

I S S N 0916-6726

令和3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. 51

長崎県工業技術センター

INDUSTRIAL TECHNOLOGY CENTER OF NAGASAKI

目 次

1. 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	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	三 木 伸 一
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	6	
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
3. AIを用いた監視装置の開発	10	
機械システム科	科 長	田 口 喜 祥
機械システム科	主任研究員	久保田 慎 一
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	16	
機械システム科	主任研究員	小 楠 進 一
5. 機械学習を用いたロボット関連製品の制御技術の開発	18	
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	23	
機械システム科	主任研究員	久保田 慎 一
7. 生体組成の非侵襲計測技術の開発	27	
電子情報科	科 長	下 村 義 昭
電子情報科	主任研究員	田 尻 健 志
8. 水素ガスの光学式検知技術の開発	32	
電子情報科	主任研究員	田 尻 健 志
9. レーザー樹脂溶着の高品質化に関する研究	34	
電子情報科	主任研究員	田 中 博 樹
10. 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（第一報）	36	
工業材料・環境科	専門研究員	重 光 保 博

11. 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.....	41
工業材料・環境科	主任研究員 入江直樹
12. 海水魚用展示蓄養水槽の開発.....	43
研究企画課	課長 大脇博樹
13. 微細気泡を活用した浄化・洗浄システムに関する研究.....	48
機械加工科	主任研究員 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.....	53
機械加工科	主任研究員 大田剛大
電子情報科	専門研究員 小笠原耕太郎
15. 航空宇宙産業に向けた耐熱合金の切削加工技術の開発.....	57
機械加工科	研究員 梅木宣明
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
16. 県内食品産業の加工技術高度化に関する研究.....	60
食品開発支援センター	専門研究員 玉屋圭
食品開発支援センター	センター長 河村俊哉
食品開発支援センター	専門研究員 宮田裕次
食品開発支援センター	主任研究員 土谷大輔
食品開発支援センター	主任研究員 井内智美
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	主任研究員 中山久之
食品開発支援センター	主任研究員 森友美

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

(航空宇宙機器用材料の切削加工における加工時間の短縮、加工トラブルの予測および脱脂技術の確立)

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	三 木 伸 一
長崎大学	情報データ科学部 教 授	小 林 透
長崎大学	情報データ科学部 准 教 授	荒 井 研 一
システムファイブ株式会社	代表取締役	佐 藤 康 彦
システムファイブ株式会社	システム技術部 マネージャー	水 野 勇 一

本研究は、切削加工に取り組んでいる県内企業の航空宇宙関連産業への新規参入および取引拡大を技術面から後押しすることを目的としており、①切削加工シミュレーションによる高能率加工技術の開発、②加工トラブルを予測する知能化ワーク固定ジグの開発、および③切削加工後の脱脂技術（洗浄技術）の三つの技術開発に取り組むことで、航空宇宙機器用材料の切削加工に関する県内企業の技術力向上を目指している。

本報告は②に関連し、AI技術を活用して加工トラブルを予測する知能化ワーク固定ジグについて報告する。

1. 緒言

航空宇宙関連産業は大きな成長産業として注目されており、長崎県では重点政策として、県内企業の航空宇宙関連産業への新規参入支援および取引拡大支援に取り組んでいる。本研究は切削加工の高度化に取り組んでいる県内企業の航空宇宙関連産業への新規参入および取引拡大を技術面から後押しするものである。航空宇宙機器用材料の切削加工に関する技術開発として、①切削加工シミュレーションによる高能率加工技術の開発、②加工トラブルを予測する知能化ワーク固定ジグの開発、および③切削加工後の脱脂技術（洗浄技術）の開発に取り組む。

①切削加工シミュレーションによる高能率加工技術の開発に関連し、令和元年度は、切削加工シミュレーションの精度向上を目的とした伝熱パラメータの取得について報告し^[1]、令和二年度は、取得した伝熱パラメータを用いて、航空宇宙機器用材料切削時の工具温度の見える化に取り組んだ結果について報告した^[2]。

本報では、②加工トラブルを予測する知能化ワーク固定ジグの開発について報告する。航空宇宙機器用材料は難削材であるために加工トラブルが生じやすく、さらに、チタン合金材料等の価格が高価であるために誤作の発生は多大な損失となる。

航空宇宙機器用材料の切削加工は切りくずの噛み込み等による突発的な工具トラブルが生じやすく、刃先の状態に注意しながら慎重に切削加工を行っている。

加工中の工具は切りくずやクーラントの飛散により目視で確認することができないため、加工現場のオペレータは主に切削音の変化から工具の状態を感じ取る必要がある、その結果、非効率的な作業となっている。

また、航空機機体部品に使用されるチタン合金材料は鍛造によるニアネットシェイプ材として支給されるものもあり、材料内部の残留応力が切削加工後に許容できないワークひずみを生じさせる場合がある。ワークひずみが生じた場合は機械的な矯正が余儀なくされるとともに、その対策としては加工途中に工作機械を停止してワークの固定状態を確認し、必要に応じてボルトの再締付等の調整をしなければならない。

本研究は、上記2つの加工トラブル予測を目的とし、工具異常の見える化とワークひずみの見える化に取り組んだ。

2. 実験方法

2.1 工具異常の見える化

加工現場のオペレータが工具状態を把握するために用いる情報は、主に切削音の変化と CNC 装置のモニタに表示される主軸ロードメータの値である。そのため、今回のシステムには切削音を集音するためのマイクロホン、音との関係が深い振動を計測するための加速度計を用いた。さらに、主軸ロードメータ信号をサーボアンプから取得することとした。

使用したマイクロホンの仕様を表1に、加速度計の

仕様を表2に示す。

サーボアンプ（ファナック株製スピンドルアンプ aiSP30）からの主軸ロードメータ信号を電圧信号として取得するために、ファナック株製スピンドルチェックボード（A06B-6078-H001）を使用した。

スピンドルチェックボードを用いることにより、各種信号波形や内部データ等を観測することが可能となる。

表1 マイクロホンの仕様

メーカー	PCB社
型式	378B02
音場	自由音場型
感度	50mV/Pa
ダイナミックレンジ	10dB ~ 135dB

表2 加速度計の仕様

メーカー	PCB社
型式	M608A11
測定範囲	±490 m/s ²
感度	10.2 mV/(m/s ²)
周波数範囲	0.5 Hz ~ 10000 Hz

2.2 ワークひずみの見える化

ワークひずみを見る化する手段として、加工中のワークの変形を直接的に測定する方法と、クランプ力（ボルトの締付力等）の変化を測定する方法について検討した。

加工中のワーク近傍は切りくずの堆積と高圧クーラントの噴射を受けるため、ワークの変形を直接的に測定する変位センサには高い耐環境性が求められる。表3に各種変位センサの検討結果を示す。

耐クーラント環境性は渦電流式変位計が優れ、耐切りくず堆積環境性は接触式のリニアゲージが優れる。今回は図1に示すとおり、渦電流式変位計にプランジャ機構を組み合わせることで両者の優位性を併せ持った変位測定方法を採用した。使用した渦電流式変位センサは株電子応用製のアンプ内蔵型センサ（ML-06）である。

クランプ力の変化を測定する手法として、クランプ力の作用する場所に圧縮形のロードセルを組み込む手法が考えられる。しかし、ロードセルが介在することでワークのクランプ剛性が低下する懸念が生じるため、加工治具への組み込みは不向きである。そこで今回は

図2に示すとおり、スタッドボルトに穴をあけ、ボルトの軸力用箔ひずみゲージ（共和電業製 KFB-1.5-120-C20-11）を埋め込むことでクランプ力を測定することとした。この方法は、ゲージが接着剤により完全に被覆されるため、耐クーラント環境および耐切りくず堆積環境の面でも有利となる。

表3 変位センサの比較

変位測定原理	クーラント環境	切りくず堆積環境	センサヘッドサイズ
光学式	測定不可	測定不可	30mm×70mm×70mm程度 (三角測量式)
渦電流式	測定可	測定不可	直径10mm×長さ20mm程度
超音波式	測定不可	測定不可	直径20mm×長さ70mm程度
リニアゲージ	仕様による	測定可	直径10mm×長さ100mm程度 (ペンシルタイプ)

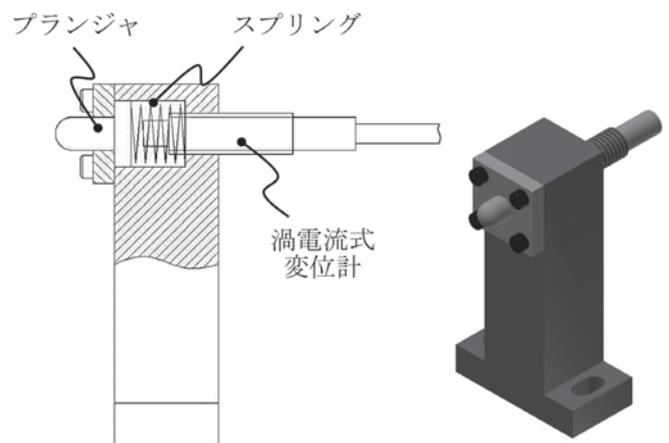


図1 変位測定ユニット

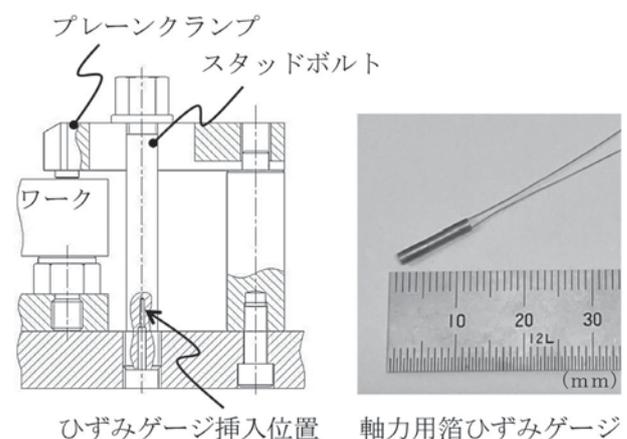


図2 クランプ力の測定

2.3 切削実験

切削実験に用いるワークは幅 200 mm、長さ 200 mm、厚さ 40 mm のステンレス鋼板 (SUS304) とした。SUS304 はチタン合金と同様に熱伝導率が低いことに起因する難削性をもった材料であるとともに、残留応力開放によるひずみの問題も生じやすい材料である。図 3 にワークの加工形状を示す。加工形状は切りくずの噛み込みトラブルが生じやすい掘り込み形状とし、壁面および底面はひずみが顕著に表れるように板厚 3.0 mm の薄肉形状とした。

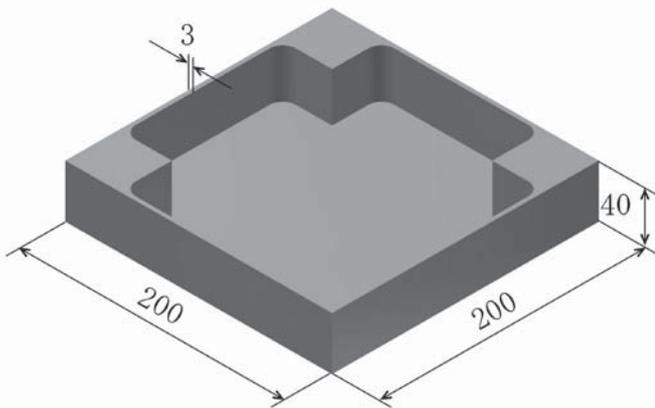


図3 ワーク加工形状

変位測定ユニットおよび軸力用箔ひずみゲージを組み込んだワーク固定ジグを図 4 に示す。変位測定ユニットはワーク側面の 4 か所とワーク底面の 1 か所の計 5 か所に配置した。軸力用箔ひずみゲージを挿入したスタッドボルトはワーク角部の 4 か所に配置した。

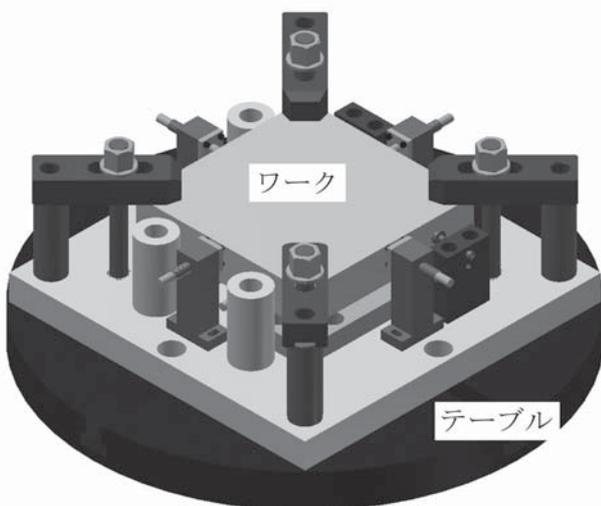


図4 ワーク固定ジグ

切削音を集音するためのマイクロホンは、マシニングセンタ機内のクーラントのしぶきが当たらない位置

に配置し、マシニングセンタの振動が伝わらないように緩衝材を介して取り付けした。加速度計は主軸頭にマグネットで取り付けした。マイクロホンと加速度計の設置状況を図 5 に示す。

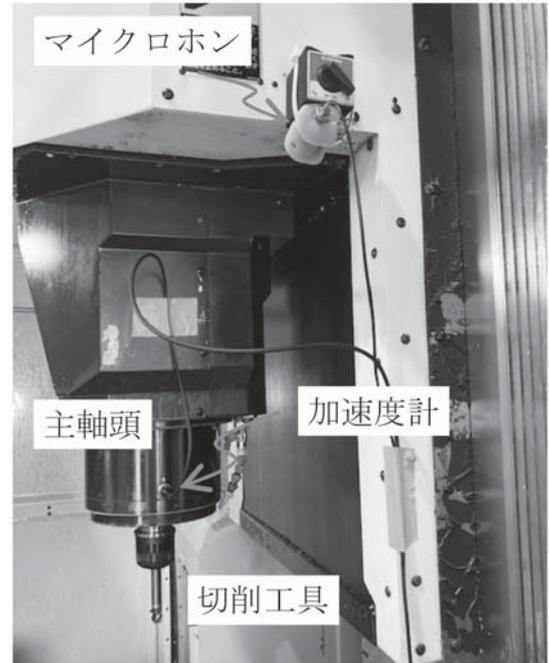


図5 マイクロホンおよび加速度計の設置状況

切削実験の条件を表 4 に示す。使用工具は直径 16 mm の 4 枚刃エンドミルでヘッド交換式を採用した。軸方向切込みは 9.25 mm とし、1 個のワークを 4 層に分けて掘り込み加工していく。1 層の加工時間は約 60 分である。1 層加工するごとに工具の刃先状態をマイクロスコープで観察した。

マイクロホンおよび加速度計のサンプリング速度は 10kHz とした。

表4 実験条件

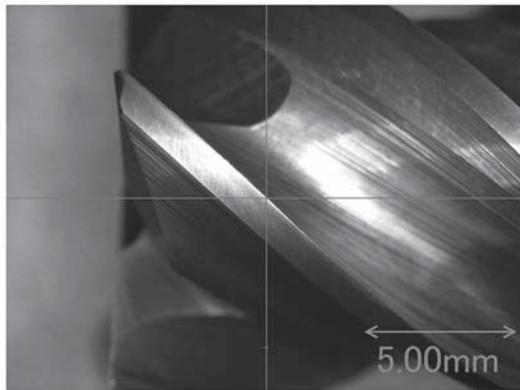
被削材	SUS304(未焼鈍材、焼鈍材)
使用工具	三菱マテリアル ヘッド交換式エンドミル IMXC4HV160R05016
工具径	φ 16 mm
刃数	4
工具突出し	80 mm
工具回転数	1200 min ⁻¹
送り速度	345 mm/min
軸方向切込み	9.25 mm
径方向切込み	1.3 mm

3. 結果と考察

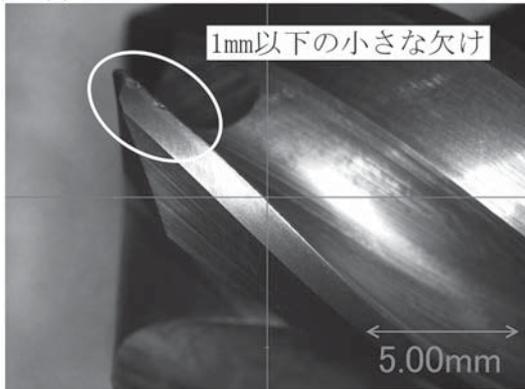
3.1 工具状態のラベル付け

AI 技術を活用した解析によって、マイクロホン等の信号から工具異常を見える化する。解析においては教示データとして、工具にチップング等がない正常状態の信号情報と、チップング等がある異常状態の信号情報を与え、AI に学習させる必要がある。

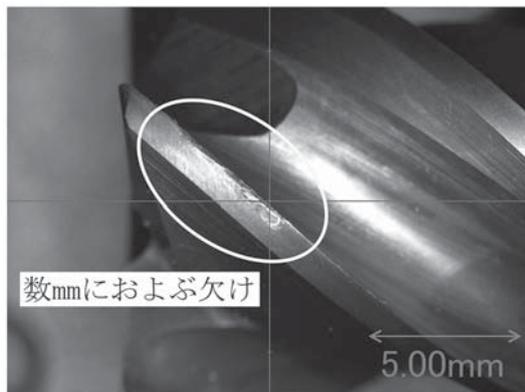
マイクロスコープを用いて工具の刃先状態を観察し、正常状態、遷移状態、および異常状態の3つにラベル付けした。各状態の刃先観察画像の一例を図6に示す。



(a) 正常状態



(b) 遷移状態



(c) 異常状態

図6 工具状態のラベル付け

3.2 オートエンコーダによる工具異常の見える化

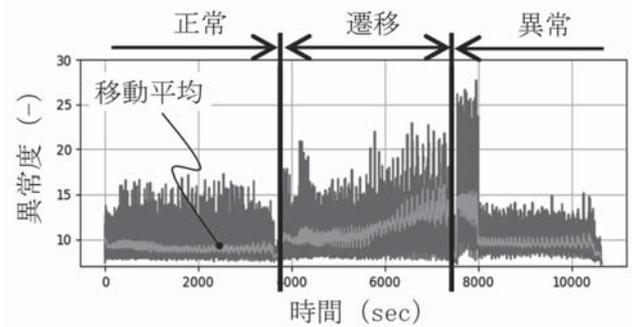
正常状態の各種信号情報を教示データとするオートエンコーダによる異常検知を用いて、工具異常の見える化の検討を行った。

具体的には、マイクロホン信号と加速度計信号をそれぞれ単独データとして学習させた場合と、同時に学習させた場合の異常度にどのような変化がみられるかの実験を行った。

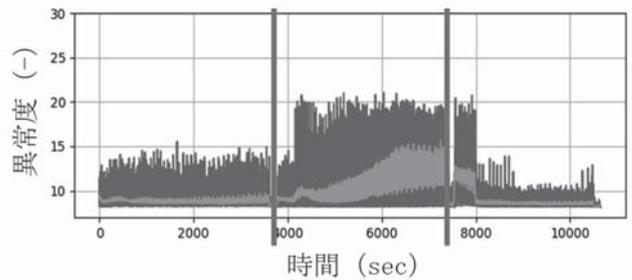
解析に用いた実験データは、観察した刃先状態を基に表5のとおりラベル付けした。解析結果を図7に示す。

表5 実験データのラベル付け

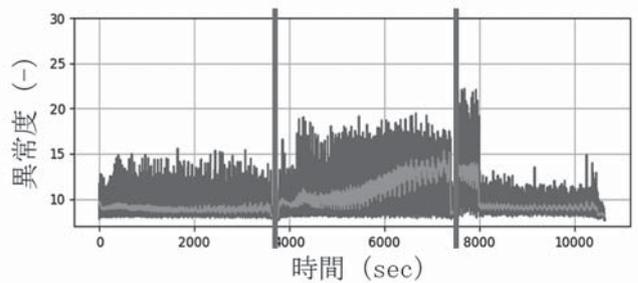
ラベル	正常	遷移	異常
層	1~3	4	5



(a) マイクロホン信号のみの解析結果



(b) 加速度計信号のみの解析結果



(c) マイクロホンと加速度計を併用した解析結果

図7 オートエンコーダの解析結果

図中の異常度は1秒毎のデータを解析して得られた結果である。また、移動平均は25秒の単純移動平均の値である。

マイクロホン信号および主軸頭に取り付けた加速度計信号に対して、オートエンコーダによる異常検知を用いた結果、いずれの信号においても遷移状態とラベル付けした4層目の加工時において異常度の増加が確認できた。また、マイクロホン信号と加速度計信号を併用した解析においても同様の結果を得ることができた。しかし、異常状態とラベル付けした5層目の加工時においては、加工途中から異常度の低下が確認された。これは切削音の特徴が急激に変化したことを意味しており、このタイミングで工具のチップングが大きく進行したと考えられる。

3.3 ワークひずみの見える化

ひずみが大きいとされる未焼鈍材とひずみが小さいとされる焼鈍材のワークを4層加工した際のスタッドボルトに加わる軸力、および変位計により測定した壁面と底面の変位を図8および図9に示す。未焼鈍材においては、各センサの信号が大きく変化しているが、焼鈍材においては各センサ信号の変化が抑えられており、加工中のワークひずみを定量的に捉えることができた。また、いずれのセンサもクーラント環境および切りくず堆積環境で使用できることが確認できた。

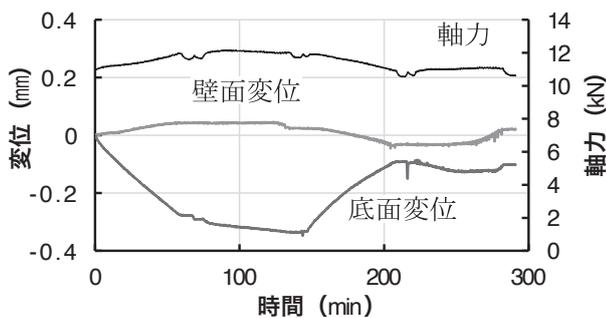


図8 軸力および変位の変化 (未焼鈍材)

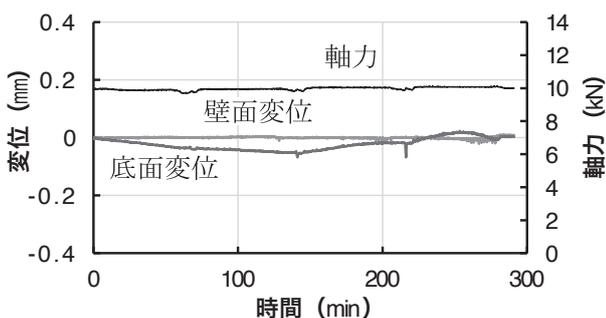


図9 軸力および変位の変化 (焼鈍材)

4. 工具異常のリアルタイム表示システム

工具異常の見える化に用いる信号は、ナショナルインスツルメンツ社製の計測システム (cDAQ-9185) とプログラミングシステム (LabVIEW) を用いて計測した。計測データは LAN ケーブルを通じて PC に送られ、任意のサンプリング周波数と計測時間で csv ファイルとして同 PC のフォルダ内に保存される。この保存された csv ファイルを用いて Python がオートエンコーダによる異常検知を行い、異常検知の結果は Global Common と呼ばれる共有メモリを通して LabVIEW 内で表示する。図 10 に示すように異常度の値を折れ線グラフで常に確認できるとともに、取得した異常度の値が予め設定した閾値より大きい場合にはアラームメッセージを出力することができる。

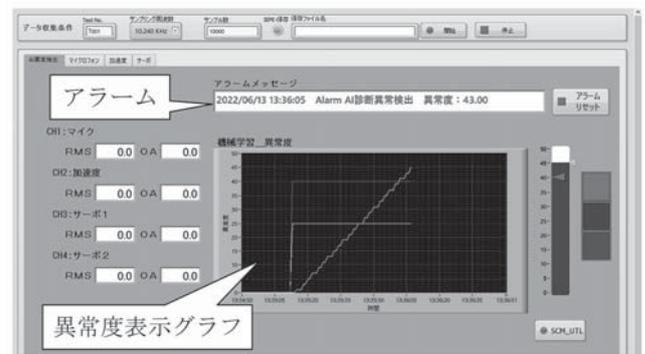


図10 リアルタイム表示システム

5. 結言

加工トラブルを予測する知能化ワーク固定ジグの開発に取り組み、以下の結果を得た。

- 1) マイクロホン信号と加速度計信号を教示データとしたオートエンコーダによる異常検知を用いて、加工に伴う工具異常の進行を見える化することができた。
- 2) 軸力用箔ひずみゲージを挿入したスタッドボルト、および渦電流式変位センサを用いた変位測定ユニットにより、加工中のワークひずみを見える化することができた。
- 3) オートエンコーダによる異常検知を用いた工具異常のリアルタイム表示システムを開発した。

参考文献

- [1] 福田, 瀧内, 三木: 長崎県工業技術センター研究報告, No.49, pp.1-5, 2020.
- [2] 福田, 瀧内, 三木: 長崎県工業技術センター研究報告, No.50, pp.1-4, 2021.

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

(高溶解ヘスペリジン素材の製造技術の確立と本素材を使った機能性表示食品の上市)

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

青ミカンやミカン加工残渣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。ヘスペリジンの摂取は認知機能の維持・改善など健康寿命の延伸に寄与する可能性が示されているが、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性に関する基盤技術を応用し、生理落果したミカンやミカン加工残渣を活用した、ヘスペリジンの高溶解化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のヒトでの認知機能の維持・改善効果を明らかにし、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、生理落果ミカンおよびミカン加工残渣の成分特性やヘスペリジンの高収率エキス製造のための、食品加工機器を用いたヘスペリジンの溶解量向上方策について報告する。

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し^[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制限されている。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溶解量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、摘果ミカン食品として利用する仕組みづくりを行っている。しかし、コスト削減やフードロスの防止が強く求められている昨今、摘果だけでなく、生理落果する果実やミカン加工残渣の活用ニーズが高まっている。なお、生理落果は、果実が肥大する過程で樹から自然に果実が落果する生理現象のことで、7月上旬頃までに6割以上のミカン果実が生理落果するとされる^[4]。ヘスペリジンはミカン果皮の内側のアルベドと呼ばれる部位に多く局在するため、アルベド部が最大化する6月頃に生理落果する果実はヘスペリジンが豊富に含まれると推察される。また、缶詰加工する際に排出されるミカン加工残渣（ミカン果皮）についても、豊富なヘスペリジン供給源と考えられる。

ヘスペリジンは、疎水性のヘスペレチン部分と親水性のルチノース部分から構成され、水溶液中ではヘスペレチン部分が強固に会合することで結晶となり、こ

のことが水への溶解量低下の主要因となっている。ミカン発酵茶は、カテキン類や紅茶ポリフェノール類といった水溶性成分を含んでおり、これら成分がヘスペレチン部分と会合し、ヘスペリジン同士の結晶化を妨げることで溶解量が向上すると推察される。しかし、ミカン発酵茶に含まれるヘスペリジンの熱水や含水熱エタノールへの溶解量は40%程度で^[3]、その他は溶解しないか、あるいは溶解しても再結晶化するものと推察される。機能性表示食品として消費者庁から受理されている機能性原料の多くがエキス粉末として取引され、様々な食品に展開されていることから、ミカン発酵茶から高収率でヘスペリジンをエキス回収し、それを保持して粉末にすることができれば、ミカン発酵茶の加工用途の幅が広がり、取引の拡大に寄与すると考えられる。予備試験にて、ミカン発酵茶を水とともにオートクレーブ処理するとヘスペリジンの溶解量が更に高まることを明らかにしていることから、オートクレーブと同じ原理の食品加工機器を用いることでも、ミカン発酵茶に含まれるヘスペリジンの溶解量が向上すると推察される。

そこで本報告では、ミカン発酵茶の原料として用いることを目的に、生理落果果実やミカン加工残渣のヘスペリジン含量や香気成分等を調査した。また、ミカン発酵茶を原料としたエキス粉末の製造技術を確認するため、レトルト殺菌装置や加圧・減圧攪拌機といった食品加工機器を用いて、モデル水溶液やミカン発酵茶のヘスペリジンの溶解量向上方策について検討した。

2. 実験方法と結果

2. 1 生理落果果実とミカン果皮の特性

生理落果果実は農林技術開発センター果樹・茶研究部門のカンキツ圃場より入手した。樹の下にネットを張り、2021年5月31日から同年6月14日まで、概ね3日おきに落果した果実を収集した(写真1)。ミカン果皮は、県内でミカン缶詰を製造している食品製造事業者より供与を受けた。ヘスペリジンの定量は、これら2つの原料を乾燥させ、DMSO-MeOHの混合溶媒に懸濁し、ろ過したものをHPLC分析に供試した。また、ミカン果皮を原料にミカン発酵茶を製造し、それに熱水を加え、SPME-GC/MS法により香り成分を分析した。

生理落果果実を緑茶抽出液と混合し10分程放置すると抽出液の色が褐色に変化することが観察された(写真2)。緑茶に含まれるカテキン類が酸化するとポリフェノール酸化酵素の影響により、橙赤から赤褐色のテアフラビンやテアルビジン等の紅茶ポリフェノール類に変化する^[5]。緑茶抽出液の色が褐色に変化したのは、生理落果果実に含まれるポリフェノール酸化酵素の影響により、カテキン類が紅茶ポリフェノール類に変化したためと推察される。つまり、生理落果果実はポリフェノール酸化酵素の活性が高く、緑茶を発酵茶に変換させる触媒的作用があることが示唆され、ミカン発酵茶の製造時間短縮やそれに伴うコスト削減に寄与する可能性がある。ヘスペリジン量については、ミカン発酵茶の原料として用いられる直径27mmの摘果果実の場合、過去3か年の調査から、乾燥重量1gあたり165mgほどであるのに対して、生理落果果実と果皮はそれぞれ395mgおよび80.3mgであった(図1)。そのため、生理落果果実は貴重なヘスペリジン供給源となる。一方、果皮のヘスペリジン含量は少なかったものの、果皮を原料にミカン発酵茶を製造すると、d-リモネンやγ-テルピネンといった、ミカン由来の爽やかな香り成分が多く検出されたことから、香りの付与や嗜好品向けの商品開発などに応用できると考えられた(図2)。



写真1 ネットを使った生理落果果実の収集方法



写真2 生理落果果実による、緑茶の酸化効果
(左：果実無し、中央：摘果果実、右：生理落果果実)

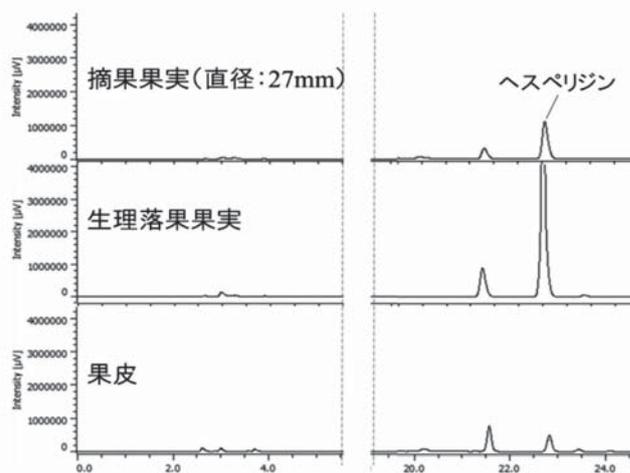


図1 ヘスペリジンのHPLCクロマトグラム

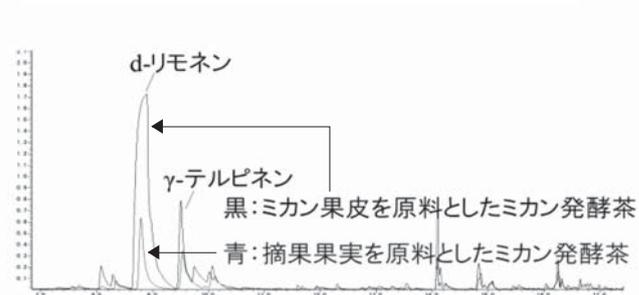


図2 香り成分のトータルイオンクロマトグラム

2. 2 ヘスペリジンの溶解量向上方策

ヘスペリジンはエタノール等の有機溶媒にも難溶であることが知られるが、ヘスペリジンの溶解には加熱温度が顕著に影響することが示唆されており、ヘスペリジンの含量が多いほど、必要となる溶解熱のエネルギーも大きくなることが報告されている^[6]。ミカン発酵茶中のヘスペリジンの溶解には、カテキン類などの成分が関与することを明らかにしているため、モデル水溶液を用いて加熱温度と成分添加によるヘスペリジンの溶解量について検討した。ヘスペリジンとテアシネンシン(TS)あるいはエビガロカテキンガレート(EGCg)の懸濁液を80℃のウォーターバス中で20分、あるいはオートクレーブ(121℃、20分)で加熱

処理後、室温で2時間静置してろ過したものを HPLC 分析に供試した。図3の結果は、ヘスペリジンが最大で溶解した量を示す。その結果、ヘスペリジンの溶解には、オートクレーブ加熱による影響が大きく、さらに、TS や EGCg の添加で溶解量が高まることが分かった。成分単体でみた場合、TS はヘスペリジンの溶解量向上に強く影響することが明らかとなったが、ミカン発酵茶に含まれる成分の総量で比較すると、最も寄与する成分は EGCg であると考えられる。ただし、ヘスペリジンは一旦溶解しても貯蔵中に急速に再結晶化することが確認されていることから^[6]、ヘスペリジンの再結晶化の防止法についても検討した。ヘスペリジンに EGCg、 β -シクロデキストリン (β -CD) あるいはビタミン C (VC) のいずれか、あるいは複数を 4 mL の蒸留水に懸濁してオートクレーブ (121℃、20 分) で加熱処理し、室温で2時間静置して溶解したヘスペリジンの分析を行った。同様に保存1か月後のヘスペリジン含量を分析した。加熱後2時間と比較すると、加熱後1か月は3割ほどしかヘスペリジンが溶解しておらず、既報^[6]のとおり大部分が再結晶化することが分かった。 β -CD は工業的に生産される最も安価なシクロデキストリンの一種で、疎水性物質をその分子内に取り込んで包含化合物を形成し、溶解量を向上させる作用がある^[7]。そのため、 β -CD 単体でもヘスペリジンの溶解量は向上したが、その保持力は弱かった(図4)。VC についても単体でヘスペリジンの溶解量を向上させた。VC 単体でヘスペリジンが溶解したメカニズムは不明であるものの、EGCg と VC を組み合わせることで、ヘスペリジンの溶解量の保持力が高まることが明らかとなった。VC が EGCg の酸化を抑制することで、EGCg による溶解量の保持力が維持されると推察される。さらに、レトルト殺菌装置および加圧・減圧攪拌機による加熱処理 (125℃、30 分) での、ミカン発酵茶を原料としたヘスペリジンの溶解量についても検討した。水に対する茶葉の割合が 1.0% 前後だと、ほぼ 100% のヘスペリジンが熱水に溶解することが分かったが、茶葉の割合が増えるとヘスペリジンの溶解量が極端に低下した(図5)。レトルト殺菌装置や加圧・減圧攪拌機による加熱温度はせいぜい 130℃ほどであり、この時の熱エネルギーでヘスペリジンを最大限可溶化しようとする、ミカン発酵茶(葉)の割合の上限は 1.0% 前後であることが分かった。現在、これらの結果を踏まえ、ミカン発酵茶のエキスを原料に、スプレードライヤーによる粉末化

試験を実施している(写真3)。

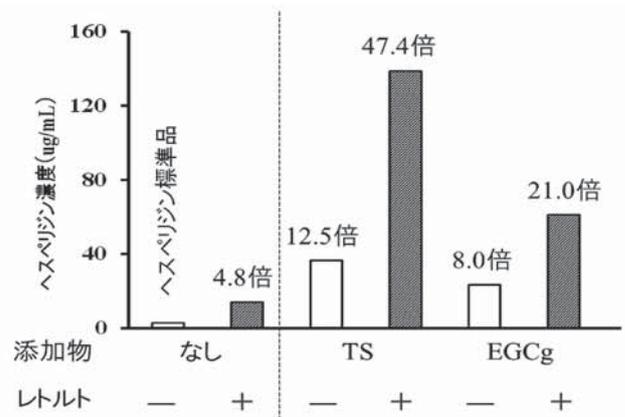


図3 ヘスペリジン最大溶解度の比較
(-: 処理なし、+: 処理あり)

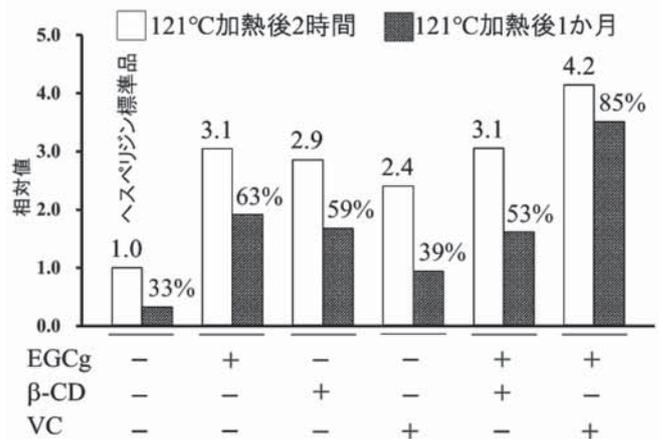


図4 ヘスペリジンの溶解量保持効果の比較
(-: 添加なし、+: 添加あり)

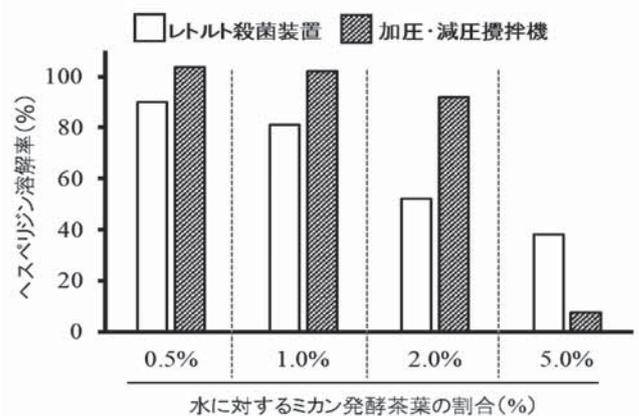


図5 ミカン発酵茶割合とヘスペリジンの溶解率



写真3 ミカン発酵茶のエキス粉末 (試験中)

3. 結言

ミカン発酵茶の原料として用いることを目的に、生理落果果実やミカン加工残渣のヘスペリジン含量や香氣成分等を調査した。また、ミカン発酵茶を原料としたエキス粉末の製造技術を確立するためには、ヘスペリジンの高収率エキスを製造する必要があるため、ヘスペリジンの溶解量向上方策について検討した。

生理落果果実はヘスペリジンを高濃度に含んでおり、また、ポリフェノール酸化酵素の活性が高かった。そのため、ミカン発酵茶の原料として有望であることが分かった。ミカン缶詰製造時に排出されるミカン果皮に関して、ヘスペリジン含量はやや少なかったものの、ミカン由来の爽やかな香氣成分が多く含まれていたことから、香氣の付与や嗜好品向けの商品開発に応用できると考えられた。

ヘスペリジンの溶解量向上には、カテキン類の存在下でオートクレーブ等での加熱が有効と判断され、ヘスペリジンの再結晶化を防止するためには、ビタミンCの添加が有効であることが分かった。オートクレーブやレトルト殺菌装置あるいは加圧・減圧攪拌機といった食品加工機器による加熱で、ヘスペリジンを最大限可溶化するための、水に対するミカン発酵茶葉の割合の上限は1.0%前後であると考えられた。

参考文献

- [1] Jung UJ, Lee MK, Park YB, Kang MA, Choi MS. Effect of citrus flavonoids on lipid metabolism and glucose-regulating enzyme mRNA levels in type-2 diabetic mice. *Int J Biochem Cell Biol*, 38, pp.1400-1403, 2006.
- [2] Yamada M, Tanabe F, Arai N, Mitsuzumi H, Miwa Y, Kubota M, et al. Bioavailability of glucosyl hesperidin in rats. *Biosci Biotechnol Biochem*, 70, pp.1386-1394, 2006.

- [3] 中山 久之, 田中 隆, 宮田 裕次, 齋藤 義紀, 松井 利郎, 荒牧 貞幸ほか. ミカン未熟果と緑茶三番茶葉を混合して製造した可溶性ヘスペリジン含有発酵茶の開発. *日本栄養・食糧学会誌*, 67, pp.95-103, 2014.
- [4] 尾形 凡生, 藤田 博之, 塩崎 修志, 堀内 昭作, 河瀬 憲次, 加藤 彰宏. AVGによるウンシュウミカン生理落果の制御. *園芸学雑誌*, 66, pp.235-244, 1997.
- [5] 田中 隆. 植物ポリフェノールに関する化学的研究とその紅茶色素生成機構解明への展開. *薬学雑誌*, 128, pp.1119-1131, 2008.
- [6] 森 太蔵, 岩本 嘉伴. 温州ミカン果汁中のヘスペリジンの挙動に関する研究-II. *東洋食品研究所研究報告*, 16, pp.45-50, 1985.
- [7] 原 耕三, 橋本 仁. サイクロデキストリンの応用. *澱粉科学*, 33, pp.152-161, 1986.

AIを用いた監視装置の開発

(AI技術を用いたIoT機器の開発)

機械システム科 科 長 田 口 喜 祥
機械システム科 主任研究員 久保田 慎 一

県内企業から機械装置の稼働状況を IoT (Internet of Things) 技術を用いて監視をしたいという相談が増えている。工場内で稼働している IoT 機能が搭載されていない従来型の機械装置を監視するためには、それぞれの機械装置に対応した IoT 機器を開発し取り付ける必要がある。そのため、長崎県工業技術センターでは、IoT 装置開発に関する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、製造現場への応用が数多く報告されている [1-3]。

そこで、本研究開発では、IoT 機能が搭載されていない従来型の機械装置を対象として、機械装置本体に改造を加えずに機械装置の稼働状況や故障予兆予測を行うことができる AI を用いた監視装置を開発することを目的とした。AI 演算を高速に実行できるボードコンピュータを用いることで、カメラ画像から AI を用いて情報を認識し監視する装置を開発した。

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。工場の IoT 化で自動化が進めば、生産年齢人口の減少で深刻化する人手不足の緩和など、わが国製造業が抱える課題の解決にも繋がる [1] ことが期待されている。そのため、これまで IoT を製造現場に活用するための研究や報告が多数なされている [2] [3]。

また、長崎県内の企業から、社内で使用している機械装置を監視することができる IoT 機器を開発したいという相談が増えている。これまで、既存の機械装置の稼働状況を監視するために電流や振動を計測し、監視する装置の開発を行ってきた [4]。開発した IoT 装置を用いて技術支援を行う中で、センサでは取得することが難しい情報や装置のエラー情報なども監視したいとの要望が出てきた。その中で、センサを取り付けることは難しいが、対象となる装置の制御装置画面には装置各部の状態やエラー情報などが表示されるものがあり、制御装置の画面情報から必要な情報を抽出できる可能性があるのではないかと考えるに至った。

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 [5]、画像から特定の部分を高速に切り出す [6] 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ている。

そこで、本研究では機械装置の制御装置画面をカメラで画像として収集するとともに、各種センサからの情報と併せて、AI 技術を用いて対象物を監視する監視装置を開発することを目的とする。開発した監視装置は、既存

のセンサからの情報を収集するセンサユニット部、AI 処理を行う監視制御装置部、制御装置の画面を切り替えることを想定して監視装置部からの指令でキーボードの操作を行うエミュレータ部により構成した。開発した監視装置で、センサデータや画像データを収集し、AI の学習を行い、情報を認識し監視することができることを実験により確認した。

2. システム構成

開発した AI を用いた監視装置のシステム構成を図 1 に示す。開発した装置は、機械装置に取り付けて電流、振動、光、音などのデータを収集するセンサユニット部、センサユニット部からのデータをデータベースに記録すると共に、カメラで制御装置の映像を撮影し、必要な情報を AI 技術で認識する監視制御装置部、監視制御装置部からの指令で機械装置のキーボードの操作を行うエミュレータ部から構成されている。また、監視制御装置部には、センサユニット部やカメラで取得した情報を AI 技

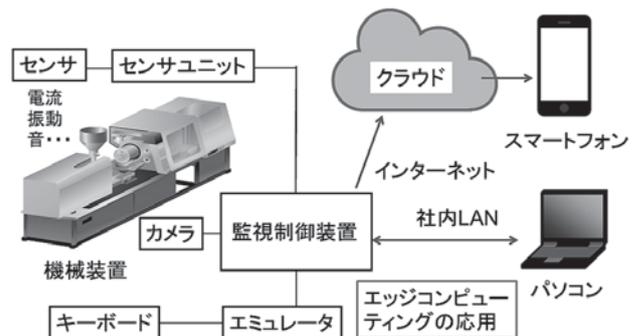


図 1 システム構成

術で解析し、稼働状況や故障予兆検知に関する監視結果を Web 画面で提供する機能を搭載した。

令和元年度に監視装置のハードウェアの検討および試作、令和 2 年度に AI 技術の導入とプログラムの試作、令和 3 年度に AI の学習および装置の改良を実施した。AI を用いた監視装置の概要及び実験の結果について以下に記述する。

3. 監視装置のハードウェア構成

AI を用いた監視装置は、IoT 機能が搭載されていない機械装置に取り付けて使用することを目的として開発した。そのため、監視装置自体は安価なマイコンボードを組み合わせて試作した。

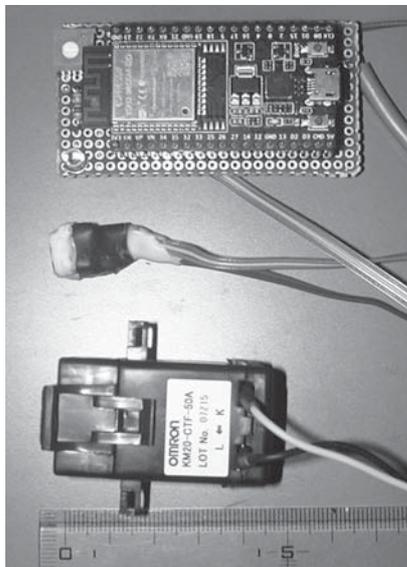


図2 センサユニット部

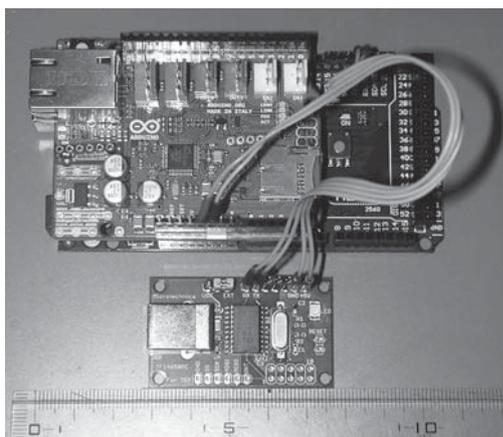


図3 エミュレータ部

試作した監視装置は、センサユニット部、エミュレータ部、監視制御装置部、の3つの要素で構成されている。試作したセンサユニット部の写真を図2に、エミュレータ部の写真を図3に、監視制御装置部の写真を図4に示す。

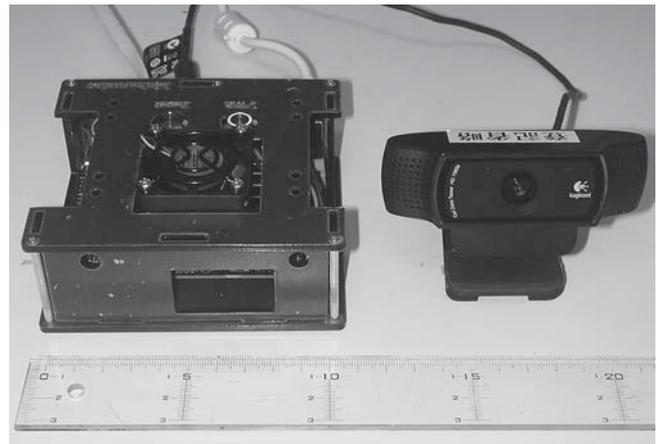


図4 監視制御装置部

センサユニット部は、Espressif Systems 社の Wi-Fi 無線モジュールを内蔵するボードコンピュータ ESP32 を用いて試作した^[4]。図2に示したセンサユニット部には電流、加速度、光を計測するセンサを搭載しており、機械装置の消費電流、稼働時の振動、パトライトなどの光を計測し、監視制御装置部に送信する機能がある。センサユニット部は監視する対象機械により音、温度、圧力など使用するセンサを変えて複数のものを製作した。デジタル出力のセンサは ESP32 が搭載しているデジタルインターフェースで直接接続可能であるが、アナログ出力のセンサはセンサにより出力信号に違いがある。そこで、アナログ出力のセンサを接続する場合は、オペアンプを用いた信号変換回路をセンサごとに試作した。ESP32 マイコンボードを使用したことで Wi-Fi による通信が可能であり、複数台のセンサユニット部を対象となる機械装置ごとに選定することが可能となった。また、センサユニット部単体でも作動する構成とし、工場内の LAN に接続されているデータベースへのデータ書き込みや LINE 等の SNS ソフトを用いて作業者のスマートフォンに異常を通知する機能を搭載した。

エミュレータ部は Arduino MEGA マイコンボードにマイクロテクニカ社のキーボードエミュレーションボード USBKBD-50 を組み合わせて試作した。エミュレータ部を用いることで監視制御装置部からの指令信号によって一連のキーボード操作を実施し、制御装置を操作し、監視対象の画面を表示する。

監視制御装置部は、表1に示したボードコンピュータを用いて3種類の試作を行った。

最初に試作したのは Raspberry Pi4 Model B を用いた監視制御部である。Raspberry Pi 財団が開発した Raspberry Pi4 Model Bは低価格で、Wi-FiやBluetooth5.0

などの無線通信機能があり、IoT 装置の試作では良く使用されるボードコンピュータである。平成 28 年度から平成 30 年度まで実施した経常研究^[4]でも使用しており、Raspbian と呼ばれる Linux を基にした OS で作動させることが可能である。センサユニット部からのデータ収集、データベースの運用、AI を用いた認識が可能である。ただし、今回の開発目的であるカメラ映像から必要なデータを抽出して認識するための AI 処理を行う場合、演算速度が遅いという問題点が確認できた。

次に試作した監視制御部は LattePanda^[7] というマイコンボードを用いたものである。LattePanda は中国上海の LattePanda Team がキックスタータにより開発したボードコンピュータであり、ボード自体に Windows10 がインストールされた状態で販売されている。そのため、Windows10 で開発したソフトウェアがほぼそのまま機能するという特徴がある。また、Arduino Leonardo 相当のボードコンピュータとして使用可能な ATmega32u4 を内蔵しており、アナログ信号やデジタル信号の入出力を Arduino のプログラムで前処理をし、Windows10 のプログラムと連携して解析などを実施できるという特徴がある。このため、後述する Windows10 で動作する SONY の AI 開発用ソフト Neural Network Console^[8] で開発した AI プログラムは LattePanda を使用した監視制御部を用いれば容易に実装することが可能となる。しかし LattePanda も Raspberry Pi4 と同様に基本的に CPU で AI 処理演算を行うことになるため、比較的数据量が少ないセンサ信号を用いて状態や異常を推定する AI 処理を行う場合は十分な性能であったが、データ量が多いカメラ画像の認識処理では演算速度が遅いという問題点が確認できた。

以上の理由により、カメラで機械装置の映像を撮影し、必要な情報を AI 技術で認識する監視制御装置部は GPU (Graphics Processing Unit) を用いて AI 演算を実施できる NVIDIA 社のマイコンポート Jetson nano 4GB^[9] を用いて試作した。

Jetson nano 4GB は NVIDIA 社が提供している AI アプリケーション構築用の SDK (Software Development Kit: ソフトウェア開発キット) である JetPack4.6 を用いることで AI を用いたプログラム開発に必要な OS および関連するライブラリをまとめてインストールすることができる。

今回、監視制御装置部の試作に用いたボードコンピ

ュータの仕様を表 1 に示す。基本的な性能は似通っているため、監視する対象により価格、性能、OS、AI の演算速度などを考慮して使用するボードコンピュータを選定することとしている。

画像入力のために使用したカメラは Logicool 社の Web カメラ C920 である。また、プログラムの開発は Python3.7 を使用し、Web フレームワークとして Flask^[10] を用いた。なお、画像処理には OpenCV、画像の認識は Darknet Neural Network Framework の YOLOv3^[11] という AI ライブラリ、データベースは MySQL を用いた。

センサユニット部と監視制御装置部は Wi-Fi による無線、エミュレータ部は有線で Wi-Fi ルータに接続して使用した。監視制御装置部ではデータ収集、AI による状態監視や異常の推定、監視データを Web 画面で表示するためのプログラムを作動させた。

表 1 監視制御装置部コンピュータの仕様の比較

	Raspberry Pi4 model B	LattePanda	Jetson nano
CPU	Quad-core Cortex-A72 1.5GHz	Quad-core Intel Cherry Trail Z8350 1.8GHz	Quad-core ARM A57 1.43GHz
RAM	4GB	2GB	4GB
接続	Wi-Fi Bluetooth 5.0 Ethernet	Wi-Fi Bluetooth 4.0 Ethernet	Ethernet
GPU	Video Core IV 500MHz	HD Graphics 200-500MHz	128-core Maxwell
USB	USB3.0×2 USB2.0×2	USB3.0×1 USB2.0×2	USB3.0×3

4. AI 技術の導入

開発を行っている装置は、IoT 機能が搭載されていない生産設備や工作機械に安価な導入費用で取り付けることを目標としている。そのため、監視制御部で使用するボードコンピュータに合わせて AI 技術の導入検討を行った。

開発当初は、IoT 装置の開発で多く使用されていた Raspberry Pi を用いて scikit-Learn^[12] などの機械学習用ライブラリを用いた試作を行い、その後 SONY の Neural Network Console で学習した AI を用いるため

に LattePanda を使用した。最終的には、GPU で演算が可能のため AI を用いて認識や推定を高速で行える Jetson nano 4GB を用いて TV カメラの AI 処理を行うこととした。

なお、Jetson nano 4GB は搭載されている GPU を用いて、ハードウェアで AI 演算を行えるが、高速な GPU ボードを搭載したパソコンと比較すると演算処理の能力が劣る。そのため、AI による推定や予測を行う場合は問題ないことが多いが、AI の学習処理自体を行う場合は学習に多大な時間がかかる。そこで、別途パソコン用部品を用いて製作した学習用装置を用意し、AI の学習処理は学習用装置で実施し、学習結果を試作した監視制御部で使用することとした。製作した学習用装置の仕様を表 2 に示す。

表 2 学習用装置の仕様

OS	Windows10 Home Ubuntu20.04.3LTS
CPU	Intel(R) Core i7-10700F
メモリー	64GB
GPU	NVIDIA(R) GeForce RTX 2080
ストレージ	SSD 2TB

AI の学習は、SONY の Neural Network Console や Darknet Neural Network Framework を使用した。

学習装置の OS は、Neural Network Console を使用する場合は Windows10、Darknet Neural Network Framework を使用する場合は Ubuntu を使用する必要がある。そこで、Windows10 Home と Ubuntu20.04.3LTS を起動する際に選択して起動できるデュアルブート構成として学習用装置を製作した。

この学習用装置を用いてセンサユニットやカメラで収集したデータで AI の学習を行い、学習結果のみを監視制御装置部で使用した。同じデータセットを用いた場合、学習用装置と今回監視制御部で使用したボードコンピュータの中で最も学習速度が速かった Jetson nano 4GB とを学習速度で比較したところ、学習用装置が Jetson nano 4GB の約 15 倍高速に学習演算を実施できることを確認した。

次に TV カメラで撮影した映像から対象物を認識するプログラム開発を行った。独自のプログラムを開発する前にこれまでに公開されている学習済みの AI を活用する取り組みを行った。



図 5 物体認識結果

まず、TV カメラからのデータ処理を行うことを想定して、動画像から物体認識を行う YOLOv3 ライブラリの導入を試みた。学習用装置で YOLOv3 ライブラリを用いた物体認識プログラムを動作させた結果を図 5 に示す。YOLOv3 の学習済みのモデルを用いることで動画像から物体を認識し切り出すことが可能であることを確認した。しかし、YOLOv3 では様々な物体を認識する機能が搭載されているため、演算処理が多く、そのまま組み込み型マイコンで作動させることは難しいことが判明した。

そこで、YOLOv3 の軽量版である YOLOv3-tiny の学習済モデルを基に、TV カメラで撮影した数字のみを認識するよう独自データセットを用いて学習を行うこととした。YOLOv3-tiny を独自データで学習を行うためには、TV カメラ画像データと対象物の認識番号および対象物の位置座標を記載したデータセットが必要となる。通常このようなデータセットを作成するためにはデータセットを作成するアプリケーションソフトを用いて、人がマウスにより対象物のラベル付けおよび位置座標を入力する。参考として YOLOv3 用のデータセットを作成可能なアプリケーションソフトの一つである Label Image^[13]を用いてのデータセット作成時の画面を図 6 に示す。ここでは、撮影した映像に含まれる数字部分の位置座標と 0 から 9 までの数字を分類し、画像と共にデータセットとして保存している。

この作業は人が数字を判断し、マウスを用いて数字の領域を指定する必要がある。AI を学習するためには数千枚以上の画像と認識対象物の ID および位置座標を記録したデータセットが必要となる。

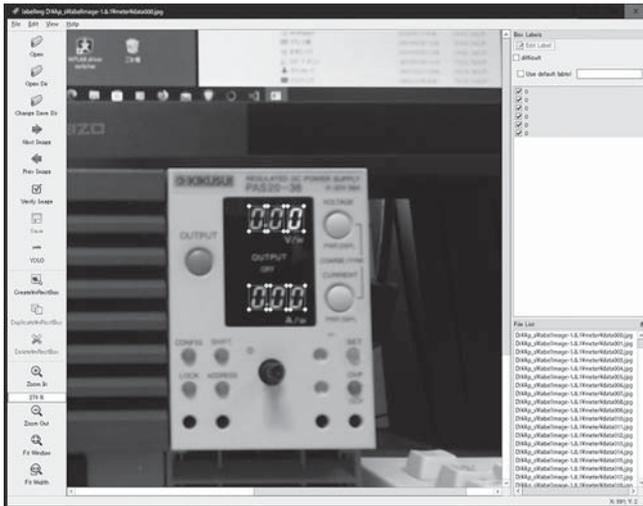


図6 学習用データセットの作成

このデータセット作成には多大な時間と労力を要するため、AI 技術を用いるための障害となっている。そこで、本研究ではデータセット作成労力を削減するために学習データ収集時はカメラの撮影位置を変更せずに、対象物の位置座標を固定して学習用データを収集し、固定された領域の画像座標を基にデータセットを自動作成するプログラムを作成した。このような手法により画素数 416×416 の画像 2000 枚についてデータセットを収集し、1800 枚のデータを学習用、200 枚を評価用として分類し YOLOv3-tiny の学習を行った。学習用装置を用いて実施した学習曲線を図 7 に示す。なお、学習用装置を用いてこの学習にかかった時間は約 20 時間であった。

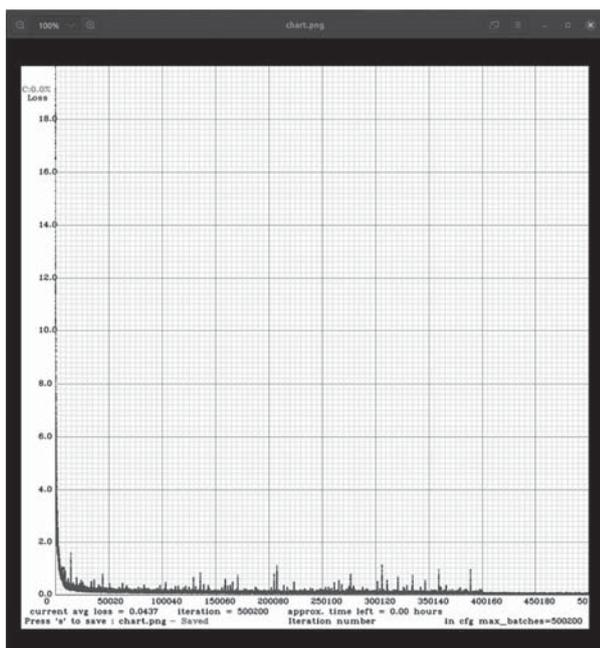


図7 学習曲線

5. AI 技術を用いた監視実験

学習を完了した YOLOv3-tiny を Jetson nano 4GB を用いて試作した監視制御装置部で動作するようプログラムを修正し、映像に含まれている数字の認識実験を実施した。認識実験時の表示画面を図 8 に示す。

実験の結果、正面からの映像であれば上下、左右、距離が学習時の位置と変わっていても 98%以上の精度で数字を認識できることを確認した。なお、このとき認識速度は 1 秒間に約 15 フレームであった。なお、認識プログラムは Python3.7 で作成した。AI 処理ライブラリ YOLOv3-tiny を使用することで、TV カメラで撮影した映像から数字を認識できることを確認できたので、計器に表示されている数字を認識し監視を行う AI 監視プログラムを作成した。作成した AI 監視プログラムの動作中の画面を図 9 に示す。



図8 AI を用いた認識実験

このプログラムは監視制御装置部に取り付けられている TV カメラで対象物を撮影し、撮影された映像から数字部分を AI で抽出、認識処理を行い、数字の変動をリアルタイムで監視することができる。また、認識した数字データを 1 秒ごとにグラフとして表示すると共に、認識した数字が既定の範囲を超えた場合は画面表示などで警告を発生する機能を有する。

今回、電源装置を対象として電圧および電流を監視する実験を行った。監視実験の結果、測定対象物と TV カメラの間に障害物が入った場合は一時的に数字を認識できないことがあったが、それ以外は 1 秒間に約 15 フレームで処理を行えることを確認した。なお、TV カメラと測定対象物の間に障害物がない場合は 98%以上の認識精度で数字の変動を監視できることを確認した。

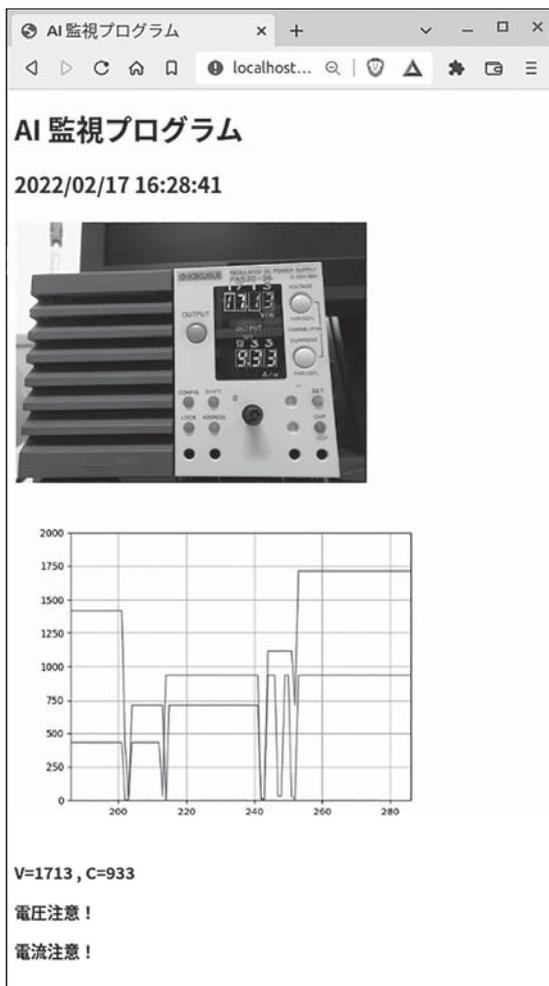


図9 AI 監視プログラム

6. 結言

IoT 機能が搭載されていない機械装置からデータを収集し、機械装置の稼働状況や故障予兆の監視を行うために AI を用いた監視装置を開発した。監視用のハードウェア部およびセンサデータや画像データを収集するプログラムを作成し、各種センサからのデータ収集、カメラ映像の画像処理、キーボードのエミュレートが可能である監視制御装置部ハードウェアを製作した。また、製作した監視制御装置部ハードウェアに、AI 技術を応用して画像から数字を認識する機能を有するプログラムを搭載することで、TV カメラで撮影した映像から数字を認識できることを確認した。製作したハードウェアとプログラムで構成された AI を用いた監視装置の性能を評価するための実験を行ったところ 1 秒間に約 15 フレームの処理速度で数字の変動を TV カメラ画像から 98% 以上の精度で監視できることを確認した。さらに、開発した AI を用いた監視

装置を用いることで、監視中の対象物の画像を LAN に接続されているパソコンやスマートフォンからブラウザソフトを用いて確認することができた。

今後は、開発した AI を用いた監視装置や、開発の中で取得した IoT および AI に関する技術を用いて、県内製造業の IoT 導入や DX 化の支援を行っていく。

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] 地主、知崎、川上：IoT 活用による工場生産活動最適化、FUJITSU. 67, 2. pp.77-83, 2016.3.
- [3] 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.
- [4] 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、No48, pp.5-10, 2019.
- [5] 飯塚、金子：深層学習を用いた複数カメラでの人物再識別、DEIM Forum 2019 pp.9-139, 2019.3.
- [6] Qiang Wang, Li Zhang, Luca Bertinetto, Weiming Hu, Philip H.S. Torr：Fast Online Object Tracking and Segmentation: A Unifying Approach, The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.1328-1338, 2019.
- [7] <https://www.lattepanda.com>, Accessed 2018.
- [8] <https://dl.sony.com/ja/>, Accessed 2020.
- [9] <https://www.nvidia.com/ja-jp/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-nano/>, Accessed 2020.
- [10] <https://palletsprojects.com/p/flask/>, Accessed 2019.
- [11] <https://pjreddie.com/darknet/yol>, Accessed 2020.
- [12] <https://scikit-learn.org/stable/>, Accessed 2018.
- [13] <https://github.com/tzutalin/labelImg>, Accessed 2020.

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。よって、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。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、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、本研究では、プラントや建築現場で活用されつつある 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、移動式測定を特徴とする自動モデリングシステムを開発する。本報では、試作した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、プラントや建築現場で活用されつつある Mixed Reality デバイス^{[1][2]}の「ホログラムの配置に使用するセンサ」を利用し、移動式測定を特徴とする自動モデリングシステムの開発を進めている。本報では、試作した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. 試作した自動モデリングシステム

図1に試作した自動モデリングシステムを示す。このシステムでは、Microsoft社のHololens2^{[1][2]}において「ホログラムを物体上に配置するために使用するセンサ」を活用しており、測定者がHololens2を装着して測定対象物の近くを歩き回ることにより測定が行われ、測定結果はアクセスポイント経由でPCに送られる。また、測定後は、PCで測定結果を確認できる。

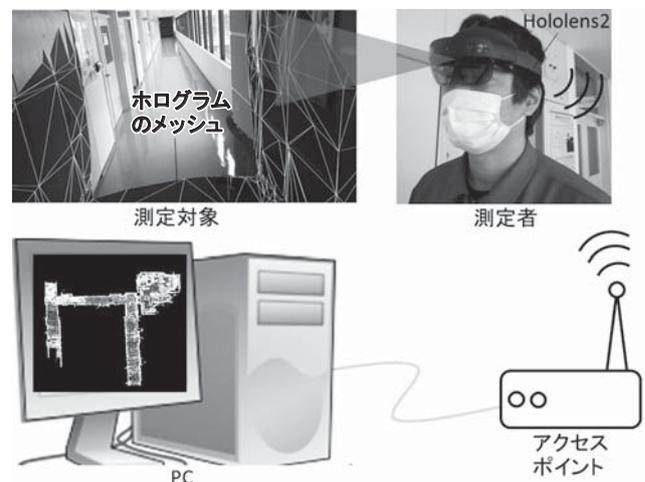


図1 試作した自動モデリングシステム

3. 死角を有する大面積のモデリング

3.1 評価方法

試作したシステムを用いて、幅2,100 mm、高さ2,680 mmの廊下（上空から見た形状は図2に示すとおりで、長さ43,200 mm×16,200 mm）のモデリングが可能であるか実証試験を行った。

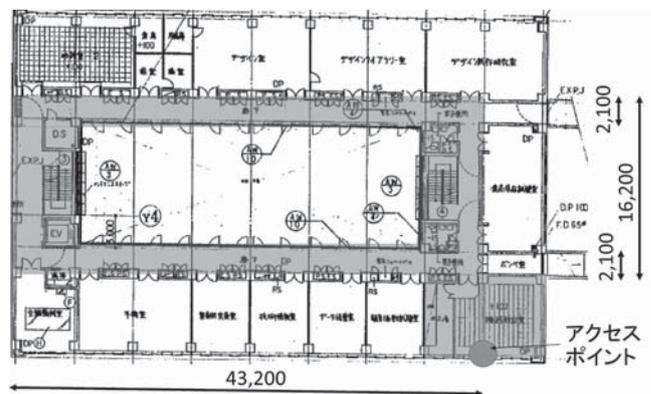


図2 実証試験に用いた廊下の平面図

3. 2 評価結果と考察

試作したシステムを用いて、図2の廊下をモデリングした結果を図3、図4に示す。

この結果から、測定結果をPCへ送り、表示することはできているが、一部モデリングができておらず、測定データに欠落があることが確認できる。これは、測定者がシステムのモデリング速度を考慮せずに移動した場合、測定者の移動速度に対してモデリング速度が追いついていないことが原因であった。

そこで、測定時にHololens2でホログラムを表示することにより、測定がどこまで完了しているのか確認できる機能を追加した^{[3][4]}。



図3 モデリング結果（廊下内部からみた図）



図4 モデリング結果（平面図）

改良したシステムを用いて、再度、図2の廊下をモデリングした結果を図5、図6、図7に示す。

これらの結果から、図2のマップの左側の廊下がモデリングできていないことが確認できる。これは、アクセスポイントから離れるとデータをPCにうまく送ることができなくなり、データの欠損が生じることが原因である。

また、図5、図6、図7を比較すると、時間変化により、モデリング結果が変化していることが確認できる。これは、Hololens2では測定データが一定量を越すと、古いデータが新しいデータに上書きされていることが原因である。

これらの課題は、今後の開発で解決していきたい。

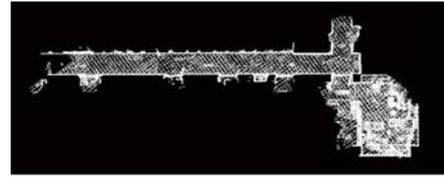


図5 モデリング結果（平面図、10分後）

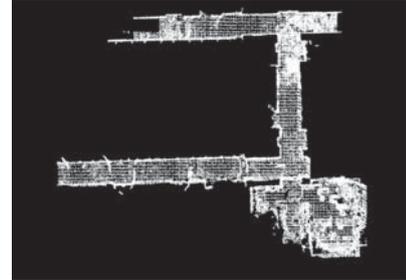


図6 モデリング結果（平面図、20分後）

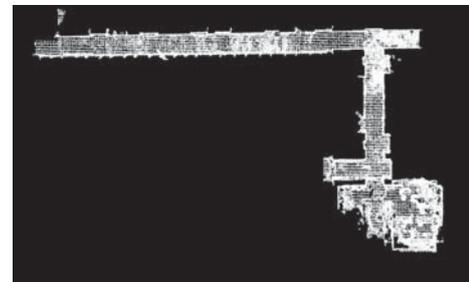


図7 モデリング結果（平面図、30分後）

4. 結言

実証試験の結果、試作した自動モデリングシステムに関して以下のことが分かった。今後は、システムの改良により、さらなる大面積のモデル化を実現したい。

- (1) 測定がどこまで完了しているのか確認できる機能を付加することにより、モデリング結果がまだらにならなくなった。
- (2) アクセスポイントから離れるとPCにデータを送れず、モデリングができなくなる。
- (3) 現状では、一定量以上の面積をモデリングすることができない。

参考文献

- [1] <https://www.nikon-trimble.co.jp/TrimbleXR10/>, Accessed 2020.
- [2] <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens>, Accessed 2020.
- [3] <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/discover/mixed-reality>, Accessed 2021.
- [4] <https://docs.unity3d.com/2020.3/Documentation/Manual/UnityManual.html>, Accessed 2020.

機械学習を用いたロボット関連製品の制御技術の開発

(オープンソースを活用したディープラーニング導入手法の確立と技術支援)

機械システム科 主任研究員 堀江 貴雄

本研究では、各種センサからのデータを用いてディープラーニングにより end-to-end で無人搬送車 (Automatic Guided Vehicle : AGV) を自律制御することを目的とした。令和元年度から2年度にかけて開発してきたニューラルネットでは、前処理なしの時系列データを用いて AGV の自動走行が実現できることを確認しているが、未学習環境における挙動が未知であり、安全面で課題があった。そこで最終年度となる令和3年度では Autoencoder によるカラー画像からの距離画像推定を行い、未学習環境の検出と自動停止機能を実現した。この結果、自動走行中に未知のシーンを検出した時、自動停止可能なことを確認した。

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。特に、各種データから特徴量を自動的に抽出できることから、これまで人による設計が困難であった高度な認識システムの実現に期待がかけられている。

これまでの研究において、オープンソフトウェアの Neural Network Console (ソニー社製)^[1]を用いたニューラルネットワーク開発により、5 時刻分のカラー画像、距離画像、車両方位角から AGV の移動制御パラメータを制御して複数の移動経路を自律走行できる移動ロボットを試作した^[2-5]。

令和3年度は、ニューラルネットによる制御において問題となる未学習環境での異常動作を抑制するため、Autoencoder を取り入れ、未学習環境の検出と自動停止機能の実装に取り組んだ。

2. メカナム移動ロボット

昨年度までに試作した移動ロボットを基本コンセプトに、前輪2輪をサブフレームに固定し、サブフレームが本体フレームに対してロール方向に動くよう改良した検証用メカナム移動ロボットを作成した (図1)。これによって4輪の接地性が向上し、よりスムーズな全方向移動が可能となっている。



図1 メカナム移動ロボット

搭載機器の仕様を表1に示す。

表1 メカナム移動ロボット機器仕様

機器名	仕様	用途
画像、深度画像センサ Intel RealSenseD455	カラー画像 1920×1080, 深度画像 1920×1080	車両前方画像、距離計測
方位センサ WitMotion HWT905	3軸 XYZ 加速度、角速度、磁気 200Hz 出力	車両方位計測
タッチパネル	13.3 インチ USB タッチパネルディスプレイ 1920×1080	制御アプリケーション操作
ブラシレスモータ OrientalMotor BLHM230K	DC 電源駆動、ギヤヘッド付き、デジタル制御	メカナムホイール駆動用
マイコン ArduinoUNO	USB 電源駆動、デジタル IO	ブラシレスモータ同期制御用
メカナムホイール NexusRobot 127mm	ホイール直径 127mm	全方向移動用ホイール
PC Intel NUC10i7FNH	Corei7-1070U (max4.7GHz) RAM32GB	ニューラルネット推論、操作インタフェース、制御
ゲームパッド Microsoft BlueTooth 対応 Xbox コントローラ	Bluetooth 通信対応 左右レバー、十字キーボタン 8 入力	データセット生成用手動操縦、オーバーライド用

データセット収集は、ゲームパッド操作による手動操縦で行う。ニューラルネットの学習は別途 GPU (NVIDIA 製 TITAN RTX) を搭載した PC で実施し、学習結果をロボット搭載の Intel 製 NUC10i7FNH に実装することで動作検証を実施した。

3. Autoencoder

異常データの収集が難しい状況で、正常データのみから、異常を検出するための手法として、自己符号化器 (Autoencoder) と呼ばれるニューラルネットの教師なし機械学習方法がある。

Autoencoder は、入力データを一旦、次元圧縮 (エンコード) し、その後デコードする。このとき出力データが入力データと一致するように学習を行わせる。

このネットワークは、学習データに類似したデータでは高い精度で入力データを再現するが、学習していないデータではうまく入力データを再現出力できない特徴を持つ。したがって入力データと出力データの差分をとり、ある閾値以上の相違があれば、学習していないデータとみなして異常検出とすることができる。

本研究でターゲットとする移動ロボットにおいても、適切な操縦データは大量に含まれるが、一度も走行したことのない環境の操縦方法は含まれず、ロボットがどのような挙動をとるかは想定困難である。このことがニューラルネットベース制御の実用化ネックになっている。そこで本研究では Autoencoder を活用し、これまでに学習した環境かどうかをニューラルネット自身に判定させ、未学習環境と検知した場合、安全面から自動停止する機能を開発する。

3. 1 画像推定 Autoencoder

この手法を今回の例に適用するため、まずは入力データにカラー画像を与え、カラー画像を出力する Autoencoder (以後 PTP Autoencoder と表記する) を学習することとした。学習させるデータセットを表 2 に示す。

表 2 PTP Autoencoder 用データセット

Input	Output
カラー画像 (3×45×80)	Input カラー画像

人や障害物が存在する屋内通路を移動ロボットを走行させて取得したデータセット 82,000 個を用意し、そのうち 74,000 個を学習用とした。残りの 8,000 個の

データは学習に使わず、テスト用の学習済み環境データセットとした。

未学習環境データとして、学習環境データセット 82,000 個には一度も映らない工具箱や階段踊り場などを含むデータを 500 個用意した。

入力するカラー画像が学習済みかどうか判定するためにエラー値を E とし、画像幅 w 、高さ h の入力画像 I_i のある点 $I_i(x, y)$ と、対応する出力画像 I_o の点 $I_o(x, y)$ の差分を合計したエラー値 E は式 1 で求められる。

このエラー値を用いて適切な閾値を設定できれば、ニューラルネットは自身で未学習環境であると判定できる。

$$E(I_i, I_o) = \sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} (I_o(x, y) - I_i(x, y))^2 \quad (1)$$

2500epoch 学習させ、式 1 を用いて各エラー値を求めた結果を図 3 に示す。学習済み環境画像 8000 枚に対して平均 109 (もっとも左)、未学習環境画像 500 枚に対しては平均 196 (左から 2 番目) だった。学習済み環境と、未学習環境で似通った値となり、十分な判定ができていないことがわかった。

3. 2 距離推定 Autoencoder

次に入力画像にカラー画像を与え、出力画像が D435 センサの距離画像となる Autoencoder (以後 PTD Autoencoder) を考える。PTP Autoencoder 学習時と同じデータセットのうち、Input としてカラー画像を与え、Output として距離画像を与える (表 3)。学習するネットワークアーキテクチャは図 2 に示す。

表 3 カラー画像から距離画像推定用データセット

Input	Output
カラー画像 (3×45×80)	距離画像 (3×45×80)

2500epoch 学習後に式 1 を用いてエラー値を評価した結果を図 3 に示す。

学習済み環境画像 8000 枚に対して平均 209 (左から 3 番目)、未学習環境画像 500 枚に対して平均 1666 (もっとも右) となった。

PTP Autoencoder と PTD Autoencoder の出力画像比較を図 4 に示す。

検証に用いたデータは学習済、未学習ともにニューラルネット学習時のデータセットには含まれていない。学

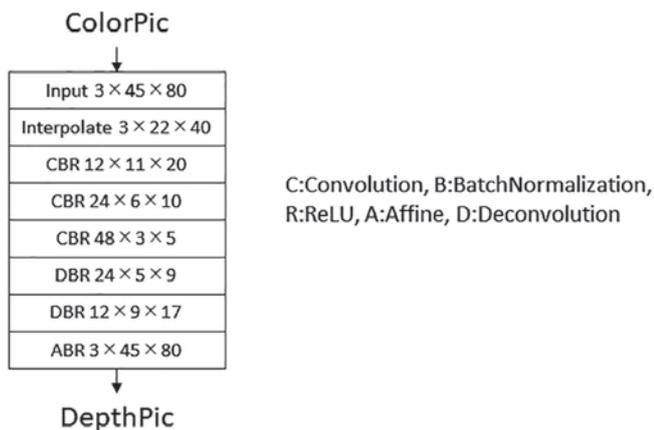


図2 PTD Autoencoder によるカラー画像からの距離推定

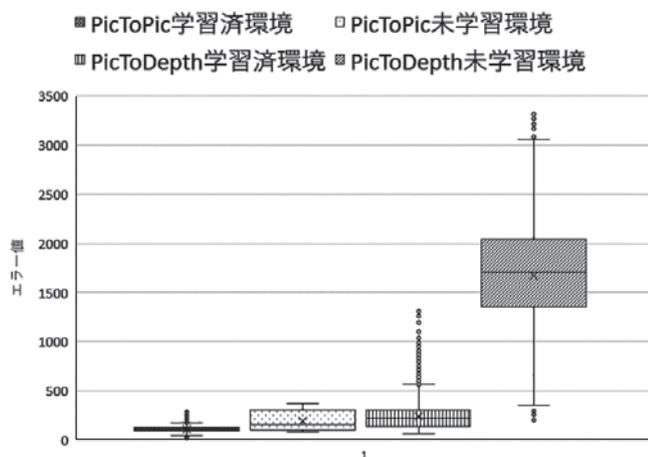


図3 Autoencoder による未学習環境検知

習済み環境のカラー画像を PTP Autoencoder と PTD Autoencoder に与えると、どちらも良好な推定を出力し、エラー値 (E) はそれぞれ 100、200 程度となる。

未学習環境のカラー画像を与えると、カラー画像を出力する PTP Autoencoder は未学習環境であっても一定程度入力画像を再現でき、エラー値は 200 付近を示す。

一方、距離画像を出力する PTD Autoencoder では、未学習環境のカラー画像を与えようまく距離を推定できず、エラー値は 1500 付近を示す。画像 1 枚から 3D 認識を行っており、PTP Autoencoder より困難なタスクを与えられていると考えられ、うまく奥行きを推定できていないと考える。

このことから、同規模のネットワークで未学習環境を検出するためには PTD Autoencoder を用いたほうがより分離度が高く有効であることがわかった。

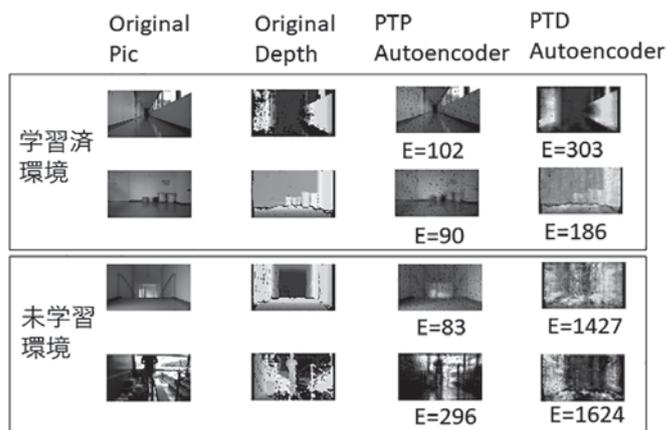


図4 Autoencoder 比較

4. 自動走行ネットワークとの結合と検証

昨年度までに開発したネットワークは、5 時刻分 (最新時刻 T、T-1 (1 秒前)、T-2、T-3、T-4) のカラー画像、距離画像、方位センサデータ、ゴール番号、ルート番号を入力データとし、ゲームパッド操作量であるスピード値、平行移動値、回転速度値を推定する [5]。

このネットワークは RNN [6] アーキテクチャを用いて実装している。カラー画像、距離画像ごとに T-4 時刻分のデータを起点に処理後、その情報を再帰構造で次の T-3 時刻に送り、ここでさらに統合して処理後、T-2 時刻処理に送るというように、最新時刻 T 処理まで繰り返す。その後、カラー画像処理結果、距離画像処理結果、磁気センサ X、Y、ゴール番号、ルート番号と集計し、速度、平行移動方向、回転速度を推定していた。

今年度開発したネットワークは Autoencoder を結合するため、このままでは計算量が多く、本研究で試作しているロボットに搭載される CPU ではスループットが十分でない。

計算量の削減と推定精度の維持を目的に、ResNet [7] [8] アーキテクチャを用いて改良し、カラー画像処理部を Pic Conv Unit (図 5)、距離画像処理部を Depth Pic Conv Unit (図 6) としてユニット化した。

各時刻において、カラー画像、距離画像をそれぞれ Pic Conv Unit、Depth Pic Conv Unit で処理後、磁気センサ X、磁気センサ Y、ゴール番号、ルート番号と結合し、全結合層で処理した結果を、次時刻の再帰処理へ送るようネットワークを構成した (図 7)。

さらに 3. 2 の PTD Autoencoder を統合するために、最新時刻 T のカラー画像を入力として、出力に T 時

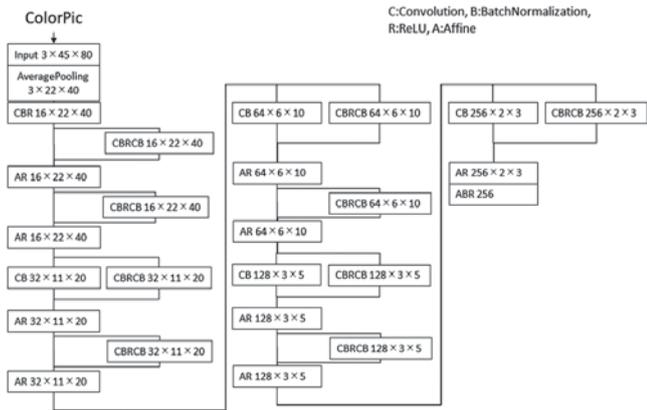


図5 Pic Conv Unit アーキテクチャ

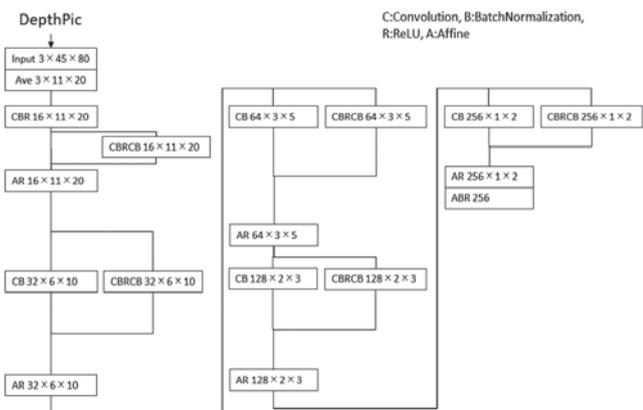


図6 Depth Pic Conv Unit アーキテクチャ

表4 統合学習用データセット

input	output
カラー画像 (3×45×80) ×5	スピード値 (-1 ~ 1)
距離画像 (3×45×80) ×5	平行移動方向値 (-1 ~ 1)
磁気センサ X (-1.0 ~ 1.0) ×5	回転速度値 (-1 ~ 1)
磁気センサ Y (-1.0 ~ 1.0) ×5	
ゴール位置 0 (0 or 1) ~ 9 (0 or 1)	
ルート選択番号 (-1 or 0 or 1)	

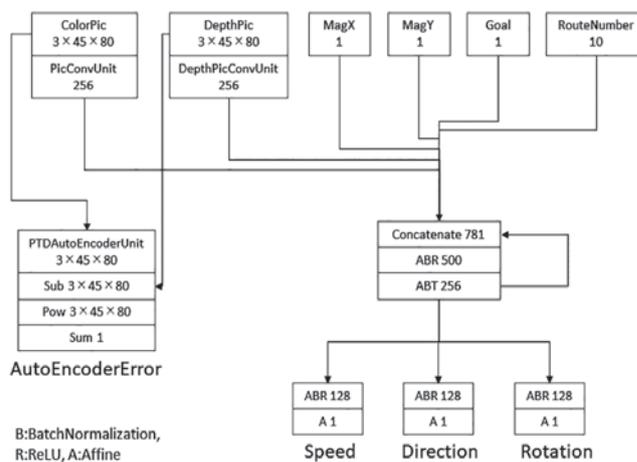


図7 統合推定ネットワーク

刻距離画像を与え同時学習させる。T時刻推定距離画像のエラー値は、3.1の1式をニューラルネット上で計算し出力する。これによって、スピード値、平行移動、回転速度、Autoencoderの統合したend-to-end学習が可能である。なお、ネットワーク全体の計算規模を表す全乗加算数は270,888,064となった。

統合ネットワークを学習させるためのデータセット構成を表4に示す。このデータセットを120,000個収集し、800epoch学習させた結果、Best Validationは388.98264を得た。学習後、自動停止とするエラー値を検討し、1250を閾値とした。

工業技術センター2階の周回約250mを対象に自動走行実験を行わせた結果、平均時速3km/hで走行可能なことを確認した。

また、階段踊り場など、学習データに含まれない環境では、未学習環境を検知し停止できることが確認できた。想定外の状況に対して一定程度の自動停止が期待できる。以上の結果から、本研究で提案するネットワークが屋内走行機能と、未学習環境での自動停止を

備えた一定の安全機能を備えることが確認できた。

5. 結言

本研究では、カラー画像と距離画像によるメカナム台車の模倣学習を試みた。昨年までの、複数場所への区間移動、障害物回避、人追跡に加え、今年度はAutoencoderによる異常停止機能の導入を図った。

カラー画像から距離画像を推定するAutoencoderを学習させることで、未学習環境の検出が可能となった。

このAutoencoderを昨年度までの自動制御ニューラルネットに統合し、ネットワーク全体のコンパクト化調整を実施後、同時学習させた。学習後にロボットへ実装し、工業技術センター通路にて、移動機能と自動停止機能の有効性を確認した。

今後は、屋内だけでなく屋外での自動走行、メカナム台車にロボットアームを追加したうえで、エレベーター

タ等を活用した多層階の移動など機能拡張を実施していきたい。

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.49, pp.18-21, 2020.7.
- [5] 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.50, pp.14-15, 2021.7.
- [6] 小林由幸：Deep Learning 入門 Recurrent Neural Network とは?,
<https://www.youtube.com/watch?v=yvqgQZIUAKg>, Accessed 2020.6.
- [7] 小林由幸：Deep Learning 入門 ニューラルネットワークの多層化テクニック,
<https://www.youtube.com/watch?v=X2KWO1UPqzk>, Accessed 2020.10.
- [8] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun : Deep Residual Learning for Image Recognition,
<https://arxiv.org/abs/1512.03385>, Accessed 2020.10.

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方が広がっており、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アレイマイク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。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ている。

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。

本年度は、音源可視化装置のハードウェア構成を検討するための予備実験を行った。

2. システム構成

開発する音源可視化装置のシステム構成を図1に示す。開発する装置は、複数のマイクロフォンと可視画像カメラ・熱画像カメラを搭載したセンサーアレイと制御用 PC、学習用ワークステーションに加え、データの通知や表示を行う端末、連携するアプリケーションソフトで構成される。学習用ワークステーションでは、取得した音や画像情報を AI 技術で学習および解

析し、稼働状況や異常に関する監視結果を Web 画面で提供する機能を搭載する。

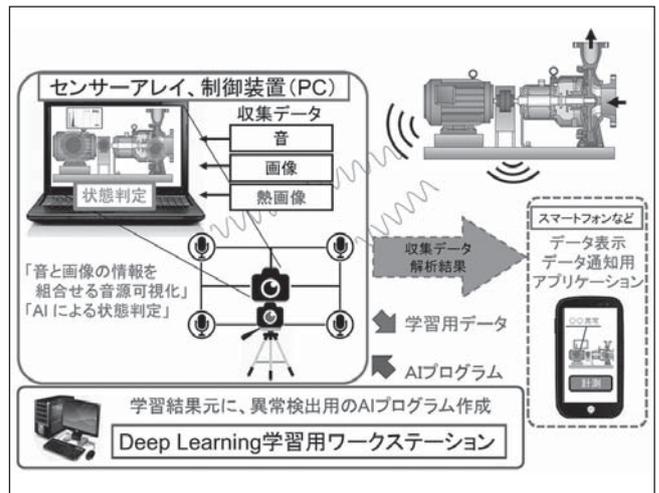


図1 システム構成

本研究で用いる技術として、熱画像カメラを用いた稼働中の機械装置の検出について、実施した予備実験の結果を図2に示す。複数の機械装置がある実験室において、通常のカメラ画像と熱画像を取得し、熱画像から稼働する機械装置の検出を目指す。今回の予備実験で、熱画像から機械装置の存在が確認できるため、今後は画角や解像度に加え、設定するレンジなどを含め、画像としての学習データの作成について検討していく。

また、音源探査の基本的な技術として、音の位相遅延を利用した音源探査の原理について図3に示す。複数のマイクロフォン間の距離と音の遅れから、音の到来方向を求めるこの技術は、各マイクロフォンにおける位相遅延を解析する事で音源位置の特定に用いることができる。

本研究では、上記の熱画像をはじめとした機械装置の検出技術と連携し、音の到来方向を指定することで、位相遅延を考慮した範囲を絞った集音の実現に利用する。以下では本年度行った予備実験におけるハードウェア構成について述べる。

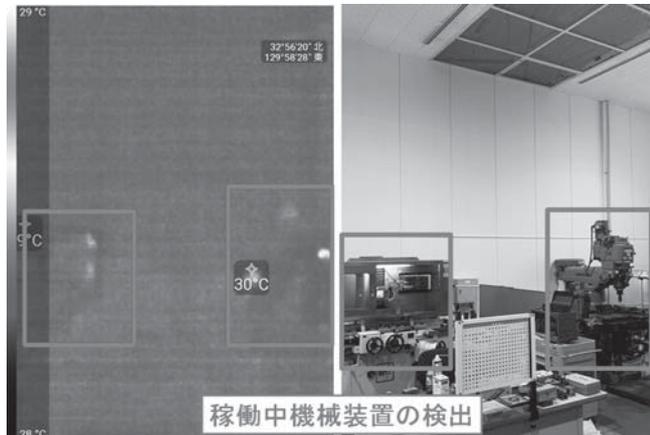


図2 熱画像カメラを用いた稼働監視

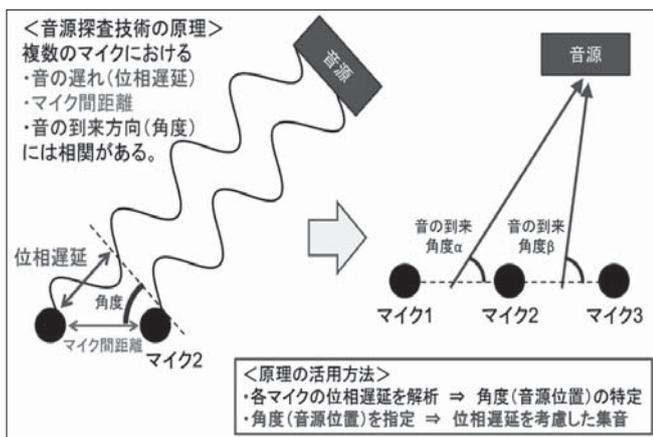


図3 音源探査の原理について

3. 実験装置の構成と試作ニューラルネットワーク

本年度実施した音源可視化装置計測原理確認実験では、大きく分けるとセンサーアレイ（図4）と学習用ワークステーション（図5）の2つで構成される装置を構築した。

センサーアレイのレコーダー部分には、6chの同期の取れた音データ（WAV形式）の録音ができる市販のフィールドレコーダーを用いた。マイクロフォンには計測用のコンデンサーマイクロフォンを使用している。構成を表1に示す。

また、学習用ワークステーションは、上記マイクロフォンで収集した6chの音データを元に、音を分割しデータセットを作成するプログラムにより作成したデータセットを用いて、音源探査の学習を実施する。学

習の際は、主にGPUでの計算となるので画像を扱うなど計算負荷によってはGPUの増強や、一度に読み込めるデータ量を増やすためにRAMの増設なども検討する必要がある。学習用ワークステーションの構成について、表2に示す。



図4 センサーアレイ



図5 学習用ワークステーション

表1 センサーアレイ構成

レコーダー	H8 (ZOOM)
マイクロフォン	ECM8000 (Behringer)
スピーカー	DBR12 (YAMAHA)
ノイズ発生器	DS-3000 (小野測器)
記録媒体	SDカード又はPC

表2 学習用ワークステーション構成

OS	Windows10Pro 64bit
CPU	Xeon E3-1220 v3
GPU	GeForce RTX3060 (メモリ 12GB)
RAM	32GB
ストレージ	SSD 240GB (SATA3)

表3 実験条件

場所	無響室
スピーカー位置	4箇所 (図7)
出力信号種類	2種類 (RANDOM、 PSEUDO RANDOM)
録音時間	600 [s]

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) [5] である。バージョン 1.80 以降、WAV データを直接取り扱うことができるようになり、音を取り扱う分野でもより使用し易いものとなり、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。試作したニューラルネットワークについて図6に示す。当初 6ch の音データを、それぞれ個別の入力データとして別々のネットワークに分けていたため学習に問題があった。そこで、6次元の1つの音データとして取り扱うネットワークを構築する事で、6ch 間の関連を含んだ学習ができた。

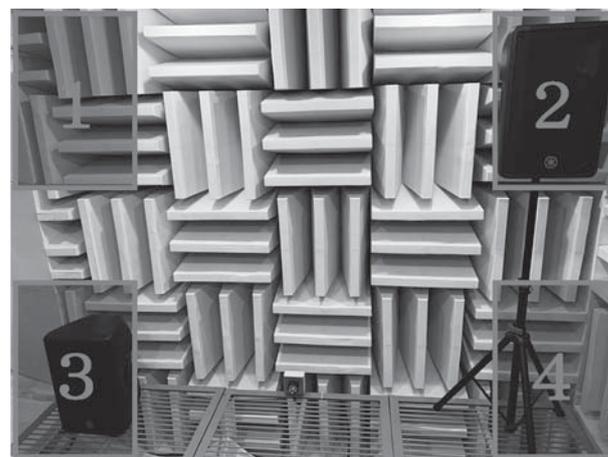


図7 スピーカー位置

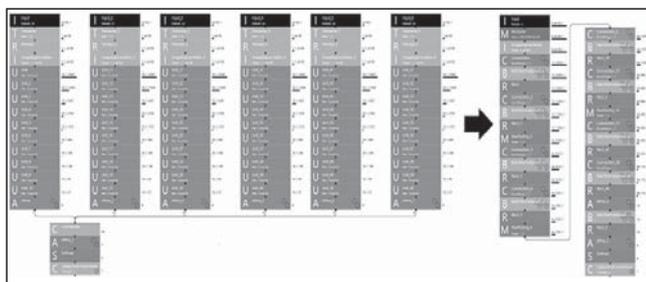


図6 試作ニューラルネットワーク

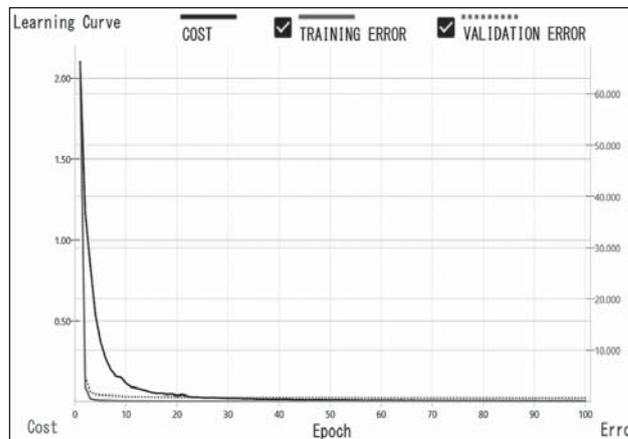


図8 学習曲線

上記実験装置を用いて、表3の実験条件にて音源探査の実験を無響室で実施した。収集した音データを元に、データセットを作成し試作ニューラルネットワークによる学習を行った結果を以下に示す。スピーカー音源の位置を図7のように設置し、4箇所のスピーカーに対し順番に音データを収集し、作成した学習用のデータセットにて学習を行った結果、図8の学習曲線及び図9の評価結果を得た。これにより4分類が可能である傾向が示されたので、今後は音源可視化装置の試作及び精度向上に向けて取り組むこととする。

	y_0	y_1	y_2	y_3	Recall
y=0	67	1	32	0	0.67
y=1	4	55	5	36	0.55
y=2	25	6	57	12	0.57
y=3	0	27	4	69	0.69
Precision	0.6979	0.6179	0.5816	0.5897	
F-Measures	0.6836	0.5819	0.5757	0.6359	
Accuracy	0.62				
Avg.Precision	0.6218				
Avg.Recall	0.62				
Avg.F-Measures	0.6193				

図9 評価結果

4. 結言

音源可視化装置を提案した。本年度は、監視装置のハードウェア構成を検討するための予備実験を実施し、収集した音データからデータセットを作成する基本プログラム及び、6ch の WAV データを学習する基本的なニューラルネットワークを試作した。無響室における実験の結果、6ch の音データによる音源位置 4 分類が可能であることを確認した。

今後、音源可視化装置の試作と、音源探査の精度向上に向け、画像と併せて学習するプログラムの開発を行い、学習データの規模に応じたワークステーションの改良を実施する。また、対象に絞った音抽出に向けてプログラムの開発を実施する。

参考文献

- [1] 亀岡弘和：深層学習モデルを用いた音声音響信号処理、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] 木下大：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] 木下大：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] <https://dl.sony.com/ja/>, Accessed 2021.

生体組成の非侵襲計測技術の開発

(長崎県発の非侵襲計測手法“TFDRS”を活用したリンパ浮腫の早期診断装置)

電子情報科 科 長 下 村 義 昭
電子情報科 主任研究員 田 尻 健 志

がん患者のリンパ節切除で主に発症するリンパ浮腫では、皮下にアルブミンと呼ばれる蛋白の濃い体液が異常に蓄積される。むくみ等の兆候がない早期ほど症状の進行を最小限に抑えて予後を改善できるが、従来の触診やむくみ測定では早期発見は難しい。一方、体外から光を当てるだけで皮下の体液量とアルブミン濃度を測定できる手法はリンパ浮腫の早期発見に有効となる。そこで、本開発では生体による光散乱やヘモグロビン色素等の夾雑物による吸収、さらには測定部位の温度変化の影響を排除した生体組成の高精度な光学的非侵襲計測手法を提案し、理論・実験の両面で測定精度等の実用性を検証した。また、本計測手法をベースに試作した測定装置では、小型・軽量化に伴う幾つかの課題も抽出されたが、片手で操作が可能な重量約 180 g でリモコンサイズを実現した。

1. 緒言

リンパ浮腫は乳がん等の手術でのリンパ節除去やその後の放射線治療でリンパ管の機能が低下して発症する。さらに、図1に示すようにリンパ管で回収されない水分やたんぱく質が皮下の間質液にたまり腫れた状態になる^[1]。むくみ等の兆候がない早期ほど症状の進行を最小限に抑えて予後を改善できる。しかし、現状では巻尺で測定した左右の腕等の周径差から発症を判断するが、この時点で既に兆候が出ている病期1期以上となる。

リンパ浮腫の診断を目的に L-Dex (米国 ImpediMed 社製) が既に製品化されている^[2]。皮下間質液の電気抵抗から水分量のみを測定する本装置では水分だけが貯留するいわゆる「浮腫」との判別が難しい。

一方、リンパ浮腫の診断目的とは異なるが、脳表面のヘモグロビン濃度を測定して脳機能を評価する装置がある^[3]。連続発振の半導体レーザーを利用した拡散反射分光法によりヘモグロビン濃度の変化量と散乱光路長の積 (以下、相対値と呼ぶ) を測定する。照射光の波長を変更すれば水分量やアルブミン濃度の相対値の測定が原理的には可能となる。同じ測定部位であれば散乱光路長が一定となるため上記の相対値でもアルブミン濃度等の変化量を評価できる。しかし、散乱光路長が異なる部位間では測定値の比較ができないため、左右の腕等での比較や発症までの経時変化を観察することは難しい。

また、時間分解分光法を用いて生体組織中のヘモグロビン濃度を絶対値で測定する装置があり^[4]、散乱光路長が異なる部位間でも測定値の比較が可能となる。照射光の波長を追加して水分量やアルブミン濃度の測

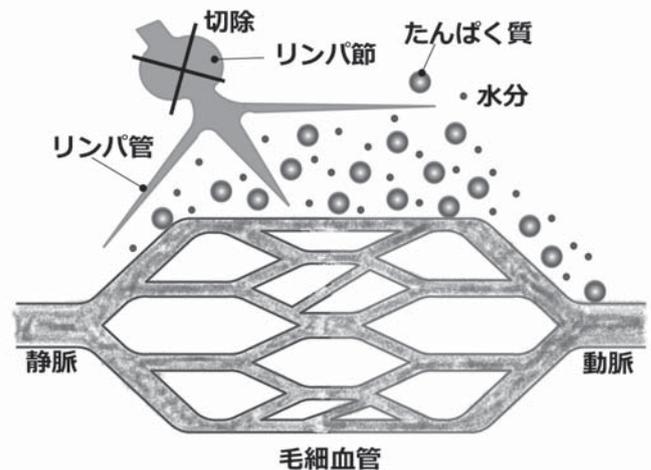


図1 リンパ浮腫。リンパ節の切除によりリンパ管が障害され、水分やたんぱく質が回収されず、細胞と細胞の間にある間質液にたまった状態となる。

定も可能となるが、時間分解分光法を用いる装置は高額な短パルスのレーザー光源と光電子増倍管などの光検出器を必要とする。

そこで、本開発では果実糖度の非破壊計測を目的に開発した独自の光計測手法 TFDRS^[5] を応用して生体組成の非侵襲計測技術を開発した。TFDRS では、散乱光路長に依存しない物理量として独自に提案した「相対吸光度比」を非破壊計測の指標として用いる。これにより、散乱光路長が異なる部位間でも測定値の比較が可能となる。さらに、ハロゲンランプや発光ダイオードなどの安価な光源を用いた計測も可能となる^[6]。

本報告では、TFDRS を活用したアルブミン濃度や

水分などの生体組成の測定手法、および測定精度について評価した結果について述べる。さらに、TFDRSを活用して試作した非侵襲測定装置の概要と課題についても述べる。

2. 研究内容と結果

2.1 非破壊計測手法 TFDRS

TFDRS では、図 2 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 λ_k ($k=1, 2, 3$) で測定した反射光の強度比 (反射率) $R(\lambda_k) = i_{sig}/i_{ref}$ 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 [5]。

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

(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非常に良い直線相関を示す。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。

図 3 は TFDRS を活用して商品化した携帯型糖度計を示す。本装置では、光源に近赤外領域の発光ダイオードを使用し、重量 200 g (電池重量含む) と世界最軽量級を実現している。また、TFDRS を用いることで、これまでの品種毎や収穫時期に応じた検量線の更新作業が不要となった他、ロックインアンプを用いて太陽光等、外乱光の影響を排除することで屋外での使用が可能となった。

2.2 TFDRS による生体組成の非侵襲計測

生体は果実と異なり、水分、脂肪、蛋白、さらにはヘモグロビン色素等の多くの吸収因子が含まれる。TFDRS による被験者前腕部の反射スペクトル (吸光度、 $A = -\ln(R)$) の実測値 (●) と光散乱理論 [7][8] により算出した理論値 (実線) を図 4 (a) に示す。理論値の計算では、生体を水分、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と仮定した。図 4 (b) は上記反射スペクトルの実測値に対する理論値の相対誤差 (誤差の実測値に対する比(%)) を示しており、生体の複雑な反射スペクトルを 650 nm ~ 1050 nm 範囲で相対誤差 $\pm 1\%$ 以下で理論的に再現し

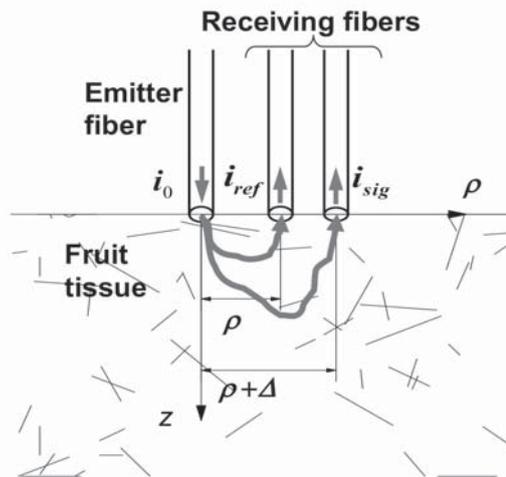


図2 TFDRS の概略図。1 本の光照射ファイバーを用いて果実などの被検体にレーザー光を照射し、反射光の一部を 2 本の受光ファイバーで受光する。



図3 TFDRS をベースに商品化した携帯型糖度計。光源に発光ダイオードを使用し、重量 200 g (電池重量含む) と世界最軽量級を実現した。

ている。

上記の理論計算手法を用いて、(1) 式で表される相対吸光度比 γ と生体組成 C_k ($k=1, \dots, n$; n は組成の数) の関係を解析した。図 5 は (2) 式で表される 1 次多項式を仮定した場合の相関係数 R^2 の計算結果を示す。

$$\gamma = a_0 + a_1 \cdot C_1 + \dots + a_n \cdot C_n \quad (2)$$

ここでの計算では、相対吸光度比 γ を算出するための 3 つの波長の内、波長 λ_1 と λ_2 をそれぞれ特定の

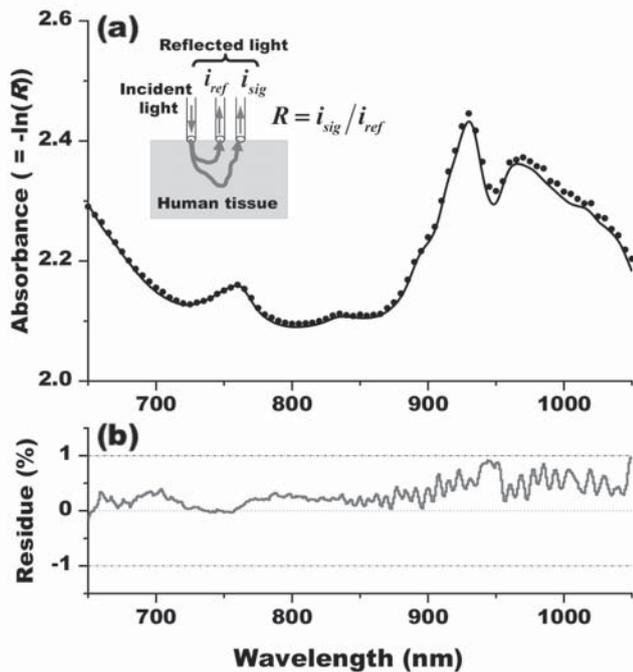


図4 (a) 被験者前腕部の反射スペクトルの実測値(●)と理論値(実線)、および(b) 反射スペクトル実測値に対する理論値の相対誤差(%)。

波長に固定し、残りの波長 λ_3 を変化させた。総ヘモグロビン濃度と組織酸素飽和度はそれぞれ 0.05mM - 0.25mM、30% - 90% の範囲で変化させた。蛋白と水はアルブミン水溶液として扱い、そのアルブミン濃度と温度をそれぞれ 20 w/v% - 40 w/v%、20°C - 40°C の範囲で変化させた。また、蛋白水溶液と脂肪を合わせた体積分率を 100% と仮定し、脂肪の体積分率を 20% - 40% の範囲で変化させた。等価散乱係数 μ_s' は $\mu_s' = P_1 \times \lambda^{-P_2}$ で表し、 $P_1 = 0.7 - 1.3 \text{ mm}^{-1}$ 、 $P_2 = 0.7 - 1.3$ の範囲で変化させた。また、反射光の検出に用いるフォトダイオードの暗電流やアンプ等の電気ノイズに起因した反射率 R の測定誤差 ($\langle \delta^2 R \rangle^{0.5} / R$) を実用的な値 0.1% と仮定した。図より、 λ_3 の波長範囲 700 nm - 950 nm で $R^2 > 0.95$ と非常に高い相関関係があることが分かる。

以上のことから、生体組成 C_k ($k=1, \dots, m$) は波長の異なる複数の相対吸光度比 γ_k ($k=1, \dots, n; n \geq m$) を用いた下記 1 次多項式 (3) により推定することができる [9]。

(3) 式を用いてアルブミン濃度 (w/v%) と水の体積分率 (%) を推定した結果を図 6 (a)、(b) に示す。ここでは、5 つの相対吸光度比 γ_k ($k=1, \dots, 5$) を用い

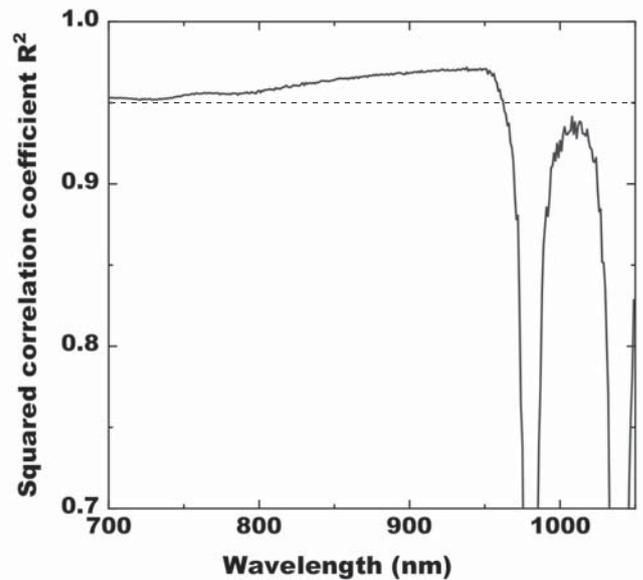


図5 相対吸光度比 γ と生体組成 C_k ($k=1, \dots, n; n$ は組成の数) の関係。縦軸は、相対吸光度比 γ を生体組成 C_k の 1 次多項式で表した場合の相関係数 R^2 を示す。

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

た 1 次多項式 (3) により推定した。ここでも、反射率 R の測定誤差 $\langle \delta^2 R \rangle^{0.5} / R = 0.1\%$ を考慮した。アルブミン濃度は 2.6 w/v% 以下の精度、また水の体積分率は 2% 以下の精度が得られた。

2.3 非侵襲測定装置

試作した非侵襲測定装置の外観を図 7 に、またその主要諸元を表 1 に示す。本装置はリモコン並みの重量 179 g (電池重量含む) とサイズ 55 mm (W) × 38 mm (H) × 133 mm (D) を実現している。また、片手で簡単に操作でき、測定時間は 2 秒となっている。

検出器に 2 台の分光器 (型式: C14384MA-01 浜松ホトニクス社製) を用い、また光源に近赤外用 LED (SFH 4736、OSRAM 社製) を用いた。本装置で測

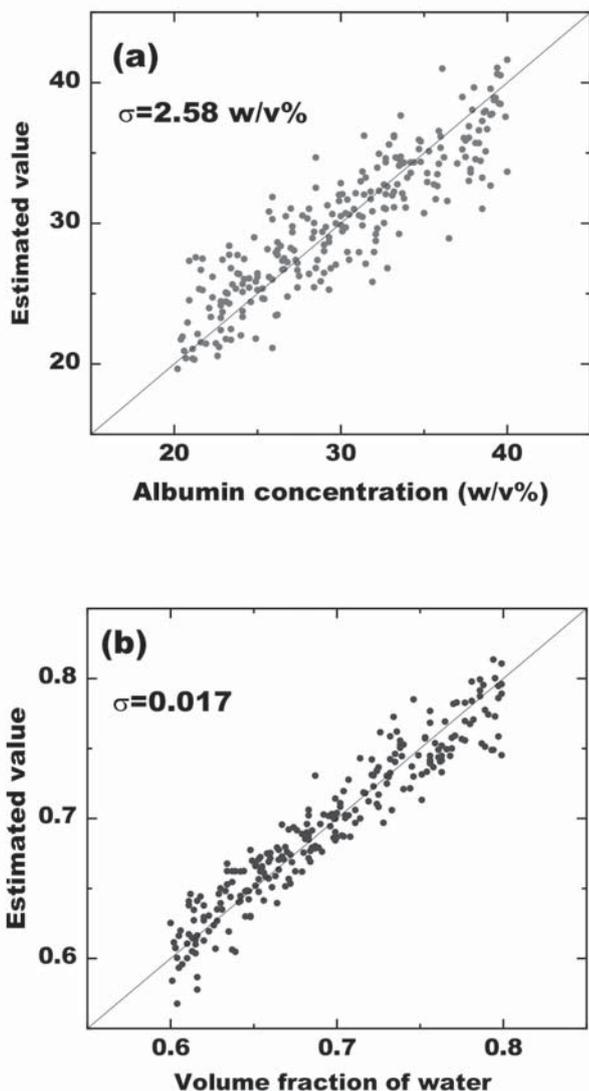


図6 相対吸光度比 γ を用いた生体組成の推定結果。(a) アルブミン濃度 (w/v%)、(b) 水の体積分率。各組成は5つの相対吸光度比 γ_k ($k=1, \dots, 5$) を用いた(3)式の1次多項式により推定した。

定した反射スペクトルは Bluetooth を用いて携帯端末に転送され、端末側で反射スペクトルから水、蛋白等の重量比 (w/w%) を計算して表示する。

図8(a)は上記測定装置で測定した反射率の安定性 (%) を示す。図中の実線は LED、点線はハロゲンランプをそれぞれ測定用光源に用いた結果である。実用的な測定精度を得るには 0.1% 以下の安定性が必要となるが、680 nm 以下、及び 950 nm 以上の波長域で LED の安定性が 0.1% を超えて悪くなっている。これは、図8(b)の光源の分光分布が示すように、上記の波長域で LED の光量が不足していることに起因し

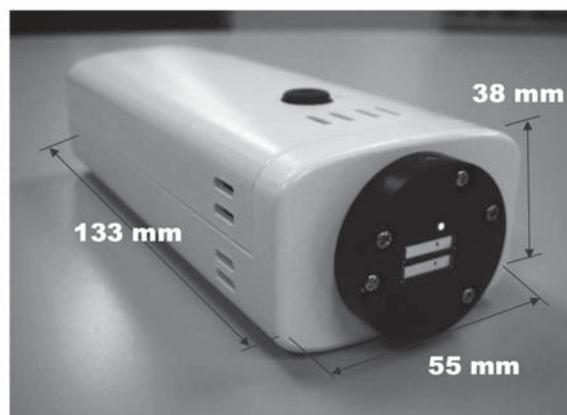


図7 試作した非侵襲測定装置の外観。光源に LED を使用し、リモコン並みの重量 179 g (電池重量含む) とサイズ 55 mm (W) × 38 mm (H) × 133 mm (D) を実現した。

表1 測定装置の主要諸元

測定方式	TFDRS
光源	LED
検出器	分光器
測定項目	水、蛋白等の重量比 (w/w%)
測定時間	2 秒
データ通信	Bluetooth & USB
電力	充電式ニッケル水素電池
重量 / サイズ	179 g (電池含) / 55 mm(W) × 38 mm(H) × 133 mm(D)

ている。

3. 結言

皮下の体液量とアルブミン濃度を体外から光を当てただけで測定してリンパ浮腫を早期に発見する非侵襲計測手法について 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アルブミン濃度を 2.6 w/v% 以下、水分の体積分率を 2% 以下の精度でそれぞれ測定できることを理論的に検証した。

また、TFDRS を活用して試作した非侵襲測定装置

はリモコン並みの重量 179 g (電池重量含む) とサイズ 55 mm (W) × 38 mm (H) × 133 mm (D) を実現した。しかしながら、使用した LED の光量不足により十分な反射率の安定性が得られなかった。

今後の実用化では、測定装置の SN 比の改善等の課題解決が必要となる。また、TFDRS で測定される蛋白濃度や各組成の重量比がリンパ浮腫の早期診断の指標として有効であるかを臨床評価する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 研究成果展開事業 A-STEP 機能検証フェーズ (JPMJTM19YY) の支援によって行われた。

参考文献

- [1] 主婦の友社編：リンパ浮腫 保存療法から外科治療まで (よくわかる最新医学) 廣田彰男、三原誠、原尚子監修 (主婦の友社) pp.12-13, 2018
- [2] Ridner, S. H. et al.: Ann. Surg. Oncol. 26, pp.3250-3259, 2019.
- [3] A. Maki, Y. Yamashita, Y. Ito, E. Watanabe, Y. Mayanagi, and H. Koizumi: Med. Phys. 22, pp.1997-2005, 1995.
- [4] E. Ohmae et al.: NeuroImage 29, pp.697-705, 2006.
- [5] 下村義昭：レーザー研究 39, pp.233-238, 2011.
- [6] Y. Shimomura, S. Tanaka, and K. Tateishi: Proc. of IEEE LEOS Annual Meeting, pp.652-653, 2008.
- [7] M. S. Patterson, B. Chance, and B. C. Wilson: Appl. Opt. 28, pp.2331-2336, 1989.
- [8] T. J. Farrell, M. S. Patterson, and B. Wilson: Med. Phys. 19, pp.879-888, 1992.
- [9] Y. Shimomura, S. Miki, T. Tajiri, and H. Tanaka: Proc. of IEEE LEOS Annual Meeting, pp.274-275, 2009.

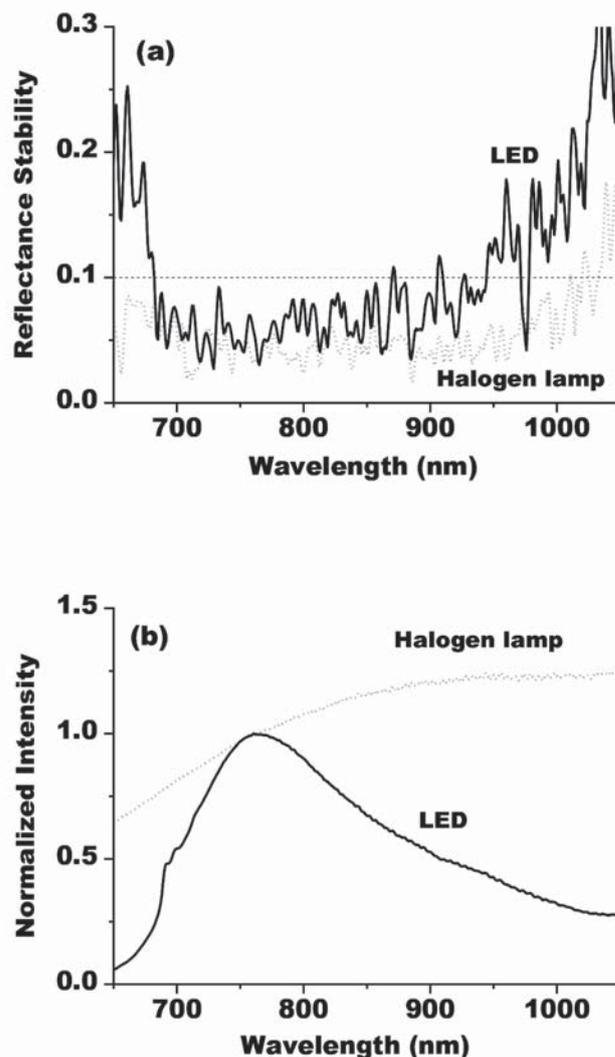


図8 (a) 反射率の安定性 (%) と (b) 測定用光源の分光分布。図中実線は LED、点線はハロゲンランプをそれぞれ測定用光源に用いた結果を示す。

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、爆発を未然に防止する必要がある。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。本報では水素ガスを充填し、単一の微小球を励起して散乱光を検出するシステムを構築した。

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][2]}。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、爆発を未然に防止する必要がある。

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^{[3][4]}。この周回する特有の電磁波モードは、ウィスパリング・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

小球表面に吸収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、センサーの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、水素ガスを充填し、単一のシリカ微小球を白色光源で励起して散乱光を検出するシステムを構築したので報告する。

2. 研究内容と結果

2.1 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。図1に示すように、単一のシリカ微小球の計測部は、顕微鏡のステージプレート部にガラスベースディッシュ(IWAKI製、底面厚み0.15~0.18mm)を設置し、側面から水素を吸排気するチューブを取り付けた。また、ガラスベースディッシュは水素の漏洩を防止するため、Oリングとシールテープを用いて密閉した。



図1 微小球の計測部分

図2に示すように、微小球を励起する光源には、白

色光源 (ENERGETIQ社製、LDLS 白色光源 EQ-99、 $\lambda=170\sim 2100\text{ nm}$) を使用し、励起用に用いる油浸対物レンズ (ニコン製) は、NA (Numerical Aperture) $=1.25$ 、倍率100倍、WD (Working Distance) $=0.17\text{ mm}$ を使用した。

図3に示すように、ガラスベースディッシュ底面のカバーガラスとの屈折率差を防ぐためマッチングオイル (屈折率 1.515) を使用し、励起光のスポット径が微小球以下になるように調整した。

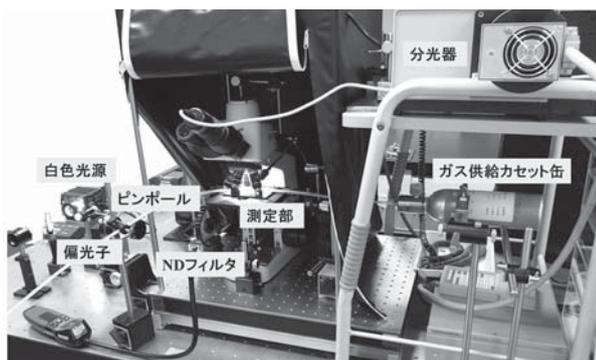


図2 白色光源による単一微小球の検出システム

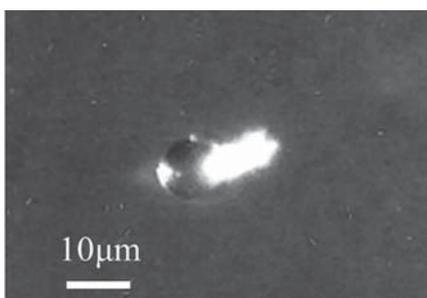


図3 単一微小球の励起状態

2. 2 単一微小球からの散乱光スペクトル

図4 (a)は、2. 1で構築した単一微小球の検出システムを用い、空気中におけるシリカ微小球の散乱光を検出したスペクトルである。560~610 nm の波長帯域の中に TE 偏光と TM 偏光に対応した周期的な共振ピーク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。

次に、図4 (b)は、Mie散乱理論の散乱断面積のフィッティングにより、空気中のシリカ微小球の光学モデルの検証を行った。微小球の球径と屈折率をそれぞれ $10.0\text{ }\mu\text{m}$ と 1.40 、空気の屈折率を 1.0 としてフィッティングした結果、実験で検出した散乱光スペクトルのピークとほぼ一致していることがわかる。

この散乱光スペクトルは、水素が無い時の基準波形となる。共振ピークは微小球の表面変化に敏感である

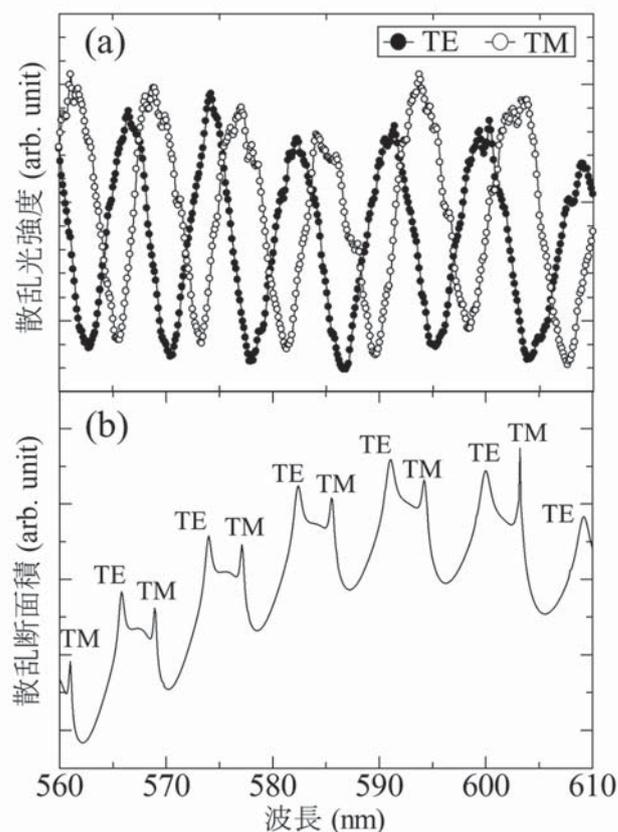


図4 シリカ微小球の散乱光スペクトル

ため、ガラスベースディッシュへ水素を充填することで変化する、水素の有無を迅速に検知することができる。

3. 結言

封止したガラスベースディッシュの中で単一微小球を励起し、散乱光を検出する顕微分光計測システムを構築した。共振ピークが発生する散乱光をMie散乱理論と比較したところ、シリカ微小球の仕様 (直径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、屈折率 1.40) と一致し、本システムがWGモードを検出できていることを確認できた。次年度は、コーティングしたシリカ微小球に水素ガスを充填し、本システムの性能評価を行う。

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] 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.
- [4] T. Tajiri, S. Matsumoto, T. Imato, T. Okamoto, and M. Haraguchi, Anal. Sci., 30, pp.799-804, 2014.

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、接合部内部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。本年度は、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、安定的に70 μ m以上の高さの突起部が得られることがわかった。

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、材料間に行け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上記の装置および前処理した材料を用いて、溶着状態や加工時間等に影響する複数のパラメーターの最適化と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、そのサンプルを用いて接合強度や気密性を評価する。

本年度は、上記②の研究項目を実施したので、その結果を以下に詳述する。考案した前処理手法でアクリル樹脂板に突起部を成形する実験を行った。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

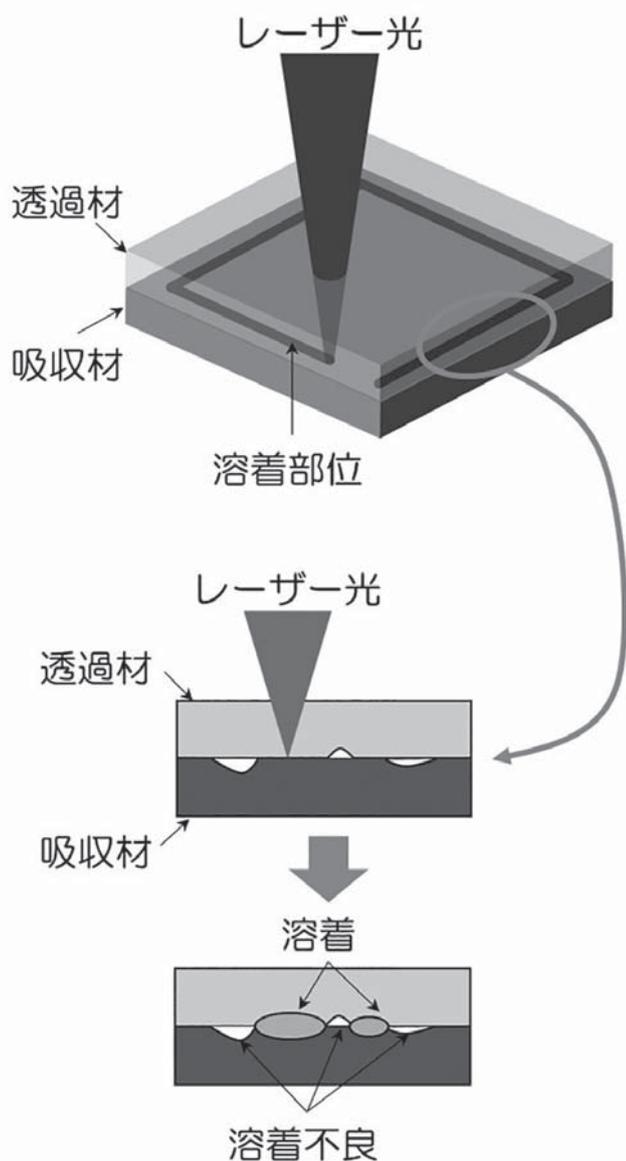


図1 レーザー樹脂溶着時の材料間の隙間に起因する溶着不良の模式図

部の高さを測定した。測定結果の一例を図2に示す。図2は、パラメーターとして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。突起部の高さは各成形速度におけるサンプル数 $n=9$ の平均値であり、エラーバーは標準偏差 σ である。成形速度4では、高さ $90\mu\text{m}$ 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 $\sigma=12\mu\text{m}$ であった。一方で、成形速度5では高さ $90\mu\text{m}$ を超える突起部は得られなかったが、平均値で成形速度4を上回り、さらに $\sigma=3.6\mu\text{m}$ とばらつきも小さい。成形速度5においては、平均値から 3σ を引いた数値が $71\mu\text{m}$ であり、この成

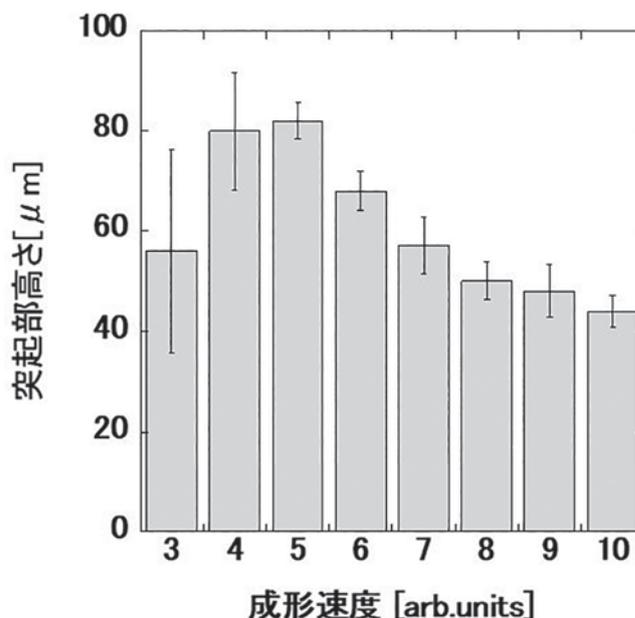


図2 成形速度を変化させた場合の突起部の高さ

形条件では、安定的に $70\mu\text{m}$ 以上の高さの突起部が得られることがわかった。

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。本年度は、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、安定的に $70\mu\text{m}$ 以上の高さの突起部が得られることがわかった。

次年度以降は、溶着状態等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、最適な加工条件を明らかにしていく。

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，エヌ・ティー・エス，2015.
- [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.

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1報)

(膜分離プロセス向上のための解析)

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。そのいっぽう、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。いっぽう、ミクロ分子動力学法で現象を直接追跡することは、計算コストの観点から非現実的である。そのため、両者の中間であるメソスケールシミュレーションや粗視化技法が提案されているが、汎用的な手法は確立していないのが現状である。

長崎県工業技術センターでは、このようなミクロ現

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て、方法論の開発と応用研究の両方を進めている。

以前の研究「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を行い、CAE関連企業の技術支援と普及活動を行った^[2](図1)。

さらに前段研究「複雑事象に対応した連成解析技術の開発(平成30年度—令和2年度)」では、マルチスケールシミュレーション環境の構築とその性能評価を目的として、(1)水分子の膜透過モデルに対するマクロ流体力学と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^[3]。

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)。

本研究ではその前段として、セルロースと有機分子のミクロ相互作用解析を行った。

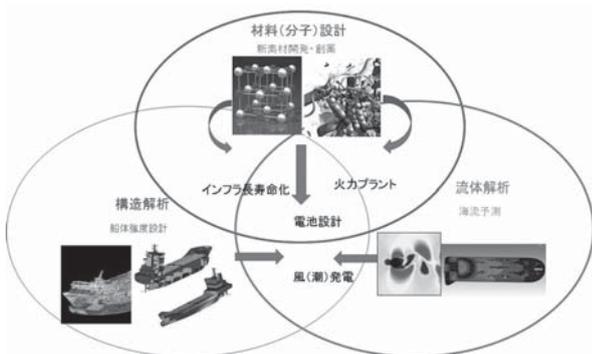


図1 連成解析のイメージ図

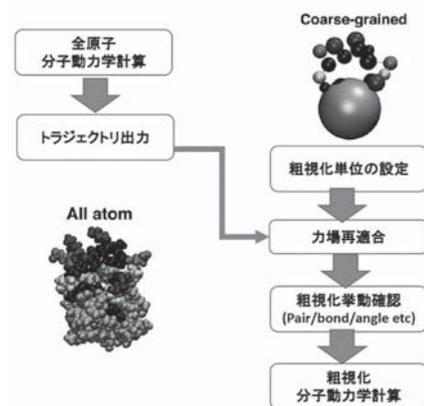


図2 MS-CG粗視化法のスキーム

2. セルロースナノファイバーと各種溶媒との相互作用：ハロゲン相互作用解析

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

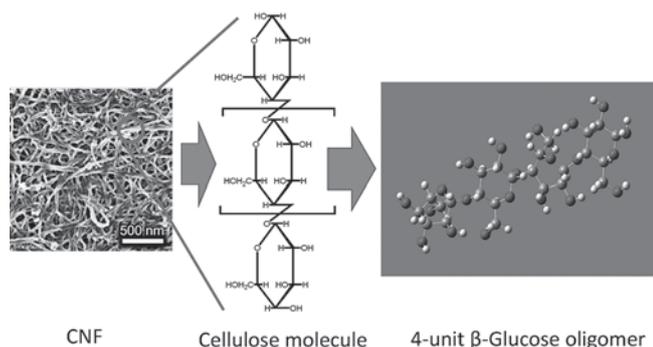


図 3 CNF の化学構造

2. 1 モデリング・計算手法

CNFと各種ポリマーとの各種相互作用のうち、ハロゲン相互作用を詳細に解析することを目的とした相互作用エネルギー解析を counterpoise 補正で行った。計算には Gaussian09/Gaussian16 を使用し、高精度 ab-initio法 (MP2, CCSD (T)) および密度汎関数法 (DFT) を採用した。計算コスト制約のため、CNF (β -グルコース) は H_2O 、PVC は CH_3Cl で単純化し、酸素-塩素間のハロゲン相互作用エネルギーを精密計算した (図 4)。自然エネルギー分割解析 (Natural Energy Decomposition Analysis) は RHF/augcc-pV5Z レベルで実行した (図 5)。

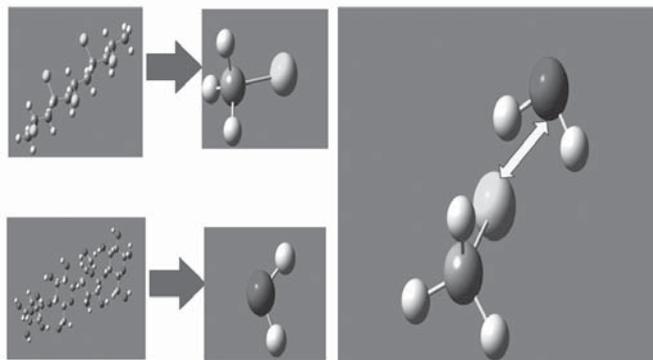


図 4 CNF-ハロゲン相互作用の計算モデル

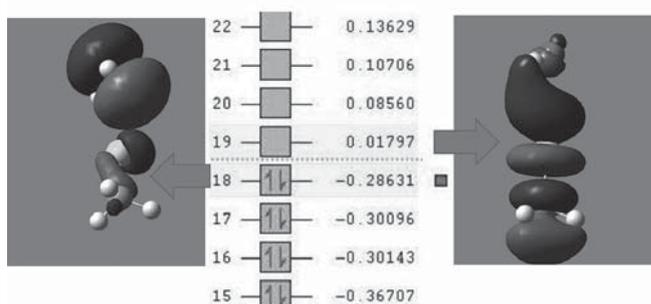


図 5 計算モデルの分子軌道図 (HOMO/LUMO)

2. 2 解析結果

2. 2. 1 Ab-initio 計算 (MP2, CCSD (T))

まず、電子相関を考慮した高精度 Ab-initio 計算のベンチマークを行った。MP2 および CCSD(T) において、6-31G(d) から Complete Basis Set (CBS) まで基底関数を順次大きくして、CBS 基底関数極限での精密評価を行い、両者の結果は 1.2Kcal/mol で一致した (図 6、図 7)。この結果から、MP2 を超える動的電子相関はほぼ無視できることが示唆される。また、MP2 では cc-pVDZ 以下、CCSD(T) では 6-31G(d) 以下の poor basis set を用いると、ハロゲン結合を再現できず、誤った結果を与えることが判明した。Split-Valence Double 以下の基底関数を用いた ab-initio 計算では CNF とハロゲン系溶媒との相互作用を適切に表現できないため、溶媒中のコンポジット化ビーズのような大規模計算を想定した場合、現実的な計算戦略として採用することが難しいと判断された。

自然エネルギー分割解析の結果は、ハロゲン結合の

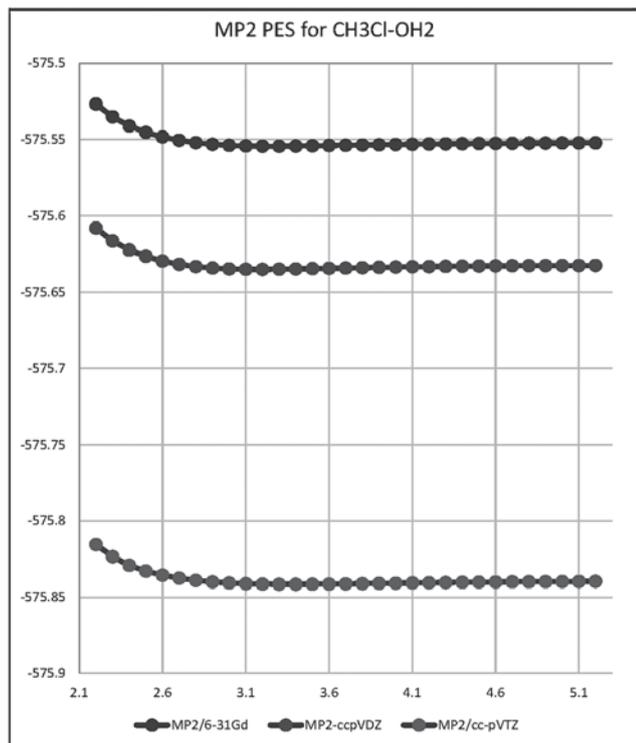


図6 結合距離に対するエネルギー変化 (MP2)

MP2	ΔE (Kcal/mol)	CCSD(T)	ΔE (Kcal/mol)
6-31Gd	-0.5525	6-31Gd	-0.00605
cc-pVDZ	-0.2409	cc-pVDZ	0.3226
cc-pVTZ	0.596	cc-pVTZ	0.6286
aug-cc-pVTZ	1.079	aug-cc-pVTZ	(*)0.9598 (**)1.0904
cc-pVQZ	0.9975	cc-pVQZ	(*)0.9499 (**)1.0025
aug-cc-pVQZ	1.1268	aug-cc-pVQZ	(*)1.1118 (**)1.2516
aug-cc-pV5Z	1.2054	aug-cc-pV5Z	(*)1.1460 (**)1.1741
(1) CBS	1.2437	(2) CBS	1.2124

$$(1) E_{CBS}^{MP2} = E_{aV5Z}^{MP2} + \frac{E_{aV5Z}^{MP2} - E_{aVQZ}^{MP2}}{(5/(5-1))^5 - 1}$$

$$(2) E_{CBS(MP2)}^{CCSD(T)} = E_{aV5Z}^{CCSD(T)} - E_{aV5Z}^{MP2} + E_{CBS}^{MP2}$$

(*) at the MP2/aV5Z optimized geometr
(**) numerical geom opt.

(1),(2) S.Kozuch, J.M.L.martin, JCTC,2013,9,1918-1931

図7 結合エネルギーの基底関数依存性 (MP2/CCSD(T))

特徴的性質を示した。引力項のうち、最大の寄与は分子間電荷移動力となり、分極項、静電項、交換項の順となった。近距離では大きく寄与する交換項の寄与は小さいことは、ハロゲン結合の「ソフト性」を示唆する。さらに、平衡核間距離が通常の共有結合と比較して長いハロゲン結合では、polarized/diffuse 関数を取り込んだ大規模な基底関数が必要なことが示唆された (図8)。

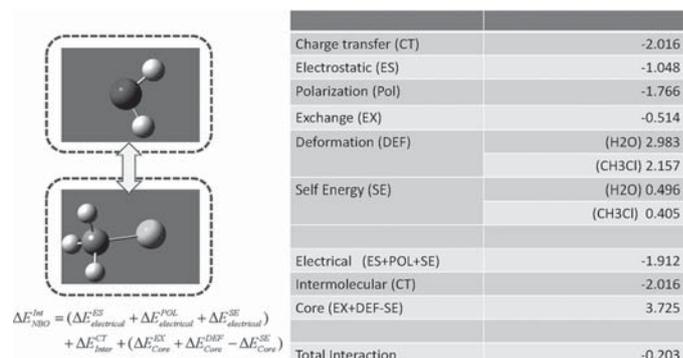


図8 自然エネルギー分割解析

2.2.2 DFT 計算

次に、汎関数への依存性を調べるため、DFT 計算のベンチマークを行った。基底関数は 6-31G (d) に固定し、大規模計算の実効性に配慮した。

代表的な 4 種類の汎関数 (B3LYP/PBE/wB97XD/M06-2X) の結果を比較した。Counterpoise補正なしの場合、平衡核間距離が約 3 オングストローム近傍にエネルギー極小が存在することが各計算から示唆される (図9)。ただし Counterpoise 補正を考慮すると、B3LYP/6-31G (d) ではエネルギー極小が消えて、安定的なハロゲン結合が生成しないという誤った結果を与えた。次に、4 種類を含めた広範な汎関数のパフォーマンスを検討した。最も強いハロゲン結合エネルギーは、MN-15汎関数 (0.862 Kcal/mol) で得られた。同じ Minnesota 系の旧汎関数 (M06-2X) においても、強いハロゲン相互作用が予測されたが、nonlocal-exchange 補正を入れていない汎関数 (M06) ではエネルギー安定化が著しく小さくなった。Minnesota 系のパフォーマンスが良好な理由は、分極相互作用補正を考慮したパラメータ fitting が行われることが一因と考えられる。同様な分極相互作用補正を考慮した汎関数 (wB97XD, DSD-PBEP86) でも良好な結果が得られている。その一方で、長距離補正の効果は不明である。CAM-B3LYP では B3LYP への修正が行われて結合が生成するのに対して、LC-wPBE では PBE での結合生成を再現しなかった。Double-Hybrid 汎関数のパフォーマンスは良好であった (B2GP-PLYP, DSD-PBEP86)。コンパクトな基底関数 (6-31G(d)) による実用的な計算を行う際、汎関数の選択が重要であることが示唆された (図10)。

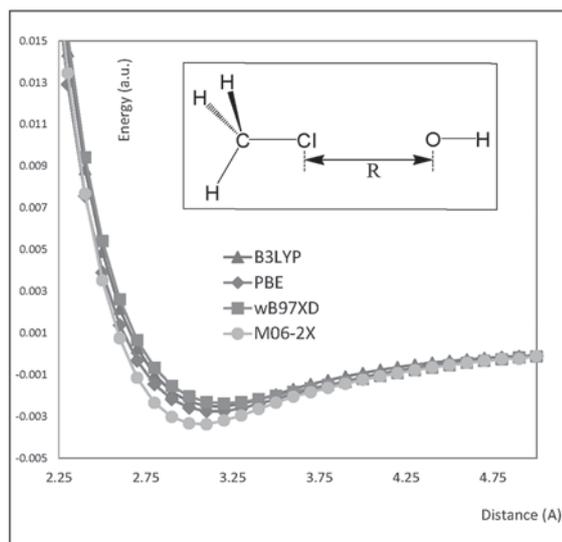


図9 結合距離に対するエネルギー変化 (DFT)

DFT/ 6-31Gd		Disp. Corrct	ΔE (Kcal/mol)
B3LYP	Hybrid-GGA		-0.0288
PBE	GGA		0.315
M06	Hybrid-Meta-GGA		0.150
M06-2X	Hybrid-Meta-GGA		0.734
MN15	Hybrid-meta-NGA		0.862
CAM-B3LYP	LC-hybrid-GGA		0.224
LC-wPBE	LC-hybrid-GGA		-0.0519
wB97XD	LC-hybrid-GGA	○	0.370
B2GP-PLYP	Double-hybrid		0.466
DSD-PBEP86	Double-hybrid	○	0.407

図10 ハロゲン結合エネルギーの汎関数依存性 (DFT)

3. 結言

セルロースナノファイバーと各種ポリマーとの各種相互作用のうち、ハロゲン相互作用を詳細に解析することを目的とした相互作用エネルギー解析を実行した。CNF (β -グルコース) は H_2O 、PVCは CH_2Cl で単純化したモデル系に対して、高精度分子軌道法 (MP2, CCSD(T)) およびDFT法によるcounterpoise補正計算を実行した。

MP2レベルでは、6-31G(d)から基底関数を順次

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

これに対して、DFTレベルでは、計算の高速性に配慮して、基底関数は 6-31G(d)に固定して各種汎関数の性能を調べた。スタンダードなDFT手法 (B3LYP/6-31G(d))では、ハロゲン結合が生成しないという誤った結果を与えた (Counterpoise 補正)。対照的に Minnesota系の汎関数 (M06-2X, MN-15) はハロゲン結合を再現する結果を与えた。分極相互作用補正を考慮した汎関数 (wB97XD, DSD-PBEP86) も良好な結果が得られた。Double-Hybrid 汎関数のパフォーマンスは良好であった (B2GP-PLYP, DSD-PBEP86) が、長距離補正の効果は不明であった (CAM-B3LYP, LC-wPBE) (図11)。

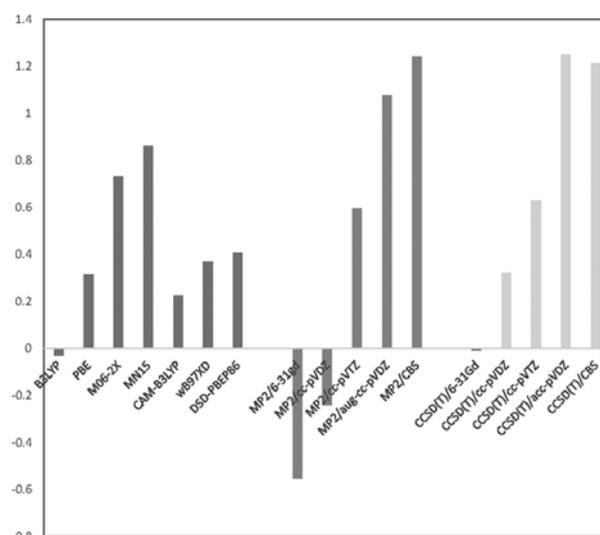


図11 結合エネルギーの方法依存性 (MP2/CCSD(T)/DFT)

以上の知見に基づき、GRRM (Global Reaction Route Mapping) プログラム^[6]を用いてCNF -各種ポリマーの配座最適化と相互作用エネルギー解析を行うため、本研究で得られた 6-31G(d)基底関数での実用的なDFT計算を進めている。並行して、溶媒和効果とポリマー間相互作用自由エネルギーを計算するため、分子動力学計算および溶媒和相互作用エネルギー計算を進めている。

謝辞

セルロースナノファイバーの実験データを提供・議論していただいた熊本県産業技術センターの永岡昭二博士に感謝する。本研究の一部は、自然科学研究機構計算科学研究センターのスーパーコンピューターシステム「NEC LX 高精度分子シミュレーター」を使用して実行された。

参考文献

- [1] 川崎恭治、「非平衡と相転移 - メソスケールの統計物理学」、朝倉書店, 2000.
- [2] 重光保博、長崎県工業技術センター研究報告、49, pp.27-30, 2020.
- [3] 重光保博、長崎県工業技術センター研究報告、50, pp.21-26, 2021.
- [4] H.Ridgway, J.Orbell and S.Gray, J.Membrane Sci., 524, pp.436-448, 2017.
- [5] S.Nagaoka, Cellulose Communications, 28(1), pp.7-12, 2021.
- [6] GRRM; <https://iqce.jp/GRRM/>, Accessed 2021.

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寸法を指定することにより3次元デジタル形状を自動的に作成するソフトウェアを試作し、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の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。

本年度は対象モデルの寸法を指定することにより3次元デジタル形状を作成するソフトウェアについて検討した。その有効性について報告する。



図1 計算機シミュレーション

2. 研究開発内容と結果

2.1 3次元デジタル形状作成ソフトウェアの開発

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。

図3は当該3次元デジタル形状作成ソフトウェアのダイアグラムを示しており、Microsoft Office 2019 Excel、Ansys Workbench(Ver.2021R1)、Visual studio 2019から構成されている。Ansys Workbenchはアンシス・ジャパン(株)のソフトウェアであり、プリプロセッサ、解析ソフトウェア、ポストプロセッサ、データ管理ソフトウェアを総合したプラットフォームである^[3]。Ansys Workbenchで初期の3次元デジタル形状を作成して、その形状における特定の寸法をパラメータ化することにより特定の寸法は名前付けされ、

図4に示すように付けた寸法名とその寸法値が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る機能を利用する。以上の構成と機能を用いて、図3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する処理のプログラムをVisual studio 2019のPythonを開発環境として開発した[4][5]。当該処理を10回連続して繰返した際に要した時間は約146秒であった。



図2 3次元デジタル形状作成ソフトウェアの機能



図3 3次元デジタル形状作成ソフトウェアのダイアグラム

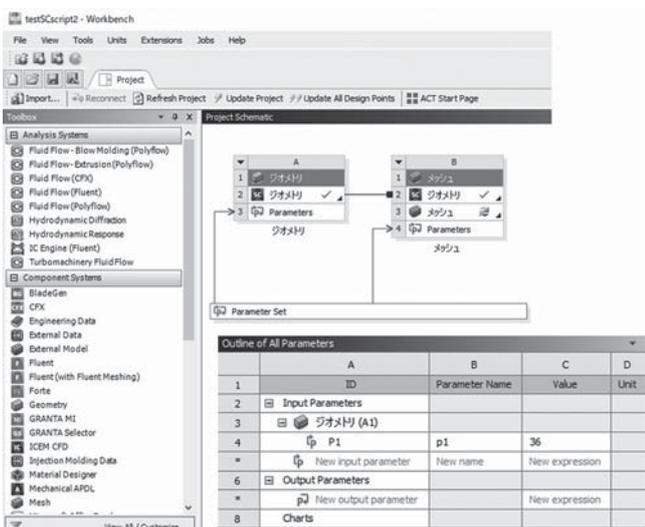


図4 形状寸法のパラメータ化

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を開発することができた。3次元デジタル形状の特定の寸法値を一箇所変更して形状に反映するための時間は約146秒であり、使用するパーソナルコンピュータの性能に依存すると思われるが省力化の効果指標として測定した。また、Ansys Workbenchの形状寸法のパラメータ化機能を利用することにより特定の寸法値に特定の名称付けをしてテーブル上に表示できるためアクセスがしやすく、当該寸法値を変更するプログラムの内容を比較的容易に、かつ短縮化して開発できた。

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はMicrosoft Office 2019 Excel、Ansys Workbench (Ver.2021R1)、Visual studio 2019を用いて構成して、初期形状として用意した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するプログラムを実行することにより所望の3次元デジタル形状を作成できた。
- 2) 3次元デジタル形状作成ソフトウェアにおけるプログラム開発はAnsys Workbenchにおけるパラメータ機能を利用することにより、より少ないコードで簡潔に記述することができた。

参考文献

- [1] 山田：シミュレーションと数値計算の基礎 (ISBN978-4-320-08226-7), 共立出版株式会社, 2018.9.
- [2] 高橋：CAD/CAM/CAE/CP 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 (ISBN978-4-274-22609-0), 株式会社オーム社, 2020.10.
- [4] 保科：Visual Studio パーフェクトガイド (ISBN978-4-297-10598-3), 株式会社技術評論社, 2019.7.
- [5] 中嶋：PythonでExcel、メール、Webを自動化する本 (ISBN978-4-8156-0639-8), SBクリエイティブ株式会社, 2021.9.

海水魚用展示蓄養水槽の開発

(食用活魚展示・蓄養のためのコンパクト水槽システムの開発)

研究企画課 兼 機械加工科 課 長 大 脇 博 樹

これまで漁獲地でしか食べられなかった新鮮な活魚を大消費地でも食べられるようにするためには、「漁獲地での蓄養」、「高密度・長時間の輸送」、「消費地での展示蓄養」を実現する必要がある。当センターではこれまでに、「漁獲地での蓄養」につながる「閉鎖循環式陸上養殖システムの開発」や、「高密度・長時間の輸送」を目指した「活イカ輸送システムの開発」を行い、それらを実現してきた。

本研究では、「消費地での展示蓄養」を実現するために、当センターが所有する海水浄化技術を活用して、水換えやメンテナンス間隔を大幅に伸ばすことが可能で、かつ飼育水に着色や悪臭が発生しない、新たな展示・蓄養水槽システムを開発することを目指した。

1. 緒言

水産業振興と新型コロナウイルス感染症により減少したものの今後改善が期待される訪日客向けの魅力ある商品開発が求められており、これまで水揚げ漁港でしか食べられなかった活魚を都会の料亭等で提供することは、この目的に大きくかなうものと思われる。また、水産県長崎は国内でも有数の漁獲量を誇っており、県内で水揚げされた魚の高付加価値化を図るために、消費地に生きたまま輸送すること、きれいに展示して高い価値を維持することは重要であり、漁業者だけではなく輸送事業者、販売者等、漁獲から販売に至るまでに関与する全ての事業者にも利益をもたらすことになる。

当センターでは、海水電解を利用した海水浄化システムの開発を行い、活イカ輸送装置の製品化・事業化等を実現してきた実績があり、漁獲地での輸送前の蓄養(図1)や大消費地への活魚の輸送を安価に行うことが可能となってきた^[1]。

地価や人件費の高い都会の料亭等で生きた魚介類(活魚)を展示・蓄養する水槽システムには、付属装置である海水浄化装置ができるだけコンパクトであること、水換えやメンテナンスの間隔をできるだけ伸ばせるシステムであることが求められる。しかしながら、従来の浄化システム(魚介類の排出物を生物ろ過技術により浄化する)では、浄化ユニットが大型にならざるを得ないだけでなく、微生物の活動の際に生成される着色有機物の蓄積により飼育水が茶褐色になり見た目が悪くなること、カビ等が発生して悪臭が生じやすく飼育魚にもおいが移ること等の問題があり(図2)、比較的短い頻度での水換えや水槽の掃除等のメンテナンスを行う必要があった。

これまで当センターで開発を続けてきた海水電解を

利用した海水浄化システムは、海水に溶存している臭化物イオンや塩化物イオン等のハロゲン化物イオンを陽極酸化して、次亜臭素酸や次亜塩素酸等のオキシダントを生成させ、魚介類が排出する有害成分であるアンモニアを窒素に直接変換することで飼育水の水質浄化を行う(式1、式2)。また、海水電解によって生成したオキシダントの殺菌効果によって微生物の繁殖



図1 漁獲地での活イカ蓄養



図2 生物濾過の影響で着色した展示水槽

を抑制することで、飼育水の着色や悪臭の発生を抑制できる。

この海水浄化システムは、従来使用されてきた生物ろ過システム^[2]と比較して著しく小容量であることも特長の一つであり、今回開発を目指している都会における活魚の展示蓄養水槽に適用するには最適の技術であると思われる。

本研究では、実際に店舗で利用できる展示蓄養水槽の開発を目指し、海水浄化システムの仕様を決定して試作機の製作を行い、実際の店舗での試験を実施する予定とした。

2. 検討内容

2. 1 試験材料および使用機器

蓄養水槽の製作には10 mm 厚の市販の透明アクリル板を、物理ろ過槽兼バッファータンクの製作には5 mm 厚の塩化ビニール板（グレー）を使用した。蓄養水槽上部には、飼育魚を入れるための開口部を準備し、5 mm 厚の透明アクリル板を蓋として使用した。

泡沫電解槽には、1 mm 厚のチタン板に白金修飾した陰極と、同様のチタン板両面に白金イリジウム修飾した陽極を利用した。チタン板のサイズは255 mm × 50 mm、修飾部は50 mm × 50 mm とし、両電極の修飾は株式会社ナカボーテックに依頼した。

今回使用した泡沫分離装置は、株式会社プレスカ製のKA式泡沫分離装置FSR-002Pで、同社の了解を得た上で泡沫槽内に前記した電極を設置する改造を行い、泡沫電解槽として利用した（図3）。

海水魚の飼育試験には、平均654 g/尾の天然カワハギ13尾（計8.5 kg、飼育密度1.7%）を使用した。

残留オキシダントの定量には、株式会社共立化学研究所のパックテストWAK-CLO-DPを、アンモニアの定量には同WAK-NH4-4を使用した。

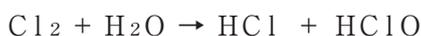
溶存酸素濃度の測定には、飯島電子工業株式会社製ID-100を使用した。

2. 2 新規泡沫電解槽の開発

前記した修飾電極を用いた海水電解では、主に陰極表面で水素が生成し、陽極表面で臭素や塩素が生成した後、多量の水と反応して次亜臭素酸や次亜塩素酸等のオキシダントが生成する（陽極反応のみ式（1）オキシダントの生成反応）。陰極表面の水素生成に伴って陰極表面に接する海水がアルカリ性になることから、溶解度の低下したカルシウムイオンやマグネシウムイ

オンがそれぞれ炭酸カルシウムと水酸化マグネシウムとして陰極表面に析出してスケールとなる。この陰極表面へのスケール析出に伴って、電解電圧が高くなることや電解槽の流路を塞ぐ等の問題が発生することになる。

- ・オキシダントの生成反応



- ・脱アンモニア反応

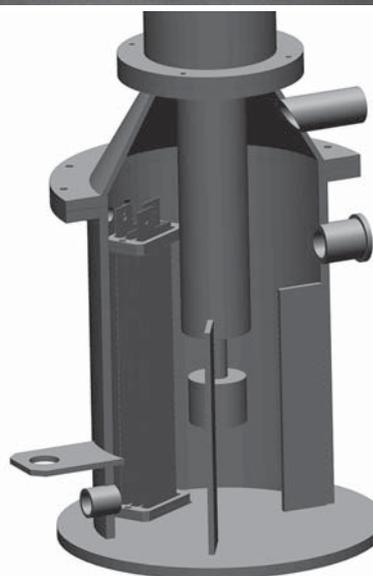
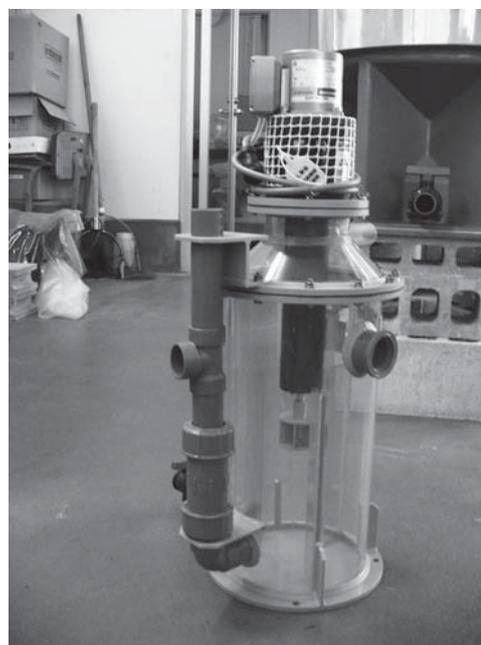
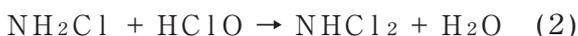


図3 泡沫分離槽内部への電極設置図

本研究にて開発する展示蓄養水槽は、店舗内部への設置が想定されることから、頻繁にメンテナンスを行うことができない。従って、電極表面のスケール析出を抑制して、メンテナンス頻度を低くする必要がある。

今回開発する電解槽は、有機物の除去を目的として用いる泡沫分離装置の内部に電極を設置したもので、泡沫槽内部の激しい水流により、陰極表面のスケール析出を抑制すること、電極表面で生成したオキシダントを効率的に拡散して、飼育水中に存在するアンモニアと効率的に反応させる効果が期待される。結果として海水浄化ユニット全体の小容量化にも寄与できるものと思われる。

2. 3 展示蓄養水槽システム試作機の製作

令和2年度に試作した装置（図4：水槽容量500L透明アクリル水槽、泡沫電解槽、物理ろ過槽兼バッファタンク、活性炭槽、温調装置、流量計）を用いた試験を行った結果、泡沫電解槽から流出するスケールの除去が必要なこと、外気が高温多湿の場合に飼育水槽表面に結露が発生すること等の問題点が確認された。そこで、物理ろ過槽に交換が容易なフィルターマットを増設し、流出するスケールを簡便に系外へ除去できるように改造した。また、飼育水槽前面を二重化して（図5）結露を防止し、高温多湿の条件下でも飼育水槽内部に飼育されている海水魚の遊泳状態が目視できるようにした。

2. 4 海水魚飼育試験

試作した展示蓄養水槽システムを使用して、カワハギの飼育試験を実施した（図6）。カワハギ13尾（計8.5kg、飼育密度1.7%）を飼育水槽に入れ、水温20℃、無給餌にて2週間飼育した。飼育開始4日目には飼育水中のアンモニア濃度が7ppmに達したため電解電流値0.5Aで電解を開始した。飼育水中のアンモニア濃度は電解開始後徐々に低下し、電解開始から2日後には検出限界以下となった。その間、飼育水pHは7.6から7.5と低下した。飼育開始6日目から14日目までかけて徐々に電流値を1.5Aまで上げたところ、アンモニア濃度は検出限界以下が維持され、飼育水pHは7.5から7.3まで低下した。

2週間の無給餌飼育の後、給餌飼育を2週間行って、電流値を適切にコントロールすることでアンモニア濃度の増加を抑制できることを確認した。この飼育期間中、通常の海水魚飼育で実施する飼育水槽への曝気は

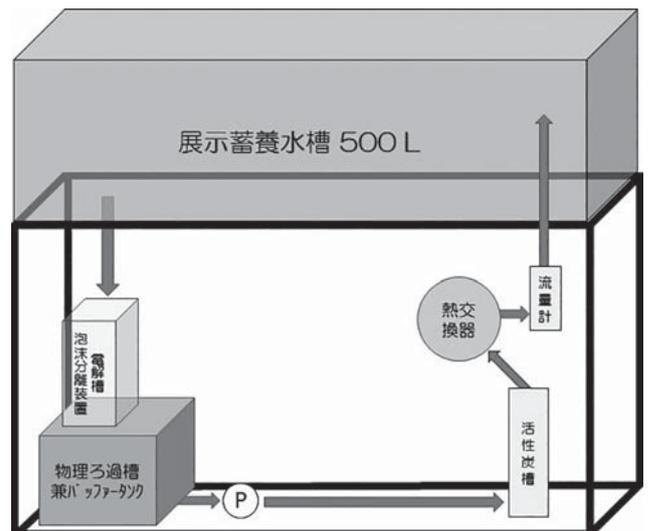


図4 展示蓄養水槽システム流路図



10 mmの空隙

図5 飼育水槽前面の二重化

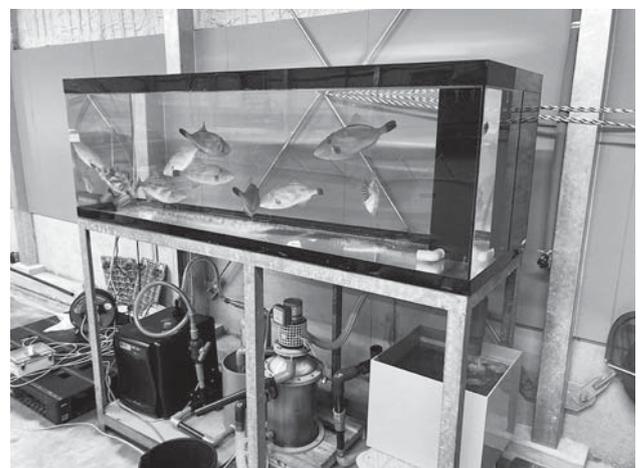


図6 カワハギの飼育試験状況

行なわなかったが、飼育水の溶存酸素濃度は7.1 から7.3 と適正な値で維持されていた。

海水魚の1 か月間の飼育期間を通じて、飼育水の着色等は認められず、蓄養水槽中で残留オキシダントは検出されなかった。泡沫電解槽からのスケールは沈殿槽にて回収することができており、活性炭槽の閉塞による流量低下等は認められなかった。陰極へのスケールの析出等の汚損は認められなかった。

3. 考察

海水魚を水換え無しで陸上飼育する場合、従来の生物ろ過では飼育水槽容量の40% から50% に相当する浄化槽が必要であったが、当センターで開発した海水電解を利用したシステムでは飼育水槽容量の約10% で同等の浄化能力を得ることが可能であり、著しい小容量化を達成していた。本研究にて新たに開発した泡沫電解槽は、泡沫分離槽と電解槽への配管やバルブが不要となることによる小容量化に貢献する他、オキシダントとアンモニアの反応効率の向上にも寄与し、余剰のオキシダントを分解する活性炭槽を小容量化することができた。本システムで使用する活性炭は高価であるため、活性炭槽の小容量化はシステム全体のコストダウンにも貢献できる。海水浄化システムの容量は、当初蓄養水槽容量の10% と見込んでいたが、今回の海水浄化システムでは、泡沫電解槽を利用することで蓄養水槽容量の5% と更なる小容量化を達成することができた。また、配管接続を不要にしたことによって、海水浄化ユニットの設置スペースの自由度が増す等、大きな効果もたらされた。

この泡沫電解槽は、泡沫分離装置の本来の機能である溶存酸素濃度の維持と懸濁物質の除去^[2] についても問題なく実現できており、電解機能を付与したことによる問題点は見出されなかった。

海水魚を入れた試験は1 か月間と短い期間ではあったが、電極表面へのスケール析出が無かったこと、泡沫電解槽後の物理濾過槽で簡便にスケール回収ができたことから、長期に渡って簡便なメンテナンスで対応可能となることが確認された。また、生物ろ過システムでは、浄化システム配管内に大量のバイオフィームが生成することによる流量低下が生じることが知られており、大掛かりな清掃作業を定期的実施する必要があるが、本研究で開発したシステムでは、浄化システム内（展示蓄養水槽から排出されて展示蓄養水槽に戻るまで）へのバイオフィームの形成が認められてお

らず、結果として流量低下も生じないため、バイオフィームを除去するための定期的な清掃作業も必要ないことが確認された。

4. 結言

本研究は当初、活魚の販売現場（スーパーや活魚店等）での現場試験まで実施し（図7）、試作機に更なる改良を加える予定であったが、新型コロナウイルスのまん延により現場試験を行うことができなかった。そのため、現場での使い勝手等を考えた細かな修正が必要となる可能性も否定できない。

本研究では、実際に現場適用できる展示蓄養水槽を開発することを目的としており、単なる技術開発ではなく、水槽の見た目や魚の取り出しやすさ、清掃の容易さ等も重要な検討課題となる。また、本展示蓄養水槽を利用した活魚輸送・販売についてもそのビジネスモデルを確立させる必要があり、装置の製作担当企業だけでなく、活魚の輸送販売業者等との連携体制構築も重要となる。これらを実現するためには、両者が立ち会っての現場での試験が不可欠であり、今後の課題として残っている。

また、試作機の現場での検証と同様、装置の製造コストの検証も実施しておく必要がある。特に、温調装置については、設置場所（例えば屋外か店内か）の温



図7 現場試験を想定していた店舗内部

度管理状況によっても求められる能力が異なるため、精査が必要である。また、本システムで最も高価な装置である泡沫分離装置の選定も製造コストに大きく影響するため、その必要能力の見極めも重要となる。現在完成している装置構成では、当初目標とした製造原価の40%高となっているが、実際の使用環境によってコストダウンを図ることができる可能性は残っている。

現在、協力企業との連携により現場試験に取り組んでおり、早期の事業化を目指したい。

参考文献

- [1] 大脇博樹、桑原浩一、山本純弘、横山文彦、秋月俊彦、狩野伸自、長崎県工業技術センター研究報告、No. 44, pp.1-4, 2015.
- [2] Yoshihisa Yamamoto, Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn., 69, pp.225-237, 2015.
- [3] 鈴木祥広、鈴木孝彦、鷺巣勇士、米加田徹、河野智哉、越塩俊介、横山佐一郎、酒井正博、伊丹利明、水産増殖、No. 56(4), pp.479-485, 2008.

微細気泡を活用した浄化・洗浄システムに関する研究

(微細気泡生成装置の製作と実証試験データの蓄積)

機械加工科 主任研究員 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気泡はファインバブルと呼ばれ、界面活性、衝撃圧力、過飽和溶解、生理活性など様々な作用があり、幅広いプロセス技術への活用が期待される。しかしながら、ファインバブルの種々の効果のメカニズムや相互関係には未解明な部分があり、裏付けとなる技術データの蓄積が肝要である。また、ナノメートルサイズの気泡は、肉眼では観察できず、性状も不安定なため、洗浄現場における気泡数の適正な管理が課題になる。そこで、本研究では、微細気泡の発生装置の構築や評価手法の確立により、洗浄データの蓄積を行うとともに、簡易的に気泡数を計測する手法について検討した。

1. 緒言

気泡は古くから工業部品の洗浄や、水産物の養殖などへ広く利用されており、気体の溶解力が向上し、気泡の浮遊時間を長くできることから、気泡の微細化が進化した。気泡サイズが数マイクロメートルまで小さくなると、白濁し、気泡は数ミリメートル/分とゆっくりした速度で浮上する。また、水との接触面積、接触時間が増えることから、水に溶解しやすくなる。西暦 2000 年以降には、数百ナノメートルサイズの気泡の存在が明らかになった。この数百ナノメートルサイズの気泡は、可視光の回折限界を超えており、目視では透明に見える。また浮力が無視できるため、水中でブラウン運動により振動し、長く水中に留まる。今日では、ISO の国際規格化が進み、気泡のサイズ等によって名称が明確に定義されるに至っている (表 1)。

この微細な気泡は、従来の気泡にはない様々な特徴を持っている。とりわけ、数百ナノメートルサイズのウルトラファインバブルは、温度変化が少ないところで静置すれば、数か月にわたって安定であることが知られており^[1]、これまでの気泡のイメージとは異なった作用を示す。また、気泡の圧壊や気体の過飽和など物理的及び化学的な性質は、精密部品の洗浄や排水処理、植物工場での発芽促進など、幅広い応用が期待されている^[2]。

本研究では、金属加工技術を持った企業が長崎県に数多く集積していることから、金属加工や表面処理に欠かすことができない洗浄に着目した。洗浄は、前工程から最終仕上げまで様々な工程で行われ、金属部品の品質にも影響する。このとき、界面活性剤、酸性・アルカリ性溶液、有機溶媒など様々な洗浄剤が用いられる。しかしながら、これら洗浄剤の多くは、環境負荷が高く、洗浄剤によっては健康に害を及ぼすものも

表 1 気泡の名称と分類

	ファインバブル(微細気泡)		通常の泡
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10nm~1 μ m	1 μ m~100 μ m	100 μ m~
溶液外観	透明	白濁	泡状
性 状	ブラウン運動 長期残存	ゆっくり上昇 水中消滅	速く上昇 水面破裂

ある。このため、廃液処理などの後工程を要し、洗浄作業者の安全を確保するための対策や教育が求められる。一方、微細気泡は、空気と水から形成されるため、環境負荷が小さく、安全に使用できる。ただし、微細気泡は、洗浄物の種類、汚れの程度、温度など様々な要因に洗浄性が影響するため、洗浄案件別に最適な条件を調整し、きめ細かくに対応する必要がある。

また、洗浄液の管理は、洗浄物の品質を保つためにも重要な役割を果たす。微細気泡洗浄の管理項目として、気泡の個数密度が挙げられるが、気泡が非常に小さいため、正確な計測が難しく、計測機器も高額である。そのため、洗浄現場で微細気泡のおよその個数密度を把握できる計測手法が求められる。

こうした背景から、本研究では①個数密度の簡易計測手法の開発、②洗浄の条件出しのための洗浄データの蓄積を実施した。①では理論解析に基づきポリスチレン粒子を用いた比較定量の検討、②では主として金属洗浄物をターゲットに種類の異なる汚れの洗浄性の評価を行った。

2. 簡易計測

2. 1 理論計算の概要

微細気泡の有無の容易な確認方法として、レーザーポインター等の安価な光源を利用した散乱光の観察がしばしば行われる。この手法は、高額なオプティクス、ソフトウェア等が不要で、肉眼で気泡の有無を判別できるが、光源の光量や照射位置、外乱光の影響などによって散乱光の見え方が変わるため、定量できる分析精度に至らない。そこで、レーザーポインター等の安価な光源を利用しつつ、定量分析を可能とする簡易計測手法について検討した。

光散乱計測は、粒子の個数をカウントする直接的な手法ではなく、あらかじめ粒子の個数と散乱光強度との関係を明らかにし、散乱光強度から間接的に個数を求める。そのため、測定時に気泡数が既知の標準試料を用いて、測定値の正しさを確認することが望ましいが、気泡の性状は不安定であり適用できない。そこで、気泡に代わり、ポリスチレン粒子を標準試料に用いた。ポリスチレン粒子は市販で入手でき、性状も安定で、光学的な性質もよく知られている。一方、ポリスチレン粒子と気泡の散乱性は異なるため、標準試料としてポリスチレン粒子を適用するには、気泡と同等の散乱性を示すポリスチレン粒子の調整条件を明らかにする必要がある。コンタミネーションや気泡の消失の懸念から、実験的な手段で調整条件を求めるのは難しい。そこで、拡散近似方程式による理論計算を行うことで散乱光強度を算出し、ポリスチレン粒子の調整条件を求めた。ポリスチレン粒子の散乱光の理論計算と実測値は概ね一致する^[3]。理論計算において、気泡径は100 nm、光の波長は400 nm から700 nm の範囲とし、微細気泡の屈折率については1.22 とした。また、光の照射方向から90°異なった方向の散乱光を観測するため、散乱光の強度だけではなく、散乱の方向性（散乱パターン）も重要となる。そこで、Oregon Medical Laser Center が公開している Mie Scattering Calculator^[4] を用いて散乱の方向性についての計算を行った。

2. 2 理論計算の結果

理論計算により求めた個数密度1億個/ml、直径100 nm の気泡及びポリスチレン粒子の散乱係数を図1に示す。散乱係数は、単位距離あたりの光の内部減衰を示す物理量であり、散乱係数が大きいほど光は強く散乱する。図中の横軸は光源の波長であり、赤色域

より青色域の光が強く散乱する。また、同じ個数密度では気泡と比べポリスチレン粒子がより強く散乱することが解る。なお、実際の気泡径の分布は、ある程度の広がりを持つが、概ね気泡径は100 nm 付近で安定するため、100 nm の代表値で計算する。

次に、散乱光の方向性についての計算を行った。図2は散乱光強度を規格化し、その広がりを図示したもので、図の左から円の中心にある散乱体に光を照射した際に、どのような分布で光が散乱するかを表している。円周上の数字は角度を表しており、光の進行方向が0°となる。粒子径が小さくなるにつれ後方にも散乱し、散乱パターンは様々な方向に広がるため、100 nm 径の気泡においては、「ひょうたん」のような形になる。この散乱パターンは、光源の波長、粒子径、屈折率、個数密度に依存する。計算に用いた波長は、実証で使用したレーザーポインターの波長515 nm とした。これらの計算に基づき、波長515 nm において、100 nm 径の気泡と同等の散乱性を示すポリスチレン粒子は、直径96.6 nm、個数密度は気泡の個数密度×0.17倍であることを明らかにした。

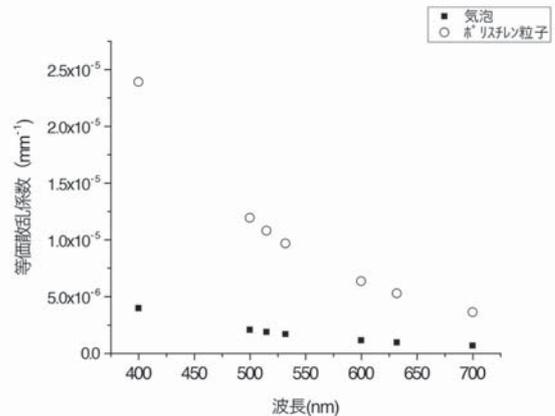


図1 散乱係数の計算結果

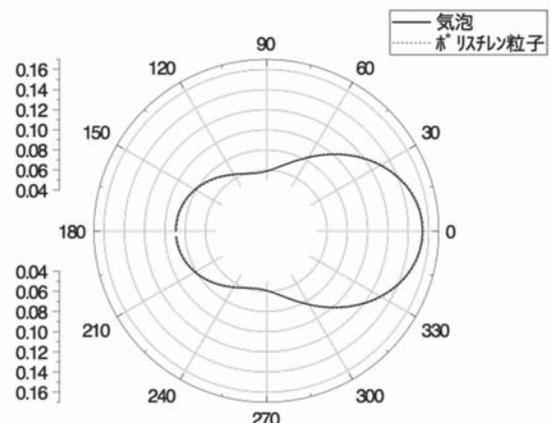


図2 散乱パターンの計算結果

2. 3 比較定量

2. 2の計算結果をもとに、実証試験を行った。平均粒子径が100 nmのThermo Fisher Scientific社製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に充填した。先述のとおり気泡と同等の散乱性を示すポリスチレンの粒子径の理論値は96.6 nmであるが、市販で入手できるポリスチレン粒子径の最近値は100 nmであった。この3.4 nmのずれは、計算による測定誤差の推定から許容できる誤差範囲にある。

ポリスチレン粒子を用いるメリットは、校正が可能になること、異なる個数密度に調整したポリスチレン粒子溶液による比較定量が可能になることにある。図3に市販のレーザーポインター（波長515 nm）の光を微細気泡水及び個数密度の異なるポリスチレン粒子溶液に照射したときの散乱の様子を示す。微細気泡水と散乱光の見え方が最も近いポリスチレン粒子溶液の個数密度を換算し、およその気泡数を求めることができる。この手法は、レーザー光の強度変化や外乱光に影響を受けにくい。これまでに著者は、ヘリウムネオンレーザーと画像処理を用いて気泡の個数密度を定量できることを報告している^[5]。本手法では、より身近なレーザーポインターを用いて定量できることを新たに示した。このときの定量精度は 2×10^8 個/ml程度である。この精度は、簡易的に気泡の個数密度を確認するには十分である。一方、市販されているファインバブルの発生シャワーヘッドのような、個数密度が低い気泡の測定には適用できない。これは、散乱光強度が低いと目視では識別が難しいこと、また、原理的に粒子径の情報が測定情報に含まれないことによる。現在、粒子径の情報を考慮した簡易計測について取り組んでいる。

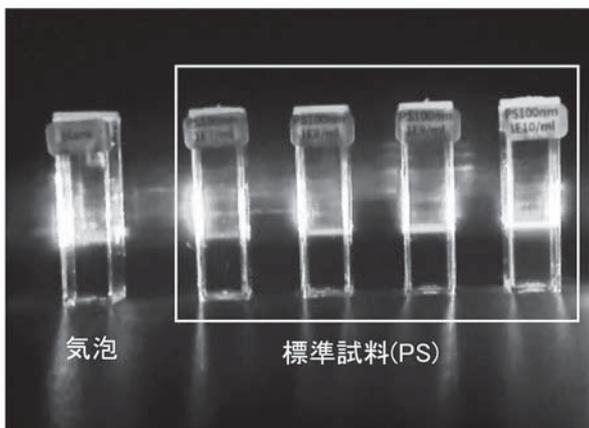


図3 散乱の様子

3. 洗浄試験

3. 1 洗浄試験の調整

洗浄物の種類や、付着量、付着の強さなどの汚れの状態、あるいは温度等の外部環境に洗浄性は大きく影響される。本研究では、汚れとしてグリース（軟質の汚れ）と防錆剤（硬質の汚れ）を用いて金属洗浄の理解を深めた。洗浄に用いる微細気泡水は、あらかじめ所定の個数密度に調整した。なお、図4に示すとおり、10倍希釈により気泡数がおよそ1/10になっており、希釈作業において気泡が消失しないことを確認している。一方、時間経過によって、気泡の個数密度や物性は変化する（図5）。保管環境にもよるが、長期の保管においては、プチルゴム製のパッキンでガラス瓶を密閉し、一連の洗浄試験においては、なるべく同一容器に保管した微細気泡水を用いた。

また、洗浄試験では、付着量のばらつきが小さく、塗布面が均質な試験片の作製が求められる。金属材料に汚れ成分を均質に塗布するため、グリース（軟質の汚れ）については、ステンレスブロックに深さと幅が

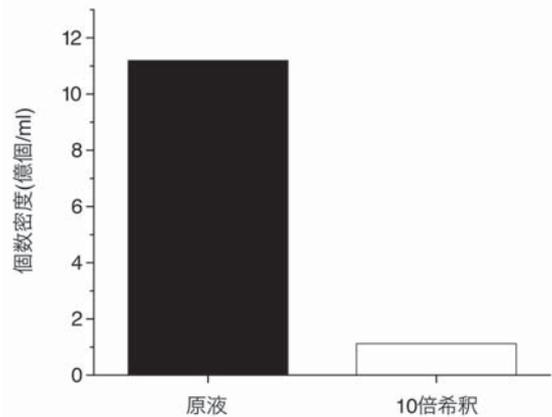


図4 希釈による個数密度変化

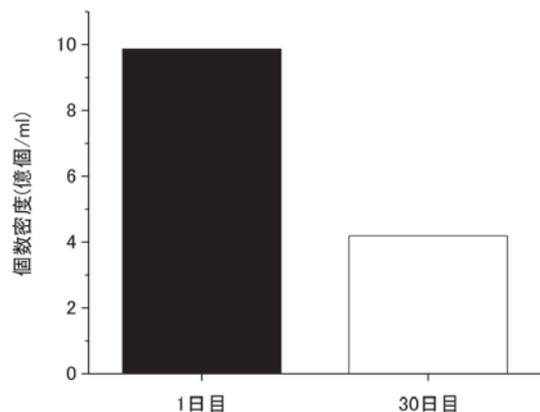


図5 保存期間による個数密度の変化

1 mm の溝を施し、溝中にグリースを埋め込んだ (図 6)。これにより、付着量のばらつきは相対標準偏差 (RSD) で 4.1% (N=5) の範囲に収まった。一方、防錆剤 (硬質の汚れ) は実情として厚塗りしないので、グリースと同じ埋め込む方法はそぐわない。そこで、手間を要するが、防錆油を塗布した試験片を多数作製し、重量測定と顕微鏡による塗膜の状態観察により、付着量のばらつきが相対標準偏差で 5% の範囲内となるよう試験片を選別した。この重量変化から予測される塗膜の厚みは 0.05 mm 程度である。

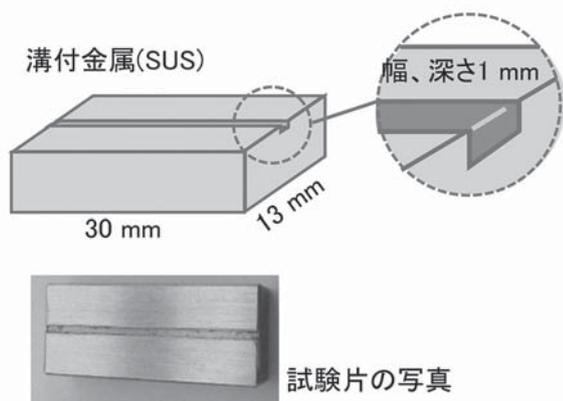


図6 グリース塗布の試験片作製

3. 2 洗浄試験 (グリース)

グリースの洗浄においては、2.5 億個/ml の個数密度の微細気泡水、及びこれに純水を加えて 1.9 億個/ml、1.3 億個/ml の個数密度になるよう希釈した微細気泡水を用いた。また、ブランクとして、気泡を含まない純水を用いた。このときの洗浄性の評価は、洗浄液の吸光度測定により行った。汚れの除去に伴い洗浄液の吸光度は高くなる。また、吸光度測定では、洗浄中に洗浄液をサンプリングすることで、洗浄の時間変化も捉えることができる。図 7 に、光路長 1 cm のガラスセルを用いて、波長 400 nm ~ 800 nm 範囲で吸光度を計測した洗浄液のスペクトルを示す。また、図 8 は、5 分及び 10 分の洗浄時間における洗浄水の波長 500 nm の吸光度を示す。洗浄のメカニズムは複雑で、必ずしも気泡数の個数密度が高ければ洗浄性が良いわけではないが、測定した範囲、条件においては、洗浄時間が長く、個数密度が高いほど洗浄性が高いことを示した。

3. 3 洗浄試験 (防錆剤)

一方、防錆剤 (硬質の汚れ) の試験片については、

汚れの付着量が少なく、吸光度測定や重量測定では洗浄評価が困難であった。そこで、デジタルマイクロスコプで直接塗布面を観察し、汚れの付着した面積から防錆剤 (硬質の汚れ) の洗浄性を評価した。防錆剤 (硬質の汚れ) は、防水や防汚目的で金属表面に塗布されており、強固に金属面と付着している。このため、高温の苛性ソーダ溶液や脱脂力の強い炭化水素系の有機溶媒を用いて塗膜を除去するのが一般的であるが、危険な作業を伴うので、微細気泡洗浄で除去できれば有益である。しかしながら、微細気泡による洗浄試験の結果、防錆油塗膜に泡の付着が観察できるものの、除去には至らなかった。また、陰イオン界面活性剤、アセトン、エタノールを用いた洗浄や、ブラッシングによる物理的な洗浄も試みたが、同様に防錆油は除去できなかった。さらに、超音波洗浄 (発振周波数: 40kHz) による洗浄を行ったが、微細気泡水、界面活性剤を含む洗浄液のどちらも除去できなかった。最終的に、微細気泡水の温度を下げて (水温 10℃)、超音波洗浄を行った。一般的に汚れの除去では温度を上げるが、温度を下げたのは、キャビテーションの効果を高めるためである。この低温下での超音波洗浄の結果、

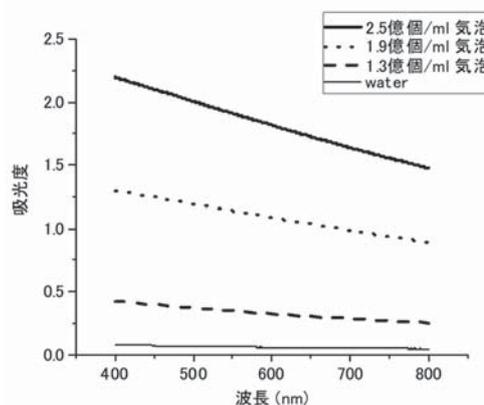


図7 個数密度の異なる気泡洗浄液の吸光度

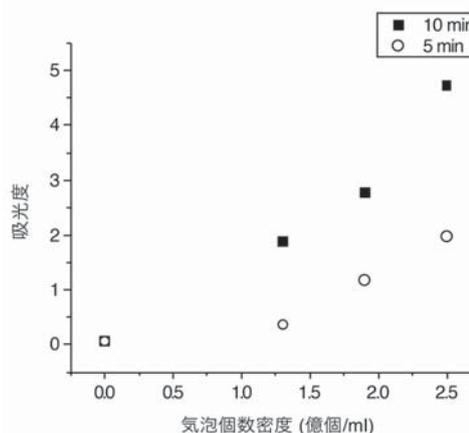


図8 波長 500 nm における吸光度変化

防錆油の汚れを完全に除去することができた。一方、純水でも部分的に防錆剤を除去でき、一定の洗浄効果があることがわかった (図9)。このとき、同一条件における汚れの除去率は、微細気泡水 100% に対し純水は 47.6% であった。つまり、防錆油のような硬質の汚れに対し、低温で超音波洗浄することによる洗浄効果は認められ、その効果は微細気泡水を用いることでより高まるといえる。この洗浄効果が高い理由は、微細気泡水に気泡が多く含まれることでキャビテーション効果が高まったこと、また、キャビテーションで破壊した汚れを気泡が剥離したことによる結果と考えている。製造現場における洗浄条件は様々なので、実際には個別の判断にはなるが、こうした知見を得ることで、洗浄の工程設計に必要な気泡洗浄についての正しい理解が進む。また、汚れを完全に洗浄できなくても、危険性が高い薬品を用いた作業を減らすことができる可能性があり、現在、微細気泡を用いた効率的な洗浄方法に関する取り組みを継続して進めている。

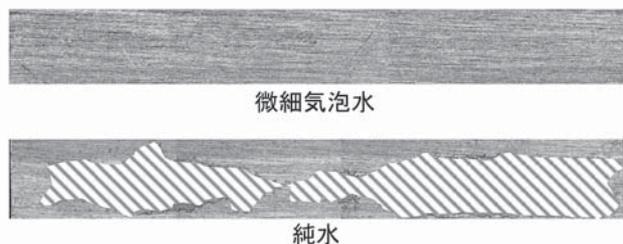


図9 超音波洗浄後の汚れの付着
(汚れの部分は網掛けで表示)

4. 結言

本研究では、微細気泡を活用した洗浄や浄化システムに関する研究として、気泡の個数密度の簡易計測技術の開発と金属材料の洗浄評価を行った。簡易計測では標準試料としてポリスチレン粒子を用いることで、比較定量が可能となり、レーザーポインターによる簡易定量を実現した。また、洗浄試験では、一例として硬質及び軟質の汚れについて金属洗浄を実施し、洗浄データを蓄積した。汚れの種類により、効果的な洗浄方法が異なっており、洗浄方法の適切な選択が重要であることを示した。

参考文献

[1] 寺坂宏一, 氷室昭三, 安藤景太, 秦隆志: 入門, p.34, 日刊工業新聞社, 2016.

- [2] 高橋正好: 微細気泡の最新技術 - 進展するマイクロ・ナノバブルの基礎研究と広がる産業応用 Vol.2, pp.273-288, エヌ・ティー・エス, 2014.
- [3] 下村義昭, 三木伸一, 田中博樹: 光学特性の評価手法確立による非破壊計測装置の応用展開, 長崎県工業技術センター研究報告書, No.48, pp.13-17, 2019.
- [4] Oregon Medical Laser Center: Mie Scattering Calculator, https://omlc.org/calc/mie_calc.html, Accessed 2020.3.9.
- [5] 三木伸一: 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書, No.50, pp.36-38, 2021.

木型と鋳物砂の改善による鋳造品の品質向上

(木型の修復手法および鋳物砂の品質管理方法の検討)

機械加工科 主任研究員 大田 剛 大
電子情報科 専門研究員 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2年目となる令和3年度は、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隣接点列の変化量から抽出された摩耗／欠損領域の点列群から、幾何形状の種類を判別し、判別した幾何形状と点列群との差異から摩耗／欠損部位を塞ぐ面形状を生成する手法を検討した。また、有機自硬性鋳物砂の耐火性評価試験の検討、表面硬さと圧縮強さとの関係について調査した。

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。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嵌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

をを図る。検査・修復処理の流れは図1のとおりである。

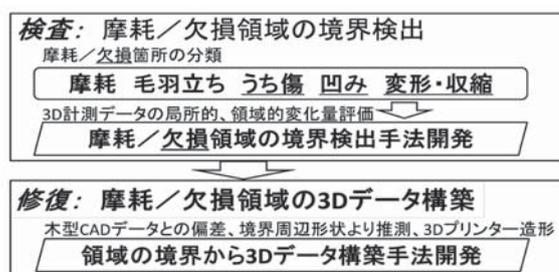


図1 全体処理の流れ

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 プリンタによる磨耗／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]。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）を検討した。

2.2 鋳物砂の耐火性評価試験

鋳物砂の耐火性が低い場合、鋳造欠陥の一つである焼付きが発生する。その対策として耐火性を上げるため、塗型等の作業を行っている。しかし、この耐火性は造型した鋳型を用いた評価方法が決まっていない。そこで、以下の方法により耐火性の評価方法を検討した。

表1に試験条件を示す。試験片は JIS Z 2601 に準

じて作製した標準試験片を使用した。この試験片を一定の温度で加熱し冷却後、試験片を一定時間振とうして加熱前および振とう後の試験片の質量を測定した。

表1 耐火性評価試験の試験条件

試験番号	砂成分	樹脂量
①	現場砂	少
②	現場砂	少
③	現場砂	多
④	現場砂	多
⑤	クロマイトサンド	少
⑥	クロマイトサンド	少

2. 3 鋳物砂の圧縮強さと表面硬さとの関係

鋳型の強度には鋳型全体を対象とした強さ（圧縮強さ）と鋳型表面を対象とした強さ（表面硬さ）がある。この2つの関係性については、使用される砂性状の違いなどから各現場で異なっている。この関係性を明確にすることは、管理する試験項目を選択することができ、作業時間の効率化、作業コストの低減が見込める。そのため、この関係性について調査した。

試験片は JIS Z 2601 に準じて作製した標準試験片を使用した。この試験片上面の表面硬さを TJFS-105（東海支部法）^[2] に準じて測定した。その後、同一試料の圧縮強さを TJFS-102（東海支部法）^[3] に準じて測定した。

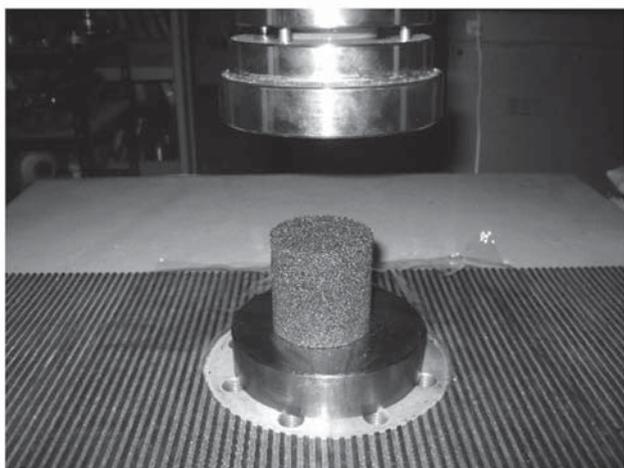


図2 表面硬さ試験後の圧縮強さ試験

3. 結果

3. 1 摩耗/欠損木型の検査、修復

摩耗欠損領域の3Dデータ構築処理の流れは図3のとおりである。

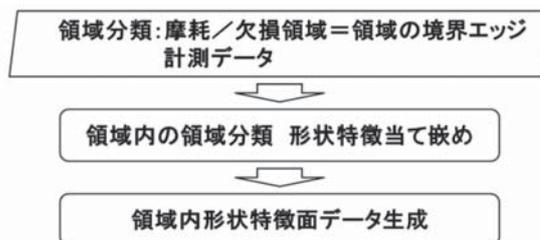


図3 摩耗欠損領域の3Dデータ構築処理

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（図4左図）から、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る。当て嵌めルールは、表2に示す、幾何形状面データと自由曲面の2種とする。まず、幾何形状に6種の幾何形状で表現できないか判断し、表現できなければ、自由曲面により補間する（図4中図）。当て嵌めた面データを境界エッジによりトリム（外部領域を削除）することにより領域内の形状特徴面データを生成（図4右図）する。

表2 領域内（境界内側）の形状特徴当て嵌めルール

1. 幾何形状	平面、円柱、円錐、球、回転体、円環
2. 自由曲面	3次 B-Spline 補間

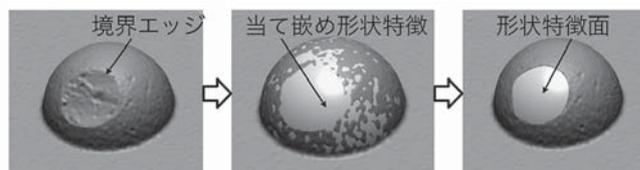


図4 摩耗/欠損領域形状特徴面当て嵌め処理

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5左図）、摩耗、破損部分を追加し（図5右図）、非接触三次元デジタイザ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6である。

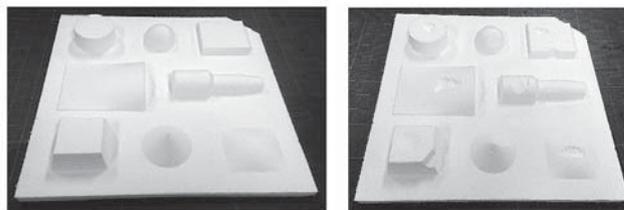


図5 発泡切削元サンプル（左）、発泡摩耗/破損サンプル（右）

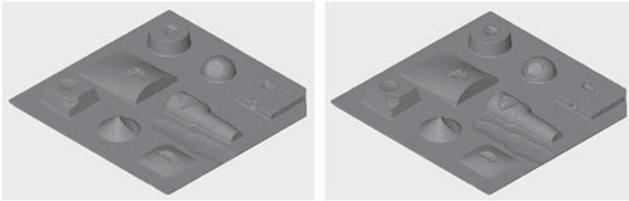


図6 発泡計測データ(左)、境界エッジ抽出(右)

図6(右)に対し、領域内を塞ぐ形状特徴面データ生成を行う。

3.2 鋳物砂の耐火性評価試験

図7に振とう後にふるい上に残った砂の質量残存率と振とう時間の関係を示す。

図より、全ての試験片において、30秒付近までは急激に砂の質量が減り、その後は緩やかな減少を示した。また、質量残存率は樹脂量が多い方(③または④)が少ない方(①または②)に比べて高い値を示した。さらに、現場の砂で作製した試験片(①または②)に比べてクロマイトサンドで作製した試験片(⑤または⑥)の方が高い値となった。

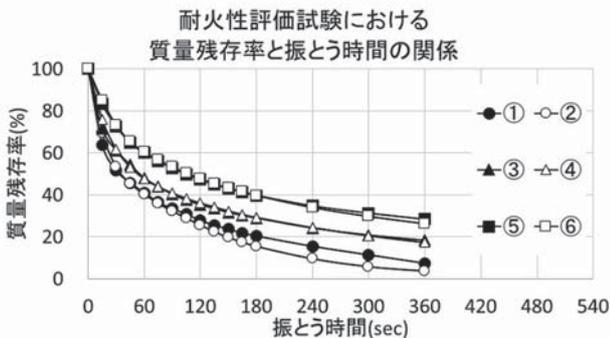


図7 加熱冷却後振とうさせた試験片の質量変化

3.3 鋳物砂の圧縮強さと表面硬さとの関係

図8に圧縮強さと表面硬さとの関係を示す。図より、表面硬さの増加とともに圧縮強さの減少の傾向がみられ、比例の関係はみられなかった。

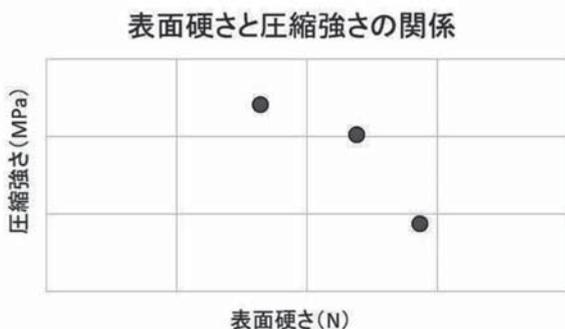


図8 圧縮強さと表面硬さとの関係

4. 考察

4.1 摩耗/欠損木型の検査、修復

本手法の効果を検討するために、本手法を図6(右)に対し修復実験を行った。その結果を図9に示す。また、生成した形状特徴面の精度評価を行うため、形状特徴面と元の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10に示す。ほぼ0.25mm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中の左下の自由曲面を当て嵌めた部分に偏差が0.4mmを超えた部分があるが、これは、推定した3次B-Spline曲面式で欠損部分の張りが表現できていないためと考えられるため、この点は今後の検討課題である。

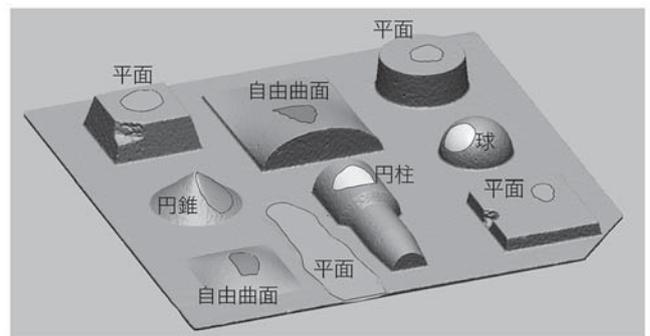


図9 形状特徴面データ生成結果

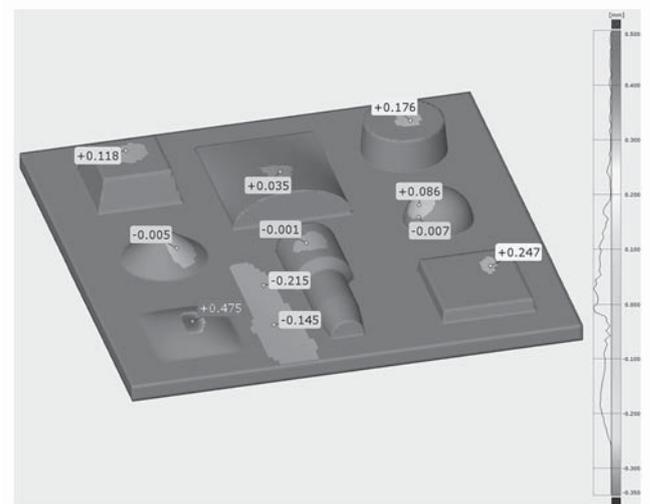


図10 生成した形状特徴面と元CADデータの偏差

4.2 鋳物砂の耐火性評価試験

本試験の結果は耐火性が増加する条件と同様の傾向が得られたことから、耐火性を評価する指標の一つとしての適用が見込める結果であった。しかし、試験で使用した現場砂は、性状が不安定であるため比較対象として妥当性に欠けると考えられた。また、再現性を確認するために試験回数を増やして比較検討する必要があると考えられた。

4. 3 鋳物砂の圧縮強さと表面硬さとの関係

本試験の結果から、圧縮強さの増加により表面硬さの減少が見られた。これは、鋳型表面硬さの増加にともない、鋳型が脆化し全体の型強度が低下したと考えられる。しかし、本試験の回数では再現性が不十分であると考慮されるため、再度試験の回数を増やして実施する必要がある。

5. 結言

5. 1 摩耗／欠損領域の3Dデータ構築

鋳造用の摩耗／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隣接点列の変化量から抽出された摩耗／欠損領域の境界となる特徴境界に対し、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／欠損領域を塞ぐ3Dデータを構築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面形状を生成できることを確認した。今後は、修復形状となる3D形状を構築する手法を検討し、摩耗／欠損した木型のデジタル修復を図っていく。

5. 2 鋳物砂の耐火性評価試験および鋳物砂の圧縮強さと表面硬さとの関係

鋳物砂の品質管理の効率化を図るため、耐火性評価試験の検討および圧縮強さと表面硬さとの関係を調査した。その結果、耐火性評価試験の有効性、圧縮強さと表面硬さとの関係について確認できた。しかし、いずれも再現性が不十分であることから、今後は試料の選択や試験回数に留意して調査する。

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. 50, pp.27-30, 2020.
- [2] 生形砂試験方法、公益社団法人日本鋳造工学会生型研究部会 東海支部 鋳鉄鋳物研究部会、2 p.21, 2017.9.
- [3] 生形砂試験方法、公益社団法人日本鋳造工学会生型研究部会 東海支部 鋳鉄鋳物研究部会、2 pp.16-17, 2017.9.

航空宇宙産業に向けた耐熱合金の切削加工技術の開発

(モリブデン合金の切削加工)

機械加工科 研究員 梅木 宣明
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

本研究は、航空宇宙産業機器のエンジン部品等に用いられるモリブデン合金の切削加工に関する研究に取り組み、最適な切削加工技術の確立を目的とする。モリブデン合金の切削に最適な、①切削工具材種の検討、②刃先形状の検討、③切削加工条件の検討を行った。

本報告は上記3つの項目の実験結果から、モリブデン合金の切削における最適な切削工具材種、切削工具の刃先形状および切削加工条件について報告する。

1. 緒言

長崎県では2018年の長崎県航空機産業クラスター協議会の設立に伴い、県内機械加工業において、航空機関連部品等の難削材の切削技術の確立に向けた意欲が高まっている。県内には航空宇宙産業機器を製造する大手重工メーカーがあり、エンジン部品等の耐熱合金に使用されているモリブデン合金の切削加工に関するニーズがある。しかし、モリブデン合金は難削材であるため、切削加工の高能率化や加工部品の高品質化等の課題がある。

そこで、本研究では、県内企業からのニーズがあるモリブデン合金の最適な切削加工技術の開発に取り組むことで、県内機械金属加工業の高度化を図ることを目指し、モリブデン合金の切削に最適な、①切削工具材種の検討、②刃先形状の検討、③切削加工条件の検討を行った。

本報告ではモリブデン合金の切削加工実験の結果について報告する。

2. 実験方法

モリブデン合金の表面粗さ $Rz3.2\mu\text{m}$ 以下で最適な切削加工条件を確立するために、①工具材種、②刃先形状、③切削加工条件の検討を行った。

被削材は $\phi 68\text{ mm}$ 、内径 20 mm の中空円筒状のモリブデン合金を用いた。

表面粗さについては、端面を2回切削後、4方向より外側から内側に向けて測定を行った。なお、同一条件にて3回加工実験を行った。また、カットオフ値は 0.8 mm 、評価長さは 4.0 mm とした。

切削加工条件の検討・評価は①工具材種、②刃先

形状、③切削加工条件の順番で行い、工具材種および刃先形状の検討・評価については表1に示す切削加工条件で実施した^[1]。

今回の切削実験にはDMG森精機(株)製NC旋盤SL-20を使用した。

表1 切削加工条件

切削速度 (m/min)	200
送り速度 (mm/rev)	0.1
切込み量 (mm)	0.2
切削液	水溶性クーラント

3. 実験結果

3.1 切削工具材種の検討

表2に示す5種類について、切削実験での検討・評価を行った。刃先形状についてはすべて刃先角度 80° 、ノーズ $R0.8$ 、ネガティブインサートで統一した。

表3にそれぞれの材種における表面粗さ Rz の平均値を示す。なお、セラミック製の工具については、切削加工中に破損したため、表面粗さは測定することはできなかった。

これらの結果から、検討した材種5種類について、超硬合金の表面粗さ Rz 値が最も低い。これより、モリブデン合金の切削加工には超硬合金が適していると考えられる。

表2 切削工具材種検討

切削工具材種	超硬合金、PVD、サーメット、PVDサーメット、セラミック
--------	-------------------------------

表3 材種違いによる表面粗さ測定結果

材種	表面粗さ Rz (平均値)
超硬合金	5.196 μm
PVD	8.331 μm
サーメット	9.999 μm
PVD サーメット	9.115 μm
セラミック	工具破損のためデータ無し

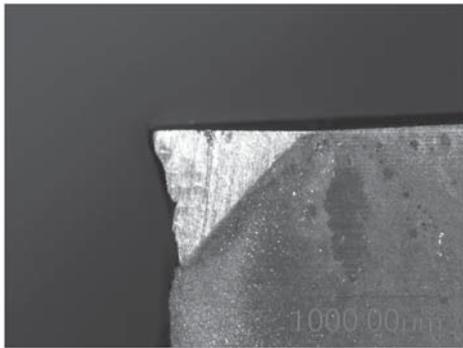


図1 破損したセラミック製インサート

3.2 切削工具刃先形状の検討

表4に示す項目について、切削実験での検討・評価を行った。検討・評価は刃先角、ノーズ R、逃げ角、ブレード形状の順番で行った。なお、今回使用したブレード形状を図2および3に示す。ブレード形状については、アルミ合金用のものをブレード①、耐熱合金用のものをブレード②とする。工具材種については、超硬合金で統一した。また、他のインサート仕様についても比較する項目以外は統一して実験を行った。

表4 刃先形状検討

刃先角	80°、55°、35°
ノーズ R	0.8、0.4
逃げ角	ネガティブ、ポジティブ
ブレード形状	2種類で検討 (図2、3参照)

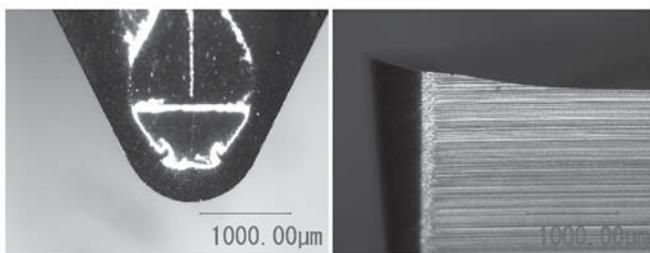


図2 ブレード形状①

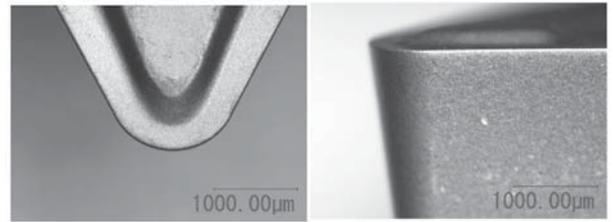


図3 ブレード形状②

それぞれの刃先形状検討項目における表面粗さ Rz の平均値を表5～8に示す。これらの結果を項目ごとにマンホイットニーの U 検定または Steel-Dwass 法を用いて有意水準 $\alpha=0.05$ で分析を行った。

分析の結果、刃先角 80°、55°、35°それぞれで有意差が認められた。ノーズ R についても R0.8 と R0.4 で有意差が認められた。また、ネガティブとポジティブについても有意差が認められた。さらに、ブレード形状についてもブレード形状①とブレード形状②で有意差が認められた。

このことから、モリブデン合金の切削に最適な刃先形状は刃先角 55°、ノーズ R0.8、ブレード形状①のポジティブインサートであることがわかった。

表5 刃先角違いによる表面粗さ測定結果

刃先角	表面粗さ Rz (平均値)
80°	5.196 μm
55°	4.453 μm
35°	7.256 μm

表6 ノーズ R 違いによる表面粗さ測定結果

ノーズ R	表面粗さ Rz (平均値)
0.8 mm	4.453 μm
0.4 mm	6.445 μm

表7 ネガティブとポジティブの違いによる表面粗さ測定結果

逃げ角	表面粗さ Rz (平均値)
ネガティブ	6.445 μm
ポジティブ	5.222 μm

表8 ブレード形状違いによる表面粗さ測定結果

逃げ角	表面粗さ Rz (平均値)
ブレード①	3.536 μm
ブレード②	7.415 μm

3. 3 切削加工条件の検討

切削加工条件の検討については、送り速度を 0.07 mm/rev に変更して実験を行った。使用したインサートの仕様については、これまでの実験結果から決定した。(表9参照)

表9 切削加工条件の検討で使用したインサート仕様

材種	超硬合金
刃先角	55°
ノーズ R	0.8 mm
逃げ角	ポジティブ
ブレーカー形状	ブレーカー形状①(図1参照)

切削実験の結果、送り速度を 0.07 mm/rev に変更して切削したモリブデン合金の表面粗さ Rz の平均値は 2.505 μm となった。平均値は目標値である Rz3.2 μm を達成したので、安定的な加工が可能であることを確認するために工程能力 Cpk の算出を行った。

の結果、Cpk=1.436 となり、今回の条件でモリブデン合金を加工する場合に、安定的な加工が可能であることが確認された。

4. 結言

モリブデン合金の高品位(表面粗さ Rz3.2 μm 以下)な切削加工条件についての研究に取り組み、以下の結果を得た。

- 1) 工具材種について、超硬合金、PVD、サーメット、PVD サーメットおよびセラミックにて検討・評価を行った結果、モリブデン合金の切削には超硬合金が最適であることがわかった。
- 2) 刃先形状について、刃先角、ノーズ R、逃げ角(ネガティブまたはポジティブ) およびブレーカー形状の検討・評価を行った結果、モリブデン合金の切削に最適な刃先形状は刃先角 80°、ノーズ R0.8、ブレーカー形状①のポジティブインサートであることがわかった。
- 3) 切削加工条件について、送り速度 0.1 mm/rev と 0.07 mm/rev を比較した結果、0.07 mm/rev で良好な表面粗さ値を示すことがわかった。
- 4) 上記の実験結果を踏まえて、超硬合金の刃先角 80°、ノーズ R0.8、ブレーカー形状①(図2参照)のポジティブインサートを使用し、切削速度 200 m/min、送り速度 0.07 mm/rev、切込み量 0.2

mm として切削実験を行い、得られたデータから目標値である表面粗さ Rz3.2 μm に対する工程能力 Cpk を算出した。この結果、Cpk=1.436 となり、今回の条件でモリブデン合金を安定的に加工可能であることを確認した。

参考文献

- [1] 次世代ものづくり基盤加工技術調査、東北経済産業局, p.12, 2011.

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
	センター長	河村	俊哉
	専門研究員	宮田	裕次
	主任研究員	土谷	大輔
	主任研究員	井内	智美
	主任研究員	横山	智栄
	主任研究員	中山	久之
	主任研究員	森友	美

県内食品産業の振興を目的として開設された食品開発支援センターを円滑に運営するために、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ので報告する。

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34.4%、従業者数の27.2%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64機種種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。ま

た、令和元年度に導入した11種の分析装置についても解析評価手順を検討した。

表1 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	プラスチック&ショックフリーザー
6	加圧・減圧攪拌機
7	真空フライヤー
8	インライン搾汁機
9	多機能摩砕機
10	製麺機
11	充填機
12	ハンマーミル

2.2 機器の標準手順書の作成

食品加工機器について、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、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2、表3に示す。

表2 加工条件を検討した主な事例

検討内容	使用機器
農産物（トマトなど）の果汁、ペースト製造	搾汁機、加圧・減圧攪拌機など
発酵食品（味噌など）の乾燥	熱風乾燥機、減圧乾燥機など
農水産物を対象としたレトルト食品製造	レトルト殺菌機、真空包装機など
急速冷凍の加工食品（畜肉加工品など）に及ぼす影響	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
柑橘類の乾燥スライス化	熱風乾燥機、凍結乾燥機、減圧乾燥機など
漬物製品の殺菌条件の検討	充填機、ボイル槽、温度ロガーなど
真空フライヤーによる農産物（バレイショなど）のチップス製造	真空フライヤー、油切り機など

表3 分析条件を検討した主な事例

検討内容	使用機器
発酵食品の品質評価（遊離アミノ酸、有機酸など）	アミノ酸・有機酸分析システムなど
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
大豆加工品に含まれる機能性成分（ γ -アミノ酪酸、ポリフェノール）の測定	ビタミン分析システムなど
菓子製品の食感と保存性の検討	クリープメーター、水分活性測定装置など

本検討により、トマト、柑橘などの各種農産物を対象とした搾汁、ペースト化、乾燥、レトルト殺菌などの加工条件を明らかにすることが出来た。また、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、漬物製品のボイル殺菌などを検討し、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。さらに、食品の品質成分であるアミノ酸、有機酸、機能性成分である γ -アミノ酪酸、ポリフェノールといった成分の分析条件を決定し、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。令和3年度の分析・加工条件検討数は計123件であり、年間目標（76件）を達成した。

3.2 機器の標準手順書の作成

令和2年度に導入した加工機器について、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、写真付きの手順書を作成した。その一例として、減圧乾燥機装置の手順書を図1、図2、図3に示す。令和3年度の作業手順書の作成数は計32件であり、年間目標（32件）に到達した。本作業手順書は、県内企業をはじめとする利用者の希望に応じて配布する予定である。

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)  (主電源) (スイッチ)
2	 (真空ポンプは、乾燥器の下部に配置されている。)	(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。 ・パージバルブ(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。  ・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1 標準手順書(減圧乾燥機 1/3)

2		<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。 (温度の設定) ・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【定値運転/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℃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し再起動した後に、再設定する。

図2 標準手順書 (減圧乾燥機 2/3)

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、パージバルブをOPEN (左に45度回転) にする。チャンパ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、パージバルブを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3 標準手順書 (減圧乾燥機 3/3)

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、昨年度に引き続き企業訪問と現地技術支援を行った。今年度の実施件数は企業訪問が17件、現地技術支援が42件である。年間目標として両者の合計を設定しており、今年度の実績は59件となることから目標(40件)を達成した。訪問の際にニーズ調査を行った結果、県産農産物を用いたレトルト品の開発、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、試作を企業と進めている。また今年度も技術セミナーを開催し、センターの概要紹介、食品の表示や衛生管理、商品開発についての3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を行う簡易的な共同研究であり、今年度は県内の食品事業者と15件(目標; 8件)を実施した。試作については、事業者などがセンターの設備を利用した件数は130件であり、目標の38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出来た。

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。

令和3年度も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(123件; 目標数値76件)、機器の標準手順書の作成(32件; 目標数値32件)、ニーズ調査及び食品開発支援センターの紹介(59件; 目標数値40件)、共同技術開発件数(15件; 目標数値8件)、試作件数(130件; 目標数値38件)といずれの項目においても数値目標を達成した。

令和4年度も、先に導入した食品加工機器について活用条件を検討し、次いで標準手順書を作成する。

さらに、活用条件や手順書などを用いて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 2021.

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4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。