

I S S N 2760-1900

令和6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. 55

長崎県工業技術センター

INDUSTRIAL TECHNOLOGY CENTER OF NAGASAKI

目 次

1. 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	1
機械システム科 科 長 堀江 貴雄	
2. 機械設計の効率化に関する研究	7
機械システム科 主任研究員 小楠 進一	
機械システム科 主任研究員 西村 学	
機械システム科 研 究 員 小笠原耕太郎	
3. 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	10
機械システム科 主任研究員 西村 学	
機械システム科 研 究 員 小笠原耕太郎	
4. スマート工場実現のための作業工程監視装置の開発	16
次長 兼 基盤技術部長 兼 応用技術部長 田口 喜祥	
5. 光学式ガスセンサーの開発	22
電子情報科 科 長 田尻 健志	
6. 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	24
電子情報科 主任研究員 中川 豪	
7. レーザーによる異材樹脂溶着の高品質化に関する研究	30
電子情報科 主任研究員 田中 博樹	
8. 生体組成の非侵襲計測技術の開発	32
電子情報科 研 究 員 下村 義昭	
9. リアルタイムシミュレーション技術の開発	37
工業材料・環境科 科 長 入江 直樹	
10. データ駆動科学を活用した化学反応プロセスの研究	39
工業材料・環境科 専門研究員 重光 保博	
11. バイオマス系弾性高分子の開発とシート材料への応用	43
研究企画課 課 長 市瀬 英明	
12. 産業洗浄における微細気泡の効果的活用に関する研究	45
機械加工科 科 長 三木 伸一	

13.	非金属脆性材料の精密加工に関する研究	50
	機械加工科 主任研究員 福田 洋平	
14.	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	52
	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	
15.	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	56
	食品開発支援センター センター長 玉屋 圭	
	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 主任研究員 三島 朋子	
	食品開発支援センター 専門研究員 河村 俊哉	
16.	美味しく食べて軽度不調を改善 バレイショ「ながさき黄金」の高付加価値化	60
	食品開発支援センター 主任研究員 土井 香織	
	食品開発支援センター 専門研究員 宮田 裕次	

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 科 長 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。今年度はニューラルネットワークモデルの推定精度向上のため、入力画像の高精細化、入力データの拡充を行い、開発ツールとして PyTorch を用いてモデルの改良、学習、実装を行った。また走行実験によってこのモデルの有効性を確認した。

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。

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。

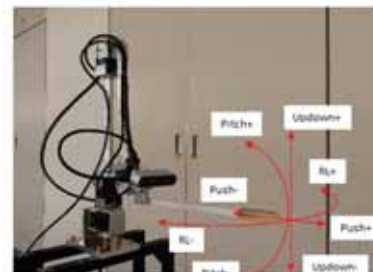


図1 ハンドアイ

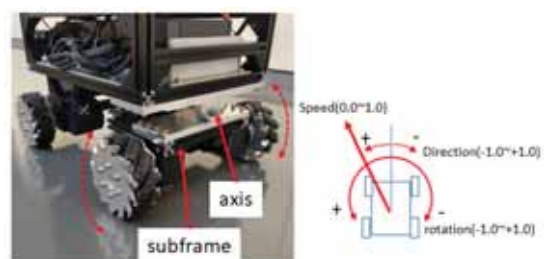


図2 メカナム駆動

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、制御プログラム実行用に ITX 規格の PC を搭載した。なお、昨年度開発モデルよりも規模の大きなニューラルネットを用いた推論を 6~7Hz で実行するために、用いる GPU を NVIDIA 製 T600(4GB)から RTX A1000 (8GB)に交換した。



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。ゲームパッド入力と対応する制御パラメータについて表1に示す。

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
X ボタン	タスク修了	なし

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。

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)。

今年度は入力情報拡大による推定精度の向上を期待し、入力画像サイズを昨年度の $3 \times 45 \times 80$ から $3 \times 90 \times 160$ に変更し、推定用パラメータにスタート階番号、スタート位置番号、ゴール階番号を追加した。

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($3 \times 90 \times 160$) $\times 5$ (5時刻分)	・車両速度 speed(1)
・車両深度画像($3 \times 90 \times 160$) $\times 5$	・車両平行移動方向 direction(1)
・アームカラー画像($3 \times 90 \times 160$) $\times 5$	・車両回転速度 rotation(-1~1)
・アーム深度画像($3 \times 90 \times 160$) $\times 5$	・アーム push(1)
・磁気センサ X(1) $\times 5$	・アーム RL(1)
・磁気センサ Y(1) $\times 5$	・アーム up and down(1)
・スタート階番号(10)	・アーム angle(1)
・スタート部屋番号(10)	・アーム基本姿勢 arm position(4)
・ゴール階番号(10)	(0:変更なし, 1:正面, 2:左90度, 3:右90度)
・ゴール部屋番号(10)	・車両、アーム制御選択 mode(3)
・ルート選択番号(1)	(0:車両, 1:アーム, 2:タスク終了)

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、ResNet18 を参考に、チャンネル数を削減するかわりに ResNet ブロックを増やし、Attention 機構の一種である SE ブロック^[7]を追加した (図4)。

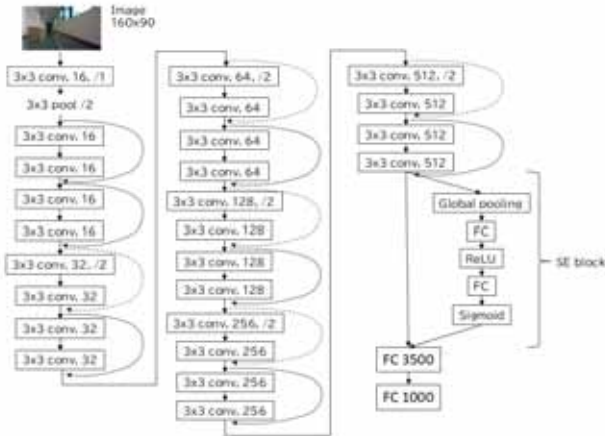


図4 Image Convolution Unit

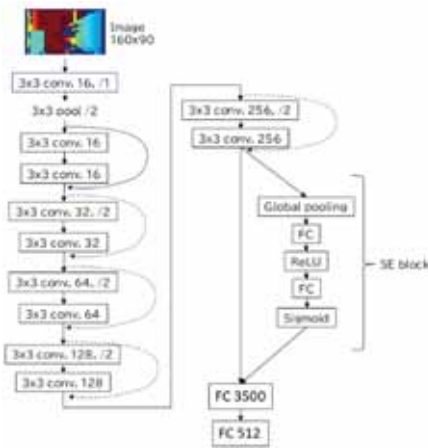


図5 Depth Image Convolution Unit

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

りかえし、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。ここに時間方向の Skip 接続 (Temporal Skip Connection) を導入する。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。

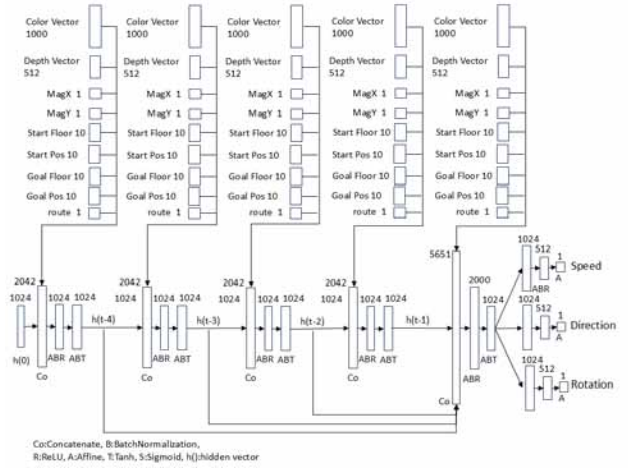


図6 Vehicle Control Unit

カラー画像を $I_{c,t}$ 、深度画像を $I_{d,t}$ 、磁気センサデータを $M_{x,t}$ 、 $M_{y,t}$ 、その他数値データ (フロア番号、スタート番号など) を S とおくと、Image Convolution Unit (ICU) の出力ベクトル $F_{c,t}$ は以下の様に表現できる。

$$F_{c,t} = ICU(I_{c,t})$$

また Depth Image Convolution Unit (DCU) 出力 $F_{d,t}$ は以下のように表現される。

$$F_{d,t} = DCU(I_{d,t})$$

このとき各時刻の入力特徴ベクトル X_t は以下のようになとめられる。

$$X_t = [F_{c,t}, F_{d,t}, M_{x,t}, M_{y,t}, S]$$

過去4時刻分の隠れ状態 h_{t-1} 、 h_{t-2} 、 h_{t-3} 、 h_{t-4} をスキップ接続として用いて最新時刻のベクトル h_t は以下のように求める。

$$h_t = RNN(X_t, [h_{t-1}, h_{t-2}, h_{t-3}, h_{t-4}])$$

最終的な車両制御パラメータ3つは以下のとおり表現できる。

$$[y^{speed}, y^{direction}, y^{rotation}] = f_{vehicle}(h_t)$$

同様に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)。

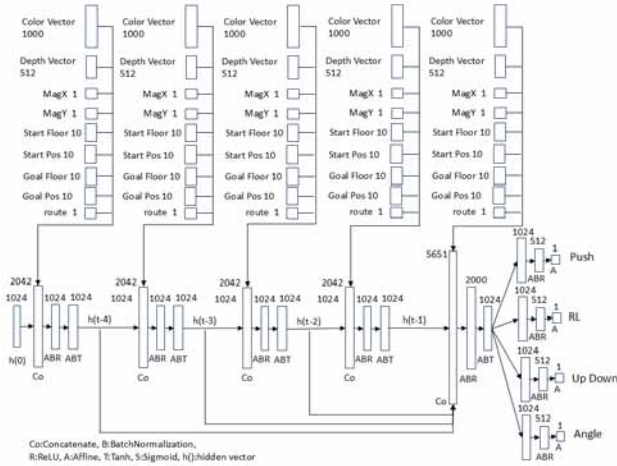


図7 Arm Control Unit

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。

このネットワークでも最新時刻 t における隠れ状態 h_t を推定する際、通常の RNN 入力 (x_t, h_{t-1}) に加え、過去の隠れ状態 $h_{t-2}, h_{t-3}, h_{t-4}$ を入力として結合し、時間方向の Skip 接続 (Temporal Skip Connection) を導入している。

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。

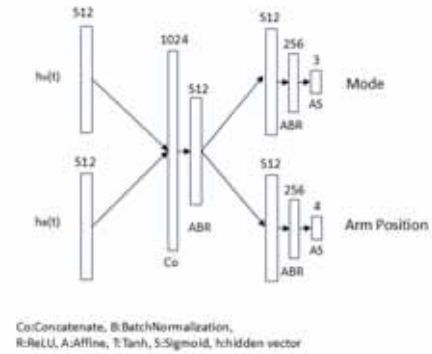


図9 PM Select Unit

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。

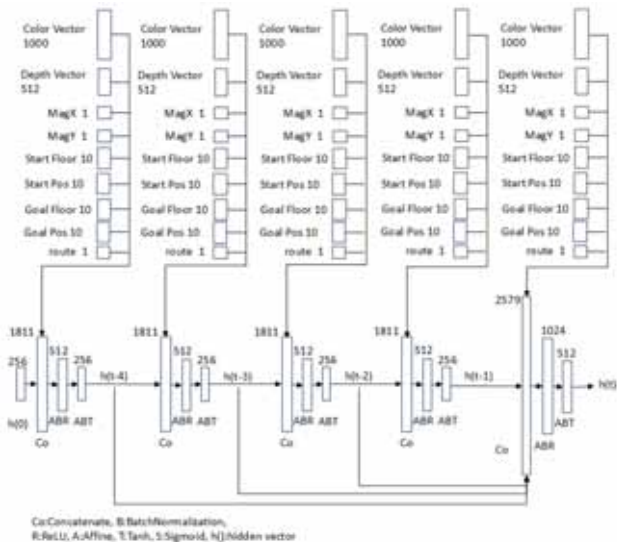


図8 Situation Unit

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)。

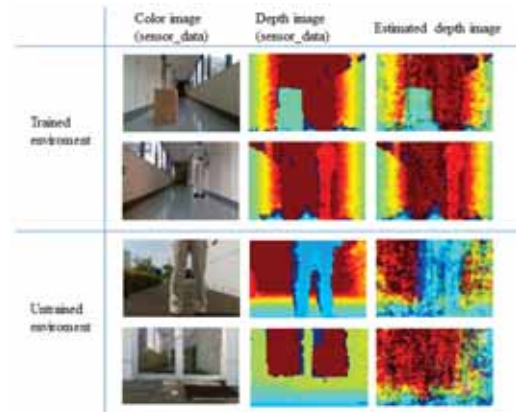


図10 PTD Autoencoder の出力事例

これは RealSenseD455 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 D' と D455 センサで取得した深度画像 D のピクセル値差分の合計 E を出力する。

$$E = \sum_{i,j} |D_{ij} - D'_{ij}|$$

E 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。

一番左は D455 センサで取得したカラー画像で、中央は深度画像である。右側はPTD Autoencoder がカラー画像から推定した深度画像である。1行目と2行目は学習済み環境での結果を示し、3行目、4行目は未学習の環境での結果を示している。学習済み環境での深度画像はうまく推定できている一方で、未学習環境では深度画像推定が不十分であることが確認できる。

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。

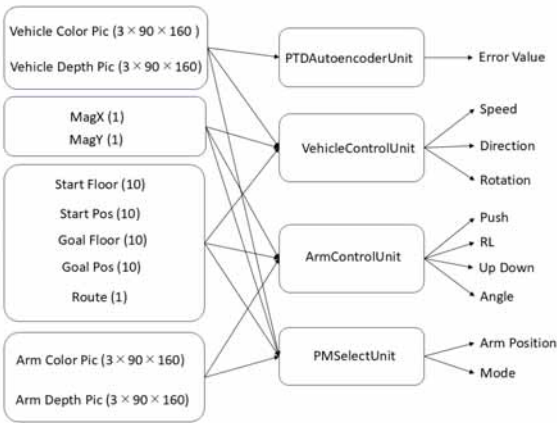


図11 統合ニューラルネットワーク

設計したニューラルネットはPyTorch を用いてコーディングし、Python サーバー上で実行させ、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6～7Hz を維持するよう調整した。

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、ゲームパッドの手動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12)。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。

ゲームパッド操作による手動操作により、各地点を往復するデータセットを合計11万790個(約5時間に相当)収集し、このデータセットを、Training 用74790個、Validation 用24930個、Test 用11070個に分割した。

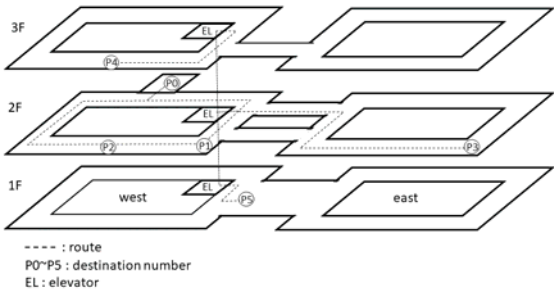


図12 走行ルート

ネットワークの改良が有効であるかを、昨年度開発のモデル(RNN+Skip2023:データセット約28万個)と比較する。

学習はNVIDIA 製TITAN RTX を搭載したPCを用いて、バッチサイズ30、最適化アルゴリズムAdam を使用し100epoch 実施した。

表3 各モデルの車両制御パラメータ決定係数(R²)

model	Speed	Direction	Rotation
RNN + Skip (2023)	0.9609	0.757	0.7686
RNN+Skip (2024)	0.9600	0.7519	0.7053

表4 各モデルのアーム制御パラメータ決定係数(R²)

model	Push	RL	UpDown	Angle
RNN + Skip (2023)	0.6961	0.644	0.5844	N/A
RNN + Skip (2024)	0.8226	0.8452	0.7902	N/A

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R²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、制御モード(車両制御とアーム制御、タスク終了の判定)推定の教師データに対しての正解確率を表5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。

表5 各モデルのアーム基本姿勢(pos)と制御モード切替(mode)推定精度(%)

model	Pos	Mode
RNN + Skip(2023)	99.03	99.64 (2mode)
RNN + Skip(2024)	99.66	99.73 (3mode)

表3より、車両制御パラメータの推定では2023モデルと2024モデル(RNN+Skip 2023、RNN + Skip 2024)間で明確な差はなかった。一方、表4と表5より、アーム制御パラメータの推定では2023モデルに比べ、2024モデルの精度が明確に高いことが分かる。また表5からは車両とアームの制御切り替えでは2023モデルと比較し2024モデルは高い推定精度であることが分かる。

2023モデルのデータセット規模は28万個程度に対し、2024モデルのデータセット規模は11万個程度と半分以下であるにもかかわらず、高い精度を実現した。2024モデル開発で実施した入力画像の高精細化、入力パラメータの拡大(スタートゴールの階数等)、ResNet部の改良が特にアーム制御パラメータ推定において高い学習能力の獲得に貢献したと考える。

表3から表5までの結果から、2023モデルでは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。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。

2023モデルに比べて、2024モデルは、アーム制御パラメータ推定において性能が高く、他のパラメータについても遜色ない精度があり、このことから、これまでで最も高い安定性をもつ推論モデルを実現できたと考える。

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ワークを設計、学習し、RNNとSkipを併用したモデルが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、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、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.

機械設計の効率化に関する研究

(受注生産向け設計システムの開発)

機械システム科	主任研究員	小 楠 進 一
機械システム科	主任研究員	西 村 学
機械システム科	研 究 員	小笠原 耕太郎

形鋼や板金及び配管を用いた製品を受注生産する製造業の工期短縮と売上拡大を目的とし、この目的に特化した自動設計システムを開発している。本年度は、3次元CAD上で形鋼や板金及び配管の最適な寸法を自動的に決定するために、最大応力・最大変位・固有振動数を考慮して、体積が最小となる寸法を提案する最適化プログラムを開発した。「Solidworks2024の最適化デザインスタディ」と「開発した最適化プログラム」を比較した結果、3次元CADの一般的な最適化手法より、機械学習と逐次最小二次計画法を用いた最適化手法の方が良い性能を示すことがあることが分かった。

1. 緒言

県内中小企業は、①受注生産型製造業が多く、受注から納品までの期間が短い、②県内受注生産型製造業は、形鋼や板金及び配管を使った製品が多い。これらの理由から、形鋼や板金及び配管を用いた製品を受注生産する製造業の工期短縮と売上拡大を目的とし、この目的に特化した自動設計システムを開発する。

本年度は、3次元CAD上で形鋼や板金及び配管の最適な寸法を自動的に決定するために、最大応力・最大変位・固有振動数を考慮して、体積が最小となる寸法を提案する最適化プログラムを開発した。

2. 開発方法

3次元CAD上で、最大応力・最大変位・固有振動数を考慮して形鋼や板金及び配管の最適な寸法を自動的に決定するために、本年度は、Anacondaを用いてPythonプログラムの開発環境を構築し、ソフトウェアライブラリを用いて、以下の機能を有する最適化プログラムを開発した。

1) 機械学習による多層パーセプトロン回帰式の構築

3次元形状モデルの特徴的な寸法と最大応力・最大変位・固有振動数のリストから、機械学習により多層パーセプトロン(MLP)回帰式を構築する。

2) 逐次最小二次計画法による最適値の算出

MLP回帰式に、目的関数(体積や重量など)、制約条件(最大応力や最大変位量、固有振動数など)、設計変数(寸法など)を設定して、逐次最小二次計画法(SLSQP)により最適な寸法を算出する。

3. 評価方法

「開発した最適化プログラム」を評価するために、図1に示すブラケットモデルの体積を最小にする最適化問題において、「Solidworks2024の最適化デザインスタディ^[1]」と「開発した最適化プログラム」を比較した。なお、制約条件や寸法制約は、表1のとおりである。

また、「開発した最適化プログラム」は、図2のフローにより最適な寸法を算出した。なお、図2に示す寸法の水準は表2に示すとおり5.0mm刻みとし、機械学習データとして、 $4 \times 4 \times 7 = 112$ 通りの寸法の組み合わせと、CAEを用いて算出した最大変位・最大応力・固有振動数を使用した。

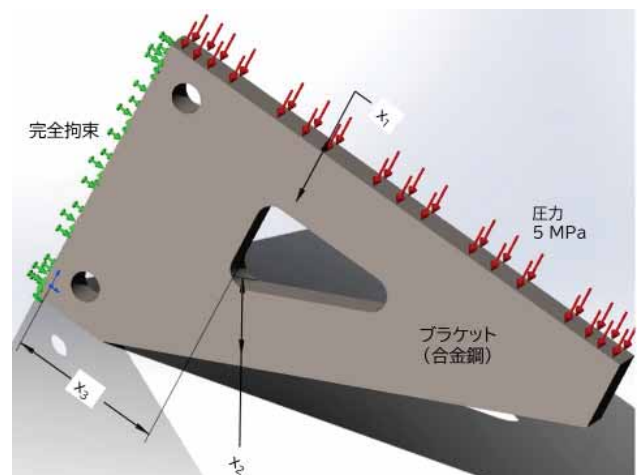


図1 対象とするブラケットモデル

表1 制約条件

目的関数	体積 y_3 [mm ³]	最小化
制約条件	最大変位 y_0 [mm]	$y_0 \leq 0.2$
	固有振動数 y_1 [Hz]	$260 \leq y_1 \leq 400$
	最大応力 y_2 [MPa]	$y_2 \leq 200$
設計変数	寸法 x_1 [mm]	$10 \leq x_1 \leq 25$
	寸法 x_2 [mm]	$10 \leq x_2 \leq 25$
	寸法 x_3 [mm]	$20 \leq x_3 \leq 50$

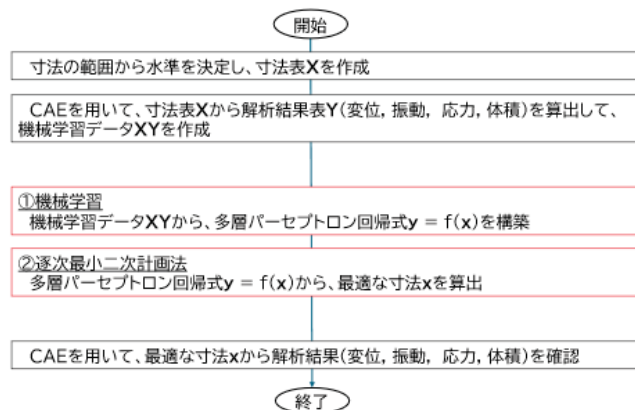


図2 最適化のフロー

表2 寸法の水準

寸法	水準(5 mm 刻み)
寸法 x_1 [mm]	10, 15, 20, 25
寸法 x_2 [mm]	10, 15, 20, 25
寸法 x_3 [mm]	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50

4. 評価結果

「Solidworks2024 の最適化デザインスタディ」を使用した結果を表3に示し、「開発した最適化プログラム」を使用した結果を表4に示す。なお、表4では、実用を考慮して、最適化プログラムによって算出した寸法の小数点第2位を切り上げ、体積、最大変位、固有振動数、最大応力を算出している。

表3 SW の最適化デザインスタディを使用した結果

体積 y_3 [mm ³]	83,918
最大変位 y_0 [mm]	0.130
固有振動数 y_1 [Hz]	317
最大応力 y_2 [MPa]	190
寸法 x_1 [mm]	10.0
寸法 x_2 [mm]	25.0
寸法 x_3 [mm]	35.0

表4 開発した最適化プログラムを使用した結果

体積 y_3 [mm ³]	80,437
最大変位 y_0 [mm]	0.135
固有振動数 y_1 [Hz]	296
最大応力 y_2 [MPa]	197
寸法 x_1 [mm]	11.8
寸法 x_2 [mm]	25.0
寸法 x_3 [mm]	25.2

5. 考察

「Solidworks2024 の最適化デザインスタディ」を使用した場合、体積を 83,918 mm³ まで小さくすることができたが、「開発した最適化プログラム」を使用した場合、80,437 mm³ まで体積を小さくすることができた。また、別の3次元形状モデル・解析条件に対しても、比較実験を実施してみたが、同様に「開発した最適化プログラム」の方が小さい形状を提案した。これらの結果から、3次元CADの一般的な最適化手法より、機械学習とSLSQPを用いた最適化手法の方が良い性能を示すことがあることが分かった。

さらに、MLP 回帰式の性能を評価するため、機械学習に使用した 112 通りのうちランダムに7割を教師データとし、残り3割をテストデータとして、真値と予測値の比較図と二乗平均平方根（以後、RMS と呼ぶ）を算出した。図3、図4、図5、図6に真値と予測値の比較図を示し、表5にRMSを示す。この結果から、機械学習データを3割減らしても、予測精度は十分であり、最適な寸法を提案できると推測できた。

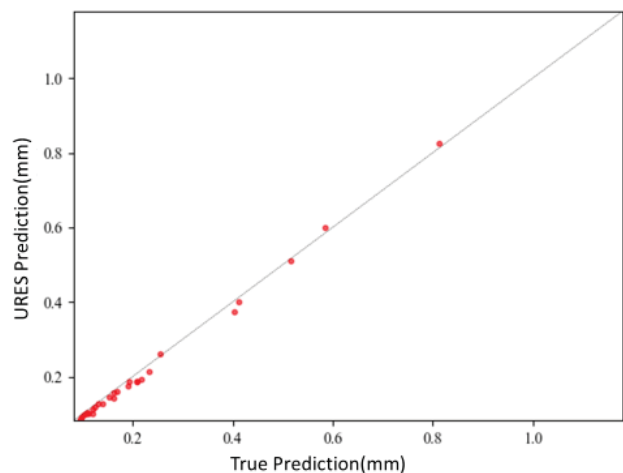


図3 真値と予測値の比較図（最大変位）

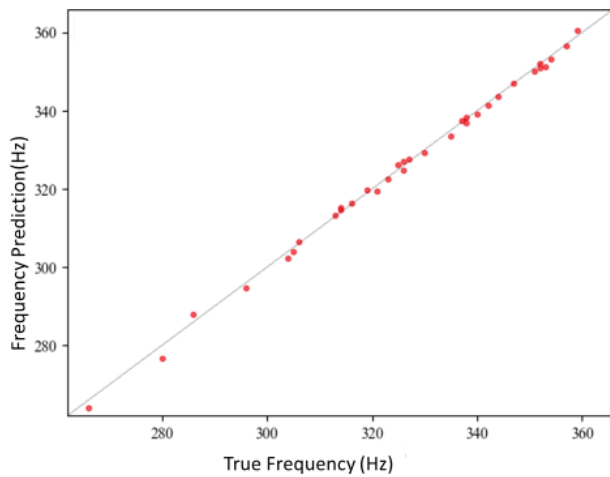


図4 真値と予測値の比較図（固有振動数）

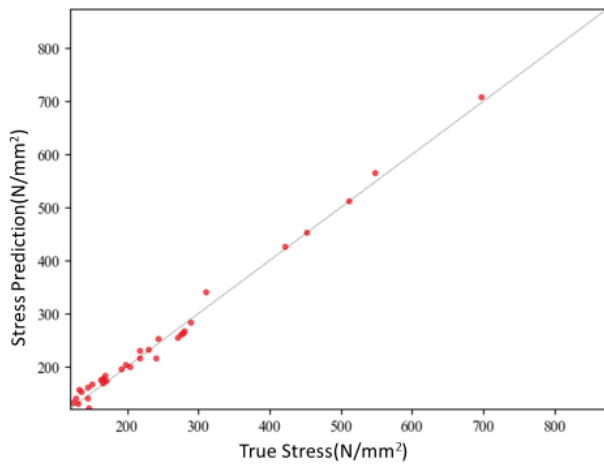


図5 真値と予測値の比較図（最大応力）

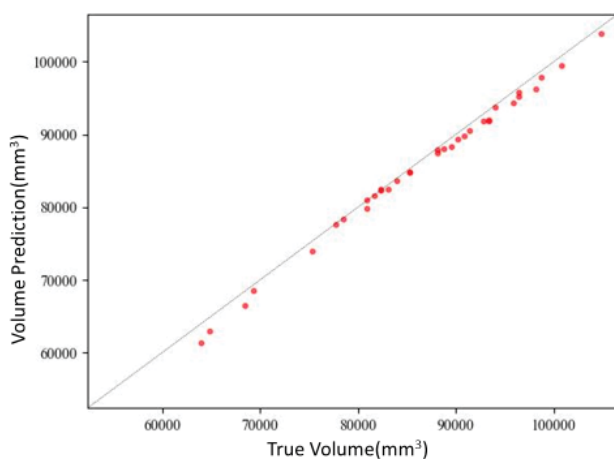


図6 真値と予測値の比較図（体積）

表5 RMS

	教師データ	テストデータ
最大変位 y_0 [mm]	0.0197	0.0172
固有振動数 y_1 [Hz]	0.0134	0.0112
最大応力 y_2 [MPa]	0.0170	0.0180
体積 y_3 [mm ³]	0.0186	0.0201

6. 結言

「Solidworks2024 の最適化デザインスタディ」と「開発した最適化プログラム」を比較した結果、3次元 CAD の一般的な最適化手法より、機械学習と SLSQP を用いた最適化手法の方が良い性能を示すことが分かった。

今後は、MLP 回帰式に必要なデータ数を削減する方法、及び、形鋼や板金及び配管を含む製品形状モデルにおいて機械学習に使用すべき設計変数（寸法等）を削減する方法を検討する予定である。

参考文献

- [1] https://help.solidworks.com/2021/japanese/SolidWorks/cworks/c_Design_Optimization.htm, Accessed 2025.

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)

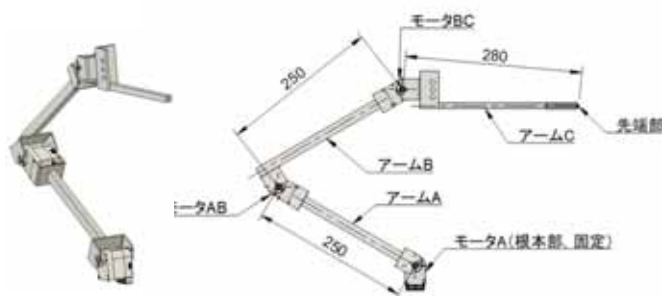
機械システム科 主任研究員 **西村 学**
機械システム科 研究員 **小笠原 耕太郎**

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。全国ではこの機械設計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。本年度は既存のロボットアームに対し、設計で用いるシミュレーションの解析条件を検討した。この条件を用いて既存のロボットアームの軽量化設計を行い、シミュレーション結果と実験値を比較することで提案した条件の妥当性を確認した。

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広く普及している。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。そのため 3D-CAD の普及推進が望まれるが、この課題として、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。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。



a) 外観 b) 概形図 (単位: mm)

図1 研究対象のロボットアーム
(アーム材質: アルミニウム合金)

本研究では別の経常研究で用いているロボットア

ーム^[1]を題材(図1のアームA, B, C)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た。

シミュレーションを含む設計には比較的安価で静解析機能が搭載される Autodesk Fusion (以下 Fusion) を用いて実施した。

2. 機械設計とシミュレーションの解析条件

製造業における機械設計では既に類似製品がある場合が多い。そのため類似製品が既にあるという前提での 3D モデルを用いた機械設計の流れ(図2)について簡単に説明する。

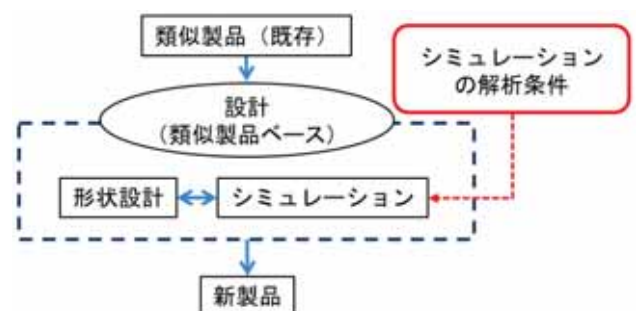


図2 3D モデルを用いた機械設計の流れ

まず類似製品の 3D モデルをベースにして直接形状変更するか、もしくは参考にして新製品の 3D モデルを作成する。その 3D モデルを用いたシミュレーションで各種性能を評価して、必要があれば形状設計をし直す。

手計算だと簡略化せざるを得ない形状でも3Dモデルで再現できていればそれに応じた計算結果が得られる。これは3Dモデルを使うメリットの一つである。

シミュレーションでの性能評価において設計対象製品は類似製品（既存）の結果と比較して評価される。比較して評価する上でこれらの結果は同じ条件のもとで計算されたものである必要がある。この条件をシミュレーションの解析条件と呼ぶことにする。このシミュレーションの解析条件によっては現実から大きく逸脱した結果となる可能性もあるため、解析条件の妥当性については設計に用いる前に検討することが望ましい。そのため本研究ではまずシミュレーションの解析条件について検討した。

3. シミュレーションの解析条件検討

今回の設計では上述の様に各製品のシミュレーション結果同士の比較であって、引張強さなどの実験で得られた指標との比較ではないものとする。この場合、現実には発生する物理量そのものがシミュレーションで再現できなくてもよいと考える。他の部位と比べて高い値を示しているなどのより危険な部位を特定出来ることが重要であると考え、今回のシミュレーションでは分布傾向が再現できれば良いものとした。そのため、ひずみもしくは応力などの分布傾向や変形の仕方などが現実を示しているかについて確認していく。

3. 1 メッシュサイズ検討

精度や分布傾向に影響するシミュレーションの解析条件のひとつにメッシュサイズがあり、この適切なサイズを決定した。具体的には以下で説明する。

前年度に報告した各アームの最大負荷時の条件（図3）を簡易的に設定し、メッシュサイズを各アームで5段階に変化させて解析を実施した（表1、表2）。

表1、2のメッシュサイズ条件は各アームを構成するブラケット(BKT)やロッド(ROD)、コネクタ部品(CON)を元にした、より簡易的なモデルを用いて決定している。このモデルは各部品を長手方向に垂直に切った断面形状を長手方向に単純に伸ばした簡易的な片持ちはりとした。そのモデルの先端に長手方向と垂直に荷重を付加した時のたわみ量がメッシュサイズの変化に対して収束する最大のメッシュサイズの組合せを“中(基準)”と定めた。これを基準としてメッシュサイズを大きくしたものを“大”、“とても大きい”とし、小さくしたものを“小”、“とても小さい”とした。

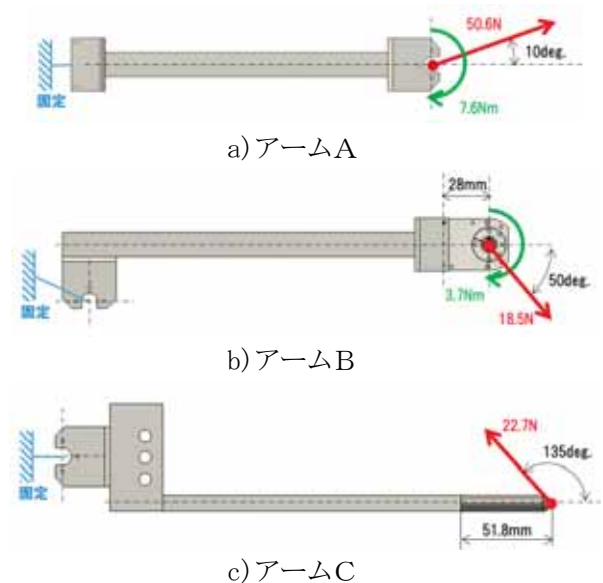


図3 各アームの荷重負荷条件

表1 アームAとBにおけるメッシュサイズ条件

[mm]			
メッシュサイズ条件	BKT-R	ROD	BKT-T
とても大きい	15	120	30
大	15	60	15
中(基準)	7.5	30	7.5
★小	4	15	4
とても小さい	2	7.5	2

※BKT-Rはモータ固定用、BKT-Tはモータ駆動側組付用。

表2 アームCにおけるメッシュサイズ条件

[mm]			
メッシュサイズ条件	ROD	CON	BKT-T
★とても大きい	60	30	15
大	60	15	15
中(基準)	30	7.5	7.5
小	15	4	4
とても小さい	7.5	2	2

これらのメッシュサイズ条件でのシミュレーション結果として最大変位量の推移を図4に示す。これを見るとメッシュサイズが小さくなるほど最大変位量が大きくなり値が収束する様子が確認できる。今回は隣り合うメッシュサイズ条件の結果が6%以下となった場合収束していると判断した。この判断基準で一旦決めたメッシュサイズ条件を表1、2において★印で示す。本来メッシュサイズを決める場合アームの種類ごとに分けるのではなく一つに統一してなるべく汎用的に扱えるのが望ましい。本研究でも最終的には統一しており詳細は5. の項目で示す。

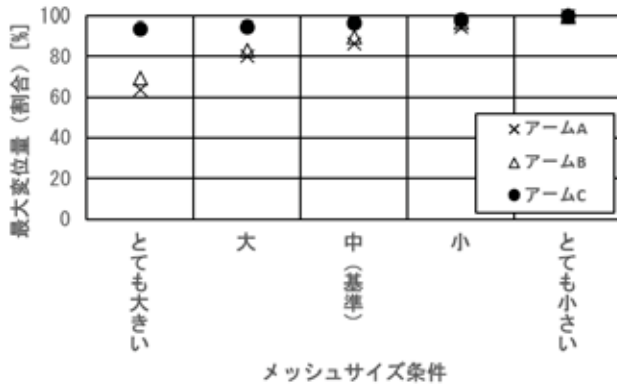


図4 メッシュサイズに対する最大変位量の推移
※ “とても小さい”条件の変位を100%とした。

3. 2 解析モデルと境界条件の検討

まず図3で示した固定・負荷の条件を適用する対象であるアームと治具の構成を図5に示す。

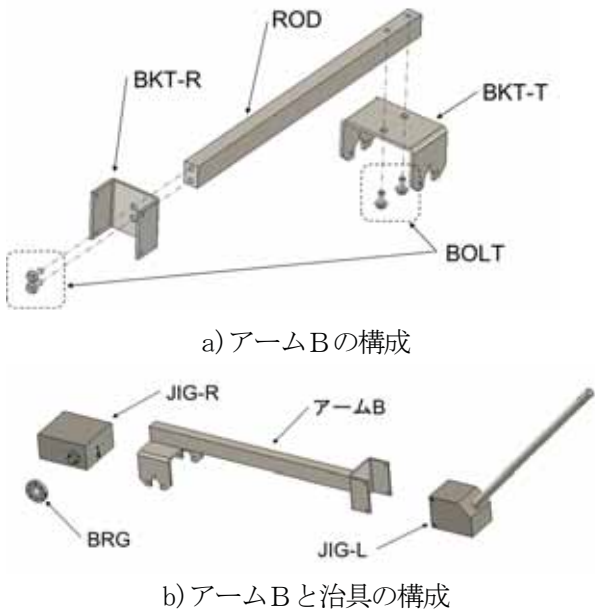


図5 アームBにおけるアームおよび治具の構成

図5は代表としてアームBを示している。一つのアームは複数の部品から構成され、それぞれボルトで連結される(図5 a))。さらにアームBには負荷するための治具(JIG-L)と固定するための治具(JIG-R)がボルトを介して組付けられる(図5 b))。この時、治具はBRK-T(図5 a))から挟み込まれて組付くがこの片側だけにベアリング(BRG)が組付けられる。そのため、片側のみトルクが伝わらない構成となっているが、これは実際のアームBの使われ方を再現したものである。

これらはアームA・Cの構成についても同様である。

表3 解析モデルの概要

解析モデル	部品間ボルト	治具	部品・治具間ボルト
ボルトなし/治具なし	×	×	×
ボルトあり/治具なし	ボルトコネクタ	×	×
ボルトなし/治具あり	×	○	ボルトコネクタ

このようなアームA、B、Cについて表3に示す3種類の解析モデルでシミュレーションを行った。

『ボルトあり/なし』は部品間の締結ボルトを表現しているかどうかを示している。ボルトを表現する場合はボルトコネクタ^[2]という Fusion の持つ機能を用いて設定しており、初期軸力を加味できる。ボルトを表現しない場合はアームの各部品はボルトを用いずに連結され一体部品として表現される。『治具あり/なし』における治具ありはJIG-TおよびJIG-R、BRGなどがモデルで表現され、現実と同様にアームに対して組付けられて計算されている。その際、治具とアーム間はボルトコネクタで連結される。治具なしの場合は治具のモデルは組付けず、治具が組付く部位に対して固定や同等の負荷条件を付与している。

つぎにBKT-Tに組付くBRG部の条件設定について説明する。BRGの内輪(およびシャフト)と外輪が回転方向の動きを互いに阻害せず、半径方向の荷重だけは相互に作用しあう状態を再現したい。そのためにBRG外輪内径の縁とJIG側のシャフトの軸中心とをFusionが有する機能の剛体コネクタ^[3]を用いてBRGの両面2か所(図6)で設定した。これによりBRG外輪の内径とJIGのシャフト軸中心において上記の様な相互関係が構築できると考えた。

本来はBRG内輪外径と外輪内径が相互に作用しあっており、今回はこれを再現できていないが本検討対象はアームであるため問題ないと判断した。

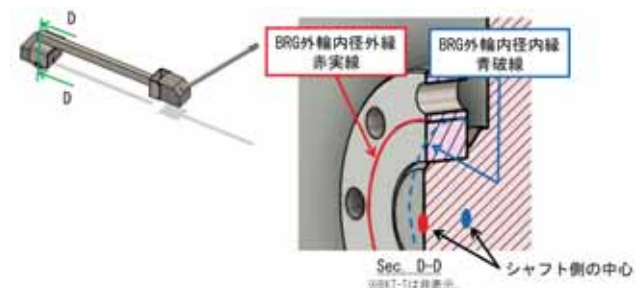


図6 治具ありにおけるBRG部の条件設定

治具なしの場合は、BKT-Tに対してBRGを組付けないが治具ありや現実と同じ挙動を再現させる必要がある。今回はBKT-Tにモータの駆動軸部が組付き(図1)、

モータを支持する BKT-T の両組付け部の回転軸は常に一致するとみなして考えた。その上で BRG が組付く側だけ回転軸まわりに自由に回転できるという境界条件としたい。

これを実現するために、BRG が組付く通し穴に対して Fusion における構造拘束^[4]のタイプをリモート^[5]として通し穴が BRG 中心軸まわりの回転を除く自由度すべてを拘束した。その反対側の通し穴は固定とした。

ここまで説明した境界条件で拘束し表3に示す解析モデルにおけるシミュレーション結果のうち変位量分布(絶対値)の結果を図7～9に示す。

各解析モデルの結果を各図の a)～c) に示す。図7においては下方の BKT に固定用治具を取り付けるため(図3)、下方の変位が小さくなるはずである。しかし今回は上述のとおり治具なしの場合(図7 a)とb))において BKT-T のモータの回転軸まわりの回転を除くすべての自由度を拘束している。(逆側に本来反作用として生じる荷重を負荷した。) そのため図7の a)とb)において上部の BKT-T の回転中心の変位量がゼロとなっており、下方の変位量が大きくなっている。ただ、変形の仕方に着目すれば a)～c) で大きな変化はない。図6, 7においても同様に変形の仕方として a)～c) で変化はないと判断した。

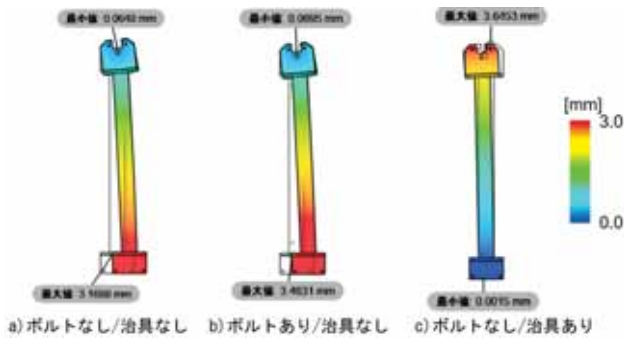


図7 アームAの変位量分布



図8 アームBの変位量分布

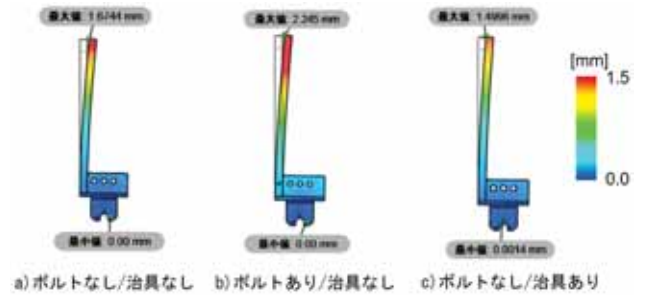


図9 アームCの変位量分布

また、応力分布についても確認した。応力分布は BKT-T で見られた特徴的な分布について着目した。図10～12ではZ方向の垂直応力分布を示す。各図の a)～c) では BKT-T の内側 R 付近で引張と圧縮が左右対称の位置に同様に発生しており大小の差はあるが傾向は同等である。b)やc)ではボルトコネクタを一部利用して締結時の初期荷重が考慮されているため、締結部付近では分布傾向に差異が見られるが強度と比較して小さいので、問題ないものと判断した。これらの結果より今回比較した解析モデルはどれも同等の分布傾向を示せると判断できる。

また、計算に要した時間を図13に示しており、アームごとに各解析モデルの計算時間を比較した。ここから確実に言えるのはボルトなし/治具なしの場合がどのアームにおいても計算時間が最も短いことである。

設計で用いる解析モデルとして変形や応力分布の傾向が観測でき、なるべく計算コストが低いものにしたいので今回は“ボルトなし/治具なし”を用いていくこととした。

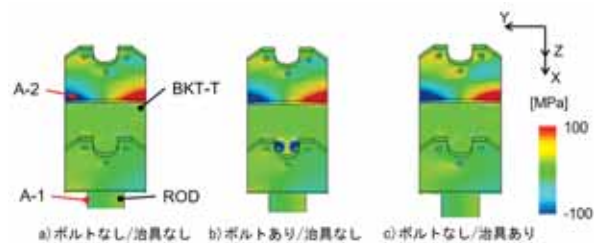


図10 アームAにおけるZ方向垂直応力分布

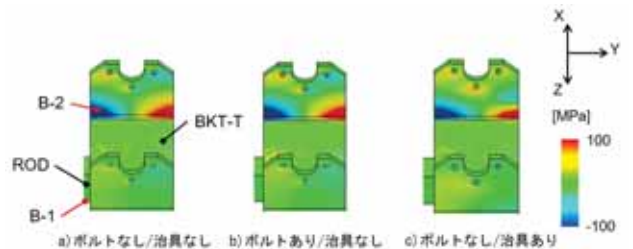


図11 アームBにおけるZ方向垂直応力分布

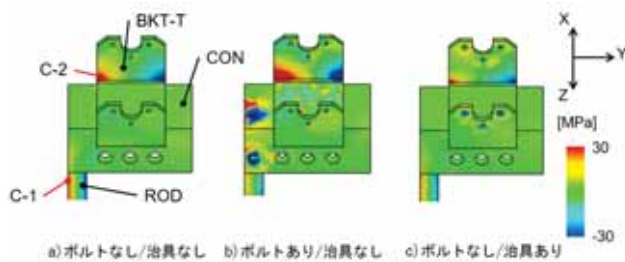


図1-2 アームCにおけるZ方向垂直応力分布

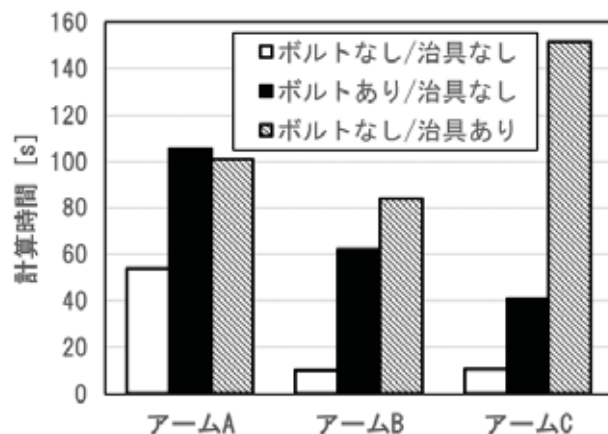


図1-3 計算時間

4. 実験

4.1 実験方法

図3で示した固定・負荷条件をアームに適用して実験をし、ひずみを測定した。図1-4に代表としてアームBの試験装置構成を示す。シミュレーションで確認できた特徴的な値を示す箇所に貼付したひずみゲージをデータロガーに接続し、データロガーに接続されるPCで各部のひずみ量を観測した。今回はひずみゲージを用いたが、分布傾向を確認する上ですでに精度も確認されているデジタル画像相関法 (DIC) ^[6]や光弾性法 ^[7]を利用することも有効であると思われる。

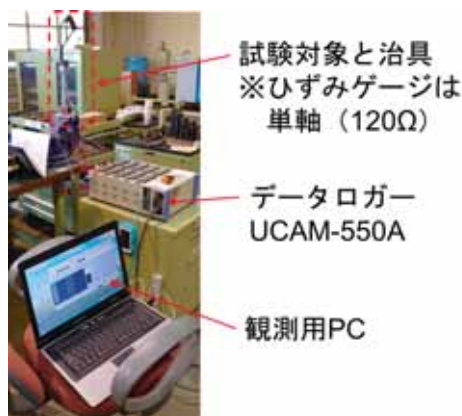


図1-4 アームBにおける試験装置構成

4.2 実験結果

実測値とシミュレーション結果のひずみを比較した(図1-5)。観測位置は図1-0～1-2中のA-1、A-2、B-1、B-2、C-1、C-2である。ここでB-1についてのみY方向垂直ひずみを示しており、その他はZ方向垂直ひずみを示す。実測とシミュレーションを比較するとどの個所においても正負が合っておりシミュレーションで現実と同様の分布傾向が示せていると考えられる。

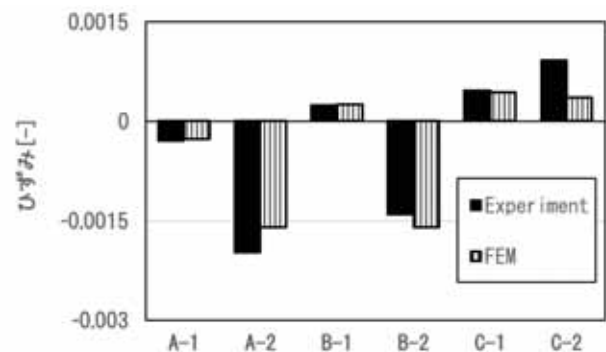


図1-5 各部のひずみ

5. 設計に向けたシミュレーション条件の統一

4.までの結果から分布傾向が確認できるという点では現状のシミュレーション条件で設計してよいと考えられる。ただ今回のようなアーム部品を設計する場合に細かい形状で条件を変更するのは手間であるため、ある程度の汎用性を持たせる必要がある。そこで今回メッシュサイズをアームA・B(表1の★)とアームC(表2の★)とで分けているものを統一することを考えた。統一するにあたりメッシュサイズがより小さいアームA・Bの条件をアームCに適用できるかを検討した。これまでの条件との比較結果を表4に示す。ミーゼス相当応力の最大値や最大変位量も大きく変化がなく分布傾向についても類似していたので統一可能と判断した。

これよりこの後の設計におけるシミュレーションでは、メッシュサイズをBKTで4mm、その他の部品を15mmとして行うものとした。

表4 アームCに対するメッシュサイズ統一検討

メッシュサイズ条件	アームC	アームA・B
	BKT:15mm ROD:60mm CON:30mm	BKT:4mm その他:15mm
ミーゼス相当応力最大値[MPa]	64.4	61.8
最大変位量[mm]	1.67	1.69
分布傾向の類似性	○	

6. シミュレーションを用いた設計

6. 1 設計したロボットアーム

アームBを対象として軽量化設計を実施した。その際の強度要件として、図3 b)に示す負荷条件下で軽量化前のミーゼス相当応力の最大値を下回ることとした。

軽量化自体は著者の試行錯誤により行った。軽量化した結果とシミュレーション結果を図16に示す。

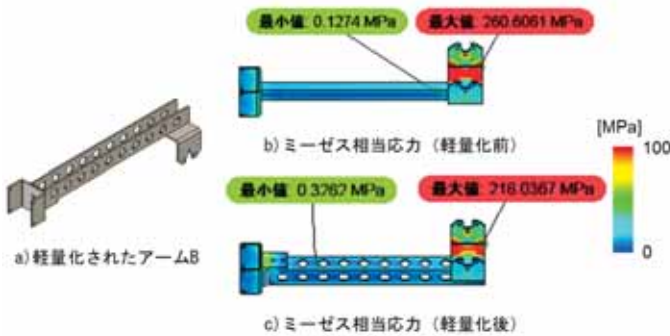


図16 軽量化アームBとシミュレーション結果

形状は図16 a)に示し、軽量化前後で約22g(実測)軽くなっている。ミーゼス相当応力の最大値についても軽量化前の260.6MPaに対して軽量化後が218.0MPaと下回っており強度要件を満たしている(図16 b)とc)。

6. 2 シミュレーションと実験値の比較

シミュレーション結果と実測値を比較した。比較位置と測定の向きを図17に示し、比較結果を図18に示す。各所の垂直ひずみは正負が一致しており今回程度の形状の変動であれば設定したシミュレーションの解析条件で分布傾向が確認できると考えられる。

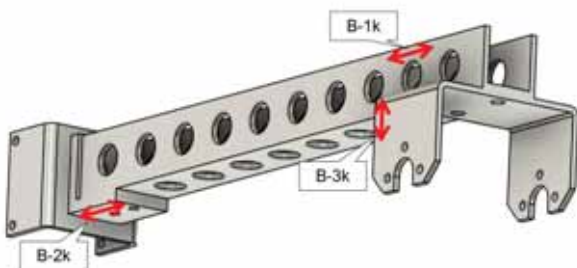


図17 ひずみ比較位置と測定の向き

※B-3kについてはBKTの内側の値について比較した。

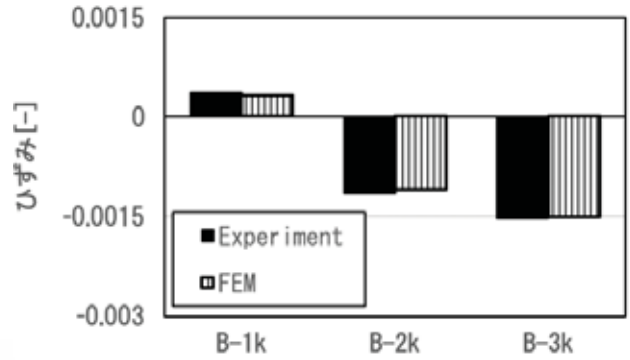


図18 軽量化アームにおける各部ひずみ

7. 結言

本研究ではシミュレーションの解析条件を定めて、これを設計に用いるところまでの一連の流れを示した。また、定めた解析条件を用いることで現実の分布傾向を設計時に確認できた。

今回の結果は設計段階で分布傾向を把握できる可能性について示しているに過ぎない。よりよい解析条件を構築するためにはシミュレーションでは検出できなかった事象が発生する度に解析条件を改善することしかないと考える。その経験が各組織のノウハウになる。

今後は本報告内容を元にして、主に技術支援などで還元していく。

参考文献

- [1] 堀江貴雄：長崎県工業技術センター研究報告、No. 52, p. 13, 2023.
- [2] <https://help.autodesk.com/view/fusion360/JPN/?guid=SIM-ADD-BOLT-CONNECTOR>, Accessed 2025.
- [3] <https://help.autodesk.com/view/fusion360/JPN/?guid=SIM-ADD-RIGID-BODY-CONNECTOR>, Accessed 2025.
- [4] <https://help.autodesk.com/view/fusion360/JPN/?guid=SIM-ADD-STRUCTURAL-CONSTRAINT>, Accessed 2025.
- [5] <https://help.autodesk.com/view/fusion360/JPN/?guid=SIM-REMOTE-CONSTRAINT-CONCEPT>, Accessed 2025.
- [6] 小金丸正明：日本機械学会年次大会講演論文集、2004. 1、pp. 295-296, 2004.
- [7] S. P. Timoshenko, J. J. Goodier：弾性論、pp. 154-171, 2012.

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)

次長 兼 基盤技術部長 兼 応用技術部長 田 口 喜 祥

近年製造現場では、生産効率を上げるためDX (Digital Transformation) の推進が求められている。特に、IoT (Internet of Things) 技術を用いて機械装置の稼働状況を監視することで、無駄な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に必要なデータ収集などが可能となり、注目されている。さらに、近年ではAI (Artificial Intelligence) 技術を活用して、収集したデータを基にニューラルネットワークを学習することで、故障の予兆監視、不良品の事前予測なども行われるようになってきている。

本研究では、工場内で稼働している機械装置の稼働状況を IoT 技術により収集し、収集したデータを基に AI 技術を用いて解析することで、工場内で稼働している機械装置を推定し、作業工程を監視する装置を開発した。

1. 緒言

製造現場では、生産効率を上げるためDX (Digital Transformation) の活用が求められている。特に、生産設備や工作機械の稼働状況の監視や、生産数、生産に要した時間をIoT (Internet of Things) 技術を用いて収集し、デジタルデータとして記録することで、製造工程の効率化や不具合発生時の迅速な対応、生産性向上のためのデータの取得が可能となることが期待される。また、近年AI (Artificial Intelligence) 技術を製造現場へ応用した事例が数多く報告されており、注目を集めている。IoT 技術により自動的に収集した多くのデータを用いてニューラルネットワークを学習することで、不具合の事前予測などが可能となるため、製造業で応用が期待されている^{[1] [2]}。

一方、生産現場では製造に使用した機械装置の稼働時間や、稼働状況、製造工程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。作業工程の監視をIoTやAI技術を用いて実現することが可能となれば、工程を自動的に監視し、生産を管理できるスマート工場の構築可能となり、製造業のさらなるDX化推進支援につながると考えられる。

そこで、本研究開発では、工場内で稼働している機械装置の稼働状況をIoT技術により収集し、AI技術を用いて解析することで、稼働している機械装置を推定し、生産工程を監視することが可能な装置開発をすることを目的とした。

生産設備やCNC工作機械などは、これまでの研究でパトライトの点灯状態や主軸電流波形の解析を行うことで稼働状況の監視が可能となっている。しかし、作業者が直接操作を行うディスクグラインダーや電動ド

リルなどの小型電動機械の稼働状況の監視を行うことは難しかった。そのため、本研究では作業者が直接使用する小型電動機械を対象として、電流波形や稼働時に発生する音の特徴から稼働している装置を認識し、稼働状況を取得する装置を開発することを目的とした。

令和4年度は作業工程監視を行う装置開発のために必要な、電流などの特徴から稼働している機械装置を推定する監視モジュールを開発するためのデータ収集を実施した^[3]。令和5年度は監視モジュールのハードウェアの検討および試作^[4]、令和6年度には収集したデータを基にニューラルネットワークを学習し、電流、音の波形を基に稼働している装置を推定する装置を開発し、性能確認試験を実施した。

2. システム構成

開発した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現在稼働中であるか認識し、記録する必要がある。

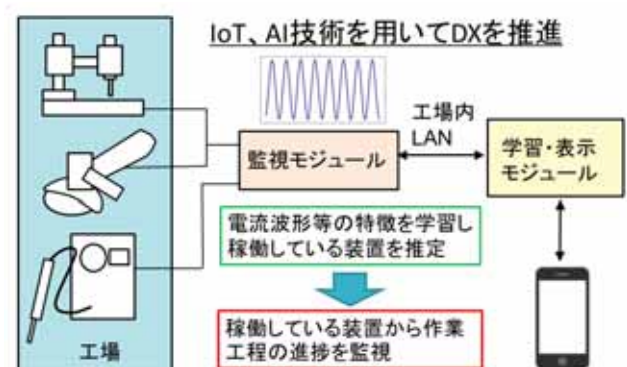


図1 システム構成

工作機械や生産設備などの稼働監視は、パトライトの監視や回転主軸の電流解析によりこれまでの研究で可能となっている。しかし、仕上げ作業などで用いられる電動ドリル、ディスクグラインダーなどの小型電動機械の稼働状況は、使用場所が特定されておらず監視することが難しかった。もし、工作機械や生産設備などの大型機械装置に加えて小型の電動機械の稼働状況監視が可能となれば、工場全体での稼働監視ができるため、工程監視が可能となり、スマート工場を構築可能になると考えられる。

そこで、本研究では稼働中の電流などの特徴を基に、ニューラルネットワークを用いて稼働している小型電動機械や電動工具を推定し監視を行う装置を開発することを目的として開発を実施した。

3. データセット収集システム

稼働中の装置を電流などの波形の特長から推定する監視モジュールを開発するためには、電流波形と稼働中の装置に関するデータをデータセットとして収集し、ニューラルネットワークを学習する必要がある。そこで、テーブルタップを流れる電流波形の特徴を認識し、稼働中の機械装置を推定する監視モジュールを開発することを想定し、電流データを収集することとした。まず、電流センサと ESP32 マイコンボード用いた電流計測用マイコンボードを複数台製作し、電流データの収集を行った。さらに、製作した電流計測用マイコンボードで収集したデータを時間および機械装置の名称と共にサーバPC に記録し、データセットとして収集するデータセット収集システムを製作した。製作したシステムの構成を図2に示す。実際に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3に示す。

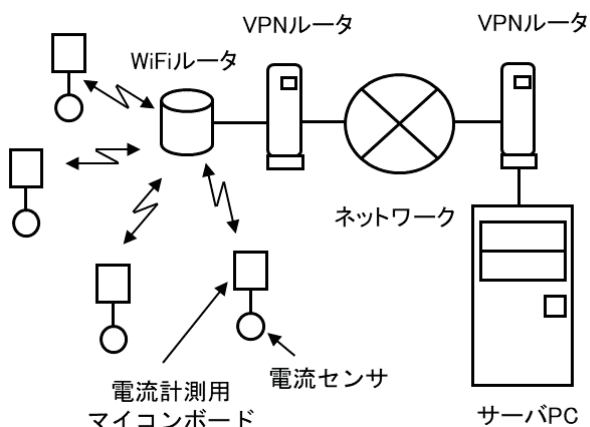


図2 データセット収集システム

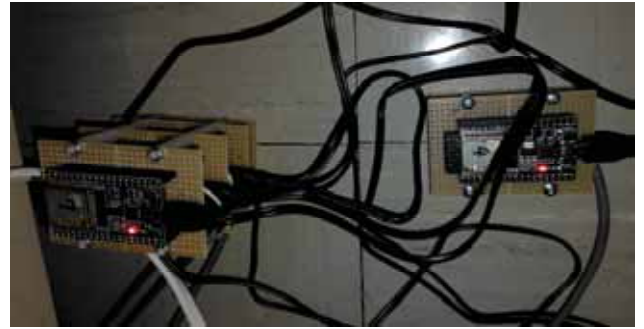


図3 電流計測用マイコンボード

データセット収集システムは、離れた工場で利用することを想定し、プライベートネットワーク間のデータ通信のためのVPNルータや広範囲なWiFi環境構築のためのメッシュWiFiなどを用いる構成とした。使用したVPNルータはBUFFAL製VR-S1000、メッシュWiFiルータはTPLink製DECO X95である。

製作したシステムで収集した電流データの例を図4に示す。この例では、約25kHzのサンプリング速度で2,048個の電流データを取得し表示した結果である。

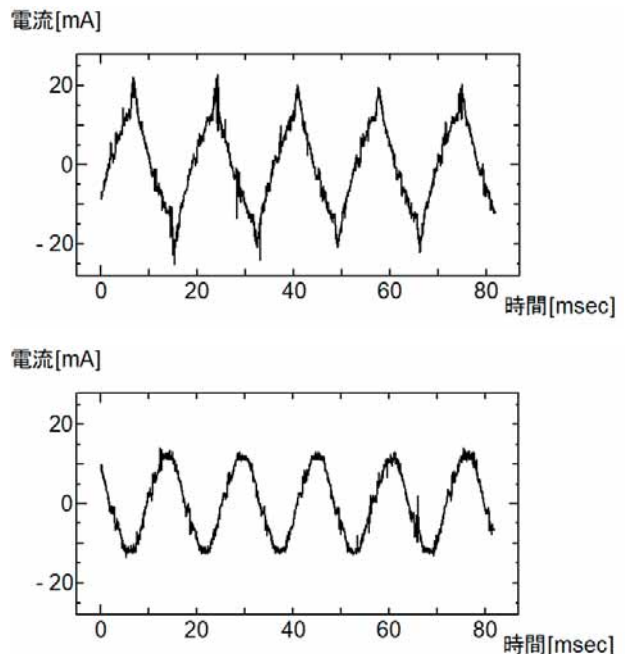


図4 収集した電流データの例

今回、製作した8台の電流計測用マイコンボードを用いて、テーブルタップ2セットについてそれぞれのテーブルタップ根本1箇所と、そのテーブルタップに接続されている機器3か所の電流データを1分おきに計測し収集した。

複数の工場で稼働している装置を対象とすることを

想定し、VPN を用いて2つのプライベートネットワーク間でのデータ収集システムを構築し、1分おきの電流波形データの収集が可能であることを確認した。

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の動作中の画面を図5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、同期したデータ収集を行っていないことに注意を要する。

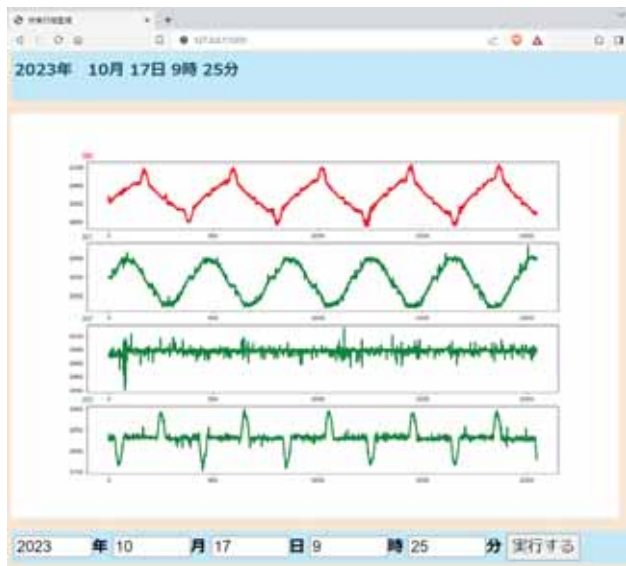


図5 収集データ確認プログラム

4. 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、ESP32などのマイコンボードでセンサデータを取得し、取得したデータをサーバコンピュータに送信後サーバコンピュータでニューラルネットワーク処理を行っていた。サーバコンピュータとしては、Raspberry Pi、Latte Panda、Jetson nanoなどのボードコンピュータ^[5]を使用していたが、これらのボードコンピュータはLinuxやWindowsなどのOSを用いて作動させており、リアルタイムでの処理が難しい。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、ニューラルネットワーク 処理をSONYのNeural Network Console^[6]を使用することを前提とし、ニューラルネットワーク処理もマイコンボード単体で実現することを目指してSONY製のSPRESENSE^[7]を用いることとした。

SPRESENSEマイコンボードは、最大4chのアナログマイクを接続可能で、音データをサンプリング周波数48kHzで測定できる。開発当初は電流波形データのみでの推定を試みていたが、熟練者が稼働中の機械装置を推定する場合、機械装置の作動音を基に判断することが多いため、音を用いた監視も有効であると考えられる^[8]。そこで、電流波形以外に音波形を用いた稼働装置の推定も試みることにした。

電流波形と音波形を監視対象として試作した監視モジュールの写真を図6に示す。なお、SPRESENSEマイコンボードで電流波形を測定するための回路は、電流データを収集するためにESP32マイコンボードを用いて作成した、電流計測用マイコンボード同様にCTセンサからの信号をオペアンプにより増幅しマイコンボードへ入力する回路構成とした。

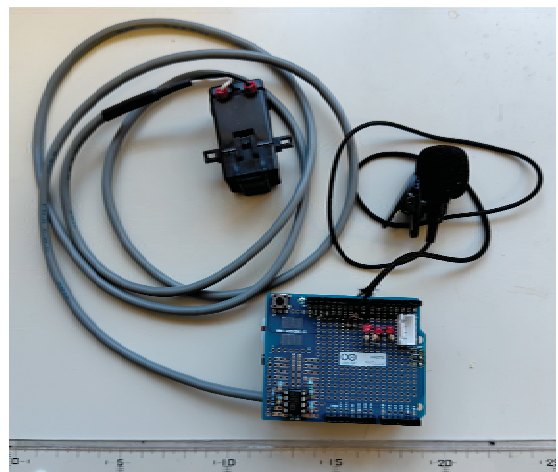


図6 監視モジュール

ニューラルネットワークを学習するためには、多くのデータを収集する必要がある。本研究で開発する監視装置では、機械装置が起動する際の電流波形および音を用いて稼働している装置を推定するため、起動時の電流データおよび音データを収集する。そのため、これまで収集していた電流データに加えて、起動時の音データを自動で取得するための改良を実施した。監視モジュールにAC100Vの電源ON/OFFを行える回路を追加し、監視モジュールから装置のON/OFFを制御でき

る構成として、装置起動時の電流波形と音波形を収集した。起動時の電流データ、音データを収集するために作成したプログラムのフローチャートを図7に示す。

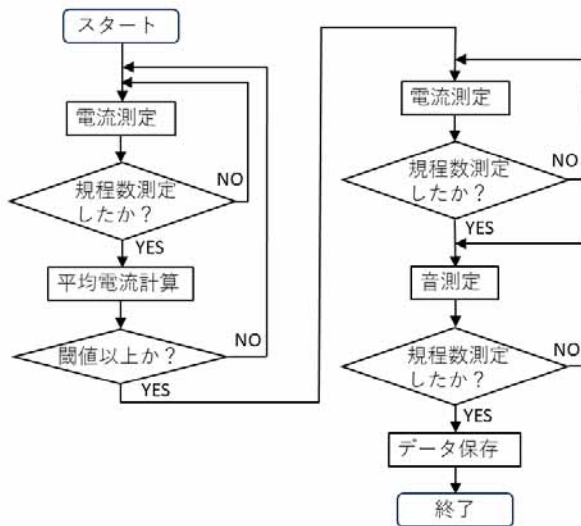


図7 起動時データ収集プログラムフロー

5. 学習・表示モジュール

学習・表示モジュールでは収集したデータを基に監視モジュールで使用するニューラルネットワークの学習や、監視モジュールから送られてきたデータを表示する機能と、スマートホンに通知する機能を有する。

監視モジュールで動作するニューラルネットワークを構築するために、Sony の Neural Network Console デスクトップ版というニューラルネットワーク開発用のアプリケーションソフトを用いた。今回、表1に示す仕様の Windows コンピュータに、収集したデータを確認するための収取データ確認プログラムとスマートホンに通知を行うプログラムを搭載することで、学習・表示モジュールとして使用した。

表1 学習・表示モジュールのハードウェア仕様

OS	Windows11
CPU	Intel (R) Core i7-10700F
メモリ	64GByte
GPU	NVIDIA (R) GeForce RTX 3090Ti
ストレージ	SSD 2TB

スマートホンへの通知は、当初Line Notify というLine に表示するためのサービスを使用していた。しかし、Line Notify が令和7年3月31日をもってサービ

スを終了するとの通知があったため、代替としてDiscordによる通知プログラムを作成し対応した。

なお、学習を行わず表示とスマートホンへの通知のみで良い場合は、Raspberry Pi などの安価なボードコンピュータで、データ収集や稼働状況表示などの動作が可能であることを確認している。

6. 性能評価実験

試作した作業工程監視装置の性能を評価するための実験を実施した。今回、監視対象として小型の卓上型ボール盤、卓上型丸ノコ版、手持ち式ディスクグラインダーを監視対象として実験を実施した。実験で用いた監視対象装置の写真を図8に示す。



(a) 卓上型ボール盤



(b) 卓上型丸ノコ盤



(c) ディスクグラインダー

図8 監視対象の機器

開発当初、図8に示した機種種の推定には電流波形のみにより行うことを予定していた。しかし、誘導モータ、ブラシレスモータ、AC ブラシモータなど、モータの種類が違う場合の推定は容易であったが、同種類のモータを使用している装置の場合は推定が難しいことが実験により明らかとなった。そこで、電流波形に加えて起動時の音データも収集し、稼働している装置を推定することとした。監視対象の機器について、駆動時電流波形と音データをそれぞれ 5,456 回収集しニューラルネットの学習および学習したニューラルネットワークの評価を行った。データセットの作成の際、音データについては収集したデータ長がプログラム起動のタイミングにより意図した長さとは違う長さで保存される場合があったので、長さが違うデータは排除してデータセットを作成した。収集したデータセットのうち約8割である 4,378 セットを学習用、残りの 1,078 セットを評価用として使用し、ニューラルネットワークコンソールの探索機能により良好な性能のニューラルネットの探索を行った。

図9は、探索結果を横軸に乗加算回数、縦軸に推定誤差として表したトレードオフグラフである。乗加算回数が増えると推定誤差が小さくなるが、演算に必要なメモリ容量が多く必要となり、演算時間も増えることになる。



図9 トレードオフグラフ

ニューラルネットワーク探索の結果、乗加算回数が約 40,000 以上であれば電流波形と音波形を用いて正解率 100%で稼働している機器を判別できるニューラルネットを探索することができた。しかし、乗加算回数が増えることによるニューラルネットのデータ容量

が大きくなり、SPRESENSE マイコンのみでは、稼働している推定処理を行えなかった。この結果を基に、SPRESENSE マイコンで実行可能な容量のニューラルネットを探索し、乗加算回数 21,635 回で推定率 99.94 %で判別できるニューラルネットを探索した。

探索した稼働装置推定ニューラルネットの構成を図10に、ニューラルネットの評価結果を図11に示す。

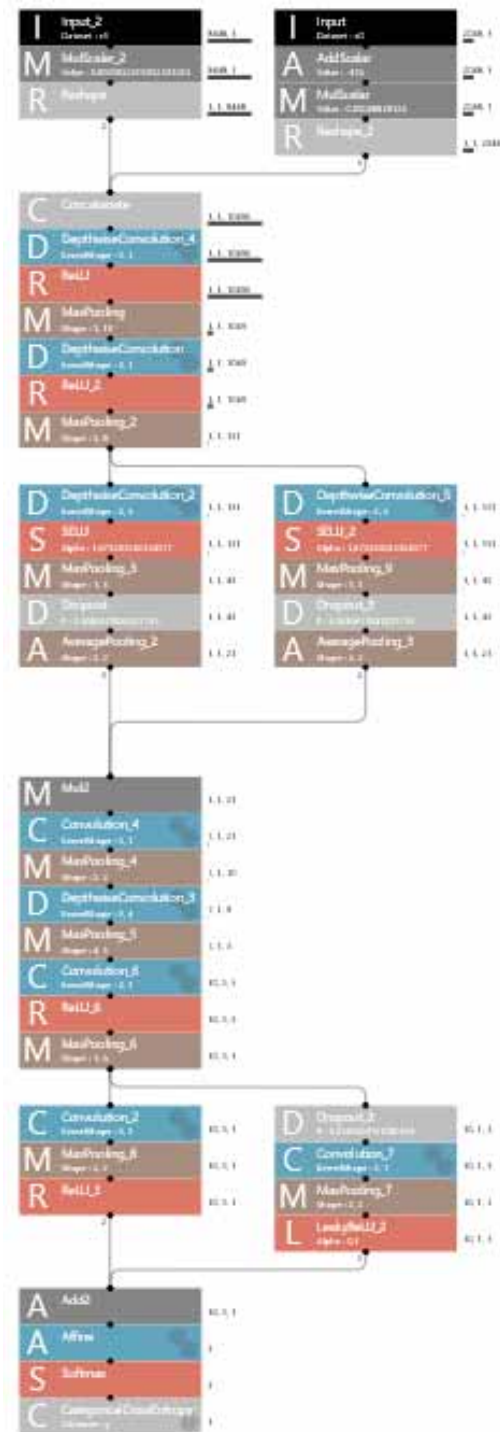


図10 稼働装置推定ニューラルネット

○ 出力結果 ● 混同行列: y - y' ▼ ○ その他

	y'_0	y'_1	y'_2	Recall
y=0	356	3	0	0.9916
y=1	0	359	0	1
y=2	0	0	360	1
Precision	1	0.9917	1	
F-Measures	0.9957	0.9958	1	
Accuracy	0.9972			
Avg.Precision	0.9972			
Avg.Recall	0.9972			
Avg.F-Measures	0.9972			

図1 1 稼働装置推定ニューラルネットの評価結果

7. 結言

スマート工場を実現するためにIoT技術とAI技術を活用した作業工程監視装置を試作した。試作した作業工程監視装置は、稼働中の装置をセンサ情報から推定する監視モジュールと監視モジュールで使用するニューラルネットワークの学習と収集したデータを表示し、スマートホンなどに通知を行う学習・表示モジュールで構成した。

開発した監視モジュールは、収集した電流波形と音データ波形で作成したデータセットを用いて学習したニューラルネットワークを使用することで、電流波形と音波形から、稼働している機器を推定する機能を有する。SONY製のSPRESENSEマイコンボードを用いることで、監視モジュール単体で電流波形と音波形の特徴から機器を99%以上の精度で推定することが可能であることを確認した。

今後、開発した装置を用いて県内企業のDX推進に貢献していきたい。

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, pp1-7, 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、pp27-88, 2017-7.
- [3] 田口：スマート工場実現のための作業工程監視装置の開発、長崎県工業技術センター研究報告、No52, pp. 8-9, 2023.
- [4] 田口：スマート工場実現のための作業工程監視装置の開発、長崎県工業技術センター研究報告、No53, pp. 13-14, 2024.
- [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, pp10-15, 2022.
- [6] <https://developer.sony.com/ja/spresense/>、accessed 2022.
- [7] 太田：SPRESENSEではじめるローパワーエッジAI、ISBN:4873119677、2022.
- [8] 田口：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、No53, pp. 27-32, 2024.

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 科 長 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。本報では、テーパ型光ファイバーを用いた、微小球の共振モード (WG モード) 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、テーパ型光ファイバーを使用し、テーパ部から染み出すエバネセント光によりシリカ微小球を励起し、微小球の共振モード (WG モード) を確認した。

2. 研究内容と結果

2. 1 テーパ型光ファイバーによる微小球の励起

シリカ微小球を励起^[4]するために、シングルモードファイバーを直径数 μm になるまで引き伸ばしたテーパ型光ファイバー (フォトリソグラフィ製、細径部直径約 3~10 μm) を作製した。光ファイバーのテーパ部から染み出すエバネセント光を微小球に作用させることで、容易かつ効率的に WG モードを励起することができる^[5]。

微小球を励起する光源は、白色光源 (ENERGETIQ 社製、LDLS 白色光源 EQ-99、 $\lambda=170\sim 2100\text{ nm}$) を使用し、集光レンズによりテーパ型光ファイバーへカップリングした。図 1 に示すように、テーパ型光ファイバーの細径部を顕微鏡のステージプレートに固定し、マニピュレータ (ナリシゲ社、最小駆動距離 1 μm) に設置したハンドツールプローブ (マイクロサポート社、

先端 5 μm) を用いて微小球を配置した。

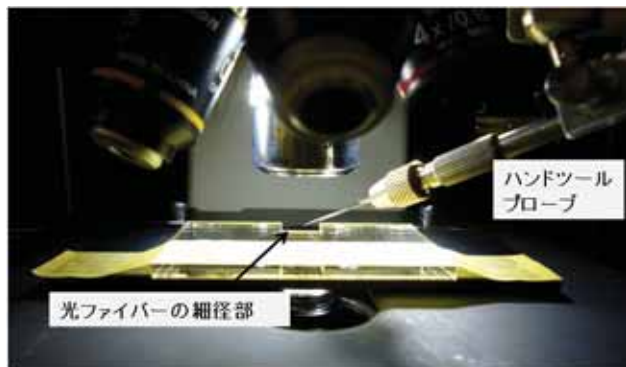


図1 テーパー型光ファイバーの細径部

図2 (a) ~ (c) は、ハンドツールプローブを操作し、微小球を光ファイバーのテーパー細径部に配置する様子を示す。配置した微小球は、図2 (d) に示すように、光ファイバーに白色光を入射し、テーパー部から微小球表面を励起した。

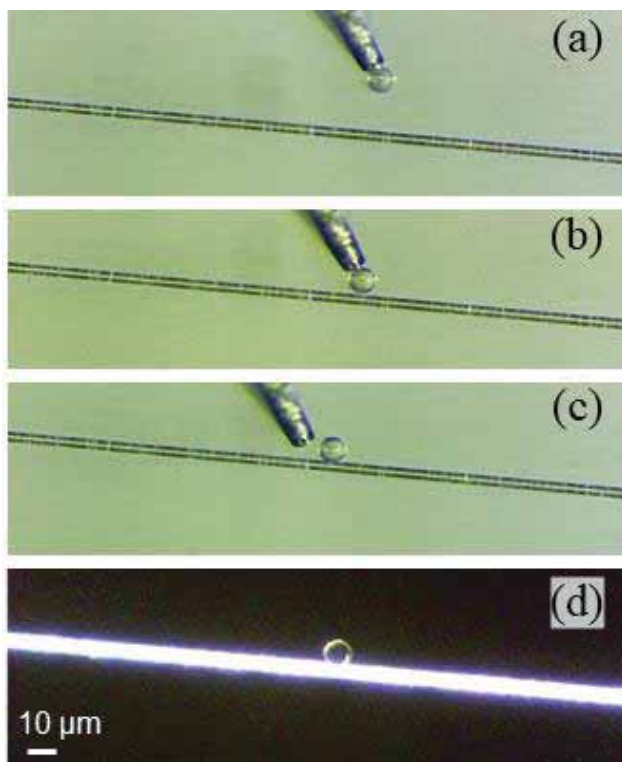


図2 テーパー細径部への微小球の配置と励起

2. 2 微小球の共振モード

図3は、光ファイバーのテーパー部から染み出すエバネセント光により微小球を励起し、光ファイバーからの出射光を分光器 (Stellarnet 社、EPP2000-HR) で検出したスペクトルである。560~640 nm の波長帯域

の中に周期的な共振ピーク波長を確認することができ、単一のシリカ微小球からの WG モードを検出していることがわかる。また、共振ピーク波長の間隔から、励起された微小球の直径は約 6~7 μm と推測される。一方で、使用したテーパー型光ファイバーは偏光方向が保存されないため、TE 偏光と TM 偏光に対応した共振ピーク波長を確認することはできなかった。

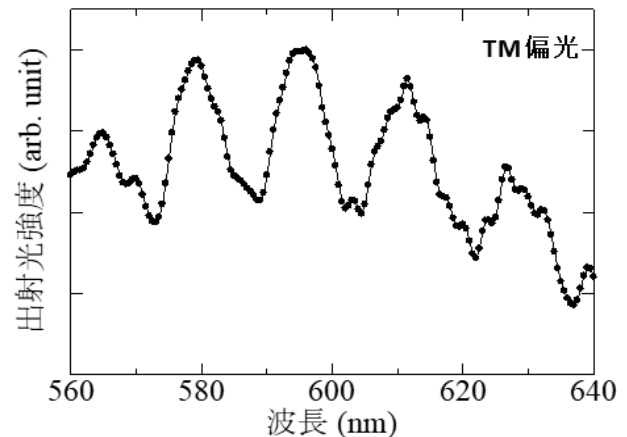


図3 シリカ微小球の共振ピーク波長

3. 結言

光ファイバーのテーパー部から染み出したエバネセント光により微小球を励起し、光ファイバーの出射光から微小球特有の共振モード (WG モード) を検出することができた。560~640 nm の波長帯域の中に約 15 nm 間隔の周期的な共振ピーク波長を確認し、シリカ微小球 (直径約 6~7 μm 、屈折率 1.40) に依存した WG モードを検出できていることを確認した。次年度は、本システムに水素ガスを充填し、WG モードの変化を検証する。

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] 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 機器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った。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電磁波ノイズ発電技術について検討した。MHz 帯域の放射ノイズ計測によるノイズ源の調査、アンテナ形状の検討及び作製、設計・試作した昇圧整流回路の機能検証を行い、開発した発電ユニットのノイズ抑制用途への応用可能性について検証し、その有効性を確認できた。

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 機器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。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

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^[5]がある。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. 実験内容

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、これら MHz 帯域の放射ノイズを新たなエネルギー源とした電磁波ノイズ発電ユニットの開発を行う（図1）。研究項目は以下のとおりである。①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発電ユニットをノイズ抑制用途に応用展開するための検証を行う。

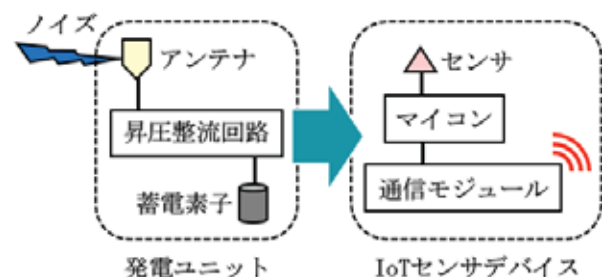


図1 環境電波発電ユニットの模式図

3. ノイズ源の調査

まずはノイズ源の調査として、当センターに設置されている様々な電気・電子機器を対象に、稼働中に発生している不要な電磁波ノイズを計測した。スペクトラムアナライザを用い、0.1 MHz～960 MHz の周波数範囲において、連成解析システム（CAE シミュレーションシステム）のノイズ測定を行った結果を一例として図2に示す。図2の縦軸は雑音電圧（dB μ V）、横軸は周波数（MHz）であり、図中の(a)はホイップアンテナ、(b)はロッドアンテナ（20 cm）を用いて同時に測定した結果^[6]を示している。測定対象機器から 30 cm の距離に各アンテナを設置し、測定時間を 10 分としてピークホールド測定を行った。図2より、連成解析システム（計器校正室）では781.9 MHz で70.6 dB μ V の雑音電圧（最大ピーク値）が計測されている。

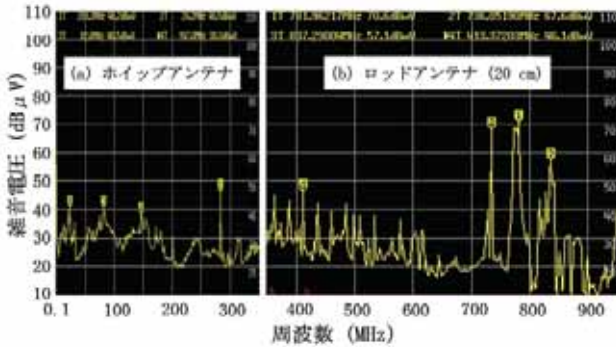


図2 連成解析システムにおけるノイズ測定結果

ノイズ測定を実施した電気・電子機器のうち、稼働率が高い開放設備機器や長時間運転している計算機器などについて、雑音電圧の最大ピーク値とその周波数を表1にまとめた。表1より AGV（無人搬送車）において最も大きな雑音電圧（836.3 MHz で最大ピーク値：83.6 dB μ V）が計測されているが、これは当センター研究員による開発機であり筐体を取り付けていない。筐体によるシールド効果がなく、電磁波ノイズが空間に放射されやすくなっていることから参考測定とした。以上より AGV を除く複数の電気・電子機器において 720 MHz～840 MHz の周波数帯域で 70 dB μ V～80 dB μ V 程度の電磁波ノイズが発生していることを確認できた。これらを電力に換算すると、0.2 μ W～2.0 μ W（AGV：4.0 μ W）に相当するノイズレベルである。また、測定対象機器が停止している状態で各室内のノイズ測定を行ったところ、280 MHz、780 MHz、840 MHz 近傍では常にノイズが発生していた。これらは屋

表1 ノイズ測定結果

測定対象機器	雑音電圧の最大ピーク値	周波数
振動試験装置	80.6 dB μ V	720.2 MHz
連成解析システム（計器校正室）	70.6 dB μ V	781.9 MHz
連成解析システム（機械設計研究室）	70.1 dB μ V	835.7 MHz
三次元造形装置	74.6 dB μ V	837.4 MHz
機械学習用 PC	57.6 dB μ V	733.1 MHz
AGV（※参考）	83.6 dB μ V	836.3 MHz
超低温恒温恒湿器	57.6 dB μ V	835.3 MHz
冷熱衝撃試験装置	63.6 dB μ V	836.4 MHz

外の無線電波によるものと推察されるが、いずれも雑音電圧は 30 dB μ V～40 dB μ V であった。

4. アンテナの作製

令和5年度に平面アンテナを試作してノイズ計測を実施^[7]したが、ノイズ源の調査結果（表1）をもとにターゲットとする周波数範囲を 720 MHz～840 MHz とし、平面アンテナの構造について詳細に検討した。FR-4 ラミネート基板（裏面：銅張、比誘電率：4.7）を用いて作製した平面アンテナの外観を図3に示す。片面をマスキングし、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を形成しているが、基板に貫通孔を形成して裏面から配線する構造とした。基板裏面をアース電極（GND）としている。

まずは放射ノイズを効率的に回収するため、アンテナの共振周波数で同調するように LC 共振回路の定数検討を行った。共振周波数 f_o は式1で表される。

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$



図3 作製した平面アンテナ

LC 共振回路として使用するコンデンサ容量を変化させ、ノイズ計測を実施した結果を図4 (a)に示す。使用したコンデンサ容量は10 pF、22 pF、33 pF、47 pF、68 pFであるが、33 pFのときに最大感度が得られていることが分かる。作製した平面アンテナは共振周波数が800 MHzになるよう設計しているため、式1より共振回路に必要なコイルのインダクタンスは1.2 nHとなる。共振コンデンサには、チップコンデンサではなくリード付のセラミックコンデンサを用いており、リード線にはインダクタンスが存在する。リード線の線径は0.5 mmであるため、線長を2.84 mmに調整した場合にインダクタンスは1.2 nHとなり、これを共振回路として使用することにした。

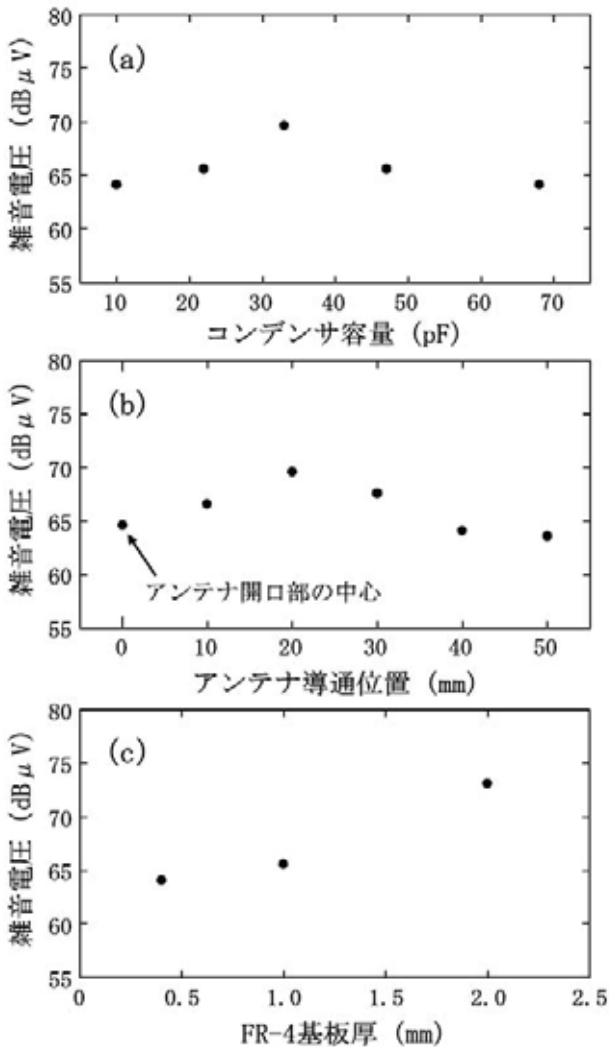


図4 (a)共振回路におけるコンデンサ容量の検討、
(b)平面アンテナにおける導通位置の最適化、
(c)基板厚さの検討

次にインピーダンス調整のため、アンテナ開口部（ノイズ受信電極）における導通位置の最適化を行った。開口部の中心点を基準として、長手方向に10 mm間隔で導通部（貫通孔）を形成したアンテナを作製し、同一のノイズ源（周波数：800 MHz）に対し同時にノイズ測定した結果を図4 (b)に示す。これより、アンテナの導通位置を中心点から長手方向に20 mm離れた点で最大感度が得られていることが分かる。

最後に誘電体基板の厚さについて検討した。0.4 mm、1.0 mm、2.0 mmと厚さの異なるFR-4 ラミネート基板を用いて平面アンテナを作製し、同一のノイズ源（周波数：800 MHz）に対し同時にノイズ測定した結果を図4 (c)に示す。これより、基板の厚さ増加に伴い感度が上昇しているのが分かる。

以上の検討結果を踏まえ、図3に示したとおりFR-4 ラミネート基板（基板厚：2.0 mm、裏面：銅張、比誘電率：4.7）を用いて平面アンテナを作製した。アンテナ導通部（貫通孔）はアンテナ開口部の中心点から長手方向に20 mm離して形成している。共振周波数を800 MHzとし、基板の厚さや比誘電率を考慮して、アンテナ開口部を112 mm×82 mmに設定している。

図5 (a)に、作製した平面アンテナのVSWR（電圧定在波比）をネットワークアナライザを用いて測定した結果を示す。図5 (a)の縦軸はVSWR、横軸は周波数である。VSWRは高周波が通過する際の反射の度合いを示す数値で、反射係数を ρ とすると式2で表される。反射が存在しない場合（ $\rho=0$ ）にはVSWR=1となる。即ち、VSWRが大きいとアンテナの受信効率が劣化すると言える。

$$VSWR = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} \quad (2)$$

図5 (a)より、作製した平面アンテナではターゲットとした周波数800 MHzを中心に、770 MHz～830 MHzの周波数範囲においてVSWRが1.5以下の良好な特性が得られた。作製した平面アンテナを用い、350 MHz～960 MHzの周波数範囲において、事務処理用デスクトップPCのノイズ測定を行った結果を図5 (b)に示す。図5 (b)の縦軸は雑音電圧 (dB μV)、横軸は周波数 (MHz)である。アンテナの受信電極を測定対象物であるPCに対向させて配置し、測定時間を10分としてピークホールド測定を行った。図5 (b)より、デスクトップPCでは798.4 MHzで73.1 dB μVの雑音電圧（最大ピーク値）が計測された。

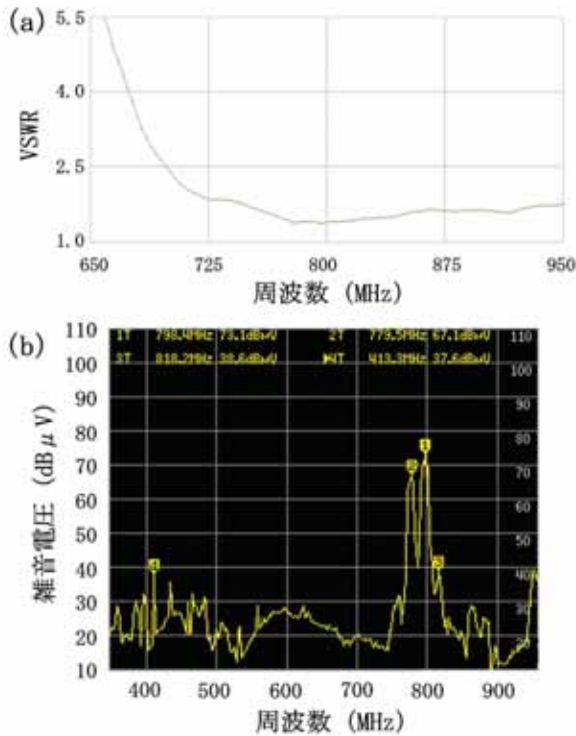


図5 (a)作製した平面アンテナのVSWR、(b)事務処理用デスクトップPCにおけるノイズ測定結果

5. 昇圧整流回路の設計、試作、性能評価

アンテナで回収した放射ノイズの電磁波エネルギーを蓄電するため、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6(a)に、外観を図6(b)に示す。図6(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3で表される。

$$V_o = 2NV_p \quad (3)$$

図6(b)より、試作した昇圧整流回路は5段(N=5)であり、ダイオードの順方向電圧は0.28 V、コンデン

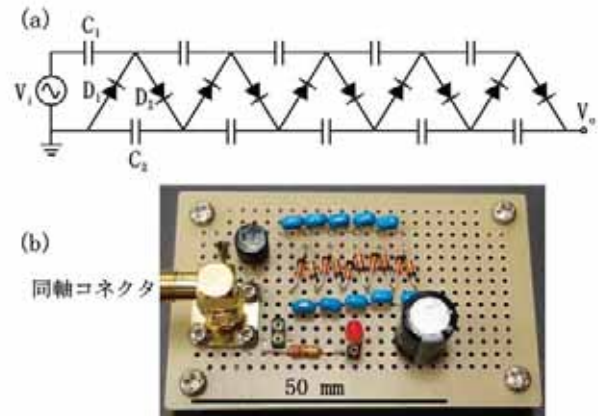


図6 昇圧整流回路の(a)回路図と(b)作製した回路の外観

サの容量は100 nFとした。出力部には330 μFの電解コンデンサを蓄電用に接続し、LEDライトあるいは負荷抵抗を切り替えできるようにピン接続している。

試作した昇圧整流回路の特性を図7に示す。図7の縦軸は出力電圧(V)、横軸は回路の段数Nであり、周波数20 MHzの正弦波(ピーク電圧 $V_p=0.20$ V~0.50 V)を入力して出力電圧を測定したものである。図7より、入力のピーク電圧が0.30 V以上(ダイオードの順方向電圧以上)の場合は、回路の段数Nの増加に伴い出力電圧が線形に増加しており、ほぼ設計通りに昇圧できていることが確認できた。一方、入力のピーク電圧がダイオードの順方向電圧より低い場合にも、設計値の約半分ほどの出力電圧しか得られていないが、昇圧動作を確認できている。低電圧で起動する昇圧整流回路を作製するため、順方向電圧の低いラジオ検波用ゲルマニウムダイオードを用いているが、順方向電圧以下の領域で流れる順方向漏れ電流により昇圧できたと考えられる。また、 $V_p=0.15$ Vまで下げると昇圧動作は確認できなかった。

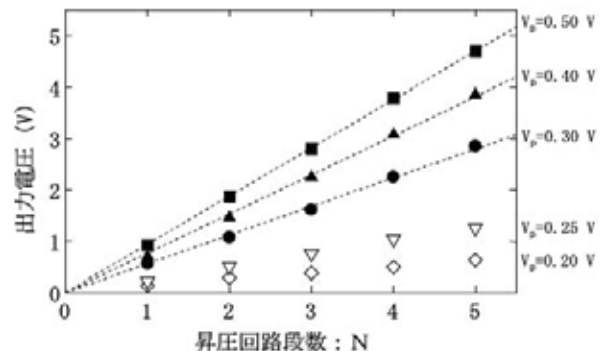


図7 昇圧整流回路の評価結果

6. ノイズ抑制効果の検証

作製した図3の平面アンテナと図6(b)の昇圧整流回路を特性インピーダンス: $50\ \Omega$ の同軸ケーブルで接続し、電磁波ノイズ発電ユニットとして放射ノイズの回収実験を行ったが、LED ライトを点灯させるまでには至らなかった。本研究では、屋内で稼働する電気・電子機器から放射される不要な電磁波ノイズを新たなエネルギー源として提案したが、結果として発電能力は最大でも数 μW 相当であり、環境発電ユニットとしての実用化を考慮すると発電能力が一桁から二桁不足していた。

また、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^[8]された。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で、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数 Hz~100 MHz とし、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。しかしながら、数 10 μW ~数 10 mW もの電力収穫が可能で、IoT 機器への安定的な電力供給を実現している。これらを踏まえ、本研究で開発した発電ユニットの応用例として、当初想定していたノイズ抑制用途への展開に方針転換し、その効果について最後に検証した。

開発した発電ユニットを電気・電子機器に内蔵し、機器の筐体内部で放射ノイズを回収することにより、電気・電子機器から空間に放出される不要な電磁波ノイズを抑制するものである。実験に使用したデスクトップPCの筐体内部の様子を図8(a)に示す。筐体側面パネルを外すと、主なノイズ源となるマザーボードが確認できる。発電ユニットは、平面アンテナ受信電極がマザーボードに対向するように配置した。発電ユニットを設置可能な筐体内部の空間は、幅 160 mm、高さ 120 mm、奥行き 70 mm 程度であった。平面アンテナの外形は 150 mm×100 mm で基板厚は 2.0 mm、配線や治具等の突起物を含めた高さは 25 mm 以下であり問題なく設置できた。平面アンテナと同軸ケーブルで接続した昇圧整流回路は、基板外形が 72 mm×45 mm、コネクタ等の突起物を含めた高さは 35 mm 以下であり、図8(a)で確認できるファンの下部空間に設置した。

当センター保有の小型電波暗室(3 m 法準拠の対策試験を実施可能)における EMI (放射エミッション) 計測の様子を図8(b)に示す。壁と天井の5面に電波吸収体を設置した暗室内において、測定対象としたデスクトップPCから放射される電磁波ノイズを計測す

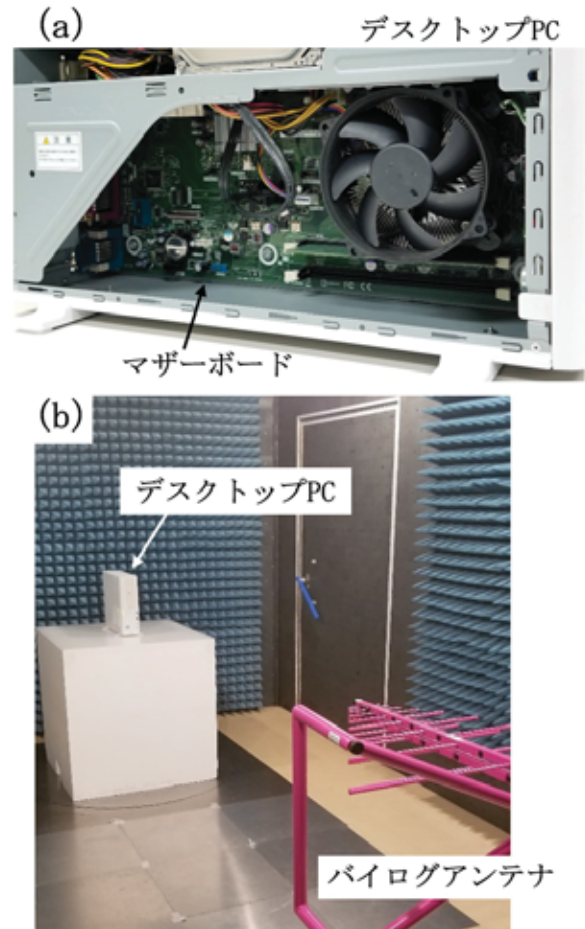


図8 ノイズ抑制効果の検証実験(a)測定対象としたデスクトップPCの筐体内部、(b)EMI 計測

る。測定周波数が MHz 帯域 (30 MHz~1000 MHz) で測定対象物が卓上機器であるため、暗室床面は GND プレーンとなっており、直接波と床面反射波を含めたノイズ測定となる。直径 1.2 m のターンテーブル上に高さ 80 cm の発泡スチロール製試料台があり、ここに測定対象物を設置して AC100 V 電源はターンテーブル中央部から確保している。MHz 帯域のノイズ計測では図8(b)右下のパイログアンテナを使用し、測定対象物との距離を 3 m 確保している。パイログアンテナの稼働領域は 1.0 m~1.5 m で、計測中はアンテナが 90 度回転し水平及び垂直方向のノイズ計測を行う。

EMI 計測結果を図9(a)~(c)にそれぞれ示す。図9の縦軸は放射妨害電界強度 ($\text{dB}\mu\text{V/m}$)、横軸は周波数 (MHz) である。図9(a)はPCのみの計測結果で、図中の青線が水平方向、緑線が垂直方向の放射ノイズである。また、赤線はマルチメディア機器のエミッション規格 (CISPR32) であり、class-B は住宅環境における QP (準尖頭値) の限度値を表している。図9の計測結

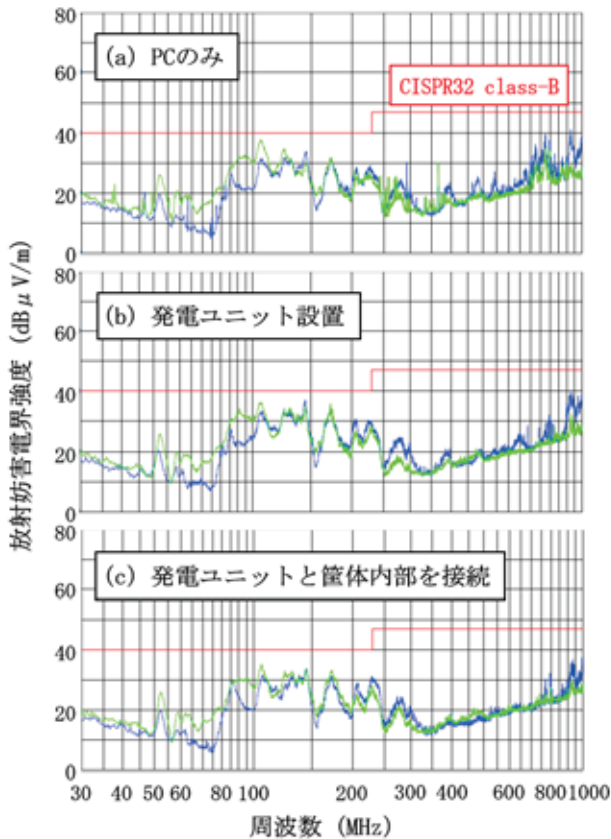


図9 EMI 計測結果の比較(a)PC のみ、(b)発電ユニットを内蔵、(c)発電ユニットを内蔵し、アンテナ導通部を筐体内部と電氣的に接続

果はいずれもピーク測定の波形であるため、ピーク値がQP 限度値（赤線）を超えていなければQP 評価を実施する必要はない。図9 (a)より、測定対象としたPCでは、75 MHz～350 MHzの周波数範囲で周期的なノイズが発生している。また、700 MHz～1000 MHzでも同様に大きなノイズが発生している。次に、PCの筐体内部に発電ユニットを設置してEMI 計測した結果を図9 (b)に示している。図9の(a)と(b)を比較したところ、250 MHz～900 MHzにおいて、放射ノイズの抑制効果を確認できる。特に700 MHz～850 MHzの周波数範囲においては、ノイズ抑制効果が顕著に現れている。

図9 (c)は、筐体内に設置した発電ユニットのアンテナを筐体と電氣的に接続してEMI 計測した結果である。これは筐体をアンテナの一部として利用した結果であるが、図9の(b)と(c)を比較したところ、350 MHz～1000 MHzの周波数範囲において更なるノイズ抑制効果を確認できた。これより、開発した電磁波ノイズ発電ユニットを電気・電子機器に内蔵することで、ノイズ抑制用途への応用可能性を示すことができた。

7. 結言

不要な電磁波ノイズをエネルギー源とした発電技術について研究を行った。当センターで稼働している様々な電気・電子機器の放射ノイズ（MHz 帯域）を計測・調査し、ターゲットとする周波数範囲を720 MHz～840 MHzに決定した。次に平面アンテナの構造について詳細に検討し、作製した平面アンテナと低電圧動作が可能な昇圧整流回路で構成される電磁波ノイズ発電ユニットを開発した。放射ノイズの回収実験から、数 μW 相当の発電能力しか得られておらず、環境発電のエネルギー源として実用化は困難と判断した。そこで開発した発電ユニットを電気・電子機器に内蔵し、筐体内において放射ノイズを回収する方式でノイズ抑制用途への応用可能性を検証し、その有効性を確認することができた。今後は、放射ノイズの回収効率を上げるためにアンテナの改良を行い、ノイズ抑制効果の検証を進めていきたい。

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] 中川豪：長崎県工業技術センター研究報告、No. 53, pp. 37-39, 2024.
- [8] 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。これまでに、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により、それらが溶着可能であることを確認した。また、上記のレーザー吸収材に対する前処理についての実験を行い、レーザー吸収材表面の任意の場所に凸部を形成できることを確認した。

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ると考えられる。

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

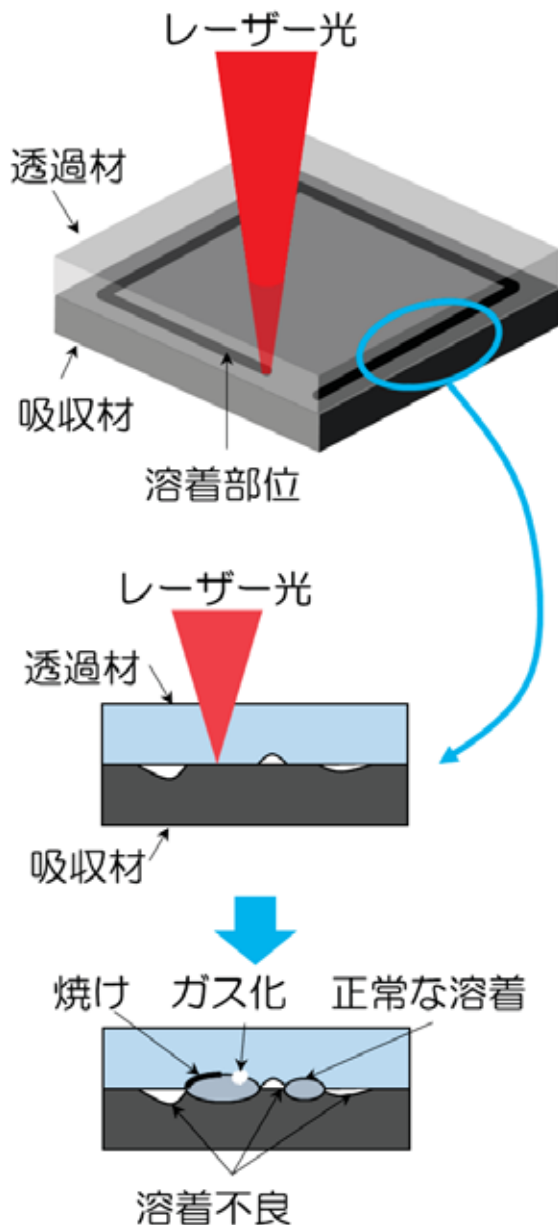


図1 レーザー樹脂溶着を行う際の課題に関する模式図

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。

これまでに、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。これらの材料について、所有するレーザー光源で溶着が可能かを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。実験の結果、条件によってはそれらの樹脂板を溶着可能であることが確認できた。

次に、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した。前処理については、レーザー吸収材に対して行うこととし、専用の型を用いることなくレーザー吸収材表面の任意の場所に処理可能な方法を考案した。レーザー吸収材として用いるポリカーボネート樹脂板およびABS樹脂板それぞれについて、数種類のパラメーターを変化させて前処理を行い、前処理箇所の断面を顕微鏡観察した。観察の結果、一部の条件下では、前処理箇所に凸部が形成されていることを確認した。

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。

これまでに、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を確認した。また、前処理により上記のレーザー吸収材表面の任意の場所に専用の型を用いずに凸部を形成可能であることを確認した。

今後は、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し、検証実験により前処理の有用性を確認する実験を行う。

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.

生体組成の非侵襲計測技術の開発

(長崎県の光計測手法“TFDRS”を活用した微量な血液成分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、採血による血糖の自己測定に基づき、食事療法や薬物投与による血糖値のコントロールが行われるが、1日複数回の採血に伴う苦痛や穿刺針による感染等の問題がある。体外から光を当てるだけで測定できる血糖値計が実用化されれば、採血に伴う苦痛が軽減され、血压測定と同じように気軽に血糖値測定が可能となる。本開発では、近赤外光を用いた血糖値の非侵襲計測における誤差要因、(1) 生体組織による散乱、(2) 色素や脂質などの夾雑物による吸収、(3) 測定部位の温度変化、および(4) 拍動や測定部位の僅かな動きの影響を全て排除する計測手法を提案した。また、本計測手法により指先での拍動に伴う血液の変化量を実測値の3倍と仮定した条件下でも皮下間質液グルコース濃度を実用的な精度で測定できることを理論的に検証した。

1. 緒言

厚生労働省の平成28年国民健康・栄養調査によれば、国内の糖尿病有病者は約1,000万人にのぼり、予備群を含めるとその数は2,000万人を超えると推定されており、糖尿病は深刻な国民病となっている。現在の糖尿病治療では、採血による血糖自己測定(Self-Monitoring of Blood Glucose: SMBG)に基づき、食事療法や薬物療法による血糖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穿刺針による感染等の問題がある。一方、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」が高齢者医療確保法により義務付けられており、保険指導による経時的なメタボリック症候群の評価など、今後は予防目的での血糖自己測定も重要となる。

非侵襲型の血糖値計が実用化されれば、採血の負担が軽減され、血压を計ることと同じように気軽に血糖値を測定できる。また、リアルタイムに血糖値を測定することで、インスリン投与のタイミングや薬物療法などの最適化を図ることができる。さらには、血糖値変動の少ない食品の選択、あるいは運動しながらの血糖測定による食事・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。加えて、患者が痛みや煩雑などを理由に敬遠することなく血糖自己測定を持続できれば、糖尿病の進行およ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削減が期待できる。

一方、採血を伴わない血糖値計として、皮下に細い針状のセンサー電極を挿入し、間質液のグルコース濃度を持続的に測定する持続グルコースモニタリング装置(Continuous Glucose Monitor: CGM)が米国において

製品化されている^[1]。CGMは間質液のグルコース濃度が血糖値とよく一致することに基づいており^[2]、SMBGに要求される国際規格(ISO15197:2103)^[3]と同等の測定精度を実現している^[4]。また、CGMは日本国内でも2022年より特定の患者を対象に保険適用が開始されたが、2週間ごとに交換が必要なセンサー電極の価格が約8,000円と高価である上、センサー挿入部での皮膚障害も報告されている^[5]。

血糖値の完全な非侵襲計測については、過去数十年にわたり、光学的手法を中心に国内外の企業や大学などの研究機関で開発が進められてきた^[6-8]。しかしながら、測定精度や安定性が悪く、いまだ実用化に至っていない^{[9][10]}。特に、近赤外光を用いた手法は、光が真皮まで十分に浸透できること、ならびに光源や検出器等の光学部品を比較的安価に調達できることから、最も有望な測定手法として注目されてきた^[11, 12]。しかしながら、(1) 生体組織による散乱、(2) 色素や脂質などの夾雑物による吸収、(3) 測定部位の温度変化、および(4) 拍動や測定部位の僅かな動きが全て干渉要因となり、グルコースによる微弱な吸収変化の抽出を難しくしている。

本開発では、果実糖度等の非破壊計測を目的に考案した光計測手法(Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy: TFDRS)^{[13][14]}をベースに、上記した4つの干渉要因を全て排除できる近赤外光を用いた血糖値の非侵襲計測手法を提案した。本報告では、提案した計測手法とその測定精度等の実用性を理論・実験の両面で検討した結果について述べる。

2. 研究内容と結果

2. 1 非破壊計測手法 TFDRS

TFDRS では、図1に示すように果実や生体等の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箇所で反射光を受光する。3つの波長 $\lambda_k (k=1, 2, 3)$ で測定した反射光の強度比で表した反射率 $R(\lambda_{k=1,2,3}) = i_{\text{sig}} / i_{\text{ref}}$ を用い、下記式(1)で表される相対吸光度比 γ を非破壊計測の指標とする^[13]。

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

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3種類の波長の光で可能とした^[13]。

一方、生体には水分、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)が含まれるが、相対吸光度比 γ はヘモグロビン色素等の生体組成、温度等の各生体パラメータ $C_k (k=1, \dots, m; m \text{ は生体パラメータの数})$ と下記の比例関係が成立する^[15]。

$$\gamma = a_0 + a_1 \cdot C_1 + \dots + a_m \cdot C_m \quad (2)$$

式(2)の比例関係から波長の組み合わせが異なる n 個の相対吸光度比 $\gamma_k (k=1, \dots, n; n \geq m)$ を用いて各パラメータ $C_k (k=1, \dots, m)$ を下記式(3)より算出できる。

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_k \\ \vdots \\ C_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{10} \\ a_{20} \\ \vdots \\ a_{k0} \\ \vdots \\ a_{m0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & & & & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{kn} \\ \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \cdot \\ \gamma_k \\ \cdot \\ \gamma_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

図2は3人の成人男性で測定した指先の総ヘモグロビン濃度(以下、 C_{tHb} と呼ぶ)の測定結果を示す。本実験では上腕部をカフで締め付けて C_{tHb} を変化させた。ここでは、3つの相対吸光度比 $\gamma_k (k=1, 2, 3)$ を用いた式(3)で C_{tHb} を推定しており、その測定誤差は0.003mMと高精度な測定を実現した^[15]。

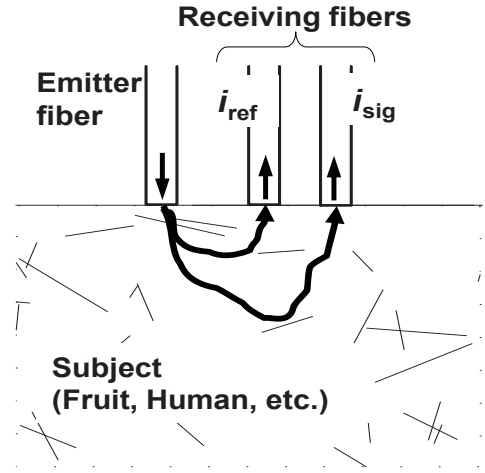


図1 TFDRS の概略図

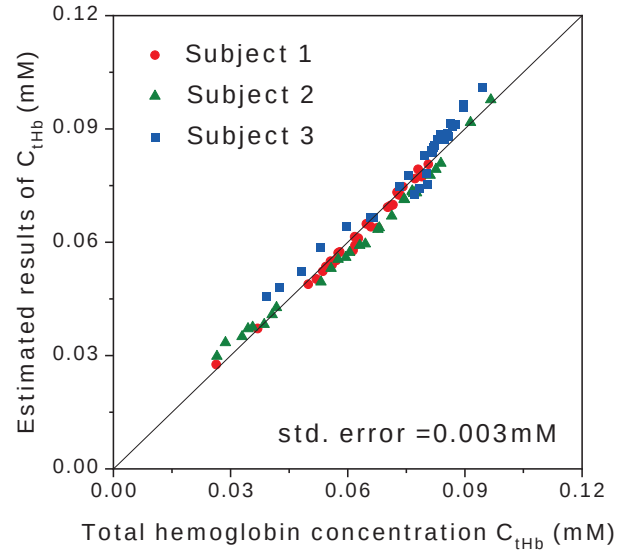


図2 指先のヘモグロビン濃度の測定結果

2. 2 TFDRS による血糖値の非侵襲計測

血糖値等の微量な血液成分も式(3)で表される複数の相対吸光度比 $\gamma_k (k=1, \dots, n)$ の一次多項式により原理的には推定できる。しかしながら、指先等の血液量の体積分率は2~3%と非常に少なく、血糖値を直接測定することは難しい。そこで、ここではCGMと同様に皮下間質液のグルコース濃度を測定対象として、式(3)によるグルコース濃度の推定精度を指先での測定を想定した理論解析により評価した。

TFDRS による指先の吸光度 $A (A = -\ln(R))$ の実験値(●)と光散乱理論^[16] ^[17]により計算した理論値(実

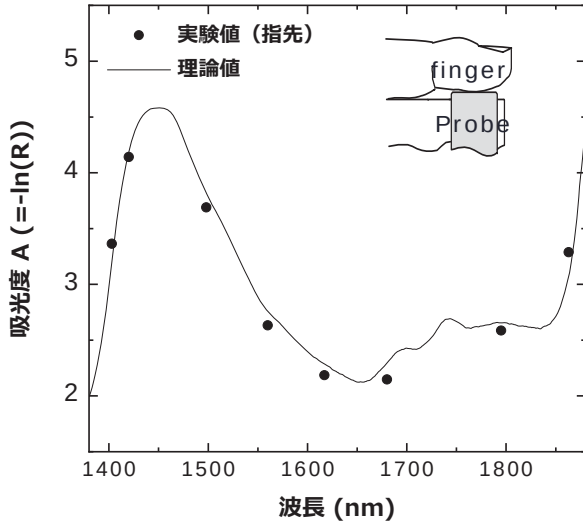


図3 指先で測定した吸光度 (●) と散乱体モデルによる吸光度の理論値 (実線)。

線) を図3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、指先を水分、脂肪、蛋白、およびヘモグロビン色素が一様に分布した光散乱体 (以下、散乱体モデルと呼ぶ) と仮定して解析したが、指先の複雑な吸光度スペクトルを相対誤差7%以下で再現している。

次に、上記散乱体モデルを用いた理論計算により、式(3)による間質液グルコース濃度の推定精度を評価した。まず、散乱体モデルのグルコース濃度に加え、ヘモグロビン色素、水分、脂質等の夾雑物濃度、指先温度、さらには散乱係数等の各パラメータを互いに相関がないように所定の範囲でランダムに変化させて250種類のサンプルを作成した。これらのサンプルに対して式(3)によりグルコース濃度を推定し、その推定精度を評価した結果を図4に示す。

同図では、二乗平均平方根誤差(Root Mean Square of Error: RMSE)で表したグルコース濃度の推定精度を電気ノイズに起因した吸光度成分 A_e の標準偏差 ΔA_e との関係で示した。同図より、吸光度変動 ΔA_e を 0.01×10^{-2} (以下 Δ_0 で表す) より小さく抑えれば10 mg/dl以下の測定精度が得られ、 $\Delta A_e=0$ での値3.4 mg/dlが限界値となる。

電気ノイズのみに起因した吸光度成分は正規分布を示すことから、吸光度の時間的な積算平均により Δ_0 以下の変動を容易に実現できる。しかし、実際に測定

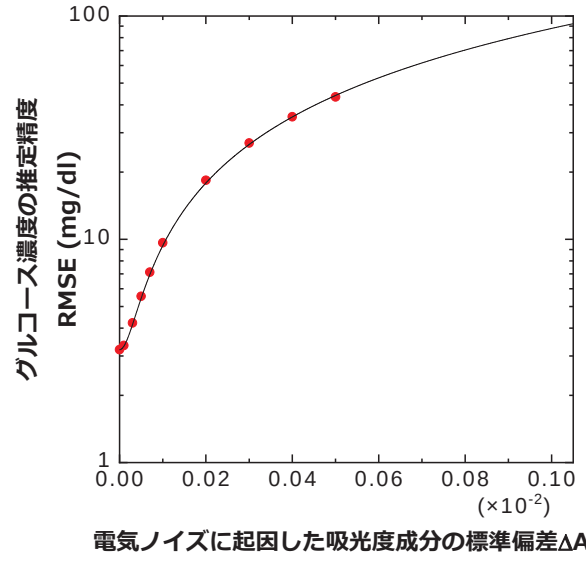


図4 間質液グルコース濃度の推定精度(RMSE)と電気ノイズにみで生じる吸光度成分 A_e の変動(標準偏差) ΔA_e との関係。

される吸光度は、電気ノイズだけではなく、後述する拍動に伴う血管の膨張・収縮や被検体の僅かな動きでも時間的に大きく変動するため、吸光度の単純な時間平均だけでは実用的な推定精度の実現は難しい。

2. 3 血糖値計測における拍動等の影響

図5(a)は指先で測定した吸光度 A の時間変化を示す。図5(b)、(c)、(d)は吸光度 A を下記式(4)に従い3つの吸光度成分に分解した結果を示す。

$$A = A_0 + A_s + A_e \quad (4)$$

図5(b)に示した A_0 は指先そのものの吸光度成分で、拍動に伴う血液量の変化に起因して最大0.025の変動を示す。図5(c)に示した A_s は体動に伴う指先とプローブ端面の幾何学的な位置関係に依存した吸光度成分で、最大0.013の変動を示す。また、図5(d)に示した A_e は光検出器等の電気ノイズに起因した吸光度成分で標準偏差 3.0×10^{-2} の正規分布を示す。

ここで、吸光度成分 A_0 、 A_s はそれぞれ Δ_0 の250倍、130倍と大きく変動する上、正規分布を示さないことから、その時間平均だけでは変動を低減できず、血糖値の大きな測定誤差を生じる要因となる。そこで、指先での血糖値測定に伴う拍動や体動の影響を低減する

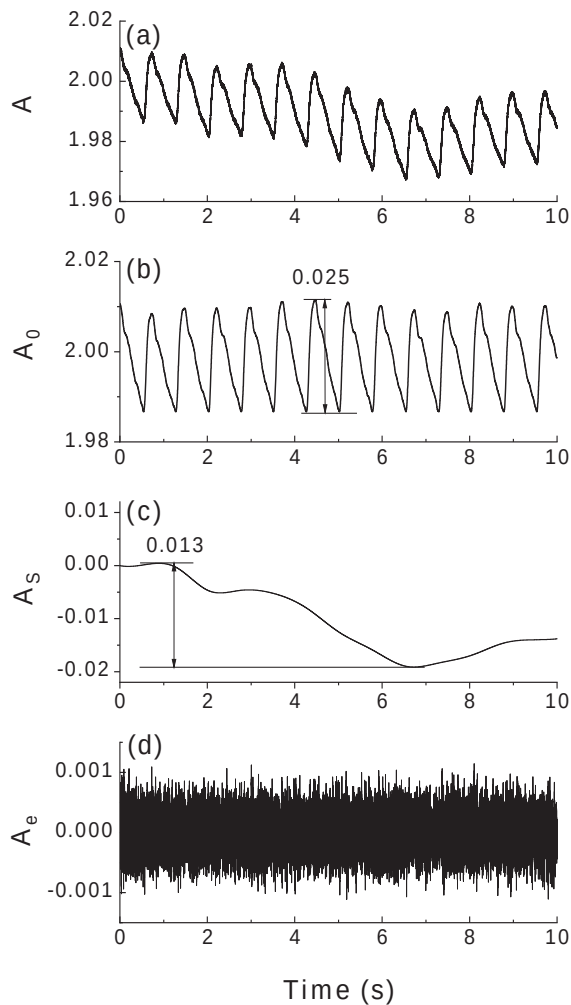


図5 (a) 指先で測定した吸光度 A 、(b) 血液を含む指先そのものの吸光度成分 A_0 、(c) 体動に伴う指先とプローブ端面の幾何学的な位置関係に依存した吸光度成分 A_S 、(d) 光検出器等の電気ノイズに起因した吸光度成分 A_e 。

ために新たな補正方法を考案した^[18]。

図6 (a)、(b)は式 (3)で推定した血糖値の時間変化を上記補正の無し、有りでそれぞれ理論計算した結果を示す。ここで、指先の拍動に伴い変化する血液量は図5 (b)に示した吸光度成分 A_0 の変化量から導出し、その血液の変化量を3倍した値を計算に用いた。また、 A_S には図5 (c)示した吸光度成分の時間波形をそのまま用いた。 A_e には Δ_0 の10倍の変動を持つ正規分布の吸光度成分を与えた。

また、指先を模した散乱体モデルのグルコース濃度を100 mg/dl に設定し、時間的に一定とした。さらに、水分、脂質等の夾雑物濃度、散乱係数、及び指先温度

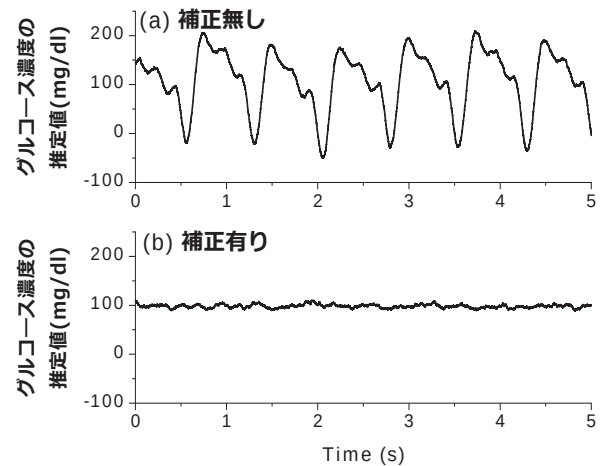


図6 指先を想定した皮下間質液のグルコース濃度の推定結果。(a) 拍動等の影響を補正しない場合、(b) 拍動等の影響を補正した場合。

も時間的に一定とした。以上の条件下で、式 (3) を用いてグルコース濃度を0.2 msの時間間隔で10秒間計算し、その後100 msの時間幅で隣接平均した。図5 (a)の補正無しの場合、拍動の影響を受けて標準偏差64 mg/dl と大きな測定誤差が生じている。一方、図5 (b)の補正有りの場合、標準偏差3.9 mg/dl を示し、限界値3.4 mg/dl を加えた推定精度(RMSE)は5.2 mg/dl ($= (3.9^2 + 3.4^2)^{0.5}$) となった。

3. 結言

近赤外光を用いた血糖値の非侵襲計測における長年の未解決課題、(1) 生体組織による散乱、(2) 色素や脂質などの夾雑物による吸収、(3) 測定部位の温度変化、および(4) 拍動や測定部位の僅かな動きの影響を全て排除できる計測手法を考案した。また、本手法により、指先での拍動に伴う血液量の変化を実測値の3倍と仮定した条件下でもSMBGに要求される国際規格(ISO15197:2103)を満たす間質液グルコース濃度の測定精度が得られることを理論的に検証した。

参考文献

- [1] E. Waltz: Sweet sensation, Nat. Biotechnol. Vol. 37, No. 4, pp. 340-344, 2019.
- [2] S. N. Thennadil, J. L. Rennert, B. J. Wenzel, K. H. Hazen, T. L. Ruchti, and M. B. Block: Comparison of glucose concentration in interstitial fluid, and capillary and venous

- blood during rapid changes in blood glucose levels, *Diabetes Technol. Ther.* Vol. 3, No. 3, pp. 357-365, 2001.
- [3] G. Freckmann, C. Schmid, A. Baumstark, M. Rutschmann, C. Haug, and L. Heinemann: Analytical Performance Requirements for Systems for Self-Monitoring of Blood Glucose With Focus on System Accuracy: Relevant Differences Among ISO 15197:2003, ISO 15197:2013, and Current FDA Recommendations, *J. Diabetes Sci. Technol.* Vol. 9, No. 4, pp. 885-894, 2015.
- [4] S. Alva, T. Bailey, R. Brazg, E. S. Budiman, K. Castorino, M. P. Christiansen, G. Forlenza, M. Kipnes, D. R. Liljenquist, and H. Liu: Accuracy of a 14-Day Factory-Calibrated Continuous Glucose Monitoring System With Advanced Algorithm in Pediatric and Adult Population With Diabetes, *J. Diabetes Sci. Technol.* Vol. 16, No. 1, pp. 70-77, 2022.
- [5] F. J. Navarro-Triviño: Skin Reactions to Glucose Sensors: Present and Future, *Actas Dermosifiliogr (Engl Ed)* Vol. 112, No. 5, pp. 389-391, 2021.
- [6] R. J. McNichols and G. L. Cote: Optical glucose sensing in biological fluids: an overview, *J. Biomed. Opt.* Vol. 5, No. 1, pp. 5-16, 2000.
- [7] S. K. Vashist: Non-invasive glucose monitoring technology in diabetes management: a review, *Anal. Chim. Acta* Vol. 750, pp. 16-27, 2012.
- [8] I. Amato: Race Quickens for Non-Stick Blood Monitoring Technology, *Science* Vol. 258, No. 5084, pp. 892-893, 1992.
- [9] Y. Li and Y. Chen: Review of Noninvasive Continuous Glucose Monitoring in Diabetics, *ACS Sens.* Vol. 8, No. 10, pp. 3659-3679, 2023.
- [10] S. Min, H. Geng, Y. He, T. Xu, Q. Liu, and X. Zhang: Minimally and non-invasive glucose monitoring: the road toward commercialization, *Sens. Diagn.* Vol. 4, No. 5, pp. 370-396, 2025.
- [11] C. F. So, K. S. Choi, T. K. Wong, and J. W. Chung: Recent advances in noninvasive glucose monitoring, *Med. Devices: Evidence Res.* Vol. 5, pp. 45-52, 2012.
- [12] K. V. Pozhar, M. O. Mikhailov, E. L. Litinskaia, and E. A. Polyakova: Near-Infrared Spectroscopy for Noninvasive Measurement of Blood Glucose: Problems, Progress, Tasks, *Biomed. Eng.* Vol. 56, No. 1, pp. 64-68, 2022.
- [13] 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.
- [14] T. Inagaki, D. Nozawa, Y. Shimomura, and S. Tsuchikawa: Three-Fibre-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy for Estimation of Total Solid Content in Natural Rubber Latex. *J. Near Infrared Spectrosc.* Vol. 24, No. 4, pp. 327-335, 2016.
- [15] Y. Shimomura, S. Miki, T. Tajiri, and H. Tanaka: Noninvasive Measurement of Absolute Hemodynamic Components in Human Tissue Using Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy, *Proceedings of the 22nd Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, pp. 274-275, 2009.
- [16] R. A. Groenhuis, H. A. Ferwerda, and J. J. Ten Bosch: Scattering and absorption of turbid materials determined from reflection measurements. 1: theory. *Appl. Opt.* Vol. 22, No. 16, pp. 2456-2462, 1983.
- [17] T. J. Farrell, M. S. Patterson, and B. Wilson: 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.
- [18] 下村義昭: 光散乱体の非破壊測定装置、特願 2024-049827, 2024.

リアルタイムシミュレーション技術の開発

(造船・エネルギープラント配管技術の高度化を目指したグリーン産業への貢献)

工業材料・環境科 科 長 入江直樹
機械システム科 主任研究員 西村 学

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は製品開発において懸念される課題をコンピュータを用いて事前に仮想実験できることから、生産工程や市場での不具合を未然に防ぐための一手段として活用されており地場企業において普及は進んでいる。しかし、シミュレーション条件の変更とともに境界条件の設定、メッシュ作成、計算の工程を再度実行して結果を得ることになること、また、シミュレーション対象モデルによっては計算に数日間かかる場合があることから時間を要しており、迅速にシミュレーション結果を得たいとのニーズを地場企業から受けている。当該課題を受けて、近年におけるAI（人工知能）技術をシミュレーション技術に組み合わせて活用することによりリアルタイムでシミュレーション結果をアウトプットする技術を開発する。本研究においては機械学習を利用するにあたり学習データを得るための実験装置を試作した、その結果を報告する。

1. 緒言

近年のIoT(Internet of Things)の進展に伴い機械システムには様々なセンサが実装され、そのセンサ情報に基づき、当該機械システムの健全性を評価する取り組みが行われている。更にシミュレーション技術を活用して、例えばパーソナルコンピュータ上で動作するソフトウェアを用いて作製した仮想空間において、現実の機械システムの動作を再現するデジタルツインといった技術が発展してきており、その応用事例の一つにバーチャルセンサが挙げられる^[1]。

当該バーチャルセンサは対象とする機械システムの動作を再現するデジタルモデルを作製することで、センサを設置できない箇所におけるデータを推定するものである。

そのデジタルモデルを作製する方法としてAI（人工知能）技術の一つである機械学習を用いて近似モデルを作製する方法がある。当該近似モデルは入力値を変更した際に実施していたシミュレーション工程（形状変更、境界条件設定、メッシュ作製、計算など）を省略してリアルタイムでシミュレーション結果を出力することができる。

図1は当該デジタルモデルの概要が示されており、本研究の目的は入力データからリアルタイムで所望のデータを出力する当該デジタルモデルを構築することにある。

長崎県は造船、エネルギープラントなどのグリーン産業を成長分野と位置付けている。当該分野において

多用されている配管技術を高度化する効果は大きく、その配管内部において輸送される流体の流動状況をより詳細に把握できることは配管振動^{[2][3]}や配管の減肉現象の予測精度を高め^[4]、余寿命の延長化やメンテナンス頻度の減少など、配管管理技術の省力化を図ることができる。

これを受けて、本研究においては配管振動の原因の一つとなる脈動現象を対象として、その伝達状況を予測するデジタルモデルを機械学習を用いて構築する。当該デジタルモデルを構築するための学習データを得るため、実験装置を試作して脈動の圧力変化と流量変化を計測した、その結果について報告する。

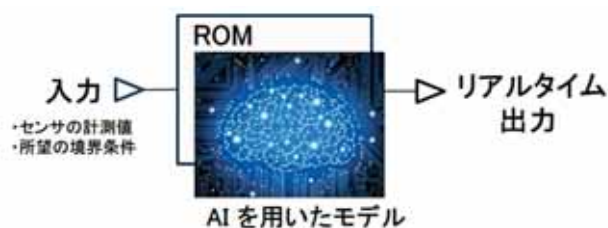


図1 リアルタイムシミュレーションモデルの概要

2. 実験方法及び結果

試作した実験装置の配管系統図を図2に、外観を図3に示す。脈動ポンプ（アサダ(株)製 MP30）に接続した配管には圧力・温度センサ（(株)キーエンス製 GP-M025T）、デジタル流量センサ（(株)キーエンス製 FD-Q20C）が取り付けられており、それらの各センサは

イーサネットケーブルを用いてパーソナルコンピュータに接続されている。

実験方法はボールバルブ1を開き、ボールバルブ2を閉じた状態で脈動ポンプを作動させ、配管に流す水道水の最大圧力を設定する。その後、ボールバルブ2を開き、脈動ポンプを用いて配管内部を流れる水道水を脈動させた際の圧力変化と流量変化を計測した。圧力・温度センサのデータは所定のサンプリングレートによりパーソナルコンピュータに収集される。その圧力変化の計測結果を図4に、流量変化の計測結果を図5に示す。

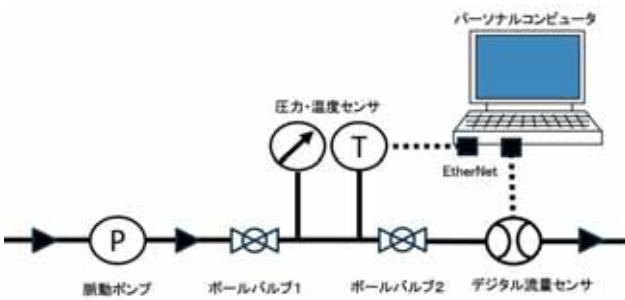


図2 実験装置の配管系統図



図3 実験装置の外観

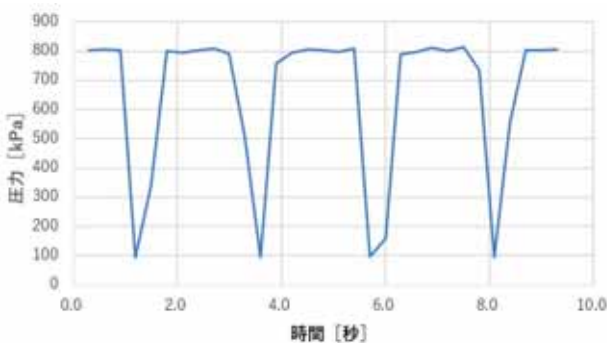


図4 圧力変化の計測結果

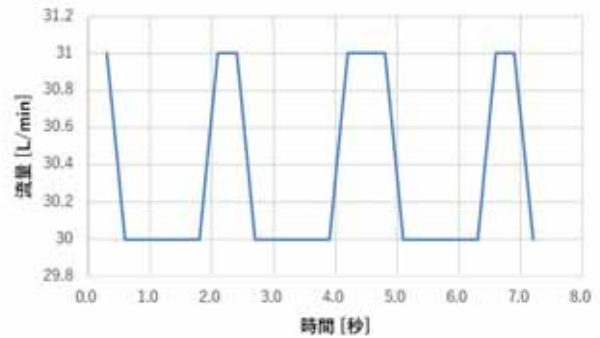


図5 流量変化の計測結果

4. 考察

試作した実験装置において、水道水の脈動現象を圧力・温度センサ、流量センサを用いて計測した結果、矩形波の周期信号として取得できた。その圧力の振幅は設定した最大圧力値とほぼ同等であり、周期と立ち上がり時間についてはバラツキが見受けられた。また、流量については振幅と立ち上がり時間についての再現性は良いが周期についてはバラツキが見受けられた。現状の構成ではサンプリングレートをより速くできないため、使用するセンサを変更するなどにより計測精度を向上する予定にある。

5. 結言

本研究の成果について以下に要約する。

- 1) 水道水の脈動現象を圧力・温度センサと流量センサを用いて計測する実験装置を試作した。
- 2) その脈動現象は圧力変化、流量変化ともに矩形波の周期信号として取得することができた。

参考文献

- [1] 高野ほか：工具刃先温度のリアルタイム推定のための Model Order Reduction を利用したバーチャルセンサ、日本機械学会論文集、Vol. 89, No. 928, pp. 1-17, 2023.
- [2] 日刊工業新聞社、トラブルから学ぶ配管技術、p. 99, 2015. 3.
- [3] 日刊工業新聞社、プラント配管の原理としくみ、p. 82, 2020. 10.
- [4] 渡辺ほか：実機発電プラントにおける T 字管合流部の減肉傾向の推定方法、日本機械学会論文集、Vol. 89, No. 919, pp. 1-15, 2023.

データ駆動科学を活用した化学反応プロセスの研究 (第1報)

(シミュレーションとマテリアルズインフォマティクスを融合した次世代材料設計技術の開発)

工業材料・環境科 専門研究員 重 光 保 博

近年、第一原理計算やシミュレーションに基づく分子レベルの材料設計技術が進展すると共に、化学工業の現場においてデータ駆動科学が急速に浸透している。本研究では、データサイエンス技法とシミュレーションの融合を通じて、化学反応や膜分離の分子機構の解明とそれに基づく化学プラントの効率的制御を目指す。

本年度は、化学反応における基礎的な機構解析を進めた。遷移状態とポテンシャル鞍点の差として定義される鞍点回避について、強摩擦領域における多次元反応速度モデルを用いたコミットメント確率 (Committer) 変分法に基づく考察を行った。その結果、ポテンシャルのパリティ (対称性/非対称性) に依存しない発現機構を導出した。

1. 緒言

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、ものづくりを主導する役割を果たしつつある。長崎県工業技術センターのシミュレーション担当者は、マイ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。

CAEの主要分野である流体解析 (Computational Fluid Dynamics: CFD) は、流体力学の基礎方程式 (Navier-Stokes 方程式) に基礎をおいている。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 (Molecular Dynamics: MD) 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メソスケールの非平衡熱力学現象は、マクロ CFD とミクロ MD の中間である粗視化技法が提案されている。

今までの取り組みとして、構造解析・流体解析ツ

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・普及活動を行った^[2] (図1)。

「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)。

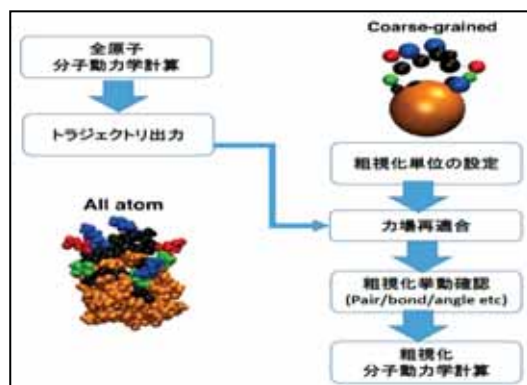


図2 MS-CG粗視化法のスキーム

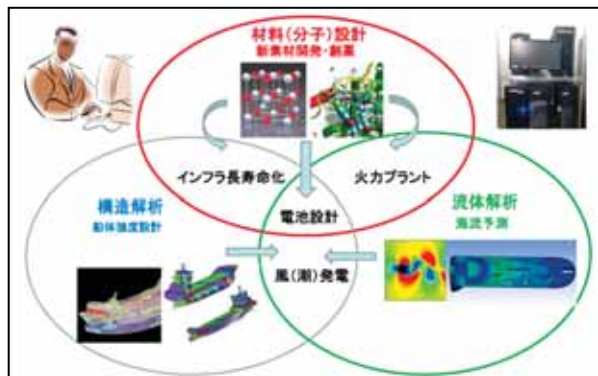


図1 連成解析のイメージ図

「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 (令和3年度-令和5年度)」では、マルチスケール複雑事象である膜透過現象^[4]を解析対象とし、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、ファウリング (汚濁物質による膜の目詰まり) によって生じる膜差圧上昇の予測に適用した。

2. Committor 変分原理に基づく KLBS-GZ モデルと鞍点回避の解明

2. 1 凝縮系反応理論の概要

化学製品の効率的合成と適切な反応制御は、近年の環境調和型ゼロエミッションポリシーの観点からますます重要になっている。データ駆動科学やシミュレーションを駆使した反応制御技術が急速に発展しているいっぽう、反応速度解析の基礎的知見は不明な点が数多く残されている。

化学工業で用いられる化学反応の大半は溶液中で進行するが、このような大自由度凝縮系の反応速度解析は、遷移状態理論 (TST) に基づいて解釈されるのが主流である。TST では、量子化学計算に基づくポテンシャルエネルギー曲面解析が非常に有効であり、反応出発物質 (反応系) と反応中間状態 (遷移状態) との間のエネルギー差である活性化エネルギーを計算で求めることで反応速度解析を行うことができる。

TST の成立は、(1) 反応系と生成系の化学平衡 (2) 遷移状態を通過した反応系は元の系に戻ることはない (non-recrossing rule) という2つの条件が仮定されている。しかし、この2つの条件は一般的には成立しておらず、非平衡系で生起する化学反応の解析は未解決のままとなっている。

TST を包含する化学反応理論である Kramers 理論では、化学反応を1次元ポテンシャルエネルギー曲面上でブラウン運動する粒子としてモデル化し、この運動を記述する Langevin 方程式 (等価表現である Fokker-Planck 方程式) を求解することによって反応速度定数を算出する (図3)。Kramer 理論を多自由度に拡張することによって、一般分子に適用可能な表現が得られる (Langer 理論)。

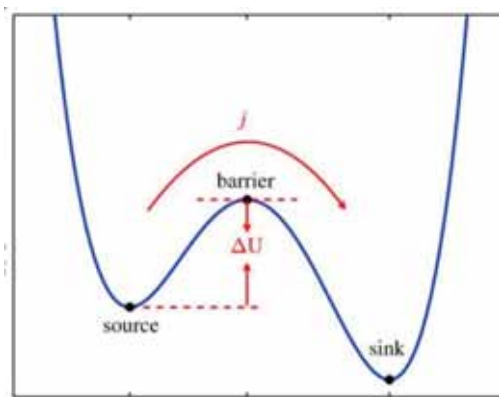


図3 一次元ポテンシャル上の運動イメージ

2. 2 反応拡散方程式・KLBS/KLBS-GZ モデル

溶液反応の場合、反応分子の運動量は衝突によって各時刻で十分緩和している (強摩擦領域) と考えることができ、Langevin (Brownian) 方程式は Smolchouski 方程式に移行する。このような周辺溶媒分子による摩擦効果を考慮する理論モデルとして、Grote-Hynes 方程式と反応拡散方程式 (半線形拡散方程式) がある。後者は、Smolchouski 方程式に吸い込み項 (sink term) を付加して数学的に定式化され、Sumi&Marcus, Basilevski&Weinberg らによって具体解が求められている (図4)。

さらに、溶液中の多自由度反応において、反応座標の適切な定義は重要な課題である。化学反応の進行パラメーターとしてコミットメント確率 (Committer) を変分変数として使用し、反応速度定数の極値化によって反応座標を決定することができる (KLBS 理論)。KLBS 理論は Langer 理論と共通の限界として、Collective variables 間の異方性が強い時でも必ず鞍点を通過する束縛があるため、鞍点回避が発生しない。この欠点を補うため、異方性の強い場において、Kramers 理論と KLBS 理論を Committor を使用して線形変分最適化することで、鞍点回避を適切に表現させることができる (KLBS-GZ 理論)。

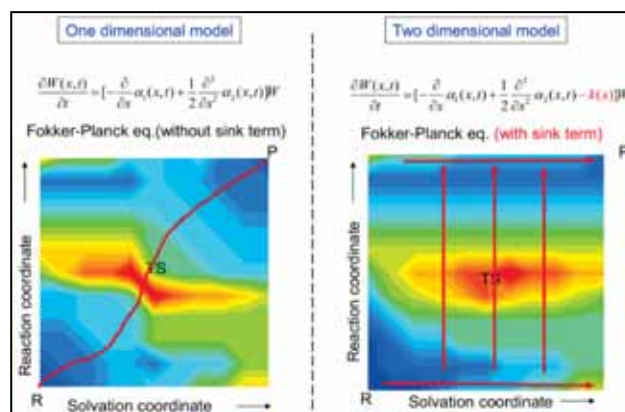


図4 Grote-Hynes式 (左) と Smolchousiki 式 (右)

2. 3 鞍点回避 (Saddle Point Avoidance: SPA)

化学反応は分子間相互作用を通じた化学結合の組み換えで直感的にイメージされ、各原子の3次元空間相対位置 (座標) で表現される。この3次元座標上のエネルギー地形 (ポテンシャルエネルギー曲面) 上での各原子の相対位置の時間的変化が化学反応を記述する。ポテンシャル曲面の峠に相当する鞍点 (Saddle Point : SP) は化学反応において重要であり、この点を

遷移状態 (Transition State : TS) と解釈して、TST の反応速度定数算出に用いられる。しかし、現実の化学反応は運動量を有するダイナミクスであり、配置空間 (3次元座標) ではなく位相空間 (3次元座標+3次元運動量) で記述される。本来の TS は SP ではなく、生成系と反応系の分割面 (セパトリクス) に相当する。従って、化学反応の異方性が大きい場合、TS は SP から乖離する (鞍点回避 (SPA)) (図5)。

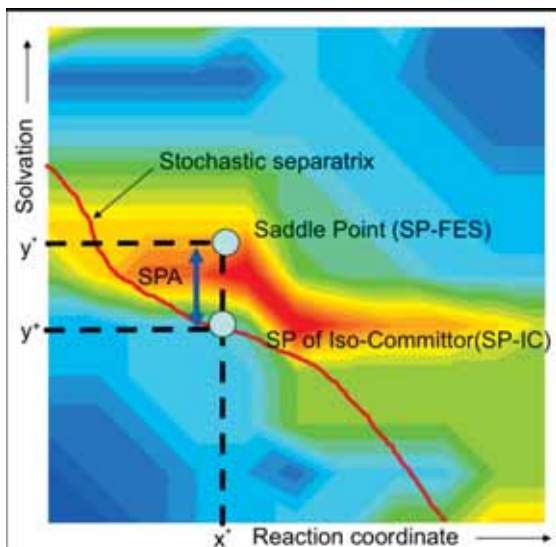


図5 鞍点回避 (Saddle Point Avoidance: SPA)

SPA の理論的考察は、Zwanzig-Caldega-Leggert (ZCL) ハミルトニアンを用いて行われている。具体的には、2次元 ZCL ハミルトニアンの変分パラメーターを通じて極値化することで反応速度定数が求められる (BPZ モデル)。この BPZ モデルでは、SPA はポテンシャル形状の非対称性に由来する結果が得られ、直感的事実と一致しない (図6)。

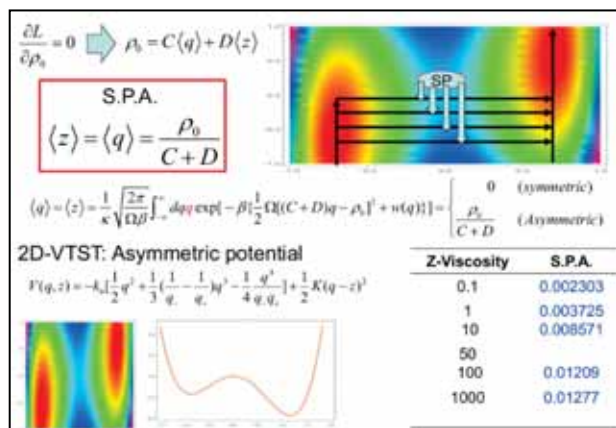


図6 ZCL-BPZモデルのSPA

Berezhkovskii らは、運動量が常に緩和する強摩擦領域における多次元反応速度式 (Langer 式) から出発し、反応フラックスの変分極小化パラメーターとして Comittor を用い、Comittor の方向ベクトル (グラディエント) として普遍的な一次元反応座標を定義した (KLBS 式)^[5]。KLBS 式の限界として、反応座標が鞍点を通過することを仮定しているため、溶質-溶媒相互作用の異方性が強い場合には破綻する。この欠点は、1次元 Kramers 式と KLBS 式の重みを変分的に最適化することで改善される (KLBS-GZ 式)^[6]。

KLBS-GZ 式を用いて、SPA の再定義を考察する。溶質-溶媒 2次元座標モデルの場合、反応座標はセパトリクスと常に直交する Comittor の方向ベクトルであり、セパトリクス 上では Comittor の値が厳密に 1/2 となっている。この時、SPA は、ポテンシャル曲面上の鞍点と位相空間上の遷移状態 (Stochastic Separatrix) の乖離で定義される。一般的には Comittor は数値的に求める必要があるが、Kramers 理論と KLBS 理論では解析的表現が得られるため、KLBS-GZ 理論では両者の重みを線形変分的に決定でき、SPA 決定方程式を導くことができる (図7)。

この決定方程式を解くことで求められる SPA は、ポテンシャル曲面の形状 (対称/非対称) に依存しないため直感的に正しいことが期待される。

Explicit expression of comittor

$$\phi_{\text{Kramers}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) dz$$

$$\phi_{\text{KLBS}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) dz$$

Stochastic Separatrix (iso-committer=0.5)

$$\phi_{\text{Kramers}}(x^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) dz = \frac{1}{2}$$

$$\phi_{\text{KLBS}}(x^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) dz = \frac{1}{2}$$

Explicit expression of SPA determination

$$\phi(x^*, y^*) = \alpha_{\text{opt}} \phi_{\text{KLBS}}(x^*, y^*) + (1 - \alpha_{\text{opt}}) \phi_{\text{Kramers}}(x^*, y^*) = \frac{1}{2}$$

図7 KLBZ-GZモデルのSPA方程式

3. 遷移パスサンプリングソフトの実装とテスト

レイイベントを効率的にサンプリングする手法の一つとして、遷移パスサンプリング法 (TPS) が提案されている。この手法の特徴はあらかじめ反応座標を仮定する必要がないことであり、トラジェクトリをモンテカルロサンプリングすることで逐次的に反応座標を抽出することができる。TPS と comittor 解析を実装したユーザーフレンドリーなソフトウェアとして、ATESA^[7]や OpenPathSampling^[8]が開発されている。

ATESA の特徴として、効率的なパスサンプリング (Aimless Shooting) が実装されており、膨大なトラジェクトリデータの取得を高速に実行することができる。さらに、Collective variables (CVs) を用いて反応座標を変分的に決定するアルゴリズム (Likelihood Maximization) も実装されている。CVs に結合角と二面角を加える改良を行い、反応座標を高精度で記述可能にした。反応座標を直感的に補足することが困難な化学反応に対して、簡便かつ実用的手法である (図8)。

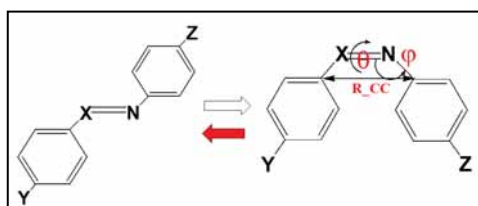


図8 DNABのZ/E-異性化反応とCVs

TPS のテスト計算として、アゾベンゼン誘導体 4-Dimethylamino-4'-Nitro-Azobenzene (DNAB) の Z/E-異性化反応の速度定数算出・反応座標解析を試行した。DNABの基底状態におけるZ/E-異性化反応は各種溶媒中で詳しく調べられており、低粘性非極性溶媒では反転機構、高粘性極性溶媒中では回転機構で進行することが明らかにされている^[9]。本報告では、孤立系での反転機構をTPSで解析した。まずATESAを用いて、CVsとして中央N=N二重結合周辺の結合長さを選び、committor最尤最適化により反応に関与する主要な構造パラメーター(結合長・結合角・二面角)を抽出した。次に主要構造パラメーターに対して、OpenPathSamplingを用いてcommittor分布解析を行った。計算手法(力場・半経験的方法(PM6・DFTB))の依存性もあわせて解析した(図9)。

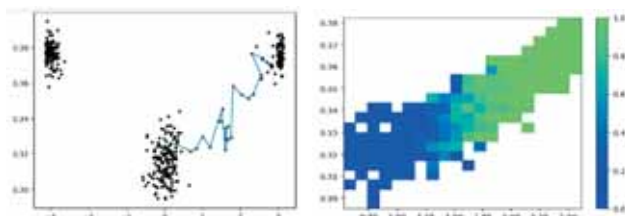


図9 Z/E異性化の軌跡(左)とcommittor分布(右)

反転機構では、分子骨格の組み換えが中央N=N二重結合周辺で局所的に生起するため、活性化体積が小さいことが実験で明らかになっている。本解析においても、反応に関与する主要構造パラメーターが中央N=N二重結合周

辺に限定されており、反転機構が裏付けられた。

5. 結言

本研究では、データサイエンス技法とシミュレーションの融合を通じて、化学反応や膜分離の分子機構の解明を通じて化学プラントの効率的制御を目指す。

本年度は、化学反応における基礎的な機構解析を進め、多次元反応速度モデル(KLBS-GZモデル)について、コミットメント確率(Committor)変分法に基づく考察を行った。遷移状態とポテンシャル鞍点の差として定義される鞍点回避(SPA)の発現について、KLBS-GZモデルを用いてポテンシャル形状の対称性/非対称性に依存しない正しい結果を導いた。併せて、遷移パスサンプリングプログラム「ATESA」の改良を行い、Collective Variablesとして結合長以外に結合角と二面角を加えることで機能向上を実現した。遷移パスサンプリング法のテストとして、アゾベンゼン誘導体 4-Dimethylamino-4'-Nitro-Azobenzene のZ/E-異性化反応の速度定数算出・反応座標解析を試行した。

謝辞

本研究の推進にあたり、実験面から貴重な助言をいただいた大分大学理工学部の大賀恭教授、東京大学生産技術研究所の北條博彦教授に感謝する。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] A. Berezhkovskii and A. Szabo, *J. Chem. Phys.*, **122**, 014503 (2005)。
- [6] A. Berezhkovskii, A. Szabo, N. Greives, H.-X. Zhou, *J. Chem. Phys.*, **141**, 204106 (2014)。
- [7] T. Burgin, S. Ellis, et al *JCTC*, **19**, pp. 235-244 (2023)。
- [8] D.W.H. Swenson et al *JCTC*, **15**, pp. 813-836 (2019)。
- [9] T. Asano, *Pure Appl. Chem.*, **71**(9), pp. 1691-1704 (1999)。

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作製した。エラストマーの物理特性に及ぼす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、非可食トウモロコシデンプン由来のポリオールを原料としたエラストマーの特性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、1,3 プロパンジオール重合体（非可食トウモロコシデンプン由来、バイオマス度 100%、以下 PG）及び比較対象として HS2N-220S（豊国精油株式会社、バイオマス度 50%）の 2 種を使用した。イソシアナートには独自に合成したプレポリマー（NCO2.75%、バイオマス度 0%、以下 p-NCO）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（サンアプロ株式会社）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そのまま使用した。

2. 2 ポリウレタンエラストマー（PUE）の作製

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て攪拌脱泡した。原料の仕込み量は表 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[%]

		比較対象	Run 1	Run 2	Run 3
ポリ側	HS2N-220S	100			
	PG		100	100	100
添加剤	KS-69	0.001	0.01	0.01	0.01
	SA-102	0.03	0.02	0.02	0.02
イソ側	p-NCO	137	138.1	133	129
INDEX [%]		0.886	0.925	0.891	0.864
バイオマス度 [%]		20.0%	41.0%	41.8%	42.5%

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40mm×40mm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。1kg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500mm/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10mm×80mm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20mm、試験速度500mm/分にて引張試験を実施した。

3. 結果と考察

作製した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、Run1のE38からRun3のE30までNCO INDEXとともに低下し、架橋密度と極めて高い相関があることが確認された。比較対象のE29と比べて試作品は若干高い傾向にあったが、いずれも実用レベルの範囲内であった。

粘着強さはRun1の41.6 N/cm²からRun3の38.6 N/cm²まで低下する傾向にあったが、比較対象（35.3 N/cm²）と比べて概ね高い値を示した。ポリオール的一次構造の違いもあるが、とくにPG分子鎖のパッ

キング効果の影響が大きいと考察される。有効面積は、粘着シートとして応用する際の重要な指標になる。しかし、比較対象の6,025 N・mmと比較して、試作品は1,690 N・mm～1,985 N・mmで極めて低く、このままでは実用に耐えることが難しいと判断された。これについては後報で詳細を検討するが、ポリオールを事前にプレポリマー化し、かつ高官能基化することで、4,755 N・mmまで改善できることを確認している。今後、実用レベルの特性発現に向けて、原料構造や配合等を含めて詳細に検討を進めたい。

引張強さはRun1の98.8 N/cm²からRun3の70.8 N/cm²までNCO INDEXとともに低下し、これも硬度と同様に架橋密度と極めて高い相関があることが確認された。伸びも含めて引張特性は十分に実用レベルにあることが確認された。

表2 PUEシートの特性

		比較対象	Run 1	Run 2	Run 3
硬 度 [-]		E29	E38	E33	E30
<垂直粘着力試験>					
粘着強さ [N/cm ²]		35.3	41.6	39.8	38.6
有効面積 [N・mm]		6,025	1,690	1,759	1,985
<引張試験>					
破壊強さ [N/cm ²]		74.2	98.8	79.8	70.8
伸 び [mm]		360	328	364	391

4. 結言

非可食トウモロコシデンプン由来（バイオマス度100%）のポリオールを用いて、高バイオマス度エラストマーを作製した。物理特性はNCO INDEXに影響を受けるものの、概ね実用特性を兼ね備えた試作品を得ることができた。

今後、ポリオールをプレポリマー化することで、より一層の特性制御の可能性を探っていきたい。

参考文献

- [1] 古川睦久、ネットワークポリマー論文集, **39**, 3(2018).
- [2] 古川睦久、ネットワークポリマー論文集, **38**, 59(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, **49**, 31(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**, 111(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、応用分野の広がり大きい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、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。

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

金属加工業等の洗浄現場では、通常、アルカリ、酸、有機溶媒等の薬品による洗浄を行う。これらの薬品洗浄と比べると、気泡洗浄はマイルドな洗浄であり、洗浄効率だけ考えると薬品洗浄の方が高い。しかしながら、産業洗浄は、洗浄効率だけではなく、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し、工程設計することが望ましい。気泡洗浄は、基本成分が空気と水なので廃液がクリーンであり、洗浄に使用する薬品量の低減や作業の安全性に寄与する。また、腐食発生の要因となる薬品残渣の問題がなく、品質向上にもつながる。一方、これらのメリットが製造コストや製品品質と見合わなければ、

洗浄現場での利用価値は低いものとなる。

そこで、本研究では、洗浄現場での適用を目指し、簡易な気泡の管理方法の提案及び気泡の照射方法等の工夫による洗浄効率の向上を目指す。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、理論計算の結果及び実証試験について報告している^[1]。また、効率の良い洗浄方法について検討を行い、円形の水槽内で水流による渦を形成させ、ポンプ内への汚れや異物の吸引防止する手法について報告している^[2]。本報では、これまでの結果を補足しまとめた内容について報告を行う。

2. 実験方法

2. 1 簡易計測手法の開発

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。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。疑似試料の異なる粒子径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 気泡による洗浄効果の検証

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

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 疑似試料による異なる粒子径の散乱挙動

性状が不安定な気泡を実試料に用いた散乱性検証は極めて困難であるため、ポリスチレン（PS）粒子を用いた疑似試料による散乱挙動により解析した。ポリスチレン粒子の個数密度調整により微細気泡の散乱光を概ね再現できる。図1に疑似試料にレーザー光を照射した散乱光画像およびスムージング・二値化処理した画像を示す。この際、粒子の総体積は一定にしている。同一体積において200nmの粒子径の粒子は、レイリー散乱により最も強く散乱する。粒子径が200nmを超えて、数 μm 程度になると、散乱強度は減少し、さらに、まだらな散乱挙動を示すようになる。

気泡数の散乱光を目視で観察する手法は、現場の気

泡管理において有効であるが、水道水には、鉄サビ、凝集物、原虫、アルミニウム等の数 μm 程度の粒子が含まれることがあり、コンタミ粒子と気泡の区別はしにくく、しばしばその誤認が問題となる。不純物粒子有無の識別のため、図1の二値化した画像からレーザー光軸にそってラインプロファイルを取得し、ライン上のピクセルの黒白比を算出した結果を図2に示す。粒子径が大きくなると、まだらな散乱挙動となるため、黒白比は大きくなり、コンタミ粒子の有無の判定として利用できる。

3. 2 二色光の散乱性に基づく粒子径補正の検討

理論計算により求めた等価散乱係数と、レーザー光を照射し得られた散乱画像を画像処理し、ピクセルカウントした結果を比較したものを図3に示す。理論計算により得られた散乱係数と得られた画像のピクセルカウントは概ね一致しており、理論計算に基づき散乱挙動を予測し、解析できることを示している。

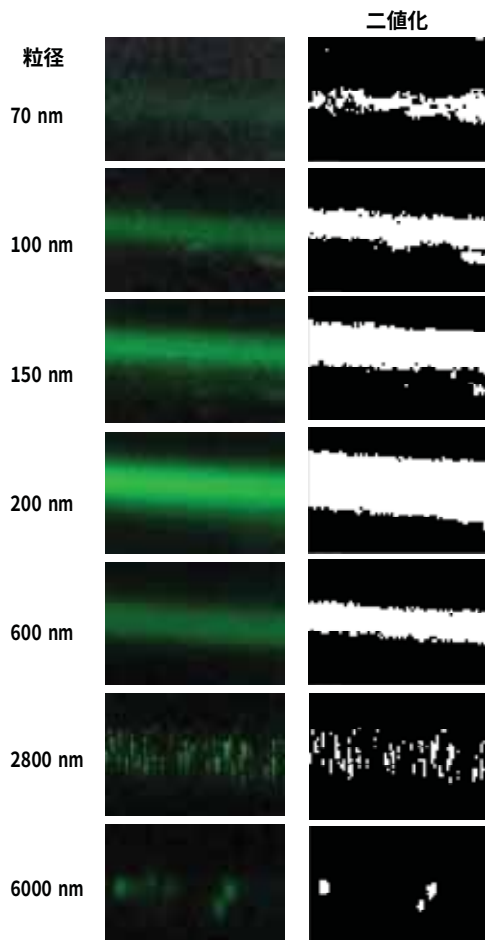


図1 疑似試料の散乱光画像

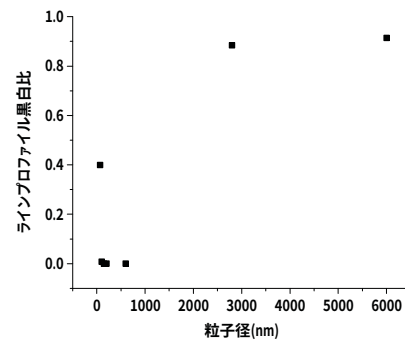


図2 レーザー光軸上のラインプロファイルにおける黒白比

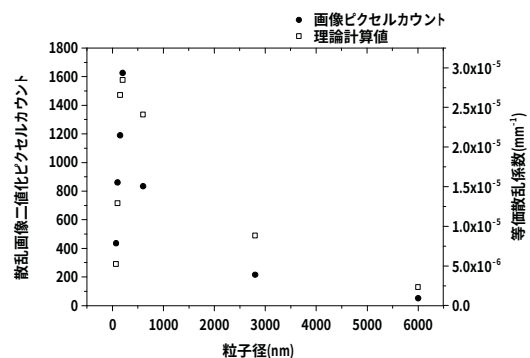


図3 理論計算による等価散乱係と取得画像からの散乱光強度の比較

実際の微細気泡の気泡径は、気泡の粒子計測装置の一つであるナノサイトを用いて計測した結果により、中心波長はおおよそ 100nm 程度で、50 nm～300 nm のブロードな範囲で分布していることを確認している。前述したとおり、散乱強度における粒子径の影響は大きく、簡易計測法の精度向上には、粒子径の大きさを補正する手法の確立が有効と考えられる。

そこで赤色と青色の散乱性の違いに着目し、粒子径の識別が可能か理論検証を行った。光源として安価で入手が容易な半導体レーザーの利用を想定し、計算における波長は 515 nm 及び 635 nm とした。図 4 に、異なる粒子径 (70 nm, 100 nm, 150 nm, 200 nm, 600 nm, 2,800nm, 6,000nm)、における角度分布の極座標を計算

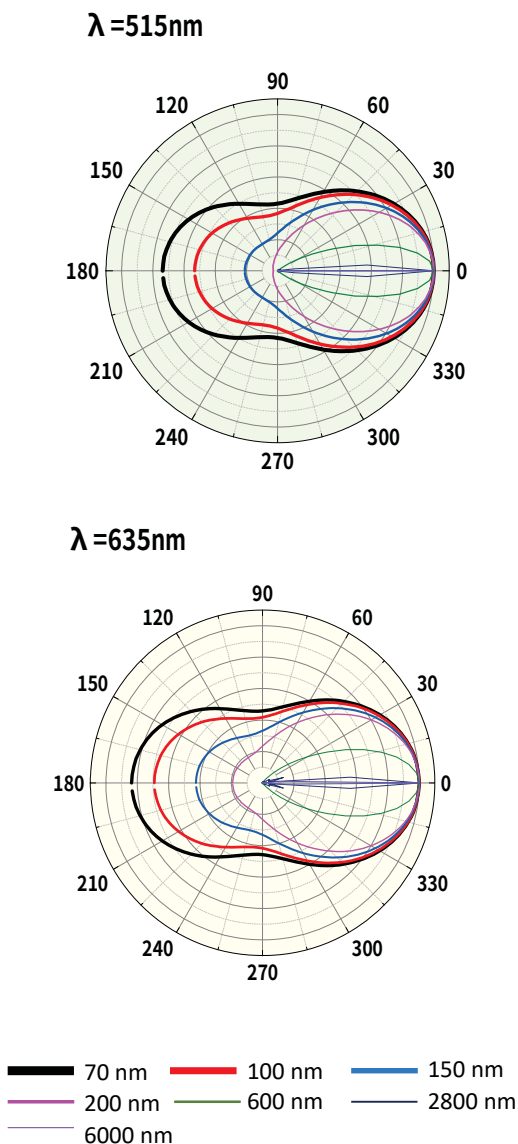


図4 波長 515 nm 及び 635 nm における散乱光の角度分布の極座標

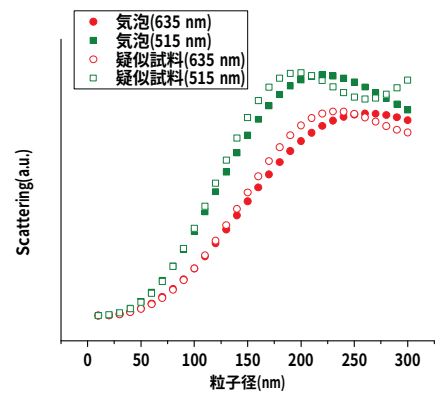


図5 微細気泡と疑似試料 (PS 粒子) の散乱光強度計算

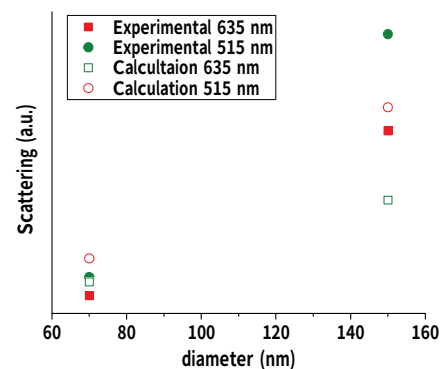


図6 二色光による散乱光強度の測定

した結果を示す。これらの計算結果をもとに、二色光による粒子径補正の検討を行った。

微細気泡の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^[3]。図 5 に気泡と疑似試料の散乱光強度を計算した結果を示す。微細気泡と疑似試料の散乱光強度は概ね一致している。波長 515nm と 635nm の散乱光強度の差は、粒子径 160nm において最大となっており、2 色比を求めることで粒子径の情報が得られることがわかる。

これらの結果をもとに実験的に散乱光強度を測定し、理論値と比較を行った。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, 150nm) における相対的な強度を求めた (図 6)。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した。理論計算値とのずれは、光源出力の安定性やビーム質によるものと考えている。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。

3.3 円形洗浄槽による洗浄試験

次に気泡洗浄効率の向上の取り組みについて述べる。洗浄槽をいくつか構築し洗浄試験を行ったが、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わかった。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とも懸念される。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。

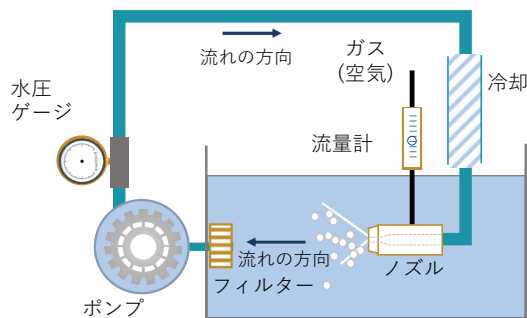


図7 洗浄装置概略

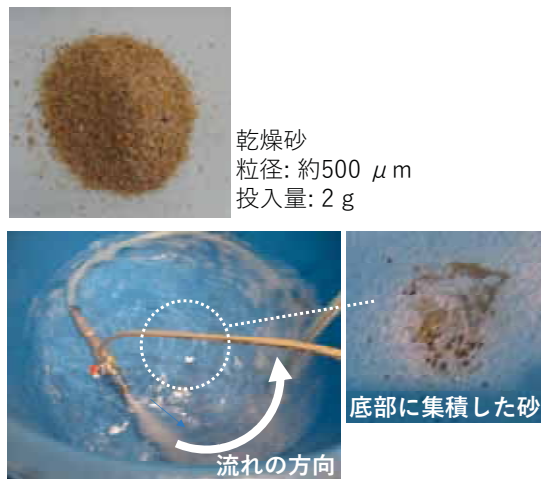


図8 洗浄の様子と異物（砂）の回収試験

図7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、中央付近に砂の堆積が目視で確認できた（図8）。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。

構築した洗浄槽において、洗浄物を水槽壁面に配置し、洗浄性を検証した。配置場所によって汚れの取れ方が異なり、気泡水の照射口に近い洗浄物については、水流も強く、汚れはとれやすい。金属プレートに格子状にグリースを付着させ、洗浄サンプルとし、60分洗浄した洗浄前後の洗浄物の写真を示す。洗浄後に、プレートに付着した汚れがとれているのがわかる。また、表1に気泡有り、無しにおける一定時間（10分）の汚れの除去率の結果を示す。気泡無しの洗浄においては、ノズルを取り外すので、完全に洗浄条件を同一にするのは難しく、微細気泡のみの効果というよりも、水流の影響も含まれると考えているが、同一ポンプ能力において、トータルとしては除去効果が得られたと考えている。

洗浄前



洗浄後



図9 洗浄前後の洗浄物

表2 グリース除去率の比較

	グリース除去率 (%) N=3
気泡洗浄	54±12
水のみ	40±1

なお、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、洗浄対象ごとに試験片の配置や水流の強さ、照射角度などを最適化することも重要である。

3. 4 超音波活用による隙間洗浄の検討

超音波利用による隙間洗浄への活用を試みた。微細気泡水には通常の水よりも多量の空気が含まれているため、キャビテーション促進による洗浄効果の向上が期待される。微細気泡の効果的な活用には、複数の手法との組み合わせや、気泡の特徴を活かした用途、目的に限定した取り組みも有効である。

金属 (SUS) ブロックに直径 1 mm、2 mm、3 mm の円形の穴 (深さ 1 mm) を空け、穴の中まで埋まるようにグリースを均一に塗布し、微細気泡水をビーカーに満たし、超音波プローブを用いて上部から超音波を照射した。この結果、図 10 に示すとおり、汚れが取れにくい穴径 1 mm 内のグリースを除去することができた。3 mm の穴径のグリースは、大半残っており、気泡洗浄については、多量の汚れを落とすよりも、隙間洗浄の有効性が期待される結果となった。洗浄メカニズムとして気泡が穴内で急速に成長し、金属の隙間において空気層を形成し、穴内の汚れ全体を剥がす

ように除去されたと推定している。隙間洗浄については、超音波の照射位置・強度、水温、汚れの状態などにも影響すると考えられ、今後、更なる検証を進めたい。

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。さらに隙間洗浄についての検討を行い、超音波洗浄との組み合わせにより、隙間洗浄において有効であることを示唆した。

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] 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. 53, pp. 56-59, 2024.
- [3] A. Sonoda: J. Soc. Powder Technol., 54, pp. 590-595, 2017.

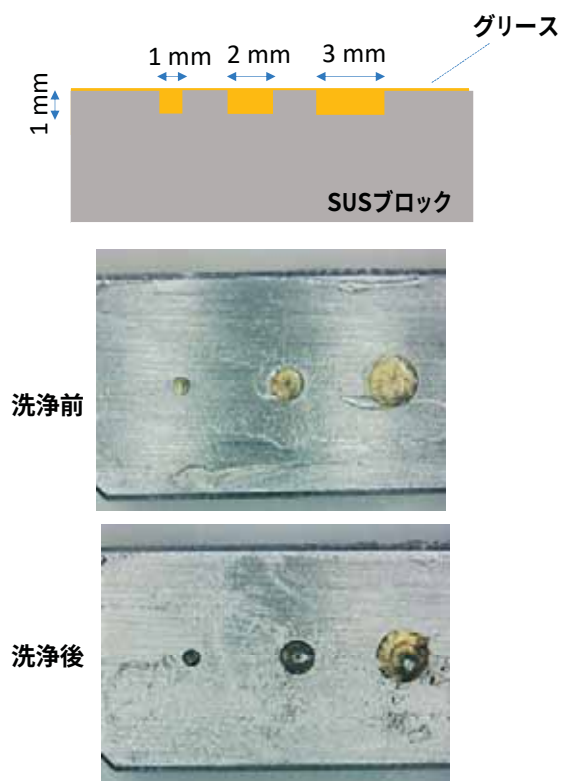


図 10 超音波洗浄による穴内グリースの除去

非金属脆性材料の精密加工に関する研究

機械加工科 主任研究員 福田 洋 平

半導体製造装置に組み込まれる部品には、躯体パーツとなるアルミの削り出し加工品や板金加工品のほか、クリティカルパーツと呼ばれる高付加価値加工部品があり、近年、クリティカルパーツの中で非金属脆性材料の占める割合が増えつつある。しかし、非金属脆性材料は長崎県のものづくり企業が得意とする切削加工技術で加工することができず、超砥粒ホイールやダイヤモンド工具を用いた加工技術が必要となる。本研究は、長崎県の半導体関連産業の振興を後押しするために、非金属脆性材料の加工技術の高度化を目的に取り組んだ。

1. 緒言

スマートフォンやパソコンの中でデータの処理を担う IC（集積回路）は半導体と呼ばれ、単結晶シリコンを主な材料として、微細加工プロセスによって製造される。近年の AI 技術や IoT 技術の普及・拡大に伴い、IC の更なる微細化など、半導体への要求は日々高まっている。半導体製造装置においては、IC の微細化を達成するためのコンタミネーションの低減、および消耗部品の長寿命化の観点から、従来、金属で製作していた部品を非金属脆性材料に置き換える動きが進んでいる^[1]。

しかし、非金属脆性材料は長崎県のものづくり企業が得意とする切削加工技術で加工することができず、超砥粒ホイールやダイヤモンド工具を用いた加工技術が必要となる。県内企業が新たに非金属脆性材料の加工技術開発に取り組む場合、研削盤やグラインディングセンタの導入から始める必要があるため、経済的なハードルとリスクが高い。

そこで、加工技術の開発ノウハウ、および各種の工作機械と評価設備を保有する工業技術センターが非金属脆性材料の加工ノウハウの構築に取り組む。本稿では、単結晶シリコンを加工対象としたダイヤモンドドリルによる穴あけ加工について報告する。

2. 実験方法

2. 1 穴加工実験

半導体製造装置は、純水、ガス、薬液などの流体を取り扱うものが多く、それらの流路を形成するために穴加工の必要性が高い。今回は単結晶シリコンを加工対象として、2種類の PCD（多結晶ダイヤモンド）ドリルを用いて穴加工実験を実施した。表1にPCDドリルの仕様を、表2に加工条件を示す。なお、主軸振れ

の影響による穴品質の低下を防ぐため、工作機械の主軸にモータスピンドル（株式会社ナカニシ製：HES510-BT40）を取り付けて加工した。

表1 PCD ドリルの仕様

	汎用形状	多角形状
メーカー	協和精工株式会社	
工具径	φ1.0 mm	
ねじれ角	30 °	
溝長	8 mm	
先端形状		

表2 穴加工実験の加工条件

主軸回転数	10,000 min ⁻¹
送り量	0.002 mm/rev
ステップ量	0.5 mm
穴加工深さ	5.0 mm
加工穴数	36
加工面（結晶方位）	(001)面

2. 2 マイクロクラックの評価方法

機械加工を施した脆性材料の加工面には、マイクログラックと呼ばれる亀裂が材料内部に向かって進行している場合がある。マイクログラックの存在は、脆性材料で製作された部品の微細な欠けを誘発するものであり、コンタミネーション低減の観点から、加工によっ

て生じるマイクロクラックは評価・管理される必要がある。

今回は穴の軸方向断面に対して研磨とエッチングを施し、マイクロクラックの拡大観察と長さ測定を実施した。なお、実験には新品の工具を使用し、31 穴目から 36 穴目の 6 穴を評価した。マイクロクラックの評価手順を表 3 に、調整後のサンプル写真を図 1 に示す。

表 3 マイクロクラックの評価手順

1. 研削	粒度 170 のダイヤモンドホイールを用いて評価面の 100 μm 手前まで除去
2. 研磨	粒度 2000 と粒度 4000 の SiC 研磨紙を用いて評価面まで除去
3. 琢磨	粒径 1 μm のダイヤモンド懸濁液を用いて評価面を鏡面仕上げ
4. エッチング	5 wt%アセトン含有 0.2 mol/L 水酸化ナトリウム溶液を用いて、90 分エッチング処理
5. 長さ測定	マイクロスコープの測長機能を用いてマイクロクラック長を測定

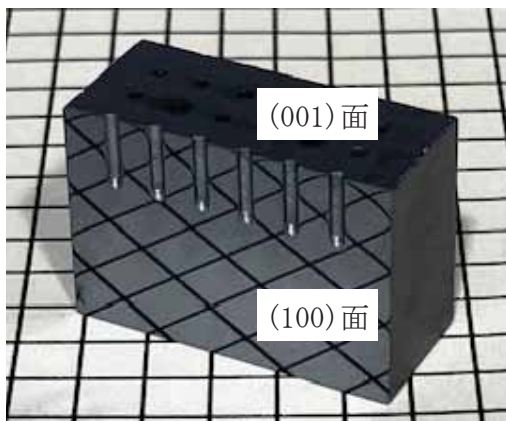


図 1 調整後のサンプル

3. 結果および考察

汎用形状ドリルによる加工穴断面を図 2 に、多角形状ドリルによる加工穴断面を図 3 に示す。いずれも 36 穴目の加工穴断面である。

汎用形状ドリルにおいては、穴底方向に向かって斜め約 45° のマイクロクラックが穴の円筒面全域にわたり発生した。一方の多角形状ドリルはマイクロクラックの発生が抑えられており、発生は局所的かつ最大マイクロクラック長は 32 μm であった。

汎用形状ドリルは切れ刃が先端にしかついておらず、生成される円筒面は、旋盤の突っ切り加工における端面と同じように成り行きで生成される。多角形状ドリルを用いることで、外周付近の切れ刃がワイパー刃のように作用し、脆性破壊に伴うマイクロクラックの発生を抑えていると考えられる。

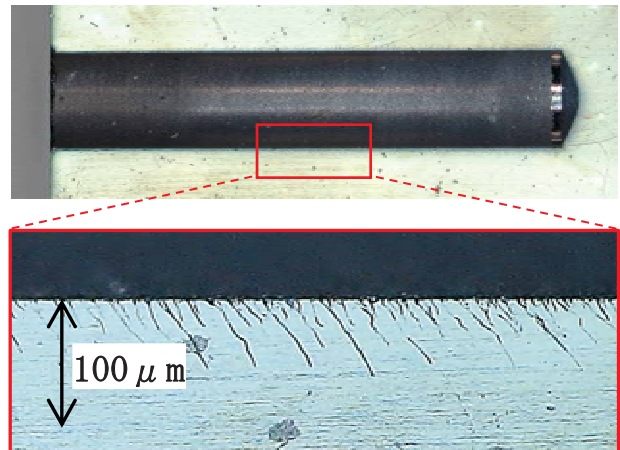


図 2 汎用形状ドリルによる加工穴断面

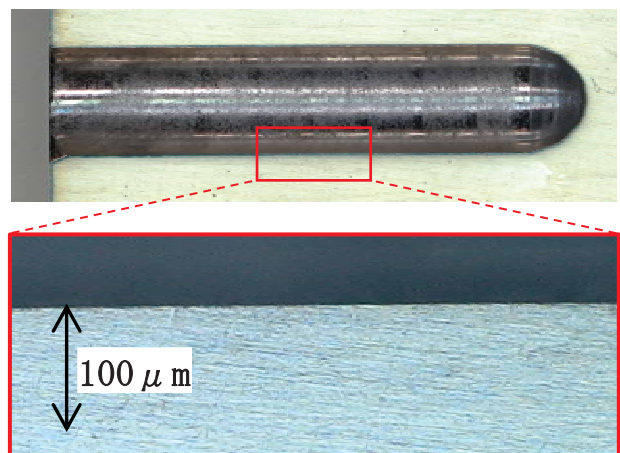


図 3 多角形状ドリルによる加工穴断面

4. 結言

単結晶シリコンの穴加工において、工作機械の主軸にモータスピンドルを取り付け多角形状の PCD ドリルを用いることで、比較的良好な穴品質を得られることを確認した。

参考文献

- [1] 大谷、石月：石英製品、シリコンパーツの技術動向、SoftMatter 11月号, pp.18-20, 2020.

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

(効率的な鋳物砂の品質管理の提案)

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。

2年目となる令和6年度の研究では、砂の管理項目の絞り込み、耐火性、砂型成型について調査した。

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、融かした金属を砂型に流し込み、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化し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 クラスタ分析による砂性状の関連性調査

鋳造後の劣化した砂は、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、定期的に採取した砂からその特性を調査した。

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。これらの試験で得られた結果をもとにクラスタ分析を実施した。また、これまでのクラスタ分析の結果とも比較して調査した。

2. 2 耐火性評価試験

鋳造欠陥の一つである焼付きは、鋳型の耐火性が低い場合に発生する。この対策として、耐火性の高いクロマイトサンドを投入して鋳型の耐火性を上げている。しかし、クロマイトサンド投入に対する耐火性向上を評価する明確な方法はない。そのため、クロマイトサンドの混入量の異なる試料に対して、これまでの研究^[1]で有効性を示した耐火性評価試験により耐火性を評価した。

2. 3 砂型の成型方法の検討

砂型の成型には、砂、粘結剤及び硬化剤を適切な量準備し、これらを均一に攪拌、混練する必要がある。また、成型した砂型は、時間経過で型強度（圧縮強さ）が変化するため、適切な時間保持する必要がある。そこで、砂型の成型方法検討のため、表1の試験条件により、ミキサー及びサンドランマーを用いて砂型の通気度試験及び圧縮強さ試験から適切な成型方法を検討した。

表1 砂型成型における試験条件

試料名	砂 (g)	粘結剤 (g)	硬化剤 (g)	攪拌時間 (sec)	保持時間 (h)
(1)	200	4.8	1.0	120	36
(2)	162.3	5.3	0.9	120	4

3. 結果及び考察

3. 1 砂の試験項目の絞り込み

砂試験の結果から、クラスタ分析を実施した結果を図1に示す。分析結果から、次の①～④の事を確認

した。①かさ密度、粒度指数、水分量の関連性が強い。②通気度、表面安定度の関連性が強い。③強熱減量、圧縮強さの関連性が弱い。これらの原因として、①では砂粒子の大きさに起因したグループ、②では砂成型時の充填率及び結合力に起因したグループと推定された。一方で、③の強熱減量、圧縮強さの関連性が弱いことから砂の品質管理においては、①、②とは別に強熱減量、圧縮強さの項目を独立して行う必要があることが推定された。また、令和5年度までの分析結果を図2に令和4年度まで分析結果^[1]を図3に示す。令和5年度及び令和4年度までの分析結果は、表面安定度とかさ密度、粒度指数と通気度の関連性が強く、水分量、圧縮強さ、強熱減量の関連性が弱い結果を示した。この結果は、上述した令和6年度までの分析結果と比較して、表面安定度、かさ密度、粒度指数、通気度の関連性の強さは同様だが、水分量の関連性が強く見られた。水分量は、採取時期や気候の影響に左右されることから、砂採取時の気温や湿度についても確認する必要があることが推定された。

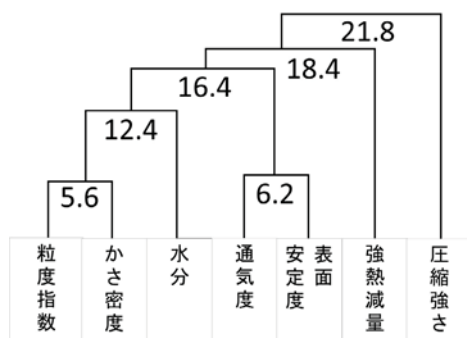


図1 令和6年度までのクラスター分析結果

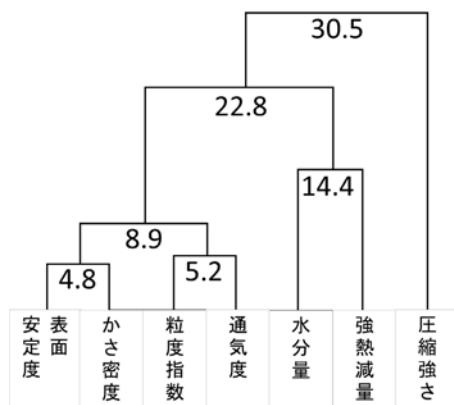


図2 令和5年度までのクラスター分析結果

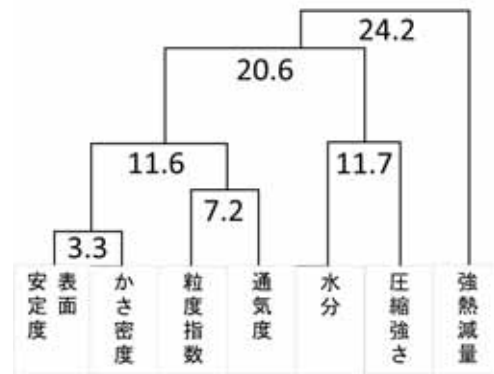


図3 令和4年度までのクラスター分析結果

3. 2 耐火性試験

クロマイトサンドの混入量が異なる2種類の成型砂の耐火性評価試験の結果を図4に示す。クロマイトサンド混入量の多少にかかわらず、振とう時間の経過に伴い質量残存率の緩やかな減少がみられた。この結果から、砂型が振とうの途中で砂型に大きな割れや欠けが発生せず、外側から規則正しく削れたためであることが推測された。また、クロマイトサンド混入量による耐火性は、混入量が多いほど耐火性が高く、混入量が少ないほど耐火性が低い値を示した。この傾向は、クロマイトサンドの特性と一致していることから、本試料において、混入量の違いに対する砂型の耐火性を明確に評価できる結果であった。

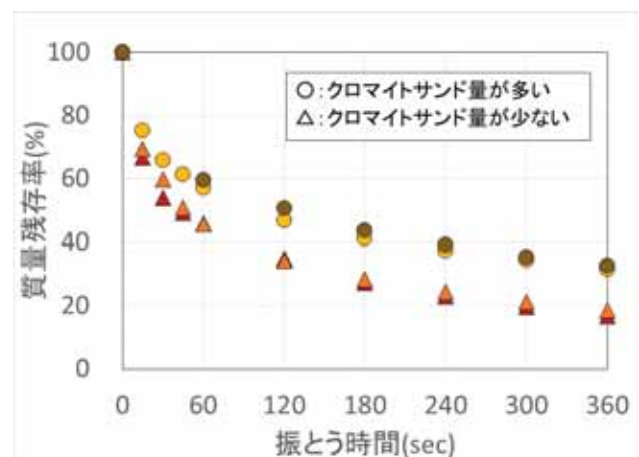


図4 耐火性評価試験結果

3. 3 砂型の成型実験

表1の試験条件で成型した砂型の試験結果を表2に、成型した砂型を図5及び図6に示す。試料(1)では、成型後の試料を取り出した際に砂型の一部が欠損した。これは、砂、粘結剤、硬化剤が均一に混練されていない

かったため砂型の一部が結合されずに崩壊したと考えられた。なお、均一に混錬するには、混錬砂をミキサーで回転させる際、ミキサーの回転に合わせて混錬砂が壁面を上り、その後上から落下するように混ぜなければならない(例:図8の①→②→③)。しかし、試料(1)では、ミキサーの大きさ、内部の形状、ミキサー内部壁面の摩擦力、混錬砂の投入量などが原因で、混錬砂がミキサー壁面を上った後、図8の③の様に落下せず、図8の④の様に元の位置に滑り戻り砂全体が適度に攪拌されなかったため結合力が一部低下したと考えられた。

次に、試料(2)で成型した砂型を図6に示す。参考として図7に鑄造現場の砂で作製した成型砂を示す。この試料では、混錬した砂をポリタンクに入れ、その容器ごとミキサーで回転させることで滑り戻りを防ぎ混錬した。この試料では、試料(1)とは異なり、砂型の崩壊は確認されなかった。しかし、通気度、圧縮強さの結果から、空隙が多く、強度が弱いことが確認された。空隙の増加については、砂を採取する際、保存容器の上澄みのみを使用したため、比較的粒径の大きい砂のみを使用しており、その結果、砂型成型時に空隙の領域が拡張した。また、強度の低下については、上述の空隙の増加に加えて、短い保持時間で試験を実施したため、砂型が十分に硬化されず、強度が低下したと推定された。

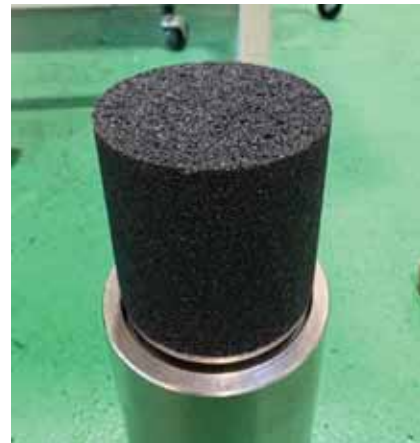


図6 試料(2)の成型砂

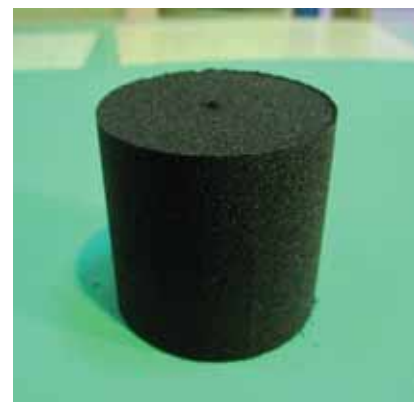


図7 鑄造現場の砂を用いて作製した成型砂

表2 砂型の試験結果

試料名	砂型質量(g)	砂型高さ(mm)	通気度(-)	圧縮強さ(kgf/cm ²)
(1)	143.7	37.3~43.8	-	-
(2)	164.8	48.55	296	10.06



図5 試料(1)の成型砂(一部欠損)

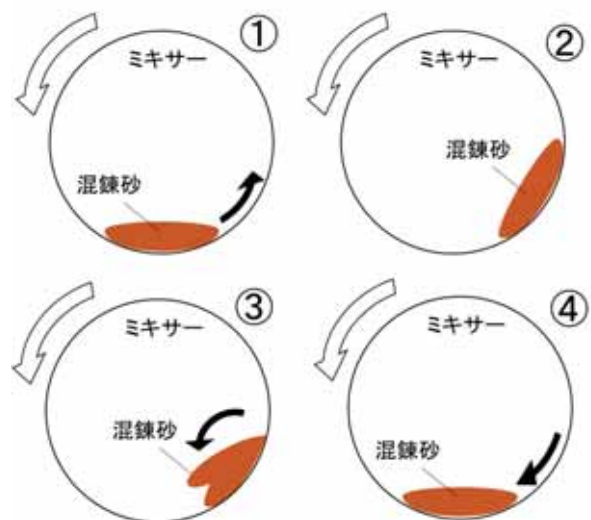


図8 ミキサーによる混錬砂回転のイメージ図

4. 結言

データ活用による砂の管理を目的とした試験項目の絞り込み、クロマイトサンド混入量に対する耐火性評価、鑄造実験のための砂型の成型について検討した。

試験項目の絞り込みでは、クラスター分析の結果から試験項目を4項目に絞り込んだ。ただし、令和5年度及び令和6年度のクラスター分析の結果と比べて水分量の関連性の強さが異なっており、温度、湿度等の外的要因の影響も考えられた。そのため、これらも併せて確認しつつ引き続き砂項目のデータ収集を行い適切な管理項目を検討する。クロマイトサンドの耐火性評価試験では、クロマイトサンドの混入量の増加に伴い耐火性が向上すること（耐火性の特徴）が明確に示された。砂型の成型実験では、混錬条件及び均一な混錬方法を示した。ただし、砂型の強度が低水準であることから、今後は、砂、粘結剤、硬化剤の分量、硬化時間の妥当性について引き続き調査する。

参考文献

- [1] 大田剛大、小笠原耕太郎：木型と鋳物砂の改善による鋳造品の品質向上、長崎県工業技術センター研究報告, No. 52, pp. 47-51, 2023.

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	センター長	玉屋 圭
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	主任研究員	三島 朋子
食品開発支援センター	専門研究員	河村 俊哉

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。昨年度に、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確立した。今年度は、市販の醤油製品に含まれる DA を測定した。

1. 緒言

これまでに生体中のアミノ酸の大半は L-アミノ酸 (LA) であると考えられていたために、鏡像異性体である D 体は注目されて来なかった。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、DA を多く含む製品開発を行う。

今年度は、発酵食品である醤油に含まれる DA を昨年度に確立した蛍光 HPLC 分析法を用いて測定したので報告する。

2. 方法

2. 1 試薬

L-アスパラギン酸、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-セリン、L-アラニンはナカライテスク株式会社製を使用した。また、L-ロイシンはキシダ化学株式会社製、D-アスパラギン酸、D-グルタミン酸、D-セリン、D-アラニン、D-ロイシンは東京化成工業株式会社製を用いた。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ー用を採用した。

2. 2 発酵食品に含まれる DA の分析

食品に含まれる DA を精度良く分析することを目的として、昨年度 HPLC 装置を用いる分析法を確立した。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である。

今年度は本法を用いて、県産の発酵食品に含まれる DA 量を測定した。今回は数種の発酵食品の中で、濃口醤油に含まれる DA の含量を検討したので報告する。

濃口醤油は県産の市販品 11 種を試料とした。製造方式として、本醸造 (6 品) 及び混合 (5 品) の 2 種

を採用した。測定の際には、醤油試料を 10 mM 塩酸を用いて 200～2500 倍に希釈した。

DA 及び LA の測定は以下に行った。

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、以下の条件^[9]により実施した。

流速 ; 0.8 mL/min

カラム ; Shim-pack VP-ODS (粒子径 5 mm, 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

なお、溶離液 (A) 並びに (B) のグラジエント条件を以下の表 1 に示す。

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 (B) の濃度 (%)
0	10
75	60
80	100
85	100
85.01	10
90	10

3. 結果

3. 1 醤油に含まれる DA 量

醤油に含まれる LA 及び DA 含量を蛍光 HPLC 分析法により測定した。特に、旨味、甘味、苦味などの味^[6]を有するアミノ酸であるアスパラギン酸、グルタミン酸、セリン、アラニン、ロイシンの含量を検討した。

まず、本醸造醤油に含まれる LA 量を表 2 に示した。L-アスパラギン酸は 32.0～46.9 mM、L-グルタミン酸は 33.9～86.1 mM、L-セリンは 19.5～62.7 mM、L-アラ

ニンは 7.1～35.9 mM、L-ロイシンは 17.7～64.7 mM の範囲で含まれていた。竹田らは、未殺菌の生揚げ醤油の L-アスパラギン酸、L-グルタミン酸、L-セリン、L-アラニン、L-ロイシン濃度はそれぞれ 20 mM、40 mM、15 mM、20 mM、15 mM 程度と報告^[10]している。今回、蛍光 HPLC 法を用いて測定した値と大きな差異はなく、妥当な値であると判断された。

表 2 本醸造醤油に含まれる主要な LA の含量

本醸造 (mM)	L-アスパラギン酸	L-グルタミン酸	L-セリン	L-アラニン	L-ロイシン
No. 1	40.7	51.3	35.3	15.2	35.7
No. 2	45.3	33.9	19.5	7.1	17.7
No. 3	43.4	46.2	45.7	10.2	23.2
No. 4	46.9	78.6	62.7	35.9	64.7
No. 5	46.4	86.1	45.7	25.4	52.1
No. 6	32.0	41.8	34.9	18.3	39.7
平均	42.4	56.3	40.6	15.7	38.8

一方、本醸造醤油に含まれる DA 量については表 3 にまとめた。測定の結果、D-アスパラギン酸は 0.3 mM 以下、D-グルタミン酸は 0.1～0.6 mM、D-セリンは 0.3 mM 以下、D-アラニンは 0.3～0.7 mM、D-ロイシンは 0.1 mM 以下の濃度で含まれていることが判明した。生揚げ醤油の D-アスパラギン酸、D-グルタミン酸、D-セリン、D-アラニン、D-ロイシン濃度についてはそれぞれ 0.545～0.654 mM、0.230～0.259 mM、0.266～0.412 mM、2.468～3.368 mM、0.182～0.262 mM と報告^[10]されている。D-アラニン並びに D-ロイシンを除いては、今回の測定値とほぼ同等の値であった。本醸造醬

表 3 本醸造醤油に含まれる DA 含量

本醸造 (mM)	D-アスパラギン酸	D-グルタミン酸	D-セリン	D-アラニン	D-ロイシン
No. 1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.1
No. 2	0.1	0.1	0.0	0.3	0.0
No. 3	0.3	0.3	0.2	0.7	0.1
No. 4	0.3	0.6	0.3	0.4	0.0
No. 5	0.2	0.3	0.1	0.7	0.0
No. 6	0.0	0.1	0.1	0.3	0.0
平均	0.2	0.2	0.1	0.4	0.0

油のDAについては、諸味発酵熟成工程、特に仕込み後1～3週に増加することが報告されている。ラセマーゼを有する乳酸菌などの発酵微生物がDAの増加に関与しているものと考えられた。

さらに、本醸造醤油と異なる方式で製造された混合醤油に含まれるLA並びにDAの含量を測定した。醤油製造において、副原料として大豆タンパク質を塩酸で分解したアミノ酸液の使用が認められている。アミノ酸液を使用しない醤油を本醸造醤油と呼ぶのに対して、本醸造醤油の生揚げにアミノ酸液を加えたものを混合醤油と規定^[11]している。混合醤油に含まれるアミノ酸、特にDAについて検討された例はほとんど見受けられないため、本研究では混合醤油でのDA含量を測定した。

表4に混合醤油に含まれるLAの含量を示した。L-アスパラギン酸は48.9～72.0 mM、L-グルタミン酸は45.5～136.2 mM、L-セリンは23.5～47.2 mM、L-アラニンは10.3～27.2 mM、L-ロイシンは16.9～38.8 mMの範囲で含まれていた。また、混合醤油のLA量の平均値(L-アスパラギン酸;56.2、L-グルタミン酸;94.3、L-セリン;36.0、L-アラニン;20.3、L-ロイシン;28.1 mM)を本醸造醤油の平均値(L-アスパラギン酸;42.4、L-グルタミン酸;56.3、L-セリン;40.6、L-アラニン;15.7、L-ロイシン;38.8 mM)と比較すると、L-アスパラギン酸、L-グルタミン酸について混合醤油で1.3倍以上高い値が認められたが、他のアミノ酸では大きな差異は認められなかった。

表4 混合醤油に含まれる主要なLAの含量

混合 (mM)	L-アス パラギ ン酸	L-グル タミン 酸	L-セリ ン	L-アラ ニン	L-ロイ シン
No. 1	72.0	73.3	29.3	15.0	20.3
No. 2	52.8	45.5	23.5	10.3	16.9
No. 3	54.1	136.2	39.9	25.9	29.4
No. 4	48.9	89.9	40.0	23.0	38.8
No. 5	53.2	126.6	47.2	27.2	35.2
平均	56.2	94.3	36.0	20.3	28.1

表5に混合醤油に含まれるDA量を記載した。D-アスパラギン酸は2.4～6.3 mM、D-グルタミン酸は1.0～2.6 mM、D-セリン0.5～1.0 mM、D-アラニンは1.0～2.2 mM、D-ロイシンは0.4～0.9 mMの範囲で含まれて

いた。表2の本醸造醤油のD-アミノ酸量の平均値(D-アスパラギン酸;0.2、D-グルタミン酸;0.2、D-セリン;0.1、D-アラニン;0.4、D-ロイシン;0.0 mM)と比較すると、混合醤油のDA量(D-アスパラギン酸;4.4、D-グルタミン酸;1.8、D-セリン;0.7、D-アラニン;1.3、D-ロイシン;0.7 mM)は含量が3倍以上増加していることが明らかになった。

表5 混合醤油に含まれるDAの含量

混合 (mM)	D-アス パラギ ン酸	D-グル タミン 酸	D-セリ ン	D-アラ ニン	D-ロイ シン
No. 1	6.3	2.0	1.0	2.2	0.9
No. 2	3.8	1.0	0.6	1.0	0.4
No. 3	5.6	2.6	0.6	1.1	0.8
No. 4	2.4	1.2	0.5	1.2	0.4
No. 5	4.2	2.3	0.9	1.1	0.9
平均	4.4	1.8	0.7	1.3	0.7

混合醤油でのDA量が大幅に増加した要因としては、DAを含む副原料のアミノ酸液を添加した結果、DAの含量が増加した可能性が考えられた。塩酸による加水分解処理によりタンパク質から遊離したアミノ酸にラセミ化反応^[12]が起こることが知られている。混合醤油の製造に用いられたアミノ酸液でもラセミ化、すなわちL体からD体への変換が行われたと予想される。アミノ酸液を生揚げ醤油へ添加した結果、DA含量が大きく増加したのと考えられた。

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。

食品に含まれるDAを精度良く分析することを目的

として、昨年度 HPLC 装置を用いる分析法を確立した。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である。

今年度は本法を用いて、県産の発酵食品に含まれる DA 量を測定した。今回は数種の発酵食品の中で、製造方式の異なる 2 種の濃口醤油（本醸造、混合）に含まれる DA の含量を検討した。

まず、本醸造醤油に含まれる DA 量については、D-アスパラギン酸は 0.3 mM 以下、D-グルタミン酸は 0.1～0.6 mM、D-セリンは 0.3 mM 以下、D-アラニン は 2.5～7.4 mM、D-ロイシンは 0.1 mM 以下の濃度で含まれていることが判明し、D-アラニンが最も高い濃度を有していた。

次いで、混合醤油に含まれる DA 量を検討した。D-アスパラギン酸は 2.4～6.3 mM、D-グルタミン酸は 1.0～2.6 mM、D-セリン 0.5～1.0 mM、D-アラニンは 10.1～21.6 mM、D-ロイシンは 0.4～0.9 mM の範囲で含まれていた。本醸造醤油の D-アミノ酸量の平均値と比較すると、混合醤油の DA 量は含量が 3 倍以上増加していることが明らかになった。混合醤油での DA 量が大きく増加した要因としては、DA を含む副原料のアミノ酸液を添加した結果、DA の含量が増加した可能性が考えられた。

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^[13]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, 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, 1-6 (2011).
- [3] Brückner H. , Hausch M. :Chromatographia, 28, 487-492 (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, 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, 62-66 (2012).
- [6] 真鍋久：美味技術学会誌, 19(1), 53-57 (2020).
- [7] 吉村徹：日本家政学会誌, 74(6), 346-351 (2023).
- [8] 牟田口祐太、大森勇門、大島敏久：化学と生物, 53(1), 18-26 (2015).
- [9] 玉屋 圭、河村俊哉、宮田裕次、三島朋子：長崎県工業技術センター報告, 53, 62-65 (2023).
- [10] 竹田悠見子、原 圭志、大橋ユキ、木田隆生、神山貴信、浦賀陽介、河盛幹雄：日本醸造協会誌, 116 (2), 125-131 (2021).
- [11] 館 博、宇都宮由佳、福留奈美：日本醸造協会誌, 115 (2), 75-84 (2020).
- [12] 宮本哲也、本間 浩：化学と生物, 56 (1), 18-25 (2018).
- [13] 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報告, 41, 1-5 (2011).

美味しく食べて軽度不調を改善 バレイショ「ながさき黄金」の高付加価値化

食品開発支援センター 主任研究員 土 井 香 織
食品開発支援センター 専門研究員 宮 田 裕 次

バレイショ「ながさき黄金」は、肉色が濃い黄色で良食味の特徴を有し、複合病害虫抵抗性があり、産地での安定した栽培が期待される長崎県育種品種である。特徴あるバレイショである一方、一般的に栽培される品種「ニシユタカ」より単位面積当たり2割程度収穫量が低いという課題がある^[1]。また、令和3年に実施された戦略的イノベーション創造プログラム「食を通じた健康システムの確立による健康寿命の延伸への貢献」(以下SIP事業)でのヒト臨床試験において、「ながさき黄金」の8週間摂取は軽度不調を改善する効果が確認された^[2]。

そこで、本研究では県産品の高付加価値化によるブランド力の向上を目的に、「ながさき黄金」青果物の機能性表示食品届出に向けた科学的根拠を得るための機能性成分分析と、「ながさき黄金」加工品の機能性成分量が担保された高付加価値食品の開発を行う。今年度は、青果物の作型や土壌および貯蔵期間の違いによる機能性成分カロテノイド含量の分析と、加工品であるポテトサラダの保存条件によるカロテノイド含量の推移について検討した。

1. 緒言

長崎県のバレイショ生産量は令和4年度時点、北海道、鹿児島に次ぐ第3位の全国有数の産地で、温暖な気候を生かした二期作栽培を行っている。長崎県はバレイショの育種に取り組んでおり、これまでに県育成品種は16品種以上におよび、病害や収量性、食味等に優れた品種を生み出している。そのうちの一つである

「ながさき黄金」は令和2年に品種登録された県育成品種であり、肉色が濃い黄色を有し、ほくほくした食感と甘味がある特徴的な品種である。「ながさき黄金」には、カロテノイドの一種であるゼアキササンチンを含む^[1]。バレイショの品種において、ゼアキササンチンを含むのは「ながさき黄金」以外に、北海道で育成品種された「インカのめざめ」が知られている。このように、ゼアキササンチンを含むバレイショ品種は希少である。

ゼアキササンチンには、目の黄斑部の色素を増加させ、光の刺激から目を保護し、ぼやけを緩和する機能によってはっきりと見る力をサポートすることが、一般に知られている^[3]。しかし、田中らは「ながさき黄金」1個に含まれるゼアキササンチンを1日109.8 μg 以上8週間継続摂取することで、目と全身の疲労感を軽減する傾向と有意に睡眠の質を高めること報告している^[2]。また、バレイショは青果物のため、原料貯蔵期間、加工処理、栽培産地などの違いによって成分含量が異なると考えられる。例えば、バレイショを長期低温貯

蔵することで糖含量が増加する^[4]。また、バレイショに含まれるアスコルビン酸残存率は、加熱処理方法によって異なる^[5]。さらに、バレイショに含まれるデンプン含量は、産地によって異なることが知られている^[6]。しかし、ゼアキササンチンについてはデータの蓄積が少なく、産地、貯蔵期間、加工処理などの違いによって、差異があることは十分に考えられる。

健康食品などのサプリメントに含まれる関与成分は、一般的に植物などから抽出・濃縮されている。濃縮液に含まれる関与成分を定量することで、一定量以上の関与成分量を担保できるサプリメントを作り出せる。このことから、多くの機能性表示食品はサプリメント形状で販売されている。一方、青果物やそれを加工した製品は、常に関与成分量を一定量以上担保することは難しい。

茶カテキンには、BMIが高めの方の内臓脂肪と皮下脂肪を低下させる機能^[7]など多くの生理機能が知られている。カテキンは、栽培条件の違いによって、カテキン含量が異なってくる。具体的には、4～5月にかけて摘採される一番茶と6月頃に摘採される二番茶では、二番茶葉が一番茶葉に比べカテキン含量が多くなる^[8]。また、茶生葉から乾燥加工した茶葉を高い温度で焙煎するとカテキンと糖が重合して、カテキン含量が減少する^[9]。これらの知見を活用することで、茶葉中のカテキン含量を推測して、機能性表示食品として茶飲料や茶ティーバッグでの販売が可能である。茶の

ように、栽培や加工条件の違いによって、関与成分量の差異について詳細に研究が進んでいる作物もある。しかし、バレイショに含まれるデンプン含量については、多くの知見が見られるものの、ゼアキサンチン含量については、あまり知られていない。

筆者らは、田中ら^[2]の知見に基づいて、「ながさき黄金」に含まれるゼアキサンチンを関与成分とし、睡眠の質向上を目的とした機能性表示食品として、バレイショ生産者や食品加工事業者と上市することを目指している。機能性表示食品で販売する上で重要なことは、関与成分量を一定量以上担保することである。そこで、「ながさき黄金」の産地、貯蔵期間、加工条件の違いによって、ゼアキサンチン含量に差異があるかどうか検討した。

2. 実験方法

2. 1 供試材料

長崎県内4地区で栽培収穫された、令和6年春作と秋作栽培の「ながさき黄金」を用いた。暗赤色土の諫早産、低地水田土の杵岐産、暗赤色土の南島原産、赤黄色土の西海産を収穫後、ながさき全農の出荷規格を参考にS、M、L、2Lサイズに分け、1サイズ5個ずつサンプリングして分析に供した。

2. 2 貯蔵条件

収穫した「ながさき黄金」を、長崎県工業技術センター低温室(KC-1.5、九州科学)にて3~4℃の暗黒条件下で6か月間貯蔵した。「ながさき黄金」の中間サイズであるMサイズを、3か月ごとに5個ずつサンプリングして分析に供した。

2. 3 カロテノイド量の測定

バレイショのカロテノイド含量を測定するための試料調製およびカロテノイド分析は、農業・食品産業技術総合研究所学術研究所が作成した手順書に準じて行った^[10]。1個の塊茎を凍結乾燥し粉碎したものを供試サンプルとした。サンプル0.3gにピロガロール0.6g、エタノール20mLを加え、ボルテックスミキサーで攪拌後60%水酸化カリウム溶液2.5mLを加え混合した後、30分間56℃で加温してケン化を行った。

ケン化後の試料に1%塩化ナトリウム溶液10mLを加えた。その後0.1%ジブチルヒドロキシトルエン含有ヘキサン10mLを加えてボルテックスミキサーで攪拌し、2000rpmで10分間遠沈後、上層を回収した。

ヘキサン投入後の操作を3回繰り返した。回収した不ケン化物を40℃以下においてエバポレーターで減圧除去し乾固させた。

0.1%ジブチルヒドロキシトルエンと1%酢酸アンモニウム溶液含有のtert-ブチルメチルエーテル：メタノール1:1溶液を用いて不ケン化物を溶解させ、0.20μmのメンブレンフィルターでろ過したものを高速液体クロマトグラフ(SHIMADZU Nexera X2)にてカロテノイドを測定した。カラムはYMC Carotenoid(ワイエムシィ)内径4.6×長さ250mmを使用し、移動相A液にはtert-ブチルメチルエーテル：アセトニトリル=(85:15, v/v) B液にはメタノールを用いた。グラジエントの条件は0分B液98%、25分B液91%、26分98%、46分stopとした。流速は1mL/分、カラム温度は30℃、試料注入量は20μL、検出波長は450nmでモニタリングした。ゼアキサンチン標準品を吸光度測定用溶液に調製し、分光光度計(UH5300)で吸光度の測定と濃度を算出した。その後、高速液体クロマトグラフ用標準溶液に調整し、1点検量線を作成し定量を行った。定量値は100g生重量当たりの重量mgを求め、5反復の平均値と標準偏差で示した。

2. 4 色調

色彩色差計(CR-400)を用い、「ながさき黄金」1個を縦半分に切断した面を上部、中部、下部の3か所の色彩値L*a*b*を測定し、5反復の平均値とした。

2. 5 ポテトサラダの製造、保存条件

材料は令和5年秋作杵岐産の「ながさき黄金」Mサイズ400g、人参、玉葱、マヨネーズ、砂糖、酢、塩胡椒からポテトサラダを製造した。工程は、「ながさき黄金」、人参、玉葱を電解水で殺菌後、皮をむき、スチームコンベクションで蒸気加熱の後粉碎・調味し、パウチ袋に70g充填しシーラーで密封後、3℃で冷蔵保管した。一般に販売されているパウチ様のポテトサラダの賞味期限は約30日なので、1.5倍となる45日間を保存期間とした。

2. 6 統計処理

測定値は平均値±標準偏差で示した。土壌群内のサイズまたは貯蔵期間の比較は、Tukey-kramer検定を行い、統計的有意水準はp<0.05とした。

3. 結果及び考察

3. 1 土壌群別およびサイズ別による「ながさき黄金」に含まれるゼアキサンチン含量の比較

令和6年春作産における土壌群別及びサイズ別による「ながさき黄金」に含まれるゼアキサンチン含量を図1に示す。土壌群内において、ゼアキサンチン含量はサイズが小さくなるほど高くなる傾向にあり、低地水田土の壱岐産はSとL間で、また暗赤色土の南島原産はSと2L間で有意な差は見られたが、ほか2土壌群の暗赤色土の諫早産と赤黄色土の西海産では有意な差は見られなかった。なお、2Lサイズに含まれるゼアキサンチン含量は、個体差によるばらつきが大きいことが確認された。

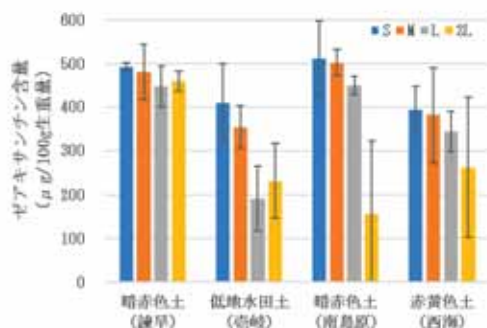


図1 春作バレイショ「ながさき黄金」における土壌群別およびサイズ別ゼアキサンチン含量
注1) 原料は令和6年春作産
注2) 数値は平均値±標準偏差 (n=5)

令和6年秋作産における土壌群別及びサイズ別による「ながさき黄金」に含まれるゼアキサンチン含量を図2に示す。土壌群内は春作同様サイズが小さくなるとゼアキサンチン含量が高くなる傾向はあったが、土壌群内サイズ別、土壌群間サイズ別のそれぞれで有意な差は見られなかった。

なお、秋作に含まれるゼアキサンチン含量は、春作に比べ半分程度であった。

ゼアキサンチンはゼアキサンチンエポキシ化酵素によってアンテラキサンチン、バイオラキサンチンへと変化する^[11]。「ながさき黄金」の親系統にあたる品種「インカのめざめ」では、2℃または6℃の12か月間の貯蔵において、ゼアキサンチン含量が減少しアンテラキサンチン含量が増加することが報告されており^[12]、秋作の気象条件では、酵素反応が進みゼアキサンチンが分解され、含量が減少している可能性が考えられた。

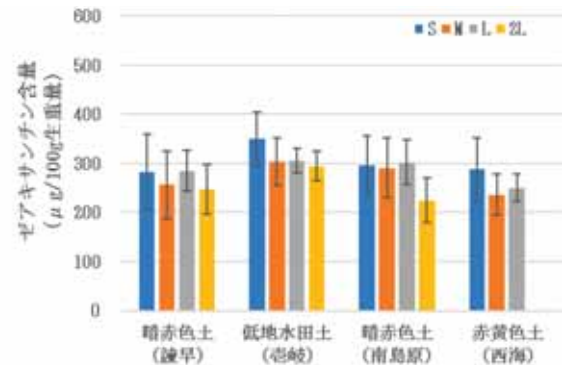


図2 秋作バレイショ「ながさき黄金」における土壌群別およびサイズ別ゼアキサンチン含量
注1) 原料は令和6年秋作産
注2) 数値は平均値±標準偏差 (n=5)

3. 2 冷蔵貯蔵における「ながさき黄金」に含まれるゼアキサンチン含量推移

令和6年春作産の冷蔵貯蔵における土壌群別「ながさき黄金」に含まれるゼアキサンチン含量を図3に示す。貯蔵開始180日目では、低地水田土の壱岐産を除く3土壌群内において、有意な差は確認されなかった。

冷蔵貯蔵中の成分変化である低温糖化はバレイショ特有の現象であり、「ながさき黄金」の親系統品種である「インカのめざめ」は2℃で90日間貯蔵すると全糖含量が貯蔵開始時と比べ8倍、180日間貯蔵では11倍増加する^[4]。また石黒らによると、「インカのめざめ」のゼアキサンチン含量は180日間の2℃貯蔵では変化は見られず、6℃貯蔵においては4割程減少していると報告されている^[9]。今回は3～4℃180日間貯蔵であり、壱岐産を除く土壌群において、ゼアキサンチン含量の減少は確認されなかった。次年度は経時変化を確認する。

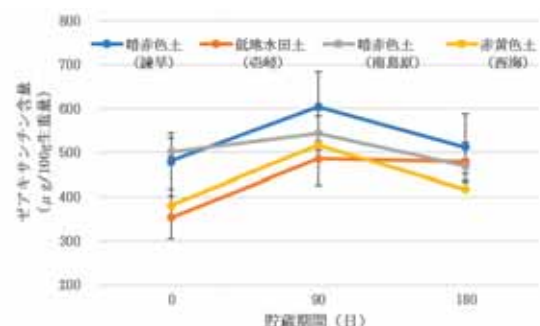


図3 春作バレイショ「ながさき黄金」における冷蔵貯蔵における土壌群別ゼアキサンチン含量
注1) 貯蔵温度は3～4℃、Mサイズを使用
注2) 数値は平均値±標準偏差(n=5)

3. 3 色調とゼアキサンチン含量の関係

色調は、色彩色差計 $L^*a^*b^*$ で表す方法を用いた。春秋作産ともにサイズが小さくなるほど b^* (＋は黄色度を－は青色度を表す)、 L^* (明度を表す) が上昇し、ゼアキサンチン量も同様の傾向となったが、 a^* (＋は赤色度を－は緑色度を表す) に傾向は見られなかった。

春作産と秋作産でゼアキサンチン含量に有意な違いが見られたが、色調にあまり違いは見られなかったため、ゼアキサンチンが代謝されカロテノイド組成が変化した可能性がある。そこで、次年度はゼアキサンチンの代謝物であるアンテラキサンチン含量も測定し、ゼアキサンチン含量とアンテラキサンチン含量を合わせた総カロテノイド含量と色調との相関を検討する。

表1 春作ながさき黄金断面の色彩値とゼアキサンチン含量

土壌別サイズ別		色彩値			ゼアキサンチン量 μg/100g生重量
		L*	a*	b*	
暗赤色（諫早）	S	69.77	0.21	40.75	491.91
	M	67.83	0.07	38.11	480.67
	L	66.36	0.23	37.18	447.44
	2L	63.45	0.48	34.22	459.25
低地水田土（杵岐）	S	70.10	-0.23	37.42	409.61
	M	69.03	-0.21	36.07	353.73
	L	67.38	-0.23	34.91	191.86
	2L	66.20	-0.07	33.75	230.69
暗赤色土（南島原）	S	69.04	0.11	39.06	511.76
	M	67.47	0.19	38.42	502.25
	L	65.59	-0.01	36.07	449.80
	2L	65.01	0.02	35.08	155.40
赤黄色土（西海）	S	71.18	-0.58	38.58	393.73
	M	69.07	-0.25	38.54	381.58
	L	68.69	-0.37	37.32	344.07
	2L	67.50	-0.05	37.94	262.36

表2 秋作ながさき黄金断面の色彩値とゼアキサンチン含量

土壌別サイズ別		色彩値			ゼアキサンチン量 μg/100g生重量
		L*	a*	b*	
暗赤色（諫早）	S	68.30	-0.28	43.55	283.39
	M	66.98	-0.63	42.86	256.81
	L	64.86	0.08	38.66	285.23
	2L	64.61	-0.47	38.07	247.80
低地水田土（杵岐）	S	68.75	0.11	42.07	350.30
	M	68.84	-0.11	44.68	304.02
	L	69.33	0.25	44.08	305.32
	2L	66.25	-0.60	43.01	294.57
暗赤色土（南島原）	S	67.83	-0.05	45.48	295.30
	M	65.99	-0.47	39.48	291.20
	L	66.93	-0.37	42.59	302.45
	2L	67.17	-0.91	41.53	225.00
赤黄色土（西海）	S	69.25	-0.46	43.39	287.74
	M	69.94	-1.04	44.53	236.43
	L	68.51	-0.79	42.30	249.84

3. 4 ポテトサラダの冷蔵保存期間におけるゼアキサンチン含量推移

「ながさき黄金」青果物 100 g に含まれるゼアキサンチン含量は $368.64 \mu\text{g}$ であるが、当日蒸気により加熱し製造したポテトサラダのゼアキサンチン含量は、100 g 当たり $148.84 \mu\text{g}$ と約 60% 減少した。また、ポテトサラダを冷蔵下で 46 日間保存すると含量は減少していた (表3)。廣田らによると、カロテノイドは加熱調理により酸化や分解が起こり、損失されると報告^[13]しており、冷蔵保存によっても損失されることがわかった。ポテトサラダを製造するにあたり、保存期間によっては、機能性表示可能な根拠含量ゼアキサンチン $109.8 \mu\text{g}$ を担保するには、内容量 90 g 以下では担保できない恐れがあることが判明した。

表3 ポテトサラダ冷蔵保存期間のゼアキサンチン含量

保存期間	ゼアキサンチン $\mu\text{g}/100\text{g生重量}$
青果物	368.64
0日	148.84
11日	147.40
20日	130.13
27日	125.73
40日	120.91
46日	132.08

注1) 原料は令和5年秋作M玉 (杵岐産) を用いた

4. 結言

令和6年春作および秋作栽培青果物の土壌群やサイズ、貯蔵、および加工品であるポテトサラダにおけるゼアキサンチン含量を調査し、機能性表示可能な根拠含量である $109.8 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ 生重量が担保できることを確認した。

また、色彩値からゼアキサンチン含量を推定できる相関関係を導くには、総カロテノイド含量の算出が必要なため、次年度より調査を実施する。相関関係が明確になれば、色調が機能性成分含量の簡易指標として活用でき、より簡易に特徴づけが可能になることで商品販売の強みになると考えられる。次年度は、経時変化や総カロテノイド含量の測定などデータの蓄積を行い精査していく。

参考文献

- [1] 坂本、森ほか：カロテノイド高含量バレイショ新品種「ながさき黄金」の育成、長崎県農林技術開発センター研究報告、第9号 55～90、2019
- [2] 田中、宮田ほか：ゼアキサンチンを含有する有色バレイショ「ながさき黄金」摂取が眼の疲労感と睡眠の質に及ぼす影響-ランダム化二重盲検プラセボ対照並行群間比較試験-、応用薬理、第108巻第1/2号、pp33-42, 2025
- [3] 橋本：機能性表示食品におけるルテインとゼアキサンチンの科学的根拠、ファルマシア、Vol. 52, No. 6, pp. 534-538, 2016.
- [4] 遠藤ほか：生食用ジャガイモ品種の低温貯蔵による糖含量の増加特性、日本食品化学工学会、62, pp50-55, 2015.
- [5] 大羽：貯蔵、切断および加熱調理に伴うジャガイモのビタミンC含量の変化、日本家政学会、Vol. 39, No. 10, 1051-1057, 1988.
- [6] 小宮山ほか：ジャガイモのデンプン含量が調理特性に及ぼす影響、日本調理科学会、Vol. 35, No. 4, pp. 336-342, 2002.
- [7] Rains, T.M., S. Agarwal, K.C. Maki : Antiobesity effects of green tea catechins: a mechanistic review, J Nutr Biochem, 22, 1-7. 2011
- [8] 石垣：お茶の化学成分 味香りと茶樹の栽培、化学と生物、19巻、5号、278-285, 1981.
- [9] 中川：茶のカテキン、茶業研究報告、1970巻、Appendix2号、81-101, 1970.
- [10] 農業・食品産業技術総合研究所果樹研究所：ルテイン、ゼアキサンチン、 β クリプトキサンチン、 α カロテン、 β カロテンを分析対象にした果実野菜類のカロテノイド分析法 pp7-26, 2013
- [11] 大宮ほか：花を彩るカロテノイド その多様性と蓄積制御機構、園芸研、18(4), 335-347, 2019.
- [12] 石黒、遠藤ほか：バレイショ塊茎および茎葉のカロテノイド評価、学会発表
- [13] 廣田ほか：植物性食品のカロテノイド、日本食生活学会誌、Vol18, No3, 11-21, 1997.

位置図



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

長崎県工業技術センター 研究報告 No. 55

令和 6 年度 長崎県工業技術センター 研究報告

発行元 長崎県工業技術センター

〒856-0026 長崎県大村市池田 2 丁目 1 3 0 3 番地 8

電話 0 9 5 7 - 5 2 - 1 1 3 3

ファックス 0 9 5 7 - 5 2 - 1 1 3 6

発行日 令和 7 年 7 月 3 1 日

