

I S S N 0916-6726

令和4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. 52

長崎県工業技術センター

INDUSTRIAL TECHNOLOGY CENTER OF NAGASAKI

目 次

1. サプライチェーン強化を目的とした航空機エンジン部品製造技術の高度化	1
機械加工科	主任研究員 福田 洋平
応用技術部	部 長 瀧内 直祐
機械加工科	主任研究員 梅木 宣明
2. 認知機能の維持・改善に資する、高溶解ヘスペリジン食品の開発	5
食品開発支援センター	主任研究員 中山 久之
食品開発支援センター	専門研究員 宮田 裕次
食品開発支援センター	主任研究員 森 友美
長崎県立大学地域連携センター	特 任 教 授 田中 一成
3. スマート工場実現のための作業工程監視装置の開発	8
機械システム科	科 長 田口 喜祥
4. プラント増設業務における既存設備モデリングシステムの開発	10
機械システム科	主任研究員 小楠 進一
5. 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	13
機械システム科	主任研究員 堀江 貴雄
6. 音源可視化技術の開発	19
機械システム科	主任研究員 久保田 慎一
7. 水素ガスの光学式検知技術の開発	22
電子情報科	主任研究員 田尻 健志
8. 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	27
電子情報科	主任研究員 中川 豪
9. レーザー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

10. 生体組成の非侵襲計測技術の開発	35
電子情報科	研 究 員 下村 義昭
11. マルチスケール概念に基づく膜透過シミュレーションの研究(第2報)	38
工業材料・環境科	専 門 研 究 員 重光 保博
12. 設計パラメータを用いたシミュレーション省力化システムの開発	42
工業材料・環境科	主 任 研 究 員 入江 直樹
13. 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	専 門 研 究 員 三木 伸一
14. 木型と鋳物砂の改善による鋳造品の品質向上	47
機械加工科	主 任 研 究 員 大田 剛大
機械システム科	研 究 員 小笠原 耕太郎
15. 県内食品産業の加工技術高度化に関する研究	52
食品開発支援センター	専 門 研 究 員 玉屋 圭
食品開発支援センター	セ ン ター 長 河村 俊哉
食品開発支援センター	主 任 研 究 員 横山 智栄
食品開発支援センター	研 究 員 三島 朋子

サプライチェーン強化を目的とした航空機エンジン部品製造技術の高度化

機械加工科 主任研究員 福田 洋平
応用技術部 部長 瀧内 直祐
機械加工科 主任研究員 梅木 宣明

本研究は、既に長崎県内で構築されている航空機エンジン部品のサプライチェーンを強化することを目的としている。航空機エンジン部品の製造を行う県内企業からのニーズに基づき、①ブレードの高品位仕上加工技術の開発、および②ブレード形状と加工条件から仕上面品質を予測するシステムの開発に取り組むとともに、宇宙・エネルギー産業への拡大を図りたいという県内企業の要望に応えるため、③超耐熱合金の加工技術開発に取り組む。本報告は①に関連し、工作機械主軸の動的振れが仕上面に及ぼす影響について評価した結果を報告する。

1. 緒言

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

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

本報告は①に関連し、工作機械主軸の動的振れが仕上面に及ぼす影響について評価した結果を報告する。

2. 渦電流式変位計による主軸の2軸振れ測定

2.1 実験方法

アンブ内蔵型渦電流式変位計（ML-06：株式会社電子応用製）を用いて主軸の2軸振れ測定を実施した。実験状況の写真を図1に示す。渦電流式変位計への供給電源はノイズ低減のために9V乾電池を用いた。

平成22年に導入した牧野フライス製作所製のマシニングセンタD500を使用し、工具ホルダは大昭和精機のMEGA13E-105、測定対象は直径12mmのハイスシャンクとした。シャンクの突出し量は43mmとし、インジケータで静的振れを測定した結果、口元1.5 μm 、先端3.0 μm であった。

工具軸方向の測定位置はシャンク先端から約21.5mmとし、シャンクとセンサヘッドの距離は渦電流式変位計の感度が最も高い0.2mmとした。また、渦電流式変位計の変位出力特性は、マシニングセンタのテーブル移動量を基準として機上で取得した。

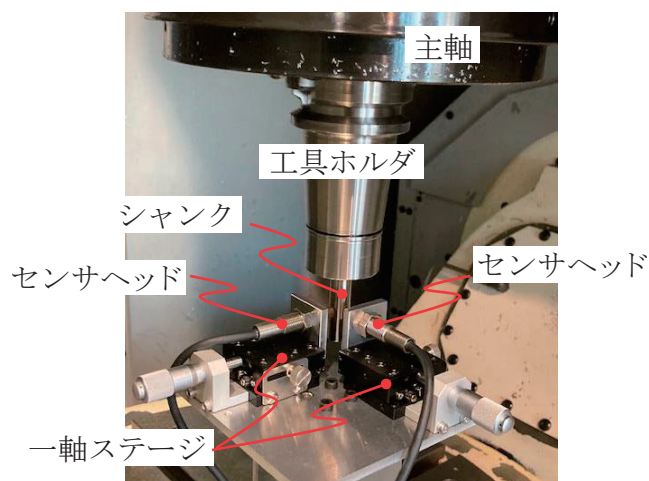
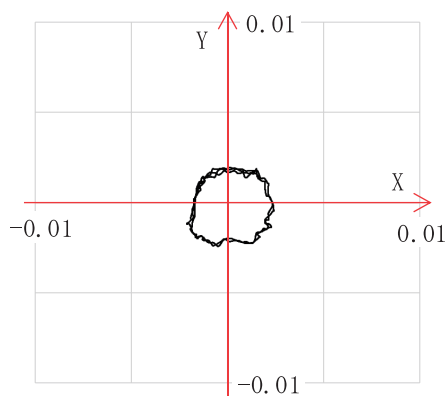


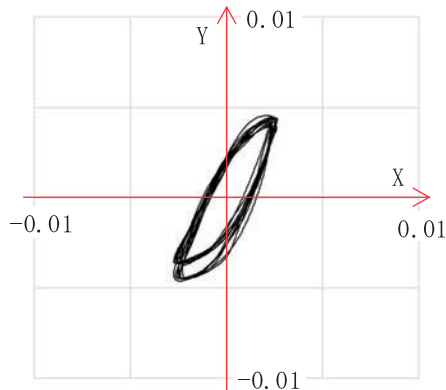
図1 渦電流式変位計による振れ測定

2. 2 実験結果

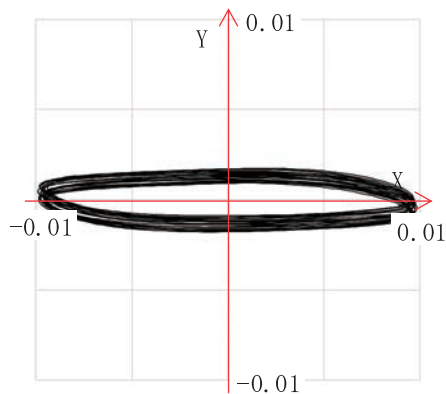
渦電流式変位計によるリサージュ図形を図2に示す。主軸回転数 100 min^{-1} は1.5秒間、主軸回転数 7000 min^{-1} および 11000 min^{-1} は0.15秒間のデータである。主軸回転数 100 min^{-1} は円形に近い結果であったのに対して、 7000 min^{-1} はY軸方向に長軸をもつ楕円形状、 11000 min^{-1} はX軸方向に長軸をもつ楕円形状であった。各回転数におけるX軸方向およびY軸方向の最大値と最小値の差を振幅とし、図3に示す。



(a) 100 min^{-1}

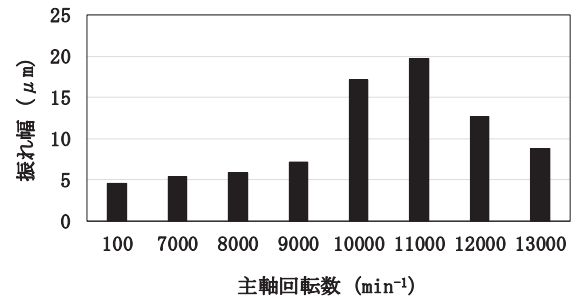


(b) 7000 min^{-1}

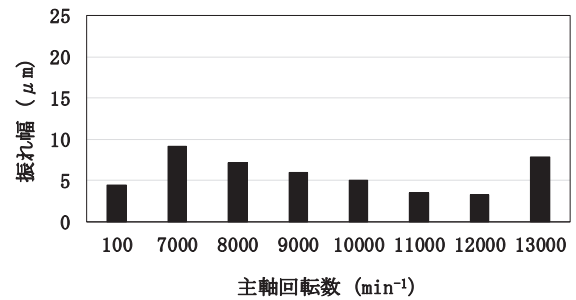


(c) 11000 min^{-1}

図2 渦電流式変位計によるリサージュ図形



(a) X 方向



(b) Y 方向

図3 各回転数における振幅 (渦電流式)

実験前の静的振れ測定結果から測定位置の静的振れは $2.25 \mu\text{m}$ 程度と想定されるが、極低速回転の 100 min^{-1} においても測定結果には約 $4.5 \mu\text{m}$ の振れが測定された。これは渦電流式変位計の変位出力特性が測定対象の金属組織に影響を受けることが原因の一つとして考えられる。

3. 光学式変位計による主軸の振れ測定

3. 1 実験方法

渦電流式変位計の変位出力特性は測定対象の金属組織の影響を受けるとともに、測定点はセンサヘッド近傍領域の比較的広い領域の平均変位となる。そこで、測定点の明確化と測定結果の信頼性向上のため、三角測量方式の光学式変位計 (LK-H022: 株式会社キーエンス製) による主軸の振れ測定を実施した。測定状況の写真を図4に示す。

光学式変位計は金属組織の影響を受けずピンポイントに変位測定ができるが、金属光沢面を測定する場合には表面粗さの影響を受け、測定結果に高周波の外乱を含む。そのため、外乱の影響を低減する適切なローパスフィルタを適用する必要がある。今回はローパスフィルタに相当するフィルタリング処理としてアンプに内蔵された平均化処理を採用した。測定条件を表1に示す。

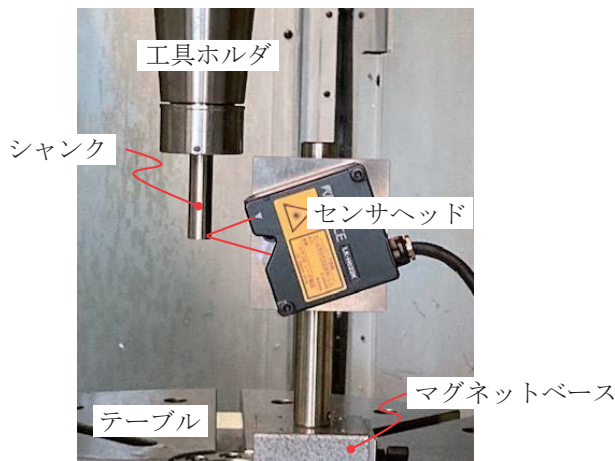


図4 光学式変位計による振れ測定

表1 測定条件

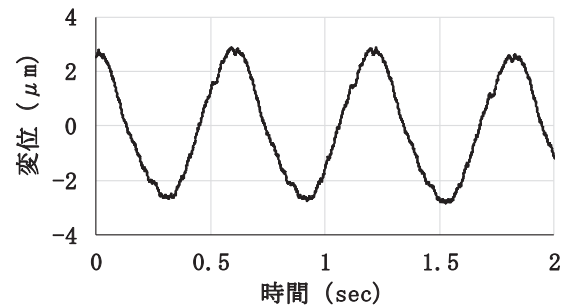
主軸回転数 (min^{-1})	サンプリング速度 (Hz)	平均化処理 (Point)
100	2k	256
7000	200k	
8000		
9000		
10000		
11000		
12000		
13000		

3.2 実験結果

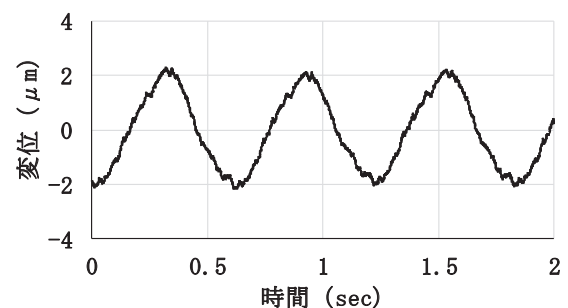
主軸回転数 100 min^{-1} の条件で測定した光学式変位計の変位出力を図5に示す。使用した変位計は一つであり、X方向とY方向測定結果は同期していない。振れの周期毎に規則的に繰り返されている高周波成分は測定面の表面粗さに起因する外乱である。X方向の振れ幅は $5.86 \mu\text{m}$ 、Y方向の振れ幅は $4.47 \mu\text{m}$ であり、主軸を起動した場合、 100 min^{-1} の極低速回転でも、手回しによる静的振れの測定値より大きな振れが刃先に生じることとなった。

各回転数におけるX軸方向およびY軸方向の振れの測定結果を図6に示す。X方向の振れ幅は 11000 min^{-1} において最大となり $34.21 \mu\text{m}$ であった。Y方向の振れ幅は 13000 min^{-1} において最大となり $8.98 \mu\text{m}$ であった。主軸の暖機状態等により振れの状況は一定でないことが想定されるが、光学式変位計と渦電流式変位計による振れの測定結果は同様な傾向であった。

これらの測定結果から、各回転数における主軸の動的振れ特性を把握することは、加工面品質の管理や工作機械主軸の負担軽減に対して重要であることが分かった。

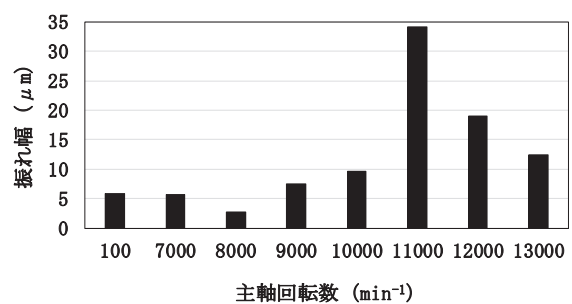


(a) X方向

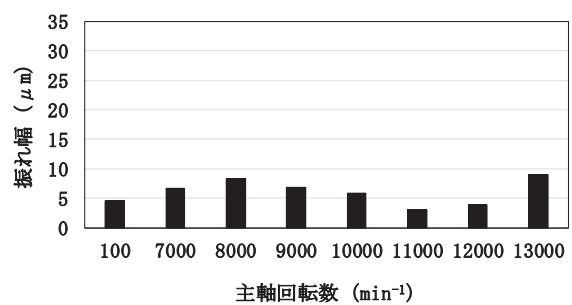


(b) Y方向

図5 光学式変位計による変位出力



(a) X方向



(b) Y方向

図6 各回転数における振れ幅 (光学式)

4. 主軸の振れ特性が表面粗さに及ぼす影響

4. 1 実験方法

主軸の動的振れには異方性があること、また、回転数により振れ方が変化していくことが確認された。これらの特性が加工面の表面粗さに及ぼす影響を確認するために加工実験を実施した。

図7に示すとおり、スクエアエンドミルによる側面加工を45°刻みで実施し加工面の表面粗さを評価した。実験条件を表2に示す。

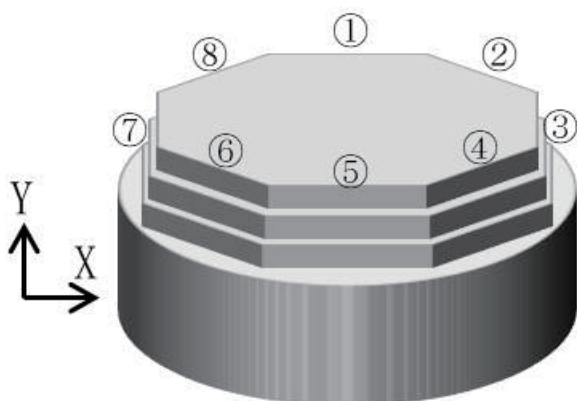


図7 加工実験図

表2 実験条件

工具	三菱マテリアル(株) C-2SS φ6.0 2枚刃
ホルダ	大昭和精機(株) MEGA13E-105
工具突出し	18 mm (先端振れ1.0 μm以内)
被削材	A2014
主軸回転数	7000 min ⁻¹ , 9000 min ⁻¹ , 11000 min ⁻¹
送り量	0.15 mm/tooth
軸方向切込み	5.0 mm
径方向切込み	0.15 mm

4. 2 実験結果

表面粗さの測定結果を図8に示す。各回転数において対向する加工面の表面粗さを比較した場合、同様な傾向になっており、半数の条件でRzの差は0.1 μm以下に抑えられていた。また、X方向とY方向の振れ幅の差が顕著であった11000 min⁻¹の条件において、Rzの最大値と最小値の差が最も大きく現れ、2.89 μmであった。これらの結果により、主軸の動的振れ特性は加工面に影響を及ぼしていると言える。

11000 min⁻¹の条件において、測定位置③もしくは⑦ではなく、④のRzが最大値となったことについては、

主軸のオリエンテーション位置に対する工具切れ刃の取り付け位相が影響していると考えられる。

5軸制御マシニングセンタにおけるブレード加工においては、加工対象のブレード形状と工作機械傾斜軸の方向に合せ、動的振れの異方性と工具切れ刃の取り付け位相を管理することが重要であると考えられる。

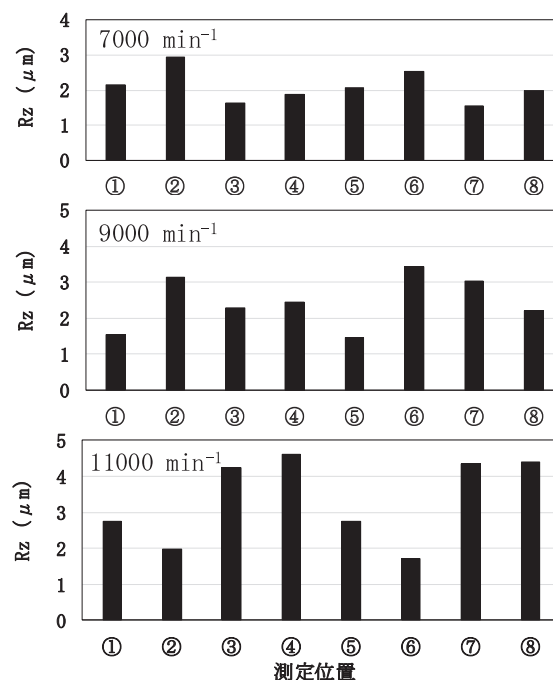


図8 表面粗さ

5. 結言

工作機械主軸の動的振れが仕上面に及ぼす影響について検討し、以下の結果を得た。

- 1) 渦電流式変位計および光学式変位計を用いて、主軸の動的振れ特性（異方性および回転数依存）を評価することができた。
- 2) 主軸の動的振れ特性が加工面に及ぼす影響を確認した。

参考文献

- [1] 福田、瀧内、三木：航空宇宙関連産業の市場獲得に向けた切削加工技術の高度化、長崎県工業技術センター研究報告、No. 49, pp. 1-5, 2020.
- [2] 福田、瀧内、三木：航空宇宙関連産業の市場獲得に向けた切削加工技術の高度化、長崎県工業技術センター研究報告、No. 50, pp. 1-4, 2021.
- [3] 福田、瀧内、三木、小林、荒井、佐藤、水野：航空宇宙関連産業の市場獲得に向けた切削加工技術の高度化、長崎県工業技術センター研究報告、No. 51, pp. 1-5, 2022.

認知機能の維持・改善に資する、高溶解ヘスペリジン食品の開発

食品開発支援センター	主任研究員	中山久之
食品開発支援センター	専門研究員	宮田裕次
食品開発支援センター	主任研究員	森友美
長崎県立大学地域連携センター	特任教授	田中一成

摘果される未熟な青ミカンは大量に廃棄されているが、フラボノイドの一種であるヘスペリジンを豊富に含む。動物実験において、ヘスペリジンの摂取は血流改善機能等を有することが報告されており、健康寿命の延伸に寄与する可能性が示されているが、水への溶解性が低いため、体内への吸収が悪く、食品への展開が困難である。

本研究では、ヘスペリジンの可溶化に関する基盤技術を応用した、ヘスペリジンの高溶解食品素材を開発するとともに、本素材からヘスペリジンを高収率でエキス回収し、粉末化する技術を確認する。さらに、高溶解ヘスペリジン素材を使った、ヒトでの認知機能の維持・改善効果を検証し、機能性表示食品として商品化することを目標とする。本報では、高溶解ヘスペリジン素材の長期摂取が認知機能に及ぼす影響について報告する。

1. 緒言

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

これまでの研究で、ミカン発酵茶の摂取は体内へのヘスペリジン吸収が促進されること、また、冷え、肩のこり、疲労感、睡眠の質といった、不定愁訴を改善する効果があることが明らかになった^[4]。これら改善効果は、ヘスペリジンによる血流改善機能と密接に関連することが推察されている。

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

足によって、脳への血流障害が起こり、認知機能が低下することが報告されていることから^[6]、ヘスペリジンの体内吸収性を高めたミカン発酵茶が、認知機能に対して改善機能を発揮する可能性がある。

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

2. 対象と方法

1) 被験者

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

⑨その他、試験担当医師が被験者として不相当と判断した者とした。被験者には毎日の体調変化、有害事象の有無、表1に示す被験食品摂取の有無および医薬品等服用の有無を、試験開始から終了まで、被験者日誌に記載させた。

表1 被験食品の詳細

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

x — : 配合していない

2) 試験デザイン

試験はランダム化二重盲検プラセボ対照並行群間比較試験で実施した。本試験に先立ち、認知機能スコアを評価するJapanese version of Montreal Cognitive Assessment (MoCA-J)を実施し、年齢、MoCA-Jスコアを考慮して、被験者を試験食品群22名とプラセボ食品群21名に割り付けた。被験者の背景を表2に示す。群分け後の試験対象からの辞退者およびデータの欠損した者はいなかった。被験者には、試験食品あるいはプラセボ食品1日1包を湯あるいは水に混ぜて夕食時に12週間摂取させるとともに、試験食品あるいはプラセボ食品を摂取することを除いて、それまでの日常生活を変えないように指導した。摂取開始日、摂取6週後および12週後の計3回、Trail Making Test 日本版(TMT-J)検査を実施し、併せて被験者に対して有害事象の確認を行った。

表2 被験者の背景

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

年齢：平均値±標準偏差

MoCA-J：平均値±標準誤差

3. 結果

TMT-Jは、紙にランダムに書かれた1~26の数字を順番通りにできるだけ早く正確に線で結んでいく検査

方法で、被験者にはTMT-Jの課題遂行中は紙を動かさないこと、鉛筆を紙から離さないことを指示し、課題遂行時間、間違った回数(誤反応回数)および紙から鉛筆を離した回数(鉛筆離し回数)を記録した。TMT-Jの課題遂行時間を図1に示す。摂取6週後および12週後の課題遂行時間を摂取開始日(0週)に対する変化量で算出したところ、摂取12週後で試験食品群はプラセボ食品群より有意に低値を示した。

誤反応回数に関しては、有意な変動および各測定時における群間での差は認められなかった(表3)。鉛筆離し回数については、プラセボ食品群および試験食品群とも経時的に減少する傾向にあったが、0週との間に差はなかった。また、いずれの測定時に関しても群間で差は認められなかった(表4)。

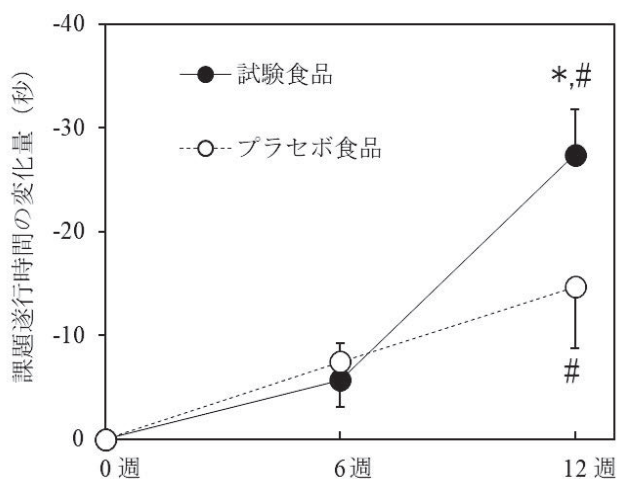


図1 課題遂行時間(変化量)の推移

平均値±標準誤差

* $p < 0.05$ (プラセボ食品と比較して有意差あり)

$p < 0.05$ (0週と比較して有意差あり)

表3 誤反応回数の推移(単位:回)

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

平均値±標準誤差

表4 鉛筆離し回数の推移(単位:回)

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

平均値±標準誤差

4. 考察

本試験では、認知機能の衰えを自覚している中高齢者を対象に、ミカン発酵茶の摂取が認知機能に及ぼす影響について検討した。

TMT-J は、幅広い注意、空間的探索、処理速度、衝動性などを総合的に測定でき、とりわけ注意力や作業記憶の評価に特化した検査である^[7]。試験食品の摂取で、TMT-J の課題遂行時間が摂取 12 週後に短縮したことから、ミカン発酵茶の長期摂取は認知機能の一部である注意力と作業記憶を改善することが明らかとなった。

血流量が慢性的に低下すると、脳内炎症が起こること、また、脳内の神経軸索と髄鞘が密集している白質部分が傷害を受け、認知機能が低下することが報告されている^[8]。ヘスペリジンの血流改善機能については複数の報告例があるため、ミカン発酵茶に含まれるヘスペリジンが注意力や作業記憶の改善に重要な役割を果たしていると推察している。現在、神経伝達の重要物質であるアセチルコリンに対して、ヘスペリジンが及ぼす影響を検証中である。

5. 結言

認知機能の衰えを自覚している中高齢者を対象に、ミカン発酵茶の摂取が認知機能に及ぼす影響について検討した。

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

参考文献

- [1] Jung UJ, Lee MK, Park YB, Kang MA, Choi MS: Effect of citrus flavonoids on lipid metabolism and glucose-regulating enzyme mRNA levels in type-2 diabetic mice, *Int J Biochem Cell Biol*, 38, pp. 1400-1403, 2006.
- [2] Yamada M, Tanabe F, Arai N, Mitsuzumi H, Miwa Y, Kubota M, et al: Bioavailability of glucosyl hesperidin in rats, *Biosci Biotechnol Biochem*, 70, pp. 1386-1394, 2006.
- [3] 中山、田中、宮田、齋藤、松井、荒牧ほか: ミカン未熟果と緑茶三番茶葉を混合して製造した可溶性ヘスペリジン含有発酵茶の開発、*日本栄養・食糧学会誌*, 67, pp. 95-103, 2014.
- [4] 中山、宮田、藤井、山本、大曲、吉野ほか: 未熟ミカンと茶葉を混合揉捻して製造した発酵茶葉由来ヘスペリジン摂取が冷え、肩のこり、疲労感および睡眠の質に及ぼす影響、*薬理と治療*, 47, pp. 1471-1481, 2019.
- [5] 総務省統計局、高齢者の人口、<https://www.stat.go.jp/data/topics/topi1291.html>, Accessed 2022.
- [6] Franceschi M, Alberoni M, Bressi S, Canal N, Comi G, Fazio F, et al: Correlations between cognitive impairment, middle cerebral artery flow velocity and cortical glucose metabolism in the early phase of Alzheimer's disease, *Dementia*, 6, pp. 32-38, 1995.
- [7] 広田、渡辺、谷本、河野、樋口、河野: 地域高齢者を対象とした Trail Making Test の意義、*日老医誌*, 45, pp. 647-654, 2008.
- [8] Miyanojara J, Kakae M, Nagayasu K, Nakagawa T, Mori Y, Arai K, et al: TRPM2 channel aggravates CNS inflammation and cognitive impairment via activation of microglia in chronic cerebral hypoperfusion, *J Neurosci*, 38, pp. 3520-3533, 2018.
- [9] Gao G, Nakamura S, Asaba S, Miyata Y, Nakayama H, Matsui T: Hesperidin Preferentially Stimulates Transient Receptor Potential Vanilloid 1, Leading to NO Production and Mas Receptor Expression in Human Umbilical Vein Endothelial Cell, *J Agric Food Chem*, 36, pp. 11390-11300, 2022.

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)

機械システム科 科 長 田 口 喜 祥

近年、製造現場で生産効率を上げるために DX(Digital Transformation)の推進が求められている。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を行うことが期待されている。また、近年では IoT 技術により収集したデータを AI(Artificial Intelligence) 技術で解析することで、故障の予兆検知なども行われるようになってきている。

そこで、本研究開発では、DX を推進するため、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、作業の進捗状態を解析し監視する装置を開発することを目的とする。

1. 緒言

近年、製造現場で生産効率を上げるために DX(Digital Transformation) の推進が求められている。特に、生産設備の稼働状況の監視、生産数及び生産に要した時間を IoT(Internet of Things) 技術を用いて監視し、デジタルデータとして記録することにより、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改善などが期待される。また、近年 AI(Artificial Intelligence) を用いた研究が注目されており、製造現場への応用が数多く報告されている。IoT 技術により収集したデータを AI 技術で解析して活用することが、製造業での DX 推進につながると期待されている^[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、製造がどの工程まで進んでいるかに関するデータを収集したいとの要望がある。作業工程の監視を IoT や AI 技術を用いて実施可能となれば、工程を自動的に監視可能なスマート工場を構築でき、製造業の DX 化支援につながると考えられる。

そこで、本研究開発では、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、作業工程の進捗状態や生産に用いられた装置の稼働状態を解析し、監視する装置を開発することを目的とする。CNC 工作機械などはこれまでの研究開発でパトライトや電流の監視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手持ち電動工具や小型機械装置の稼働状況は、数が多いことに加えて使用する場所が一定しておらず測定が難しかった。本研究では作業者が直接使用する小型機械装置を対象として、電流波形の特徴から対象を認識し、稼働状況を取得する装置を開発し、作業工程の監視を行うことを目標とする。

令和4年度は作業工程監視のために必要となる、電流波形の特徴から稼働している機械装置を推定する装置(以下、監視モジュールと呼ぶ)を開発するために必要なデータ収集を行った。

2. システム構成

開発する作業工程監視装置の構成を図1に示す。作業工程を監視するためには、どのような機械装置が稼働中であるか認識し、自動的に記録する必要がある。これまでの研究でCNC工作機械の稼働監視は可能となっているが、仕上げ作業などで用いられる電動工具の稼働状況は、数が多く使用する場所が変わる場合があるため監視することが難しかった。そこで、本研究では、機械装置に流れ込む電流の特徴を基に、稼働している機械装置を認識し監視する装置を開発する。

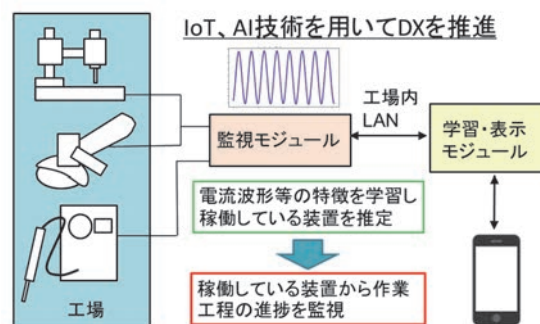


図1 システム構成

令和4年度は、電流波形の特徴から稼働している機械装置を推定する AI を開発するために、テーブルタップを流れる電流と機械装置に流れ込む電流を自動収集する IoT 装置を製作した。

3. データセット収集システム

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には、稼働している機械装置ごとの電流波形から稼働している機械装置を推定する機能が求められる。このような機能を有した AI を開発するためには、機械装置ごとの電流データを収集する必要がある。そのため、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た。また、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名と共にサーバ PC に記録し、AI 学習用のデータセットを作成するためのデータセット収集システムを構築した。構築したシステムの構成を図 2 に示す。

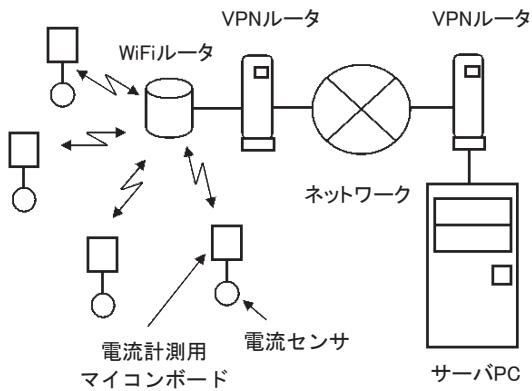


図2 データセット収集システム

データセット収集システムは、離れた工場間での利用を想定し、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環境を構築できるメッシュWiFiを用いた構成とした。今回使用したVPNルータはBUFFALO製VR-S1000、メッシュWiFiルータはTPLink製DECO X95である。システムで収集した電流データの例を図3に示す。この例は、約25kHzのサンプリング速度で2048個の電流データを取得し、サーバPC(Windows 10)で収集した結果であり、使用する装置ごとに電流波形が違っていることが確認できる。製作した4台の電流計測用マイコンボードを用いて、テーブルタップ本体の電流1か所と、そのテーブルタップに接続されている機器の電流3か所を収集した。安定してデータを収集できることを確認するために連続して30日間電流データを収集する予備実験を実施し、データセット作成のための電流データを収集できることを確認した。

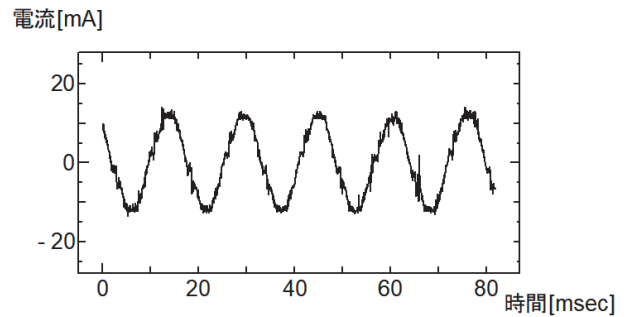
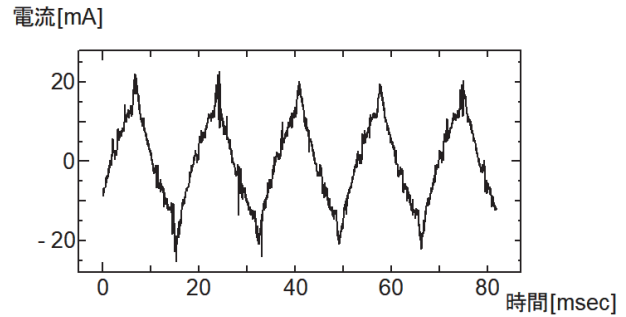


図3 収集した電流データの例

4. 結言

工場内で稼働している機械装置を推定し、作業工程の進捗状態を解析し監視する装置を開発するために、機械装置ごとの電流波形を収集するデータセット収集システムを構築した。

今後、収集したデータセットを用いて、AIを学習し電流波形の特徴から機械装置を認識し、機械装置ごとの稼働状況を基に作業工程の進捗を解析・監視する装置を完成させたい。

参考文献

- [1] 成瀬: AI活用が期待される工場のIoT化、日本総研経済 Research Focus No. 2019-032, pp. 1-7, 2019. 11.
- [2] 小川、永井: IoT等の進展が与える情報システムへの影響に関する研究、産業経済研究所紀要、第27号、pp. 27-88, 2017. 7.
- [3] 田口: 無線ネットワークを用いた振動監視装置の開発、長崎県工業技術センター研究報告、No. 48, pp. 5-10, 2019.
- [4] 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、No. 51, pp. 10-15, 2022.

プラント増設業務における既存設備モデリングシステムの開発

機械システム科 主任研究員 小 楠 進 一

県内増設業者は、プラントの詳細図面を受け取れないことがある。そのため、スケールやノギス等を用いて既存プラント設備を測定した結果をもとにプラントの詳細図面を作成し、プラントの増設品を設計することが多い。そのような現状から、省力化に向けて、自動的に既存プラント設備をモデリングするシステムが必要となるが、市販されている自動的に既存プラント設備をモデリングするシステムは、問題点を抱えており、県内では普及していない。そこで、令和3年度は、Mixed Reality デバイスの「ホログラムの配置に使用するセンサ」を利用し、移動計測式自動モデリングシステムを試作したところ、取得できる測定点の点間距離が大きく、測定誤差も大きいことが分かった。令和4年度は、センサを Mixed Reality デバイスから KinectV2 センサにかえて、移動式計測式自動モデリングシステムを試作した。本報では、試作した移動計測式自動モデリングシステムの評価結果について報告する。

1. 緒言

長崎県では、プラントの増設業務が多い。増設を行う場合には既存プラントの詳細図面が必要となるが、増設業者は、プラントの詳細図面を受け取れないケースがある。このとき、県内増設業者は、スケールやノギス等で既存プラント設備の寸法を測定し、この結果をもとにプラントの詳細図面を作成し、プラントの増設品を設計している。

こういった現状から、省力化に向けて、自動的に既存プラント設備をモデリングするシステムが必要となるが、一般的に販売されているモデリングシステムは、(a)高価であること、(b)不安定な場所では測定器の設置が困難であること、(c)死角(障害物)が多い測定では何度も測定器の設置位置を変える必要が生じるためにとっても手間が生じることなどの問題点を抱えており、県内企業に普及していない。

そこで、本研究では、安価な移動計測式自動モデリングシステムの開発を進めている。令和3年度は、プラントや建築現場で利用されつつある Mixed Reality デバイスにおいてホログラムの配置に使用するセンサを活用し、移動式計測を特徴とする自動モデリングシステムを試作した^[1]。この結果、取得できる測定点の点間距離が大きく、測定誤差も大きいことがわかった。令和4年度は、センサを Mixed Reality デバイスから KinectV2 センサにかえて、移動計測式自動モデリングシステムを試作した。本報では、試作した移動計測式自動モデリングシステムの評価結果について報告する。

2. 移動計測式自動モデリングシステム

試作した移動計測式自動モデリングシステムを図1に示し、このシステムを制御するために試作した制御ソフトウェアのフローチャートを図2に示す。

試作した移動計測式自動モデリングシステムは、Microsoft製KinectV2センサを用いて、水平視野角70度、垂直視野角60度、奥行き0.5 m～4.5 mの範囲にある測定対象物の形状を30 fpsで取得し、制御ソフトウェアを用いて取得した形状を合成・表示していくシステムである。

また、試作した制御ソフトウェアは、Kinect for Windows SDK 2.0^[2]や PCL^[3]を用いており、最初に、KinectV2 センサ、色データや深度データ、ボクセルデータ、ビューアの初期化を行い、コールバック関数の登録を行う。次に、KinectV2 センサで取得したデータをもとに色データや深度データを更新し、この色データや深度データをもとにボクセルデータを更新し、ボクセルデータをもとにメッシュデータを算出し、このメッシュデータをもとにビューアを更新することを繰り返し、1ショットで得た形状を合成していく。



図1 試作した移動計測式自動モデリングシステム

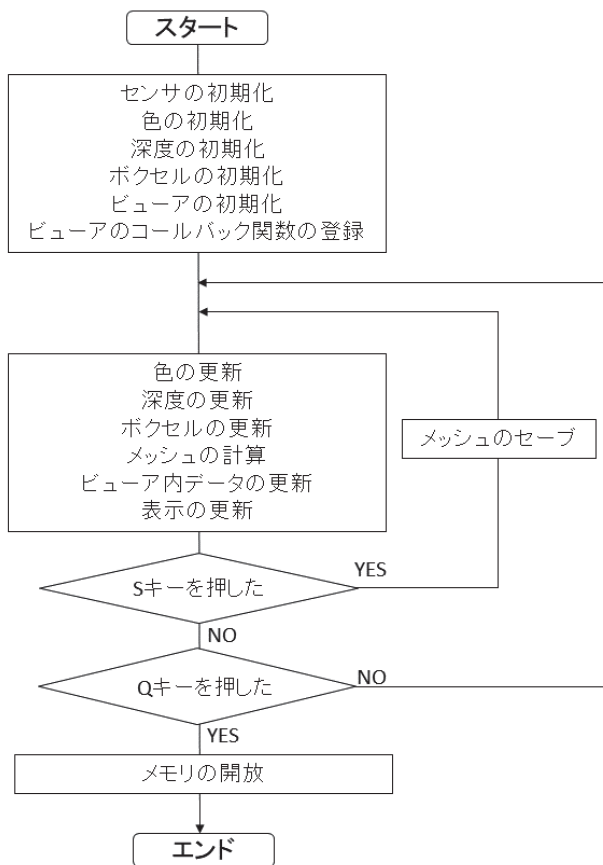


図2 試作した制御ソフトウェアのフローチャート

3. 評価方法

図3を用いて評価方法を説明する。壁の中央、壁からの距離1,500 mm、2,500 mm、3,500 mm、高さ1,300 mmの位置にKinectV2センサを配置し、図3のKinectV2センサの視線の軌跡に沿って、測定対象物（ロッカーや机、幅7,000 mm×高さ2,590 mmの壁）を測定した際に、モデリングが可能であるか評価を行った。

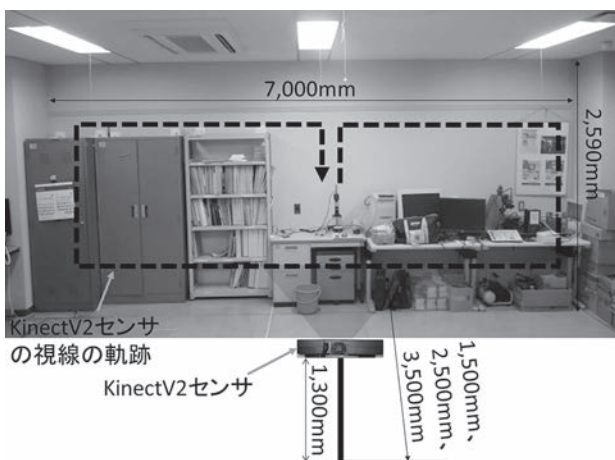


図3 評価方法

4. 評価結果と考察

試作したシステムを用いて、異なった測定距離からモデリングした結果を図4から図6に示す。結果をみると、試作したシステムを用いて、測定対象とした備品や壁をモデリングすることが可能であると確認できる。しかし、3,500 mm、2,500 mm、1,500 mmと壁にセンサを近づけると、図7に示すとおり、生成したモデルが歪んだり、測定データが欠落することが頻繁に生じ、モデリングに不安定さが残った。これは、壁との距離3,500 mmの場合、1ショットで幅4,900 mm×高さ4,041 mmの範囲の形状を取得するのに対し、壁との距離1,500 mmの場合、1ショットで幅2,100 mm×高さ1,732 mmの範囲の形状を取得するため、形状合成を行う数が増加して、歪みが累積するためである。この問題点については、モデルの補正などで今後改善していきたい。



図4 距離3.5 m



図5 距離2.5 m



図6 距離1.5 m



図7 歪んだモデル

5. 結言

試作した移動計測式自動モデリングシステムを評価した結果、幅 7,000 mm×高さ 2,590 mm の範囲をモデリングできることが分かった。しかし、試作した移動計測式自動モデリングシステムに不安定さが残るため、モデルの補正などを検討し、今後解決していくことにする。

参考文献

- [1] 小楠進一：プラント増設業務における既存設備モデリングシステムの開発、長崎県工業技術センター研究報告書、No. 51, pp. 16-17, 2022
- [2] <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/apps/design/devices/kinect-for-windows>, Accessed 2022.
- [3] <https://pointclouds.org/>, Accessed 2022.

ディープラーニングを活用したロボット制御における安定性向上の研究

機械システム科 主任研究員 堀江 貴雄

近年、ディープラーニングの活用は画像判別などにとどまらず、ロボット制御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。そのために、今年度は実験用のアーム試作と、模倣学習用のデータセット設計、同時制御用ネットワークの設計と学習を行った。さらに実機によるエレベータ移動実験を行うことで、基本的なシステム構築手法の有効性を確認した。

1. 緒言

近年ではディープラーニングによる画像判別や機械制御の事例も多く報告されるようになった。

これまでの研究において、筆者はNeural Network Console (ソニー社製) [1] を用いたディープラーニングの設計と学習、実装方法を確立した[2]。さらにカラー画像、距離画像、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実現し移動ロボットに実装した[3][4]。同時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を利用して、一定の閾値によって道環境を検出して強制停止させる手法も確立した。

本稿では、これに加えてエレベータを用いたフロア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の設計を行う。学習したネットワークの効果を実機による実験によって確認する。

2. アーム搭載メカナムロボット

2.1 ハンドアイシステム

カメラをハンド先端に取り付け、ビジュアルフィードバックによりロボットアームを制御するハンドアイシステムを、本研究ではエレベータボタンの操作のために用いる。試作したシステムを図1に示す。

使用するカメラにはintel社RealSenseD435を選定した。D435は後述するメカナム台車に搭載のD455よりもDepth画像の最小測定距離が小さく、ハンド先端とエレベータボタン間の距離情報を取得しようとしたとき、アーム先端への実装に有利である。

ロボットアームの自由度はボタン操作に必要な押し込み動作ができれば十分と考え、4自由度とした。この構造ではエレベータボタンに対するロボットアーム基軸の位置によって、エレベータボタン面法線に平行な動作ができない。しかし実際にはボタン面に対して斜め方向の押し込みでも操作に問題はないと考えた。

アーム長さは工業技術センターのエレベータ操作ボタンに届くように上腕部、下腕部とも250mmとし、手先部はD435測定レンジを考慮し280mmとした。

D435で取得した映像を見ながら後述するゲームパッドを操作し、アーム先端座標系でUp down, RL, Push, Pitch動作を指示可能である。なお、アーム先端座標系目標座標からの逆運動学計算は解析的に求め実装した。

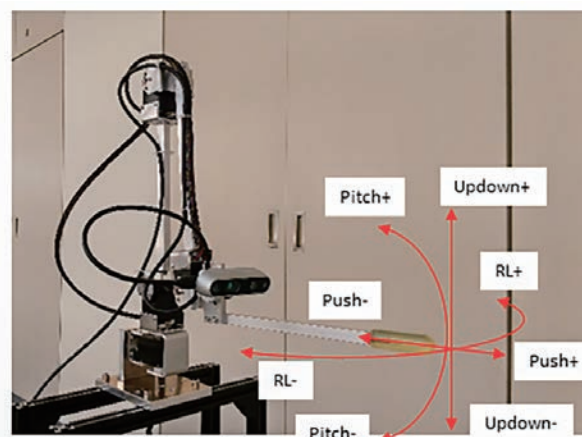


図1 ハンドアイシステム

2.2 メカナム台車

図2に試作したメカナム台車を示す。台車には4つのモータが取り付けられており各モータにメカナムホイールが取り付けられている。各モータの回転方向および速度を調整することで全方向への移動が可能と

なっている。またフロントモータはサブフレームに取り付けられており、このサブフレームはroll軸周りに回転するジョイントを介して本体フレームと結合されている。これにより路面の凹凸を吸収し、4つの車輪が設置することでスムーズな全方向移動が可能となっている。

ゲームパッドを使用しSpeed, Direction, Rotationの各パラメータを指示すると適切な各モータ回転数を決定し、台車を移動可能とするプログラムを実装した。

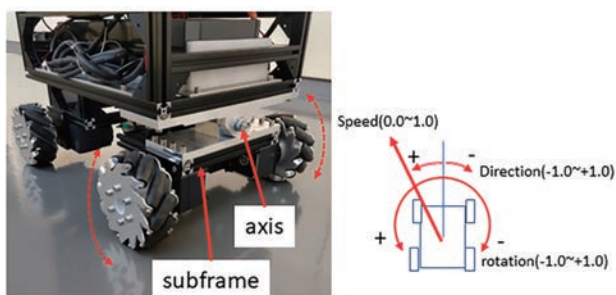


図2 メカナム駆動部

2.1のハンドアイシステムをエレベータ操作ボタンの取り付け高さにあわせて設置するために、このメカナム台車の上にフレームを追加し、アーム基部を固定した(図3)。

車両制御用のカラー画像、深度画像撮影用にIntel製RealSenseD455センサ、磁気センサとしてWitMotion製HWT905、モータ同期制御用のマイコンボードにArduino Uno、ニューラルネット推論および制御プログラム実行用にITX規格のPCを搭載した。

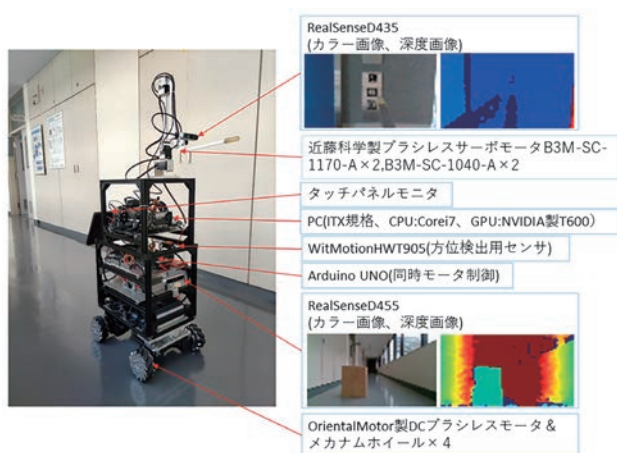


図3 アーム搭載メカナムロボット

2.3 ゲームパッド操作系

台車とアームの協調動作を手動操作で行い、データセットを生成するため、ゲームパッドを使用する。使用するゲームパッドを図4に示す。使用するゲームパッドには多数のボタンが用意されており、特に2つのスティックは操作性の観点から有用であるが、台車とアームを同時制御するには自由度が足りない。

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



図4 ゲームパッド

表1 ゲームパッド入力と制御パラメータの割り当て関係

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

3. ネットワーク設計

3.1 データセット

ロボットアームとメカナム台車の同時制御を実現す

るために、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ために、データセットを設計した(表2)。

表2 車両、アーム同時制御用データセット

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

なお、この5時刻分のデータセットを生成時、本ロボットシステムの制御周期は160msであるが、過去時刻分データの保持は2秒おきとしている。したがって、最新時刻データとひとつ前のデータの時間間隔は0秒から2秒の間でばらついており、過去時刻4つ分の間隔は2秒固定となる。

3.2 ネットワーク設計

筆者はこれまでの研究^[2-4]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。

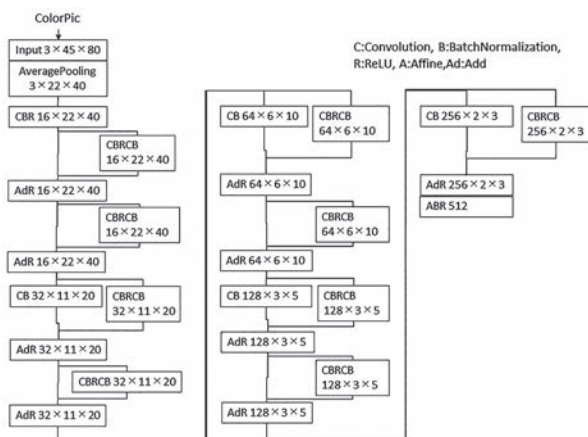


図5 PicConvUnit(カラー画像特徴抽出用)

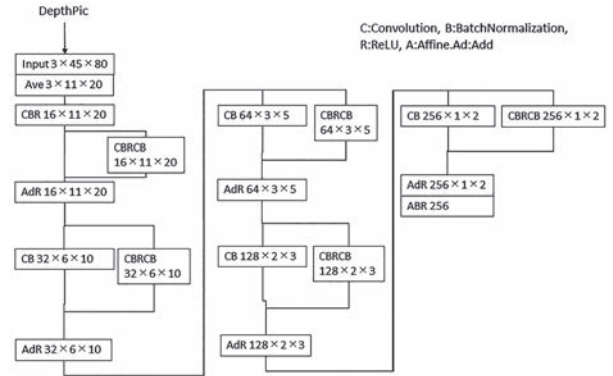


図6 DepthPicConvUnit(深度画像特徴抽出用)

このネットワークでは、カラー画像を入力すると、ResNet^[5]ブロックで構成されたユニット(以後 PicConv Unit とする)で計算し、深度画像は ResNet ブロック5つを用いた、より小規模のユニット(以後 DepthPic ConvUnit)で計算を行う(図5、6)。

これらユニットの計算結果を RNN^[6]ブロックで集約したのち、次時刻の RNN ブロックに送る処理を時刻データごとに繰り返す。5時刻分を処理したのちに、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する。

このネットワーク設計をベースとして、アーム制御パラメータを推定するために、車両制御推定用のネットワークと同じ設計のネットワーク構造を追加した。

アーム側ネットワークの入力値は車両パラメータと同様に、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車両制御用ネットワークと同じ設計の PicConv Unit、深度画像には DepthPicConvUnit を用いた。

また、未学習環境における安全停止機能のために、昨年度までに開発した PTDAutoencoder^[4]も追加した。これは D455 のカラー画像から深度画像を生成する Autoencoder であり、生成した推定深度画像と D455 センサで取得した深度画像の誤差を評価して未学習環境を検知し自動停止に用いる。

これら PicConvUnit, DepthPicConvUnit, PTDAutoencoder を適用して設計した車両、アームの統合学習用ネットワークを図7に示す。

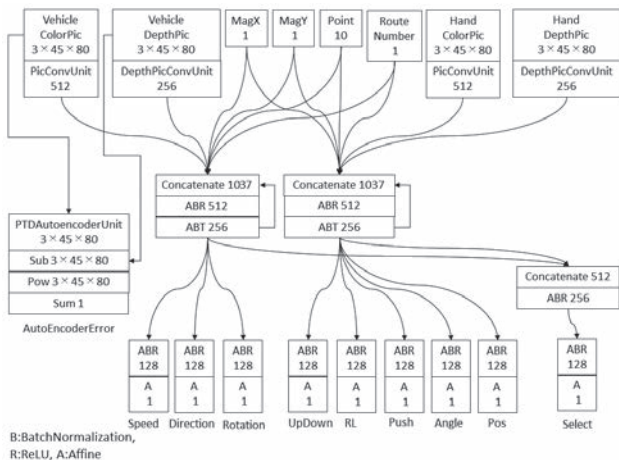


図7 統合ニューラルネットワーク

4. 実験とネットワークの改良

4.1 データセット収集

工業技術センター屋内6地点に0~5の番号を割り振り、ゲームパッドの手动操作によって各地点から他の地点への移動を網羅的に行い、データセットを収集する。地点0は2階の事務室中央、1、2は2階西棟の廊下の壁側、3は2階東棟廊下の壁側、4は3階廊下の壁側、5は1階ロビーに設定した。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。地点番号の位置関係を図8に示す。

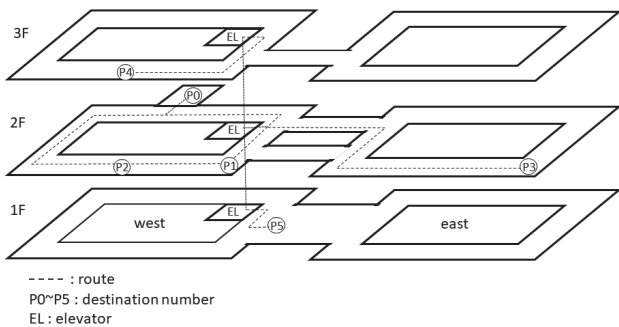


図8 地点番号と移動経路

各地点を往復する操縦データセットを合計22万個(約9時間40分に相当)収集したのち、100 epoch 学習後、Pythonコードに変換し、サーバーに実装した。このニューラルネットを用いて、走行実験を実施した結果、車両移動制御とアームのボタン操作制御は良好だったものの、車両、アームの制御切り替え推定と、アーム基本姿勢の推定の精度が不十分であることが判明した。精度向上のため、ネットワークの改良とデータ収集方法の見直しをおこなった。

4.2 ネットワークおよびデータ収集手法の改良

当初設計したネットワーク(図7)では、車両、アーム切り替え推定は、車両側のRNNブロック出力とアーム側RNNブロック出力をconcatenateで結合後、推定していた。またハンドの基本姿勢は5時刻分のアームカラー画像、アーム深度画像、磁気センサ値、目標地点番号、ルート選択番号からRNNブロックを経由し、推定していた。

車両側RNN、アーム側RNNでは各制御パラメータ推定用の情報抽出も担っていることから、これらの情報を共用して推定を行うのは難しいと考え、アーム基本姿勢推定と車両、アーム制御切り替え判定に特化した新たなRNNブロックを追加した。

各時刻の車両側PicConvUnitとDepthPicConvUnit、アーム側PicConvUnitとDepthPicConvUnitの各出力を車両側とアーム側で個別のRNNブロックに入力し、それぞれが各時刻に出力を伝え、5時刻分を処理後にConcatenateで結合し、全結合層を介してアーム基本姿勢と車両、アーム制御切り替え判定を行う設計とした(図9)。

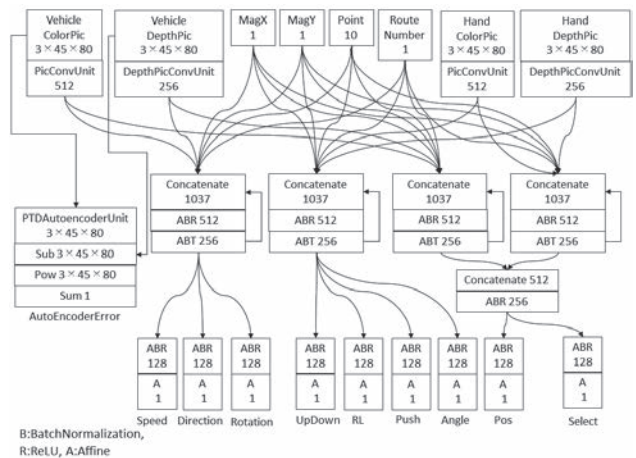


図9 改良版統合ネットワーク

データセットの見直しでは、特に誤動作の多い、エレベータ乗り込み後のアーム基本姿勢変更動作前後のデータを解析した。エレベータに乗り込んで扉が閉まった後、基本姿勢を左90度に変更することが正しいが、その教師データの1~2秒前に、正面姿勢を取り続ける教師データがあることが判明した。

プログラムコードを見直したところ、ゲームパッドによるデータセット記録時に、アーム切り替えボタンを押した瞬間からデータ記録するため、姿勢変更ボタンを押す前の無操作状態が不必要に記録されているこ

とが判明した。これによって、アーム基本姿勢変換前の無操作状態をニューラルネットが学習してしまっていることが分かった。

ゲームパッドの右トリガーボタン操作（アーム制御選択）かつ、左右レバーまたは左右ショルダーボタン（アーム操作量）ならび左十字キー（姿勢変更）の操作が発生したときのみデータを保存するようにプログラムを修正した。

4.3 走行試験

これら対策後にさらにデータセットを3万個（約1時間20分相当）追加収集し、学習させた結果、エレベータ移動を含む全ルートでの移動が可能であることを確認した。

地点0から地点4へのエレベータ操作を伴う移動例を図10に示す。まず、ユーザがタッチパネルから地点番号を入力後、移動開始ボタンを押すと、地点0を設定した部屋内を移動し廊下へ出る（図10-1）。

左折後、廊下をしばらく直進、右折後にエレベータ付近で減速し、操作ボタン前で停止する（図10-2、10-3）。

次にアームを操作し、2階から3階に上がるために上向きのボタンを押す（図10-4）。エレベータが到着するまで停止待機し、到着後にボタンのランプが消灯し、扉があいたのち、エレベータ内に移動する（図10-5）。

エレベータ内で180度向きを変え、アームの基本ポジションを左90度に変更する（図10-6）。3階に移動するために、3の数字が書かれたボタンを押す動作を行う（図10-7）。ランプが点灯すると、ボタンから離れてランプが点灯している間（エレベータ上昇中）待機する。ランプが消えると、ハンド基本姿勢を正面に変更し、エレベータ扉が開くと移動を再開する（図10-8）。

エレベータを出て右折、廊下を走行し突き当たりのT字路を右に曲がる。さらに直進、地点4で減速後停止位置にアプローチを行う（図10-9）。向きを180度変えて微調整を行い停止する（図10-10）。

以上のように、アームと車両を協調制御し、エレベータを操作して階層間移動タスクを達成することが確認できた。



10-1



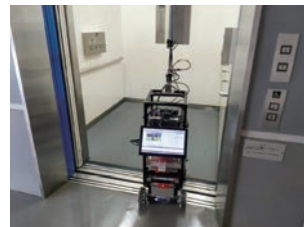
10-2



10-3



10-4



10-5



10-6



10-7



10-8



10-9



10-10

図10 地点番号0から4への移動例

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、RNN ブロック、Autoencoder を活用したニューラルネットを設計、学習し、実機による階層間移動実験によって、本手法が有効であることを確認した。

移動とマニピュレーションの統合制御をend-to-endで模倣学習可能なことから、本研究で用いたハードウェア構成に限らず、様々なロボット制御を現実的にend-to-endで学習可能と考える。

今後はハンドを備えた複数アームを搭載した移動ロボット制御や、少ないデータセットで移動可能なモデルの構築および、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] Neural Network Console, <https://dl.sony.com/ja/>, Accessed 2018. 4.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun : Deep Residual Learning for Image Recognition, <http://arxiv.org/abs/1512.03385>, Accessed 2020. 10.
- [6] W. Zaremba, I. Sutskever and O. Vinyals: Recurrent neural network regularization, arXiv:1409.2329, 2015.

音源可視化技術の開発

(マイクアレイを用いた音源可視化システムの構築)

機械システム科 主任研究員 久保田 慎一

音関連技術は非接触・非破壊検査技術としても注目され活用の場が広がっており、機器の異常監視やノイズキャンセリング、対象音の明瞭化などをはじめAI・IoTなどと連携し必要な情報を取り出すための情報選別技術へのニーズが高い。県内企業からもIoT (Internet of Things) 技術をはじめ、音を用いた機械装置の監視に関する相談が増えている。そのため、長崎県工業技術センターでは、新たに導入した音響計測機器を用いた技術支援を実施している。一方、近年ではAI (Artificial Intelligence) を用いた研究が注目されており、音信号への応用が数多く報告されている^[1-4]。

そこで、本研究開発では、音と画像の情報を組合せる可視化機能に特長を有するマイクアレイや可視画像カメラに加え熱画像カメラを併用した音源可視化装置及び、連携するアプリケーションを開発することを目的とした。

1. 緒言

近年、製造現場ではIoTやAIを用いた取り組みが注目されている。機械装置の監視技術は、生産現場の自動化や省力化に向けて重要な技術であり、さらなる発展が期待されている。その中でも音を用いた機械装置の監視技術については、音響信号処理など活用するための研究や報告が多数なされている^[1-4]。

また、長崎県内の企業から、異常音の監視を行うIoT機器を開発したいという相談が増えている。一方、近年AI技術を用いた画像処理の研究開発が数多くなされてきている。例えば、カメラ映像から人物を認識する、画像から特定の部分を切り出すなど映像処理に関してAI技術を用いることで高度な処理が可能となってきた。

そこで、本研究では複数のマイクロフォンを搭載したアレイマイクで音を収集するとともに、可視画像カメラに加え熱画像カメラを併用して稼働状況に関する情報を音と併せて収集することができる音源可視化装置を開発することを目的とする。

令和4年度は、音源位置を判別する音源探査の精度向上に向けたニューラルネットワークの開発と、対象に絞った音を抽出するAIを開発するために必要な学習用の音源データの収集を実施した。

2. 音源探査ニューラルネットワーク

令和3年度に計測用のコンデンサーマイクロフォン (Behringer 製 : ECM8000) 6本を使用して製作した図1のマイクアレイ^[5]を用いて、音源探査性能向上のためのニューラルネットワークの再構築を行った。こ

れまで4箇所のスピーカーに対し実施していた音源探査を8箇所のスピーカーに拡張する取り組みを実施した。音源探査に使用するデータを取得した際のスピーカー配置を図2に、製作した音源探査ニューラルネットワークを図3に示す。学習用ワークステーションにて、音源探査用に作成したデータセットを用いて、音源探査の学習を実施した。学習の結果、得られた学習曲線を図4に、評価結果を図5に示す。



図1 マイクアレイ (音源探査)

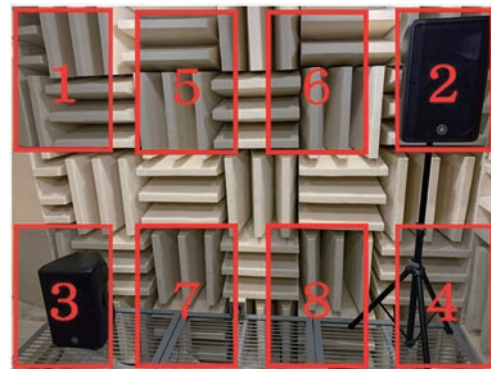


図2 データ取得時の音源配置 (音源探査)

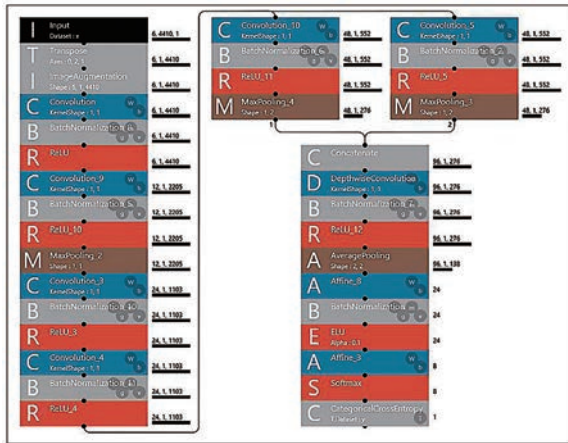


図3 音源探索ニューラルネットワーク

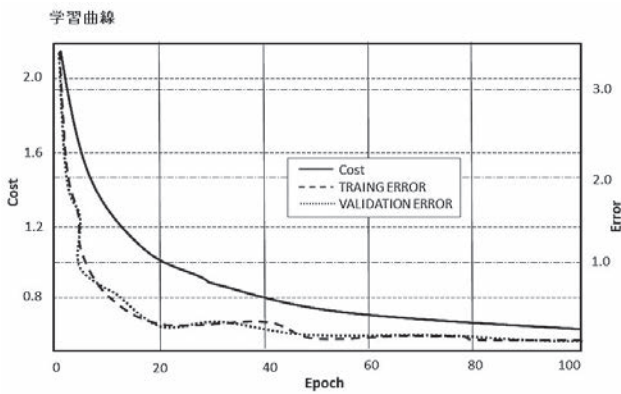


図4 音源探索ニューラルネットワーク学習曲線

	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7
y=0	2000	0	0	0	0	0	0	0
y=1	0	1999	0	0	0	1	0	0
y=2	0	0	2000	0	0	0	0	0
y=3	0	0	0	2000	0	0	0	0
y=4	202	0	0	0	1798	0	0	0
y=5	0	3	0	1	39	1956	0	1
y=6	0	0	31	0	0	0	1967	2
y=7	0	0	0	0	0	0	0	2000
Precision	0.9082	0.9085	0.9047	0.9095	0.9787	0.9094	1	0.9085
F-Measure	0.9518	0.9089	0.9022	0.9097	0.9371	0.9085	0.9916	0.9092
Accuracy	0.9825	正解率 98.25%						
Avg.Precision	0.9834							

図5 音源探索ニューラルネットワーク評価

ニューラルネットワーク探索の結果、8箇所音源位置に対する音源探索の正解率98%を達成した。

3. 対象音抽出AI 開発用学習データの収集

本来、目的の対象に絞った音を抽出するためには対象へセンサーを取り付ける必要があるが、それを不要とするための対象音抽出AIの開発に向けて、必要となる学習用音源データの収集を行った。

データ収集時の音源配置を図6に示す。4箇所のうち1箇所のスピーカーについては、出力する信号をFFTアナライザーへ入力信号として返し、学習データにおける抽出すべき対象音の教師データとしている。6chの同期の取れた音データの録音を実現するために、音源探査で使用したマイクアレイの配置を基に対象音抽出用マイクアレイ(図7)を製作し、FFTアナライザー(図8)を用いて、マイクアレイからの音声データと抽出する対象音を合わせた合計7chの音データの収録を行った。



図6 データ取得時の音源配置(対象音抽出)

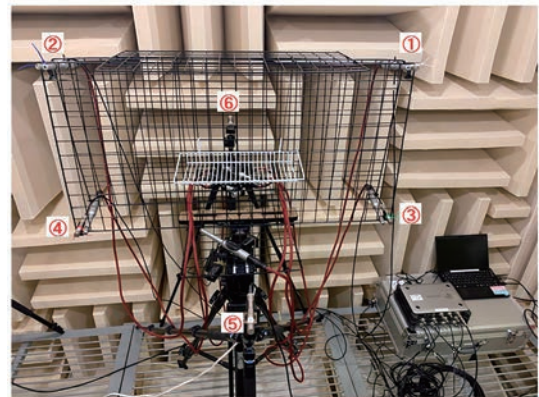


図7 マイクアレイ(対象音抽出)



図8 FFTアナライザー

本実験に用いた実験機器構成を表1に、実験条件を表2に示す。これらの音源データを活用することで、複数の音源がある環境の中で、対象の位置を指定することで、対象から出る音に絞った音データを生成するAIの開発が可能となると考えられる。

表1 実験機器構成

レコーダー (FFTアナライザー)	DS-3000(小野測器)
マイクロフォン	MI-1271(小野測器)
スピーカー (対象音、7chへ入力)	DBR12(YAMAHA)
スピーカー (その他)	SoundCore(Anker)
ノイズ発生器	DS-3000(小野測器)

表2 実験条件

場所	無響室
スピーカー位置	4箇所(図6参照)
入力信号種類	1ch~6ch: 各マイクロフォン入力信号 7ch: スピーカー出力信号 (出力元を分岐させ入力)
録音時間	600[s]

4. 学習用ワークステーションおよびソフト

本研究を通して利用した学習用ワークステーションの構成を表3に示す。学習用ワークステーションは、収集した複数チャンネルの音データを元に、音を分割するプログラムにより作成した学習用データセットを用いて、音源探索および対象音抽出の学習を実施することができる。学習の際は、主にGPUでの計算となる。

表3 学習用ワークステーション構成

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

ディープラーニングによる学習を行うために用いた

ソフトウェアは、Windows10 ローカル版の Neural Network Console (SONY)^[6]である。バージョン 1.80以降、WAV データを直接取り扱うことができるようになり、音を取り扱う分野でもより使用し易いものになっており積極的に活用を進めている。実際に使用したバージョンは2.10で、WAVデータの取り扱いについてはCSVでの相対ファイルパスを指定する形で利用している。

5. 結言

高精度な音源探索ニューラルネットワークの提案と、対象に絞った音を抽出するAIの開発について音源データの収集を実施した。実験の結果、6chの音データによる音源位置8分類を高精度に実施可能であることを確認した。

今後、対象音抽出に向けた学習の実施と、実際の生産現場における機械装置の異常発生音の検出に活用を進めたい。

参考文献

- [1] 亀岡：深層学習モデルを用いた音響信号処理、計測と制御、計測自動制御学会、58巻、3号、pp.195-202, 2019.
- [2] 株式会社アイ・エヌ・シー・エンジニアリング：振動のモニタリングサービス、IHI 技報 Vol.61, No.3, pp.20-23, 2021.
- [3] 木下：機械学習による機械稼働音監視とデータ拡張による学習効率化に関する実験的検討、公益社団法人計測自動制御学会中国四国支部、第28回学術講演会論文集、pp.77-78, 2019.
- [4] 木下：計測用マイクを用いたリアルタイム音信号AI処理システムの開発、鳥取県産業技術センター研究報告、No.23, pp.55-56, 2020.
- [5] 久保田：音源可視化技術の開発、長崎県工業技術センター研究報告、No.51, pp.23-26, 2022.
- [6] <https://dl.sony.com/ja/>, Accessed 2021.

水素ガスの光学式検知技術の開発

(爆発誘因性の低い光学式ガスセンサー手法の開発と安全評価技術の構築)

電子情報科 主任研究員 田尻健志

脱炭素社会の実現に向けて、水素のエネルギー利用と関連産業の創出が期待されている。水素は電気や熱に変換し様々な用途に利用できるが、爆発し易い特徴を持っている。そのため、水素ガスを迅速に検知し、爆発を未然に防ぐ必要がある。しかし、既存の水素ガスセンサーは、検知できるガス濃度の範囲が狭く検出下限値の精度が悪い。また、大量にセンサーを配置できないため、水素ガスの漏洩箇所や空間分布を把握することができない。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検知技術を開発する。本報では微小球センサーに水素ガスを充填し、微小球からの散乱光スペクトル変化を Mie 散乱理論と実験の両面で検証した。また、水素ガスの濃度を変化させ、本システムの検知時間と検知濃度範囲を評価した。

1. 緒言

パリ協定の目標を達成するために、世界各国で CO₂ 排出抑制や再生可能エネルギーの利用が促進されている。脱炭素化社会の実現に向けて、水素のエネルギー利用は注目を集め、水素関連産業の創出が期待されている^[1-3]。水素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、燃焼性も高いため、万が一ガスが漏れた場合には水素ガス濃度が一定以上に達する前に検知し、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として、接触燃焼式や半導体式などがあるが、検知箇所を数百℃に加熱する必要がある。そのため、加熱により水素ガスが爆発する危険性があり、消費電力も大きい。検知できるガス濃度の範囲も狭く、検知時間に数十秒が必要である。また、コストを抑えるためにセンサーの設置数が制限され、水素ガスの漏洩箇所や空間分布までを把握することはできない。

そこで本研究では、水素ガスを吸収できる微小球プローブの開発、および微小球プローブで吸収した水素ガスを迅速・高感度に検知できる光学式の検知技術を開発する。

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^[4-5]。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を把握することができる。

本報では、水素を吸蔵する微小球センサーに水素ガスを充填し、微小球からの散乱光スペクトル変化を確認した。Mie 散乱理論で解析した散乱断面積と比較することで、水素を吸蔵した微小球の表面状態を評価した。また、充填する水素濃度を変化させ、本検出システムの検知時間と検知濃度範囲を評価した。

2. 実験方法

2.1 微小球センサー

微小球の光閉じ込め効果を高めるため、高い屈折率と真球性を持つ直径 10 μm、屈折率 1.40 のシリカ (SiO₂) 微小球を選定した。また、シリカ微小球の表面にコーティングする水素吸蔵合金は、常温常圧で反応するパラジウム (Pd) を選定した。

図 1 はパラジウムをコーティングしたシリカ微小球に水素ガスを充填した近似モデルを示している。

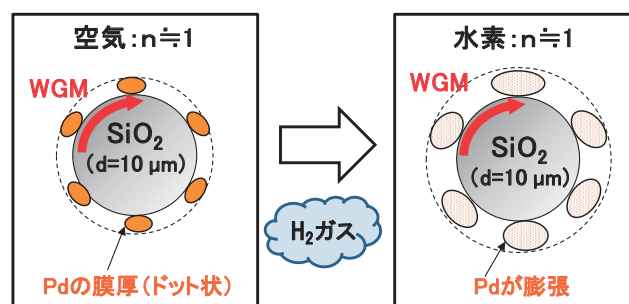


図 1 水素ガスによる表面状態の変化

水素ガスを吸蔵するとパラジウム薄膜が膨張し、微小球表面の屈折率に変化が生じる。この状態で微小球を励起すると、WGモードに起因した共振ピーク波長に変化が生じ、ガスの判定が可能となる。

2.2 単一微小球の散乱光検出システム

油浸対物レンズを使用し、全反射減衰配置における単一微小球の励起と散乱光を検出するシステムを構築した^[6]。

図2で示すように、油浸対物レンズ(ニコン製、100×)により、全反射減衰配置で照射された単一のシリカ微小球は、TE偏光とTM偏光に対応するWGモードが励起される。微小球はガラスベースディッシュ(IWAKI製、底面厚み0.15 mm~0.18 mm)の中に配置し、水素ガスは側面のチューブから吸排気した。水素の漏洩を防止するため、ガラスベースディッシュはOリングとシールテープで密閉し、顕微鏡のステージプレート部に固定した。水素ガスを充填してもCCD観測画像に焦点のズレは発生せず、経時的に安定したスペクトル測定が可能となった。また、微小球の表面状態の情報を含んだ散乱光は、検出用の対物レンズ(50×)で受光し光ファイバーで導光した後、分光器で検出した。

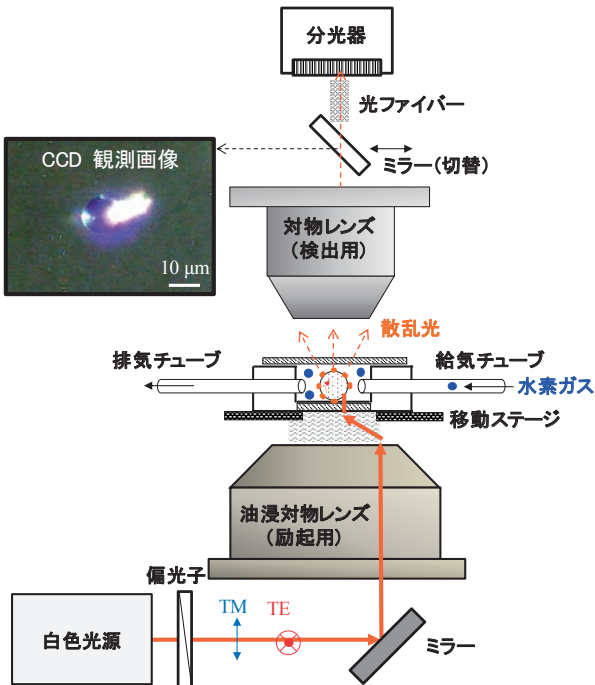


図2 単一微小球の散乱光検出システム

図3で示すように、水素ガスは、太陽日酸社、および、ジーエルサイエンス社の水素ガスカセット缶に圧力調整器(ユタカ製、eco-CAN CR-10-2)を接続し充填

した。水素濃度は窒素でバランス調整した5種類(3.92%、9.83%、30.00%、50.30%、99.99%)を使用した。また、窒素ガスだけの充填も行い、水素ガスの共振ピーク波長と変化量を比較した。なお、測定中はガスの滞留を防止するため、部屋を換気した状態で行い、排気ガスは大気へ放出した。

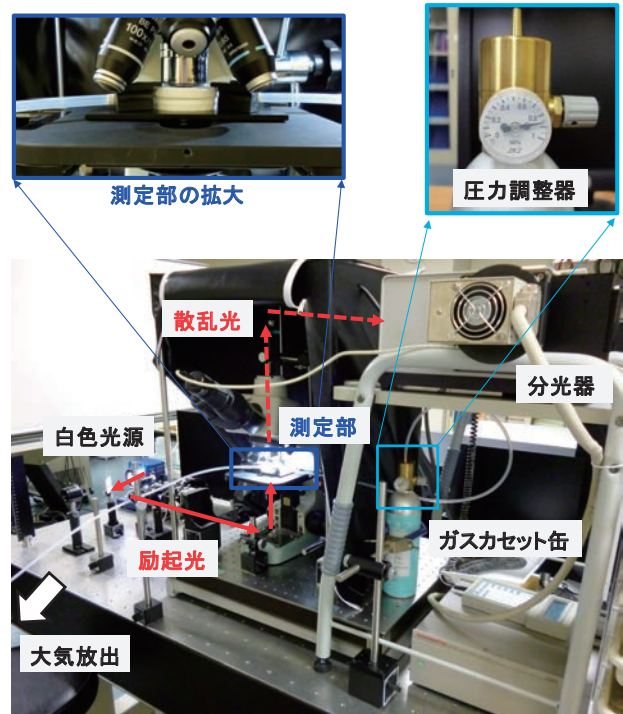


図3 水素充填による計測システム

2.3 微小球表面状態の評価方法

シリカ微小球にWGモードが励起されると、散乱光スペクトルの特定波長に鋭い共振ピーク波長が確認される。本測定では、白色光源(ENERGETIQ社製、LDLS白色光源EQ-99、 $\lambda=170\text{ nm}\sim 2100\text{ nm}$)の555 nm~610 nmの波長帯域に着目し、TE偏光とTM偏光に対応する周期的な共振ピーク波長を検出した。図4(a)と(b)は、空気中におけるシリカ微小球の散乱光スペクトルと散乱断面積スペクトルを示す。微小球モデルの球径と屈折率をそれぞれ10.0 μm と1.40、空気の屈折率を1.0としてフィッティングすると、実験で検出した散乱光スペクトルのピークとほぼ一致することがわかった。このため、共振ピーク波長をMie散乱理論で得られる散乱断面積の波長ピークと比較することにより、周囲ガスによる微小球の表面状態を評価した。また、共振ピーク波長の反応時間や水素ガス濃度による変化量を確認することで、本検知システムの判定時間や検出濃度範囲を評価した。

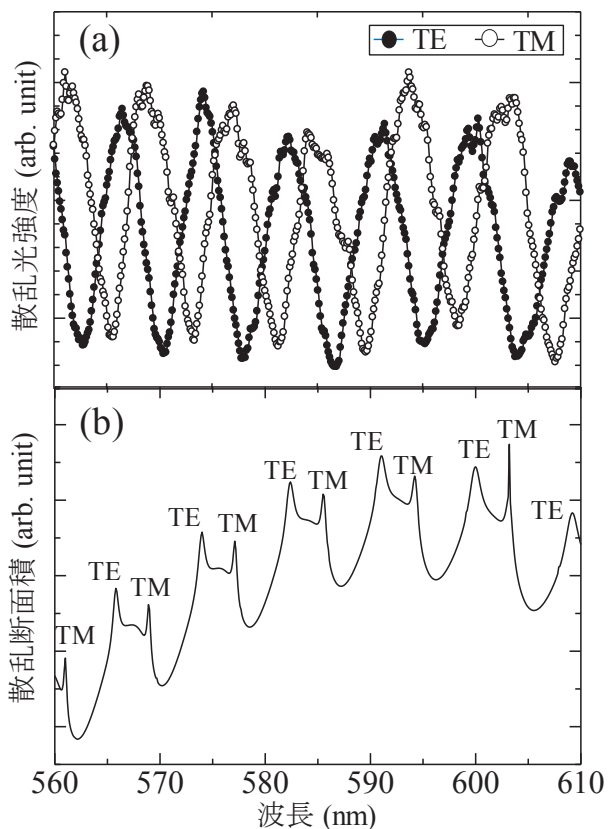


図4 シリカ微小球の散乱光スペクトル

3 結果と考察

3.1 微小球センサーの評価

図5は、パラジウムを全体にコーティングしたシリカ微小球①（左下）とパラジウムの厚みを薄くし、ドット状にコーティングした微小球②（右上）を示す。全体をコーティングした微小球①は、光を照射すると表面が黒く観察され、図6（a）で示すように、微小球を励起しても共振ピーク波長を検出できなかった。コーティングしたパラジウムは光吸収係数が大きく、WGモードの増強効果を生じることができなかつたと推察される。

一方、厚みが薄く、ドット状にコーティングした微小球②は、光を照射すると表面が透明に観察され、図6（b）で示すように、WGモードに起因した周期的な共振ピーク波長を検出することができた。コーティングした薄膜が薄く、WGモードと作用する面積が減少したことで、光の減衰を抑え、共振ピーク波長を検出できたと推察される。散乱光の共振ピーク波長とMie理論による散乱断面積のピーク波長を比較した結果、薄膜の屈折率は1.4、厚みは40 nm以下になると算出できた。また、光減衰の影響は少ないとみなし吸収係数は0とした。

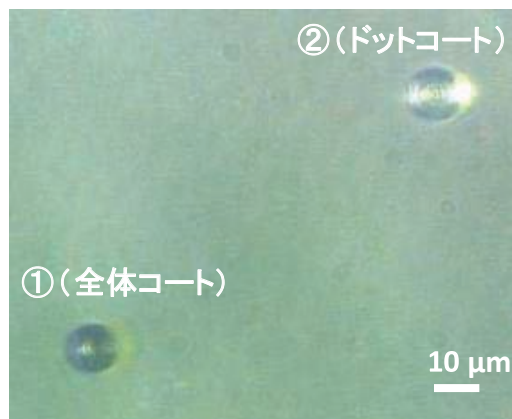


図5 コーティング微小球の観測

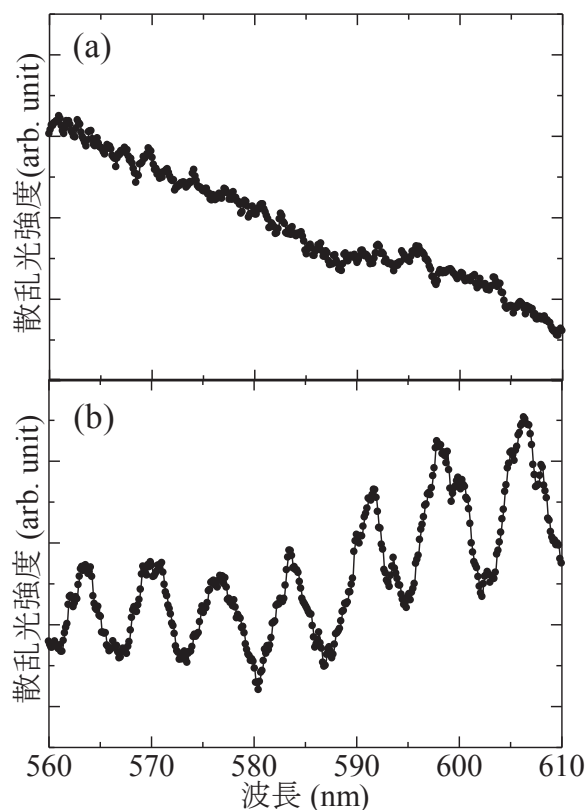


図6 微小球プローブの励起

3.2 単一微小球からの散乱光スペクトル

図7（a）は、水素充填の前後で検出したTM偏光の散乱光スペクトルを示す。555 nm～580 nmの波長帯域の中にTM偏光に対応した周期的な共振ピーク波長を確認することができ、コーティングしたシリカ微小球からWGモードを検出していることがわかる。散乱光の隣り合う共振ピーク波長の間隔は約9 nmであり、水素を充填すると、1秒～2秒で共振ピーク波長が3 nm～4 nm短波長側へシフトする。これは、水素を吸蔵

したパラジウムの薄膜が膨張し、屈折率が低下することで共振ピーク波長がシフトしたと考えられる。なお、ここでの縦軸の散乱光強度は、散乱光強度の最大値によって規格化した。

次に、図7(b)は、Mie理論による散乱断面積スペクトルを示す。散乱光スペクトルとのフィッティングにより、水素ガスの有無における微小球の光学モデルを検証した。計算において、コーティングしたシリカ微小球の直径は10 μm 、微小球と周囲媒体(空気と水素)の屈折率はそれぞれ1.40と1.0とした。また、コーティングした薄膜の厚みは20 nmから22 nm、屈折率は1.40から1.0に変化することを算出できた。薄膜が膨張したことにより密度が減少し、屈折率が低下したと推測できる。なお、コーティング無しのシリカ微小球でも2 nm~3 nm短波長側へのシフトを確認したが、ポリスチレン微小球はシフト変化を確認できなかった。これは、シリカ微小球表面では水素が透過し、表面状態が変化していたと考えられる。

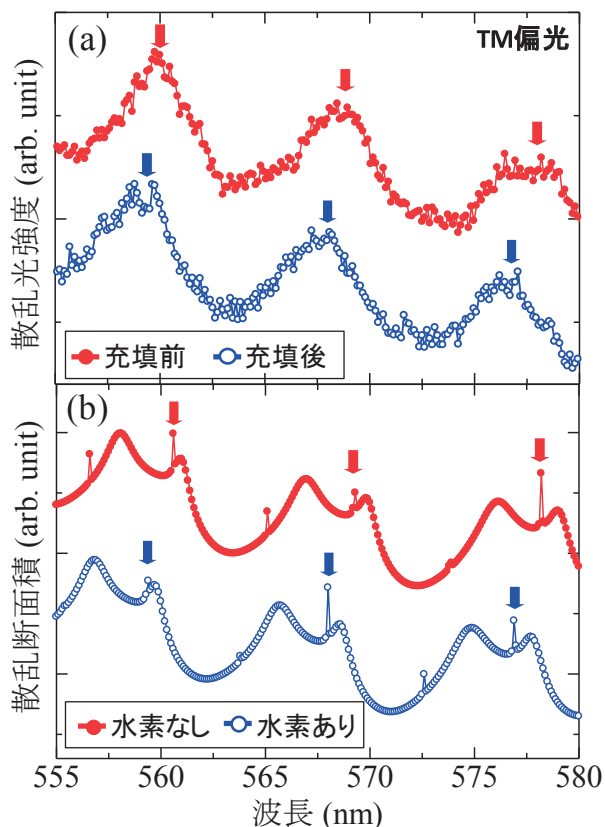


図7 水素充填による散乱光スペクトルと散乱断面積スペクトルの変化

3. 3 水素濃度による共振ピーク波長のシフト

図8は、充填する水素濃度を4%~100%の範囲で変化させたTM偏光の共振ピーク波長の変化を示す。励起

した微小球プローブは直径10 μm のコーティング無しのシリカ微小球とした。表1で示すように、大気中の共振ピーク波長(581 nm)からのシフト量 $\Delta\lambda$ は、ガス濃度4%では1.25 nm、ガス濃度100%では2.5 nmとなり、水素濃度が高濃度になるにつれて、短波長側へ大きくシフトする傾向を確認した。一方、窒素ガスを充填するとシフト量 $\Delta\lambda$ は0.87 nmとなり、本システムで使用した分光器の波長分解能1 nmからも、シフト変化はないと判断した。また、水素ガスの充填を停止すると、共振ピーク波長が充填前の位置に復帰し、復帰する時間は水素濃度が高濃度になるにつれて、遅くなる傾向を確認した。

これらの結果より、本システムは水素ガスに依存した散乱光の共振ピーク波長を検知しており、水素ガスの爆発範囲である4%~74%をカバーできることがわかった。

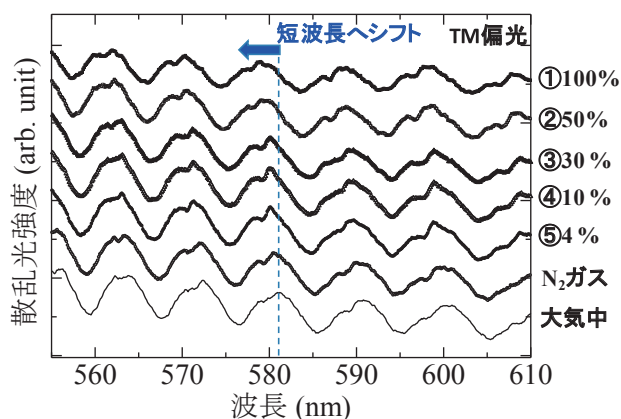


図8 水素濃度変化による共振ピーク波長のシフト

表1 水素濃度における共振ピーク波長の変化

水素濃度 %	共振波長ピークの シフト量 ($\Delta\lambda$)/nm	復帰時間 (t)/min:s
4	1.25	1:20
10	1.37	1:38
30	1.50	2:08
50	1.75	4:18
100	2.50	10:42

4. 結言

単一のシリカ微小球の散乱光検出システムにより、水素ガスを検知した。Mie理論を利用した散乱断面積の光学モデルにより、微小球表面にコーティングした

薄膜の屈折率は1.40 から1.0 へ低下し、厚みは10% 膨張することが算出できた。また、共振ピーク波長のシフト量を確認することで、本検知システムの判定時間は1秒～2秒、検知濃度範囲は4%～100%であることがわかった。このため、本検出システムは水素ガスの爆発範囲である4%～74%をカバーすることができる。

今後、検知装置の実用・事業化を図るためには、シフト量の再現性や作業性を向上させていく必要がある。また、本検知技術を応用し、水素以外の可燃性ガスの検知へ応用展開を図っていく。

参考文献

- [1] 資源エネルギー庁、第5次エネルギー基本計画、2018.
- [2] 経済産業省、水素・燃料電池戦略ロードマップ基本戦略、2019.
- [3] 経済産業省、水素基本戦略、2023.
- [4] 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.
- [5] T. Tajiri, S. Matsumoto, T. Imato, T. Okamoto, and M. Haraguchi, *Anal. Sci.*, 30, pp. 799–804, 2014.
- [6] 田尻健志：長崎県工業技術センター研究報告、No. 51, pp. 32–33, 2022.

エネルギーの有効活用を目指した環境発電に関する研究

(電磁波ノイズの回収と蓄電に関する技術開発)

電子情報科 主任研究員 中川 豪

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

1. 緒言

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

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

させることが十分に可能であるといわれている。

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

2. 研究内容と結果

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

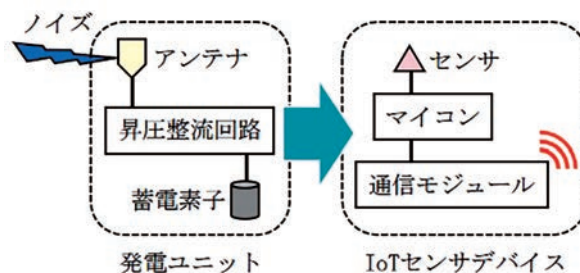


図1 環境電波発電ユニットの模式図



(a) ロッドアンテナ
アンテナ長：20 cm～80 cm
(b) ホイップアンテナ
アンテナ長：30 cm

図2 使用したアンテナ

ノイズ測定には図2に示した市販のアンテナ（アンテナ長：20 cm～80 cm 可変のロッドアンテナ、アンテナ長：30 cm 固定のホイップアンテナ）を使用した。まずはネットワークアナライザを用いて、各アンテナのVSWR（電圧定在波比）を測定した結果を図3に示す。図3の縦軸はVSWR、横軸は周波数でそれぞれ1.0 MHz～350 MHz 及び350 MHz～960 MHz 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1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。

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

図3(a)～(c)より、ロッドアンテナではアンテナ長を長くするほどVSWRの波形が低周波帯にシフトしており、一方で、アンテナ長が短い方が高周波帯でVSWRが小さくなっているのが確認できる。また図3(d)より、アンテナ長が30 cm 固定のホイップアンテナでは、1.0 MHz～350 MHzの周波数帯域において、ロッドアンテナよりも良好なVSWR特性が得られた。今回、ノイズ測定に用いるスペクトラムアナライザは周波数帯域に応じて入力端子が2系統に分かれており、測定可能な周波数レンジは0.1 MHz～350 MHz、及び240 MHz～960 MHzとなっている。これを考慮し、350 MHz以下ではホイップアンテナ、350 MHz以上ではロッドアンテナ（20 cm）とホイップアンテナを用いてノイズ測定を実施することとした。

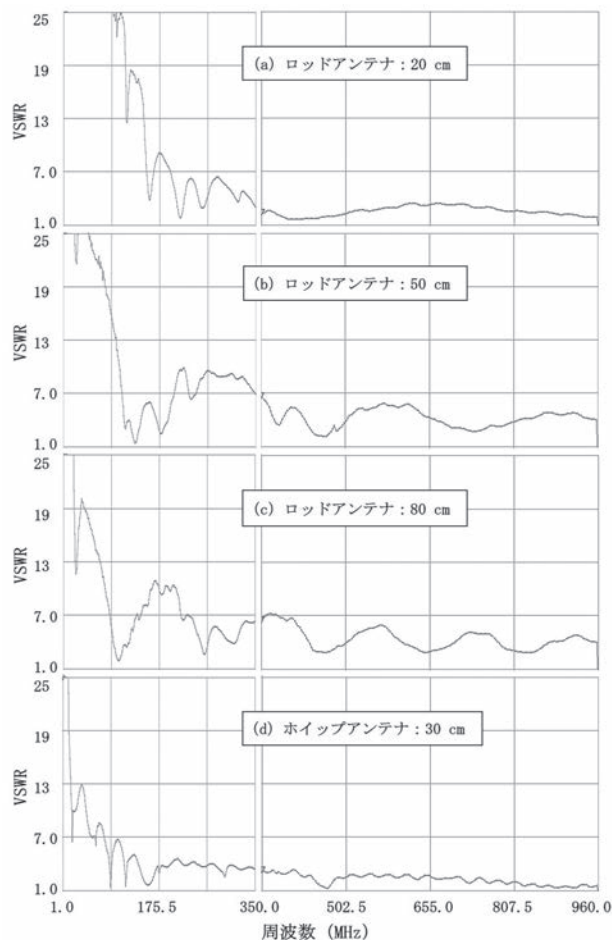


図3 各アンテナのVSWR

次に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～350 MHz 及び350 MHz～960 MHzの周波数範囲において、連成解析システムのノイズ測定を行った結果を一例として図4に示す。図4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ものである。測定時間を10分とし、ピークホールド測定を行っている。また、アンテナを測定対象機器から30 cmの距離に設置して測定した。350 MHz～960 MHzの周波数範囲においては同様にホイップアンテナを用いて測定し、ロッドアンテナ（20 cm）での測定結果と比較した。その結果、両者のノイズ波形に有意差は確認できなかったが、ロッドアンテナを用いた場合の方が雑音電圧のピーク値が大きくなる傾向にあった。図4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。

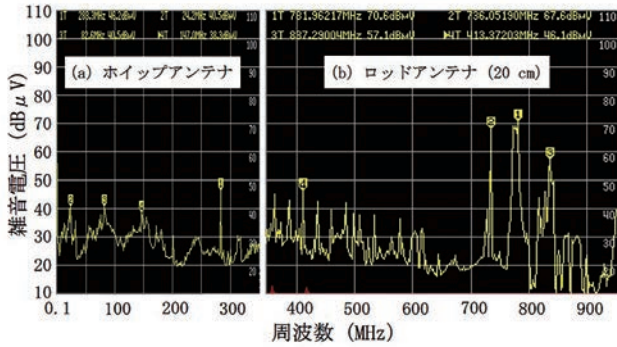


図4 連成解析システム（計器校正室）におけるノイズ測定結果

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力（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。そのため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、700 MHz～850 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、同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ることを確認している。これらは屋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。

3. 結言

本研究では、屋内で稼働する電気・電子機器から放出されている不要な電磁波ノイズに着目し、これをエネルギー源とした環境電波発電ユニットの開発を行う。そこで今年度は、環境発電のエネルギー源となる電磁波ノイズについて、周波数範囲とノイズレベルの調査を行った。

当センターに設置されている様々な電気・電子機器のうち、稼働率が高い開放設備機器や長時間運転している計算機器などを中心に、ホイップアンテナ（アン

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）開発機のため筐体なし	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

テナ長：30 cm）及びロッドアンテナ（アンテナ長：20 cm）を用いて、雑音電圧の最大ピーク値とその周波数を測定した。その結果、複数の電気・電子機器において、700 MHz～850 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おり、これらを電力に換算すると0.2 μ W～2.0 μ Wに相当するノイズレベルであることが分かった。

ワイヤレスセンサデバイスを間欠的に作動させるためには10 μ W程度の発電能力が必要であるため、次年度は、700 MHz～850 MHzの周波数帯域に良好な感度を有するアンテナについて開発を進めていく。

参考文献

- [1] 瀬川浩司：有機系太陽電池を利用した環境発電と蓄電の新技术、化学工学 Vol.84, No.6, pp.263-265, 2020.
- [2] 神野伊策：振動エネルギーによる環境発電（振動発電）、表面技術 Vol.67, No.7, pp.348-352, 2016.
- [3] 一般社団法人 日本熱電学会、ロードマップ、<https://thermoelectrics.jp/roadmap.html>, Accessed 2023.
- [4] 篠原真毅：電波エネルギーによる環境発電（レクタナ）、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.

レーザー樹脂溶着の高品質化に関する研究

(汎用の材料であっても接合強度や気密性の低下が起きない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、レーザー樹脂溶着では材料間の隙間に起因する接合強度や気密性の低下が問題となる。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。研究内容としては、まず、加工用光源に Yb ファイバーレーザーを用いたレーザー樹脂溶着用の実験装置を作製した。次に、専用の型を用いることなく吸収材に突起部を成形する前処理手法を考案し、その検証実験を行った。実験では数種類のパラメーターを変化させて突起部を成形したサンプルを作成し、突起部断面を顕微鏡観察して突起部の高さを測定した。その結果、成形条件によっては、平均 80 μm 程度の高さの突起部を成形できることがわかった。最後に、考案した前処理手法の有効性を確認するための評価試験として、スペーサーを用いて意図的に隙間を作った材料に対してレーザー溶着を行い、前処理をしたサンプルの方が高い接合強度を得られることを確認した。

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、材料に工夫が必要である。

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として、材料間に見える隙間に起因する溶着品質の低下がある(図1参照)。一般的に調達できる樹脂材の表面には、ひげ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。

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を、多品種少量生産時にも適用可能な方法で改善する。このために、以下の研究項目を実施する。①レーザー樹脂溶着用の実験装置を作製する。②専用の型を用いることなく吸収材に突起部を成形する前処理手法を考案し、その検証実験を行う。③溶着状態や加工時間等に影響する複数のパラメーターを検討し、その検証実験を行う。④上記の実験データに基づいて評価用サンプルを試作し、それらサンプルの接合強度を測定する。

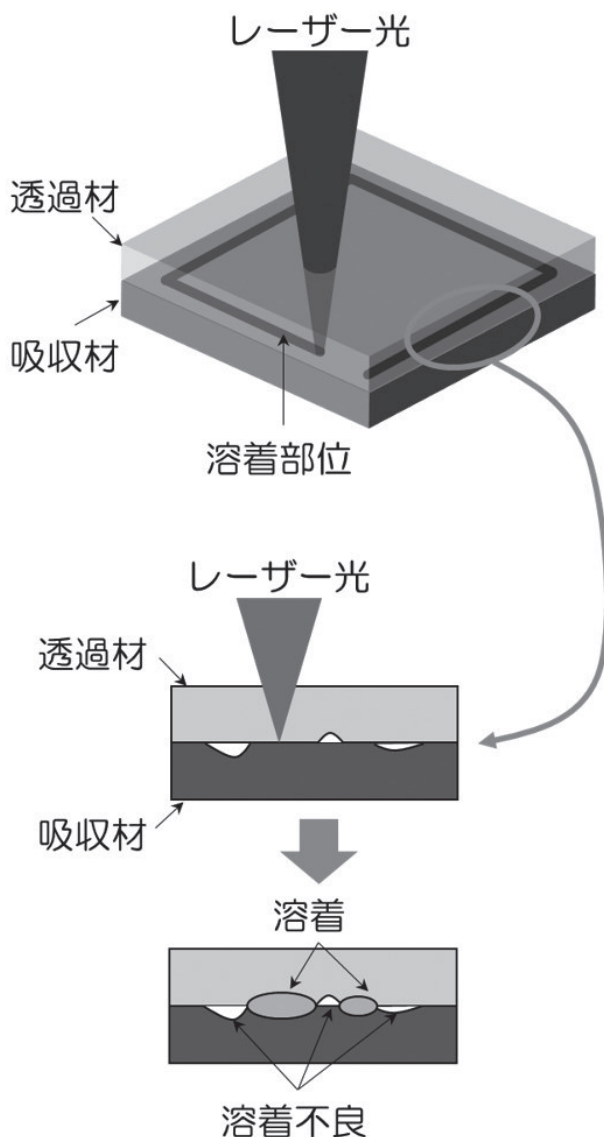


図1 レーザー樹脂溶着時の材料間の隙間に起因する溶着不良の模式図

2. 1 レーザー溶着実験装置の作製

上記①の研究項目について、その内容を以下に記述する。レーザー樹脂溶着用の光源には Yb ファイバーレーザー（パナソニック製 LP-Z250）を用いた。このレーザーの照射ヘッド内には、ガルバノモーターに取り付けられた X 軸ミラーおよび Y 軸ミラー、ならびに集光用 $f \theta$ レンズが内蔵されており、X 軸ミラーおよび Y 軸ミラーはガルバノモーターにより反射角を変えることができ、その反射角の組み合わせにより加工対象面の任意の場所に集光スポットを移動させることができる。この集光スポットの位置、移動軌跡および移動速度は装置制御用のコンピューターによって設定できる。また、レーザー出力等も同様に設定できる。

図2に作製した装置の写真を示す。レーザー照射

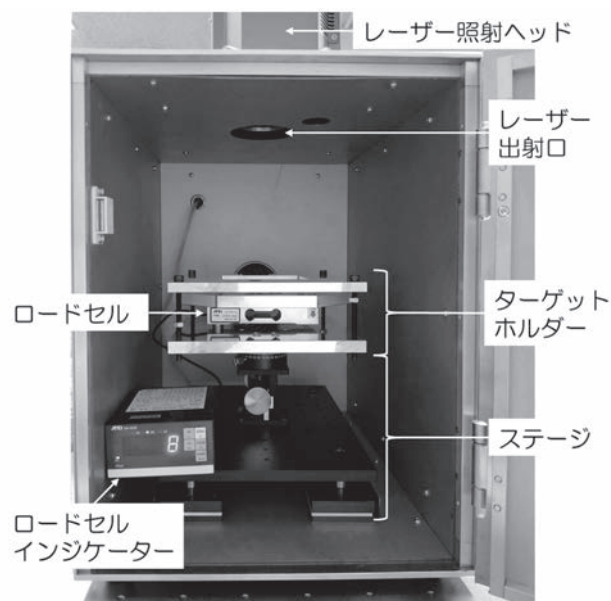


図2 作製した装置の写真

ヘッドの下部には、照射ターゲットとなる樹脂材料を設置するターゲットホルダーならびに高さおよび水平回転の可動軸を有する移動ステージがある。ターゲットホルダーには重ね合わせて設置した樹脂材料を加圧する機構があり、その加圧力を測定するためのロードセルをターゲットホルダーに組み込んでいる。

2. 2 突起部成形の検証実験

上記②の研究項目について、考案した前処理手法を用いてアクリル樹脂板に突起部を成形する検証実験で得られた結果の一部を以下に記述する。実験では数種類のパラメーターを変化させて突起部を成形したサンプルを作成し、突起部断面を顕微鏡観察して突起部の高さを測定した。

測定結果の一例として、突起部成形時の投入エネルギー量を変化させた場合の突起部の高さを表すグラフを図3に示す。各エネルギー量における突起部の高さは、9か所の断面を測定した平均値である。投入エネルギー量を増やすと、ある程度までは高さが単調に増加するが、その後、高さが減少に転じる。この投入エネルギー量が多く、高さが低下したサンプルの突起部断面を顕微鏡観察すると、一部で突起部の形状に乱れが発生しており、それが高さの減少につながったことがわかった。

図4は、成形速度を変化させた場合の突起部の高さを表すグラフである。各成形速度における突起部の高さは、9か所の断面を測定した平均値である。形成速

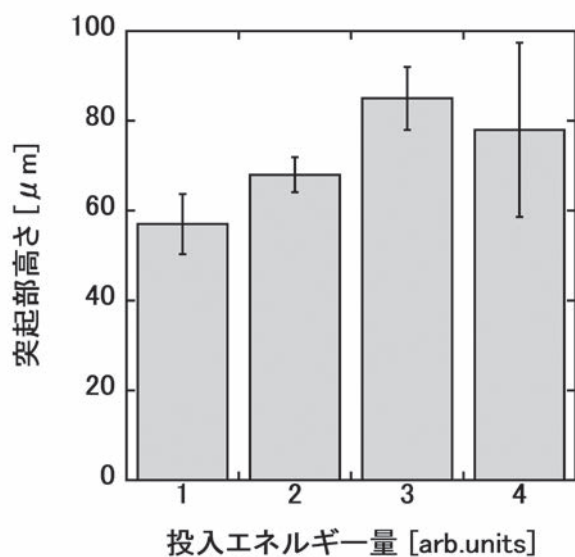


図3 投入エネルギー量を変化させた場合の突起部の高さ

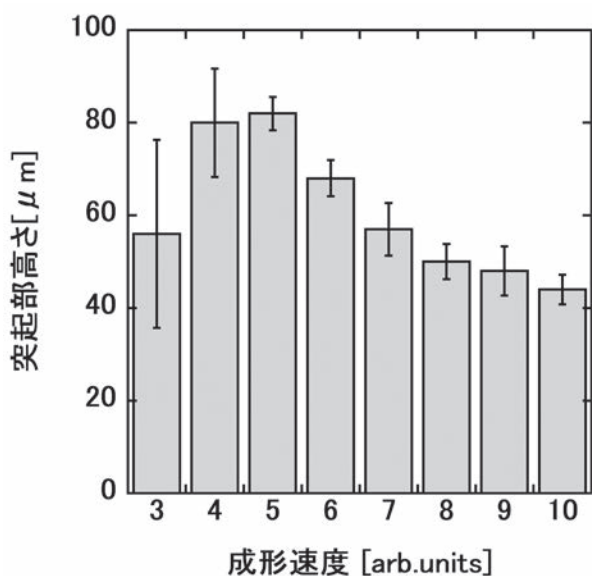


図4 形成速度を変化させた場合の突起部の高さ

度4では、高さ90 μmを超える突起部が得られることもあったが、ばらつきが大きく、高さ60 μmを下回るサンプルもあった。形成速度5では、高さ90 μmを超える突起部は得られなかったが、突起部の高さの平均値は全形成速度中で最も高かった。また、形成速度5では、突起部の高さのばらつきが小さく、高さ70 μmを下回ることにはなかった。また、突起部断面の顕微鏡観察から、形成速度が速くなるにつれて、突起部の高さの平均値は低くなるものの、突起部の形状の乱れは少なかった。一方で、形成速度が遅い場合は、突起部

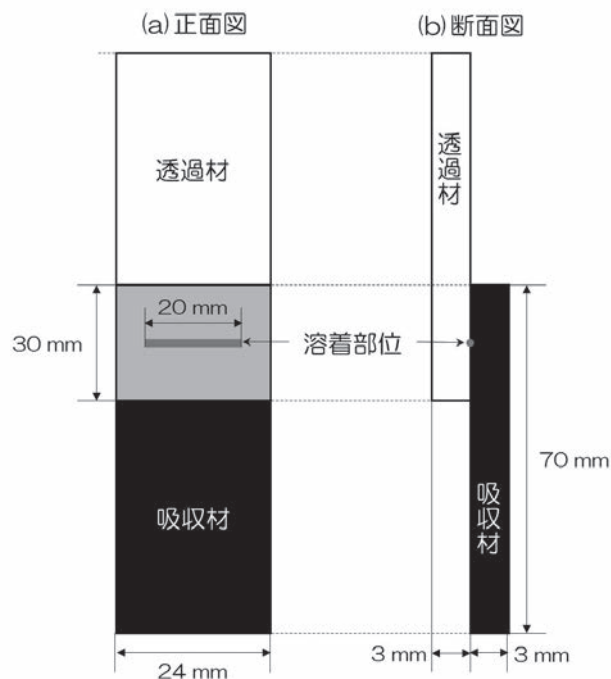


図5 樹脂材料の形状および溶着部位

の形状の乱れが大きくなり、それが突起部の高さ低下につながっていた。

検証実験の結果、突起部成形時の投入エネルギー量および形成速度を、突起部の形状が乱れない程度に調整することで、平均80 μm程度の高さの突起部を成形できることがわかった。

2.3 レーザー樹脂溶着の検証実験

上記③の研究項目について、その内容を以下に記述する。検証実験では、レーザー出力、レーザー走査速度、加圧力等のパラメーターを変えながらアクリル樹脂板の溶着を行い、溶着後のサンプルの接合状態を確認した。重要な確認項目の一つに溶着後の接合強度があるが、その確認方法としては、引張りせん断試験を行うことにした。引張りせん断試験には、精密万能試験機(島津製作所製 AG-10kNX)を用いた。この引張りせん断試験を行うことを前提とし、検証実験で用いる樹脂材料の形状および溶着部位は図5のようにした。図5に示した形状の樹脂材料をレーザー溶着実験装置に配置する際には、別途作製した専用の固定治具を用いてターゲットホルダーに取り付けた。図6は、溶着後のサンプルを精密万能試験機にセットした様子である。溶着後のサンプルをそのまま試験機のエアチャックで把持すると、水平方向の位置がずれて不要

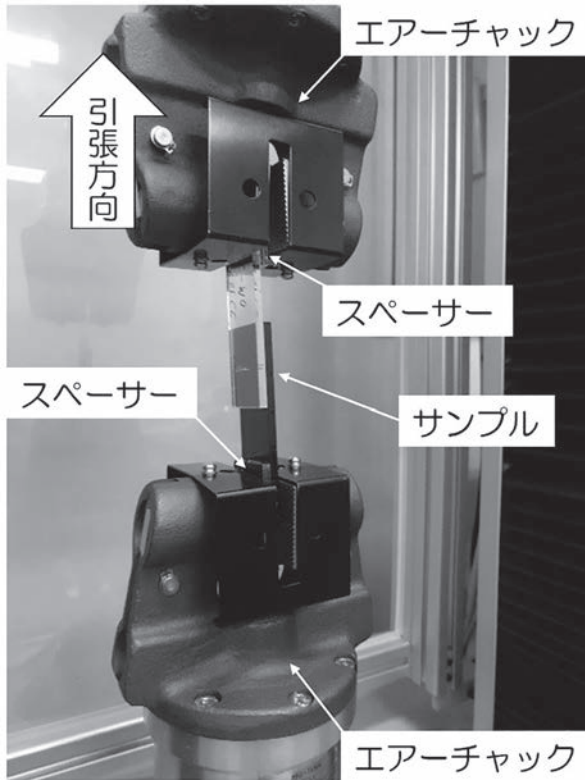


図6 溶着サンプルの精密万能試験機へのセッティングの様子

な応力がかかるため、各エアージャックの把持面に樹脂材料と同じ厚さ 3 mm の板材をスペーサーとして挿入した。

検証実験の結果の一例として、レーザー溶着時のレーザー出力を変化させた場合の最大点試験力を表すグラフを図7に示す。最大点試験力とは、溶着接合部が破断したときの試験力のことである。なお、引張りせん断試験時のチャック圧は 0.2 MPa で試験速度は 1 mm/min とした。全体的な傾向としては、レーザー出力を高くするほど最大点試験力が高くなった。すなわち、レーザー出力を高くするほど高い接合強度が得られることがわかった。ただし、出力を上げすぎると、ターゲットである樹脂材料近傍の治具等がダメージを受けるケースがあった。したがって、高出力域を常用するには、ダメージを受けにくい材料で治具等を作製するなどの対策が必要である。

条件によっては、図8に示すように、溶着接合部ではなく樹脂材料自体が破断するほど強い接合状態も得られた。一方で、次の研究項目では、突起部成形による効果を評価する試験が必要である。その際に、樹脂材料自体が破断するような強い接合状態になったら、正しい評価ができない。したがって、評価試験におい

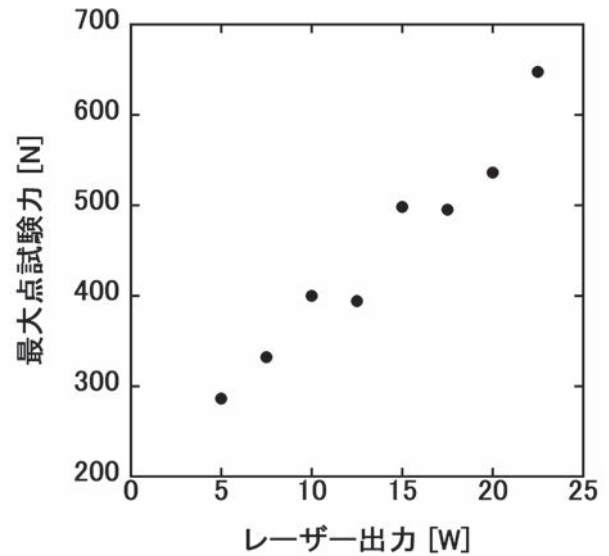


図7 形成速度を変化させた場合の突起部の高さ

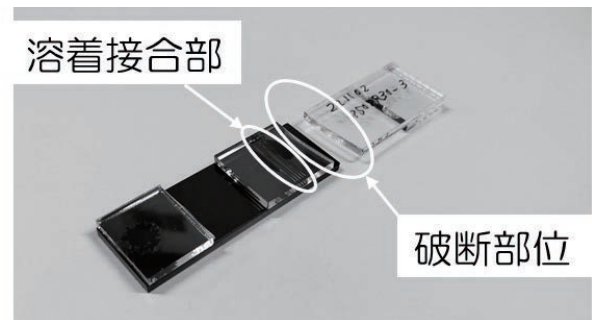


図8 溶着接合部とは別の部位が破断したサンプルの写真

ては、レーザー出力を調整するなどして、適度な接合強度になるように溶着を行う必要がある。

2. 4 評価試験

上記④の研究項目について、その内容を以下に記述する。考案した前処理手法の有効性を評価するために、前処理によりアクリル樹脂板に突起部を成形してレーザー溶着を行ったサンプルと前処理なしでレーザー溶着を行ったサンプルとを作成し、両者の比較を行った。

評価試験の一つとして、透過材と吸収材の間にスペーサーを挿入して隙間を作ったうえでレーザー溶着し、溶着後のサンプルの引張りせん断試験を行った。スペーサーには、厚さ 11 μm、幅 10 mm の金属箔を用い、図9に示すように材料間に配置した。この材料を 9 N で加圧した状態で、出力 5 W のレーザーを照射して融着した。同条件で、前処理をしたサンプルと前処理をしていないサンプルを、それぞれ 10 個作成し、

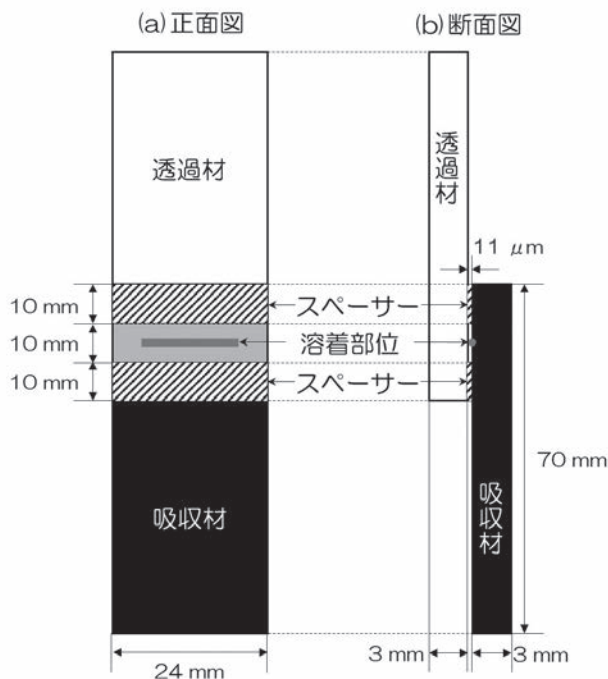


図9 材料間スペーサーの配置位置

2. 3節と同じ条件で引張りせん断試験を行った。試験の結果、前処理をしていないサンプルの最大点試験力の平均値が146 Nであったのに対して、前処理をしたサンプルの最大点試験力は185 Nであった。このように、考案した前処理手法が、材料間に隙間のあるレーザー溶着において、接合強度を高める効果があることを確認した。

3. 結言

本研究は、レーザー樹脂溶着において、材料間の隙間に起因する接合強度や気密性の低下を、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。

本研究では、まず、その検証実験を行うための装置の作製を行った。レーザー溶着装置の光源にはYbファイバーレーザー用い、そのレーザー照射ヘッドの下部には、移動ステージおよびターゲット材料を加圧する機能を有するターゲットホルダーを設置した。ターゲットホルダーにはロードセルが組み込まれており、加圧力を調整可能である。

次に、専用の型を用いることなく吸収材に突起部を成形する前処理手法を考案し、その検証実験を行った。その結果、成形条件によっては、平均80 μm程度の高さの突起部を成形できることがわかった。

さらに、溶着状態に影響する各種パラメーターを変

えながら溶着実験を行い、評価試験に必要な加工条件のデータを取得した。

最後に、考案した前処理手法の有効性を確認することを目的とした評価試験を行った。その結果、スペーサーを用いて意図的に材料間に隙間を作った状態でのレーザー溶着において、前処理をしたサンプルの方が前処理をしていないサンプルよりも高い接合強度が得られることがわかった。以上のことから、考案した前処理手法が、レーザー樹脂溶着を行う際の材料間にできる隙間に起因する溶着品質の低下を改善する効果があることを確認した。

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:樹脂材のレーザー溶着方法、特開2008-302700、2008.12.18.

生体組成の非侵襲計測技術の開発

電子情報科 研究員 下村 義 昭

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

1. 緒言

平成 28 年国民健康・栄養調査（厚生労働省）によれば、糖尿病患者は国内に 1,000 万人、その予備軍を含め 2,000 万人以上にもなり、深刻な国民病となっている。現状、糖尿病治療では採血による血糖値の自己測定により、食事療法や薬物投与による血糖値コントロールが行われているが、1日数回の採血に伴う苦痛や採血針による感染等の問題がある。

また、平成 20 年度から生活習慣病の予防を目的とした「特定健診・特定保健指導」も高齢者医療確保法により義務付けられており、保健指導による経時的なメタボリック症候群の評価など、今後ますます予防目的での血糖値の自己測定が重要となる。

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

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

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

本開発では、果実糖度の非破壊計測を目的に考案した光計測手法 TFDRS (Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy)^[5]をベースに上記課題を全て克服できる生体組成の非侵襲計測技術を確立する。本報告では、TFDRS を活用したヘモグロビンや血糖値等の血液成分の非侵襲計測手法、およびその課題について述べる。

2. 研究内容と結果

2.1 非破壊計測手法 TFDRS

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

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

(1)式で表される相対吸光度比 γ は散乱の影響を受けない物理量で果実糖度との高い直線相関を示す。これにより、従来の測定方法では数百種類の波長の光を必要とした果実糖度の非破壊計測を TFDRS ではわずか 3 種類の波長の光で可能とした。

2. 2 TFDRS による生体組成の非侵襲計測

生体でも相対吸光度比 γ は散乱の影響を受けない物理量で水分、蛋白、脂肪、ヘモグロビン等の各生体組成 G_k ($k=1, \dots, m$; m は組成の数) と下記の比例関係が理論的に成立する^[6]。

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

(2) 式の比例関係から波長の組み合わせの異なる n 個の相対吸光度比 γ_k ($k=1, \dots, n$; $n \geq m$) を用いて各組成 G_k ($k=1, \dots, m$) を下記(3)式により算出できる。

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

図2は3人の被験者で測定した指先のヘモグロビン濃度(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。3つの相対吸光度比を用いて(3)式で推定した C_{thb} の測定誤差は0.003 mM と高精度な測定を実現している。

血糖値等の微量な血液成分も(3)式で表される複数の相対吸光度比 $\gamma_{k=1, \dots, n}$ 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。一方、間質液中のグルコース濃度は血糖値の急激な変化に対して数分程度遅延するが、定常状態ではよく一致することが報告されている^[1]。

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、(3)式を用いた測定精度を理論的に検討した。その結果、吸光度 $Abs (= -\ln(R))$ の測定誤差を 0.01×10^{-2} 以下に抑えれば国際規格 ISO15197 を満足する ± 15 mg/dl 以下の高い精度が得られることが検証された。

電気ノイズのみに起因した吸光度の測定誤差は時間的な積算平均により 0.01×10^{-2} 以下を容易に実現できる。しかしながら、図3(a)に示すように、指先で測定した吸光度 Abs は電気ノイズ以外の要因でも時間的に変動しており、①拍動に起因した Abs_p (図3(b)) と②測定部位の微動に起因した Abs_c (図3(c)) に分けることができる。① Abs_p は、血管の膨張収縮に伴う

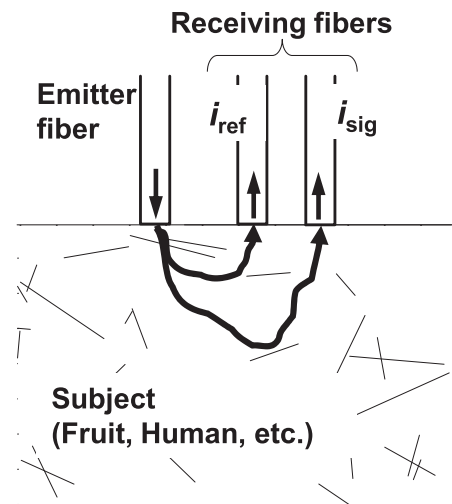


図1. 光計測手法 TFDRS の概略図

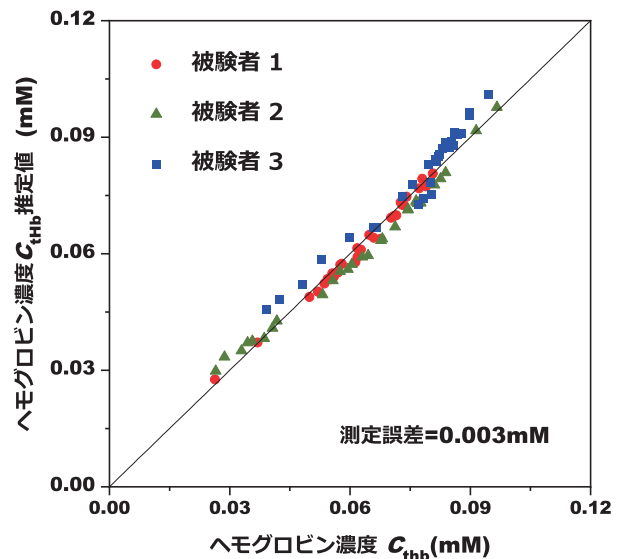


図2. 指先のヘモグロビン濃度の測定結果

ヘモグロビン濃度の僅かな変化に起因しており、その変化量は最大で0.032となる。また、② Abs_c は、測定プローブと測定部位の僅かな位置ずれに起因しており、呼吸による体全体の微動でも生じ、その変化量は最大で0.015となる。

こうした拍動や測定部位の微動に起因した吸光度の変化は、目標とする吸光度の測定誤差 0.01×10^{-2} に比べて150倍~300倍と遙かに大きく、また時間的な積算平均だけでは容易に抑えることができない。

3. 結言

ヘモグロビン濃度や血糖値等の血液成分の非侵襲計

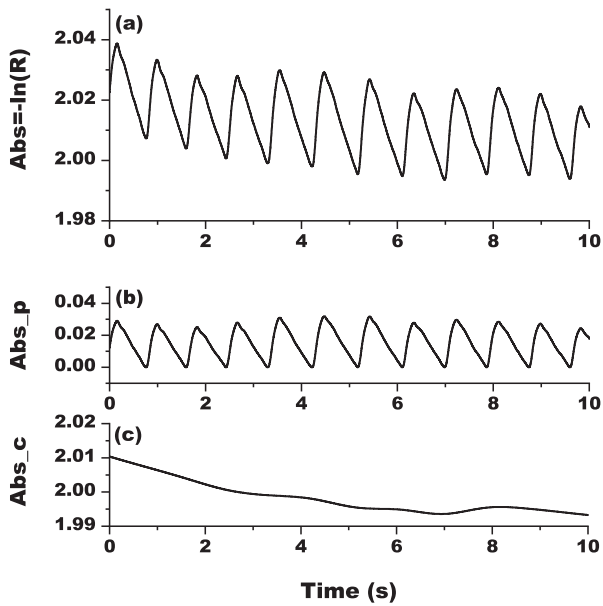


図3. 指先で測定した吸光度の時間変化

測手法についてTFDRSをベースに検討した。その結果、波長の異なる複数の相対吸光度比 γ の一次多項式によりヘモグロビン濃度や血糖値を実用的な精度で測定できることを検証した。しかしながら、拍動や測定部位の微動に起因した吸光度の変化量は目標とする吸光度の測定誤差 0.01×10^{-2} に比べて150倍～300倍と遙かに大きい。今後は、拍動等に影響されない測定手法を提案し、その実験的検証を行う。

参考文献

- [1] 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 Technology & Therapeutics*, Vol. 3, No. 3, pp. 357-365, 2001.
- [2] K. Maruo, M. Tsurugi, J. Chin, T. Ota, H. Arimoto, Y. Yamada, M. Tamura, M. Ishii, Y. Ozaki: “Noninvasive Blood Glucose Assay Using a Newly Developed Near-Infrared System”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 9, No. 2, pp. 322-330, 2003.
- [3] R. Kasahara, S. Kino, S. Soyama, and Y. Matsuura: “Noninvasive glucose monitoring using mid-infrared absorption spectroscopy based on a few wavenumbers”, *Biomedical Optics Express*, Vol. 9, No. 1, pp. 289-302, 2018.
- [4] J. W. Kang, Y. S. Park, H. Chang, W. Lee, S. P.

- Singh, W. Choi, L. H. Galindo, R. R. Dasari, S. H. Nam, J. Park, P. T. C. So: “Direct Observation of glucose fingerprint using in vivo Raman Spectroscopy”, *Science Advances*, Vol. 6, No. 4, pp. 1-8, 2020.
- [5] 下村義昭: “近赤外レーザーを用いた果実糖度の非破壊計測技術”, *レーザー研究*, Vol. 39, No. 4, pp. 233-238, 2011.
- [6] Y. Shimomura, S. Miki, T. Tajiri, and H. Tanaka: “Noninvasive Measurement of Absolute Hemodynamic Components in Human Tissue Using Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy”, *Proc. 22nd Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, pp. 274-275, 2009.

マルチスケール概念に基づく膜透過シミュレーションの研究（第2報）

工業材料・環境科 専門研究員 重光保博

化学工学の中心分野の一つである膜分離現象について、その分子レベルでの機構解明はプロセス制御の観点から重要な課題である。本研究では、連続体力学に基づくマクロ流体解析と分子レベルのマイクロ分子動力学シミュレーションの両観点を踏まえ、マルチスケール連成シミュレーション技術の開発とその膜透過シミュレーションへの展開を目標とする。

1. 緒言

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

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

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

前段研究「連成統合シミュレーション技術の開発と普及支援（平成27年度～平成29年度）」では、構造解析・流体解析ツールである「連成解析システム」を活用して構造流体連成シミュレーションの性能評価とCAE関連企業の技術支援と普及活動を行った^[3]（図1）。

さらに前段研究「複雑事象に対応した連成解析技術の開発（平成30年度～令和2年度）」では、マルチスケールシミュレーション環境の構築とその性能評価を目的として、（1）水分子の膜透過モデルに対するマクロ流体力学とマイ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^[4]。

本研究では、マルチスケール複雑事象である膜透過現象^[4]を解析対象とする。ミクロとマクロをつなぐ「スケールの壁」を克服するため、粗視化法や非平衡MD法などの新規手法が模索されている（図2）。

本年度報告では、ポリウレタン触媒を使用したケミカルリサイクル反応の反応機構解析を行った。

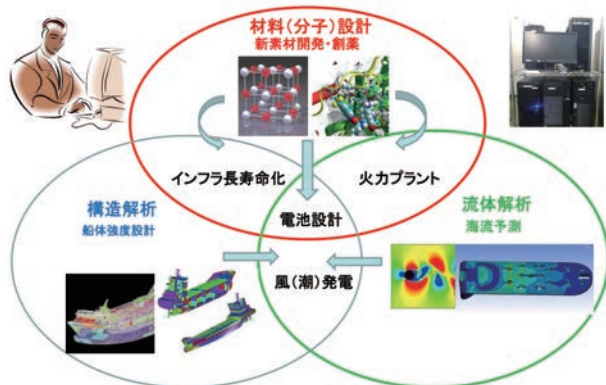


図1 連成解析のイメージ図

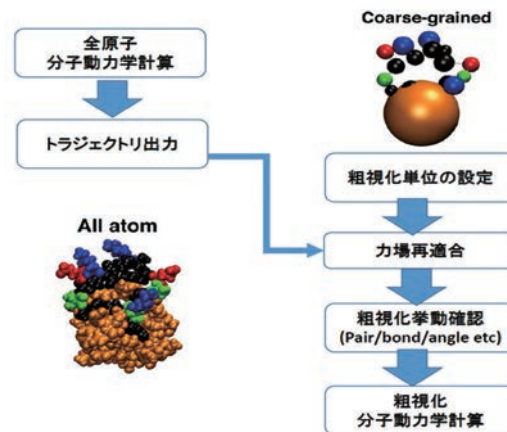


図2 MS-CG粗視化法のスキーム

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

SDGs を推進するグローバル潮流において、CO₂ を出発原料とする有用物質の化学合成や、有機廃棄物を再利用するケミカルリサイクル化学反応が注目されている。さらに、希少金属や有害金属を使わないメタルフリー有機触媒を用いた環境負荷の低い化学反応が求められている。化学的活性が低い CO₂ の変換は、希少金属触媒を用いて高温高压反応条件下で達成されているものの、このようなシビアな反応条件は工業プロセスとしてコスト的に実現が難しく、SDGs に貢献する実用化手法には至っていない。

最近、ポリウレタン触媒を用いた高変換効率・高ターンオーバーを達成した興味深い CO₂ ケミカルリサイクル反応が報告されている^{[5][6]}。比較的マイルドな反応条件で進行するメタルフリー反応であり、工業化されれば大きなインパクトが期待される。この反応の基礎的メカニズムを解明することを目的として、一連の量子化学計算を実行した (図3)。

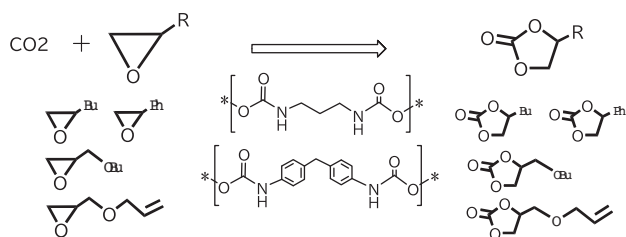


図3 ポリウレタン触媒を用いたケミカルリサイクル反応

2. 1 モデリング・計算手法

対象であるケミカルリサイクル反応は、各種ポリウレタン触媒を用いて、CO₂ とエポキシサイト誘導体から5員環カーボネート誘導体を生成するサイクル反応機構である。計算コスト制約のため、反応物は、エチレンオキシド (エポキシサイト誘導体) とエチレンカーボネート (5員環カーボネート誘導体) へそれぞれ簡易モデル化した。ポリウレタン触媒は、直鎖誘導体モノマーと環状誘導体モノマーへそれぞれ簡易モデル化し、アリール基の効果を解析した (図4)。触媒サイクル反応機構の量子化学解析には、Gaussian^[7] と GRRM17^[8] を組み合わせて用い、密度汎関数法 (DFT) には汎関数 M06-2X を採用した。溶媒効果は SCRF-SMD 法で考慮した。Preliminary test として、まず 3-21G 基底関数を用いた反応機構全体の定性的なエネルギープロファイ

ルを求めた。各ステップの安定体および遷移状態は GRRM/MC-AFIR, GRRM/DS-AFIR で求め、GRRM/LUP 経路を検証した。その後、6-31G(d) 基底関数を用いた GRRM/Repath で計算精度を上げて再検証を行った。

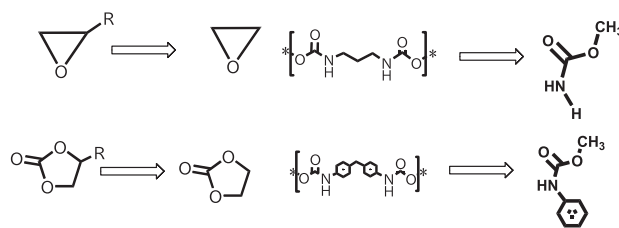


図4 反応物およびポリウレタン触媒の簡易モデル化

2. 2 解析結果

2. 2. 1 直鎖ポリウレタンモデル触媒

最も簡易なモデルケースとして、真空中での反応機構解析の結果を示す (図5)。反応は3ステップに分けられる。最初はポリウレタン簡易モデルであるメチルカルバメートへのエチレンオキシドの付加反応 (path-B)、次に CO₂ の付加反応 (path-C)、最後にメチルカルバメートが再生する過程でエチレンカーボネートが分離生成する (path-D)。Path-B では、直鎖中間体と環状中間体の2つの中間体からの経路が存在する。全反応ステップ (path-B/path-C/path-D) のうち、path-B の活性化障壁が最も高く、このステップが事実上の反応ボトルネックとなっている。活性化障壁がより低い直鎖中間体 (66 kcal/mol) を経由する経路が優先されると推定されるが、活性化障壁の差は約 4 kcal/mol と小さい。生成物は逆に環状中間体が約 3 kcal/mol 安定なため、両者は平衡下で共存していると考えられる。また、直鎖中間体には2つの互変異体 (imine 型/zwitterionic 型) が考えられるが、溶媒を考慮しない真空条件の計算では分極が大きい zwitterionic 型は安定に存在できないため見出せなかった。zwitterionic 型は反応に関与しないと推定される。また imine 型は分子内水素結合を形成して安定構造をとる (図6)。

次の path-C では、直鎖中間体と環状中間体の両方から出発する反応経路が存在するが、環状中間体経路の活性化障壁が顕著に低いため (約 12 kcal/mol)、この経路のみを経由すると推定される。直鎖中間体には2つの互変異体 (imine 型/zwitterionic 型) が推定されるが、path-B の生成物と同様、imine 型のみが見出された。

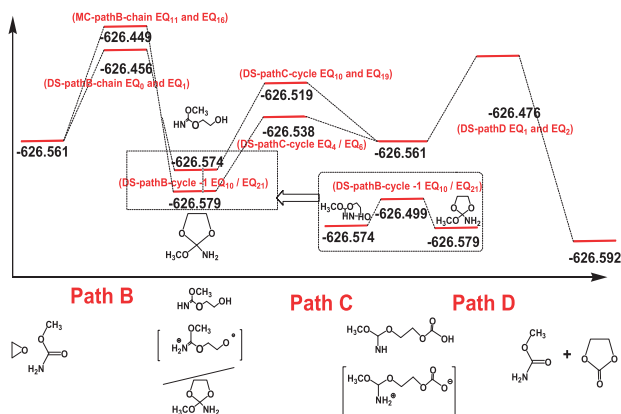


図5 直鎖ポリウレタンモデル触媒の反応機構 (気相)

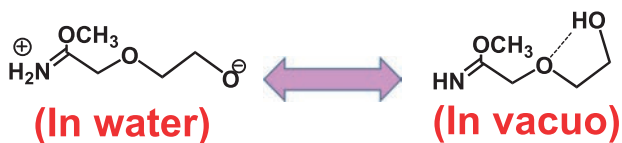


図6 直鎖ポリウレタンモデル触媒の変異 (溶媒/真空)

つまり、path-C の出発物である imine 型直鎖中間体と環状中間体は約 4.6 kcal/mol の反応障壁で隔てられて化学平衡を保ちつつも、前者から後者への変換がスムーズに生起して、path-C の反応が進行すると推定される。Path-D の出発物である imine 型直鎖中間体は、大きな活性化障壁 (約 53 kcal/mol) を経由して、最終生成物であるエチレンカーボネートを与える。

次に、水を仮想的溶媒として溶媒和効果を考慮した計算を行った (図7)。真空中との大きな違いは、zwitterionic 型中間体の反応への関与である。高い分極率を有する溶媒中では、zwitterionic 型電子構造が相対的に安定化されて系中に存在可能となる。path-B においては、imine 型遷移状態を経由する imine 型直鎖中間体への反応経路のみが見出され、zwitterionic 型中間体や環状中間体へ至る反応経路が見出されなかった。活性化障壁は約 41 kcal/mol であり、真空中 (約 66 kcal/mol) と比較して顕著な低下となり、真空中と比較して溶媒中のほうが容易に進行することが示唆される。次に path-C では、imine 型直鎖中間体と環状中間体からそれぞれ出発して生成物に至る反応経路が見出されたが、zwitterionic 型中間体から出発する経路は見出されなかった。imine 型直鎖中間体から出発する反応経路の活性化障壁は顕著に大きい (約 61 kcal/mol)、事実上は環状中間体から出発する経路が支配していると考えられる。また、Path-B 終了後に生成した zwitterionic 型中間体から imine 型直鎖中間体と

環状中間体へ異性化する反応経路が見出され、この 2 つの反応はほぼ活性化障壁がなく速やかに進行すると推定される。Path-D では、imine 型直鎖中間体から出発する反応経路のみが見出された。反応はいったん出発物である methylcarbamate と ethyleneoxide を与える stepwise 機構であり、methylcarbamate と ethylene carbonate を与える。活性化障壁はそれぞれ約 48 kcal/mol と約 47 kcal/mol と算出された。全反応経路のボトルネックは、path-B ではなく path-D となり、活性化障壁も低下したことから、溶媒効果は反応を促進すると推測される。

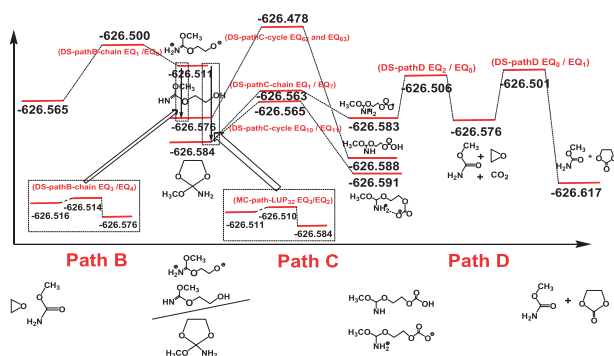


図7 直鎖ポリウレタンモデル触媒の反応機構 (水中)

2. 2. 2 環状ポリウレタンモデル触媒

次に、環状ポリウレタン触媒を使用した反応経路を解析した。真空中での反応機構解析の結果を示す (図8)。Path-B において、環状中間体に至る反応経路のみが見出され、zwitterionic 型直鎖中間体や imine 型直鎖中間体への経路は見出されなかった。Path-C、path-D も同様に環状中間体を経由する経路のみが見出された。したがって、反応の全体プロファイルは非常にシンプルである。反応のボトルネックは path-B となり、活性化障壁は約 73 kcal/mol となり、直鎖ポリウレタン触媒 (66 kcal/mol) よりも高くなった。

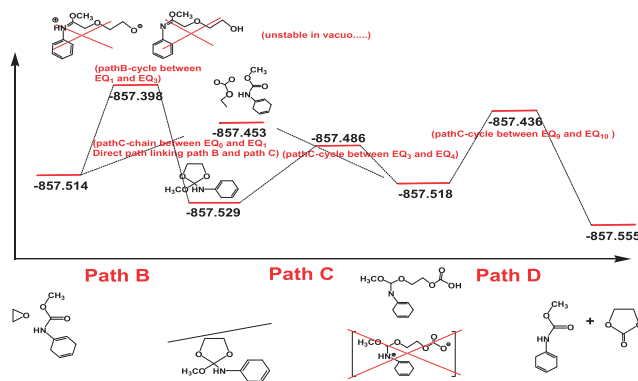


図8 環状ポリウレタンモデル触媒の反応機構 (気相)

次に、溶媒として水を考慮した計算を実行した(図9)。反応機構は真空中と同様で、zwitterionic型直鎖中間体やimine型直鎖中間体は関与せず、環状中間体のみが関与するシンプルな反応プロファイルが得られた。アリール基が直鎖中間体の関与を阻害する原因として、(1)アリール基の共鳴効果によるimine構造の不安定化(2)アリール基のバルク構造がimine構造の溶媒分極安定化を阻害することが考えられる。反応のボトルネックはpath-Bであり、活性化障壁は約68 kcal/molとなり、直鎖ポリウレタン触媒(41 kcal/mol)よりも顕著に高くなった。この計算結果は、環状ポリウレタン触媒の活性は直鎖ポリウレタン触媒と比較して顕著に低下する実験事実と一致する。

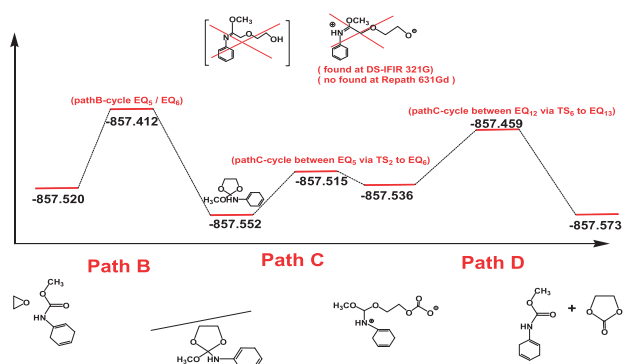


図9 環状ポリウレタンモデル触媒の反応機構(水中)

3. 結言

ポリウレタン触媒を用いた高変換効率・高ターンオーバーを達成した興味深いケミカルリサイクル反応の量子化学解析を行った。当該反応はCO₂とエポキシサイド誘導体から5員環カーボネート誘導体を与え、CO₂を資源とした工業中間体合成反応としてSDGs推進の観点からも非常に興味深い。本報告において、実験的に不明であった反応機構の全容解明を行い、特に、溶媒効果の重要性、zwitterionic型中間体の反応への関与、ポリウレタン触媒の活性へのアリール基有無の影響等について集中的な解析を行った。その結果、実験結果を裏付ける解析結果が得られ、量子化学計算の有効性が確認された。今後、量子化学計算と機械学習探索の両面からのアプローチを継続し、各種エポキシサイド誘導体とポリウレタン触媒の分子設計を最適化する計画である。

謝辞

ポリウレタン触媒ケミカルリサイクル反応の実験

データを提供・議論していただいた長崎大学大学院工学研究科の本九町卓助教に感謝する。本研究の一部は、自然科学研究機構計算科学研究センターのスーパーコンピュータシステム「NEC LX 高精度分子シミュレーター」を使用して実行された。

参考文献

- [1] 川崎恭治:「非平衡と相転移 -メソスケールの統計物理学」、朝倉書店、2000.
- [2] 重光保博:長崎県工業技術センター研究報告、49, pp. 27-30, 2020.
- [3] 重光保博:長崎県工業技術センター研究報告、50, pp. 21-26, 2021.
- [4] H. Ridgway, J. Orbell and S. Gray, *J. Membrane Sci.*, 524, pp. 436-448, 2017.
- [5] S. Motokucho, Y. Takenouchi, R. Sato, H. Morikawa, H. Nakatani, *ACS Sus. Chem&Eng.*, 8, pp. 4337-4340, 2020.
- [6] S. Motokucho, H. Morikawa, *Chem. Comm.*, 56, 10678-10681, 2020.
- [7] Gaussian; <https://gaussian.com/>, Accessed 2022.
- [8] GRRM; <https://iqce.jp/GRRM/>, Accessed 2022.

設計パラメータを用いたシミュレーション省力化システムの開発

(シミュレーション技術を用いた地場企業の設計工程支援)

工業材料・環境科 主任研究員 入江直樹

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

1. 緒言

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

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

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

これを受けて、本研究では形状の各設計パラメータが設計開発する機器の性能に及ぼす影響度を調査して自動的に各設計パラメータの最適値を探索するシステムを開発する。当該システムは3次元デジタル形状の作成、シミュレーションを用いた性能評価、最適な設

計パラメータを選出するソフトウェアから構成する。

令和4年度はシミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアを開発して令和3年度に試作した3次元デジタル形状作成ソフトウェア^[4]と組合せたシステムを検討した。当該システムは対象モデルの特定の寸法を指定することにより、自動的に3次元デジタル形状の作成、及び流体解析のシミュレーション結果を得ることができる機能を有しており、その有効性について報告する。

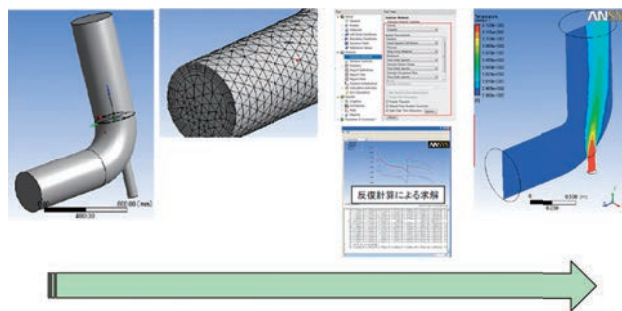


図1 計算機シミュレーション例

2. 実験方法と結果

2.1 3次元デジタル形状作成ソフトウェアの機能

3次元デジタル形状作成ソフトウェアは図2に示すように、当該ソフトウェアを実行することにより、初期形状として予め用意した3次元デジタル形状の寸法値を変更して所望の形状を作成する。当該ソフトウェアはSpaceClaim Scriptを用いて開発しており、変更する形状の寸法値をパラメータ化している。

2.2 シミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアの機能

シミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアは図3に示すように、当該ソフトウェアを実行することにより、対象の3次元形状に対してメッシュ作成、境界条件の付与、計算、計算結果の保存までの処理を自動で実施する。本研究においては計算結果の値をパラメータ化している。



図2 3次元デジタル形状作成ソフトウェアの機能

2.3 3次元デジタル形状作成ソフトウェアとシミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアを組合せたシステム開発

図4は3次元デジタル形状作成ソフトウェアとシミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアを組合せたシステムのダイアグラムを示しており、Microsoft Office 2019 Excel、Ansys Workbench(Ver. 2021R1)、Visual studio 2019 を用いて実行されるプログラムから構成されている。3次元デジタル形状作成ソフトウェアとシミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアはフレームワークであるAnsys Workbench上の要素アプリケーションとして作動する。手順は初期の3次元デジタル形状を作成して、その形状におけるメッシュ作成、境界条件の付与、計算、計算結果の保存を予め実施する。変更する形状の寸法と計算結果を図5に示すようにパラメータ化しており、特定の名前が付けられテーブルに表示される。当該テーブル上の寸法値を変更して再度読み込ませることにより変更した寸法値が形状に反映された後、メッシュ作成、境界条件の付与、計算が実施され、計算結果となるパラメータ値が変更される。



図3 シミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアの機能



図4 3次元デジタル形状作成ソフトウェアとシミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアを組合せたシステムのダイアグラム

以上の構成と機能を用いて、図4に示すように予めExcelに入力した所望の寸法値を取得するプログラムとAnsys Workbench上で3次元デジタル形状作成ソフトウェアとシミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアを作動させ、パラメータ化した寸法をExcelから取得した寸法値に変更して形状を更新し、計算結果を得るまでの処理を実施するシステムをVisual studio 2019のPythonを開発環境として開発した^[5-6]。当該処理を10回連続して繰り返した際に要した時間は約17分50秒であった。

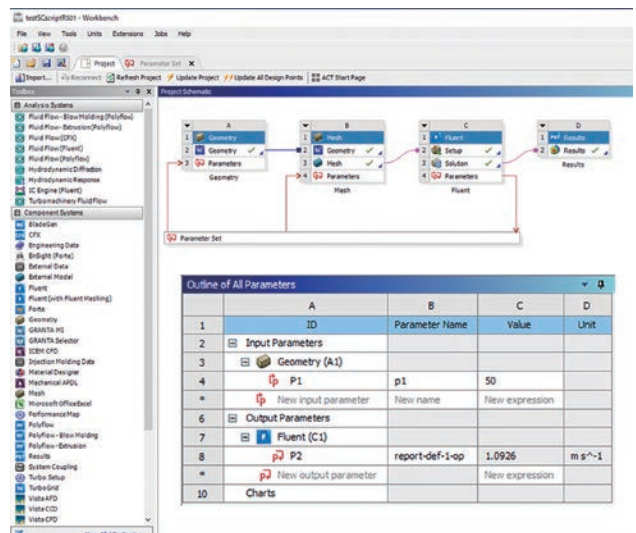


図5 形状寸法と計算結果のパラメータ化

3. 考察

Visual studio 2019のPythonを開発環境として3次元デジタル形状作成ソフトウェアとシミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアを組合せたシステムを開発した。3次元デジタル形状の特定の寸法値を変

用いた性能評価ソフトウェアを組合せたシステムを開発した。3次元デジタル形状の特定の寸法値を変

更、及び形状反映から計算結果を得るまでの時間は1回あたり約1分47秒であった。同様のシミュレーション処理を手作業にて実施した際に要した時間は約9分57秒であった。使用するパーソナルコンピュータの性能や3次元デジタル形状の複雑さ、計算の収束性などにも依存するが省力化の効果指標として測定した。

今回は比較的簡易な形状を用いて10回連続した当該処理を可能としたが、最もメッシュ作成が困難な形状や計算が収束しにくい形状については予め各処理が可能であることを事前検討した。

4. 結言

本研究の成果について以下に要約する。

- 1) 開発した3次元デジタル形状作成ソフトウェアとシミュレーションを用いた性能評価ソフトウェアを組合せたシステムはMicrosoft Office 2019 Excel、Ansys Workbench (Ver.2021R1)、Visual studio 2019 を用いて実行されるプログラムを構成として、予め用意した3次元デジタル形状の寸法値を所望の寸法値に変更して形状に反映後、メッシュ作成、計算、計算結果の保存までの一連のシミュレーション処理を自動で実施することが可能であった。
- 2) 形状寸法をパラメータとするパラメトリックスタディが可能となり、多数のシミュレーションを連続して実施可能となった。
- 3) 来年度は最適な設計パラメータを選出するソフトウェアを開発する予定にある。当該ソフトウェアは品質工学を用いており、シミュレーション処理を数十回にわたり実施する。本年度において開発したシステムを活用することにより最適な設計パラメータを選出するソフトウェアの開発を効率的に進めることができる。

参考文献

- [1] 山田：シミュレーションと数値計算の基礎、共立出版株式会社、2018. 9.
- [2] 高橋：CAD/CAM/CAE/RP 概論、鋳造工学、Vol. 86, No. 2, pp.170-175, 2014.
- [3] 吉本：有限要素法解析ソフト Ansys 工学解析入門 第3版、株式会社オーム社、2020. 10.
- [4] 入江：設計パラメータを用いたシミュレーション省力化システムの開発、長崎県工業技術センター研究報告、No. 51, pp. 41-42, 2022. 11.
- [5] 保科：Visual Studio パーフェクトガイド、株式会社技術評論社、2019. 7.
- [6] 中嶋：PythonでExcel、メール、Webを自動化する本、SBクリエイティブ株式会社、2021. 9.

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 専門研究員 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、その取り組みの一環として、安価な手法で微細気泡の個数密度管理をより正確・簡便に求める方法について検討を行ったので報告する。

1. 緒言

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

本研究は、金属加工業等の洗浄現場において、気泡の照射方法等の工夫により洗浄効率を高めることを目指す。一方、洗浄現場では、洗浄効率の向上だけではなく、作業性・安全性の向上、環境負荷低減、管理コスト削減などトータルメリットを考慮する必要がある。そこで、本報告は気泡の個数密度の安価な管理手法について検討したので述べる。

微細気泡の個数密度は、洗浄管理において重要な項目の一つであるが、正確な計測は難しく、計測機器も高額である。一方、産業洗浄の現場は、コストや手間をかけて正確な値を求めるよりも、およその量がわかればよい。これまでに、微細気泡の光散乱に関する理論解析を実施し、性状が安定なポリスチレン粒子を比較定量の基準試料とする簡易計測法を提案している^[1]。本研究では、更なる取り組みとして、気泡径分布を考慮するとともに、およその粒子径の把握のため、二色光を用いた測定方法について検討した。

2. 理論計算及び実験方法

2.1 微細気泡の散乱性の理論計算

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。これにより微細気泡と同様の散乱を示すポリスチレン粒子の調整条件を求めることがで

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

きる。これまでの取り組みでは、気泡径の分布(広がり)は無視できるものとし、散乱係数を計算している。本研究では、計算精度の向上のため粒子径の分布を考慮し、半値幅40 nm、平均粒子径100 nmの正規分布曲線を作成した。なお、半値幅の値については、Malvern Panalytical製ナノ粒子解析システムNanoSight(ナノサイト)を用いた実測値の近似により設定した。また、汎用的なレーザー光源を想定し、計算波長は515 nm及び635 nmとした。また、微細気泡の屈折率については、文献値により $n=1.25$ とした^[2]。

2.2 標準試料の調整

性状が不安定な気泡による計算結果の妥当性検証は、困難であり、検証用の試料としてThermo Fisher Scientific社製ポリスチレン粒子を使用した。粒子径は、70 nm、100 nm、150 nm、200 nm、600 nm、2,800 nm及び6,000 nmである。これらのポリスチレン粒子を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。

3. 結果及び考察

3.1 分布を考慮した微細気泡の散乱性の理論計算

図1に気泡の分布モデルおよび等価散乱係数をプ

ロットしたものを示す。波長は515 nm、粒子の個数密度は 1×10^{-4} 個/ μm^3 とした。分布を考慮した散乱係数は確立密度の積算により求めることができ、得られた計算結果をもとに調整したポリスチレン粒子溶液は、目視確認により微細気泡の散乱性と良い一致を示し、気泡の個数密度の簡易定量に有効であることを示した。

3. 2 二色光による粒子サイズの推定方法の検討

前項の結果は、溶液中に気泡だけ存在することを前提としている。そのため、製造現場等において他の粒子が混入した場合、気泡の個数密度を誤認するおそれがある。そこで、二色光を用いて粒子サイズの推定が可能か検証した。波長515 nm（青色）及び635 nm（赤色）、粒子径70 nm～6,000 nmの範囲で理論計算を実施した。図2に散乱強度の極座標表示および図3に二色波長の等価散乱係数比を示す。散乱光強度は個数密度、粒子径の両方に依存するため、単色光では区別がつかない。一方、青色光と赤色光の散乱強度比は、粒子径のみに依存するので微細気泡と異なる径の粒子が混入

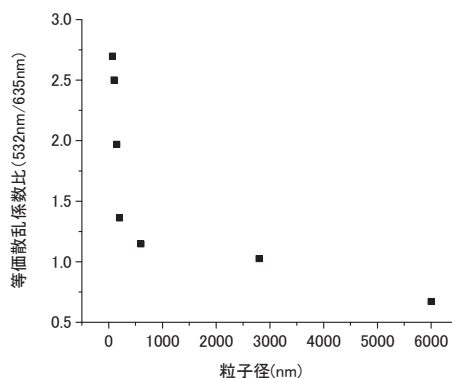


図3 等価散乱係数の二色光の比

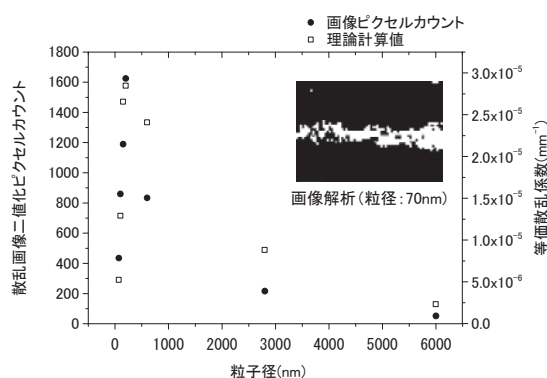


図4 画像データと理論計算値との比較

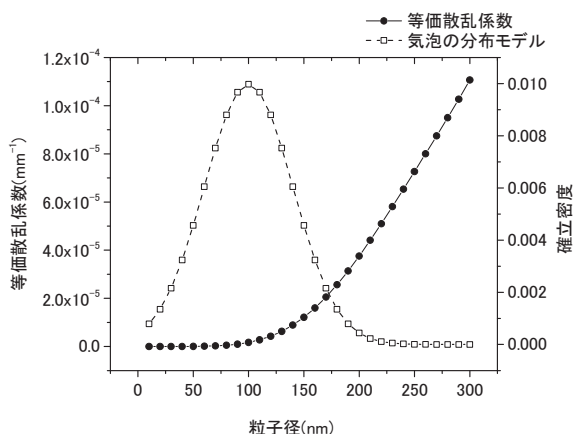


図1 気泡サイズと等価散乱係数

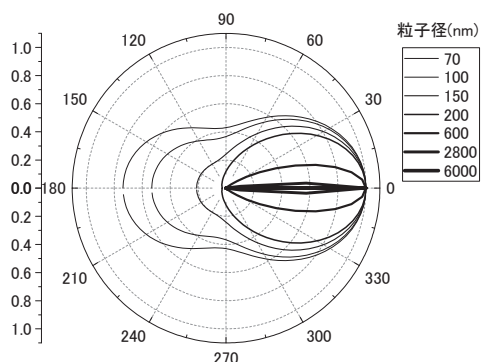


図2 散乱強度の極座標表示

した場合、判別可能であることを示した。

また、目視による比較定量だけではなく、散乱画像の画像処理による個数密度の定量検証も行った。図4は、波長515 nmのレーザー光（レーザーポインター）をポリスチレン粒子溶液に照射し、デジタルカメラで撮影した画像をスムージング・二値化後にピクセルカウントし、理論計算の値と比較したものである。これらの値は概ね一致し、デジタルカメラによる簡易的な定量が可能であることを示した。

4. 結言

分布を考慮した理論解析に基づく比較定量用ポリスチレン溶液は、微細気泡の散乱とよい一致を示した。二色光の散乱比により、およその粒子径が判別できることを示した。

参考文献

- [1] 三木：微細気泡を活用した浄化・洗浄システムに関する研究、長崎県工業技術センター研究報告、No. 51, pp. 48-52, 2022.
- [2] A. Sonoda: J. Soc. Powder Technol., 54, pp. 590-595, 2017.

木型と鋳物砂の改善による鋳造品の品質向上

機械加工科 主任研究員 大田 剛大
機械システム科 研究員 小笠原 耕太郎

本研究は、鋳造で繰り返し使用される木型および鋳物砂の品質を管理し、繰り返しの使用に伴う品質の劣化を改善することで鋳造品への影響を減らし、鋳造品の品質を向上させることを目指している。

本研究の3年目となる令和4年度の摩耗／欠損木型の修復手法の研究では、三次元計測点列群の抽出領域の点列群から判別した幾何形状から点列群との差異形状を生成する手法を検討した。また、磁選機導入に伴うクロマイトサンドの再利用の検討、各砂性状同士の関連性の強さについて調査した。

1. 緒言

鋳造は、中空で複雑な形状の部品や大型の部品を効率的に生産する技術であり、鋳造で生産された鋳物は振動の減衰能が優れているため大型の回転部品などに適用されている。さらに、プレス加工の端材などを材料に使うため資源の有効利用になっている。県内には鋳造企業が立地しており、受注先は広く県外にも広がっている。

鋳造は溶かした金属を鋳型に流し込み、冷却・凝固させる。このとき、鋳型の造型に木型と鋳物砂が使用される。この木型や鋳物砂は鋳造品の品質に大きく影響し、使用するにつれて状態が悪くなり鋳造品の品質が劣化する。これは、木型では使用時に生じる表面への摩耗や水分による形状変化があり、鋳物砂では再利用時に生じる熱や摩擦による割れ、付着物の残留があるためと考えられる。これらを防ぐために、木型では図面を基準にした手作業での修復を行っており、鋳物砂では経験的に新しい砂を補給して対策している現状にある。また、使用後の砂の処理も問題になっているため、磁選機により回収したクロマイトサンドの再利用を検討している。本研究では、これらの作業の効率化を目指す。

2. 実験方法

2.1 摩耗／欠損木型の検査、修復

摩耗、欠損した木型の修復は、目視、手計測で摩耗／欠損部分を判断し、木型図面を基準にしたパテ埋めや、機械加工した木片の当てはめ等の手作業により行われている。そのため、形状位置や寸法精度を維持するのは難しく、特に曲面形状部分の修正は困難で、また、これらの作業は手間の掛かるものとなっている。そこで、現在経験と勘で行われ手間の掛かる摩耗した木型の修復作業に、デジタル化、3Dプリンタ技

術を活用した検査、計測手法を導入し、効率化と高品質化を図る。検査・修復処理の流れは図1のとおりである。

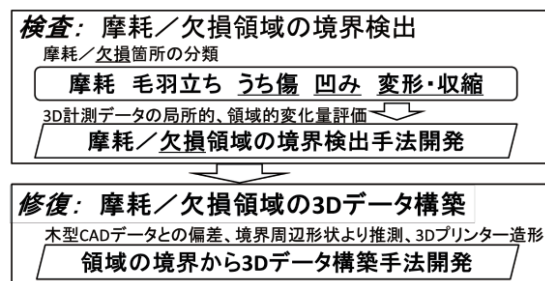


図1 全体処理の流れ

摩耗した木型の計測データを入力データとして、摩耗／欠損領域の境界を検出し、木型CADデータと摩耗データの偏差や境界内部及び周辺点列形状からの形状推測により3Dデータを構築し、3Dプリンタによる摩耗／欠損領域部分の造形を行う。令和2年度には、摩耗／欠損領域の境界を表す特徴境界の検出手法を開発した^[1]。令和3年度には、これにより得られた摩耗／欠損領域の境界となる特徴境界に、外部から接続する点列群から幾何形状の種類を判別し、判別した幾何形状から摩耗／欠損部位を生成する手法（摩耗／欠損領域の3Dデータ構築）を開発した^[2]。令和4年度には、以上2年間により得られた特徴境界と摩耗／欠損部位形状から、差異となる立体形状を生成する手法を検討した。

2.2 クロマイトサンドの耐火性評価試験

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、耐火性が高いクロマイトサンドを添加して鋳型の耐火性を上げているが、一方で使用した砂の処理が問題になっている。そこで、磁選機で回収したクロマイトサンド（以下再生

クロマイト) が再利用可能か耐火性評価試験^[2]を用いて検討した。なお、耐火性評価試験は、表1の試料を用いて試験を実施した。

表1 耐火性評価試験に用いた試料一覧

番号 (符号)	砂成分	砂の状態
① (□)	クロマイトサンド	未使用品
② (○)	再生クロマイト	磁選機導入後に回収した砂
③ (△)	再生クロマイト	②の2か月後に回収した砂
④ (◇)	再生クロマイト	②の4か月後に回収した砂

2.3 各砂性状同士の関連性調査

砂の管理において、砂性状を評価する試験は数多く存在しており、それらを全て管理することは難しい。そのため、管理する砂性状を各現場で絞り込む必要がある。そこで、これまで得られた砂性状のデータをもとにクラスター分析を実施して関連性の強さを調査した。なお、分析に使用したデータは、約2か月ごとに現場で採取した砂から得られた以下7種類の砂性状の測定値を用いた。また、分析の計算はウォード法を用いて実施した。

表2 分析した砂性状と試料形状

砂性状	試料形状
かさ密度	粒状
粒度 (指数)	粒状
水分量	粒状
強熱減量	粒状
通気度	標準試験片 (JIS Z 2601)
表面安定度	標準試験片 (JIS Z 2601)
圧縮強さ	標準試験片 (JIS Z 2601)

3. 結果

3.1 摩耗/欠損木型の検査、修復

特徴境界と摩耗/欠損部位形状から差異となる立体形状を生成処理の流れは図2のとおりである。

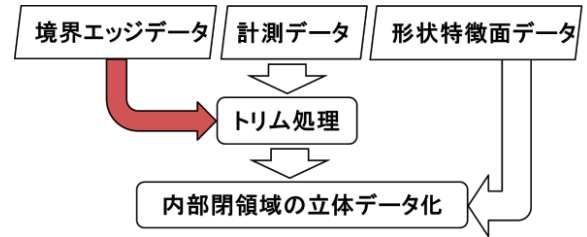


図2 摩耗欠損領域の3Dデータ構築処理

入力データとして、計測データと摩耗/欠損領域の境界エッジデータと、境界エッジに外側に隣接する計測データから領域内の形状特徴を判定し当て嵌められた形状特徴面データ、及び計測データを基にして、境界エッジデータより計測データをトリム処理し、境界エッジデータ内の計測データを得る。形状特徴面データと境界エッジデータ内の計測データにより囲まれた領域が破損領域となるので、これら両境界領域により囲まれた領域により立体領域のデータを構築する。以上の処理手順を、球形状の破損部に適用した3Dデータ構築処理の流れを示す(図3)。図3中の太枠で囲んだ形状が、構築された破損領域の立体データである。

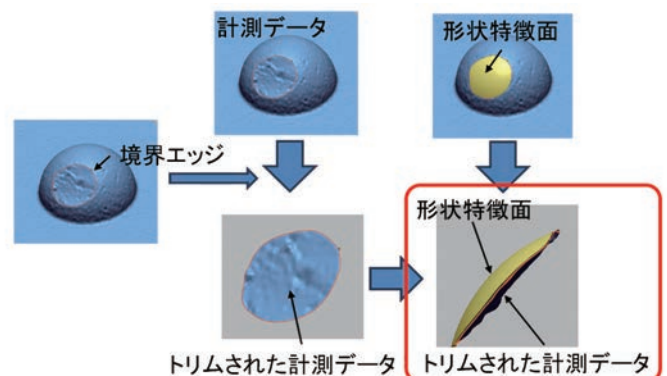


図3 球形状破損部に適用した3Dデータ構築処理

発泡に対し、複数の特徴形状(円柱、平面、円錐、回転体、自由曲面)の切削加工を行い(図4左図)、摩耗、破損部分を追加し(図4右図)、非接触三次元デジタル計測により形状計測を行い、計測データから境界エッジを抽出した結果が図5右である。

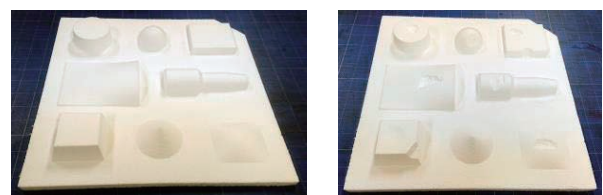


図4 発泡切削元サンプル(左)、
発泡摩耗/破損サンプル(右)

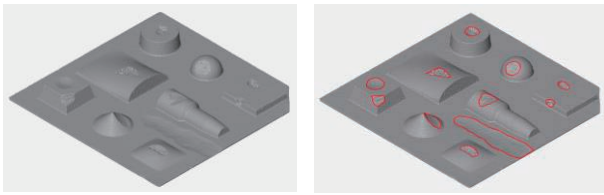


図5 発泡計測データ (左)、境界エッジ抽出 (右)

図5 (右) に対し、領域内を塞ぐ形状特徴面データ生成を行った結果が図6である。

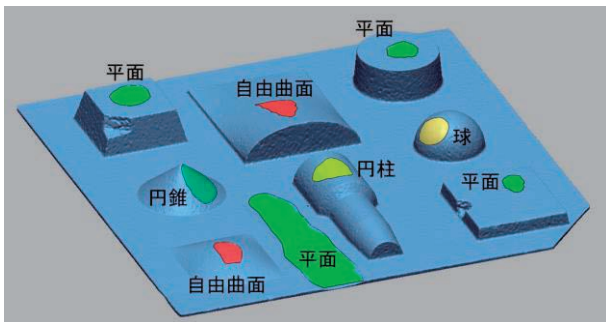


図6 形状特徴面データ生成結果

図5に示す計測データと境界エッジ及び図6に示す、形状特徴面データにより、ここに示した手法により構築した摩耗/欠損領域の3Dデータを図7に示す。

これらが破損部修復形状の3DCADデータとなる。



図7 破損部修復形状の3DCADデータ

3.2 クロマイトサンドの耐火性評価試験

図8に振とう後にふるい上に残った砂の割合 (以下質量残存率) と振とう時間の関係を示す。この試験は、耐火性が高い試料では質量残存率が高く、耐火性が低い試料では質量残存率は低い値となる。

図8より、全ての試料で30秒付近までは質量残存率の減りが大きく、その後は緩やかに減少した。また、120秒付近から質量残存率が一定の割合で減少した。さらに、360秒後の質量残存率は、③ (△)、④ (◇)、① (□)、② (○) の順で高い値を示した。

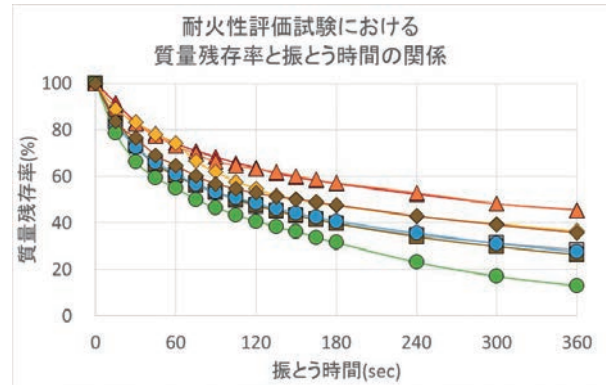


図8 加熱、冷却、振とう後ふるい上に残存した砂の割合変化

3.3 各砂性状同士の関連性調査

図9に、表2中の砂性状からクラスター分析を行った結果を示す。なお、図中の数値はワード法により算出したクラスター間の距離を示している。

図9より、かさ密度と表面安定度の関連性が最も強く、強熱減量においては他の性状との関連性が弱いことが確認できた。また、比較的関連性の強い砂性状ごとに3つのグループに分けた場合、図中のA、BおよびCのグループに分類された。

次に、図10および図11に、AおよびBグループ内でそれぞれ関連性が強い砂性状同士の測定結果を示す。

図10からは負の相関がみられ、図11からは正の相関が見られた。また、各砂性状における平均値からの測定値の差は、図10の方が小さく、図11の方が大きい値を示した。

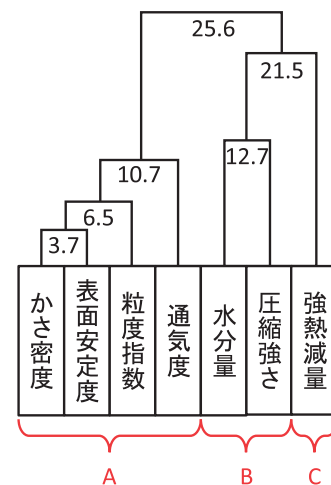


図9 クラスター分析による砂性状の関連性

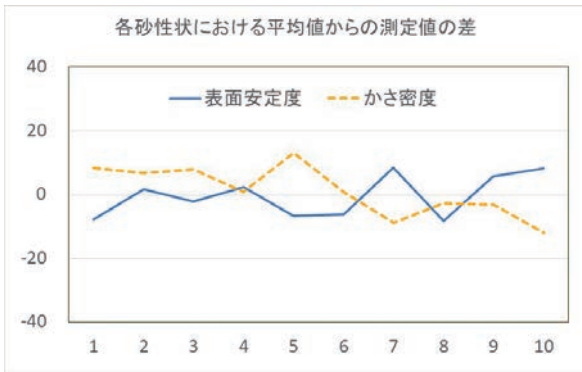


図10 Aグループ内で最も関連性が強い砂性状における平均値からの測定値の差

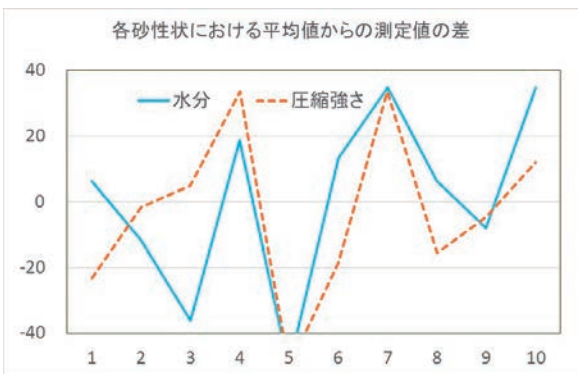


図11 Bグループ内で最も関連性が強い砂性状における平均値からの測定値の差

を行うため、修復した発泡サンプルを三次元デジタイザーで計測した計測データと元のCADデータを同じ位置に配置し、位置座標値の比較を行った偏差マップを作成した。その偏差を図14に示す。ほぼ0.3mm内で摩耗/欠損部分が推定できていることが確認できた。図10中の左下の薄い平面を当て嵌めた部分に偏差が0.5mmを超えた部分があるが、これは、破損部分の嵌め合わせ具合の影響と考えられるため、この点は今後の検討課題である。

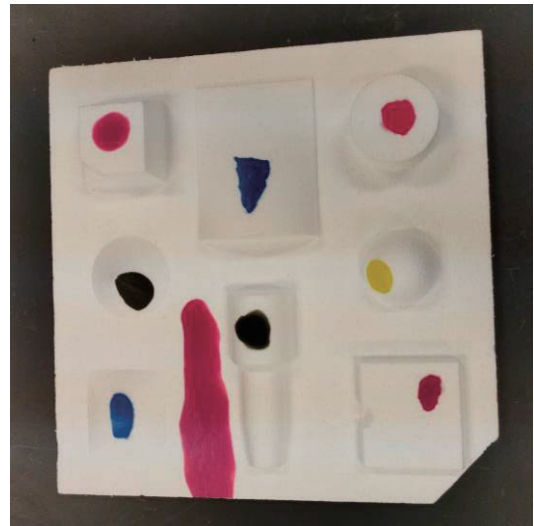


図13 修復した破損発泡サンプル

4. 考察

4.1 摩耗/欠損木型の検査、修復



図12 3Dプリンタで出力した破損部修復形状の造形サンプル

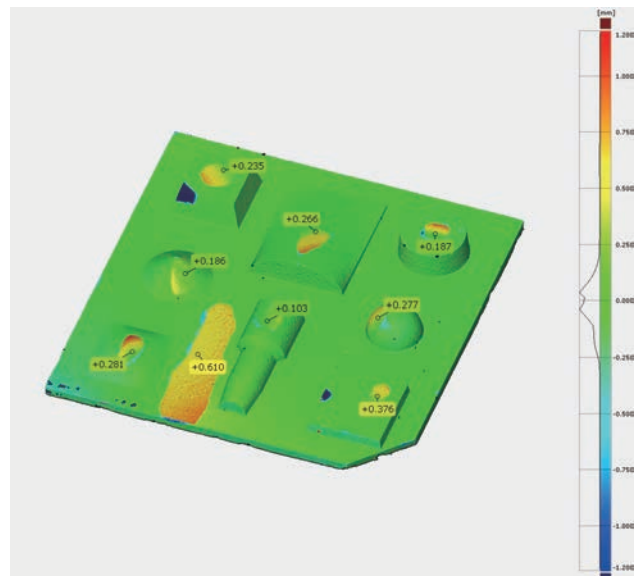


図14 修復した破損発泡サンプルと元CADデータの偏差

本手法の効果を検討するために、本手法を図7の3D CADデータより3Dプリンタにより破損部修復形状を図12のとおり造形し、造形物により破損発泡を修復した結果を図13に示す。また、修復状態の精度評価

4.2 クロマイトサンドの耐火性評価試験

本試験の結果から、③(△)、④(◇)の質量残存率が①(□)の未使用品より高いため、耐火性を向上させるうえでは再利用可能であると考えられた。しかし、

再利用した砂は、性状の劣化があるため再利用できる回数に上限がある。加えて、耐火性以外にも鑄造品の品質に影響を与える性状があり、それらの性状も併せて調査が必要である。また、② (○) の質量残存率は① (□) に比べて低い値を示した。これは、磁選機導入直後に回収した試料であったため、機械の動作が安定せず不純物等が混入し耐火性が低下したと考えられたが明確な原因については調査が必要である。

4. 3 各砂性状同士の関連性調査

クラスター分析の結果から、かさ密度と表面安定度の関連性が最も強いことが分かった。これは、かさ密度が大きいほどクロマイトサンド等の粒径の小さい砂が増加しているため、砂の粒径が表面の安定性に影響を出たと考えられた。また、関連性の強いグループ(A, B および C) 間では、成型した砂のそれぞれの性状とそれらに影響を与える粒子の性状が組み合わせられた結果になったと推定された。

次に、各グループ内で最も関連性が強い砂性状における平均値からの測定値の差では、図10では負の相関、図11では正の相関が得られた。これらのグラフからは、相関関係の強さの比較は難しく、その他の組合せも併せて調査が必要である。

5. 結言

5. 1 摩耗/欠損領域の3Dデータ構築

鑄造用の摩耗/欠損した木型の検査、修復を行うため、摩耗/欠損領域の3Dデータ構築を検討した。三次元計測点列群の抽出領域の点列群から判別した幾何形状から点列群との差異形状を生成する手法を検討した。摩耗/欠損部位を持つ発泡立体形状に適用実験を行い、摩耗/欠損領域に的確な修復立体形状を生成できることを確認した。今後は、実施の木型への適用実験を幅広く進め、手法の精度を高め、摩耗/欠損した木型のデジタル修復の実現を図っていく。

5. 2 クロマイトサンドの耐火性評価試験および各砂性状同士の関連性調査

クロマイトサンドを再利用するため、耐火性評価試験を実施し未使用の砂と磁選機で回収した砂を比較した。その結果、磁選機導入の2か月後から回収された再生クロマイトからは、未使用品と同等以上の耐火性であることが確認できた。また、これまでの砂性状データを用いてクラスター分析を実施した。その結果、

関連性の強い砂性状が確認できた。しかし、いずれも検証が不十分であることから、今後は、耐火性以外の砂性状の比較や性状を把握した砂を用いた鑄造実験により調査していく。

参考文献

- [1] 大田剛大、小笠原耕太郎：木型と鑄物砂の改善による鑄造品の品質向上、長崎県工業技術センター研究報告、No. 50, pp. 27-30, 2021.
- [2] 大田剛大、小笠原耕太郎：木型と鑄物砂の改善による鑄造品の品質向上、長崎県工業技術センター研究報告、No. 51, pp. 53-56, 2022.

県内食品産業の加工技術高度化に関する研究

(県内食品業界の加工技術の高度化や新製品開発に対する技術支援)

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

工業技術センターは食品開発に関する総合的な支援施設として、食品開発支援センターを新たに設置し令和3年度に開所した。本支援センターを円滑に運営するために、新規に導入した機器の活用条件の検討、導入機器の標準手順書の作成、ニーズ調査及び食品開発支援センターの紹介を行った。まず、新規に導入した加工及び分析機器について、農産物の搾汁、乾燥、粉碎、加工食品や農産物の品質評価など活用条件の検討を詳細に行った。次いで、機器の標準手順書については、令和元年及び2年度に導入した機器（75機種）について、利用者が使用できることを目的とした手順書を作成した。さらに、食品開発支援センターの紹介と企業のニーズ調査を行うために県内の食品企業の訪問（161件）を行うことにより、センターの利用促進に努めた。

1. 緒言

本県では、全国を上回るスピードで人口減少が進行しており、主要な原因である若年層の人口流出を抑止することが喫緊の課題となっている。県は、その対策として雇用対策や県民所得向上に取り組んでいるところである。工業技術センターでは、所得の向上及び雇用改善には県内製造業のさらなる振興が重要と考え、高い付加価値と競争力を有する製品開発を促進するために、研究開発・技術支援を実施している。平成23年度からは、ものづくり試作加工支援設備を整備し、技術支援をさらに充実・強化している。本県の食品製造業は、県内の全製造業に対して事業所数の34%、従業者数の27%を占めている^[1]。しかしながら、小規模事業所の割合が高く、製品の付加価値をより高めることが課題と考えられている。そこで、県は食品開発に関する総合的な支援施設として工業技術センターに食品開発支援センターを設置し、令和3年度に開所した。本研究では、食品開発支援センターに新しく導入する設備を活用し、加工技術の高度化を目指した技術開発を通して、県内食品製造業の新製品開発と高付加価値化を支援する。今回は、(1) 導入機器の活用条件の検討、(2) 機器の標準手順書の作成、(3) ニーズ調査及び活用事例の紹介を行ったので報告する。

2. 方法

2.1 導入機器の活用条件の検討

令和元年度に食品開発支援センターに導入した表1の分析機器を用いて、様々な食品を分析試料として

評価・解析するための分析条件を検討した。

また、令和2年度に食品開発支援センターに導入した食品加工機器（表2）の活用条件を検討した。各種の食品や農産物を対象として最適な加工条件を検討した。

表1 食品開発支援センターに導入した主な分析装置

No.	装置名
1	レーザー回折式粒度分布測定装置
2	卓上型電子顕微鏡
3	超純水装置
4	アミノ酸・有機酸分析システム
5	ビタミン分析システム
6	色差計
7	水分活性測定装置
8	水分計

表2 食品開発支援センターに導入した主な加工機器

No.	装置名
1	レトルト殺菌機
2	凍結乾燥機
3	熱風乾燥機
4	スチームコンベクションオーブン
5	ブライン冷凍機
6	真空フライヤー
7	インライン搾汁機
8	ハンマーミル

2. 2 機器の標準手順書の作成

食品加工並びに分析機器について、利用者が開放機器として正確かつ容易に使用できることを目的として、写真付きの標準手順書を作成した。

2. 3 ニーズ調査及び活用事例の紹介

企業ニーズの調査ならびに食品開発支援センターの紹介を行うことを目的として、県内食品関連企業などの訪問を行った。

3. 結果

3. 1 導入機器の活用条件の検討

導入した加工及び分析機器に関して、様々な食品試料に対応した加工・分析条件を検討した。主な事例を表3、表4に示す。

本検討では、まず食品の品質成分であるアミノ酸、有機酸、単糖及び二糖類、機能性成分であるγ-アミノ酪酸、ポリフェノール、イヌリンなどの分析条件を詳細に検討した。アミノ酸・有機酸並びにビタミン分析システムを用いて検討した結果、これら成分を精度よく分析することができた。他にも、食品の保存性の指

表3 分析条件を検討した主な事例

検討内容	使用機器
農産物の品質評価（有機酸、単糖及び二糖類、ポリフェノール、多糖類など）	ビタミン分析システム、アミノ酸・有機酸分析システム、分光光度計など
加工食品に含まれるビタミンC分析法の確立	ビタミン分析システム
調味料の品質評価（遊離アミノ酸、旨味など）	アミノ酸・有機酸分析システム、味認識装置など
菓子製品の食感と保存性の検討	クリープメーター、水分計など
発酵食品に含まれる機能性成分（アミノ酸誘導体）の測定	ビタミン分析システムなど
漬物製品の保存性検討	水分活性測定装置、温度ロガーなど
水産加工品の品質評価（遊離アミノ酸、核酸化合物など）	アミノ酸・有機酸分析システム、味認識装置など

表4 加工条件を検討した主な事例

検討内容	使用機器
農産物（柑橘など）の果汁製造	インライン搾汁機、パルパーフィニッシャー、圧搾式搾汁機など
農産物（トマト、柑橘、メロンなど）の乾燥	熱風乾燥機、凍結乾燥機、減圧乾燥機など
レトルト食品（畜肉加工品など）製造	レトルト殺菌機、真空包装機など
農産物（イチゴなど）の急速冷凍処理	ブラストチラー & ショックフリーザー、ブライン冷凍機など
真空フライヤーによる野菜チップス製造	真空フライヤー、油切り機など
農産物（柑橘、トマトなど）のペースト製造	搾汁機、ブrikサー、加圧・減圧攪拌機など
農産物を原料とした粉末の製造	ハンマーミル、気流式粉碎機、遊星型ボールミルなど

標となる水分や水分活性、食感を判断する破断強度などを正確に測定することが可能となった。

一方、加工条件の検討については、以下の項目を検討した。まず、搾汁、ペースト化の試験をトマト、柑橘などの各種農産物を対象として実施し、各種装置（搾汁；インライン搾汁機、圧搾式搾汁機、パルパーフィニッシャー、ペースト化；ブrikサー、多機能磨砕機）を用いて検討した。得られた果汁については、搾汁率、糖、酸などを測定し、果汁の品質を検討した。また、県産のトマト、メロン、柑橘などを数種の乾燥機（熱風、真空凍結、低温並びに減圧乾燥機）を用いて処理し、粉末、スライス品などの試作を行った。

次いで、レトルト殺菌については畜肉加工品、ボイル野菜などを高圧高温処理し、殺菌条件と味・風味との関係を検討した。さらに、真空フライヤーを用いた野菜チップス製造、加工食品の急速冷凍法なども検討し、詳細な調理条件を確立した。これら検討した条件はセンターを利用する事業者への技術指導などに有効に利用する予定である。

本研究で実施した分析及び加工条件の検討数を表5に示した。条件検討数の3年間の合計は335件であり、目標の180件を大きく超える件数を達成した。

表5 分析・加工条件検討数

	R2	R3	R4	合計
目標	22	76	82	180
実績	23	123	189	335

3. 2 機器の標準手順書の作成

令和元年及び2年度に導入した分析並びに加工機器 75 種について、利用者が開放機器として正確かつ容易に使用できることを目的とし、写真付きの手順書を作成した。本研究での作業手順書の作成数は計 75 件であり、数値目標 (75 件) に到達した。

表6 標準手順書の作成数

	R2	R3	R4	合計
目標	11	32	32	75
実績	11	32	32	75

例として、水分活性測定装置の手順書を図1、図2に、減圧乾燥機を図3から図5に示す。

水分活性測定装置測定手順

担当 玉屋 圭

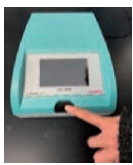

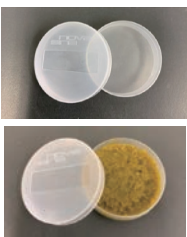

1		(装置名) Lab TOUCH-aw (Novasina社) 装置の正面の黒いボタンを押して、本体の電源を入れます。黒いボタンを押すと、カバーが開きますので、閉めて下さい。
2		立ち上げが終了すると、測定画面が表示されます。画面にタッチすると、メインメニュー画面 (右の写真) に変わります。
3		空の試料容器 (上の写真) に、試料を入れます (下の写真)。試料を入れる目安は、容器の高さの半分から8分目です。容器の中央に線が入っていますので、この線を越えるように試料を入れてください。
4		黒いボタンを押して、カバーを開けます。

図1 標準手順書 (水分活性測定装置 ; 1 ページ目)





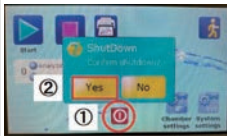
5		測定室中央の穴 (写真左) に、試料容器をセット (写真右) した後に、カバーを閉じます。
6		① 測定画面にタッチして、メインメニューを呼び出します。スタートボタン (左写真の赤丸) を押します。 ② Analyzingのランプが点滅し、分析中であることが確認できます。
7		測定が終了すると、「Stable」の表示が出ます。その下に、測定した試料の水分活性値 (aw) が表示されます。
8		カバーを開けて、試料容器を取り出します。次に測定したい試料がある場合、試料の入った容器をセットし、メインメニューのスタートボタンを押して測定を行います。
9		(測定を終了する時) ① カバーを閉じた後に、測定画面にタッチして、メインメニューを呼び出します。左写真のボタン (赤丸) を押します。 ② 測定画面に、シャットダウンの表示が出て来ます。「Yes」を押すと、電源オフになります。

図2 標準手順書 (水分活性測定装置 ; 2 ページ目)

減圧乾燥機測定手順

0		(減圧乾燥機の構成) ヤマト科学 (株) 製 角型真空定温乾燥器 DP610 冷却トラップ CA801 空冷式ドライ真空ポンプ PK250-2
1		<運転開始> (冷却トラップの立ち上げ) ・主電源 (右側面) をON (冷却ファンが作動) にする。 ・オレンジ色のスイッチ (正面) をON (約3分後に冷凍機が作動) にする。⇒表示温度がマイナスまで下がるまで待つ (10-15分程度)
2		(真空ポンプの立ち上げ) *この前までに、乾燥したい試料を乾燥器に入れておく。 ・バージバルブ (左側) とポンプバルブ (右側) がCLOSEになっていることを確認する。
		(真空ポンプは、乾燥器の下部に配置されている。) ・乾燥器の下方に装備されている真空ポンプの主電源をON (左写真の赤丸) にする。

図3 標準手順書 (減圧乾燥機 ; 1 ページ目)

		<ul style="list-style-type: none"> ・ポンプバルブを左に45度回転し、OPEN (チャンバーが減圧になる) にする。 
3		<p>(乾燥機の立ち上げ)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・右側面の主電源をONにする。 ・緑のパワースイッチ (赤丸) を2秒以上長押しすると、温度の実測値と設定値が表示される。 <p>(温度の設定)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・エンターキー (青丸) を押す。 ・◀マークのボタン (緑四角) を押して設定する桁の位置を変えて、△▽マークを押して設定温度を入力する。 ・エンターキーを再度押すと温度が登録される。 ・Modeボタン (水色四角) を押すと【定常運転/プログラム運転/オートスタート/オートストップ】を切り替えられる。 
4		<p>(安全装置 (独立過昇防止器) の温度設定)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アップダウンキー (赤四角) を押して、設定温度の+30°Cとなるように設定する。 *エラーが出た場合は、乾燥器の主電源を落とす再起動した後に、再設定する。

図4 標準手順書 (減圧乾燥機 ; 2 ページ目)

5		<p>(昇温開始)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・start/stopボタン (赤丸) を押すと、ヒーターの出力ランプが点灯し、昇温が開始される。
6		<p><運転停止></p> <p>(本体の停止)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・start/stopボタン (赤丸) を押す (ヒーターが止まる) ・パワースイッチ (青丸) を押す。
7		<p>(チャンバーを大気圧に戻す)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ポンプバルブをCLOSEにした (右に45度回転) 後に、バージバルブをOPEN (左に45度回転) にする。チャンバー内に空気が取り込まれて大気圧に戻る。 ・音が止んで圧力計が右に振り切るまで待つ。 ・ポンプバルブをOPEN (左に45度回転) にする。 ・真空ポンプの電源をOFFにする。 ・ポンプバルブ、バージバルブをCLOSE (右に45度回転) にする。
8		<p>(冷却トラップの停止)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・オレンジのスイッチをOFFにする。 ・主電源 (右側面) をOFFにする。 ・トラップの中の氷を解凍した後に、装置右側のホース (写真下) から水を排出する。 

図5 標準手順書 (減圧乾燥機 ; 3 ページ目)

3. 3 ニーズ調査及び食品開発支援センターの紹介

食品開発支援センターの紹介並びに企業のニーズ調査を行うために、企業訪問と現地技術支援を行った。

本研究での実施件数は企業訪問が 55 件、現地技術支援が 106 件である。数値目標として両者の合計を設定しており 3 年間の実績は 161 件となることから、目標 (120 件) を達成した。

表7 企業訪問及び現地技術支援の実施件数 (内訳)

	R2	R3	R4	合計
企業訪問	19	17	19	55
現地技術支援	25	42	39	106

表8 企業訪問及び現地技術支援の実施件数

	R2	R3	R4	合計
目標	40	40	40	120
実績	44	59	58	161

また、ニーズ調査の結果、食品開発支援センターへの要望として以下のようなものが得られた。

- ・「センターの装置を利用すると、こういった製品が出来上がるか」を示す事例をまとめた冊子を作成し、配布してほしい。
- ・加工食品を開発するには、包装容器、パッケージデザインなど製品を完成させるのに必要な要素がある。これらを専門とする業者をセンターで紹介してほしい。
- ・開発した製品をいきなり販売するのはなかなか難しい。売れるかどうかの反応を見るために、試験販売を実施することは重要である。センターで、販売可能な試作品を製造できれば意義がある。

これら要望に対しては、以下の対応を行った。

- ・センターが支援した製品開発事例をまとめた資料 (図6) の作成・配布を行い、センターの利用促進に努めた。
- ・センターに販路開拓、包装容器、パッケージデザインなどの外部専門家を紹介する制度を創設し、

利用者からの要望があった際は紹介を行った。
 ・利用者が開発した製品の試験販売を目的として、センターの占有使用を開始し、小ロットの製造を計9件実施した。

表9 共同技術開発の実施件数

	R2	R3	R4	合計
目標	6	8	8	22
実績	18	15	11	44

支援により商品化に至った開発品 (R3~R4)

◆生産者による新商品開発 (農商工連携含む)

- ゆでなくていーもん (エムビーフーズ) じゃがいもをレトルト殺菌
- レモンケーキ、島原レモン麺 (はじめ農園) ベースト化したレモン果実を使用
- ORGANIC DECAF GREEN TEA (北村製茶) 市販の緑茶よりカフェイン量を半分以下に

◆食品製造業者の新商品開発 (加工支援)

- 原城トマトそうめん (小林甚製麺) 原城トマト果汁を練りこんだそうめん
- 玄米粉deメープルクッキー (シエスタ) こだわりの米粉を使用したクッキー
- まるごと檸檬飴 (ママン・ガトー) レモン果実を粉末化し飴に加工

◆食品製造業者の新商品開発 (分析支援)

- クエ鍋セット (リンガーハット) 県産クエの味評価を実施
- 大村こつぶひらいてクッキー (フルカワ) 大村産の落花生の味を評価

◆加工機器選定支援

- しょうが糖 (きらく大村) 薄切りショウガの糖菓子

図6 センターの支援事例をまとめた資料

その他にも、県産農産物を用いたレトルト品の開発、加工食品の賞味期限の延長を目的とした殺菌条件の検討、果物などの急速冷凍品の開発、ドライフルーツの開発、農産物を用いた菓子の開発、野菜を練りこんだ麺の開発などに関する相談が寄せられた。これら相談に関しては、試作工程、使用する設備などの打ち合わせを行った後に、試作を企業と進めた。

また令和4年度も技術セミナーを開催し、加工食品開発、粒子径分布測定、粉碎、乾燥、搾汁、アミノ酸分析についての6件を実施した。

さらに、共同技術開発と試作件数を目標に設定することにより、食品事業者によるセンターの利用促進を試みた。共同技術開発はセンターが県内企業や生産者で行う簡易的な共同研究であり、本研究では県内の食品事業者と44件(目標;22件)を実施した。

試作については、本研究で事業者などがセンターの設備を利用した件数は計124件であり、目標の79件を大きくクリアし、センターの設備利用促進を達成することができた。

表10 試作の実施件数

	R2	R3	R4	合計
目標	-	38	41	79
実績	-	64	60	124

4. 結言

県は工業技術センターに食品開発支援センターの設置を決定し、令和3年度に開所した。

本研究では、センターに新しく導入した設備を用いて加工技術の高度化を実施することにより、県内食品製造業による新製品開発の促進と製品の高付加価値化を試みた。

本研究では、導入機器の活用条件の検討、機器の標準手順書の作成、ニーズ調査及び食品開発支援センターの紹介を行った。その結果、機器活用条件の検討(335件;目標数値180件)、機器の標準手順書の作成(75件;目標数値75件)、ニーズ調査及び食品開発支援センターの紹介(161件;目標数値120件)、共同技術開発件数(44件;目標数値22件)、試作件数(124件;目標数値79件)といずれの項目においても数値目標を達成した。

今後も県内食品企業へのセンター紹介を行うことにより導入設備の利用を促進し、県内企業の高付加価値かつ競争力を有する製品開発を支援する。

参考文献

- [1] 長崎県統計課、2020年工業統計調査結果確報調査結果の概要【資料2】
<https://www.pref.nagasaki.jp/object/kenkaranooshirase/oshirase/522342.html>, Accessed 2023.

位置図



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

発行日：令和5年11月30日

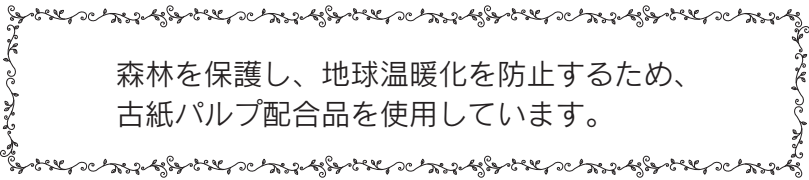
発行所：長崎県工業技術センター

〒856-0026 大村市池田2丁目1303番地8

TEL 0957-52-1133

FAX 0957-52-1136

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



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