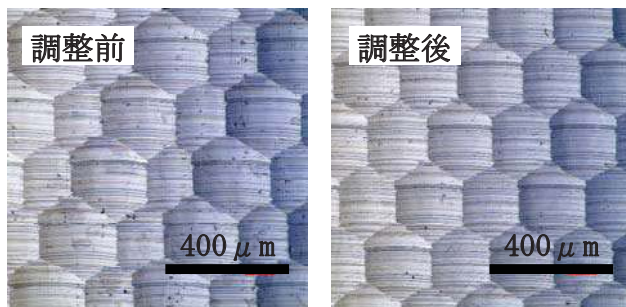


図10 加工面の拡大写真

7. 結言

工作機械の主軸に取り付けられた工具のエッジを高精度に計測するため、空間周波数フィルタリング、長作動距離設計の無限補正対物レンズ、およびチューブシステムを採用した机上計測装置の開発に取り組んだ。

開発したシステムを用いることで、工作機械の主軸に取り付けられたボールエンドミルの切れ刃の不揃いを $0.1\mu\text{m}$ の分解能で計測することができた。

さらに、開発したシステムと振れ調整機構を備えた工具ホルダを併用することで、加工面の創成に寄与する各切れ刃の不揃いに対して、サブミクロンオーダーの調整が可能となった。

また、加工面の創成に寄与する各切れ刃の不揃いを調整することで、加工面の表面粗さを改善できることが確認された。

参考文献

- [1] 福田、瀧内、三木：長崎県工業技術センター研究報告、No. 49, pp. 1-5, 2020.
- [2] 福田、瀧内、三木：長崎県工業技術センター研究報告、No. 50, pp. 1-4, 2021.
- [3] 福田、瀧内、三木、小林、荒井、佐藤、水野：長崎県工業技術センター研究報告、No. 51, pp. 1-5, 2022.
- [4] 福田、瀧内、梅木：長崎県工業技術センター研究報告、No. 52, pp. 1-4, 2023.

認知機能の維持・改善に資する、高溶解ヘスペリジン食品の開発

食品開発支援センター 主任研究員 中山 久之
食品開発支援センター 専門研究員 宮田 裕次

摘果されるミカン未熟果は大量に廃棄されているが、フラボノイドの一種であるヘスペリジンを豊富に含む。動物実験において、ヘスペリジンの摂取は様々な生体調節機能を有することが報告されており、健康寿命の延伸に寄与する可能性が示されているが、水への溶解性が低いため、体内への吸収が悪く、食品への展開が困難である。これまで、ミカン未熟果と茶葉を製茶機械である揉捻機と一緒に揉み込んで乾燥することにより、ヘスペリジンの溶解性を向上させた高溶解ヘスペリジン素材を開発し、本素材の摂取でヘスペリジンの体内吸収量が高まること、また、ヒトにおいて、冷えや睡眠の質などが改善されることを明らかにしてきた。

本研究では、摘果する果実だけでなく、生理現象で落果する未熟果や缶詰製造などの過程で排出されるミカン果皮を原料とした高溶解ヘスペリジン素材の製造技術確立や品質解明を行うとともに、本素材からヘスペリジンを高収率でエキスを回収する技術について検討した。さらに、高溶解ヘスペリジン素材を試験食として、ヒトでの認知機能の維持・改善効果を検証した。

1. 緒言

ミカンに含まれるヘスペリジンは、血流改善などの機能性を有することが報告されている成分で^[1]、成熟した果実よりも未熟な果実に高濃度に含まれる。しかし、ヘスペリジンは水に極めて難溶のため、体内への吸収量が少ないことから^[2]、食品への加工展開が難しい。これまでに、未熟なミカン果実を緑茶三番茶葉とともに、製茶機械である揉捻機で揉み込んで乾燥させることで、テルペン系の香りを有する発酵茶（以下、ミカン発酵茶）が製造でき、含まれるヘスペリジンの水への溶解性が向上すること^[3]、また、体内へのヘスペリジン吸収量が増加することを明らかにしてきた。そこで、本センターでは、県内外の大学や食品企業と共同で、ミカン発酵茶のヒトでの機能性を追究している。

離島・中山間地が多い長崎県では、単位面積あたりの生産性をいかに向上させるかが農業の課題となっている。特に、生産過程で廃棄される資源を有効活用することは本県の農業振興に重要な役割を果たし、生産力向上と持続性の両立を目指す「みどりの食料システム戦略」の実現に大きく貢献することが期待される。ミカンは果実が肥大する過程で、樹から自然に果実が落果する生理現象（以下、生理落果）が起き、7月上旬頃までに6割以上の果実が落果するとされる^[4]。ヘスペリジンはミカン果皮の内側のアルベド部に多く局在するため、アルベド部が最大化する6月頃に生理落果する果実はヘスペリジンが豊富に含まれると推察

される。また、缶詰加工する際に排出されるミカン加工残渣（以下、ミカン果皮）についても、アルベドを多く含むことから、豊富なヘスペリジン供給源と考えられるが、いずれも有効活用されておらず、そのほとんどが廃棄されている。

ミカン発酵茶に含まれるヘスペリジンの熱水への溶解量は未熟果のみと比べると数倍高いものの、その溶解量は20～40%程度で^[3]、ヘスペリジンの半量以上は溶解しないか、あるいは溶解しても再結晶化すると推察される。この理由から、ヘスペリジンを効率よく摂取するため、上市されているミカン発酵茶製品のほとんどが茶葉を粉末状にし、まるごと摂取する形態をとっている。茶葉は不溶性繊維が多く、水に溶けることではないため、粉末化するだけでは異なる食品に混ぜるなどの加工展開が難しい。一方で、機能性原料の多くはエキスを粉末として取引され、様々な食品に展開されていることから、ミカン発酵茶においても、ヘスペリジンを高収率にエキスを回収し、それを保持して粉末にすることができれば、加工用途の幅が広がり、取引の拡大に寄与すると考えられる。

日本の高齢者人口の割合は世界で最も高く、総人口に占める65歳以上の割合は約3割に及ぶ^[5]。人生100年時代を迎え、定年退職後も働き続けたいと考える労働者らの健康寿命の延伸は社会的問題であるが、加齢に伴い、注意力、判断力、記憶力といった脳機能（以下、認知機能）は低下する。認知機能の低下は、日常生活に多大な支障をきたすため、本機能の低下を

抑制することは重要な意義をもつ。これまでの研究で、ミカン発酵茶の摂取はヒトにおいて冷えを改善する効果があることを明らかにしているが^[4]、この効果は、ヘスペリジンによる血流改善機能と密接に関連することが推察される。加齢による慢性的な血流量不足によって、脳への血流障害が起こり、認知機能が低下することが報告されていることから^[6]、ヘスペリジンの体内吸収性を高めたミカン発酵茶が認知機能に対して改善効果を発揮する可能性がある。

本研究では、生理落果した果実やミカン果皮を有効活用するため、これらをミカン発酵茶の原料にする場合の品質評価を行うとともに、ヘスペリジンを高収率でエキス抽出する技術について検討した。さらに動物やヒトを対象に、ミカン発酵茶の摂取が認知機能に及ぼす影響について追究したので報告する。

2. 研究内容と結果

2. 1 生理落果果実の特性

生理落果果実は農林技術開発センター果樹・茶研究部門のカンキツ圃場から入手した。樹の下にネットを張り、2021年と2022年の2か年で生理落果果実を収集した（写真1）。2022年産は、5月24日から同年6月23日まで、2日から4日おきに、生理落果果実の収量を調査した。また、生理落果果実を原料として、農林技術開発センター果樹・茶研究部門の茶業研究室にて、茶葉との揉捻を行った。ヘスペリジンおよびカテキン類の定量は、ジメチルスルホキシド・メタノールの混合溶媒に試料を懸濁し、60℃のウォーターバス中で1時間恒温抽出した後、メンブレンフィルターでろ過したものをHPLC分析に供試した。

生理落果果実の累積収量を図1に示す。2022年の5月下旬から6月下旬までの1か月間で、継続して生理落果が起こることが観察され、累積で約35kg/10aの収量であった。摘果で収穫する未熟果の量は、約400kg/10aと試算されることから、生理落果果実は、摘果果実の1割に満たない収量になる。ただし、年によっては生理落果が多発し、摘果果実の減収が起こることから、生理落果果実を発酵茶の原料として用いることを想定し、ヘスペリジン量やミカン発酵茶の原料にした場合の特性について調査した。2か年の調査において、生理落果果実には、約360mg/gのヘスペリジンが含まれていた（表1）。これまでにミカン発酵茶由来のヘスペリジンを1日あたり36.7mg摂取することにより、血圧、冷え、肩のこり、疲労感および睡眠

の質が改善することを明らかにしている^[7]。これはミカン発酵茶葉あたりに換算すると約1gに相当する量で、製造現場では、通常、未熟果と茶葉を1:3の重量比で混合してミカン発酵茶葉を製造することから、未熟果1gあたり、約150mg以上のヘスペリジンを含む必要がある。生理落果果実の場合、1gあたり約360mgのヘスペリジンを含むことから、ヘスペリジン量を十分に担保できる原料であることが分かった。

発酵茶の製造においては、未熟果と茶葉を製茶機械である揉捻機と一緒に揉み込む工程がある。この揉捻により、ポリフェノール酸化酵素が活性化し、カテキン類の酸化重合が起こることで、発酵茶独特の風味が付与されるとともに、ヘスペリジンの可溶化に寄与する成分も生成される。前報において、生理落果果実は摘果果実よりもポリフェノール酸化酵素の活性が高いことが見出されたため、揉捻工程におけるカテキン類の減少率を経時的に測定した。カテキン類の酸化重合が進むと、基質であるカテキン類が減少することになるが、図2に示すとおり、生理落果果実を茶葉と一緒に揉捻すると、摘果果実の場合と比較し、カテキン類が早く減少した。これはすなわち、発酵が短時間で促進されることを意味する。ミカン発酵茶の製造現場では、摘果果実と茶葉の揉捻時間を20分としているが、生理落果果実の場合は、約5分でカテキン類が同程度減少することから、生理落果果実を発酵茶の原料に用いることで、揉捻時間を約15分短縮できると考えられる。

以上の結果から、生理落果果実は、収量こそ低いものの、ヘスペリジン量は多く、発酵茶の製造時間を短縮できるポテンシャルがあることが明らかとなった。



写真1 ネットを使った生理落果果実の収穫方法

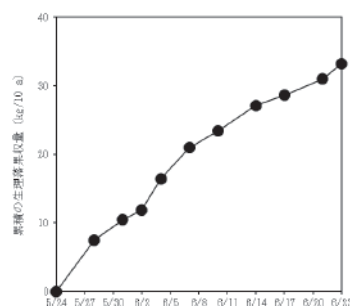


図1 生理落果果実の累積収量 (kg/10a)

表1 摘果果実と生理落果実に含まれるヘスペリジン含量 (mg/g)

	摘果果実	生理落果実
2021年	260.8	393.9
2022年	251.7	332.3
平均	256.2	363.1

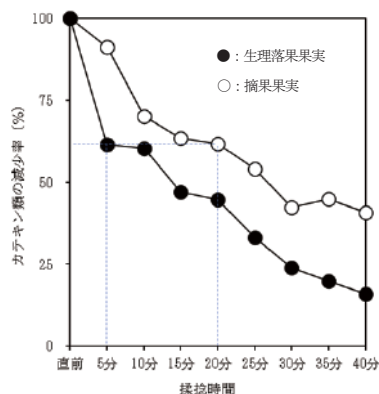


図2 生理落果実と摘果果実の揉捻時間の違いによるカテキン類の減少率

2.2 ミカン果皮の特性

ミカン果皮は、県内でミカン缶詰を製造している食品製造事業者から供与を受けた。ミカン果皮を原料とするミカン発酵茶は、農林技術開発センター果樹・茶研究部門の茶業研究室にて製造した。ヘスペリジンの定量は前項のとおりであった。香気成分の定量は、試料を遠沈管に入れ、80℃の沸騰水で5分間抽出後、3000rpmで遠心して得られた上清5 mL をガラスバイアルに移したものを、SPME-GC/MS分析に供試した。

前述のとおり、ミカン発酵茶の製造現場では、ミカン発酵茶葉1 g あたり 41.3mg（ヒト試験において、ヘスペリジン 36.7mg 以上で効果を発揮することが分かっており、サンプルに入っているミカン発酵茶の量が0.89gなので1gに換算すると41.3mgになる）以上のヘスペリジン量となることを目安としている。年毎のミカン果皮と茶葉の重量比の違いによる1g 当たりのヘスペリジン含量を表2に示す。目標とするヘスペリジン含量 41.3mg を超えるのは、令和4年のミカン果皮：茶葉の重量比＝1：1、3：2であり、年によって変動が大きく、機能性食品としてミカン果皮を使用するのは難しいと判断した。

香りは味とともに、商品の品質を決定づける重要な要素であるが、ミカン果皮と茶葉の割合が1：3の場合においても、ミカン果皮を原料とするミカン発酵茶は、 α -リモネンや γ -テルピネンといった、ミカン由来

の香気成分が多く検出される（データ略）。本報にて、ミカン果皮の配合量を茶葉と同程度以上にしたミカン発酵茶の香気特性を調査したところ、表3に示すとおり、主要香気としてテルペン系の成分が多く検出され、リナロール以外は、ミカン果皮の配合量と比例関係にあった。リナロールはミカン果皮の配合量が増えるほど減少する傾向にあったが、本成分は、紅茶の主要香気であるため、茶葉の割合が相対的に少なくなったことが、リナロール減少の主要因と考えられる。一方で、ミカンの代表的香気である α -リモネンなどの場合、ミカン果皮を使用すると、未熟果と比べ、数倍多くなることから、ミカン果皮を原料としたミカン発酵茶は、未熟果を原料とする場合より、紅茶の香りは弱いものの、ミカン由来の爽やかな香気成分が多く、嗜好性の高い商品開発などに応用できると判断された。

以上の結果から、ミカン果皮をミカン発酵茶の原料として用いる場合は、機能性食品としての利用は難しいが、品質面からミカンの香りが強い発酵茶が製造できることが明らかとなった。

表2 ミカン果皮と茶葉の重量比の違いによるミカン発酵茶に含まれるヘスペリジン含量 (mg/g)

ミカン果皮と茶葉の重量比	令和3年	令和4年	令和5年
1:2(3:30)		32.6	
1:1(6:30)	32.1	41.5	30.3
3:2(10:30)	35.2	58.9	36.5

注) ミカン果皮と茶葉の重量比は乾燥物での比

() はミカン果皮は乾燥、茶葉は生葉重量の比

表3 未熟果、果皮と茶葉の混合比率の違いによる香気成分の相対ピーク面積比

	未熟果：茶葉 1：3	果皮：茶葉 1：1	果皮：茶葉 2：1
α -テルピネン	2.87	3.16	3.60
α -リモネン	31.7	136.4	178.8
p-シメン	3.55	4.13	5.18
γ -テルピネン	6.67	6.87	8.67
リナロール	60.5	47.5	45.6
α -カリオフィレン	4.54	6.74	9.12
α -テルピネオール	6.46	7.42	11.12
酢酸ゲラニル	0.68	2.05	2.91
イソチモール	4.6	31.2	61.8

注) 数値は内部標準物質に対する相対ピーク面積比

2. 3 エキス粉末化技術

機能性原料からエキス粉末を製造するためには機能性関与成分をできる限り溶媒抽出する必要があるが、ミカン発酵茶に含まれるヘスペリジンの熱水やエタノールへの溶解量は20～40%程度である。ヘスペリジンのモデル溶液を用いた実験において、ヘスペリジンの溶解量を向上させるためには、茶の主要カテキンであるエピガロカテキンガレート（以下、EGCg）やEGCgの二量体であるテアシネンシン（以下、TS）の存在下で、オートクレーブによる抽出が有効であることを明らかにしている（図3）。オートクレーブは、約120℃の加熱を行うため、容器内部を加圧することから、ミカン発酵茶を原料として、まず、圧力によるヘスペリジン抽出率への影響を調査すべく、オートクレーブと同じ、約2気圧に設定した容器釜で95℃での抽出を行った。しかし、ヘスペリジンの抽出率に違いは認められなかったため（データ略）、抽出温度の影響を調べたところ、温度依存的にヘスペリジンの溶解量が向上した（図4）。次に抽出時間による影響を検討した結果、オートクレーブ加熱の場合、加熱時間が20分までは抽出率が向上し、その後は抽出率に変化はなかった（図5）。

以上のとおり、ヘスペリジンの溶解には加熱温度と加熱時間が関係することが分かったが、ヘスペリジンの量が多いほど、必要となる溶解熱のエネルギーも大きくなると推察される。そこで、オートクレーブ抽出において、水に対する最適なミカン発酵茶葉の割合を検討した結果を図6に示す。茶葉の割合が多いほど、抽出量は増加するものの、水に対するミカン発酵茶葉の割合が1.0%以下だと、8～9割のヘスペリジンが水に溶解するが、2.0%になると半分程度しかヘスペリジンは抽出されず、ミカン発酵茶葉の割合が増えるほどヘスペリジンの抽出率が低下した。前報において、オートクレーブと同じく加圧加熱が可能な機器である、レトルト装置や大型の加圧釜においても同様の傾向にあったことから、120℃程度の熱エネルギーでヘスペリジンを最大限可溶化する場合、水に対するミカン発酵茶葉の上限は1.0%程度が妥当であることが分かった。なお、ヘスペリジンを最大限溶解させた抽出液を原料に、スプレードライヤーで乾燥粉末にしたエキス粉末の溶け残りは少なかった。

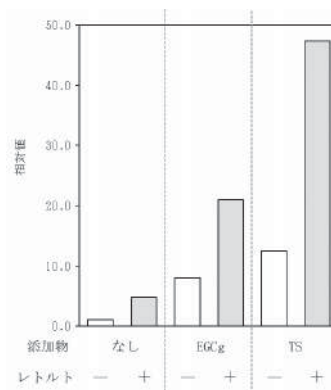


図3 EGCgとTS存在下におけるレトルトの有無の違いによるヘスペリジン溶解度の相対値

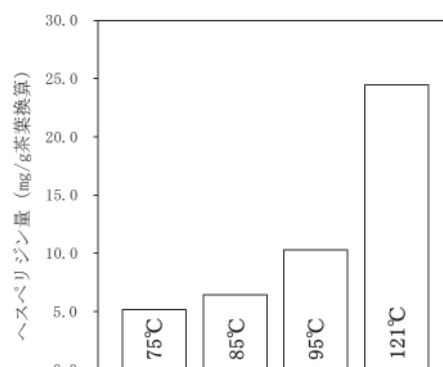


図4 抽出温度の違いによるヘスペリジン溶出量

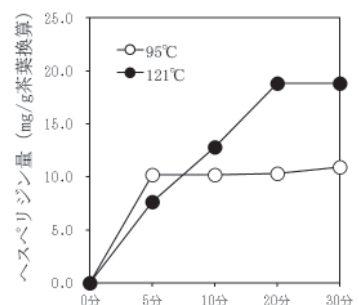


図5 抽出温度と抽出時間の違いによるヘスペリジン溶出量

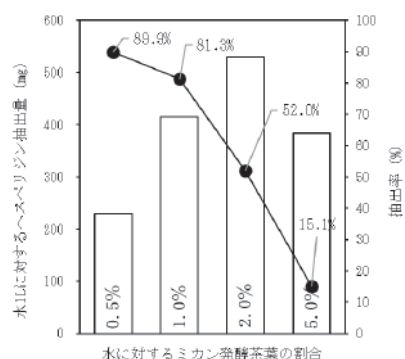


図6 水に対するミカン発酵茶の割合の違いによるヘスペリジンの抽出量と抽出率

2. 4 ヒトにおける認知機能維持・改善効果

中高齢者を対象に、ミカン発酵茶の 12 週間摂取が認知機能に及ぼす影響について検討した。

ヒト試験は、長崎県立大学一般研究倫理委員会の審査および承認を受けたうえで実施した。被験者の選択基準は、①60 歳以上 90 歳未満の男女、②認知機能の衰えを自覚している者、③試験期間中の暴飲暴食を控えることが可能な者、④試験の目的・内容について十分な説明を受け、同意能力があり、よく理解した上で自発的に参加を志願し、書面で試験参加に同意した者とした。また、被験者の除外基準は、①認知症と診断された者、②重度の脳神経疾患・精神疾患や内臓疾患の既往歴のある者、③試験期間中に紅茶や緑茶の多量摂取を止めることができない者、④紅茶あるいは緑茶にアレルギー症状を起こす恐れのある者、⑤他の食品の摂取や薬剤を使用する臨床試験、化粧品および薬剤などを塗布する臨床試験に参加中の者、参加の意思がある者、⑥カフェインを摂取することにより体調不良を起こす者、⑦アルコール依存者、⑧事前に行なわれる試験の説明に対し、その趣旨に賛同できない者、⑨その他、試験担当医師が被験者として不適当と判断した者とした。被験者には毎日の体調変化、有害事象の有無、表 4 に示す被験食品摂取の有無および医薬品等服用の有無を、試験開始から終了まで、被験者日誌に記載させた。

表 4 試験食品の詳細

	プラセボ食品	試験食品
ミカン発酵茶葉 (g)	— ^x	0.89
乳糖 (g)	0.86	—
デキストリン (g)	0.28	0.29
プルラン (g)	0.02	0.02
カラメル色素 (g)	0.04	—
合計 (g)	1.20	1.20
うち ヘスペリジン量 (mg)	検出限界未満	36.7

^x — : 配合していない

試験はランダム化二重盲検プラセボ対照並行群間比較試験で実施した。本試験に先立ち、認知機能スコアを評価する Japanese version of Montreal Cognitive Assessment (MoCA-J) を実施し、年齢、MoCA-J スコアを考慮して、被験者を試験食品群 22 名とプラセボ食品群 21 名に割り付けた。被験者の背景を表 5 に示す。群分け後の試験対象からの辞退者およびデータの欠損した者はいなかった。被験者には、試験食品ある

いはプラセボ食品 1 日 1 包を湯あるいは水に混ぜて夕食時に 12 週間摂取させるとともに、試験食品あるいはプラセボ食品を摂取することを除いて、それまでの日常生活を変えないように指導した。摂取開始日、摂取 6 週間および 12 週後の計 3 回、Trail Making Test 日本版 (TMT-J) 検査を実施し、併せて被験者に対して有害事象の確認を行った。

表 5 被験者の背景

	プラセボ食品 (n=21)	試験食品 (n=22)
男/女 (人)	4/17	8/14
年齢 (歳)	70.6 ± 6.7	67.8 ± 5.6
MoCA-J (点)	26.4 ± 0.6	26.5 ± 0.6

TMT-J は、紙にランダムに書かれた 1～26 の数字を順番通りにできるだけ早く正確に線で結んでいく検査方法で、被験者には TMT-J の課題遂行中は紙を動かさないこと、鉛筆を紙から離さないことを指示し、課題遂行時間、間違った回数 (誤反応回数) および紙から鉛筆を離した回数 (鉛筆離し回数) を記録した。TMT-J の課題遂行時間変化量の推移を図 7 に示す。摂取 6 週間および 12 週後の課題遂行時間を摂取開始日 (0 週) に対する変化量で算出したところ、摂取 12 週後で試験食品群はプラセボ食品群より有意に低値を示した。

誤反応回数に関しては、有意な変動および各測定時における群間での差は認められなかった (表 6)。鉛筆離し回数については、プラセボ食品群および試験食品群とも経時的に減少する傾向にあったが、0 週との間に差はなかった。また、いずれの測定時に関しても群間で差は認められなかった (表 7)。

以上のことから、TMT-J は、幅広い注意、空間的探索、処理速度、衝動性などを総合的に測定でき、とりわけ注意力や作業記憶の評価に特化した検査である^[8]。試験食品の摂取で、TMT-J の課題遂行時間が摂取 12 週後に短縮したことから、ミカン発酵茶の長期摂取は認知機能の一部である注意力と作業記憶を改善することが明らかとなった。

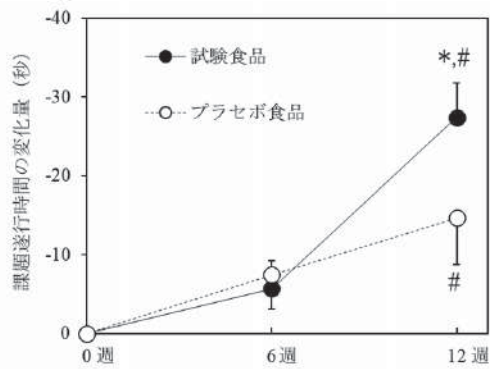


図7 課題遂行時間変化量の推移

* $p < 0.05$ (プラセボ食品と比較して有意差あり)

$p < 0.05$ (0週と比較して有意差あり)

表6 誤反応回数の推移 (単位: 回)

群	摂取開始日	摂取6週後	摂取12週後
プラセボ食品	0.10±0.07	0.14±0.08	0.05±0.05
試験食品	0.09±0.06	0.09±0.06	0.00±0.00

表7 鉛筆離し回数の推移 (単位: 回)

群	摂取開始日	摂取6週後	摂取12週後
プラセボ食品	1.71±0.66	1.10±0.46	0.86±0.57
試験食品	1.27±0.38	0.86±0.28	0.45±0.17

3. 結言

ミカン発酵茶の原料として摘果ミカンを利用しているが、生理落果実やミカン果皮も原料として適しているか、ミカン発酵茶に含まれるヘスペリジンを効率的に抽出できる条件、ミカン発酵茶に含まれるヘスペリジンがヒトにおいて、認知機能維持・改善効果があるか、これらについて検討を行った。

ミカン発酵茶の製造現場では、摘果果実と茶葉の揉捻時間を20分としているが、生理落果果実の場合は、約5分でカテキン類が同程度減少することから、生理落果果実を発酵茶の原料に用いることで、揉捻時間を約15分短縮できるとともに生理落果果実は、収量こそ低いものの、ヘスペリジン量は多く含まれていることが明らかになった。

ミカン果皮をミカン発酵茶の原料として用いる場合は、機能性食品としての利用は難しいが、品質面からミカンの香りが強い発酵茶が製造できることが判明した。

120℃程度の熱エネルギーでヘスペリジンを最大限

可溶化する場合、水に対するミカン発酵茶葉の上限は1.0%程度が妥当であり、この溶液を噴霧乾燥などを用いてエキシ化粉末にすることが妥当と考えられた。

ミカン発酵茶を12週間、継続摂取することにより、TMT-Jの遂行時間が短縮したことから、ミカン発酵茶は、認知機能の一部である注意力と作業記憶を改善することが明らかとなった。

参考文献

- [1] Jung UJ, Lee MK, Park YB, Kang MA, Choi MS, Effect of citrus flavonoids on lipid metabolism and glucose-regulating enzyme mRNA levels in type-2 diabetic mice, *Int J Biochem Cell Biol*, 38, pp. 1400-1403, 2006.
- [2] Yamada M, Tanabe F, Arai N, Mitsuzumi H, Miwa Y, Kubota M, et al, Bioavailability of glucosyl hesperidin in rats, *Biosci Biotechnol Biochem*, 70, pp. 1386-1394, 2006.
- [3] 中山久之、田中隆、宮田裕次、齋藤 義紀、松井利郎、荒牧貞幸ほか：ミカン未熟果と緑茶三番茶葉を混合して製造した可溶性ヘスペリジン含有発酵茶の開発、*日本栄養・食糧学会誌*, 67, pp. 95-103, 2014.
- [4] 尾形凡生、藤田博之、塩崎修志、堀内昭作、河瀬憲次、加藤 彰宏：AVG によるウンシュウミカン生理落果の制御、*園芸学雑誌*, 66, pp. 235-244, 1997.
- [5] 総務省統計局、高齢者の人口、<https://www.stat.go.jp/data/topics/topi1291.html>, Accessed 2022.
- [6] Franceschi M, Alberoni M, Bressi S, Canal N, Comi G, Fazio F, et al, Correlations between cognitive impairment, middle cerebral artery flow velocity and cortical glucose metabolism in the early phase of Alzheimer's disease, *Dementia*, 6, pp. 32-38, 1995.
- [7] 中山久之、宮田裕次、藤井信哉、山本咲暁子、大曲勝久、吉野豊ほか：熟ミカンと茶葉を混合揉捻して製造した発酵茶葉由来ヘスペリジン摂取が冷え、肩のこり、疲労感および睡眠の質に及ぼす影響、*薬理と治療*, 47, pp. 1471-81, 2019.
- [8] 広田千賀、渡辺美鈴、谷本芳美、河野令、樋口由美、河野公一：地域高齢者を対象とした Trail Making Test の意義、*日老医誌*, 45, pp. 647-654, 2008.

スマート工場実現のための作業工程監視装置の開発

(DX実現のためのIoTとAI技術を用いた製造業支援)

基盤技術部長 兼 機械システム科長 田 口 喜 祥

製造業での DX (Digital Transformation) 推進が求められている。DX の最初の取り組みとして、IoT (Internet of Things) 技術を用いて機械装置の稼働監視に取り組むことが多い。そのため、長崎県工業技術センターでは、工程の見直しや不具合発生時の迅速な対応、生産性向上のための改善データ収集を行うことを目的として IoT 機器の開発支援を実施している。近年では、IoT 技術により収集したデータを AI (Artificial Intelligence) 技術で解析することで、故障の予兆解析なども行われるようになってきおり、AI 技術に関する相談も増えている。

本研究開発では、IoT 技術と AI 技術を用いて、工場内で稼働している機械装置の稼働状況を取集し解析することで、作業工程の進捗状態を監視する装置を開発することを目的とする。

1. 緒言

製造現場で生産効率を上げるために DX 推進が求められている。DX 推進のため様々な取り組みがなされているが、県内企業からは生産設備の稼働状況の監視を行いたいとの相談が多い。

一方、近年 AI を用いた研究が注目されており、画像処理技術などを中心に様々な分野で応用研究の報告がなされている。AI 技術を活用するためには、事前に数多くの学習用データを収集することが必要となるが、IoT 技術を用いることでデータ収集が容易となるため、収集したデータを AI 技術で解析することで、様々な用途への応用展開が期待されている^[1-2]。

生産現場からは、製造に使用する機械装置の稼働時間や、製造がどの工程まで進んでいるかに関するデータを収集したいとの要望がある。作業工程の監視が IoT や AI 技術を用いて実施可能となれば、工程を自動的に監視可能なスマート工場を構築でき、製造業の DX 化支援につながると考えられる。

そこで、本研究開発では、これまで監視することが難しかった、作業者が直接操作を行うグラインダーや電気ドリルに代表される手持ち電動工具などの小型機械装置を対象として、電流波形の特徴から対象を認識し、稼働状況を取得する装置を開発し、作業工程の監視を行うことを目的とする。

2. 電流波形の収集

開発する作業工程監視装置の構成を図 1 に示す。作業工程を監視するためには、どのような機械装置が稼働中であるか認識し、自動的に記録する必要がある。そこで、消費電流の特徴から稼働している電動工具や機械装置を推定する AI を搭載した監視モジュールを開発する。現在、テーブルタップを流れる電流と機械

装置の消費電流を自動収集する IoT 装置を製作し、電流データの収集を実施している。

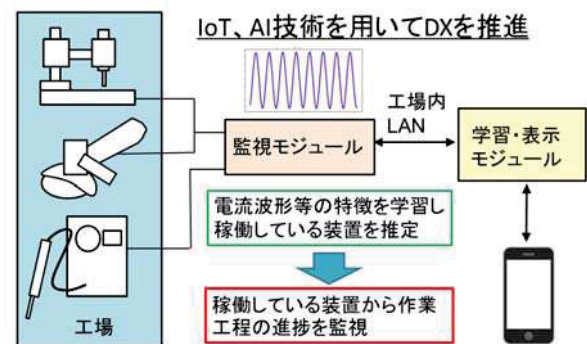


図 1 システム構成

電流データの収集は、電流センサと ESP32 マイコンボードを用いて製作した電流計測用マイコンボードにより実施している。電流データを収集中の電流計測用マイコンボードの写真を図 2 に示す。ここでは、テーブルタップ根本の電流 1 か所と、そのテーブルタップに接続されている 3 台の機器の電流を 1 分ごとに収集し、記録用サーバに送信している。



図 2 電流計測用マイコンボード

収集した電流波形データを確認するために、収集データ確認プログラムを製作した。収集データ確認プログラム動作中の画面を図3に示す。この画面の一番上の波形がテーブルタップ根本の電流波形であり、2番目から4番目までの波形がテーブルタップに取り付けられている機器の電流波形である。テーブルタップ根本の波形が、各テーブルタップの波形を加算した波形となっていることが確認できる。なお、それぞれの電流計測用マイコンボードは、同期してデータ収集を行っていることに注意を要する。

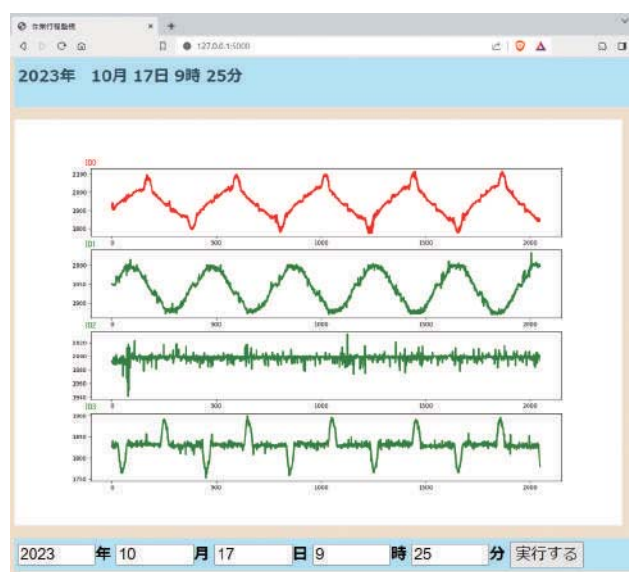


図3 収集データ確認プログラム

3. 監視モジュール

電流波形データを基に稼働している装置を推定する監視モジュールを開発するために、使用するマイコンボードの選定を行った。これまでの研究では、AI 処理を行うために Raspberry Pi、LattePanda、Jetson nano などのマイコンボードを使用していた^[3]。しかし、これらのマイコンボードはLinux やWindows などのOSを用いて作動させることを前提としたマイコンボードであり、プログラム単体でのリアルタイム処理が難しい。また、シャットダウン操作を行わずに電源を切ると不具合が発生するなどの問題点があった。

そこで、監視モジュールの開発は、AI 処理をソニー株式会社の Neural Network Console^[4]を使用することを前提とし、AI 処理もマイコンボード単体で実現することを目指してソニー株式会社の SPRESENSE^[5]を用いることとした。

SPRESENSEマイコンボードを用いて試作した監視モジュールの写真を図4に示す。



図4 監視モジュール

試作した監視モジュールは、電流データの収集に用いている電流計測用マイコンボードと同じ回路構成として製作し、電流データの AI 処理を行うことで作業工程の監視を行うこととした。

4. 結言

工場内で稼働している機械装置を推定し、作業工程の進捗状態を解析し監視する装置を開発するために、電流データから稼働中の装置を推定することを特徴とする作業工程監視装置を開発している。令和5年度は、電流データから稼働装置を推定するために必要な電流データの収集および監視モジュールのハードウェアに関する検討を行い、ソニー株式会社製の SPRESENSE を用いた監視モジュールを試作した。今後、試作した監視モジュールを用いて、電流波形の特徴から稼働中の機器を推定し、機器ごとの稼働状況を出力することによる作業工程を監視する装置開発を実施したい。

参考文献

- [1] 成瀬：AI 活用が期待される工場の IoT 化、日本総研経済 Research Focus No. 2019-032, pp. 1-7, 2019-11.
- [2] 小川、永井：IoT 等の進展が与える情報システムへの影響に関する研究、産業経済研究所紀要、第27号、pp. 27-88, 2017-7.
- [3] 田口、久保田：AI を用いた監視装置の開発、長崎県工業技術センター研究報告、No51, pp. 10-15, 2022.
- [4] <https://developer.sony.com/ja/spresense/>, accessed 2022.
- [5] 太田：SPRESENSE ではじめるローパワーエッジ AI, ISBN:4873119677, 2022.

ディープラーニングを活用したロボット制御における安定性向上の研究

機械システム科 専門研究員 堀 江 貴 雄

近年、ディープラーニングの活用は画像判別などにとどまらず、ロボット制御等などにも応用されている。しかしながら、ニューラルネットによる直接的な制御手法では、特定条件で誤動作することが問題とされている。

そこで、本研究ではアーム搭載のメカナム移動ロボットを課題として、安定して自律制御することを目的とした。アーム制御と移動制御を組み合わせた複雑な制御を、end-to-end 学習で安定的に制御することを目標とする。これまでに実験用のアーム試作と、データセット設計、同時制御用ネットワークの設計と学習を行った。今年度はネットワークの改良のため、異なるアーキテクチャを適用したネットワークを複数試し精度比較を行い、最適なネットワークを模索した。

1. 緒言

近年では深層学習は、機械制御への応用事例も多く報告されるようになった。そのひとつに自動走行の研究がある。

これまでにロボットの屋内移動の自律移動を目的に、筆者は、カラー画像、深度画像、方位データ、目的地番号、ルート選択番号の各5時刻分を入力すると、車両速度、平行移動方向、回転速度を出力するニューラルネットワークを設計した。さらに未学習環境を検出し、安全に停止させるために、カラー画像から深度画像を推定する Autoencoder を設計し、一定の閾値によって未学習環境を検出して強制停止させる手法も確立した^[1-3]。これに加えてエレベータを用いたフロア階間移動を実現するため、エレベータボタンを操作可能なアームを試作し、車両とアームの制御パラメータを同時推定可能なネットワークを実現した^[4]。本稿ではこのネットワークをさらに改良するため、複数のアーキテクチャを適用したネットワークを試作、性能比較を行い最適なネットワークを模索した。

ITX 規格の PC を搭載した。

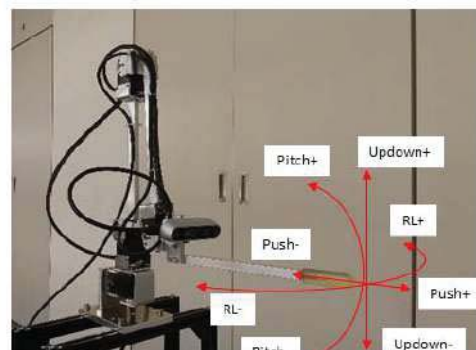


図1 ハンドアイ

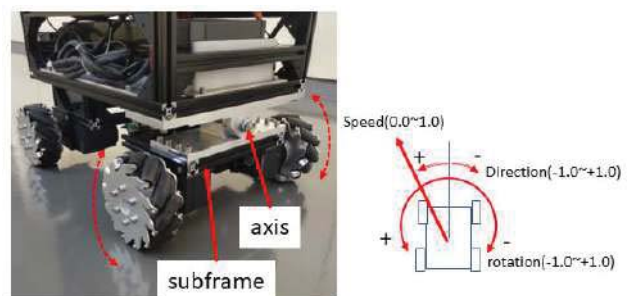


図2 メカナム駆動

2. システム構成

2.1 ハンドアイ搭載全方向移動ロボット

制御対象のロボットは、エレベータボタンを操作するための4自由度アームのハンドアイを上部に搭載している(図1)。また全方向移動のためにメカナムホイールを有している(図2)。このロボットの全体像を図3に示す。アーム制御用のカラー画像、深度画像撮影用に Intel 社 RealSenseD435、車両制御用のカラー画像、深度画像撮影用に Intel 製 RealSenseD455 センサ、磁気センサとして WitMotion 製 HWT905、モータ同期制御用のマイコンボードに Arduino Uno、ニューラルネット推論および制御プログラム実行用に

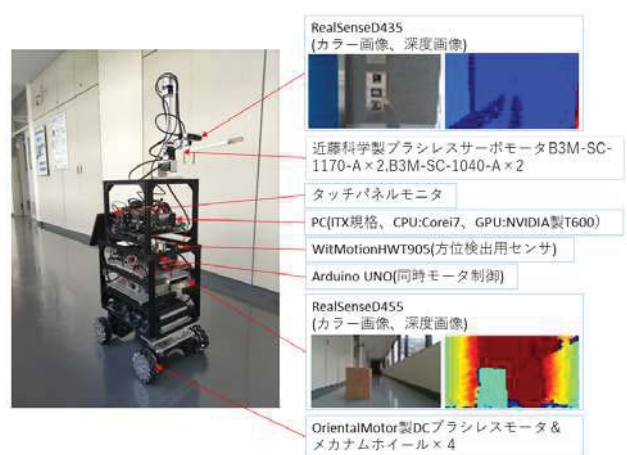


図3 ハンドアイ搭載全方向移動ロボット

2. 2 操作系

台車とアームの協調動作操作を手動で行い、データセットを生成するため、ゲームパッドを使用する。使用するゲームパッドには多数のボタンが用意されており、特に2つのスティックは操作性の観点から有用であるが、台車とアームを同時制御するには自由度が足りない。

右トリガーボタンを、「車両・アーム切り替え」とし、2つのスティックに割り当てるパラメータを切り替えることで、解決した（表1）。

表1 ゲームパッド入力と制御パラメータの割り当て関係

	右トリガー-off (車両制御モード)	右トリガー-on (アーム制御モード)
左スティック 上下	前後平行移動 (directionY)と 車両速度(speedY)	アーム上下(updown)
左スティック 左右	左右平行移動 (directionX)と 車両速度(speedX)	アーム左右回転(RL)
左十字キー (上、左、右)	なし	アーム基本姿勢(pos) (正面、左、右)
右スティック 上下	なし	アーム押し引き(push)
右スティック 左右	車両回転方向と回転速度(rotation)	なし
右ショルダー	なし	アーム俯角増(angle-)
左ショルダー	なし	アーム仰角増(angle+)
A ボタン	強制データ記録	強制データ記録

3. ネットワーク

3. 1 データセット

屋内実環境でフロア間を移動させることを目的に、ロボットアームとメカナム台車の同時制御を実現するため、車両カラー画像、車両深度画像、アームカラー画像、アーム深度画像、方位センサデータ、ゴール番号、ルート番号から動作を推定するネットワークを学習させるデータセットを設計した（表2）。

表2 車両、アーム同時制御用データセット

Input	Output
車両カラー画像(3×45×80)×5(5時刻分)	車両速度 speed(1)
車両深度画像(3×45×80)×5	車両平行移動方向 direction(1)
アームカラー画像(3×45×80)×5	車両回転速度 rotation(-1~1)
アーム深度画像(3×45×80)×5	アーム push(1)
磁気センサ X(1)×5	アーム up and down(1)
磁気センサ Y(1)×5	アーム RL(1)
地点番号(9)	アーム angle(1)
ルート選択番号(1)	アーム基本姿勢 arm position(4)
	車両、アーム制御選択 mode(1)

3. 2 ネットワーク設計

Otsuboらは、小型2輪移動ロボットによる模型道路内の走行を対象に、運転者が得る視覚情報とそのときの運転操作の関係を畳み込みオートエンコーダ等複数ネットワークを用いて学習するモデルを提案している[5]。学習済みモデルは模型の道路環境下を複数ルートで自動走行可能としており、この手法の有効性を示した。

筆者はこれまでの研究[1-4]で、5時刻分のカラー画像、深度画像と方位センサデータ、ゴール番号、ルート番号から車両制御用パラメータを推定するニューラルネットワークを実現している。このネットワークをベースにいくつかの改良を実施した。

カラー画像特徴抽出のために設計した Image Convolution Unit は、これまで ResNet ブロック[6]9 つで構成していたが、新たに、Attention 機構の一種である SE ブロック[7]を追加した（図4）。

同様に深度画像特徴抽出のために設計された Depth Image Convolution Unit についても、ResNet ブロック5つと SE ブロック1つを用いたユニットに改良した（図5）。

過去に報告されたネットワークでは、これらユニットの計算結果を RNN ブロック[8]で集約したのち、次時刻の RNN ブロックに送る処理を時刻データごとに繰り返えし、車両速度、車両平行移動方向、車両回転速度をそれぞれ推定した。ここに Skip 機構を導入する。すなわち、現時刻 T の計算部入力に1時刻前(T-1)から4時刻前(T-4)の計算結果である4つの隠れベクトルを、RNN ブロックに向かう経路とは別に、連結した。設計した車両制御パラメータ推定用ネットワーク (Vehicle Control Unit) を図6に示す。

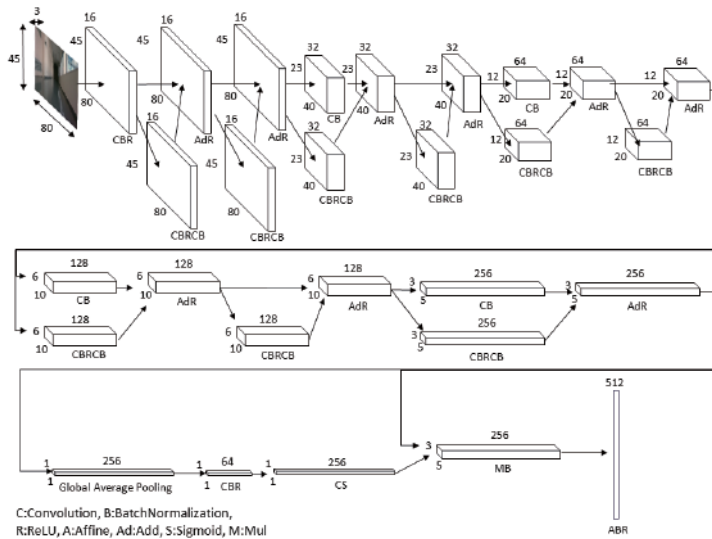


図4 Image Convolution Unit

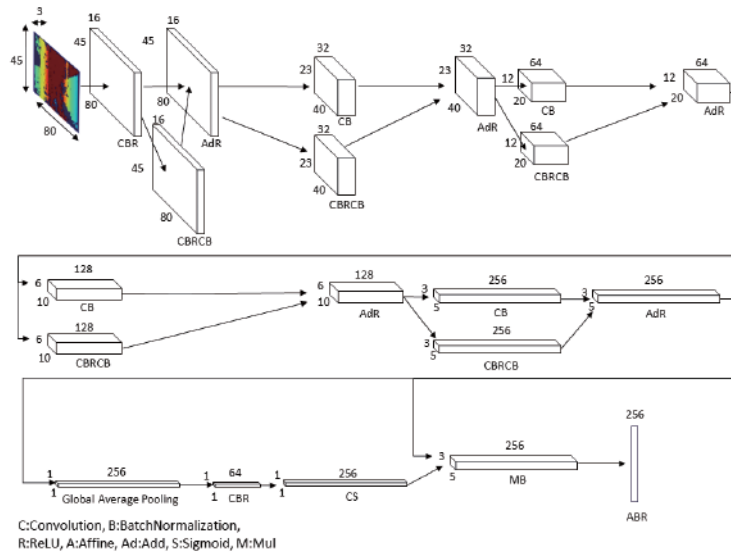


図5 Depth Image Convolution Unit

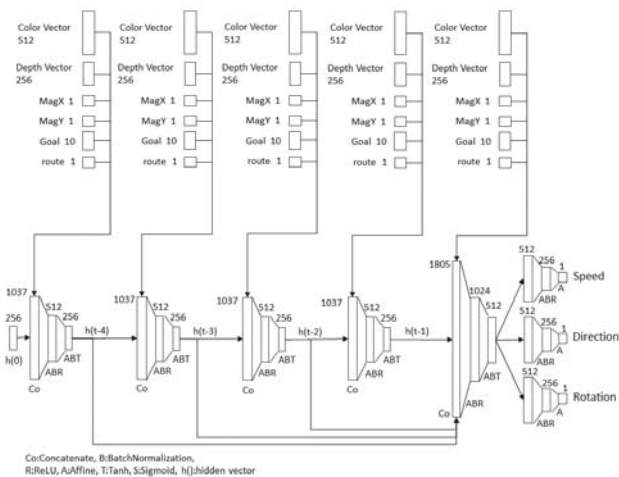


図6 Vehicle Control Unit

アーム制御パラメータを推定するために、Vehicle Control Unitベースで、最終出力のみ3つから4つに変更したネットワーク（Arm Control Unit）を設計した（図7）。

Arm Control Unit の入力値はVehicle Control Unitと同様に、アームカラー画像、アーム深度画像、磁気センサ値、地点番号、ルート番号とした。

カラー画像の処理はVehicle Control Unitと同じ設計のImage Convolution Unit、深度画像にはDepth Image Convolution Unitを用いた。

これまでの研究から、アームの基本姿勢推定、車両とアームの制御モード選択推定は、Vehicle Control UnitおよびArm Control Unitの各時刻ベクトルとは

別に計算することが有効である。

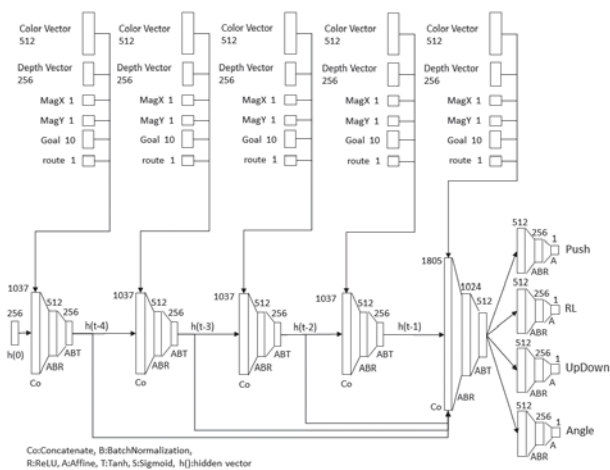


図7 Arm Control Unit

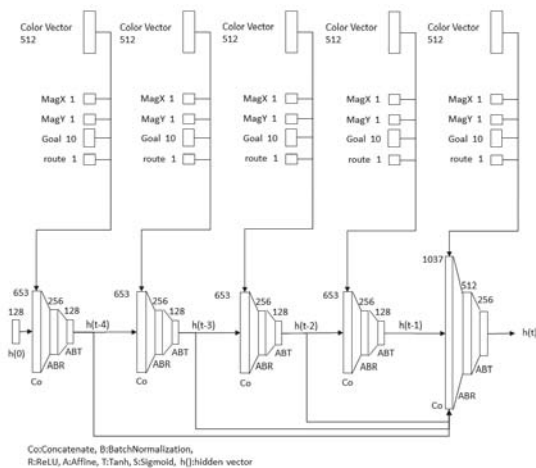


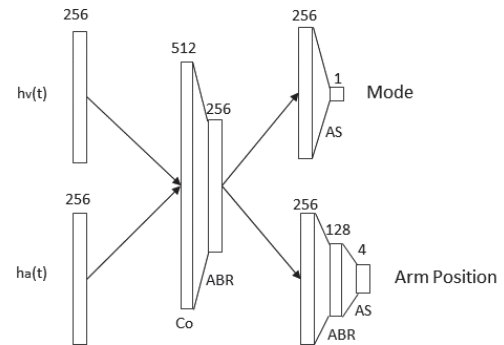
図8 Situation Unit

また、この2つの推定においては深度画像を用いずとも可能であることが実験により判明した。そこで Image Convolution Unit の出力ベクトルと、磁気センサ値、ゴール番号、ルート番号をそれぞれ5時刻分使用しベクトルを得るネットワーク (Situation Unit) を設計した (図8)。

さらにこのネットワークで得られた車両状態ベクトル h_v とアーム状態ベクトル h_a を結合し、アームの基本ポジション (Arm Position) 推定、車両とアームの制御モード (mode) 推定をおこなう。このネットワーク (PM Select Unit) を図9に示す。

また、未学習環境における安全停止機能のために開発した PTD Autoencoder^[1]を追加した。これは RealSense D455 のカラー画像から深度画像を生成する Autoencoder であり、生成した推定深度画像と D455 センサで取得した深度画像のピクセル値差分を

合計し、出力する。



Co:Concatenate, B:BatchNormalization, R:ReLU, A:Affine, T:Tanh, S:Sigmoid, h:hidden vector

図9 PM Select Unit

後述するクライアントスレッドでは、この値を評価し、閾値以上の場合にはロボットの制御値をすべて0として強制停止する。PTD Autoencoder で深度画像を推定した事例を図10に示す。

	Color image (sensor_data)	Depth image (sensor_data)	Estimated depth image
Trained environment			
Untrained environment			

図10 PTD Autoencoder の出力事例

これら Image Convolution Unit、Depth Image Convolution Unit、Vehicle Control Unit、Arm Control Unit、Situation Unit、PM Select Unit、PTD Autoencoder を適用して設計した車両、アームの統合ニューラルネットワークを図11に示す。

設計したニューラルネットは Python サーバー上で実行し、タッチパネルを含むインタフェースと、RealSense センサ以外のデバイスは、C#クライアントで制御するようロボット内蔵 PC に実装した。なお、制御周期は6～7 Hz を維持するよう調整した。

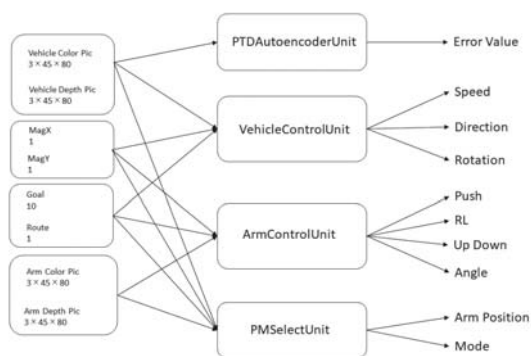


図1-1 統合ニューラルネットワーク

4. ネットワーク評価

4.1 データセット収集と学習

3階建て屋内6地点に0～5の番号を割り振り、ゲームパッドの手动操作によって各地点から他の地点への移動を網羅的に行い、データセットを収集する。地点0は2階の事務室中央、1、2は2階西棟の廊下の壁側、3は2階東棟廊下の壁側、4は3階廊下の壁側、5は1階ロビーに設定した(図1-2)。地点0、1、2、3と地点4、5間の階層間移動ではエレベータを使用するため、ボタン操作も行う。

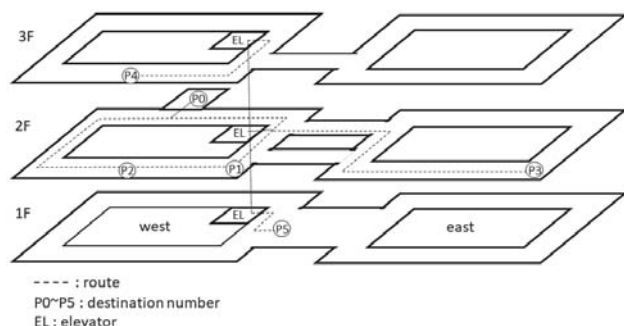


図1-2 走行ルート

ゲームパッド操作による手动操作により、各地点を往復するデータセットを合計279,000個(約12時間20分に相当)収集し、このデータセットを、Training用188,000個、Validation用63,000個、Test用28,000個に分割した。

ネットワークの改良が有効であるかを、4種のネットワークでそれぞれ学習後、比較する。Vehicle Control Unit、Arm Control Unit、Situation Unitそれぞれについて、各時刻の隠れベクトル出力以降の構造を変更し検証する。

具体的には現時刻データのみから制御パラメータを

推定するNormal、昨年度までに開発した5時刻データをRNNブロックを用いて推定するRNN、5時刻データのうち過去データ4時刻分のベクトルを現時刻処理部に入力するSkip、今回提案するRNN+Skipの4種である。学習はNVIDIA製TITAN RTXを搭載したPCを用いて、バッチサイズ192、最適化アルゴリズムAdamを使用し100epoch実施した。

学習後にTestデータを用いて推論した車両制御パラメータと教師データの散布図から求めた決定係数 R^2 を表3に示す。同様にアーム制御パラメータについて表4に示す。またアーム基本姿勢の教師データに対しての正解確率を表5に示す。車両制御とアーム制御のモード切替推定精度についても正解確率を表6に示す。

なお、表4のAngleと表5のPos=3については、本実験の走行においては、データセット中に含まれなかったため評価していない。また表中の各制御パラメータごとに推定精度が最も良いものを太字で表している。

表3 各モデルの車両制御パラメータ決定係数(R^2)

	Speed	Direction	Rotation
Normal	0.9335	0.5259	0.7094
RNN	0.964	0.7645	0.7668
Skip	0.9624	0.767	0.7797
RNN + Skip	0.9609	0.757	0.7686

表4 各モデルのアーム制御パラメータ決定係数(R^2)

	Push	RL	UpDown	Angle
Normal	0.3	0.5093	0.5550	N/A
RNN	0.6601	0.641	0.5258	N/A
Skip	0.6913	0.6155	0.5773	N/A
RNN + Skip	0.6961	0.644	0.5844	N/A

表5 各モデルのアーム基本姿勢(pos)推定精度(%)

	Pos=0 (stay)	Pos=1 (front)	Pos=2 (left)	Pos=3 (right)
Normal	99.53	48.76	66.2	N/A
RNN	99.51	69.69	82.87	N/A
Skip	99.57	69.69	79.16	N/A
RNN + Skip	99.50	72.72	83.79	N/A

表6 各モデルの制御モード切替(mode)推定精度(%)

	Mode
Normal	99.02
RNN	99.65
Skip	99.61
RNN + Skip	99.64

表3より、車両制御パラメータの推定では時系列データを計算する3モデル(RNN、Skip、RNN + Skip)間で大きな差はない。一方、表4と表5から、アーム制御パラメータの推定にはRNNブロックとSkipを併用したモデルが最も精度が高いことが分かる。また表6からは車両とアームの制御切り替えにはRNNブロックのみを使ったモデルが最も性能が高いことが分かる。

車両制御パラメータの推定では、5時刻分の情報を並列的にとらえること、アーム制御パラメータの推定では情報の時間変化と過去情報を並列的にとらえることの両方を考慮すること、制御モードの切り替えには情報の時間変化がより重要であることをそれぞれ示していると考ええる。

表3から表6までの結果から、アーム制御パラメータの推定精度は車両制御パラメータ推定精度と比べ全般的に低いことが分かる。したがってアーム制御の失敗がタスク失敗の主要因となる可能性が高く、アーム制御パラメータの推定モデル選択は車両制御パラメータよりも重要といえる。

昨年度までに開発したRNNモデルに比べて、RNNとSkipを併用したモデルは、アーム制御パラメータ推定においては最も性能が高く、他のパラメータについても遜色ない精度があり、本システムにおいては、このモデルが最も妥当であると判断した。

5. 結言

本研究では、アーム搭載移動ロボットのエレベータを使った階層間移動を模倣学習するため、まずアーム搭載移動ロボットを試作し、アーム及び車両を手動操作可能とした。次にエレベータ操作を含む階層間移動時のカメラ画像を含む各種センサデータの時系列データとその時の操作データを記録したデータセットを作成した。このデータセットを用いて、ResNetブロック、SEブロック、RNNブロック、Autoencoder、Skipコネクション等のアーキテクチャを活用したニューラ

ルネットを設計、学習し、推定精度の比較を行った結果、RNNとSkipを併用したモデルがもっとも妥当であることを確認した。

今後は引き続き、RNNの改良モデルであるGRUアーキテクチャや、Transformerに使用されているScaled Dot-Product Attentionアーキテクチャの適用を検討したい。またグリッパ付きアームを搭載した移動ロボットによるハンドリングを含む移動制御や、少ないデータセットで移動可能なモデルの構築、言語命令の活用および、動作安定性向上の手法についても検討していきたい。

参考文献

- [1] 堀江貴雄：Neural Network Consoleを使用したメカナム台車制御方法の開発、ロボティクス・メカトロニクス講演会2020, 1A1-G10, 2020.
- [2] 堀江貴雄：カラー画像と距離画像を用いた模倣学習によるメカナム台車の移動制御、第38回日本ロボット学会学術講演会、3A3-06, 2020.
- [3] 堀江貴雄：機械学習を用いたロボット関連製品の制御技術の開発、長崎県工業技術センター研究報告、No. 51, pp. 18-22, 2022.
- [4] 堀江貴雄：ディープラーニングを活用したロボット制御における安定性向上の研究、長崎県工業技術センター研究報告、No. 52, pp. 13-18, 2023.
- [5] Shun Otsubo, Yasutake Takahashi, Masaki Haruna, “Modular Neural Network for Learning Visual Features, Routes, and Operation Through Human Driving Data Toward Automatic Driving System,” <https://doi.org/10.20965/jaciii.2020.p0368>, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics Vol. 24 No. 3, 2020.
- [6] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun “Deep Residual Learning for Image Recognition”, <http://arxiv.org/abs/1512.03385>, 10 Dec 2015.
- [7] Jie Hu, Li Shen, Samuel Albanie, Gang Sun, Enhua Wu, “Squeeze-and-Excitation Networks”, <https://arxiv.org/abs/1709.01507>, 2017.
- [8] W. Zaremba, I. Sutskever, O. Vinyals, “Recurrent neural network regularization”, arXiv:1409.2329, 2015.

プラント増設業務における既存設備モデリングシステムの開発

機械システム科 主任研究員 小 楠 進 一

増設業務を行う際にプラントの図面が必要となるが、図面が現状のプラント形状を示していないことがたびたび起こる。測定工具を用いて寸法を測定し、作図することは手間なので、レーザースキャナーが販売されているが、高価であることなどの理由から県内企業に普及していない。そこで、本研究では、代替システムである「既存設備モデリングシステム」を開発し、これを評価した。さらに、増設モデルの寸法を調整する「ホログラム合わせ」を提案し、これを評価した。

1. 緒言

長崎県は、溶接・製缶を得意としており、プラントの増設業務を取り扱う企業が多い。増設業務を行う際にプラントの図面が必要となるが、増築や廃棄によって図面が現状のプラント形状を示していないことがたびたび起こる。このとき、スケールやノギスなどの測定工具を用いて寸法を測定し、作図するが、測定誤差が生じやすく、とても面倒な作業となる。

これらの問題を解決するため、設置した位置から長距離用レーザを周囲に飛ばしてプラント形状を測定するレーザースキャナーが販売されている。しかし、(a)死角が多い室内では、設置作業が増え手間になること、(b)高所や不安定な場所および狭所では、設置自体が難しいこと、(c)レーザースキャナーが高価であることなどの理由から、県内企業に普及していない。

そこで、本研究では、上記問題の解決に向けて、図1に示す「既存設備モデリングシステム」を開発した。既存設備モデリングシステムの「移動計測式スキャンシステム」では、測定範囲は狭いが安価な RGBD カメラを用いてプラント形状の一部を測定し、いくつかのプラント形状の一部を合成することで数十メートルのプラント形状を取得する。その後、MeshLab^[1]を用いて、数十メートルのプラント形状をスケール補正する。

また、既存設備モデリングシステムは、形状合成を使用するので、1ショットで測定するレーザースキャナーと比べて生成したプラント形状の誤差が大きい。そこで、MRを活用して「ホログラム合わせ」を行い、プラント形状を用いて作成した増設モデルの誤差を軽減することにした。なお、「ホログラム合わせ」については、以下の章で詳細を説明する。

本報では、試作した「既存設備モデリングシステム」の評価結果及び「ホログラム合わせ」の評価結果を報告する。

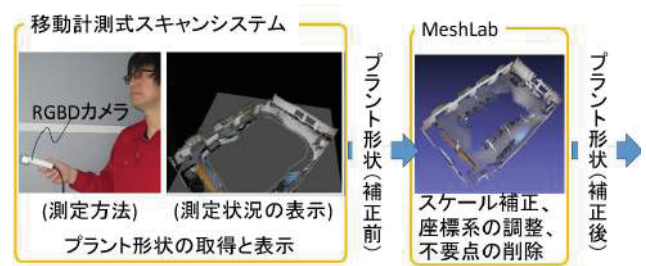


図1 既存設備モデリングシステム

2. 既存設備モデリングシステム

2. 1 移動計測式スキャンシステム

図2に試作した移動計測式スキャンシステムを示す。

3次元形状を測定する RGBD カメラとして、AzureKinectDK (ToF 法)、RealSenseD455 (アクティブステレオ法)、ZED2 (パッシブステレオ法) などが考えられるが、距離精度を求めて AzureKinectDK (ToF 法)を選択した。さらに、AzureKinectDKにおいて、長距離測定ができ、RGB カメラとのオーバーラップ性がよい N FoV モードを選択し、ノイズを減らすために2×2 ビニングを行うこととした。なお、2×2 ビニングとは、個々のピクセルで読み取るのではなく、隣接するピクセルを組み合わせることで一斉に読み取る手法であり、解像度を犠牲にしてノイズを減らす手法のことである。

また、形状合成ソフトウェアは、これまでに、Kinect for Windows SDK 2.0^[2]や PCL^[3]を活用し、ICP (Iterative Closest Point)^[4]による形状合成を行うものを試作してきた。しかし、幅7m×高さ2.6mの壁の測定において、合成結果が歪むことがあった^[5]。そこで、今回は、Qt^[6]やrtabmap^[7]などを活用し、グラフ最適化^[8]による形状合成を行うものを試作した。図3に試作した形状合成ソフトウェアのフローチャートを示す。



図2 移動計測式スキャンシステム

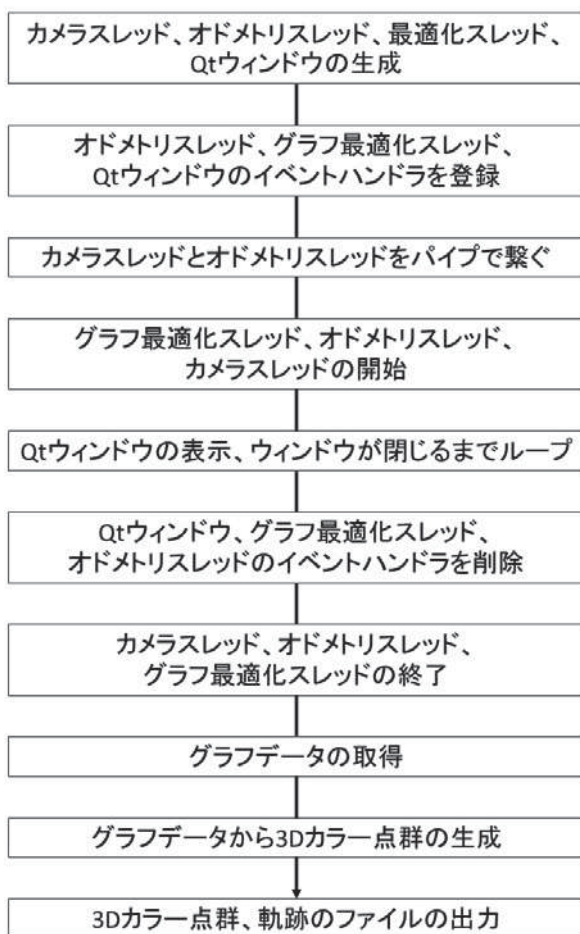


図3 形状合成ソフトウェアのフローチャート

2. 2 評価方法

移動計測式スキャンシステムを評価するため、図4に示す会議室に4枚の緑色のマーカーを貼り、移動計測式スキャンシステムを用いて会議室の形状を10回測定し、この結果から縦方向の2点間距離 H と横方向の2点間距離 W を抽出して、校正値とするレーザー距離計の結果と比較して測定誤差を算出した。

移動計測式スキャンシステムを用いた測定にあたっては、図5に示すとおり、RGBD カメラと PC を高さ 660 mm の台車にのせ、RGBD カメラを進行方向に対して斜め 45 度に向け、図6に示す移動経路を通して測定した。

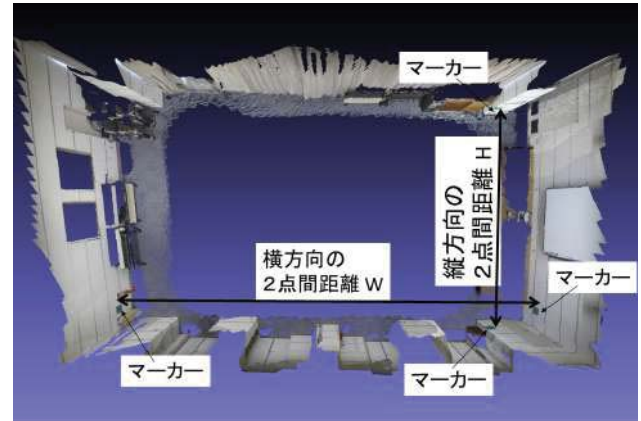


図4 移動計測式スキャンシステムが得た会議室の形状

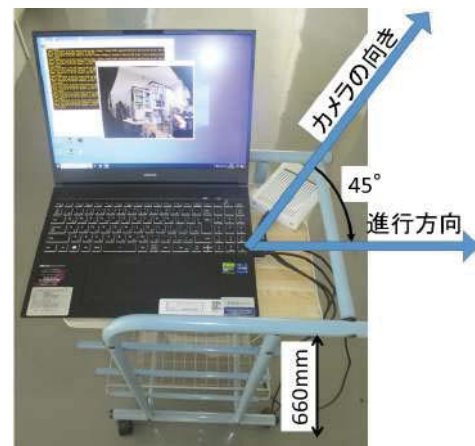


図5 カメラと PC を乗せた台車

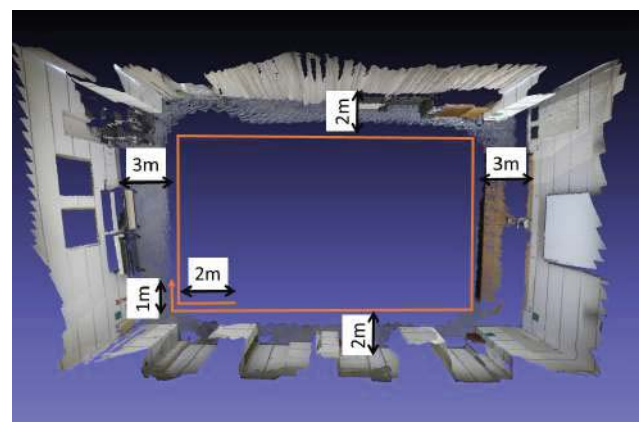


図6 台車の移動経路

なお、図6の左下の場所は、移動経路の始点と終点が重なるため、形状合成においてばらつきが大きく生じやすいと考えられる。そこで、横方向の2点間距離のばらつきを大きくするため、あえて横方向の2点間距離の1点をこの場所を選んだ。

また、既存設備モデリングシステムでは、図1に示すとおり、移動計測式スキャンシステムを用いてプラント形状を測定した後、MeshLabを用いてプラント形状のスケールを補正する。そこで、本研究では、既存設備モデリングシステムを評価するため、レーザー距離計で得た2点間距離を用いて、移動計測式スキャンシステムで得た会議室の形状をスケール補正し、スケール補正に使用していない2点間距離の測定誤差を取得した。

2.3 評価結果

移動計測式スキャンシステムを用いて、縦方向の2点間距離の測定誤差と横方向の2点間距離の測定誤差を取得した結果を図7に示す。縦方向の2点間距離の最大測定誤差は 306 mm であり、平均測定誤差は 273 mm であり、標準偏差は 24.5 mm であった。また、横方向の2点間距離の最大測定誤差は 577 mm であり、平均測定誤差は 463 mm であり、標準偏差は 50.9 mm であった。

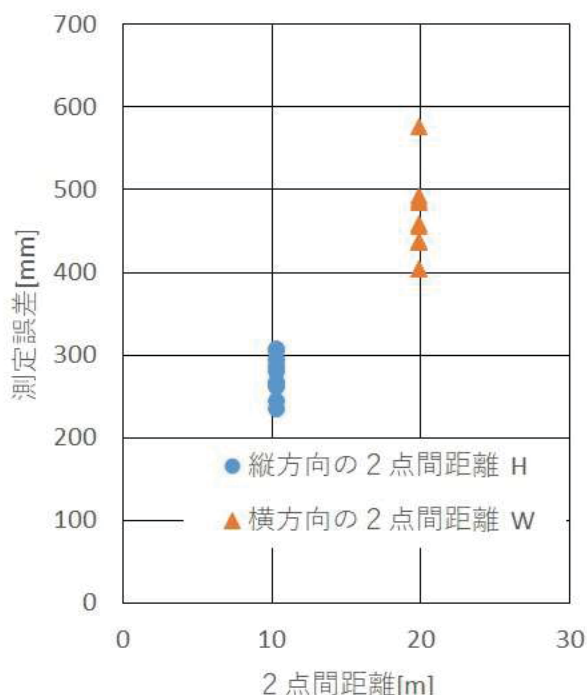


図7 移動計測式スキャンシステムの測定誤差

なお、レーザー距離計を用いて、縦方向の2点間距離 H と横方向の2点間距離 W を3回測定した結果、縦方向の2点間距離は $H=10.398 \pm 0.001$ m であり、横方向の2点間距離は $W=19.880 \pm 0.001$ m であった。

また、レーザー距離計で得た横方向の2点間距離を用いて移動計測式スキャンシステムで得た会議室の形状をスケール補正し、縦方向の2点間距離の測定誤差を取得した結果と、レーザー距離計で得た縦方向の2点間距離を用いて移動計測式スキャンシステムで得た会議室の形状をスケール補正し、横方向の2点間距離の測定誤差を取得した結果を図8に示す。

縦方向の2点間距離の最大測定誤差は 80.0 mm であり、平均測定誤差は 29.8 mm であり、標準偏差は 34.7 mm であった。また、横方向の2点間距離の最大測定誤差は -151 mm であり、平均測定誤差は -56.7 mm であり、標準偏差は 66.1 mm であった。

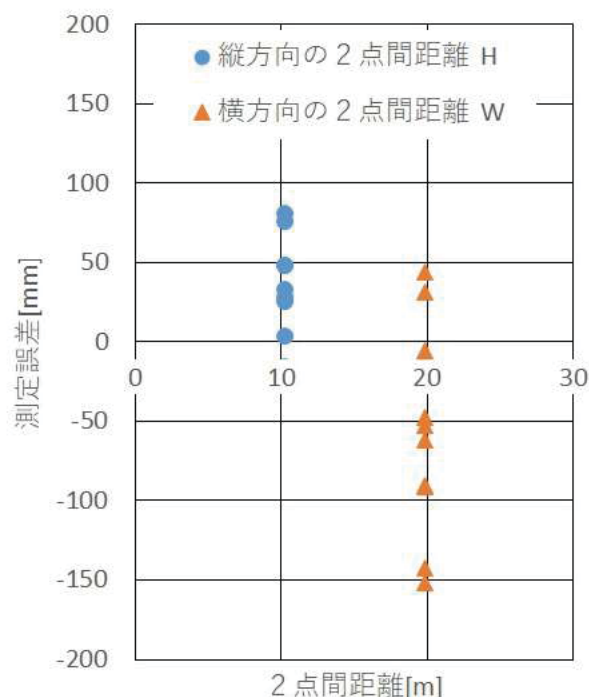


図8 既存設備モデリングシステムの測定誤差

2.4 RGBD カメラ

2.4.1 評価方法

RGBD カメラの選択と設定を評価するために、移動計測式スキャンシステムを用いて1ショットの測定を行い、JIS B7441 非接触座標測定機の受入検査及び定期検査に従って球間距離測定誤差を評価した。

評価に使用する球間距離測定用標準器は、直径 70 mm の鋼球を鉄板に接着することで作製し、球間距

離測定用標準器の校正值は、球間距離測定用標準器を十分に $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の測定室に置いたうえで、(株)ミットヨ製三次元測定機 LEGEX9106 を用いて3回測定して校正值とした。

また、移動計測式スキャナーを用いた球間距離測定の際も、球間距離測定用標準器を十分に $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の測定室に置き、球間距離測定用標準器に光沢消し用スプレーをかけ、測定を行った。

なお、RGBD カメラの測定位置は、図9に示す球間距離測定用標準器に対する角度 θ 、球間距離測定用標準器までの距離 D 、球間距離測定用標準器に対する高さ H を変え、8地点から測定を行った。これらの水準を表1に示す。

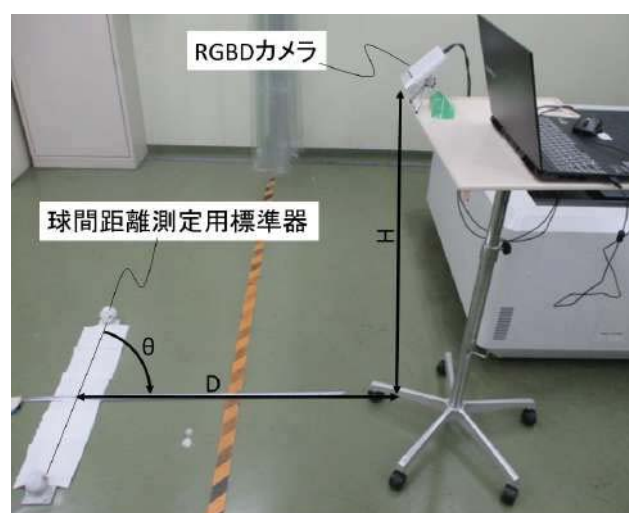


図9 RGBD カメラの測定位置を説明する図

表1 RGBD カメラの位置を示すパラメータ

項目	水準	
角度 θ [$^\circ$]	90	150
距離 D [mm]	500	1,000
高さ H [mm]	900	1,200

2. 4. 2 評価結果

JIS B7441 非接触座標測定機の受入検査及び定期検査に従って球間距離測定誤差を評価した結果を図10に示す。球間距離最大誤差は 7.123 mm であり、平均誤差は 5.492 mm であり、標準偏差は 1.075 mm であった。また、(株)ミットヨ製三次元測定機 LEGEX9106 を用いて得た球間距離測定用標準器の校正值は $830.535 \pm 0.001\text{mm}$ であった。

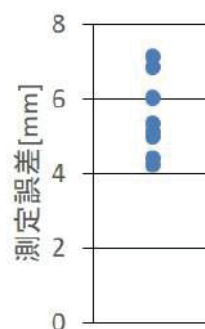


図10 RGBD カメラの評価結果

2. 5 考察

2. 3節では、スケール補正により縦方向の2点間距離の最大測定誤差を 73.8%、横方向の2点間距離の最大測定誤差を 73.8%小さくできた。スケール補正が有効に働くには、どの2点間距離も同様に拡大・縮小している必要があり、①距離精度を求めて AzureKinectDK (ToF 法) を選択し、ノイズを減らすために 2×2 ビニングを行ったので、2. 4. 2項に示すとおり、1ショットの測定バラつき (標準偏差) を 1.075 mm とかなり小さくできたこと、②グラフ最適化による合成を行ったので、空間的なバラつきを抑えられたことが、スケール補正が有効に働く原因になったと考えている。なお、 2×2 ビニングによるノイズの減少は、図11に示す金属円筒面の測定動画を目視評価したことにより確認できている。

なお、既存設備モデリングシステムの縦方向の2点間距離の測定精度が 0.800% であり、横方向の2点間距離の測定精度が 0.755% であるため、目標とする最低限の精度 1%以下を満たすことはできた。次章では、さらなる精度向上のため、「ホログラム合わせ」による増設モデルの調整を検討した。

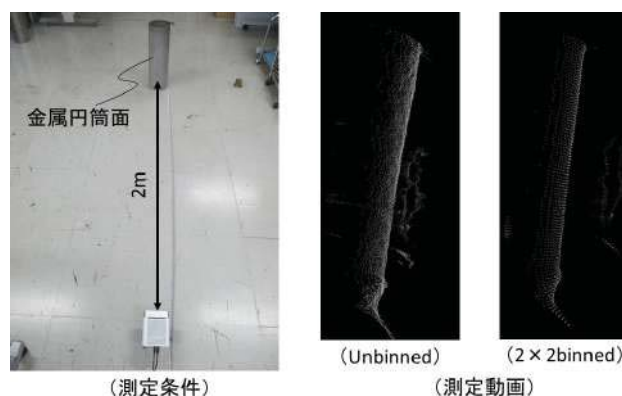


図11 2×2 ビニングの目視評価

3. ホログラム合わせ

3. 1 MRを活用したホログラム合わせとは

MRとは、Mixed Realityの略であり、MRゴーグルのディスプレイにホログラムを投影して現実空間上にホログラムを表示し、MRゴーグルが現実空間の手の動きや環境を認識して現実空間上のホログラムに影響を与える技術のことである。このMRは、様々な活用が検討されている^[9]。

本研究では、図12に示すとおり、このMRを活用して設計した増設モデルのホログラムを生成し、現実空間でこのホログラムを用いて嵌め合わせ等を行い、増設モデルの寸法を調整することを試みた。なお、この手法を「ホログラム合わせ」と呼ぶことにする。

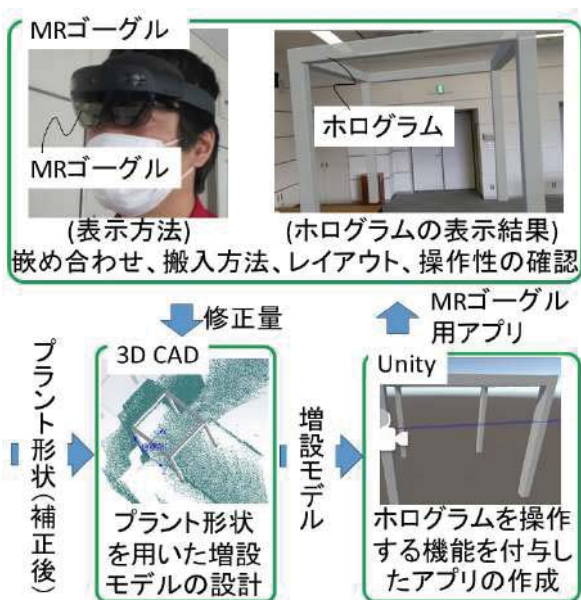


図12 ホログラム合わせ

3. 2 評価方法

「ホログラム合わせ」では、入力値どおりにホログラムを正確に表示することが課題となる。そこで、ホログラムの表示誤差を評価するために、図13に示す直方体のホログラムを表示するMRゴーグル用アプリを作成し、このMRゴーグル用アプリを用いて実空間に直方体のホログラムを表示して、メジャーでホログラムの長手方向の寸法を測定することにした。

なお、MRゴーグルは、マイクロソフトコーポレーション製Hololens2を使用し、作成したMRゴーグル用アプリは、長手方向の寸法(入力値)が5m、10m、20m、30mである直方体を表示し、観測者と同じ位置に直方体の端を配置し、観測者の前方に長手方向を

向けるアプリにした。

また、ホログラムの表示の際は、毎回、事前にMRゴーグルにおいて「近くのホログラムを削除」コマンドを用いて前回のホログラムを削除し、少し立ち位置を変えてホログラムを表示した。さらに、メジャーを用いた寸法測定の際は、自分に近い直方体の端にメジャーの0点を置き、もう片方の端まで移動した後、片目をつぶってメジャーの目盛りを読んだ。これらの作業を各直方体に対して13回ずつ行い、ホログラムの表示誤差を評価した。

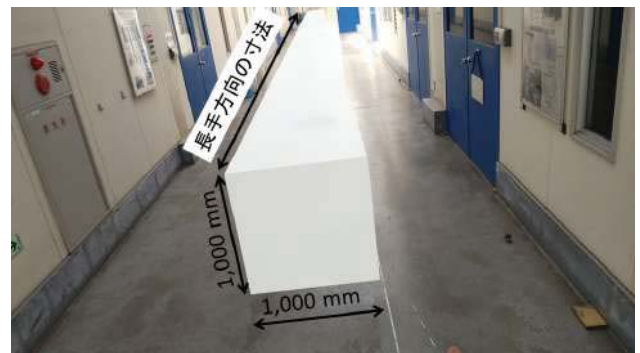


図13 直方体のホログラム

3. 3 評価結果

入力値に対するホログラムの表示誤差は、図14のとおりであった。なお、入力値5mの最大誤差は14mmであり、入力値10mの最大誤差は28mmであり、入力値20mの最大誤差は154mmであり、入力値30mの最大誤差は188mmであった。

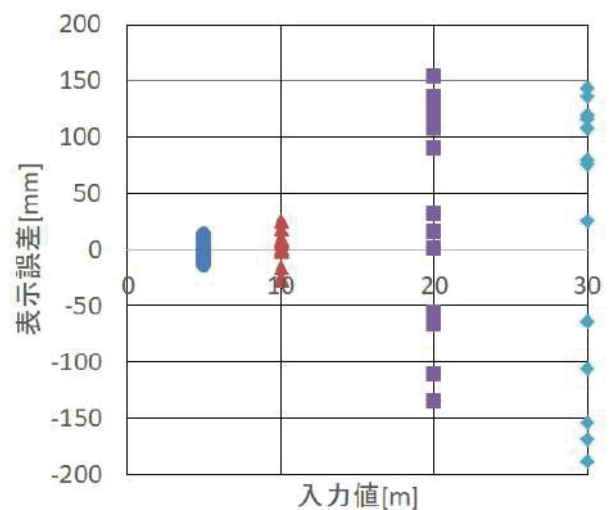


図14 ホログラムの表示誤差

3. 4 考察

3. 3節のホログラムの表示誤差の結果から、10 m の最大表示誤差は 28 mm であり、2. 3節の既存設備モデリングシステムの最大測定誤差が 80.0 mm であることから、10 m 以下の増設モデルに対してホログラム合わせは有効利用できると考えられるが、20 m の最大表示誤差は 154 mm と急激に大きくなっており、既存設備モデリングシステムの最大測定誤差が 151 mm であるため、20 m 以上の増設モデルに対してホログラム合わせは有効利用が難しいと考えられる。

また、一度ホログラムを測定し、この結果をもとに補正することが考えられるが、図14に示すとおり、20 m、30 m の表示誤差の平均値は0に近く、バラつきが大きいと、補正は難しいと考えられる。

4. 結言

本報では、試作した「既存設備モデリングシステム」を評価し、提案する「ホログラム合わせ」を評価した。この結果を以下にまとめる。

- ① RGBD カメラで得た形状をグラフ最適化によって合成し、この合成結果をリファレンスで補正する「既存設備モデリングシステム」を評価した。この結果、測定精度は0.800%であり、目標とする測定精度1%を満足することができた。
- ② 提案する「ホログラム合わせ」を評価した結果、10 m 以下のホログラムの場合、表示誤差は0.28%で「既存設備モデリングシステム」の測定精度より小さいため、「既存設備モデリングシステム」の後工程として「ホログラム合わせ」を活用できそうである。しかし、20 m 以上のホログラムの場合、表示誤差が0.77%と跳ね上がり、活用は難しい。
- ③ 今後は、開発したシステムを県内企業に提供し、各県内企業の事業に適用できるか実証試験を行う。

参考文献

- [1] <https://www.meshlab.net/>, Accessed 2023.
- [2] R. Newcombe, S. Izadi, O. Hilliges, D. Molyneaux, D. Kim, A. Davison, P. Kohli, J. Shotton, S. Hodges, A. Fitzgibbon, “KinectFusion: Real-Time Dense Surface Mapping and Tracking”, 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR 2011, Basel, Switzerland, October 26-29, 2011.
- [3] Radu Bogdan Rusu and Steve Cousins, “3D is here: Point Cloud Library (PCL)”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, May 9-13, 2011.
- [4] Szymon R and Marc L, “Efficient Variants of the ICP Algorithm”, Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Quebec City, QC, Canada, pp.145-152, 28 May 2001 – 01 June 2001.
- [5] 小楠進一：プラント増設業務における既存設備モデリングシステムの開発、長崎県工業技術センター研究報告書、No. 52, pp.10-12, 2023.
- [6] <https://github.com/qt>, Accessed 2023.
- [7] <https://github.com/introlab/rtabmap>, Accessed 2023.
- [8] Rainer Kuemmerle, Giorgio Grisetti, Hauke Strasdat, Kurt Konolige, and Wolfram Burgard, “g2o: A General Framework for Graph Optimization”, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, May 09-13, 2011.
- [9] <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens/industry-manufacturing>, Accessed 2023.

音源可視化技術の開発

(マイクアレイを用いた音源可視化システムの構築)

基盤技術部長 兼 機械システム科長 田 口 喜 祥

機械装置の異常を音情報から検知する技術が注目されている。従来は、熟練技術者による長年の経験と勘から通常と違う音が発生したことを認識し機械装置の異常を把握していた。近年、音データを FFT (Fast Fourier Transform) 解析し、異常音の特徴から監視を実施する試みや、IoT (Internet of Things) 技術を用いて音データを収集し AI (Artificial Intelligence) 技術により異常を検出するための試みが数多く実施されている^[1-4]。このような取り組みは、熟練技術者の技術伝承としても有効であると考えられる。

そこで、本研究開発では、音と画像の情報を組合せることで音源の可視化を行うことにより、監視対象としている装置から発生している音であることを認識し、監視することを特徴とした音源可視化技術を開発することを目的とする。マイクアレイと TV カメラ、もしくは熱画像カメラを組み合わせたセンサーアレイを製作し、AI 技術を用いて音の発生方向を認識し、監視を行う音源可視化装置を試作した。

1. 緒言

近年、製造現場では IoT や AI を用いた取り組みが注目されている。機械装置の異常監視は、生産現場の自動化や省力化に向けての重要な取り組みであり、さらなる発展が期待されている。その中でも音を用いた機械装置の監視技術については、FFT などの音響信号処理の活用や、AI と IoT を応用して異常監視を実施する研究や報告が数多くなされている^[1-4]。

機械装置の異常を動作音から認識する技術開発は関心が高く、長崎県内企業からも異常音の監視を行う IoT 機器を開発したいという相談がある。これまでの音を用いた異常監視は、音をマイクロホンで収集し、AD 変換器を用いてデジタルデータに変換した後、FFT 演算処理を行うことで周波数ごとの音圧信号に変換し、音圧信号の特徴量を抽出することにより行われていた。

一方、近年 AI 技術の進歩は目覚ましく、様々な分野で AI を応用する研究開発がなされてきている。例えば、カメラ映像から人物を認識する、画像から特定の部分を切り出すなど映像処理に関して AI 技術を用いることで高度な処理が可能となってきた^[5]。さらに、異常音の監視についても AI 技術の一手法であるオートエンコーダを用いることで、正常時に発生する音のみを学習し、学習した音と違った音が発生した場合は異常音と認識するなど、これまでより高度な認識が可能となってきた。

しかし、実際の工場内では様々な機械装置が稼働しており、単純にマイクロホンで音を収集しても様々な

機械装置の音を収集することになってしまい、監視対象となる機械装置からの正常な音の収集や機械装置ごとの異常音を監視することが現実的に難しいという問題点がある。

そこで、本研究開発では、音と画像の情報を組合せることで音源の可視化を行い、まず音源の発生位置を推定し監視対象から発生している音であることを識別し監視するための音源可視化技術を開発することを目的とする。

複数のマイクロホンを用いて構築したマイクアレイを用いて音を収集すると共に、マイクアレイと TV カメラや熱画像カメラを組み合わせて構築したセンサーアレイを用いて音源方向を可視化し、監視対象物から発生している音を識別する装置を開発する。

令和3年度は市販のフィールドレコーダーや FFT アナライザを用いて音源可視化装置のハードウェア構成を検討するための予備実験を実施した^[6]。令和4年度は収集した音データを基に音源位置を推定するためのニューラルネットワークの開発を行った^[7]。

令和5年度には、実際に工場内で使用できる音源可視化装置を開発するために、3D プリンタを用いてセンサーアレイを製作すると共に、FFT アナライザと計測用マイクロホンで実現していた装置を、実際に工場内に設置可能な組み込み用マイコンボードと安価なマイクロホンなどの部品を用いて再設計した。以上により、マイクアレイで取得した音データおよび TV カメラもしくは熱画像カメラで取得した映像を組み合わせることで音源方向を可視化する装置開発を行ったので報告する。

2. システム構成

開発する音源可視化装置のシステム構成を図1に示す。複数のマイクロホンとTVカメラもしくは熱画像カメラで構成されたセンサーアレイと、制御装置(PC)により音源方向を可視化し、PCやスマートフォンなどで閲覧できる装置開発を行う。

このような装置を開発するためには、複数のマイクロホンからの音データを基に音源の方向を推定するAIプログラムを開発する必要がある。開発するAIプログラムは、事前に音源方向が異なる複数の音データを収集し、収集した音データと音源方向を関連付けたデータセットを作成した後、ディープラーニング学習用ワークステーションを用いて音源方向を推定するAIの探索を行うことで製作した。

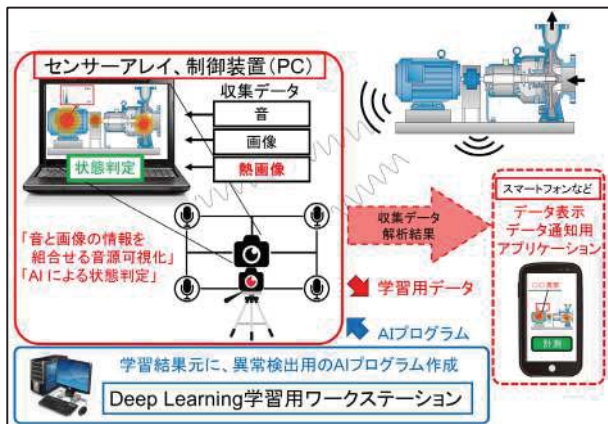


図1 システム構成

3. 音源可視化予備実験

考案したシステム構成で音源可視化が可能であるかについて予備実験を実施した。熱画像カメラを用いて、稼働中の機械装置を検出するために実施した予備実験結果を図2に示す。

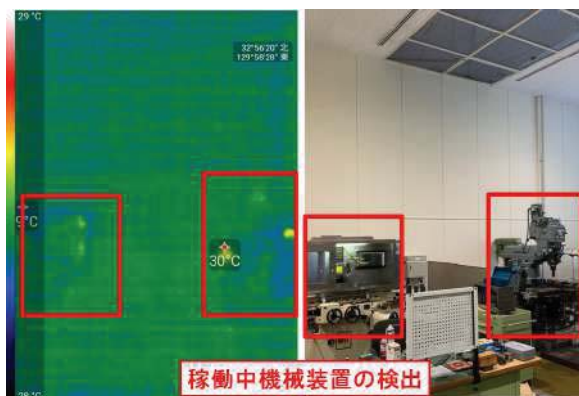


図2 熱画像カメラを用いた予備実験

この予備実験では、熱画像カメラ（Infinitegra製 OWLIFT Type-F）を使用して、稼働中の機器および可動部の判別が可能であるかについて評価を行った。実際に動作中の工作機械を撮影した結果を図2に示す。この予備実験により、稼働している箇所は周囲より温度が高くなる傾向があるため、熱画像カメラの画像で稼働中もしくは稼働箇所の判別が可能であることを確認した。

つぎに、マイクアレイを用いて音源の方向が推定できるかに関する予備実験を実施した。マイクアレイで取得した音データを用いて音源の方向が推定できれば、TVカメラの映像と組み合わせることで、複数の機械装置がある場合であっても監視対象からの音であることを識別することが可能となる。また、熱画像カメラからの映像と組み合わせることで、稼働中の装置や稼働箇所から発生している音であることを認識できると考えられる。

予備実験では、音データから音源方向を推定するため、無響室内の任意の場所にスピーカー1個を設置し、マイクアレイで音データを収集すると共に、スピーカーの位置を記録し、データセットとしてAIの学習に用いた。図3に無響室で実施した予備実験で用いたマイクアレイおよびスピーカーの写真を示す。マイクアレイのデータ記録には、6chの同期した音データをWAV形式データとして記録できる市販のフィールドレコーダー（ZOOM製、H8）を用いた。



図3 マイクアレイおよびスピーカー

図4に示した1から8までの位置にスピーカーを設置し、FFTアナライザから出力したホワイトノイズをスピーカーで再生し、それぞれの箇所で同期して収集した6chの音データをWAV形式で記録した。スピーカーの位置番号と6chの音データを用いてAI学習

用のデータセットを製作した。この予備実験に使用した機材を表1に、使用したFFTアナライザの写真を図5に示す。



図4 データ取得時の音源配置

表1 音データ収集に用いた機器

レコーダー	H8 (ZOOM)
マイクロホン	ECM8000 (Behringer)
スピーカー	DBR12 (YAMAHA)
FFTアナライザ	DS-3000 (小野測器)
記録媒体	SDカード又はPC



図5 FFT アナライザ

表2 学習用ワークステーション構成

OS	Windows10Pro 64 bit
CPU	Core i9 12900K
GPU	GeForce RTX3090
RAM	DDR5 64 GB
ストレージ	M2-SSD 2 TB (PCI-E-GEN4)

収集したデータセットを用いて、ディープラーニング学習用ワークステーションにより、6 ch の音デー

タから、スピーカーの位置を推定する音源探索用ニューラルネットワークの探索と学習を実施した。学習用ワークステーションの構成について表2に示す。

ディープラーニングによる学習を行うために用いたソフトウェアは、Windows10 ローカル版の Neural Network Console (SONY) [8] である。バージョン 1.80 以降、WAV データを直接取り扱うことができるようになり、音を取り扱う分野でもより使用し易いものとなっており積極的に活用を進めている。実際に使用したバージョンは2.10で、WAV データの取り扱いについてはCSVでの相対ファイルパスを指定する形で利用可能である。

予備実験で探索した音源探索ニューラルネットワークの例を図6に、音源探索ニューラルネットワーク学習曲線を図7に、評価結果を図8に示す。

ニューラルネットワーク探索の結果、8か所の音源位置に対する音源探索の正解率 98.25%で判別できることを確認した。

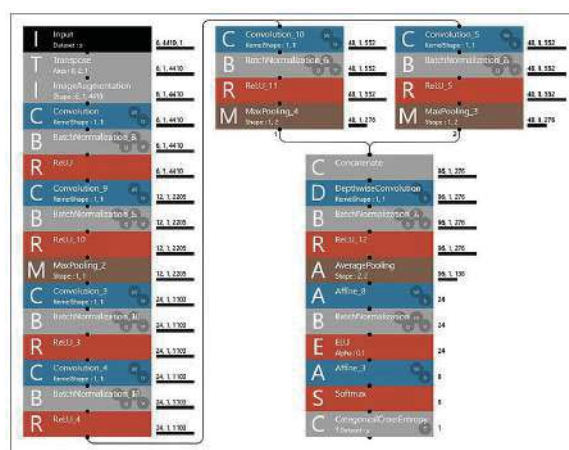


図6 音源探索ニューラルネットワーク

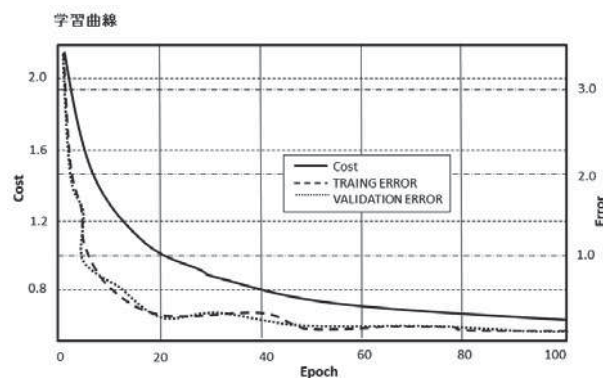


図7 音源探索ニューラルネットワーク学習曲線

	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7
y=0	2000	0	0	0	0	0	0	0
y=1	0	1999	0	0	0	1	0	0
y=2	0	0	2000	0	0	0	0	0
y=3	0	0	0	2000	0	0	0	0
y=4	202	0	0	0	1798	0	0	0
y=5	0	3	0	1	29	1956	0	1
y=6	0	0	31	0	0	0	1967	2
y=7	0	0	0	0	0	0	0	2000
Precision	0.9082	0.9985	0.9847	0.9995	0.9787	0.9994	1	0.9985
F-Measures	0.9518	0.9989	0.9922	0.9997	0.9771	0.9985	0.9916	0.9992
Accuracy	0.9825	正解率 98.25%						
Ang.Precision	0.9834							

図8 音源探索ニューラルネットワーク評価

4. 音源可視化装置

予備実験により、マイクアレイを用いて同期して収集した音データとTVカメラもしくは熱画像カメラ映像を組み合わせることで音源可視化装置を開発できると推察できたので、工場内で使用することを想定した音源可視化装置の設計を行った。工場内に常時設置して使用することを前提とし、社内LANからネットワークを通して監視を行わせること、マイクアレイからの音データを同期して収集できること、および製造コストを考慮して、音データの収集をマイコンボード（SONY製、SPRESENSE^[9]）で実現することとした。FFTアナライザを用いた予備実験では、6chのマイクロホンのデータを使用した。SPRESENSEでのアナログ入力マイクロホン最大接続可能チャンネル数は4chまでである。計測原理を考えると4chでも問題ないと考え、マイクロホン4chで動作する音源可視化装置を試作することとした。

3D-CAD（Solid works office premium 2007）を用いてセンサーアレイの設計を行い（図9）、3Dプリンタを用いてセンサーアレイの機構部品を製作した。今回、TVカメラと熱画像カメラのレンズ中心位置高さの違いを考慮し、センサーアレイのカメラ取付部の高さをそれぞれのカメラに合わせた高さとした2種類のセンサーアレイを製作することとした。そのため、センサーアレイは2つの部品を組み合わせることで製作することとし、マイク1個とカメラを取り付ける箇所の部品をTVカメラ用、熱画像カメラ用の2種類製作し、マイク3個を取り付ける部品を1種類製作することとした。使用した3Dプリンタは短繊維CFRP材料であるOnyxを用いて造形が可能なMarkfoged X7である。センサーアレイの設計結果を図9に、試作に用いた3Dプリンタの写真を図10に示す。また、センサーアレイ機構部品として、マイク4個とTVカメラもしくは

熱画像カメラを取り付けて製作したセンサーアレイの写真を図11に示す。製作したセンサーアレイを用いて、音源可視化用ニューラルネットワークを製作するためにデータセットの収集を行った。

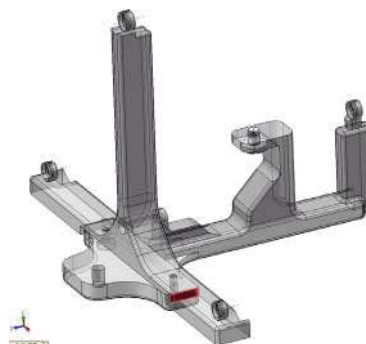


図9 センサーアレイの設計



図10 高強度3Dプリンタ



(a) TVカメラ (b) 熱画像カメラ

図11 試作センサーアレイ

今回は、USBスピーカーからホワイトノイズを発生し、図12に示した音源位置にUSBスピーカーを設置し4chの音データとスピーカー位置からなるデータセットを製作した。約8千点のデータセットのうち8割を学習用、2割を評価用としてニューラルネットワーク探索を実施した。探索の結果、9か所の音源位置に対する音源探索の正解率99.94%で判別できるニューラルネットワークを構築した。

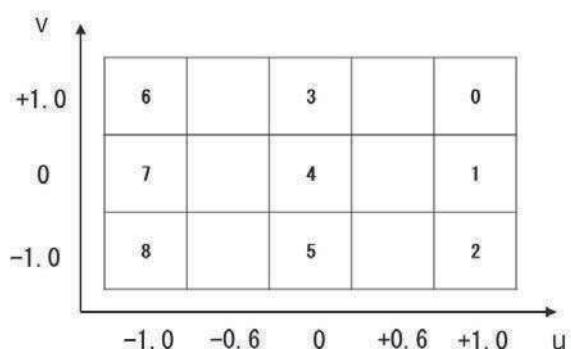


図 1 2 学習用音源配置

分類問題で高精度な推定が可能であったので、回帰分析の実施を試みた。画面座標を (u, v) とし、スピーカーの位置を分類問題の 9 か所に加えて u 座標が 0.6 および -0.6 の 6 か所を増やしてデータの収集を行った。図 12 に示す (u, v) 座標系の場所に USB スピーカーを設置し、4 ch の音データとそれぞれの (u, v) 座標をデータセットとして、4 ch の音データから (u, v) 座標を推定するニューラルネットワークの探索を試みた。学習用のデータセットを収集する実験を実施している無響室の様子を図 1 3 に示す。

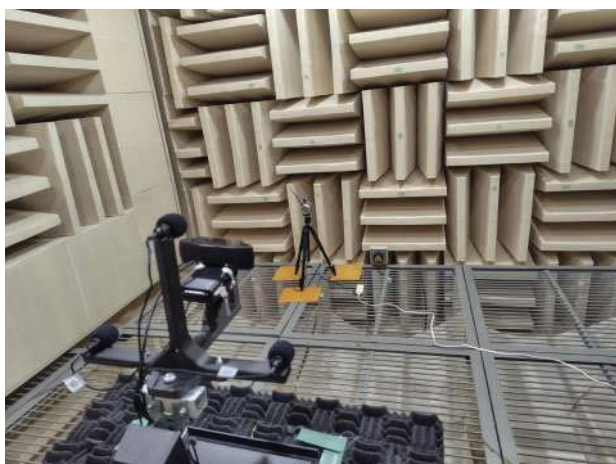


図 1 3 データセット収集実験

15,000 点のデータを収集し、12,000 点を学習用のデータ、3,000 点を評価用のデータとし 4 ch の音データから音源の方向 (u, v) を推定するニューラルネットワークの探索を行った。その結果、トレーニングエラー 7.35×10^{-4} 、バリデーションエラー 8.97×10^{-4} となるニューラルネットワークを探索した。

これらのことにより、ニューラルネットワークを用いた回帰推定により、4 ch の音データから音源の方向 (u, v) を推定することが可能となったが、マイコン

ボード SPRESENS のみではメモリ容量の関係で、探索したニューラルネットワークを用いた音源方向の推定、音源の可視化および可視化結果を表示するプログラムを実行することが困難であった。

そこで、4 ch の音データを同期して取り込む機能のみをマイコンボード SPRESENS で実行し、一定間隔で取り込んだ音データを制御用 PC に送信し、制御用 PC で音源方向の推定、TV カメラもしくは熱画像カメラと推定方向を組み合わせた音源の可視化画像表示、および PC やスマートフォンなどからブラウザで閲覧できるようにするための Web サーバプログラムを実行させることとした。開発した装置のシステム構成を図 1 4 に示す。

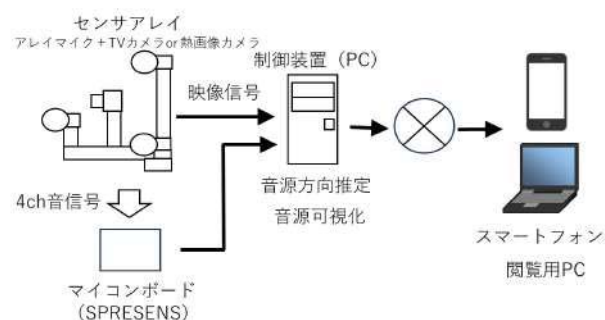


図 1 4 音源可視化装置システム構成



図 1 5 マイコンボード (SPRESENS)

表 3 制御用 PC の仕様

OS	Windows10
CPU	Intel (R) Core i7-10700F
メモリ	64GB
GPU	NVIDIA (R) GeForce RTX 3090Ti
ストレージ	SSD 2 TB

同期した4 ch の音データ収集のために用いたマイコンボードSPRESENSの写真を図15に示す。マイクロホンを接続する端子とネットワーク接続のための拡張ボードが干渉したため接続用ケーブルを製作した。TVカメラや熱画像カメラの映像収集、SPRESENSEで収集した4 ch の音データからニューラルネットワークを用いて音源方向の推定、収集した映像と推定した音源方向を組み合わせて音源を表示し、スマートフォンやPCのブラウザで表示可能とするためのプログラムを制御装置(PC)で作動させた。今回使用した制御装置(PC)の仕様を表3に示す。

表3に示した制御装置(PC)で動作する音源可視化プログラムを開発した。開発したプログラムは音源可視化装置のセンサーアレイで収集した音データを基にAI処理により音源方向を推定し、TVカメラで撮影している映像に推定した音源方向を重ねて表示する機能を有する。音源可視化装置で撮影した映像はLANに接続されているPCやスマートフォンのブラウザから閲覧することが可能である。図16は、実験室内に小型スピーカーを設置し、この小型スピーカーからホワイトノイズの音を再生した際のブラウザ表示画面である。



図16 音源可視化実験 (TV カメラ)

TVカメラを用いた音源可視化実験の結果、開発した装置により音源方向を推定しTVカメラの映像に重ね合わせて可視化することで、取得した音データが監視対象の装置から発生している音データであることを確認可能となった。

5. 結言

音源方向と映像情報を組合せることで音源の可視化を行うことにより、監視対象としている装置から発生している音であることを確認し、監視することの特徴とする音源可視化技術を開発した。4 ch の音データによる音源位置9分類をニューラルネットワークにより99.9%以上の高精度で推定可能であることを確認した後、音データから音源方向を推定し、TVカメラ映像や熱画像カメラ映像と併せて音源方向を表示する機能を有する音源可視化装置を試作した。性能評価のための実験を行ったところ、音源方向と映像情報を基に音源位置を可視化し、対象とした装置からの音であることを認識できることを確認した。

今後、開発した音源可視化技術を用いて実際の工場内で稼働している機械装置の異常音解析や、音を用いたIoT機器等の応用開発に取り組んでいきたい。

参考文献

- [1] 植松 他：動作音から機器の異常を検知する異常音検知技術、NTT技術ジャーナル、vol. 29 No. 6, pp. 24-27, 2017. 6.
- [2] 高嶋：音響センシングによる異音検知、OKIテクニカルレビュー、第233号 Vol. 86 No. 1, pp. 32-35, 2019.
- [3] 亀岡：深層学習モデルを用いた音響信号処理、計測と制御、計測自動制御学会、58巻、3号、pp. 195-202, 2019.
- [4] 木下：機械学習による機械稼働音監視とデータ拡張による学習効率化に関する実験的検討、公益社団法人計測自動制御学会中国四国支部、第28回学術講演会論文集、pp. 77-78, 2019.
- [5] 田口、久保田：AIを用いた監視装置の開発、長崎県工業技術センター研究報告、No51, pp. 10-15, 2022.
- [6] 久保田：音源可視化技術の開発、長崎県工業技術センター研究報告、No51, pp. 23-26, 2022.
- [7] 久保田：音源可視化技術の開発、長崎県工業技術センター研究報告、No52, pp. 19-21, 2023.
- [8] <https://dl.sony.com/ja/>, Accessed 2021.
- [9] 太田：SPRESENSEではじめるローパワーエッジAI、ISBN:4873119677, 2022.

3D-CADとシミュレーションを用いた設計変更技術適用による機械設計の高度化 (機械設計の効率化に向けた3D-CAD普及促進)

機械システム科 研究員 西村 学
機械システム科 研究員 小笠原 耕太郎

機械設計は製品開発において重要な工程である。この工程では製品形状を決めるにあたり多岐にわたる検討を行い、製造・検査に必要な設計図面を作成するなど非常に多くの工数を要する。全国では機械設計のこの多くの業務を効率化するために3Dデータやこれを作成する3D-CADを用いることが主流である。県内でも生産性向上の取組支援をしているが、3D-CADの機械設計活用に関してはさらなる普及推進が必要である。

3D-CADの普及への大きな障壁として“導入メリットの不透明さ”や“導入しても活用できない”などが挙げられる。そこで本研究では実際に部品設計における3D-CADやシミュレーションの活用事例を作り、そのメリットを明確化するとともに得られた知見をもとに導入前後の技術支援をしていくことを目的とする。本年度は研究対象をロボットアームとし、この試作および試験手法の検討と試験治具の設計・製造を行った。

1. 緒言

全国における機械や電気機器、輸送用機器などの業種では3D-CADは7割程度導入されており^[1]広く普及している。現在は3Dデータと2D図面が併用されており、今後は3Dデータを用いてさらなる効率化が検討されている^[2]。それに比べ、長崎県の製造業における機械設計では3D-CADが用いられることはまだ少ない。これは単純に設計の技術力だけでなく、製造プロセス全体の効率などの大部分で差が広がり続けていることを意味する。

3D-CADが普及しない要因の一つに導入メリットが見えづらいことが考えられる。実際、3D-CAD活用の具体的な事例はとても少ない。特にシミュレーションの活用まで拡張した事例において具体的なものはほとんどないので、3D-CAD導入によるメリットを感じにくいのが現状である。また、このような事例には詳細なプロセスが記述されていることはほとんどなく、3D-CADを初めて導入した企業は、手探りでノウハウを構築する必要があるが、途中で断念し従来の2D-CADを用いた設計に戻るケースもある。これらのことから3D-CADを普及の課題として、導入メリットの明確化や導入後のノウハウ構築の困難さなどが挙げられる。

そこで本研究では3D-CADやシミュレーションを用いた設計事例をつくることを目的とした。特に試行錯誤が必要な構造解析における解析条件を決めるプロセスについては詳細を示していきたいと考えている。

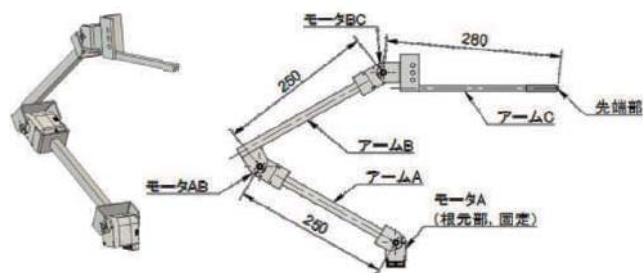
これにより単純なメリットの把握だけでなく、導入後の参考資料としても活用できる。また、本研究で得られる知見を元に直接支援することで企業のノウハウ

構築にも寄与できる。

本研究では別の経常研究で用いているロボットアーム^[3]を題材として進める。この既存のロボットアームに対して3D-CADおよびシミュレーションを用いて設計変更を試みる。これを進めるためにシミュレーションで用いる解析条件を事前に定めなければならない。そのため試験結果とシミュレーション結果を比較して最適な解析条件を決める必要がある。今回は解析条件設定に向けたロボットアームの試作、試験手法の検討および治具設計を実施した内容について報告する。

2. 研究対象

本研究における対象のロボットアームの外観および概形図を図1に示す。ロボットアームは3本のアームから成り、各アーム間および根元部にモータが配置され、アーム同士もしくはアームと固定部を連結する。このロボットアームはモータで駆動し、ロボットアームの先端部でエレベータなどのスイッチを押すことを目的としている。本研究内では構成部品の中のアームを設計変更の対象とする。



(a) 外観 (b) 概形図 (単位: mm)

図1 研究対象のロボットアーム

3. 試験手法

3. 1 設計要件とアームの負荷条件

本来の設計では多岐にわたる設計要件について検討する必要があるが、本研究では事例を示すことが目的であるため、1つの設計要件（下記）に絞って検討する。

<設計要件>

下記項目を満たす場合に、各アームが破損しないこと。

- ① 根元のモータが最大トルクで駆動する。
- ② 根元を除く各関節部のモータの発生トルクは最大トルク以下である。
- ③ モータ駆動時における先端部および各関節部の座標は一定である（動かない）。
- ④ 先端部において角度拘束されていない。

根元のモータが最大トルクで駆動する場合でもロボットアームの姿勢によって各アームに掛かる負荷は変化する。そこで各関節の開き角ごとに各アームが受ける負荷（両端に生じるx、y方向荷重およびz軸回りのモーメント）を力のつり合いから算出した。さらに簡易的にアームを一樣断面と仮定して各アームの発生応力を得られた負荷ごとに計算して、それらを比較することで各アームの最大負荷時の条件(図2、図3、図4)を推定した。



図2 アームAにおける最大負荷条件

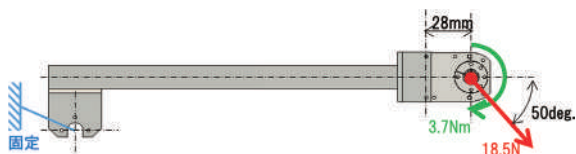


図3 アームBにおける最大負荷条件



図4 アームCにおける最大負荷条件

3. 2 試験手法および試験治具

試験を実施する上で図2から図4までに示す負荷を安定的にアームに与えることが重要である。そのため、

アーム単体での試験とし、負荷を与える治具をシンプルな形状とした。試作した各アームとその試験治具を図5から図7までに示す。

図中の固定用治具をバイスでクランプして固定し、負荷用治具における負荷部にばねばかりで図中に示す荷重方向および荷重の大きさを付加することを想定する。これにより、図2から図4までに示す負荷条件を各アームに付与できるように設計した。

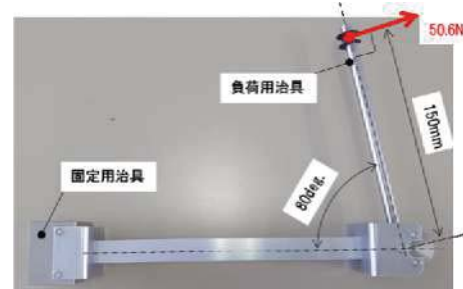


図5 アームAの試作品と試験治具

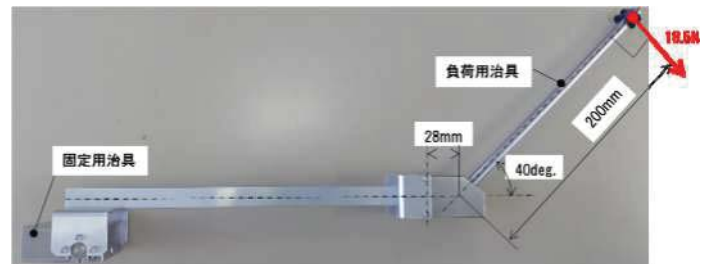


図6 アームBの試作品と試験治具

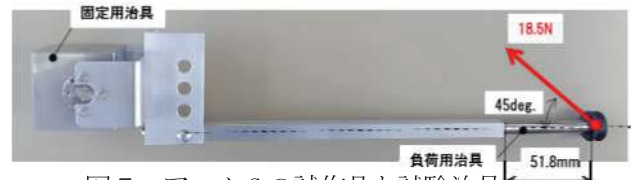


図7 アームCの試作品と試験治具

4. 結言

今回は、試験実施のための手法検討および治具設計を行った。今後は実際に試験とシミュレーションを実施するとともにそれらの結果を比較して最適な解析条件を検討する。

参考文献

- [1] https://engineer.fabcross.jp/archeive/160406_cad_tool.html, Accessed 2024.
- [2] https://home.jeita.or.jp/3d/pdf/fukyu_semi_131108shiryo.pdf, Accessed 2024.
- [3] 堀江：ディープラーニングを活用したロボット制御における安定性向上の研究、長崎県工業技術センター研究報告、No. 52, p. 13, 2023.

光学式ガスセンサーの開発

(可燃性ガス等を光で迅速に検知できるセンサーを開発する)

電子情報科 主任研究員 田 尻 健 志

2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて、再生可能エネルギーの導入と関連産業の創出が期待されている。このような中、再生可能エネルギーの余剰電力を水素ガスに変換して貯蔵・利用する Power To Gas (P2G) が注目を集めている。しかし、水素ガスを含めた可燃性ガスは拡散して爆発しやすい特徴を持っているため、漏洩ガスを迅速に検知し爆発を未然に防ぐ必要がある。また、コストを抑え安全性を高めたセンサーシステムの実現は難しい。そこで本研究では、空間内の水素ガスを迅速・高感度に検知できる光学式の水素センサーを開発する。初年度は、FDTD 法 (有限差分時間領域法) により水素ガスを検知する連結微小球プローブモデルの仕様について検証した。

1. 緒言

2050 年カーボンニュートラルを実現するために、世界各国で CO₂ 排出抑制や再生可能エネルギーの導入拡大を目指している^[1]。再生可能エネルギーを主力電源として利用するには、コスト、系統制約、調整力の問題を解決する必要がある。このような中、余剰電力を水素に変換して貯蔵・利用する Power To Gas (P2G) が注目され、実用化に向けた実証事業が進められている。水素ガスは正しい取扱いを行えば安全なガスであるが、他の可燃性ガスと比較すると拡散性や浸透性が高く、漏洩する危険性がある。また、空気中での爆発濃度範囲が4%~75%と広いと、ガスが漏洩した場合には迅速に検知し、爆発を未然に防ぐ必要がある。

従来から利用されている水素センサーには、接触燃焼式や半導体式などがあるが、検知できるガス濃度範囲が低濃度範囲と狭く、検知時間にも数十秒が必要である。また、検知箇所を数百℃に加熱する必要があるため、加熱により水素ガスが爆発する危険性があり、消費電力量も高くなる。さらには、空間的なガス分布を把握するには、大量にセンサーを設置し、安全性と経済性を両立する必要がある。

そこで本研究では、多種の可燃性ガスにあわせたプローブモデルの選定を理論・実験の両面で行い、光学的に検知できる微小球プローブを開発する。また、微小球プローブを用いた試作装置を開発し、可燃性ガスの検出濃度範囲を評価する。

微小球プローブは、ある条件下で光を入射すると微小球内を周回する電磁波モードが発生し、特定波長の入射光が強く散乱されることが分かっている^[2-3]。この周回する特有の電磁波モードは、ウィスパーリング・ギャラリー・モード (Whispering Gallery Mode、以下 WG

モード) と呼ばれており、微小球表面状態 (屈折率、コート厚み) に非常に敏感である。このため、本研究では WG モードの変化を利用することで、微小球表面に吸蔵した水素ガスを高感度に検知できるセンサーの開発を行う。微小球プローブはシンプルな構造であるため大量生産が容易であり、低コスト化に繋がる。また、空間に大量のセンサーを設置できるため、水素ガスの漏洩箇所や空間分布状態を把握することができる。

本報では、微小球プローブを FDTD 法 (有限差分時間領域法) により解析し、連結した微小球の仕様や励起方法を検証したので報告する。

2. 研究内容と結果

2. 1 微小球プローブの選定

微小球の光閉じ込め効果は、周辺媒質との屈折率差が大きいほど高いと、高い屈折率を持つ微小球を選定する必要がある。本研究では、Mie 理論に基づき微小球の散乱断面積を計算し、空気や水素ガス中でも散乱光ピークが発生する直径 10 μm 、屈折率 $n=1.40$ のシリカ (SiO₂) 微小球を選定した^[4]。

図 1 に示すように、シリカ微小球は表面に水素を吸蔵する薄膜コーティングがない状態でも、水素ガスの充填により散乱光の共振ピーク波長が短波長側へシフトすることを確認している^[5]。このため、本研究では直径 10 μm のコーティング無しのシリカ微小球を用いて検証した。

また、昨年度までは単一の微小球を励起し、散乱光の共振ピーク波長変化を確認したが、本研究では、2 個以上の微小球を連結した複合球へと展開し、散乱光強度を比較することで検知範囲の拡大と感度の向上を図る。

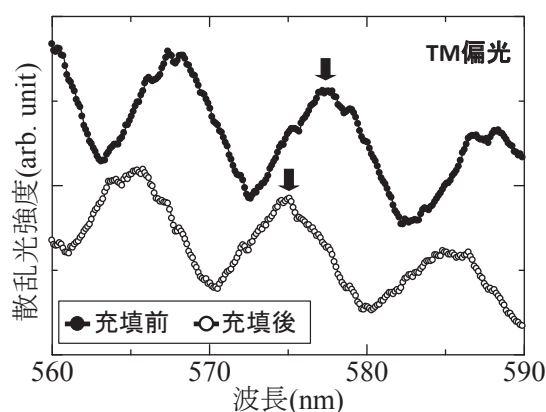


図1 水素充填による散乱光スペクトルの変化

2. 2 微小球の励起方法

昨年度までは、油浸対物レンズ（ニコン製、100×）を用い、全反射減衰配置で単一のシリカ微小球を励起し、分光器により散乱光スペクトルを検出した。しかし、微小球の励起位置が少しでも異なると散乱光強度に誤差が生じ、装置の小型化や低コストを進めるには励起方法と検出方法の改善が必要となる。そこで、本研究では、励起方法を光ファイバー方式へと簡易化し、再現性を向上させる検出システムを検証した。

図2 (a) は FDTD 法（有限差分時間領域法）を用い、導波光から連結した微小球を励起する計算モデルを示す。微小球の直径 (d) と屈折率 (n) は $10\ \mu\text{m}$ と 1.40、周囲媒質の空気 (n_{air}) と導光板 (n_w) の屈折率は、それぞれ 1 と 1.5 としている。励起波長は単一の微小球で TM 偏光の共振ピーク波長が発生する $577\ \text{nm}$ とした。計算の結果、連結した2つの微小球で光が閉じ込められ、WGM が励起されることを確認した。また、図2 (b) と (c) で示すように、2つの微小球が接触および非接触の場合でもそれぞれの微小球で WGM が励起され、導波光との結合が有効であることを確認した。したがって、本研究では直径数 μm に細くした光ファイバーを用い、テーパ部から染み出すエバネセント光との結合^[6]により WGM を励起し、出射光の強度変化を検証する。

3. 結言

水素ガスを検知する微小球プローブとして、直径 $10\ \mu\text{m}$ 、屈折率 1.40 のシリカ微小球を選定し、連結微小球の仕様を検証した。また、FDTD 法（有限差分時間領域法）により、導波光を連結微小球に結合することで WGM を励起できることがわかった。次年度は、テーパ型光ファイバーを作製し、水素ガスの有無における散乱光ピーク波長の変化による強度変化を検証する。

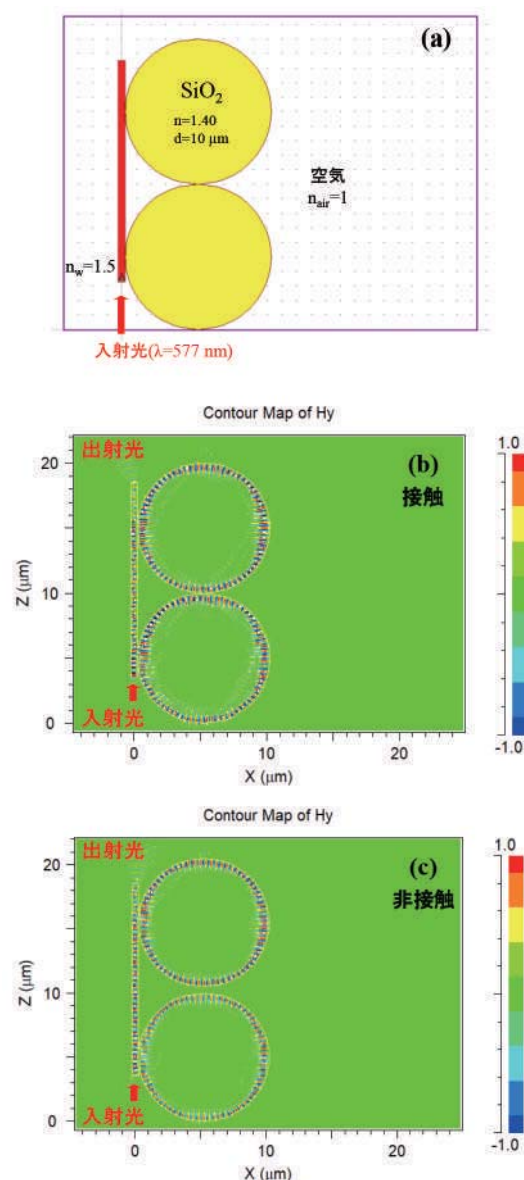


図2 連結微小球の励起状態

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁、第6次エネルギー基本計画、2021.
- [2] 福井萬壽夫、大津元一：光ナノテクノロジーの基礎、オーム社、2003.
- [3] T. Tajiri, S. Matsumoto, T. Imato, T. Okamoto, and M. Haraguchi, Anal. Sci., 30, pp. 799–804, 2014.
- [4] 田尻健志、岡本敏弘、原口雅宣：第84回応用物理学会秋季学術講演会、22a-A602-3, 2023.
- [5] 田尻健志：長崎県工業技術センター研究報告、No. 52, pp. 22–26, 2023.
- [6] 五神真、成田善廣：応用物理、第71巻6号、pp. 671–677, 2002.

エネルギーの有効活用を目指した環境発電に関する研究

(電磁波ノイズの回収と蓄電に関する技術開発)

電子情報科 主任研究員 中 川 豪

IoT の急速な普及に伴いあらゆる場所にセンサデバイスが設置され、情報の収集と演算、データの無線送信が行われている。これら IoT センサデバイスの電源として、環境発電技術が注目されている。代表的な環境発電のエネルギー源として光^[1]・振動^[2]・熱^[3]・電磁波^[4]等が挙げられるが、電磁波エネルギーによる環境電波発電は他のエネルギー源に比べ発電量が 1/100~1/10 と少ないという問題がある。そこで本研究では、屋内で稼働する電気・電子機器（民生機器、産業機器）から放出されている不要な電磁波ノイズに着目し、これをエネルギー源とした環境電波発電ユニットを開発する。今年度はアンテナ形状の検討と、昇圧整流回路の設計・試作を行った。

1. 緒言

持続可能な社会の実現に向け、環境発電（エネルギーハーベスティング）が注目されている。ここでいう環境発電とは、身の回りに薄く広く存在している微小なエネルギーを収穫し、微弱な電力に変換して有効利用する技術であり、送電網（系統電力）から分離した、電池を代替する持続的電源といえる。近年の IoT の急速な普及に伴い、住宅や工場、商業施設、インフラ（道路、橋など）、農場などありとあらゆる場所にセンサデバイスが設置され、ワイヤレスセンサネットワークを構築して情報の収集と演算、データの無線送信が行われている。これら IoT センサデバイスの電源には一般的にボタン電池などが使われているが、センサデバイスが置かれている周囲の環境には捨てられて無駄になっている様々なエネルギーが存在している。これらの環境エネルギーから電力を取り出すことができれば、エネルギー的に自立したデバイスとして、長期間にわたりメンテナンスせずに使用することが可能になる。このように環境発電は IoT 分野と相性が良く、大量の一次電池廃棄に伴う環境負荷を低減できるだけでなく、本来は捨てられていたエネルギーを有効に活用することで間接的な省エネや省資源の実現にも貢献しうる高付加価値なエネルギー源として、今後欠かすことのできない重要な技術であるといえる。

代表的な環境発電のエネルギー源として、光（室内光）・振動（応力）・熱、電磁波等が挙げられるが、いずれのエネルギー源を用いた場合にも発電能力は 1.0 μW ~100 μW 程度と少ない。しかしながら、マイクロコントローラの超低消費電力化や無線技術の発達によって、10 μW 程度の発電能力があれば、データを取り出してワイヤレスセンサデバイスを間欠的に作動させることが十分に可能であるといわれている。

現状、光をエネルギー源とした環境発電が最大のシェアを占めているが、一方で、電磁波エネルギーによる環境電波発電は他のエネルギー源に比べて発電能力が 1/100~1/10 と少なく、実用化は 2030 年頃という予測がある^[5]。また、現在実施されている環境電波発電の研究開発は、そのほとんどが携帯電話や TV 放送、Wi-Fi 用の電波をエネルギー源としたものである。

2. 研究内容と結果

本研究では、屋内で稼働する電気・電子機器（民生機器、産業機器）から放出されている不要な電磁波ノイズに着目し、これをエネルギー源とした環境電波発電ユニットの開発を行う（図 1 参照）。研究項目は以下のとおりである。①環境発電のエネルギー源となる電磁波ノイズについて、周波数範囲とノイズレベルを調査する。②電磁波ノイズをエネルギーとして効率的に回収できるアンテナ形状について検討する。③回収した電磁波エネルギーを二次電池に蓄電するため、昇圧整流回路を設計・試作し、機能評価を行う。④発電ユニットを試作し、充放電試験を行うことで発電量を算出する。今年度はアンテナ形状の検討及び昇圧整流回路の設計・試作を実施したので、その結果について述べる。

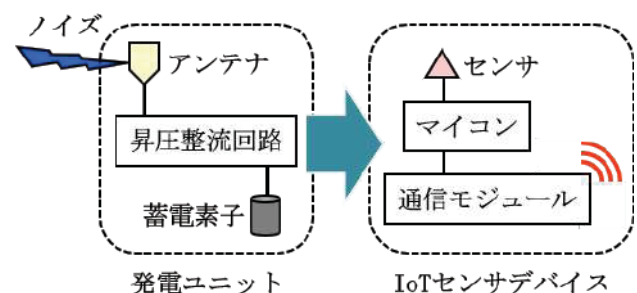


図1 環境電波発電ユニットの模式図

昨年度は市販のアンテナ（アンテナ長：20 cm～80 cm 可変のロッドアンテナ、アンテナ長：30 cm 固定のホイップアンテナ）を使用し、当センターに設置されている様々な電気・電子機器から稼働中に発生している不要な電磁波ノイズを計測することで、ノイズ源の調査を実施した^[6]。今年度は平面アンテナを試作して、同様に電磁波ノイズの計測を行った。FR-4 ラミネート基板（厚さ：2 mm、裏面：銅張、比誘電率：4.7）を用いて試作した平面アンテナの外観を図2に示す。片面をマスキングして、電磁波シールド用の導電性塗料をスプレー塗布することでアンテナ開口部（140 mm×90 mm）を形成した。基板裏面の銅張をGNDにしている。



図2 試作した平面アンテナ

スペクトラムアナライザを用い、0.1 MHz～350 MHz 及び 350 MHz～960 MHz の周波数範囲において、振動試験装置のノイズ測定を行った結果を図3に示す。図3の縦軸は雑音電圧 ($\text{dB } \mu\text{V}$)、横軸は周波数 (MHz) であり、図中の(a)は平面アンテナ、(b)はロッドアンテナ (20 cm) を用いて同時に測定したものである。測定時間を10分とし、ピークホールド測定を行っている。また、アンテナを測定対象機器から30 cmの距離に設置して測定した。図3より、試作した平面アンテナを用いた場合でもロッドアンテナとほぼ同様のピーク波形が観測された。雑音電圧の最大ピーク値は、平面アンテナを用いた場合が817.7 MHzで67.1 $\text{dB } \mu\text{V}$ 、ロッドアンテナでは821.2 MHzで68.1 $\text{dB } \mu\text{V}$ であった。平面アンテナの方が若干ピーク値が低くなっているものの、同軸ケーブルの損失を考慮すれば有意差はないものと考えられる（ロッドアンテナはスペクトラムアナライザに直接接続している）。平面アンテナについては、アンテナパターンだけでなく基板材料の選定も含め、次年度も引き続き検討を進めていく。

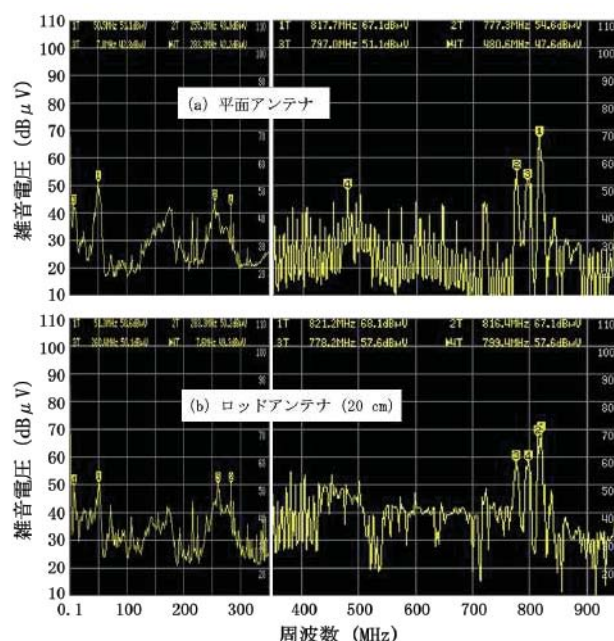


図3 振動試験装置（機械要素試験室）におけるノイズ測定結果

次に、アンテナで回収した電磁波エネルギーを二次電池に蓄電するため、昇圧整流回路を設計・試作し、機能評価を行った。試作した昇圧整流回路の回路図を図4(a)に、外観を図4(b)に示す。図4(a)より、ダイオード2個とコンデンサ2個で1段($N=1$)の回路を構成している。入力に交流電圧（ピーク値： V_p ）が印加されると、入力電圧の正負の反転に応じてダイオードを通しコンデンサが充電される。 C_1 は D_1 を通して最大で V_p まで充電され、入力電圧が反転すると D_2 を通して前段の C_1 に充電された分と入力電圧分が充電されるため、 C_2 にかかる電圧は $2V_p$ となる。その後は入力電圧が反転するたびに前段のコンデンサから各ダイオードを通して次段のコンデンサが充電されるため、 C_2 以降のコンデンサにかかる電圧はいずれも $2V_p$ となる。その結果、回路が N 段の場合、出力とGNDの間には N 個のコンデンサが直列に接続されているため、無負荷での出力電圧 V_o は入力電圧のピーク値 V_p の2倍に段数 N をかけた値となり、式1で表される。

$$V_o = 2NV_p \quad (1)$$

図4(b)より、試作した昇圧整流回路は4段($N=4$)で、使用したダイオードの順方向電圧は0.3 V、コンデンサの容量は330 nFである。100 k Ω の負荷抵抗を接続し、出力電圧を測定した結果を図5に示す。図5の縦軸は出力電圧 (V)、横軸は回路の段数 N であり、周波数30 MHzの正弦波（ピーク電圧 $V_p=0.3\sim0.6$ V）を入

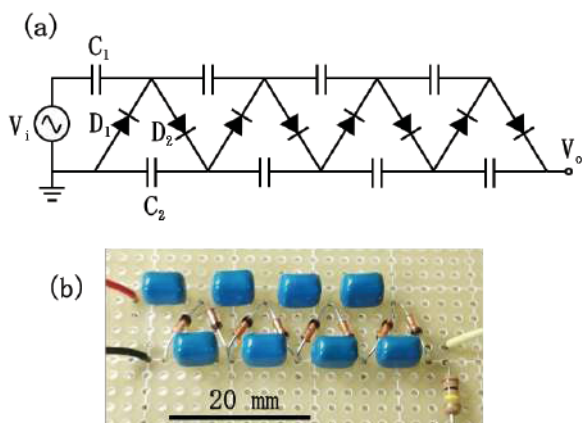


図4 昇圧整流回路

力して出力電圧を測定したものである。図5より、入力のピーク電圧が 0.3 V（ダイオードの順方向電圧と同等）の場合は、昇圧できているものの回路の段数 N と出力電圧が比例していない。これはダイオードに流れる電流が少なく、コンデンサの充電が不十分となったためである。一方、ピーク電圧が 0.4 V 以上では、回路の段数 N の増加に伴い出力電圧が線形に増加しているのが確認できた。

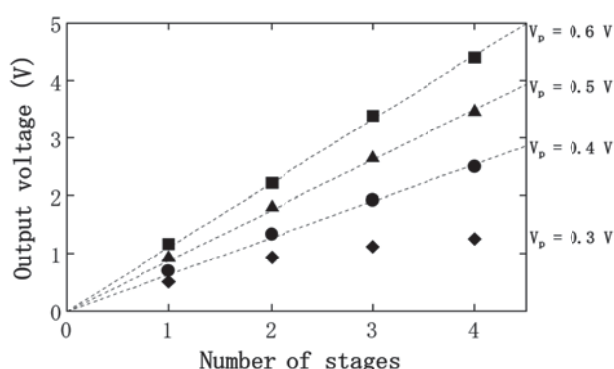


図5 試作した昇圧整流回路の評価結果

3. 結言

本研究では、屋内で稼働する電気・電子機器から放出されている不要な電磁波ノイズに着目し、これをエネルギー源とした環境電波発電ユニットの開発を行う。昨年度は環境発電のエネルギー源となる電磁波ノイズについて、周波数範囲とノイズレベルの調査を実施し、今年度はアンテナ形状の検討及び昇圧整流回路の設計・試作・評価を実施した。

当センターに設置されている様々な電気・電子機器のうち、稼働率が高い開放設備機器（振動試験装置）をノイズ源として、試作した平面アンテナを用いて雑

音電圧の最大ピーク値とその周波数を測定した。その結果、市販のロッドアンテナ（アンテナ長：20 cm）とほぼ同様のピーク波形が観測された。また、チャージポンプ方式の昇圧整流回路を試作し、出力電圧特性を評価した結果、設計どおりの昇圧整流特性を確認することができた。

本研究と同様に、電気・電子機器から発生する電磁波ノイズをエネルギー源とした環境発電ユニットの先行開発事例が、2023年9月7日にプレスリリース^[7]された。これは、ノイズ源となる電気・電子機器等の金属部をアンテナの一部として活用することにより、モジュールの小型化に成功している。収穫対象のノイズ周波数を 100 MHz 以下とし、放射ノイズではなく伝導ノイズを主なエネルギー源としている点が本研究とは異なるが、数 10 μ W～数 10 mW の電力収穫を可能としており、IoT 機器への安定的な電力供給用途としては太刀打ちできない。そこで今後は、応用例の一つとして想定していたノイズ抑制用途に方針転換し、引き続き検討を進めていく。

参考文献

- [1] 瀬川浩司：有機系太陽電池を利用した環境発電と蓄電の新技术、化学工学 Vol.84, No. 6, pp. 263-265, 2020.
- [2] 神野伊策：振動エネルギーによる環境発電（振動発電）、表面技術 Vol. 67, No. 7, pp. 348-352, 2016.
- [3] 一般社団法人 日本熱電学会、ロードマップ、<https://thermoelectrics.jp/roadmap.html>, Accessed 2023.
- [4] 篠原真毅：電波エネルギーによる環境発電（レクテナ）、表面技術 Vol. 67, No. 7, pp. 353-356, 2016.
- [5] 日経産業新聞、「エネルギーハーベスティング」携帯電話で発電、2020. 2. 14.
- [6] 中川豪：長崎県工業技術センター研究報告、No. 52, pp. 27-29, 2023.
- [7] ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社：電磁波ノイズエネルギーから高効率に電力を生成するエナジーハーベスティング（環境発電）用のモジュールを開発、<https://www.sony-semicon.com/ja/news/2023/2023090701.html>, Accessed 2024.

レーザーによる異材樹脂溶着の高品質化に関する研究

(材料間の隙間に起因する性能低下や異材溶着時の過熱による障害を改善するレーザー樹脂溶着技術の開発)

電子情報科 主任研究員 田 中 博 樹

工業製品の製造工程において、樹脂同士を接合する方法の一つにレーザー樹脂溶着^[1]がある。レーザー樹脂溶着には、バリが発生しない、接合部近傍への熱影響が少ない等のメリットがあり、近年注目を集めている。しかし、レーザー樹脂溶着には、材料間の隙間に起因する接合強度や気密性の低下という課題がある。また、異なる種類の樹脂材料をレーザー溶着する際には、焼けやガス化といった過熱による障害が起こるという課題があり、この解決も求められている。本研究では、多品種少量生産時にも適用可能な方法で上記課題を解決する技術を開発することを目的としている。本年度は、今後の検証実験で用いる試験片について、材料の種類や形状等を検討した。検討した材料のうち、アクリル樹脂板をレーザー透過材として用い、ポリカーボネート樹脂板または ABS 樹脂板をレーザー吸収材として用いた組み合わせに対して、光源に Yb ファイバーレーザーを用いた実験装置で溶着実験を行い、溶着可能であることを確認した。

1. 緒言

工業製品の製造工程において、樹脂同士を接合する場合、接着剤を利用するのが最も一般的である。しかし、接着剤には、ランニングコストがかかる、接着剤の管理が煩雑、硬化時間が必要、経年劣化により気密性が失われる、といったデメリットがある。このようなデメリットが問題となる場合、熱を加えて接合する技術が用いられる。また、加熱接合は気密性が得られやすいため、一度封止して開封する必要がないものであれば、パッキンを用いたネジ止めの代替となり、ネジコストの削減、製造工程の簡素化、製品の小型化が可能、といったメリットが得られる。

樹脂の加熱接合では、熱源として熱板や超音波を利用する方法がある。熱板を熱源とする接合には、サイクルタイムが遅い、バリや糸引きの発生といったデメリットがある。超音波を熱源とする接合には、振動による内部部品へのダメージ、バリや粉塵の発生といったデメリットがある。これらより新しい技術として、熱源にレーザー光を利用する方法(レーザー樹脂溶着)もあり、この方法では上記のようなデメリットはない。ただし、接合する材料の一方がレーザー光を透過し、もう一方はレーザー光を吸収する必要があるため、使用可能な材料にはある程度制限がある。

今後 IoT が進展すると、様々な場所にセンサーが設置されることになるが、風雨にさらされる環境下、高湿度環境下、水中および粉塵の多い環境下等で用いるセンサーには容器の気密性が要求される。バリや部材内部への影響がなく、小型の容器を封止できるレーザー樹脂溶着は、そのようなセンサーの製造と相性が

よく、今後ますます活用されと考えられる。

レーザー樹脂溶着を行う際の課題(図 1 参照)として、材料間にできる隙間に起因する溶着品質の低下がある。一般的に調達できる樹脂材の表面には、ひけや傷等による凹みがあるため、材料を重ねた際に隙間ができる。その状態でレーザー照射を行うと、隙間部分がうまく溶着されず、接合強度や気密性の低下を引き起こす。この対策として、吸収側の材料のレーザー照射部分に予め突起を成形しておく方法^[2]が提案されている。しかし、この方法では、専用の型で突起部を成形する必要があり、汎用の板材等をそのまま使用してレーザー樹脂溶着を行うことはできず、多品種少量生産には不向きである。また、異なる種類の樹脂材料をレーザー溶着する際、材料間でガラス転移温度が異なることにより、焼けやガス化といった過熱による障害が起こるという課題があり、この解決も求められている。

2. 研究内容と結果

本研究では、レーザー樹脂溶着における材料間の隙間に起因する接合強度や気密性の低下の改善および異種材料をレーザー溶着する際の過熱による障害の低減を多品種少量生産時にも適用可能な方法で実現することを目的としている。このために、以下の研究項目を実施する。①検証実験で用いる材料の種類や形状等を検討する。②接合強度や気密性の低下の改善および過熱による障害の低減に資する材料の前処理手法を検討する。③上記前処理をした材料を用いてレーザー溶着を行う際の溶着性状に影響するパラメーターを検討する。④上記検討結果をふまえて検証実験を行い、その

実験データに基づいて評価用サンプルを試作し、性能評価試験を行う。

2. 1 材料についての検討

まず、検証実験で用いる材料の種類について検討した。材料のうち、レーザー透過材には、高い透明度と耐候性を有し、光学センサーを容器内に内蔵する際の窓材としての利用が想定されるアクリル樹脂を用いる

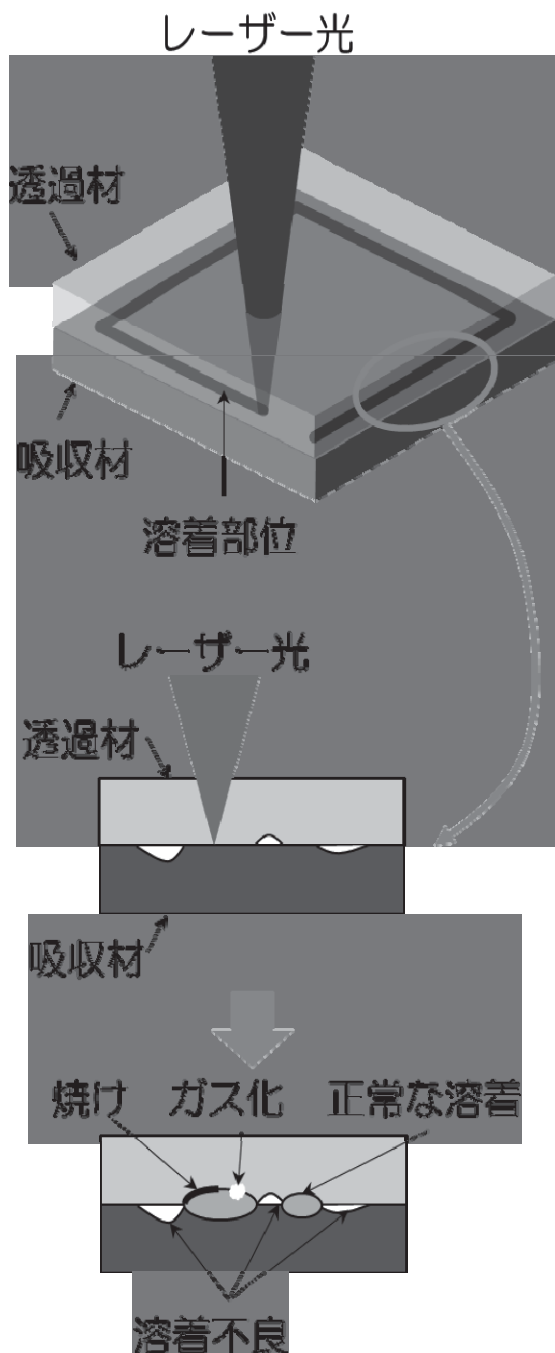


図1 レーザー樹脂溶着を行う際の課題に関する模式図

ことにした。一方で、レーザー吸収材については、検証実験に用いる材料として次の二種類を選定した。ひとつは、高強度かつ耐燃性に優れ、耐久性の高いセンサー容器として利用可能なポリカーボネート樹脂である。もうひとつは、汎用性に優れ、様々な用途に利用可能なABS樹脂である。

つぎに、材料の形状について検討した。検証実験では加圧力やレーザー出力等のパラメーターを変えながら溶着を行い、溶着後のサンプルの性能を評価する。重要な性能の一つに溶着時の接合強度があるが、その評価方法として引張りせん断応力の測定を考えている。そこで、検証実験で用いる樹脂材料の形状および溶着部位は図2のようにすることにした。

2. 2 レーザー溶着実験

検討した材料について、所有するレーザー光源で溶着が可能か確認する実験を行った。光源は Yb ファイバーレーザー（パナソニック製 LP-Z250）である。このレーザーの照射ヘッド内には、ガルバノモーターに取り付けられた X 軸ミラーおよび Y 軸ミラー、ならびに集光用 f θ レンズが内蔵されており、X 軸ミラーおよび Y 軸ミラーはガルバノモーターにより反射角を変えることができ、その反射角の組み合わせにより加工対象面の任意の場所に集光スポットを移動させることができる。この集光スポットの位置、移動軌跡および



図2 樹脂材料の形状および溶着部位

移動速度は装置制御用のコンピューターによって設定できる。また、レーザー出力等も同様に設定できる。

図3にこのレーザー光源を組み付けた実験装置の写真を示す。レーザー照射ヘッドの下部には、照射ターゲットとなる樹脂材料を設置するターゲットホルダーならびに高さおよび水平回転の可動軸を有する移動ステージがある。ターゲットホルダーには重ね合わせて設置した樹脂材料を加圧する機構があり、その加圧力を測定するためのロードセルをターゲットホルダーに組み込んでいる。図2に示した形状の樹脂材料は別途作製した専用の固定治具を用いてターゲットホルダーに取り付けた。

ポリカーボネート樹脂板または ABS 樹脂板をレーザー吸収材として用い、アクリル樹脂板を透過材として用いた組合せに対して、上記装置を用いてレーザー照射を行ったところ、条件によっては樹脂板を溶着可能であることが確認できた。

3. 結言

本研究は、レーザー樹脂溶着における、材料間の隙間に起因する接合強度や気密性の低下および異種材料溶着時の過熱による障害を、多品種少量生産時にも適用可能な方法で改善する技術を開発することを目的としている。

今年度は、検証実験で用いる材料の種類や形状等を検討した。検討の結果、レーザー透過材にはアクリル樹脂を、レーザー吸収材にはポリカーボネート樹脂ま

たは ABS 樹脂をそれぞれ用いることにした。また、検証実験において、溶着後のサンプルで引張りせん断応力の測定を行うことを考慮して材料形状を決定した。

アクリル樹脂板をレーザー透過材として用い、ポリカーボネート樹脂板または ABS 樹脂板をレーザー吸収材として用いた組合せに対して、所有するレーザー光源を組み付けた実験装置でレーザー照射を行ったところ、条件によっては樹脂板を溶着可能であることが確認できた。

次年度は、接合強度や気密性の低下の改善および過熱による障害の低減に資する材料の前処理手法を検討する。

参考文献

- [1] 本間 精一:実践 二次加工によるプラスチック製品の高機能化技術、株式会社エヌ・ティー・エス、pp. 126-130, 2015. 6. 8.
- [2] 早河 毅、河本 保典:樹脂材のレーザ溶着方法、特開 2008-302700, 2008. 12. 18.

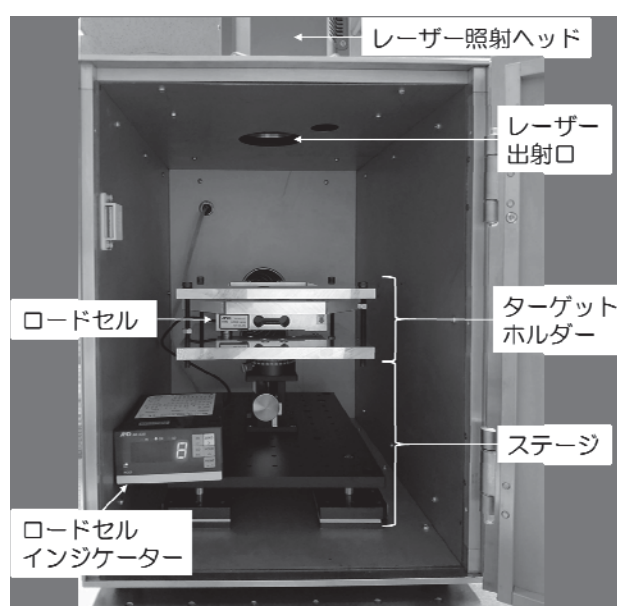


図3 実験装置の写真

生体組成の非侵襲計測技術の開発

電子情報科 研 究 員 下 村 義 昭

糖尿病の治療では、採血による血糖値の自己測定により、食事療法や薬物投与による血糖値のコントロールが必要となるが、1日数回の採血に伴う苦痛や採血針による感染等の問題がある。本開発では、血糖値等の微量な生体組成を体外から光を当てただけで測定できる計測技術の実現を目的とする。しかしながら、微量な生体組成の光学的測定では、生体組織による散乱、色素や脂肪などの夾雑物による吸収、測定部位の温度変化、及び拍動や測定部位の僅かな動きにより大きな測定誤差が生じる。ここでは、散乱や吸収の影響を排除する長崎県独自の計測手法TFDRSをベースに前記課題を克服できる生体組成の非侵襲計測技術を確立する。

1. 緒言

平成28年国民健康・栄養調査（厚生労働省）によれば、糖尿病患者は国内に1,000万人、その予備軍を含め2,000万人以上にもなり、深刻な国民病となっている。現状、糖尿病治療では採血による血糖値の自己測定により、食事療法や薬物投与による血糖値コントロールが行われているが、1日数回の採血に伴う苦痛や採血針による感染等の問題がある。また、平成20年度から生活習慣病の予防を目的とした「特定健診・特定保健指導」も高齢者医療確保法により義務付けられており、保健指導による経時的なメタボリック症候群の評価など、今後ますます予防目的での血糖値の自己測定が重要となる。

非侵襲タイプの血糖値計が開発されれば、採血の負担が軽減され、血圧や体重を計ることと同じように気軽に血糖値をモニターできる。また、リアルタイムに血糖値をモニターすることでインスリン投与のタイミング、及び食事・運動療法や薬物療法による治療方法の最適化を図ることができる。さらには、血糖値変動をきたさない食品の選択、あるいは運動をしながらの血糖値モニタリングによる食事・運動療法の効果判定とその患者の動機づけも期待される。また、糖尿病患者が痛みなどを理由に敬遠することなく血糖値の自己測定ができるようになれば、糖尿病の進行及び重篤な合併症発症の抑制に繋がり、ひいては医療費の大幅な低減が期待できる。

採血が不要な血糖値計として、皮下に細い針状のセンサー電極を刺して間質液中のグルコース値^[1]を持続的に測定できる持続グルコースモニター（CGMと呼ばれる）が米国で製品化されている。特定患者を対象に2022年から国内でも保険収載されているが、2週間で使い捨てのセンサー電極は約8,000円と高価で、センサー電

極を刺した部分で皮膚障害が生じる問題が報告されている。

血糖値の完全な非侵襲タイプの測定手法は、グルコースによる光吸収に基づく光計測手法を中心に国内外で盛んに開発されている^[2-4]。しかしながら、生体組織による散乱、色素や脂肪等の夾雑物による吸収、測定部位の温度変化、拍動や測定部位の僅かな動き等の影響を完全に克服できないため実用的な精度の実現は難しい。

本開発では、果実糖度の非破壊計測を目的に考案した光計測手法TFDRS（Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy）^[5]をベースに上記課題を克服できる生体組成の非侵襲計測技術を確立する。本報告では、令和5年度に試作した非侵襲測定装置について述べる。

2. 研究内容と結果

2. 1 非破壊計測手法TFDRS

TFDRSでは、果実等の被検体の1箇所からレーザー光などの単色光を照射し、異なる距離2か所で反射光を受光する。また、3つの波長 λ_k ($k=1, 2, 3$)で測定した反射光の強度比（反射率） $R = I_{\text{sig}} / I_{\text{ref}}$ を用いた下記式で表される相対吸光度比 γ を非破壊計測の指標とする。

式（1）で表される相対吸光度比 γ は散乱の影響を受けない物理量で果実糖度との高い直線相関を示す。これにより、従来の測定方法では数百種類の波長の光を必要とした果実糖度の非破壊計測をTFDRSではわずか数種類の波長の光で可能とした。

$$\gamma(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \frac{\ln(R(\lambda_3)) - \ln(R(\lambda_1))}{\ln(R(\lambda_2)) - \ln(R(\lambda_1))} \quad (1)$$

一方、生体は果実と異なり、水分、脂肪、蛋白、さらにはヘモグロビン色素等の多くの吸収因子(夾雑物)を含む。TFDRSを用いた生体組成計測では、波長の異なる複数の相対吸光度比 γ_k ($k=1, \dots, n$)を用いた下記1次多項式により、特定の生体組成 C を上記した夾雑物の影響を受けることなく推定することができる^[6]。

$$C = a_0 + a_1 \cdot \gamma_1 + \dots + a_n \cdot \gamma_n \quad (2)$$

2. 2 生体組成の非侵襲測定装置

試作装置の外観を図1に示す。本装置では、測定用光源に安定した単一波長の発振を可能とするDFBレーザーを複数波長で採用した。被験者の指先で測定した吸光度 $A(A = -\ln(R))$ を図2に示す。記号(●)で示した実験値は、測定に用いた受光ファイバーの伝送効率や受光素子の感度等を波長毎に校正している。また、実線で示した理論値は、生体を水分、脂肪、蛋白等が一樣に分布した光散乱体と仮定して散乱理論^[7]を用いて計算した。実験値の理論値に対する相対誤差は6.9%以下を示しており、理論値どおりの吸光度を得ることができた。

3. 結言

TFDRSを活用した生体組成の非侵襲計測装置を試作した。被験者の指先での測定では、理論値どおりの吸光度を得ることができた。しかしながら、拍動や体動で生じる時間的な吸光度変動が目標とする吸光度の測定精度に比べて約300倍と大きく、試作装置では回避できない。今後は、上記の吸光度変動を低減する手法を検討して試作装置の改良に反映する。

参考文献

- [1] S. N. Thennadil et al.: "Comparison of glucose concentration in interstitial fluid, and capillary and venous blood during rapid changes in blood glucose levels", Diabetes Technology & Therapeutics, Vol. 3, No. 3, pp. 357-365, 2001.
- [2] K. Maruo et al.: "Noninvasive Blood Glucose Assay Using a Newly Developed Near-Infrared System", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 9, No. 2, pp. 322-330, 2003.
- [3] R. Kasahara et al.: "Noninvasive glucose monitoring using mid-infrared absorption spectroscopy based on a few wavenumbers", Biomedical Optics Express, Vol. 9, No. 1, pp. 289-302, 2018.

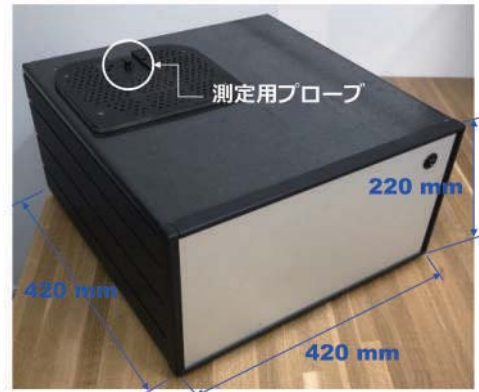


図1 試作装置の外観

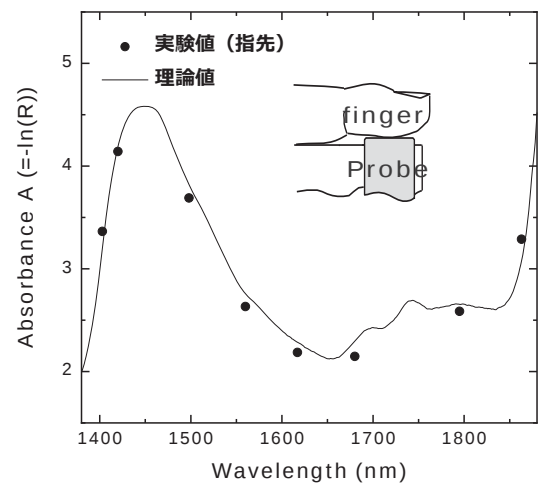


図2 被験者の指先で測定した吸光度。記号(●)は実験値を、実線は理論値をそれぞれ示す。

- [4] J. W. Kang et al.: "Direct Observation of glucose fingerprint using in vivo Raman Spectroscopy", Science Advances, Vol. 6, No. 4, pp. 1-8, 2020.
- [5] 下村義昭: "近赤外レーザーを用いた果実糖度の非破壊計測技術", レーザー研究, Vol. 39, No. 4, pp. 233-238, 2011.
- [6] Y. Shimomura et al.: "Noninvasive Measurement of Absolute Hemodynamic Components in Human Tissue Using Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy", Proc. 22nd Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, pp. 274-275, 2009.
- [7] T. J. Farrell et al.: "A diffusion theory model of spatially resolved, steady-state diffuse reflectance for the noninvasive determination of tissue optical properties in vivo.", Med Phys Vol. 19, No. 4, pp. 879-888, 1992.

マルチスケール概念に基づく膜透過シミュレーションの研究(第3報)

工業材料・環境科 専門研究員 重 光 保 博

化学工学の中心分野の一つである膜分離現象において、その分子レベルでの機構解明はプロセス制御の観点から重要な課題である。本研究は、マルチスケール連成シミュレーション技術の膜透過プロセスへの展開を目指すとともに、実用的観点から回帰モデルに基づく排水処理プラント制御（ソフトセンサー）への展開も試みた。前年度までの分子レベルの知見を踏まえつつ、3年間の研究を総括する。

1. 緒言

近年、人工知能やIoT等のデジタル技術トレンドと並行して、シミュレーション技術のモノづくりへの活用が進み、シミュレーションは実験の検証にとどまらず、モノづくりを主導する役割を果たしつつある。長崎県では海洋関連工学・再生可能エネルギー分野を推進しており、Computer-Aided Engineering (CAE) は関連インフラ設計や設置地域の地理・気象解析へ貢献するシミュレーション技術として定着しつつある。

流体解析はCAEの重要な一分野であり、流体力学の基礎方程式であるNavier-Stokes方程式に基礎をおいている。その一方、ミクロな見地からは流体の微細構成要素は溶媒分子であり、溶媒分子間の相互作用を直接計算する分子動力学シミュレーションで追跡することも可能である。膜分離プロセスのような界面での物質交換を伴う非平衡熱力学現象では、マクロ流体方程式で詳細機構を解明することは難しい。一方、ミクロ分子動力学法で現象を直接追跡することは、計算コストの観点から非現実的である。そのため、両者の中間であるメソスケールシミュレーションや粗視化技法が提案されているが、汎用的な手法は確立していないのが現状である。

長崎県工業技術センターでは、ミクロ現象とマクロ現象が混在化する複雑事象^[1]を解析ターゲットとした方法論開発と応用研究を進めている。

前段研究「連成統合シミュレーション技術の開発と普及支援（平成27年度～平成29年度）」では、構造解析・流体解析ツールである「連成解析システム」を活用して構造流体連成シミュレーションの性能評価とCAE関連企業の技術支援と普及活動を行った^[2]（図1）。

さらに前段研究「複雑事象に対応した連成解析技術の開発（平成30年度～令和2年度）」では、マルチスケールシミュレーション環境の構築とその性能評価を目的として、（1）水分子の膜透過モデルに対するマクロ流体力学とミクロ分子動力学の比較（2）粗視化法を用いた有機溶媒・溶液系の分子動力学シミュレーションを実施した^[3]（図2）。

本研究では、マルチスケール複雑事象である膜透過現象^[4]を解析対象とする。ミクロとマクロをつなぐ「スケールの壁」を克服するため、粗視化法や非平衡MD法などの新規手法が模索されている。

最終年度は、回帰分析に基づくデータ駆動予測技術（ソフトセンサー）の応用展開として、排水処理プラントの運転データを用いた数理モデル構築を行い、膜差圧上昇の予測に適用した。

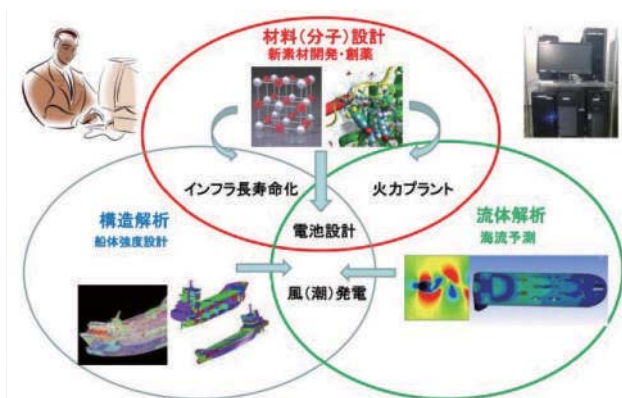


図1 連成解析のイメージ図

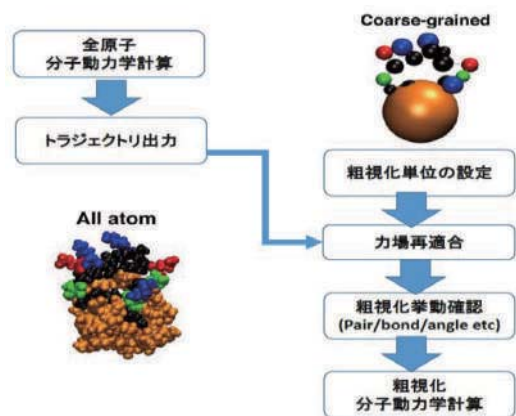


図2 MS-CG粗視化法のスキーム

2. セルロースナノファイバーと各種溶媒との相互作用：ハロゲン相互作用解析

機能性材料として注目されるセルロースナノファイバー（CNF）は、その優れた物理化学的特性を生かした環境調和型材料として様々な産業用途が開拓されつつある（図3）。ナノセルロースの造粒技術を活用した各種ポリマーとCNFのコンポジット化ビーズが作製されている^[5]。HPLC解析の結果からCNFと各種ハロゲン溶媒（塩化メチレン/クロロホルム/ブロモホルム）との特異的な相互作用が検出されていることから、ハロゲン相互作用がCNFとポリ塩化ビニルとのコンポジット化ビーズ安定形成の鍵と推測されている。しかし、各種ビーズの生成機構および化学的安定性の起源については、詳しい理論解析が行われていない。本研究では、ナノコンポジット化ビーズ形成のdriving forceの一つと考えられるハロゲン相互作用について、高精度量子化学計算を用いて詳しく解析した。

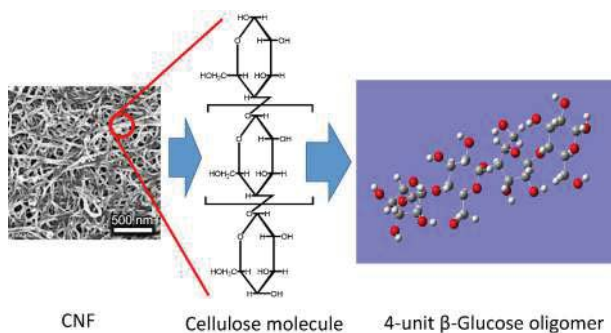


図3 CNFの化学構造

ハロゲン相互作用を詳細に解析することを目的とした相互作用エネルギー解析をcounterpoise補正で行った。計算にはGaussian09/Gaussian16を使用し、高精度ab-initio法（MP2、CCSD(T)）および密度汎関数法（DFT）を採用した。計算コスト制約のため、CNF（ β -グルコース）は H_2O 、PVCは CH_3Cl で単純化し、酸素-塩素間のハロゲン相互作用エネルギーを精密計算した（図4）。自然エネルギー分割解析はRHF/augcc-pV5Zレベルで実行した。

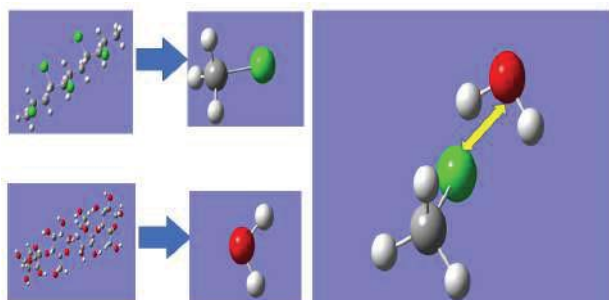


図4 CNF-ハロゲン相互作用の計算モデル

MP2 レベルでは、6-31G(d)から基底関数を順次大きくしてComplete Basis Set Limit (CBS)基底関数極限での精密評価を行い、ハロゲン相互作用エネルギーによる安定化は約1.2 Kcal/molと算出された。ただし、cc-pVDZ以下のpoor basis setを用いると、ハロゲン結合を再現できず、誤った結果を与えた。CCSD(T)では、6-31G(d)から基底関数を順次大きくしてCBS基底関数極限での精密評価を行い、MP2と同様に約1.2 Kcal/molが得られた。ただし、6-31G(d)以下のpoor basis setを用いると、ハロゲン結合を再現できなかった。以上の結果から、ハロゲン相互作用を適切に計算するには、MP2以上の電子相関計算とValence-Triple以上の基底関数が必要とされることが明らかとなった。この計算レベルは、溶媒中のナノコンポジット化ビーズを対象とした大規模計算を想定した場合、現実的な計算戦略として採用することが難しいと判断された。

これに対して、DFTレベルでは、計算の高速性に配慮して、基底関数は6-31G(d)に固定して各種汎関数の性能を調べた。スタンダードなDFT手法（B3LYP/6-31G(d)）では、ハロゲン結合が生成しないという誤った結果を与えた（Counterpoise補正）。対照的にMinnesota系の汎関数（M06-2X, MN-15）はハロゲン結合を再現する結果を与えた。分極相互作用補正を考慮した汎関数（wB97XD, DSD-PBEP86）も良好な結果が得られた。Double-Hybrid汎関数のパフォーマンスは良好であった（B2GP-PLYP, DSD-PBEP86）が、長距離補正の効果は不明であった（CAM-B3LYP, LC-wPBE）（図5）。

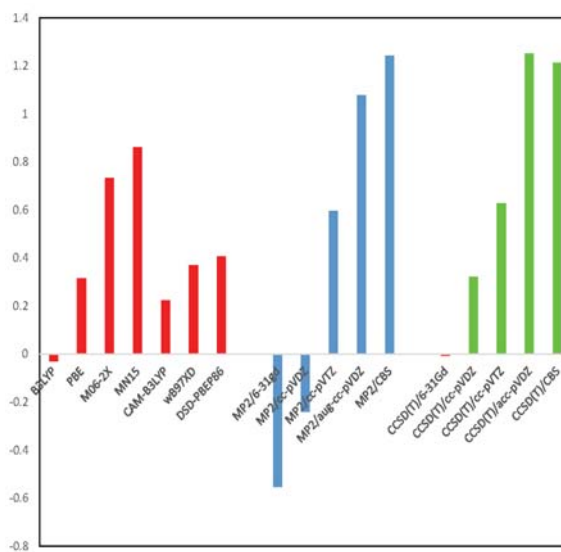


図5 各手法の理論結合エネルギー（MP2/CCSD(T)/DFT）

3. ポリウレタン触媒を用いた CO₂ 変換ケミカルリサイクル反応の量子化学解析

CO₂ を出発原料とする有用物質の合成や、有機廃棄物を再利用するケミカルリサイクル反応が注目され、希少金属や有害金属を使わないメタルフリー有機触媒を用いた低環境負荷の化学反応が求められている。

最近、ポリウレタン触媒を用いた高変換効率・高ターンオーバーを達成した興味深い CO₂ ケミカルリサイクル反応が報告されている^{[6][7]}。この反応の基礎的メカニズムを解明することを目的として、一連の量子化学計算を実行した (図6)。

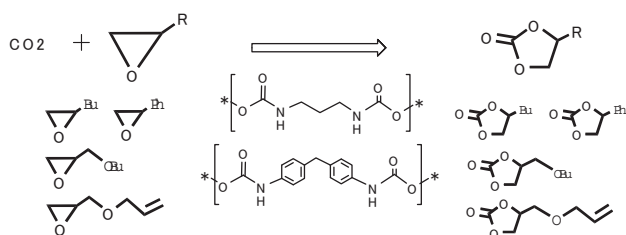


図6 ポリウレタン触媒によるケミカルリサイクル反応

このケミカルリサイクル反応は、各種ポリウレタン触媒を用いて、CO₂ とエポキシサイド誘導体から5員環カーボネート誘導体を生成するサイクル反応機構である。計算コスト制約のため、反応物は、エチレンオキシサイド (エポキシサイド誘導体) とエチレンカーボネート (5員環カーボネート誘導体) へそれぞれ簡易モデル化した。ポリウレタン触媒は、直鎖誘導体モノマーと環状誘導体モノマーへそれぞれ簡易モデル化した (図7)。触媒サイクル反応機構の量子化学解析には、Gaussian^[8]と GRRM^[9]を組み合わせて用い、溶媒効果は SCRf-SMD 法で考慮した。まず 3-21G 基底関数を用いた反応機構全体の定性的なエネルギープロファイルを求めた。各ステップの安定体および遷移状態は GRRM/MC-AFIR, GRRM/DS-AFIR で求め、GRRM/LUP 経路を検証した。その後、6-31G(d) 基底関数を用いた GRRM/Repathで計算精度を上げて再検証を行った。

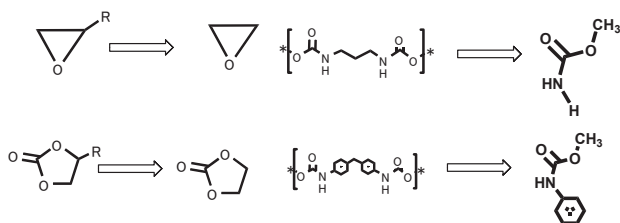


図7 反応物およびポリウレタン触媒の簡易モデル化

直鎖ポリウレタンモデル触媒の計算結果を示す。反応は3ステップに分けられ、メチルカルバメートへのエチレンオキシサイドの付加反応 (path-B)、次に CO₂ の付加反応 (path-C)、メチルカルバメートが再生する過程でエチレンカーボネートが分離生成する (path-D)

(図8)。path-Bの活性化障壁が最も高く、このステップが事実上の反応ボトルネックとなっている。直鎖中間体には2つの互変異体 (imine 型/zwitterionic 型) が考えられるが、真空条件では分極が大きい zwitterionic 型は安定に存在できず、imine 型は分子内水素結合を形成して安定構造を取り、反応経路に参与する (図9)。溶液中では path-B の活性化障壁が顕著に低下する (図10)。

環状ポリウレタンモデル触媒についても、活性化障壁の低下を溶媒効果が促進する計算結果が得られ、溶媒中での反応加速が示唆された。

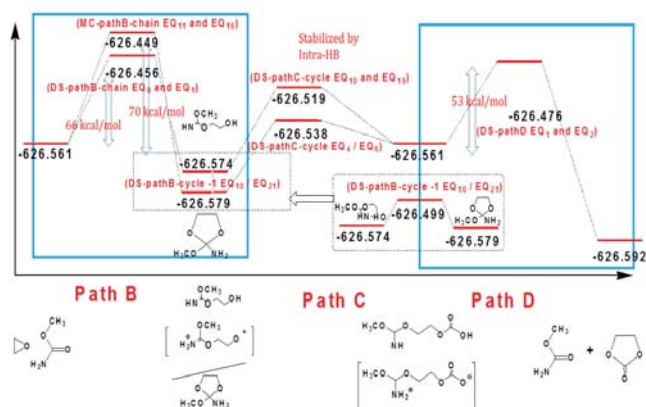


図8 直鎖ポリウレタンモデル触媒の反応機構 (気相)

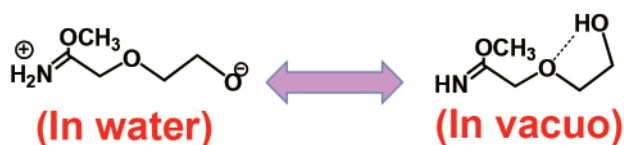


図9 直鎖ポリウレタンモデル触媒の変異 (溶媒/真空)

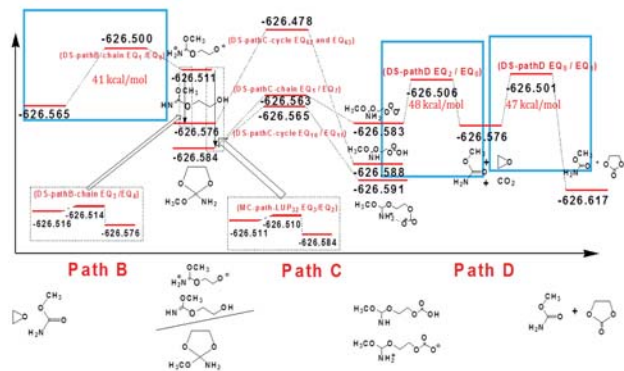


図10 直鎖ポリウレタンモデル触媒の反応機構 (水中)

4. 膜分離プロセスにおける差圧上昇予測

種々の污水处理プラントにおいては、対象とする汚水の性質によって様々な技術が融合して用いられる。このうち、活性汚泥法は、生活下水や工業廃液などの広範な污水处理に対して汎用的に用いられる優れた処理法であり、微生物によって活性汚泥を分解したのち汚濁物質を沈降させて固液分離を行う。溶液中に残存した微小な汚濁物質は、膜分離プロセスを介して浄化することで、再利用水を精製することができる。この固液分離と膜分離を併せた污水处理と再利用水の精製は、膜分離活性汚泥法(Membrane BioReactor: MBR)として広く用いられている^[10]。

MBR 法を用いた污水处理の大きな問題として、ファウリング(汚濁物質の目詰まり)によって膜抵抗が大きくなった結果、分離膜の上昇が生じる。ファウリング防止のため、汚濁物質を除去する薬液を加え、運転方向とは逆に水を流して膜の洗浄を行う必要がある(逆洗)。しかし逆洗にかかるコストや、逆洗中は運転が停止することから、逆洗回数を可能な限り低減して効率的な運転を行う必要がある。解決策として、ファウリングに強い過膜の開発と、ファウリング回数の最適化が考えられ、前者は分子レベルでの材料設計、後者はマクロなプラント制御技術になる。本研究では後者の試みとして、Brinkman らが報告した MBR 試験ミニプラント運転を CANARY System を用いて行ったデータを用いて^[11]、回帰モデルに基づく膜差圧上昇予測を行い、その結果を検証した。

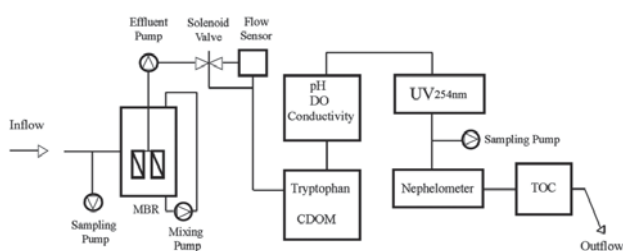


図 1.1 MBR 試験ミニプラントの概要図^[11]

4. 1 モデリング・計算手法

MBR 試験ミニプラントの CANARY System による運転は、膜バイパス試験(汚濁塊(Mixed Liquid Suspended Solids: MLSS)を流出口に直接流入させる: ろ過膜が不能になった状態を想定)、およびスパイク試験(バクテリア塊を流入させる: 高濃度の微生物汚染を想定)の 2 パターンのデータが取得されている。

本研究では、膜バイパス試験のデータを用いた。

記述子(説明変数)として、伝導度(Conductivity)、溶存酸素(D.O.)、汚濁度(Turbidity)、吸光度(UV₂₅₄)、炭素量(TOC)、溶液色相(CDOM)、の各測定データを用いた。

目的変数として、CANARY System の正常動作を仮定して、Alarm 指数を差圧と読み替え、膜差圧の学習と予測を行った。

差圧予測プログラムは、金子らによって開発された Python ライブラリ DCEKIT^[12]を適宜改変して用いた。差圧予測モデル構築^[13]には、一連の線形(Partially Least Square: PLS)および非線型(Support Vector Regression: SVR)回帰分析を用い、記述子の重要度解析(Cross-validated Permutation Feature Importance: CVPFI)^[14]、時間遅れアルゴリズム(Moving Window: MW)をそれぞれ用いた。

4. 2 解析結果

4. 2. 1 差圧上昇予測(時差更新を考慮しない)

膜バイパス試験データは(図 1.2)、各説明変数の取得間隔が均一でないため、全説明変数を同時取得した時刻分だけのデータを抽出した。この 321 時刻に相当するデータのうち、前半の 263 個を学習データ、後半の 58 個を予測データとして分割し、5-fold クロスバリデーションによって学習モデルを構築し、膜差圧の予測を行った。

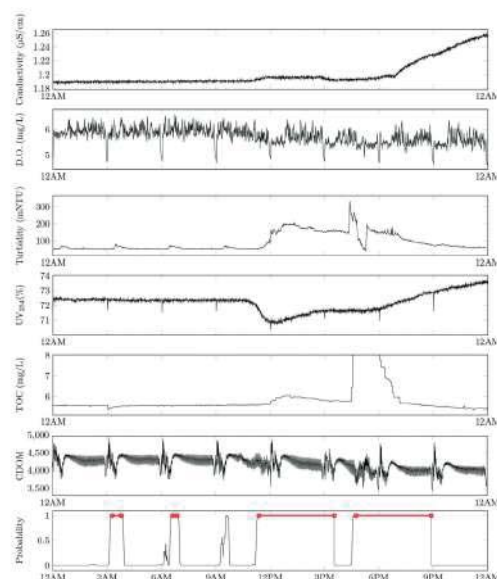


図 1.2 各説明変数と CANARY の時系列データ^[11]

PLS 線形回帰分析について、モデル構築および予測結果を示す。時間遅れアルゴリズムを使用しない場合、膜差圧上昇の予測に失敗する。CVPFI 解析の結果から、最も重要な説明変数は汚濁度 (Turbidity) であることが示唆された (図 1 3)。

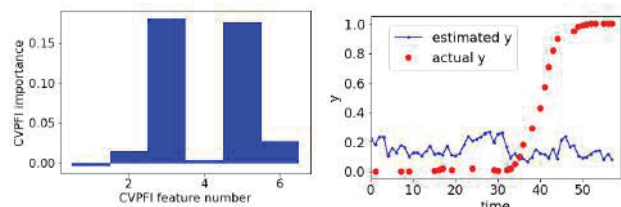


図 1 3 PLS の CVPFI 解析 (左) および予測 (右)

次に SVR 非線形回帰分析について、モデル構築および予測結果を示す。時間遅れアルゴリズムを使用しない場合、膜差圧上昇の予測に失敗する。CVPFI 解析の結果から、重要な説明変数は汚濁度 (Turbidity) と炭素量 (TOC) であることが示唆された (図 1 4)。

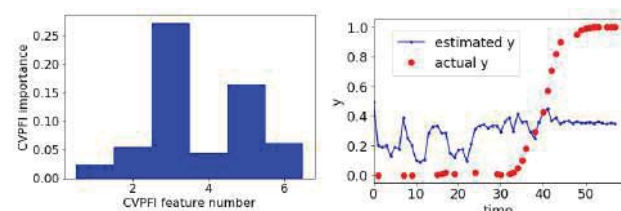


図 1 4 SVR の CVPFI 解析 (左) および予測 (右)

4. 2. 2 差圧上昇予測 (時差更新を考慮)

Moving Window アルゴリズムに基づき、時間遅れデータを説明変数に加えて古いデータを更新しつつ、回帰モデルを逐次的に構築した。

MW-PLS 線形回帰分析について、モデル構築および予測結果を示す。時差を考慮することで、膜差圧上昇の予測に定性的に成功した。CVPFI 解析の結果は、時間遅れの説明変数がリアルタイムの膜差圧に強く影響していることを示している。各データを取得している位置が MBR よりも後方にあり、MBR とデータ取得地点の時差に基づく履歴を考慮する必要があることが示唆された (図 1 5)。

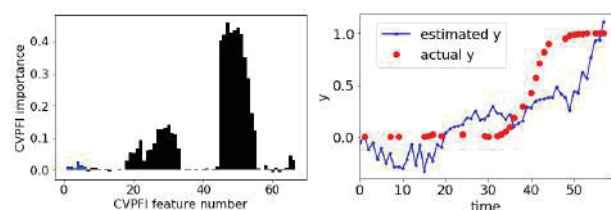


図 1 5 MW-PLS の CVPFI 解析 (左) および予測 (右)

MW-SVR 非線形回帰分析について、モデル構築および予測結果を示す。時差を考慮することで、膜差圧上昇の予測に定性的に成功した。CVPFI 解析の結果は、時間遅れの説明変数がリアルタイムの膜差圧に強く影響していることを示している。MW-PLS と比較して、MW-SVR では膜差圧の上昇変化を的確に予測していることがわかる (図 1 6)。

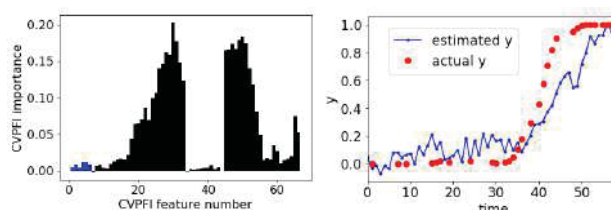


図 1 6 MW-SVR の CVPFI 解析 (左) および予測 (右)

5. 結言

本報告は、膜透過現象に対してマルチスケールシミュレーションとケモインフォマティクスの両分野からアプローチした当該研究の総括である。シミュレーションとAIの融合技術は著しく発展しているが、実際に現場で有効活用するために解決すべき技術課題は数多く残されている。

ナノコンポジット機能性材料への展開として、セルロースナノファイバーと各種ポリマーとの各種相互作用のうち、ハロゲン相互作用に対する詳細なエネルギー解析を実行した。CNF (β -グルコース)は H_2O 、PVCは CH_3Cl で単純化したモデル系に対して、高精度分子軌道法 (MP2, CCSD(T)) および DFT 法による counterpoise 補正計算を実行した。MP2 以上の電子相関計算と Valence-Triple 以上の基底関数が必要とされること、Minnesota 系汎関数 (M06-2X, MN-15)、分極補正汎関数 (wB97XD, DSD-PBEP86)、Double-Hybrid 汎関数の有効性を確認した。

カーボンニュートラル化学への展開として、ポリウレタン触媒を用いたケミカルリサイクル反応の量子化学解析を行った。当該反応は CO_2 とエポキシサイド誘導体から5員環カーボネート誘導体を与え、 CO_2 を資源とした工業中間体合成反応としてSDGs推進の観点から非常に興味深い。反応機構の計算解析を行い、特に、溶媒効果の重要性、双性イオン型中間体の反応への関与、ポリウレタン触媒の活性へのアリアル基有無の影響等について検討した。

膜透過現象の工業プロセスへの応用展開例として、MBR試験ミニプラント運転データに対する回帰モデ

ルに基づく膜差圧上昇予測を行なった。線形および非線形回帰手法に基づいて膜差圧予測モデルを構築し、その有効性を検証した。学習データに時差データを加えてモデル構築を逐次的に更新することによって予測精度が向上することが示された。

謝辞

本研究の推進にあたり、繊維ろ過技術全般に渡り議論していただいた協和機電工業株式会社水処理プロジェクトチームの各位に感謝する。セルロースナノファイバーの実験データを提供・議論していただいた熊本県産業技術センターの永岡昭二博士、ポリウレタン触媒ケミカルリサイクル反応の実験データを提供・議論していただいた長崎大学大学院工学研究科の本九町卓助教に感謝する。本研究の一部は、自然科学研究機構計算科学研究センターのスーパーコンピューターシステム「NEC LX 高精度分子シミュレーター」を使用して実行された。

参考文献

- [1] 川崎恭治、「非平衡と相転移－メソスケールの統計物理学」、朝倉書店(2000).
- [2] 重光保博、長崎県工業技術センター研究報告、49, pp. 27-30 (2020).
- [3] 重光保博、長崎県工業技術センター研究報告、50, pp. 21-26 (2021).
- [4] H. Ridgway, J. Orbell and S. Gray, J. Membrane Sci., 524, pp. 436-448 (2017).
- [5] S. Nagaoka, Cellulose Communications, 28(1), pp. 7-12, (2021).
- [6] S. Motokucho, Y. Takenouchi, R. Sato, H. Morikawa, H. Nakatani, ACS Sus. Chem&Eng., 8, pp. 4337-4340 (2020).
- [7] S. Motokucho, H. Morikawa, Chem. Comm., 56, pp. 10678-10681 (2020).
- [8] Gaussian; <https://gaussian.com/>, (accessed in 2024).
- [9] GRRM; <https://iqce.jp/GRRM/>, (accessed in 2024).
- [10] V. Lazarova, S. M. Ruel, B. Barillon, P. Dauthuille, Water Sci. Tech., 66, pp. 2056-2064 (2012).
- [11] A. Leow, J. urkhardt, W. E. Platten III, B. Zimmerman, N. E. Brinkman, A. Turner, R. Murray, G. Sorial, J. Garland, Environ. Sci. Water. Res. Technol., 3, pp. 224-234, (2017).
- [12] DCEKIT, <https://github.com/hkaneko1985/dcekit/>, (accessed in 2024).
- [13] 金子弘昌、船津公人、J. Comp. Chem. Jpn., 10(4), pp. 131-140 (2011).
- [14] H. Kaneko, Anal. Sci. Advances, 3(9), pp. 278-287 (2022).

設計パラメータを用いたシミュレーション省力化システムの開発

(シミュレーション技術を用いた地場企業の設計工程支援)

工業材料・環境科 専門研究員 入 江 直 樹

近年における高性能かつ廉価で使いやすいパーソナルコンピュータやオペレーティングシステムの普及は汎用計算力学ソフトウェアの利便性を高め、シミュレーション技術の発展に大きく寄与している。地場企業からは当該汎用計算力学ソフトウェアを用いたシミュレーション技術を自社製品開発に活かして製品開発期間の短縮化や差別化技術の創出につなげたいとの要望を受けている。一方で、シミュレーション技術を設計工程に活用する際製品形状によっては多数の設計パラメータが存在し、性能に対する各設計パラメータの影響度が不明であるため、多くのシミュレーションを必要とする場合がある。これを受けて、本研究では形状に関連する各設計パラメータが機器の性能に及ぼす影響度を調査して各設計パラメータの最適値を探索するシステムを開発する。本研究では対象モデルの特定の寸法を指定することにより、3次元デジタル形状の作成、流体解析のシミュレーション結果取得、及び、その結果から品質工学を用いて各寸法が性能に及ぼす影響度を評価するソフトウェアを試作した。

1. 緒言

「模擬実験」を意味するシミュレーションは自然科学や社会科学などの様々な分野における課題を解決へと導く一つ的手段として利用されている^[1]。本研究におけるシミュレーションは主に工学分野における数学モデルに基づいた計算機シミュレーションを対象としている。

工学分野の技術開発において、当該シミュレーションは計算機であるパーソナルコンピュータを用いて実施でき、仮想的な模擬実験を繰り返すことにより製品に要求される仕様や品質を設計開発の初期段階から作り込むことができる^[2]。これに伴い、多くの汎用計算力学ソフトウェアが開発され商用化されており、図1に示すように、例えば配管内部の流れを対象とした流体解析や伝熱、構造、応力等のシミュレーションを有限要素法や有限体積法などを用いて計算して流れの速さやその温度をコンター図や動画を用いて表示することができる^[3]。

地場企業は当該ソフトウェアを活用して自社製品を評価しているが、特に各設計パラメータの性能に対する影響度が不明である際に、数多くのシミュレーションを実施する必要があり時間を要するといった課題を抱えている。

これを受けて、本研究では形状の各設計パラメータが設計開発する機器の性能に及ぼす影響度を調査して各設計パラメータの最適値を探索するシステムを開発する。当該システムにおいては3次元デジタル形状の作成、シミュレーションを用いた性能評価と最適な設計パラメータを選出するソフトウェアから構成する。

令和5年度は令和3年度から令和4年度にかけて開

発した3次元デジタル形状作成ソフトウェア^[4]とシミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアを組合せたシステム^[5]を用いて、各設計パラメータが機器に及ぼす影響度を品質工学を用いて評価するシステムについて検討した、その有効性について報告する。

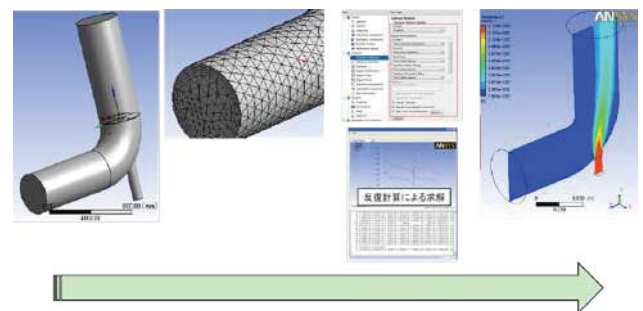


図1 計算機シミュレーション例

2. 実験方法と結果

2. 1 品質工学を用いた機能性評価

図2に本研究における品質工学^[6]を用いた機能性評価のためのダイアグラムを示す。設計対象は配管の流路形状、入力にあたる信号因子はエアの流入量、出口となる評価特性に圧力損失、ノイズ因子に外乱、制御因子に各設計パラメータとなる配管流路の各寸法を設定した。ノイズ因子はエアの温度、流路入口における乱流強度、乱流粘性比の三因子、制御対象の配管流路の形状を制御因子である各設計パラメータにて指定した際に、所定のエア流入量に対する圧力損失を流体解析シミュレーションソフトウェア (Ansys Fluent 2021R2) を用いて計算して配管流路形状の機能性を評価する。

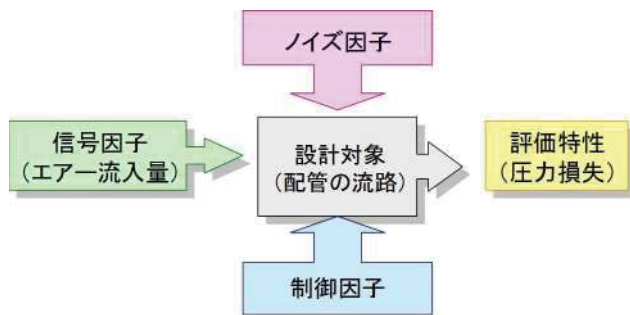


図2 機能性評価のためのダイアグラム

2.2 設計対象のモデル

図3に設計対象のモデルを示す。配管内部の流路を抽出した形状を示しており、表1は制御因子として設定した8種類の寸法値及び水準である。当該形状は3DCADソフトウェアであるAnsys Discovery(ver 2021R2)を用いて作製されており、当該ソフトウェアの機能であるヒストリートラッキングにて制御因子の寸法値をパラメータ化している。

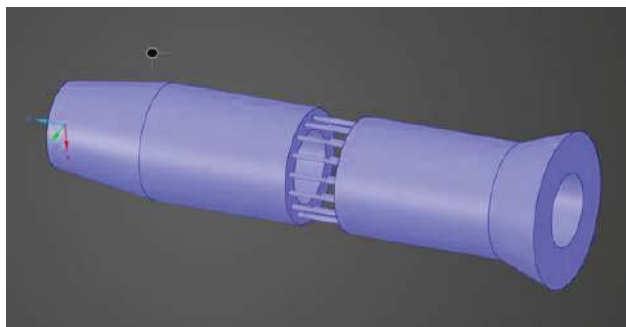


図3 設計対象のモデル

表1 制御因子の寸法値

記号	制御因子名	水準1	水準2	水準3
A	直径	0	-3	-
B	ボルト穴径(出口側)	0	1.5	3
C	ボルト穴径(入口側)	0	1.5	3
D	本数	16	14	12
E	フランジ長さ	0	-5	-10
F	小径テーパ長さ	0	-5	-10
G	大径テーパ長さ	0	5	10
H	大径テーパ直径	0	5	10

2.3 L18 直交表

表2は本研究にて作製したL18 直交表を示しており、2水準を1つ、3水準を7つとした制御因子を設定し

て合計8つの制御因子により評価する。L18 直交表は総当たり 4374 通りの組み合わせの実験に対して、18 回の実験を実施して最もSN比が良くなる最適条件を推定する。本研究において L18 直交表は Microsoft Office 2019 Excelを用いて作製されている。番号は表1に示すように、各制御因子の水準に対応して示しており、各制御因子の水準を用いて 18 通りの配管流路の形状を決定している。例えば実験 No.10 の組み合わせの際の形状を図4に示す。

表2 L18 直交表

実験 No.	制御因子							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

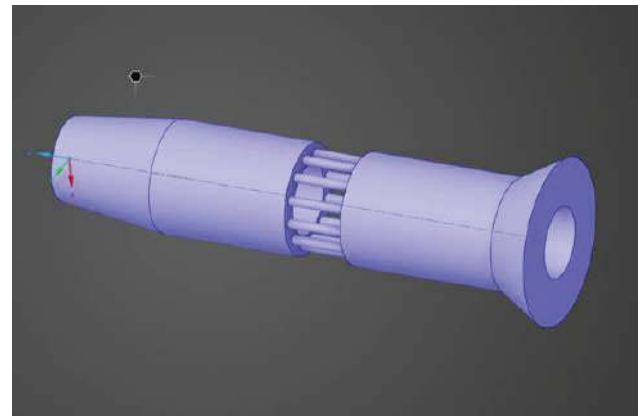


図4 実験No.10のモデル形状

2.4 設計パラメータの評価処理ソフトウェアの機能

図5は設計パラメータの評価処理ソフトウェアの機能が示されている。当該ソフトウェアを実行することにより、L18 直交表により選別した寸法値を用いて作成された設計対象モデルのシミュレーション結果をExcel ファイルから採取して、その18通りの数値データからSN比、傾き、感度の算出、及び要因効果図を作成する。

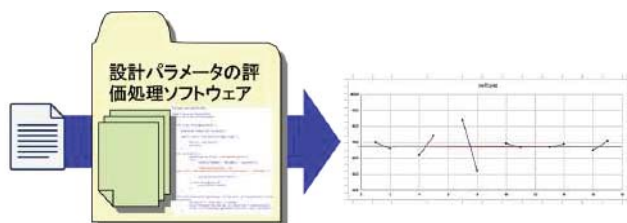


図5 設計パラメータの評価処理ソフトウェアの機能

2. 5 実験方法

図6は本研究におけるシミュレーション省力化システムのダイアグラムを示しており、Microsoft Office 2019 Excel、3次元デジタル形状作成ソフトウェア、シミュレーションを用いた性能評価ソフトウェア、Ansys Workbench(Ver. 2021R2)、Visual Studio 2019、設計パラメータの評価処理ソフトウェアから構成している。

Microsoft Office 2019 Excel には L18 直交表により選別された設計パラメータである各寸法値とノイズ因子である境界条件の各数値が入力されている。3次元デジタル形状作成ソフトウェアは図7に示すように、当該ソフトウェアを実行することにより、初期形状として予め用意した3次元デジタル形状の寸法値を変更して所望の形状を作成する。当該ソフトウェアは本年度においては前述したように Ansys Discovery(Ver 2021R2)を用いて開発しており、制御因子となる形状の寸法値をパラメータ化している。シミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアは図8に示すように、当該ソフトウェアを実行することにより、対象の3次元デジタル形状に対してメッシュ作成、境界条件の付与、計算、計算結果の保存までの処理を自動で実施する。本研究においては信号因子、ノイズ因子を入力することとなる境界条件と計算結果の値をパラメータ化している。当該3次元デジタル形状作成ソフトウェアとシミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアは、フレームワークである Ansys Workbench 上の要素アプリケーションとして作動する。

当該シミュレーション省力化システムの手順は初期の3次元デジタル形状を作成して、その形状におけるメッシュ作成、境界条件の付与、計算、計算結果の保存を予め実施する必要がある。変更する形状の寸法、境界条件、計算結果を図9に示すようにパラメータ化しており、特定の名前が付けられテーブルに表示される。当該テーブル上の数値を変更して再度読み込ませ

ることにより変更した寸法値が形状に反映された後、メッシュ作成、境界条件の付与、計算が実施され、計算結果となるパラメータ値も変更される。

当該シミュレーション省力化システムの初期計算後の動作を図10のフローチャートに示す。Visual Studio 2019 を用いてプログラムを実行することにより、Excel に入力されている L18 直交表により選別された寸法値と境界条件の数値を取得後、3次元デジタル形状作成ソフトウェアの機能により形状が変更され、シミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアの機能により計算結果が保存される。当該計算を所望の回数実施した後、設計パラメータの評価処理ソフトウェアの機能により要因効果図が作成される。

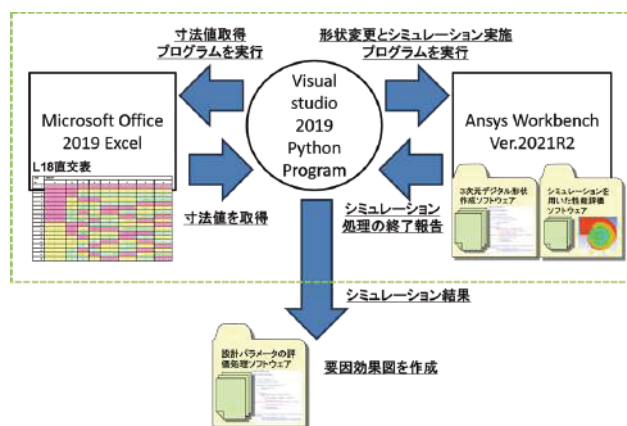


図6 シミュレーション省力化システムのダイアグラム



図7 3次元デジタル形状作成ソフトウェア



図8 シミュレーションを用いた性能評価ソフトウェア

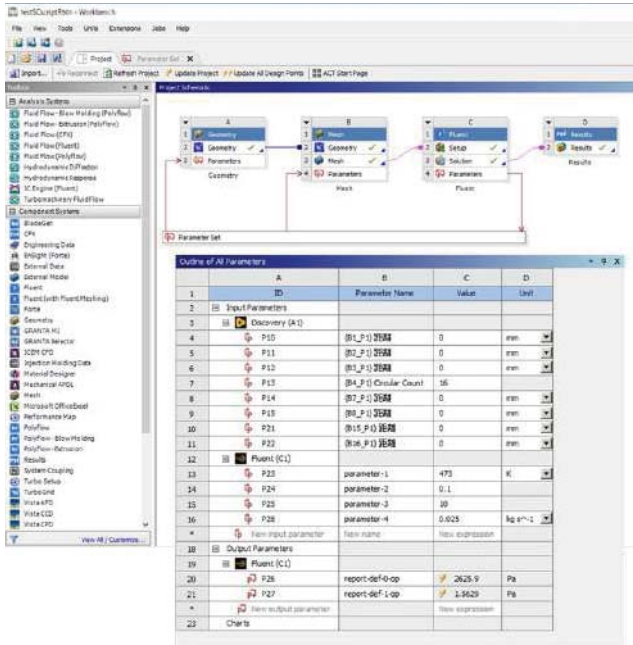


図9 各条件のパラメータ化

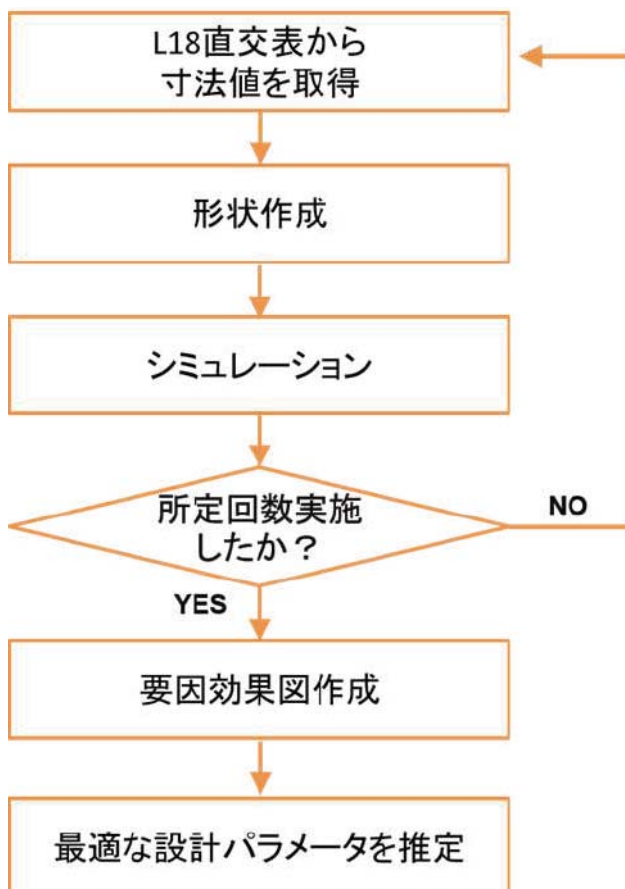


図10 シミュレーション省力化システムのフローチャート

2. 4 実験結果

シミュレーション省力化システムの構成と機能を用いて、ノイズ因子は表3に示す3因子2水準として図10に示すフローチャートの処理を実施した。計算の組み合わせはノイズ因子を表4に示すL4直交表を用いて選別するため、寸法値のパターン数:18通りかけるノイズ因子のパターン数:4通りで信号因子1パターンにつき78通りとなる。当該78通りの計算結果を得て図11と図12に示す要因効果図を得るまでに要した時間は約8時間であった。本研究におけるシミュレーション省力化システムはVisual Studio 2019のPythonを開発環境として開発している[7][8]。

表3 ノイズ因子の項目と水準

因子	水準	
	水準1	水準2 (現状)
温度	473	293
乱流強度	0.1	0.04
乱流粘性比	10	4

表4 L4直交表

	N1	N2	N3	N4
P	1	1	2	2
Q	1	2	1	2
R	1	2	2	1

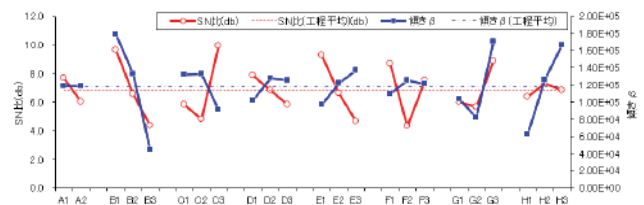


図11 要因効果図 (SN比と傾き)

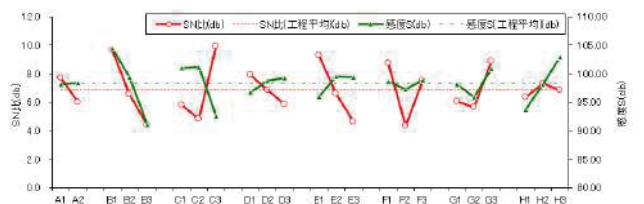


図12 要因効果図 (SN比と感度)

3. 考察

Visual Studio 2019のPythonを開発環境として3次元デジタル形状作成ソフトウェア、シミュレーションを用いた性能評価ソフトウェア、設計パラメータの評価処理ソフトウェアを組合せたシミュレーション省力化システムを開発した。信号因子:1パターン、ノ

イズ因子：3パターン、制御因子：8パターンとして、ノイズ因子をL4直交表、制御因子をL18直交表により選別した78通りの計算を実施して要因効果図を作成するまでに要する時間は約8時間であった。配管の流路設計において形状を絞り込むまでに要する工数は3日間程であり約33%の工数削減となった。シミュレーション省力化システムの処理時間は使用するパーソナルコンピュータの性能に依存するが省力化の効果指標として測定した。

4. 結言

本研究の成果について以下に要約する。

- 1) 開発したシミュレーション省力化システムはMicrosoft Office 2019 Excel、Ansys Workbench (Ver. 2021R2)、Visual Studio 2019 を用いて実行されるプログラムを構成として形状寸法をパラメータとするパラメトリックスタディが可能であった。
- 2) 3次元デジタル形状作成ソフトウェアの機能によりExcelに所望の寸法値を入力することで形状を変更でき手作業と比較して効率的であった。
- 3) 品質工学に基づいた要因効果図を用いて最適な設計パラメータ候補を効率的に絞り込むことができ、設計品質向上に向けた支援方法として有効性がある。

令和3年度から令和5年度にかけて研究開発したシミュレーション省力化システムは、地場企業との共同技術開発などの技術支援に活用している。

謝辞

本研究事業を推進するにあたり、株式会社ツバキ・ナカシマ世知原工場の古田浩之課長と中西商事株式会社長崎営業所の福田幸作課長から多大なるご協力とご支援を頂いた。

参考文献

- [1] 山田：シミュレーションと数値計算の基礎、共立出版株式会社、2018. 9.
- [2] 高橋：CAD/CAM/CAE/RP 概論、鋳造工学、Vol. 86, No. 2, pp. 170-175, 2014.
- [3] 吉本：有限要素法解析ソフト Ansys 工学解析入門 第3版、株式会社オーム社、2020. 10.
- [4] 入江：設計パラメータを用いたシミュレーション

省力化システムの開発、長崎県工業技術センター研究報告、No. 51, pp. 41-42, 2022. 11.

- [5] 入江：設計パラメータを用いたシミュレーション省力化システムの開発、長崎県工業技術センター研究報告、No. 52, pp. 42-44, 2023. 11.
- [6] 矢野：はじめての品質工学、(一財)日本規格協会、2006. 2.
- [7] 保科：Visual Studio パーフェクトガイド、株式会社技術評論社、2019. 7.
- [8] 中嶋：Python でExcel、メール、Web を自動化する本、SB クリエイティブ株式会社、2021. 9.

バイオマス系弾性高分子の開発とシート材料への応用

(SDGsを志向した環境に優しいエラストマーを目指して)

研究企画課 課 長 市 瀬 英 明

ポリウレタンはウレタン基を含むポリマーの総称であり、フォーム、プラスチック、弾性繊維、エラストマー、合成皮革、塗料、接着剤などとして多方面で使用され、今日では重要な高分子材料のひとつになっている。しかし、近年は安価な輸入資材の流通により、加工、販売単価が下げ止まらない状況にある。このようななかで、グリーン調達などの環境意識が醸成されつつあり、県内においても輸入資材との差別化、及び自社製品の高付加価値化の一環として、バイオマスプラスチックなどの環境調和型材料の開発ニーズが高まっている。そこで、本研究では、SDGs を志向したバイオマス系弾性高分子の開発の一環として、バイオマス系原料を用いたポリウレタンエラストマーを合成した。エラストマーの物理特性に及ぼすバイオマス度、原料構造または配合比の影響を確認した。バイオマス度40%以上の構造制約が大きいポリウレタンエラストマーにおいても、ポリオールやイソシアナートの種類や配合によって、物理特性を制御できることがわかった。

1. 緒言

ポリウレタンはウレタン基を含むポリマーの総称であり、フォーム、プラスチック、弾性繊維、エラストマー、合成皮革、塗料、接着剤などとして多方面で使用され、今日では重要な高分子材料のひとつになっている。このように多方面で利用される理由は、ポリウレタンの構造及び物性を、出発原料であるポリオール、ジイソシアナート及び架橋剤あるいは鎖延長剤の構造と配合比を種々変化させることにより比較的容易かつ広範囲に制御できるからである^[1,2]。

本県の合成樹脂工業においてもポリウレタンは重要な材料であり、シート材料や粘着材料などの工業製品として生産出荷されている。しかし、近年は安価な輸入資材の流通により、加工、販売単価が下げ止まらない状況にある。このようななかで、官公庁や大企業においてはグリーン調達などの環境意識が醸成されつつあり、県内においても輸入資材との差別化、及び自社製品の高付加価値化の一環として、バイオマスプラスチックなどの環境調和型材料の開発ニーズが高まっている。国が循環型社会形成推進基本計画に基づいてバイオマスプラスチックの活用推進を先導しており、今後、環境調和型材料の市場は拡大の一途をたどると予想されている。当所においても、これまでに環境調和型ポリヒドロキシウレタンの開発等、SDGs を志向した新規合成樹脂を開発してきた^[3,4]。

そこで、本研究ではバイオマス系ポリウレタンエラストマーを開発し、シート材料への応用を目指す。とくに本報では、エラストマーの物理特性に及ぼすバイオマス度、原料構造または配合比の影響を調査したの

で報告する。

2. 実験方法

2. 1 試薬

ポリオールには、HS2N-220S（豊国精油株式会社、バイオマス度50%）及びD-2000（三井化学株式会社）を使用した。イソシアナートにはモノメリック MDI（東ソー株式会社、ミリオネートNM、2,4'-体含有率：約55%）、ポリメリック MDI（東ソー株式会社、コロネート1391）及びPDIトリマー（三井化学株式会社、スタビオ D-376N、低粘度タイプ、バイオマス度67%）を使用した。また、シリコーン系消泡剤KS-69（信越工業株式会社）、アミン系触媒SA-102（サンプロ株式会社）及びスズ系触媒ジブチル錫ジラウレート（DBTDL）（キシダ化学株式会社）を適宜使用した。いずれの化成品、試薬ともに精製や脱水を行うことなく市販品をそのまま使用した。

2. 2 ポリウレタンエラストマー（PUE）の調製

ポリカップにポリオールを秤り取り、規定量の消泡剤と触媒を添加し十分に攪拌した。そこに規定量のイソシアナートを添加し攪拌脱泡した。原料等の仕込み量は表1のとおりとした。

ポリカップの内容物をステンレス製バットに流し込んだ。この操作は気泡が混入しないよう注意深く行った。その後、100℃の恒温槽に18時間静置した。硬化物を離型したのち、常温常湿環境下に24時間以上静置養生することによりPUEシートを得た。なお、PUEシートは厚さ5mmになるよう仕込み量を調整した。

赤外分光分析により、いずれの PUE もウレタン構造に帰属される吸収が発現し、原料由来のイソシアナート基に帰属される吸収が消失したことを確認した。

表 1 原料仕込み量[g]とバイオマス度[%]

		Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
ポリオール	HS2N-220S	100	90	100	100
	D-2000	—	10	—	—
消泡剤 触媒	KS-69	0.01	0.01	0.01	0.01
	SA-102	0.02	0.02	—	—
	DBTDL	—	—	0.01	0.01
イソシアナート	NM	—	—	—	1.15
	C-1391	11.5	11.5	—	10.35
	D-376N	—	—	13.5	—
仕込量計 [g]		111.53	111.53	113.52	111.52
バイオマス度 [%]		44.8	40.3	52.0	44.8

2. 3 評価方法

【硬度】デュロメータ GS-721 (タイプ E、置き針式、テクロック社) を用いて、JIS K6253-3 により E 硬度を求めた。

【垂直粘着力試験】 PUE 試料を 40 mm × 40 mm に切り出し、アセトンで脱脂処理して十分に乾燥させた 2 枚のステンレス板に挟み込んだ。1 kg の錘を乗せて室温で 10 分間養生したのち、卓上型オートグラフ (AGS-5kNX、島津製作所株式会社) を用いて、試験速度 500 mm/ 分にて垂直方向の引き剥がし試験を実施し、粘着力を評価した。

【引張試験】 PUE 試料を 10 mm × 80 mm の短冊状に切り出し、卓上型オートグラフ (AGS-5kNX、島津製作所株式会社) を用いて、評点間距離 20 mm、試験速度 500 mm/ 分にて引張試験を実施した。

3. 結果と考察

調製した PUE シートの E 硬度、粘着特性及び引張特性を表 2 に示す。硬度は、バイオマス度、原料配合比等によらず、すべての試料において E27 から E30 の範囲にあり、実用において同等と判断できるレベルにあった。

バイオマス度 44.8% の Run 1 と同じく 40.3% の Run 2 を比較した場合、粘着強さはそれぞれ 42.9 N/cm² と 41.5 N/cm²、また引張伸びは 288 mm と 283 mm でありバイオマス度によらずほぼ同等だった。その一方で、破断強さは 82.8 N/cm² と 70.8 N/cm² であり、バ

イオマス度が高い方が大きかった。これは、添加率が高い HS2N-220S の一次構造によるものと考えられる。

また、イソシアナート側をバイオマスベースに置き換えた Run 3 を Run 1 と比較した場合、バイオマス度は 44.8% から 52.0% に向上するが、粘着強度、破断強さ、及び伸びともに大幅に低下した。D-376N の剛直な構造が特性低下を招いたものと考えられる。

さらに、イソシアナートにモノメリック体を併用した Run 4 は、Run 1 と比較して粘着強さが 42.9 N/cm² から 38.2 N/cm²、及び引張強さが 82.8 N/cm² から 75.5 N/cm² と 5% から 10% 程度の低下が見られた。その一方で、伸びが 288 mm から 405 mm へ大幅に向上することが確認された。イソシアナート種と配合によって、PUE の要求特性に応じて、その特性を制御することが可能であることが示唆された。

表 2 PUE シートの特性

	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
硬 度 [—]	E30	E27	E30	E28
<垂直粘着力試験>				
粘着強さ [N/cm ²]	42.9	41.5	35.2	38.2
引剥がし試験力 [N]	687	664	564	611
<引張試験>				
破断強さ [N/cm ²]	82.8	70.8	34.6	75.5
破断試験力 [N]	41.4	35.4	17.3	37.8
伸び [mm]	288	283	108	405

4. 結言

40% 以上の高バイオマス度エラストマーにおいても、ポリオールやイソシアナートの構造や配合によって、物理特性を制御できることを確認した。とくに、ポリメリック体ベースのイソシアナートにモノメリック体を併用することで、引張特性が向上することを明らかにした。

参考文献

- [1] 古川睦久：ネットワークポリマー論文集、39, p3, 2018.
- [2] 古川睦久：ネットワークポリマー論文集、38, p59, 2017.
- [3] 市瀬英明、古川信之：長崎県工業技術センター研究報告、No. 49, p31, 2020.
- [4] 市瀬英明、里見暢子、古川信之、遠藤剛：ネットワークポリマー論文集、39, p111, 2018.

産業洗浄における微細気泡の効果的活用に関する研究

機械加工科 科 長 三 木 伸 一

ナノメートルからマイクロメートルサイズの微細な泡はファインバブルと呼ばれ、従来の泡の概念を変える吸着、溶解、分解、生理活性など様々な効果があることから、応用分野の広がりが見込まれるプロセス技術として期待されている。この技術は、しばしば洗浄用途にも利用されるが、環境負荷が小さいなどの利点はあるものの、洗浄効率は高いとはいえず、気泡発生コストもかかるため、より安価な手法で効率よく洗浄することが産業洗浄現場においては求められる。本研究では、その取り組みの一環として、安価な手法で微細気泡の個数密度管理をより正確・簡便に測定する装置の開発、効率よく洗浄するための手法について検討したので報告する。

1. 緒言

気泡をマイクロメートル程度まで小さくすると、肉眼では白濁に見え、浮遊速度は1分間で数ミリメートル程度となる。西暦2000年以降、さらに小さい数百ナノメートルサイズの気泡の存在が知られるようになった。この数百ナノメートルの気泡は、可視光の回折限界を超え、目視では透明に見える。今日では、ISOの国際規格化が進み、泡のサイズ等によって名称が定義され（表1）、洗浄等に利用されている。

本研究は、金属加工業等の洗浄現場において、気泡の照射方法等の工夫により洗浄効率を高めることを目指す。一方、洗浄現場では、洗浄効率の向上だけではなく、作業性・安全性の向上、環境負荷低減、管理コスト削減などトータルメリットを考慮する必要がある。これまでに、気泡の個数密度の安価な管理手法について検討し、理論計算の結果等について報告している^[1]。本報告では、理論計算の結果等を踏まえ、簡易測定装置を試作し、性能評価を行ったのでその結果について述べる。

さらに、気泡洗浄においては、洗浄物から外れた汚れの再付着や、外れた汚れに気泡が消費されることにより洗浄効率が下がることが懸念される。また、コスト上、洗浄水は循環して使用するため、汚水の程度によってはサクシオンフィルターやポンプの目詰まりを生じ、頻繁なメンテナンスが必要となる。これらの問題を解決するために、円形の水槽内で渦を形成させ、汚れや異物のポンプ内への吸引の防止を試みたので、併せて報告する。

2. 実験方法

2. 1 散乱光の検証

粒子の散乱については、ミー理論に基づき理論的に求めることができる。これまでの研究において性状が

表1 気泡の名称と分類

名称	ウルトラ ファインバブル	マイクロバブル	ミリバブル /サブミリバブル
直径	数10 nm ～1 μm	1 μm ～100 μm	100 μm～
溶液外観	透明	白濁	泡状
性状	ブラウン運動 数週間～数か月 残存	ゆっくり上昇 水中消滅	速く上昇 水面破裂

既知なポリスチレン粒子を疑似気泡として適用できることを明らかにしている^[1]。本研究では、安価なレーザー光源を用いた簡易計測の実用性を検証した。レーザー光源には、市販のグリーンレーザーポインター（エステーシー株式会社製 SPG1）及び赤色ダイオードレーザー（エステーシー株式会社製 KMP635-3）を用いた。撮影には USB カメラ（ホーザン株式会社製 L-835）を用いた。疑似試料の70 nm、100 nm及び150 nmのポリスチレン粒子（サーモフィッシャーサイエンス社製）は、所定の個数密度に調整し、防腐剤としてアジ化ナトリウムを加え、分光分析用のガラスセルで保管した。

2. 2 気泡洗浄

洗浄水の循環用ポンプには、高揚程のマグネットポンプ（三相電機株式会社製 PMH-1511B2M）を用いた。洗浄槽として、外径約1 m、深さ約60 cmの円形のタンクを用い、タンク側面から水槽内に通した排水パイプの先端に100メッシュのサクシオンフィルター（大生工業株式会社製 SFG-02-100W）を取り付けた。

3. 結果及び考察

3. 1 二色光の散乱性に基づく粒子径補正の検討

図1に疑似試料にレーザー光を照射した際、得られ

た散乱光の画像を示す。得られた画像をトリミング、スムージング、RGB 分割、二値化処理し、ピクセルカウントにより散乱光強度を求めた。また、理論計算を実施し、理論計算に用いる微細気泡の屈折率については、文献値により $n=1.25$ とした^[2]。図2に解析結果を示す。散乱光強度は光源の強さで変わるので、100 nm 粒子径の散乱光強度を基準とし、異なる粒子径 (70 nm, 150 nm) における相対的な強度を求めた。これらの結果、理論計算値とのずれはあるものの、散乱傾向は等しく、二色光で粒子径を補正できる可能性を示唆した。理論計算値とのずれは、光源出力の安定性等のビーム質にも影響されていると考えられる。高品質の光源を用いれば改善されるが、光源のコストはかかるため、定量精度とのトレードオフの関係にある。

3. 2 円形洗浄槽の評価

図3に洗浄装置の概略を示す。図に示すとおり、洗浄水（気泡水）は洗浄槽内で循環させる。このとき、洗浄液の汚れやコンタミ成分は洗浄効率を下げるともに、フィルターの目詰まりやポンプの負担を大きくし、故障の一因となる。そこで、円形のタンクを洗浄槽に用い、壁面に沿って流れを形成させた。この結果、洗浄槽中央付近で渦が形成され、汚れが中心底部に集まった。効果検証のため、意図的に乾燥砂を水槽内に投入し、洗浄水を30分循環させたところ、中央付近に砂の堆積が目視で確認できた（図4）。この堆積した砂を回収し、ろ過、乾燥させ重量を測定した結果、投入

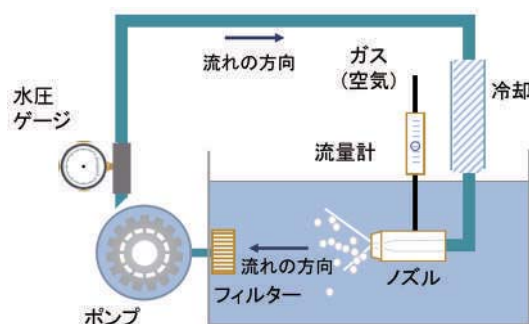


図3 洗浄装置概略

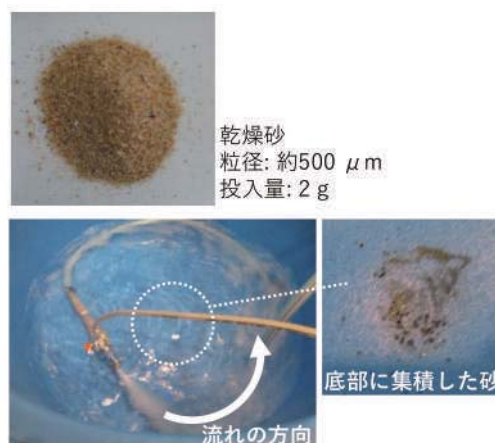


図4 洗浄の様子と異物（砂）の回収試験

量95%以上回収できた。また、サクシオンフィルターの内部を確認したが、砂の混入は見られなかった。なお、洗浄物を壁面に配置し、洗浄性を検証し、配置場所によって汚れの取れ方が異なることを確認している。ただし、洗浄については、洗浄物の性質によって求められる要件が異なるため、今後、データの蓄積を進め、汚れの種類や気泡水の照射方法などとの関係性についての検証を深める。

4. 結言

簡易な二色のレーザー光を用いてレーザー光の散乱と粒子径との関係について調べ、粒子径を補正できることを示唆した。また、円形の洗浄槽を用いて汚れや異物を渦の中央付近に集めることにより、装置のダメージが少なく、効率よく洗浄できることを示した。

参考文献

- [1] 三木：産業洗浄における微細気泡の効果的活用に関する研究、長崎県工業技術センター研究報告、No. 52, pp. 45-46, 2023.
- [2] A. Sonoda: J. Soc. Powder Technol., 54, pp. 590-595, 2017.

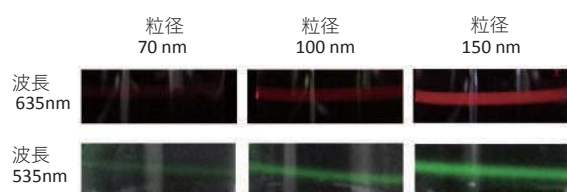


図1 レーザー照射による散乱光画像

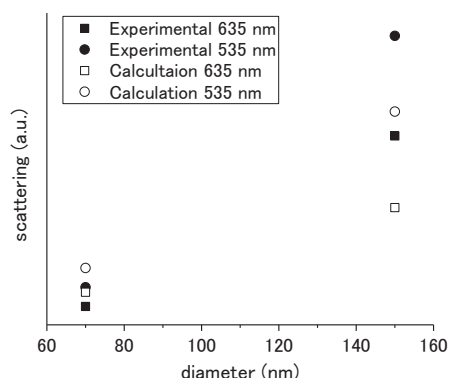


図2 二色光の散乱強度解析結果

県内の製造現場に即した鋳物砂性状の管理手法に関する研究

機械加工科 主任研究員 大 田 剛 大
機械加工科 主任研究員 梅 木 宣 明

鋳造で使用する砂は、繰り返しの使用で品質が劣化し鋳造品の品質に影響が生じる。これを防ぐために砂の管理を行っているが、この管理は現場の経験と勘で行っている。そこで、本研究は、経験と勘の管理からデータを活用した管理への転換を図ることで、砂品質の安定化、さらには鋳造品の品質向上を目指している。

1年目となる令和5年度の研究では、砂性状、砂の投入量、鋳造欠陥発生状況から、砂の管理項目の絞り込み、鋳造欠陥発生時の砂の特性について調査した。

1. 緒言

鋳造は、中空で複雑な形状の部品や大型の部品を効率的に生産する技術であり、鋳造で生産された鋳物は振動の減衰能が優れているため大型の回転部品などに適用されている。さらに、プレス加工の端材などを材料に使うため資源の有効利用になっている。

また、砂型鋳造では、溶かした金属を砂の型に流し込み、冷却・凝固させる。このとき、砂の性質が鋳造品の品質に大きく影響するが、使用するにつれて状態が悪くなり鋳造品の品質へ影響を及ぼす。砂の状態が変化する原因は、砂を再利用する時に生じる熱や摩擦、衝撃による割れ、付着物の残留等である。これらを防ぐために、砂の品質を数項目管理し、経験的に新しい砂を補給して対策しているが、管理項目の選定や砂投入の時期及び量については明確な根拠が示されていない。

そこで、本研究は、経験と勘の管理からデータを活用した管理による砂の品質安定化と、これに伴う鋳造品の品質向上を目指す。

2. 試験方法

2. 1 砂性状と砂投入量の関係性調査

使用後の劣化した砂は、新砂を投入することで砂全体の特性を改善している。この特性変化を調査するため、砂の特性と砂の投入量を同時期に調査しその傾向を比較した。

試験項目は、これまでの研究^[1]で有効と考えられた7項目（粒度試験、通気度試験、表面安定度試験、水分試験、強熱減量試験、かさ密度測定、圧縮強さ試験）の試験とした。また、試験の期間は、最初と最後の試験の間隔を1か月とし、試験番号（試験回数）と砂の投入量は表1のとおりとした。これらの試験で得られた結果をもとにクラスター分析を実施した。

表1 各試験時の砂投入量と鋳造欠陥割合

試験番号	砂投入量(t)	鋳造欠陥(%)
①	4	8
②	6	0
③	4	6
④	0	3
⑤	4	10

2. 2 砂性状と鋳造欠陥による管理幅の調査

砂の管理幅は、安価で単純形状に適した生型において明記されている^[2]が、本研究で使用する自硬性鋳型の管理幅は明記されていない。また、鋳造現場の環境や、製造方法が異なるため、正確な管理幅は各現場の実情に応じて決まる。そこで、県内企業に協力いただき、実際の鋳造現場の鋳造欠陥の有無とその時の砂特性の値をもとに砂の管理幅を推定した。

3. 結果及び考察

3. 1 砂の試験項目の絞り込み

砂試験の結果より、クラスター分析を実施した結果を図1に示す。クラスター分析の結果から、通気度、表面安定度、かさ密度、粒度指数、強熱減量は関係性が強く、水分量と圧縮強さは関係性が比較的に弱いことが示された。

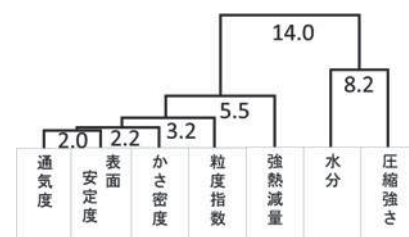


図1 クラスター分析結果

また、横軸に時系列、縦軸に各砂特性を任意強度で示したグラフを図2から4までに示す。これらの結果、通気性は、砂の投入量にかかわらず時系列で値が右肩上がりに変化し、一方で、強熱減量は砂の投入量に伴い変化、水分量は砂の投入量とは無関係に変化していることが分かる。引き続き、データの蓄積は実施するものの、現時点の解析では、①時系列変化、②砂の投入量変化、③無相関の3つのパターンがあると考えている。

管理項目の選定については、現場で測定することが容易な項目を優先し、砂投入量との相関を示さなかった「水分量」と「圧縮強さ」を別項目とした次の4つ（「粒度・強熱減量・かさ密度」、「通気度・表面安定度」、「水分量」、「圧縮強さ」）に絞り込んだ。

砂の管理幅については、鑄造欠陥が発生した時の砂特性の値をもとに、管理幅を推定した。図5に一例として通気度の管理幅（240～260）を示す。この管理幅は、上限値と下限値で示されるが、水分量については、上限値のみ（下限値無し）となる。生型の場合、結合剤に使用されるベントナイトが水分を含むことで膨張と粘性が得られるため、水分を一定量必要とする。一方で、有機自硬性鑄型の場合、結合剤は自硬性樹脂であり結合に水分を必要としないため下限値が無い結果を示した。

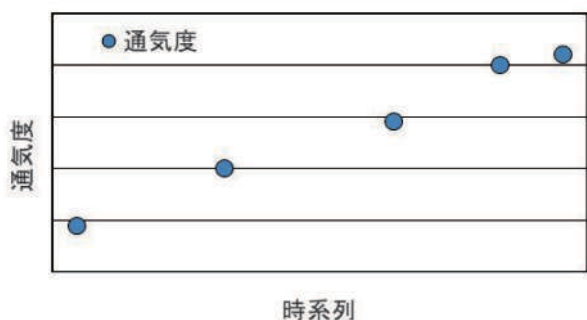


図2 時系列における通気度の変化

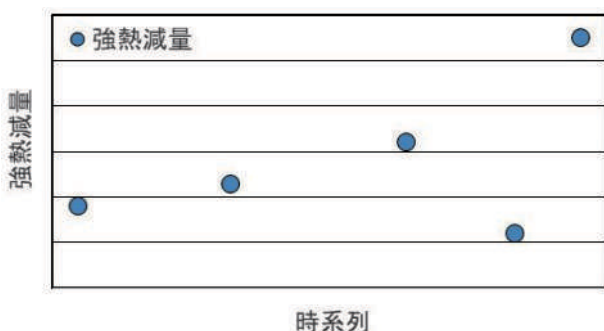


図3 時系列における強熱減量の変化

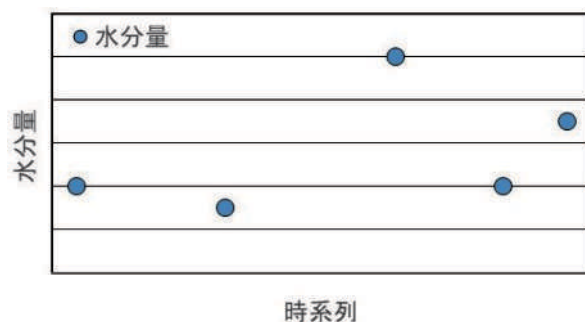


図4 時系列における水分量の変化

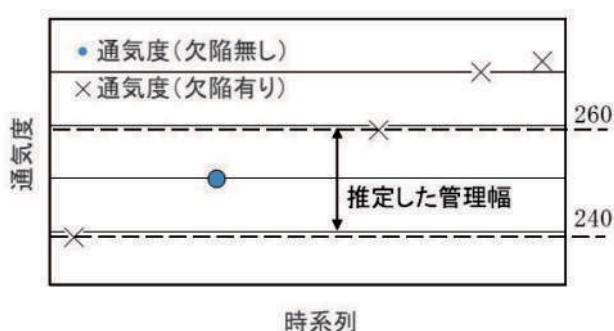


図5 管理幅の推定

4. 結言

データ活用による砂の管理を目的として試験項目の絞り込みおよび砂性状の管理幅の推定を行った。項目の絞り込みでは、クラスター分析、グラフの値、現場での活用を考慮したうえで4項目に絞り込んだ。ただし、引き続き収集するデータによりクラスター分析の結果やグラフの傾向が変化する可能性もあるため、試験結果に合わせて絞り込み項目を検討する必要がある。また、推定した管理幅については、その値の正確さについて検討していない。今後は、その妥当性について調査する。

参考文献

- [1] 大田剛大、小笠原耕太郎：木型と鑄物砂の改善による鑄造品の品質向上、長崎県工業技術センター研究報告、No. 52, pp. 47-51, 2023.
- [2] 日本鑄造工学会編：鑄造工学便覧, p. 73, 2002.

県産地域資源に含まれるD-アミノ酸の解析と含有食品の開発

(特徴的な味を有するD-アミノ酸を活用した食品の付加価値向上)

食品開発支援センター	専門研究員	玉 屋 圭
食品開発支援センター	センター長	河 村 俊 哉
食品開発支援センター	専門研究員	宮 田 裕 次
食品開発支援センター	研 究 員	三 島 朋 子

近年の分析技術の進化に伴い、発酵食品にD-アミノ酸 (DA) が多く含まれていることが判明し、さらにはDAの有する甘味などの特徴的な味、美肌効果などの機能性について注目が集まっている。乳酸菌などの発酵微生物の一部はDAを生成する酵素を有していることから、DAを高生産する微生物を獲得出来れば、本成分を多く含有する高付加価値の食品を開発することが可能となる。そこで本研究では、センターが保有する乳酸菌などの微生物ライブラリーからDAを高生産する微生物を選抜し、得られた微生物株を用いてDAを多く含む製品開発を行う。まず、食品に含まれるDAを精度よく分析することを目的として、液体クロマトグラフ (HPLC) 装置を用いた分析法を検討したので報告する。

1. 緒言

これまでに生体中のアミノ酸の大半はL体であると考えられていたために、鏡像異性体であるD体は注目されなかった。しかしながら、近年は分析技術の進化に伴いDAの検出が可能となり、野菜及び果実^[1]、米^[2]などでその存在が確認されている。さらに発酵食品では、生鮮食品より高い濃度で存在することが示されており、チーズ^[3]、日本酒^[4]、黒酢^[5]などで含量が報告されている。

DAの味については、アラニン、セリン、フェニルアラニン、トリプトファンなど強い甘味を有するものが存在^[6]し、L体の味と異なることが大きな特徴である。また、DAの中には健康機能を有するものが見いだされており、特にD-アスパラギン酸は美肌効果を発揮^[7]することが明らかにされている。

発酵食品にDAが多く含まれる理由は、発酵に関与する微生物がL体をD体に変換する酵素^[8] (ラセマーゼ) を有しているからである。従って、DAを高生産する微生物を獲得できれば、本成分を多く含有する高付加価値の食品を開発することが可能となる。

そこで本研究では、センターが保有する乳酸菌などの微生物ライブラリーからDAを高生産する微生物を選抜し、得られた微生物株を用いてDAを多く含む製品開発を行う。

本研究では、まず食品に含まれるDAを精度よく分析することを目的として、HPLC装置を用いた分析法を検討したので報告する。

2. 方法

2. 1 試薬

L-アスパラギン酸、L-グルタミン、L-スレオニン、L-トリプトファン、L-フェニルアラニン、D-アスパラギン一水和物、酢酸、酢酸ナトリウムは富士フィルム和光純薬株式会社製の試薬を用いた。L-グルタミン酸、L-アスパラギン、L-セリン、グリシン、L-アラニン、L-チロシン、L-メチオニン、L-イソロイシンはナカライテスク株式会社製を使用した。また、L-ヒスチジン、L-アルギニン、L-バリン、L-ロイシンはキシダ化学株式会社製、L-リジン、D-アスパラギン酸、D-グルタミン酸、D-セリン、D-グルタミン、D-ヒスチジン、D-スレオニン、D-アルギニン、D-アラニン、D-チロシン、D-メチオニン、D-バリン、D-トリプトファン、D-フェニルアラニン、D-ロイシン、D-リジンは東京化成工業株式会社製、D-イソロイシンは株式会社ペプチド研究所製を用いた。一方、誘導体化試薬であるo-フタルアルデヒド (OPA) は富士フィルム和光純薬株式会社製、N-イソブチリル-L-システイン (NIBC) はミリポアシグマ製を使用した。なお、これら試薬は全て特級のものを使用した。さらに、アセトニトリル及びメタノール (関東化学株式会社製) は高速液体クロマトグラフィ用を採用した。

2. 2 HPLCを用いたDA分析法の確立

食品に含まれるDAを精度よく分析することを目的として、HPLC装置を用いる分析法を検討した。

キラル構造を持つ誘導体化試薬であるNIBCの存在

下で、OPA を反応させることにより、L 体並びに D 体をジアステレオマー蛍光誘導体化し、逆相カラムを用いて分離した後に蛍光検出する手法を試みた。

まず、誘導体化試薬（OPA/NIBC）は以下のように調製した。OPA 試薬は、10 mg の OPA に 0.3 mL のエタノールを添加し溶解させた後、0.7 mL の 0.1 M ホウ酸緩衝液及び 4 mL の超純水を添加した。また、NIBC 試薬は、20 mg の NIBC に対して 10 mL の 0.1 M ホウ酸緩衝液を添加し溶解させて調製した。これら 2 種の試薬を同量ずつ混合させて OPA/NIBC 試薬とした。

試料の誘導体化は次のように行った。試料 1 mL に対して OPA/NIBC 試薬 4 mL を添加し、2 分間誘導体化反応を行い、蛍光-HPLC 装置に供した。

蛍光 HPLC の分析法は、これまでの DA 測定に関する報告^[9-10]をもとにした以下の条件により実施した。

装置；島津製作所製蛍光 HPLC システム

流速；0.8 mL/min

カラム；Shim-pack VP-ODS（粒子径 5 μ m, 内径 4.6 mm×長さ 150 mm）

カラム温度；35℃

溶離液；(A) 30 mM 酢酸ナトリウム（pH 6.0）

(B) メタノール/アセトニトリル（12:1）

蛍光検出；励起波長：230 nm, 蛍光波長：445 nm

誘導体化した L 体及び D 体を分離するために、溶離液 (A) 並びに (B) の組成を分析時間とともに変化させるグラジエント条件を検討した。

3. 結果

3. 1 L 体及び D 体の分析条件の確立

溶離液 (A) の 30 mM 酢酸ナトリウム並びに (B) のメタノール/アセトニトリル混液を表 1 のように変化させることにより、L 体及び D 体の分離を行った。

表 1 溶離液 (A) 並びに (B) のグラジエント条件

分析時間 (分)	溶離液 (A) 濃度 (%)	溶離液 (B) 濃度 (%)
0	90	10
75	40	60
80	0	100
85	0	100
85.01	90	10
90	90	10

その結果、図 1 に示したように、L 体と D 体の以下の 35 成分を分離することが出来た。図 1 のクロマトグラムに示された 1 から 35 のアミノ酸は以下のものである。

1：L-アスパラギン酸 2：D-アスパラギン酸 3：L-グルタミン酸 4：D-グルタミン酸 5：L-アスパラギン 6：D-アスパラギン 7：L-セリン 8：D-セリン 9：L-グルタミン 10：D-グルタミン 11：L-ヒスチジン 12：L-スレオニン 13：D-ヒスチジン 14：グリシン 15：D-スレオニン 16：L-アルギニン 17：D-アルギニン 18：L-アラニン 19：D-アラニン 20：L-チロシン 21：D-チロシン 22：L-バリン 23：L-メチオニン 24：L-トリプトファン 25：D-メチオニン 26：D-バリン 27：L-フェニルアラニン 28：D-トリプトファン 29：L-イソロイシン 30：D-フェニルアラニン 31：L-ロイシン 32：D-イソロイシン 33：D-ロイシン 34：L-リジン 35：D-バリン

次にアミノ酸試薬を用いて調製した 25 nmol/mL 濃度の溶液を誘導体化した後、5 回連続して蛍光 HPLC 装置に供し、再現性を検討した。表 2 には各アミノ酸の溶出時間を示した。

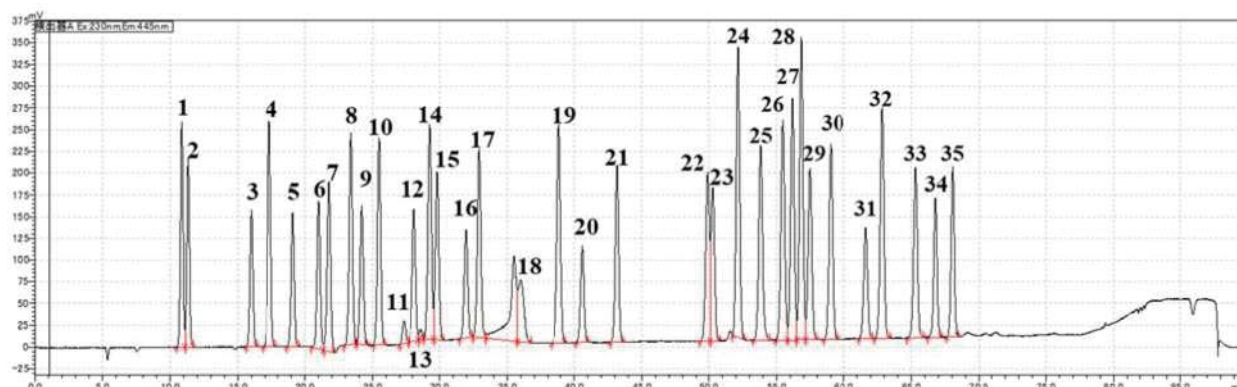


図 1 蛍光 HPLC 法を用いた L 体及び D 体のクロマトグラム

表2 25 nmol/mL 濃度のアミノ酸注入時（5回連続）の溶出時間

アミノ酸	溶出時間 (分)		
	平均	標準偏差	変動係数 (%)
1. L-アスパラギン酸	10.559	0.039	0.374
2. D-アスパラギン酸	11.024	0.027	0.249
3. L-グルタミン酸	15.793	0.047	0.299
4. D-グルタミン酸	17.152	0.035	0.202
5. L-アスパラギン	18.738	0.040	0.213
6. D-アスパラギン	20.706	0.029	0.140
7. L-セリン	21.483	0.045	0.211
8. D-セリン	23.152	0.035	0.152
9. L-グルタミン	23.987	0.044	0.183
10. D-グルタミン	25.302	0.034	0.133
11. L-ヒスチジン	27.281	0.035	0.127
12. L-スレオニン	28.103	0.054	0.193
13. D-ヒスチジン	28.633	0.025	0.089
14. グリシン	29.287	0.057	0.194
15. D-スレオニン	29.927	0.037	0.124
16. L-アルギニン	32.190	0.031	0.097
17. D-アルギニン	33.208	0.023	0.071
18. L-アラニン	35.867	0.063	0.175
19. D-アラニン	39.407	0.043	0.109
20. L-チロシン	41.280	0.055	0.134
21. D-チロシン	44.013	0.036	0.082
22. L-バリン	51.308	0.074	0.144
23. L-メチオニン	51.672	0.068	0.132
24. L-トリプトファン	53.659	0.063	0.117
25. D-メチオニン	55.411	0.050	0.091
26. D-バリン	57.159	0.049	0.085
27. L-フェニルアラニン	57.979	0.060	0.104
28. D-トリプトファン	58.633	0.048	0.082
29. L-イソロイシン	59.368	0.066	0.111
30. D-フェニルアラニン	60.978	0.049	0.080
31. L-ロイシン	63.848	0.069	0.107
32. D-イソロイシン	65.078	0.052	0.080
33. D-ロイシン	67.725	0.049	0.073
34. L-リジン	69.411	0.067	0.096
35. D-リジン	70.734	0.048	0.067

5回の繰り返し分析を行った際の保持時間の変動係数は各 DL アミノ酸で0.082～0.374%の範囲にあり、その平均は0.139%であった。

岩田^[10]は誘導体化試薬として NIBC、あるいは N-アセチル-L-システインと OPA とを組み合わせた手法を用いて、6回連続分析した際の溶出時間から算出した変動係数を0.01～0.35%と報告している。本研究で検討した結果とほぼ同等の数値であることから、本研究で検討した分析法は再現性のあるものと考えられた。

4. 結言

昨今の分析技術の進化に伴い、発酵食品に DA が多く含まれていることが明らかにされている。また、各種研究の進展により、DA の中には強い甘味を有する成分があること、DA が恒常性維持などの機能性を持つことが判明し、大きな注目が集まっている。

乳酸菌などの発酵微生物の一部は DA を生成する酵素を有していることから、DA を高生産する微生物を獲得できれば本成分を多く含有する食品を開発することが可能となる。

そこで本研究では、DA を高生産する微生物を選抜し、得られた微生物株を用いて DA を多く含む製品開発を行う。

本研究では、まず食品などの生物資源に含まれる DA を精度よく分析することを目的として、HPLC 装置を用いる分析法を検討した。キラル構造を持つ誘導体化試薬である NIBC の存在下で、OPA を反応させることにより、L 体並びに D 体をジアステレオマー蛍光誘導体化し、蛍光検出する手法の開発を試みた。本分析法を用いて、アミノ酸溶液の5回繰り返し分析を行い、溶出時間を検討したところ、変動係数が各 DL アミノ酸で0.082～0.374%の範囲にあることから、本分析法は再現性のあるものと判断された。

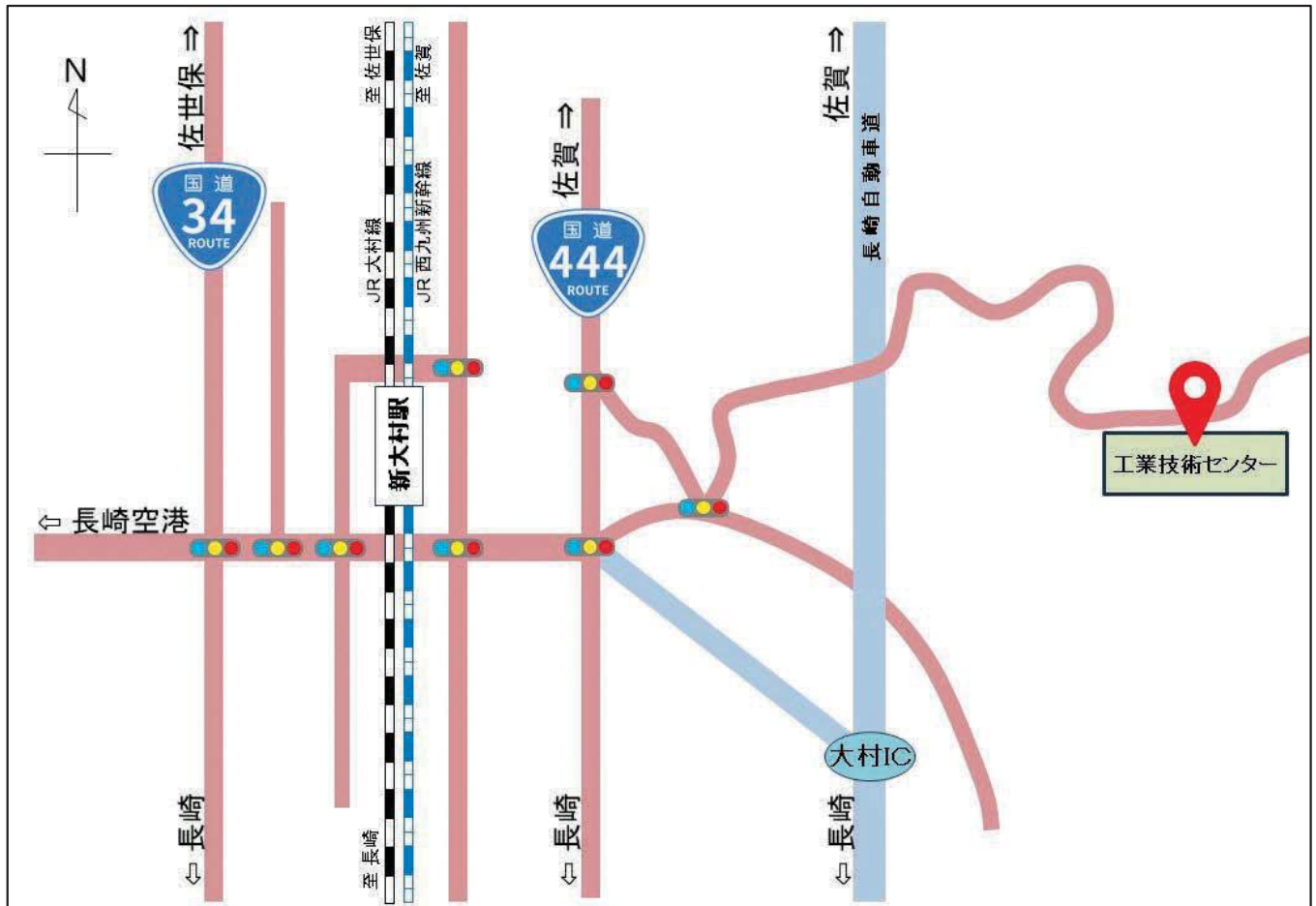
センターでは、これまでに長崎県特産物から乳酸菌約600株を分離^[11]してきた。さらに、これら菌株の有する特徴（有用成分生産能、抗菌性、抗酸化性など）をもとにしてライブラリー化している。

今後は、ライブラリーの乳酸菌が有する DA 生産能を本研究で確立した蛍光 HPLC 法を用いて測定することにより菌株の選抜を行い、DA を高度に含む発酵食品の開発につなげる。

参考文献

- [1] 郷上佳孝、伊藤克佳、老川典夫: Trace Nutrient Research, 23, pp.1-4, 2006.
- [2] 郷上佳孝、保井美保、岡田かおり、老川典夫: Trace Nutrient Research, 28, pp.1-6, 2011.
- [3] Brückner H. , Hausch M. :Chromatographia, 28, pp. 487-49, 1989.
- [4] 郷上佳孝、岡田かおり、森山昌和、伊藤克佳、老川典夫: Trace Nutrient Research, 29, pp.1-6, 2012.
- [5] 岡田かおり、郷上佳孝、竹下義隆、老川典夫: Trace Nutrient Research, 29, pp.62-66, 2012.
- [6] 真鍋久:美味技術学会誌、19(1), pp.53-57, 2020.
- [7] 吉村徹: 日本家政学会誌、74(6), pp. 346-351, 2023.
- [8] 牟田口祐太、大森勇門、大島敏久: 化学と生物、53(1), pp.18-26, 2015.
- [9] Inoue Y, Katsumata T, Watanabe H, Hayase F: Food Science and Technology Research, 22 (5), pp.679-686, 2016.
- [10] 岩田奈津紀: 島津製作所 Application News, No.L592, 2021-1,
https://www.an.shimadzu.co.jp/sites/an.shimadzu.co.jp/files/pim/pim_document_file/an_jp/applications/application_note/17907/an_l592.pdf, (参照 2024-06-01)
- [11] 河村俊哉、晦日房和、玉屋 圭、松本周三:長崎県工業技術センター研究報告、No.41, pp. 1-5, 2011.

位置図



- 新大村駅から車で約 10 分
- 大村 I C から車で約 5 分
- 長崎空港から車で約 15 分

発行日：令和 6 年 7 月 3 1 日

発行所：長崎県工業技術センター

〒856-0026 大村市池田 2 丁目 1303 番地 8

TEL 0957-52-1133

FAX 0957-52-1136

ホームページ <https://www.pref.nagasaki.jp/section/kogyo-c/>

森林を保護し、地球温暖化を防止するため、
古紙パルプ配合品を使用しています。