

平成30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.48

長崎県工業技術センター

INDUSTRIAL TECHNOLOGY CENTER OF NAGASAKI

# 目 次

1. 海洋産業に用いるデジタルデータと電力の非接触式伝送システムの開発 .....	1
次長兼グリーンニューディール技術開発支援室長	兵 頭 竜 二
グリーンニューディール技術開発支援室 参 事	神 田 誠
グリーンニューディール技術開発支援室 専 門 幹	田 口 勝 身
グリーンニューディール技術開発支援室 専 門 幹	丁子谷 一
2. 無線ネットワークを用いた振動監視装置の開発 .....	5
機械システム科 科 長	田 口 喜 祥
3. 可視化システムを用いたシミュレーション技術の高度化 .....	11
(シミュレーションを用いた地場企業の製品開発工程支援)	
機械システム科 主任研究員	入 江 直 樹
4. 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 .....	13
電子情報科 科 長	下 村 義 昭
電子情報科 主任研究員	田 中 博 樹
食品・環境科 主任研究員	三 木 伸 一
5. 三次元デジタル製造に関する要素技術の確立と実部品への応用 .....	18
電子情報科 専門研究員	小笠原 耕太郎
工業材料科 科 長	瀧 内 直 祐
工業材料科 主任研究員	福 田 洋 平
6. 低コストで高機能な発光サイン用導光板の開発 .....	22
(導光板用金型をレーザー加工で安価に作製することで低コスト・高機能な発光サインを実現する)	
電子情報科 主任研究員	田 中 博 樹
7. 難削性非鉄材料の高効率切削加工技術の開発 .....	24
工業材料科 科 長	瀧 内 直 祐
工業材料科 主任研究員	福 田 洋 平
食品・環境科 主任研究員	三 木 伸 一
8. 複雑事象解析に対応可能な連成シミュレーション技術の開発 (第1報) .....	28
工業材料科 専門研究員	重 光 保 博

9. 分子複合による耐熱性樹脂材料の開発 .....				32
	工業材料科	主任研究員	市瀬英明	
	佐世保工業高等専門学校技術室		里見暢子	
	佐世保工業高等専門学校	特任教授	古川信之	
10. 健康維持と美味しさを求めるアクティブシニアのための食品開発 .....				36
	食品・環境科	主任研究員	横山智栄	
	食品・環境科	主任研究員	玉屋圭	
	食品・環境科	主任研究員	松本周三	
11. 乳酸発酵並びに酵素利用技術を用いた機能性食品の開発 .....				41
	食品・環境科	主任研究員	玉屋圭	
	応用技術部	部長	河村俊哉	
	有限会社伊東精麦所	代表取締役	伊東清一郎	
12. 新規電解槽の開発 .....				46
(多機能型電解槽の開発)				
	食品・環境科	専門研究員	大脇博樹	

# 海洋産業に用いるデジタルデータと電力の非接触式伝送システムの開発

次長 兼 グリーンニューディール技術開発支援室長 兵 頭 電 二  
グリーンニューディール技術開発支援室 参 事 神 田 誠  
グリーンニューディール技術開発支援室 専 門 幹 田 口 勝 身  
グリーンニューディール技術開発支援室 専 門 幹 丁 子 谷 一

本研究事業は、海洋関連産業の振興に寄与すべく、金属接点を有しない給電部と受電部のコネクタを接続して固定することに特徴を持つ非接触給電技術を開発し、これに海水の影響を受けない光通信技術を付加することで、海面・海中において90%以上の電力伝送効率と45 Mbps以上のデジタルデータ転送速度を実現する小型・軽量な非接触式伝送システムを開発することを目指している。

研究最終年度となる平成30年度は、内部に組み込む電力伝送部の改良や嵌合用筐体の開発などを行い、最終的な目標である1.5 kVAの電力を伝送できるシステムを開発した。また、このシステムを既存の水中ロボットに適用した評価実験も行い、期待どおりの性能が発揮されることを確認した。

## 1. 緒言

海洋再生可能エネルギー分野で新たな産業を興すとともに、その産業拠点を長崎に形成することの重要性から、県は“ナガサキ・グリーンイノベーション戦略”や“長崎県海洋エネルギー産業拠点形成プロジェクト”を重要な施策として推進している。

金属接点を持つ接続部品は、錆びや漏電などの問題があるため、海面や海水中での利用に制限がある。また、水中ロボットや観測ブイ、洋上発電装置などとの接触を行う場合、電力の伝送とともに情報収集やメンテナンスのためのデータ転送が欠かせない。

そこで本研究事業では、県内製造業者の得意技術を活用し、海洋再生可能エネルギー分野で広く利用可能な技術として、デジタルデータと電力の伝送に使用する水中挿脱が可能なコネクタを開発する。具体的には、むき出しの金属接点を持たず、給電部と受電部のコネクタを密着して固定することに特徴を持つ非接触給電技術を開発する。そして、これに海水の影響を受けない光通信技術を付加することで、海面・海中において90%以上の電力伝送効率と45 Mbps以上のデジタルデータ転送速度を実現する小型・軽量な非接触式伝送システムを開発する。

本研究事業の最終年度である平成30年度は、これまでの評価検討結果をもとに、中心周波数が85 kHzの高周波電力を用いた新たな非接触給電回路を製作した。データの伝送は100 Base-TXの光による中継機能を実装した。そして、これらの機能を収容する嵌合

用筐体を開発し、非接触式伝送システムを開発した。

また、試作開発したシステムを水中ロボットに適用して実証実験を行った。

## 2. 開発と評価の方法

### 2.1 非接触式伝送システムの開発

これまでの開発と評価結果<sup>[1],[2]</sup>を考慮して、最終的な試作開発を行った。図1にシステム構成の概要を示す。

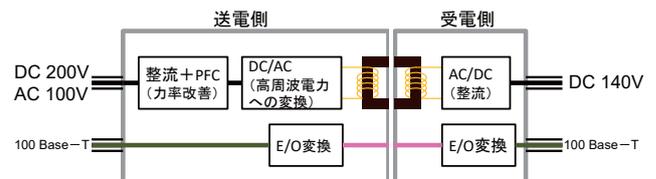


図1 システム構成

#### (1) 電力伝送部の開発

電力の伝送には、いわゆる非接触給電技術を用いる。方式は85 kHz帯の高周波電力を利用した電磁誘導方式とした。高周波電力の周波数帯として85 kHz帯を選択した理由は、電気自動車への非接触充電分野での利用として法整備や標準化が進められている帯域だからである。

送電側の入力電源は、商用電源として壁コンセントに普通に用いられているAC 100 Vと、実験施設などで使用されることがあるDC 140 V～200 Vの両方に対応できるようにした。

受電側は、受電した 85 kHz の高周波電力を全波整流した上で平滑化し、DC 140 V を出力することとした。AC 100 V の商用電源を入力とする機器のインバータ式電源は、全波整流と平滑化した DC 140 V を内部で使用している。このことから、DC 140 V を出力として採用した。

## (2) データ通信機能の実現

組込み機器やパソコンには、100 Base-TX などの Ethernet 規格に適合した通信機能が実装されていることが多い。このため、本研究事業で開発する伝送システムの両端では、100 Base-TX の通信インタフェースを提供することとした。

データの非接触伝送を実現する具体的方法としては、電気-光変換モジュールを活用して、送電側と受電側との間を光で中継する。図 1 の構成概要には、一对の電気-光変換モジュールのみが描画されているが、装置内部での光ファイバの引き回しなどの関係で、実際は、電気-光変換モジュールがカスケード接続される。

## (3) 嵌合用筐体の試作

水中で使用する筐体は、球形や円筒形にすることで耐水圧性が向上する。しかし、本研究事業で開発する装置が実験段階であることから、分解と組立てなどのメンテナンス性を重視し、直方体とした。このため、ある程度の水圧に耐える必要があることから、厚みが約 5 mm のアルミ製とした。

また、受電側ユニットは本来、水中ロボット等の負荷装置の中に組み込むべきものであるが、本研究では汎用的な伝送システムとして完成させるため、受電側ユニットも独立した装置として構成することとした。

## 2. 2 評価

評価は、電力伝送部と通信機能部の個別評価、ならびに、嵌合用筐体に組み上げた伝送システムを既存の水中ロボットに適用した総合評価として実施した。

## 3. 結果と考察

### 3. 1 電力伝送部の評価

図 2 は電力伝送部の評価結果であり、受電側装置に接続された負荷による消費電力と、電力の伝送効率との関係を示している。なお、図中の●印によるプロットは入力に DC 200 V を使用した場合、◆印のプロットは入力に AC 100 V を使用した場合のものである。

DC 200 V 入力の場合に着目すれば、負荷の消費電

力が 800 W を超えたところでは 90 % 以上の伝送効率を得られていることが分かる。また、最大で 1533 W の電力が負荷で消費されたことも確認できた。

さらに同図から、AC 100 V 入力の場合、DC 200 V 入力に比べ、電力伝送効率が低いことが見て取れる。送電側装置に含まれる PFC (力率改善回路) は、後段の高周波電力への変換機能部である DC/AC を効率良く作動させるため、一旦、DC 400 V 等に昇圧する。入力電圧の違いによる昇圧の効率の差が、システムとしての伝送効率に影響したものである。

なお、受電側装置から負荷に供給される電力の電圧は、光パルス信号を用いて受電側から送電側にフィードバックされる受電電圧情報を用いて、DC 140 V に安定制御されている。

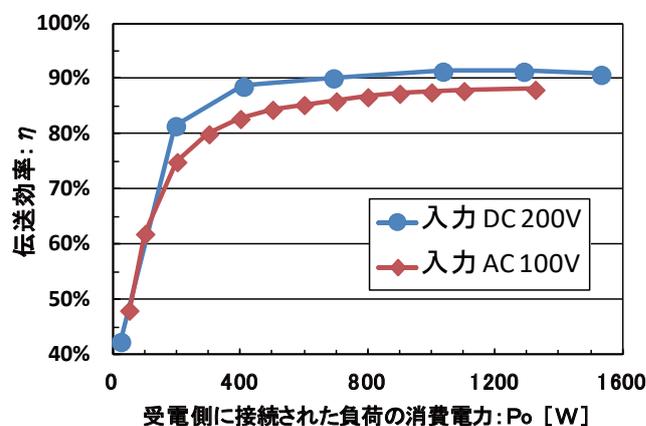


図 2 電力伝送効率

### 3. 2 データ通信機能の評価

通信機能部の個別評価については、伝送システム両端の 100 Base-TX インタフェースにそれぞれパソコンを接続して通信品質試験を行った。この結果、特に目立ったパケット廃棄等も無く、問題なく通信機能の提供ができていることを確認した。

### 3. 3 嵌合用筐体

図 3 に嵌合用筐体の外観等を示す。同図 (a) は送電側装置と受電側装置とを対向させた勘合前の状態であり、同 (b) は両者を嵌合締結した状態である。また、同図 (c) は勘合前の状態における嵌合部分の拡大写真、同 (d) は嵌合時の嵌合部分の拡大写真であり、この図 (d) では理解を助けるために上蓋を透明板に変更した写真を用いている。

開発した嵌合用筐体は、両者が嵌合する面の中央に樹脂板があり、その奥には電力伝送用のコイルとコア

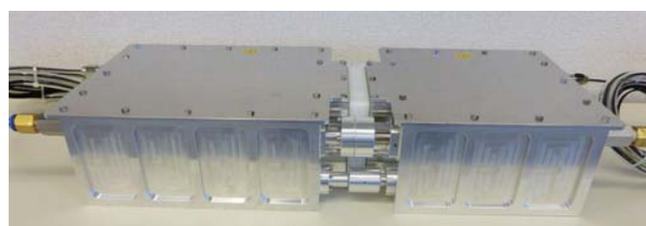
がある。これらの樹脂板同士が密着することで、送電側のコアと受電側のコアとが近接し、電磁誘導方式による非接触給電を実現する。

また、上述の樹脂板の回りには4つの機能部が実装されている。内訳は、①送電側から受電側に向かうデータ通信用の光を通す窓、②反対に受電側から送電側に向かうデータ通信用の光を通す窓、③受電側出力の電圧情報を光パルスで送電側にフィードバックするための光を通す窓、④送電側と受電側との嵌合締結状態を検知するための小型マグネットと対応するリードスイッチである。

さらに、データ通信用の光を通す窓を包含する部分(上述の①と②)には大きな接合ネジ(カラーネジ)が付いている。これらの接合ネジを締めることで、送電側と受電側との嵌合締結状態を維持することができる仕組みとなっている。



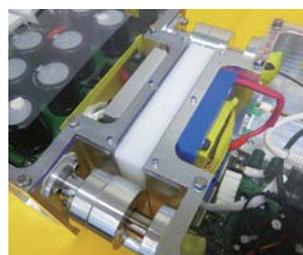
(a) 嵌合前(左;送電側、右;受電側)



(b) 嵌合状態



(c) 嵌合前の拡大



(d) 嵌合状態の拡大

図3 嵌合用筐体

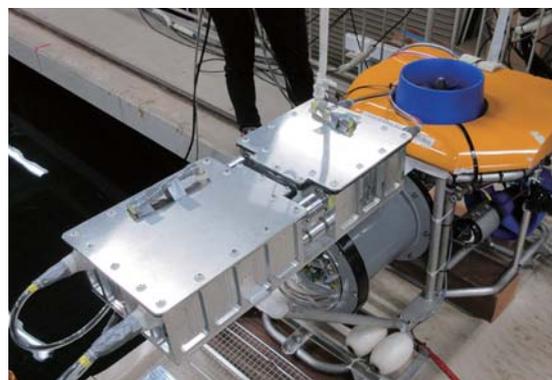
### 3.4 水中ロボットへの適用評価

本研究事業の協力企業であるロボットテクノス(株)が所有する水中ロボットに、開発した伝送システム(概観は図3(b)を参照)を適用した実証実験を行った時

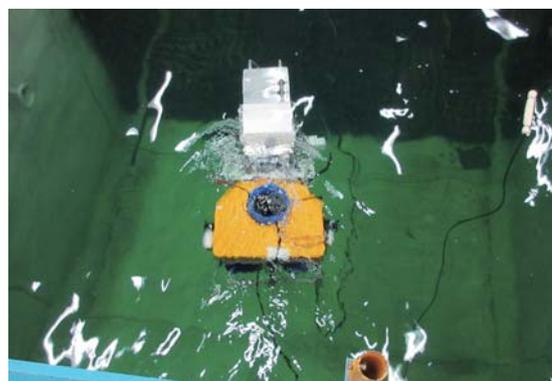
の様子を図4に示す。図4(a)は水中ロボットに開発した伝送システムを取り付けた状態の写真、同(b)はそれが実験用水槽内を航行している様子である。

この評価に用いた水中ロボットは、約500Wのスラスタ(推進装置)を3本搭載している。また、操縦に必要な信号は、陸上の操作盤(リモコン)と水中ロボット内の制御ユニットとの間を100Base-TXの通信回線で接続して送受される。

水中ロボットの航行試験の結果、電源線や通信線を直接に繋いだ場合と比較して、水中ロボットが何の遜色も無く航行性能を発揮したことを確認した。このことによって、本研究事業で開発した伝送システムの有効性を実証的に確認したと言える。



(a) 取付けの様子



(b) 航行中の水中ロボット

図4 水中ロボットへの適用実験

### 3.5 開発概要の整理

開発した非接触式伝送システムの成果概要を表1に整理する。

開発当初の目標として、①1.5kVAの電力が効率90%以上で伝送できること、②3kg~5kg程度の重量で片手でハンドリングできること、③45Mbps以上のデータ伝送速度の実現、を掲げていた。結果として、表

1に示すように、片手でハンドリングできる程度には至らなかったが、電力伝送とデータ伝送の目標は達成することができた。

また図5は、開発した伝送システムを用いて、机上で電力の伝送を実演している様子である。

本研究事業で開発した嵌合用筐体は、水中で使用することを前提としている。それは、装置内部の不要な発熱が、筐体を伝って筐体外の水に逃げることを期待したものである。机上で作動させていることから放熱性能が低下するため、2個の100Wの白熱電球を直列接続した小容量の負荷で実演を行った。

表1 開発した非接触式伝送システムの成果概要

目標	開発仕様		結果
	項目	仕様	
1.5kVAの電力伝送 効率90%以上	送電側の入力電源	DC 140V~DC 200V or AC 100V	○
	受電側の出力	DC 140V	
	非接触給電の周波数	85kHz帯	
	伝送電力と電力伝送効率	受電側出力1533Wまで確認(伝送効率は90% (DC 200Vを送電側へ入力))	
3kg~5kg程度 片手でハンドリング	コネクタの大きさ	給電側: 長300mm×幅250×高120mm 受電側: 長240mm×幅250×高120mm	×
	コネクタの重量	給電側: 約8.9kg、受電側: 約7.8kg	
	方式	光による中継	
45Mbps以上の データ伝送速度	両側のインターフェース	100Base-T	○
知財財産 取得準備 1件	特許出願	3件	○

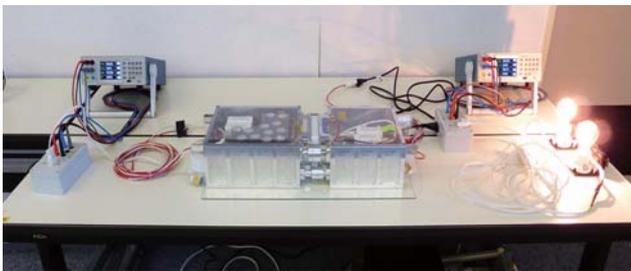


図5 机上での電力伝送の実演の様子

#### 4. 結言

3か年で実施した本研究事業では、初年度と第2年度で電力伝送機能部やデータ伝送機能部などについて複数回の試作と評価を行った。最終年度であった平成30年度、これまでの評価検討結果をもとに、85kHz帯の高周波電力を用いた新たな非接触給電回路を試作し、システムとして組み上げた状態で受電側に接続した負荷に1500Wを超える電力を90%以上の効率で伝送できることを確認した。また同時に、光パルス信号を用いて受電側から送電側に受電電圧情報をフィードバックする方法についても検討を加え、受電側装置から負荷に供給する電力の電圧を安定制御できることを確認した。データの伝送は、100Base-TXの光による中継機能を実装することで実現した。

この結果、90%以上の電力伝送効率と100Mbpsのデータ転送速度を実現する非接触式伝送システムを開発した。

また、試作開発したシステムを水中ロボットに適用して実証実験を行った結果、本研究で開発したシステムが実運用に耐えることも確認した。

#### 謝辞

本研究事業を推進するにあたり、長崎大学海洋未来イノベーション機構の山本郁夫教授と長崎大学大学院工学研究科の盛永明啓准教授、長崎大学大学院工学研究科の樋口剛教授と横井裕一准教授、イサハヤ電子株式会社の徳永秀昭部長と服部慎一郎氏と手束翔氏、ロボットテクノス株式会社の長嶋豊研究開発部長、宮本電機株式会社の篠崎照夫常務取締役、に多大なるご協力とご支援を頂いた。

また本研究事業は、平成26年度から5年間の年限付きで工業技術センター内に設置されたグリーンニューディール技術開発支援室の集大成とも言えるプロジェクト研究となった。これを支援してくださった関係各位に謝意を表します。

#### 参考文献

- [1] 兵頭ほか：海洋産業に用いるデジタルデータと電力の非接触式伝送システムの開発、平成28年度長崎県工業技術センター研究報告, No.46, pp.1-5, 長崎県工業技術センター, 2017.10.
- [2] 兵頭ほか：海洋産業に用いるデジタルデータと電力の非接触式伝送システムの開発、平成29年度長崎県工業技術センター研究報告, No.47, pp.1-6, 長崎県工業技術センター, 2018.10.

# 無線ネットワークを用いた振動監視装置の開発

機械システム科 科 長 田 口 喜 祥

県内中小企業では、生産性を向上させるため、できるだけ少ない人員で多くの機械装置を長時間稼働させたいという要望がある。特に、CNC 工作機械の稼働率を上げることは利益に直結するため、工作機械の稼働状況を監視し、異常の早期検出が求められる。従来、機械装置の異常の検出は人間が目視や音響により予兆を検知し判断することが多かった。一方、近年 IoT (Internet of Things: もののインターネット) が話題となっており、この技術を応用することで、機械装置の稼働状況を遠隔地から監視し、異常の通知を行うことが可能となっている。本研究は、振動現象について着目し、機械振動や電流波形などの振動現象を計測することで機械装置を監視する装置を開発することを目的として実施した。開発した振動監視装置は、IoT 機能が搭載されていない従来の機械装置に後から簡便に取り付けるため、データ通信を無線で行う、計測対象に合わせたセンサを選択できる、センサごとに複数の無線監視モジュールを使用可能である、計測したデータを収集・解析・処理する解析モジュールを用いるなどの特徴を持っている。これらの無線監視モジュールと解析モジュールを用いて機械装置の異常を検出し、モバイル端末に通知を行う無線式振動監視装置の開発を行った。

## 1. 緒言

県内中小製造業では、生産性を向上させるために、少人数で多くの機械装置を休みなく長時間稼働させたいという要望がある。CNC 工作機械を用いて機械加工を行っている企業では、工作機械の稼働率を上げることは利益に直結するため、工作機械の稼働状況を常時監視し、異常を早期に検出したいとの要望が増えている。これまでは、機械装置の異常を人間が見回り、音や振動により予兆を察知し、加工後の製品を観察することで機械装置や工具の異常を判断していた。しかし、このような判断には熟練を要するうえ、従業員に多くの時間的負荷をかけるため、人間に代わり自動的に機械装置の稼働状況や異常を監視できる装置の開発が求められている。このような問題を解決するために、機械装置にセンサを取り付け電流や振動データを解析することで異常を検出する研究が行われてきていた<sup>[1]~[4]</sup>。

一方、IoT (Internet of Things: もののインターネット) 技術の発達により、機械装置に複数のセンサを取り付け、取得したデータを品質工学や AI 処理により解析することで異常を検出する研究が行われてきている<sup>[5]~[6]</sup>。また、IoT に関する関心の高まりとともに、各種センサやマイコンボードなど安価な製品が発売されるようになってきた。このような安価な部品を用いることで、インターネット回線に接続して、機械装置を遠隔で監視する装置を安価に開発できるようになってきた。

そこで、本研究では、IoT 技術を応用し、機械装置に後付けで簡便に取り付けできる無線監視モジュールを試作し、試作した無線監視モジュールで計測した振動や電流のデータを解析モジュールで処理することで機械の稼働状況や異常を検出し、モバイル端末に通知を行う装置を開発することを目的として研究開発を行った。開発を行った振動監視装置の概要と性能確認実験の結果を以下で報告する。

## 2. システム構成

開発する無線ネットワークを用いた振動監視装置のシステム構成を図1に示す。開発する装置は振動データや電流データを計測し、無線ネットワークを用いてデータを送信することができる無線監視モジュールと、GPS から時刻信号を読み取り、無線監視モジュールに対して時刻同期信号を送信するとともに、無線監視モジュールからデータを収集し、収集したデータを解析することで機械装置の異常や稼働状況を検出する解析モジュールから構成される。

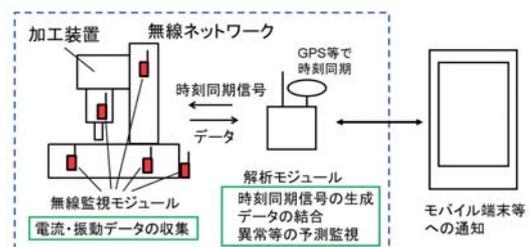


図1 システム構成

各種センサに対応した無線監視モジュールと解析モジュールを用いてネットワークを構成することで、センサの種類や数、設置場所を、対象とする機械装置に合わせて容易に変更できる“無線ネットワークを用いた振動監視装置”となった。

以下では、開発した無線ネットワークを用いた振動監視装置の構成と、開発したソフトウェアについて述べる。

### 3. 加速度センサ

無線監視モジュールには、電流センサや振動センサを取り付け、機械装置から機械振動や電流に関する振動データを収集することに用いる。電流に関しては、平成28年度までに長崎県単独経常研究「機械装置知的遠隔監視装置の開発」<sup>④</sup>で開発した手法を用いてクランプ式のCTセンサで取得することとした。

一方、機械振動の計測には、通常圧電式加速度ピックアップが使われる。しかし、圧電式加速度ピックアップは高価であるため、複数の台数を常時機械装置に取り付けて使用することは難しい。また、電荷での出力であるため、マイコンでデータを取り込むためにはチャージアンプなどの回路が必要となり大きさや容易に設置することが難しいという問題点もある。

一方、近年スマートフォンの傾きを測定するためのセンサとして利用されるMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いて製造されたMEMS型加速度センサが流通している。このセンサは、1つのチップ部品に3軸の加速度センサを組み込んだものがあり、安価に入手できるものが多い。そこで、チップ型3軸加速度センサを機械装置の振動計測に使用できないか検討を行った。今回検討したチップ型3軸加速度センサはKionix社製KXR94-2050<sup>⑧</sup>である。

圧電式加速度ピックアップと比較を行うために、圧電式加速度ピックアップとチップ型3軸加速度センサを振動試験装置に取り付け、正弦波で加振をし、ボード線図を用いて比較する実験を行った。加振の基準として圧電式加速度ピックアップであるIMV社製のVP-32を使用し、同じIMV社のVP-02SとMEMS型3軸加速度センサKXR94-2050により加速度の測定を行い、ボード線図を用いて評価を行った。使用した加速度センサの写真を図2に示す。

振動試験装置は、IMV社製のi230/SA2Mを使用した。加速度0.7[G]固定で、周波数5 Hz から2 kHzまでを1 oct/minの掃引速度で変化させながら加振を行い、加速



図2 加速度センサ

度の計測を行った。

圧電式加速度ピックアップVP-32とVP-02Sおよびチップ型3軸加速度センサKXR94-2050を、図3に示すように振動試験装置のキューブ型補助テーブルに固定して試験を行った。制御に用いた加速度ピックアップVP-32を基準としたボード線図を図4に示す。

試験の結果、KXR94-2050は200 Hz以上でゲインおよび位相の差が大きくなる現象を確認した。この結果、今回使用したチップ型3軸加速度センサでは高周波の

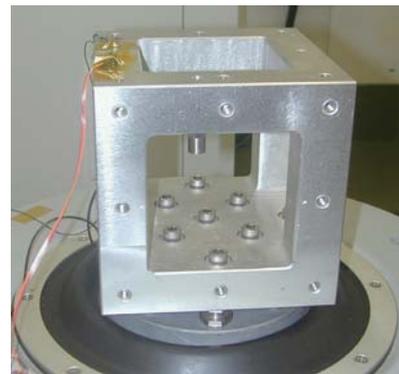


図3 試験装置の写真

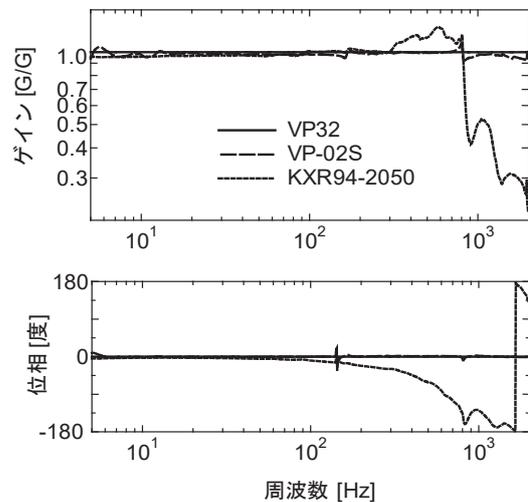


図4 測定結果

振動現象を対象とする測定には使用することは難しいが、比較的周波数が低い振動モードの計測には使用できることを確認した。

#### 4. 無線監視モジュール

開発した振動監視装置では、特定のセンサを取り付けた複数の無線監視モジュールを機械装置に取り付けて使用することを想定している。現在、データの収集に使用できる無線通信として、Bluetooth、XBee、LoRaなど様々の規格があるが、今回は高速データ通信が可能で汎用性が高く、無線LANとしてインターネットとの親和性が最も高いWiFiを用いることとした。

WiFiを用いて電流データや振動データを収集するためには、WiFiモジュールの他に、振動センサのデータを読み込むAD変換器を備えデータ処理の演算を行うマイコンが必要となる。この場合、WiFiモジュール、マイコン、センサ処理の回路が必要となり装置が複雑で高価になることが考えられる。しかし、今回は安価に入手可能で、マイコンとしての利用も可能なEspressif Systems社のWiFi無線モジュールESP8266<sup>[9] - [11]</sup>を用いることで、装置の小型軽量化と低価格化を目指した。使用したWiFi無線モジュールの写真を図5に示す。



図5 WiFi無線モジュール(ESP8266)

ESP8266は元々WiFi無線モジュールとして使用することを想定した製品であるが、設定によりマイコンボードとして広く使用されているArduinoマイコンの統合開発環境でプログラム開発が可能となり、Arduino統合開発環境を用いればC言語に近いArduino言語でプログラム開発が可能となる。ただし、Arduino言語では同期プログラムで遅れが発生する恐れがあるため、同期プログラムの一部をアセンブリ言

語により記述することで、高速化を図った。

なお、ESP8266はアメリカTensilica社のXtensaマイクロプロセッサと互換性があるため、Xtensaアセンブリ言語<sup>[12]</sup>をArduinoのインラインアセンブラ機能により記述し、試験を行った。1MHzの矩形波を入力信号とし、この矩形波の立ち上がりを検出し、デジタルIOに出力するプログラムをArduino言語とアセンブリ言語を併用したプログラムにより比較した。オシロスコープ(Tektronix製:TDS3014B)の機能により1秒間計測して算出した矩形波パルス信号に対する応答の遅れ時間の平均値と標準偏差を表1に示す。表1に示すように、アセンブリ言語を使用することで遅れ時間のばらつきを抑えることができることを確認した。

表1 矩形波に対する応答遅れ

	平均	標準偏差
Arduino言語	536 nsec	713 nsec
アセンブリ言語	410 nsec	96 nsec

研究開始当初は、ESP8266を用いて試作を行っていたが、研究中盤からは後継機種であるESP32が日本国内での使用可能となったので無線監視モジュールで使用するマイコンをESP32に変更した。ESP8266とESP32の性能比較表を表2に示す。

表2 ESP8266とESP32の比較<sup>[13]</sup>

	ESP8266	ESP32
MCU	Xtensa Single-Core 32bit LX106	Xtensa Dual-Core 32bit LX6 With 600 DMIPS
802.11 b/g/n WiFi	HT20	HT40
Typical Frequency	80 MHz	160 MHz
SRAM	×	○
Flash	×	○
GPIO	17	36
Hardware/Software PWM	None/ 8channels	None/ 16channels
SPI/I2C/I2S/UART	2/1/2/2	4/2/2/2
ADC	10-bit	12-bit

表2でも明らかなように、ESP32はESP8266と比較して高機能となっているため、今後の開発はESP32を用いて行うこととした。ESP32とMEMS型3軸加速度センサKXR94-2050を用いて試作した振動用無線監視モジュールの写真を図6に、ESP32とCT

(OMRON:KM20-CTF-50A)、オペアンプ回路を用いて試作した電流用無線監視モジュールの写真を図7に示す。

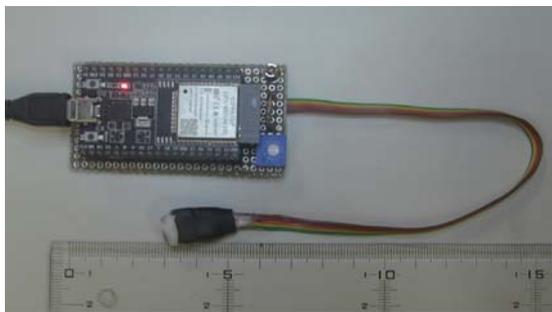


図6 振動用無線監視モジュール



図7 電流用無線監視モジュール

複数台の無線監視モジュールを使用するために、それぞれの無線監視モジュールには個別のIPアドレスを割り振り、解析モジュールから制御を行える構成とした。

## 5. 解析モジュール

解析モジュールは、無線監視モジュールから送られてくる電流データ、振動データを収集すると共に解析を行う機能を有する。また併せて、計測の基準となる時刻同期信号をGPSから取得し、無線監視モジュールへ送信する機能が求められる。解析モジュールは、安価で入手可能でGPSとのデータ通信を行うためのUARTインターフェースおよびWiFi通信モジュールを搭載しているRaspberry Pi 3B+を用いて試作を行った。基準となる時刻同期信号は1秒ごとに同期信号を出力する機能を搭載したGPSを用いて取得した。今回GPSモジュールとしてGYSFDMAXB(太陽誘電社製)<sup>[4]</sup>を使用した。試作した解析モジュールの写真を図8に示す。



図8 解析モジュール

## 6. 測定実験

開発した振動監視装置の性能を確認するための実験を実施した。測定実験に用いたネットワークの構成を図9に、監視を行った外付けハードディスクと卓上ボール盤の写真を図10に示す。機械振動を測定するために加速度センサを取り付けた無線監視モジュールと電流計測のためのCTを取り付けた無線監視モジュールで取得した振動データはWiFiルータ経由で解析モジュールに送られる。解析モジュールでは送られてきた振動データを日付と時間を合わせたファイル名を付けて保存すると共に、データベースに登録する。また、FFT解析などを行い、機械を監視するための特徴量を抽出する。

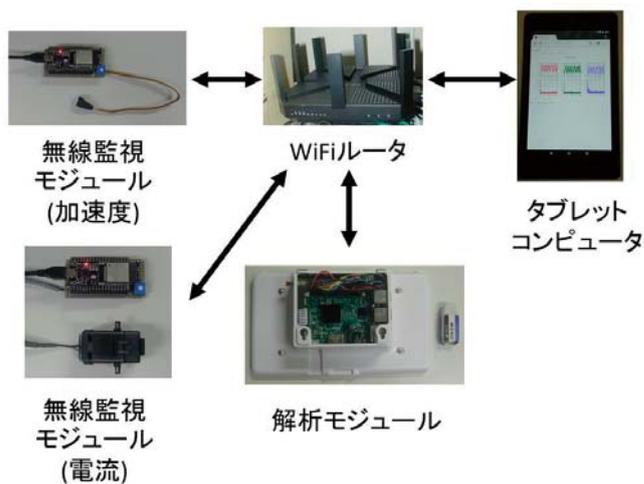


図9 振動監視装置ネットワーク構成

外付けハードディスクの機械振動測定例を図11に示す。図11はXYZの3軸方向の加速度を測定し、FFT解析した結果をWeb画面として表示した結果である。図11の上側3つのグラフは、それぞれXYZ軸方向の時間変化に対する加速度の変化を表している。

これらのグラフは、サンプリング周波数 30 kHz で 2048 点のデータを取得し表示した結果である。横軸は時間に相当するサンプル数、縦軸は加速度に相当する数値を表している。下のグラフは図 11 上側グラフを FFT 解析した結果である。ハニングウインドウ関数を使用した後、FFT 演算を行った結果で、横軸は周波数に相当する数値、縦軸は加速度に相当する数値を表している。

これらの FFT 解析結果を機械学習の特徴量として利用することを想定してプログラムを製作した。

また、1分ごとに測定した加速度データを二乗平均し振動の大きさに相当する数値を算出し、振動の大きさの変化量を算出したグラフを図 12 に示す。図 12 は



(a) 外付けハードディスク (b) 卓上ボール盤

図 10 振動計測実験対象

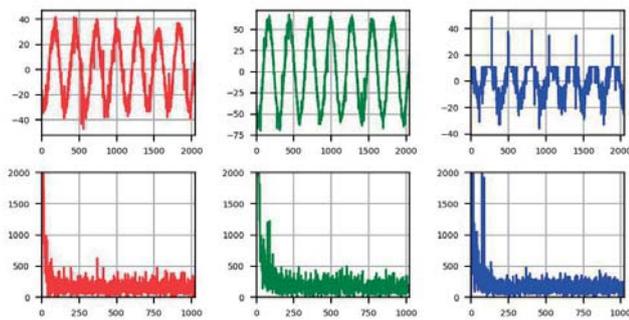


図 11 3軸方向加速度測定例

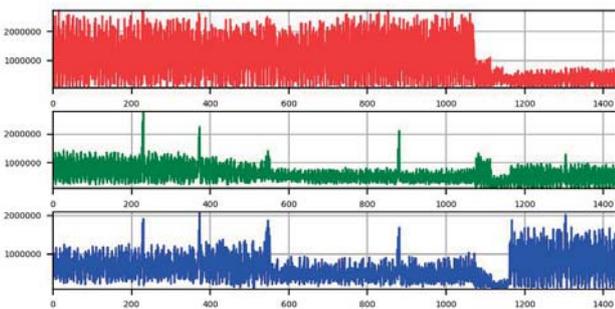


図 12 3軸方向加速度の時間変化

24 時間の振動変化を表しており、時間ごとの変化を確認することができる。

電流の測定結果を図 13 に示す。図 13 の上側グラフの縦軸は、電流に相当する数値、横軸は時間に相当するサンプル数である。図 13 の上側のグラフでは、測定結果はサンプリング周波数約 30 kHz で 2048 点のデータを取得し表示したものである。下の図は、上の図のデータにハニングウインドウ関数を使用した後に FFT 解析を行った結果である。今回開発した装置では、機械振動および電流振動の測定を 1分ごとに実施し、測定データを、無線監視モジュールの番号、センサ名、取得日時の情報と合わせて解析モジュールのデータベースに記録している。

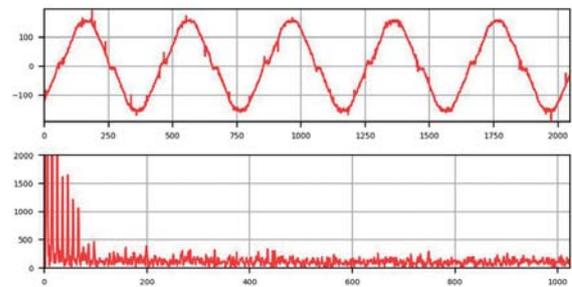


図 13 電流の測定例

今回、データベースとして MySQL を用いた。また、測定したデータは機械装置、センサ、取得日のディレクトリに分けて自動的に分類され、取得した日時のファイル名を付けた CSV ファイルとして解析モジュールに保存する。保存した CSV ファイルは Web ブラウザを介して端末から閲覧やダウンロード可能としている。CSV ファイルの閲覧画面の例を図 14 に示す。開



図 14 CSV ファイル閲覧画面の例

発した解析モジュールには、測定したデータを解析し、特定の条件から外れた場合には、電子メールや SNS (Social Networking Service) を用いてスマートフォンに通知する機能を搭載した。

今回使用した SNS ソフトは、日本国内で多くの人が使用している、Chatwork (株) の Chatwork と LINE (株) の LINE を用いた。

図 15 に LINE による通知の例を示す。この例は、加速度センサからの信号が事前に設定した特徴量から外れた場合の通知結果であり、現象を確認した時間とそのときに測定した振動波形のグラフおよび FFT 解析の結果をグラフとして LINE Notify<sup>[15]</sup> というサービスを用いて通知した結果である。

解析モジュールのプログラムは Python3.5.3 を用いて開発した。



図 15 LINE での通知画面の例

## 5. 結 言

無線監視モジュールと解析モジュールで構成される振動監視装置を開発した。WiFi 通信によりデータを送信できる複数の無線監視モジュールを用いることで、IoT 機能が搭載されていない機械装置に容易に取り付け可能となった。また、無線監視モジュールから送られてくる振動データを解析モジュールで処理することで、電子メールや SNS を用いた異常通知が可能となった。

## 参考文献

[1] 三笥, 陳山: 多変量解析による回転機械の状態判定基準値の決定法、SICE 産業論文集 Vol.5, No.12, pp83-89, 2006.

- [2] 大庭 他 4 名: 振動解析に基づく新幹線台車の状態監視、JSME 論文集 (C), 75 巻 757, pp93-101, 2009-9.
- [3] 近藤 他 3 名: 振動のオクターブバンド分析を用いた車両用ディーゼル機関の異常通知手法、RTRI REPORT Vol.29, No.9, pp17-22, 2015.
- [4] 植松 他 4 名: 動作音から機器の異常を検知する異常音検知技術、NTT 技術ジャーナル 2017.6, pp24-27, 2017.
- [5] 神生 他 3 名: パターン認識技術を用いた設備保全診断システムの開発、北海道立総合研究機構工業試験場報告 No.309, pp97-103, 2010.
- [6] 高橋: 製造業 IoT 向け振動による異常検知、OKI テクニカルレビュー, 第 230 号 Vol.84, No.2, pp30-33, 2017.
- [7] 田口: 機械装置知的遠隔監視装置の開発、長崎県工業技術センター研究報告 No45, pp10-14, 2016.
- [8] <http://kionixfs.kionix.com/en/datasheet/KXR94-2050 Specifications Rev 03.pdf>, Accessed 2016.
- [9] 国野: ESP スタータ・キット×ブレッドボードで作る IoT 実験ボード、トランジスタ技術 2016 年 9 月号, pp45-53, 2016.
- [10] <https://github.com/esp8266/Arduino/>, Accessed 2016.
- [11] <https://www.switch-science.com/catalog/2500/>, Accessed 2016.
- [12] Xtensa Instruction Set Architecture (ISA) Reference Manual/, Accessed 2016.
- [13] <https://makeradvisor.com/esp32-vs-esp8266/>, Accessed 2019.
- [14] <https://www.yuden.co.jp/jp/product/category/module/GYSFDMAXB.html>, Accessed 2016.
- [15] <https://notify-bot.line.me/ja/>, Accessed 2017.

# 可視化システムを用いたシミュレーション技術の高度化

(シミュレーションを用いた地場企業の製品開発工程支援)

機械システム科 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流体分野においても汎用計算力学ソフトウェアの利便性を高め、流れ現象に関連するシミュレーション技術の発展に大きく寄与している。これを受けて、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地場企業から受けている。地場企業が取扱う気流及び粒子の特性を計測可能とする可視化システムについて研究開発を行い、その計測結果を汎用計算力学ソフトウェアにパラメータ入力してシミュレーション技術の計算精度向上を図るとともに地場企業のシミュレーション技術を用いた製品開発工程に貢献することを本研究の目的としている。平成30年度においてはPIV (Particle Image Velocimetry：粒子画像流速測定法) を用いた可視化システムについて試作検討した。

## 1. 緒言

流れ現象の解明と制御は船舶、自動車などの輸送機械の性能や安全性、高層ビルの耐風性や風害など対策を講じる上で非常に重要となる。その流れ場における速度分布を計測する方法としてPIVはある<sup>1)</sup>。当該PIVを応用して流体振動が発生している状態における遠心圧縮機の内部流れ計測<sup>2)</sup>や騒音発生源を特定するための送風機の内部流れ計測などについての研究が報告されている<sup>3)</sup>。

図1にPIVを用いた可視化システムの概要を示す。流れ場に流れに追従する微細粒子などのトレーサを混入してレーザーなどの光源をシート状に照明する。照明されたトレーサ粒子から散乱光を得、CCD素子などの撮影装置を介して記録媒体に2時刻の瞬間的な粒子画像として記録する。その2時刻の画像上のトレーサ粒子像から求めた移動量と画像間の時間間隔から流れの速度を計算できる<sup>4)</sup>。本研究では地場企業とともに送風機における流れ場の可視化システムを開発検討した。

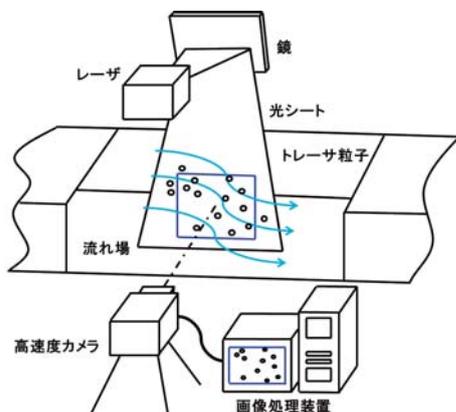


図1 PIVを用いた可視化システムの概要

## 2. 実験方法

図2に示すように、所定の回転数で回転している送風機の吹き出し口近傍においてPIV計測するための可視化システムを試作して実験した。送風機は羽根枚数8枚、出口外径φ104ミリメートルのインペラをケーシングに格納した構造としており、送風機とケーシングはレーザーの透過と可視化のためにアクリルを用いて製作している。実験時の送風機の回転数は440 rpmである。送風機のエアー吸入口からトレーサ粒子となる線香の煙を混入して、シートビームレーザー (型番：可視化照明用シートビームレーザー3Wタイプ、ウシオ電機(株)) を送風機の吹き出し口から照射した。当該シートビームレーザー上で散乱するトレーサ粒子像をハイスピードカメラ (型番：PL3、シナノケンシ(株)) を用いて撮影した。



図2 可視化システムを用いた実験

### 3. 結果と考察

図3に送風機の吹き出し口近傍を撮影した画像を示す。画像の画素数は640×480ピクセルである。本研究における計測範囲は16×16ピクセルの検査領域を横に30個、縦に11個並列して示している。当該画像の次時刻の画像に対して、各検査領域を中心とした上下左右方向に±10ピクセルを探索領域とした、差分法によるテンプレートマッチング<sup>[4],[5]</sup>を行った。図4はテンプレートマッチングした後の画像を示しており、各検査領域の移動後の位置及び移動ピクセル数を求め、移動後の各検査領域を表示している。図5は各検査領域の移動方向を矢印にて示しており、多数の検査領域は送風機の吹き出し口方向へ移動していることを確認することができる。

また、当該フレーム間における最大速度を求めた。テンプレートマッチングの結果から最大移動ピクセル数は12.8ピクセルであったこと、ハイスピードカメラの撮影速度は2000フレーム毎秒であること、当該画像においては1ピクセルあたり0.095ミリメートルに相当することを用いて計算した結果、最大速度は約2.4メートル毎秒であった。

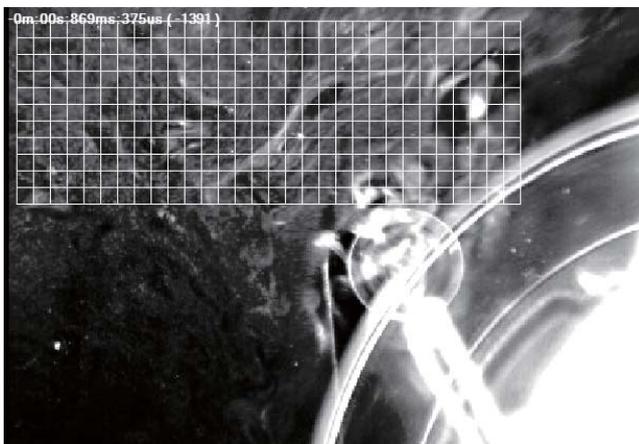


図3 可視化システムを用いて撮影した画像

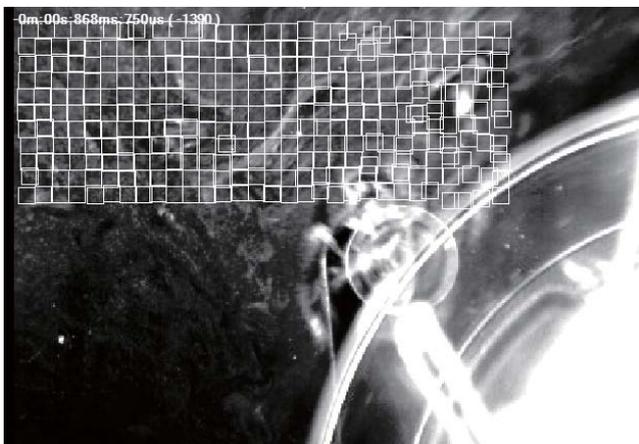


図4 テンプレートマッチング後の画像



図5 各検査領域の移動方向を示した画像

### 4. 結 言

本研究の成果について以下に要約する。

- 1) P I V (粒子画像流速測定法) を用いた可視化システムを試作開発して送風機の吹き出し口近傍の流れを可視化した。
- 2) 撮影した画像に対して差分法を用いたテンプレートマッチングの画像処理を行い、大まかな流れを捉えた。

### 参考文献

- [1] 一般社団法人 可視化情報学会：P I Vハンドブック (第2版)、2016.10.
- [2] 大内田：遠心圧縮機内部流れの PIV 計測、可視化情報学会誌 Vol.39, No.153, pp7-10, 2019.4.
- [3] 鎌谷：送風機の品質向上への取組み、工業加熱 Vol.56, No.3, pp7-10, 2019.5.
- [4] Adrian Kaehler, Gary Bradski：詳解 OpenCV3 コンピュータビジョンライブラリを使った画像処理・認識、株式会社オライリー・ジャパン、2018.5.
- [5] 北山：OpenCV3 基本プログラミング、株式会社カットシステム、2016.5.

# 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

電子情報科 科 長 下 村 義 昭  
電子情報科 主任研究員 田 中 博 樹  
食品・環境科 主任研究員 三 木 伸 一

光学的手法による非破壊測定装置は農産物の品質管理やヘルスケアにおいて高いニーズと大きな市場規模を持った成長産業として期待されている。また、長崎県が保有する光学的非破壊計測に関するコア技術は携帯型の非破壊糖度計を実現するなど装置の低コスト・小型化で競合製品を差別化できる強力な武器となっている。一方、コア技術を活用した非破壊測定装置の開発では、測定光源の波長や測定精度に関する装置仕様を理論と実験の両面で検討する必要があるが、穀物や生体では理論計算に必要な吸収係数等の光学特性の測定が難しく正確な情報が不足している。そこで、本研究では光散乱体の光学特性を正確に測定する手法を確立して穀物や生体等の光学特性のデータベースを構築することを目的としている。本報告では、開発した光学特性の測定装置と性能、及び各種被検体の光学特性に関する測定結果について述べる。

## 1. 緒 言

光学的手法による非破壊計測装置は農産物の品質管理や生体組成計測によるヘルスケアにおいて高いニーズと大きな市場規模を持った成長産業として期待されている。また、長崎県独自の光学的計測技術は携帯型の非破壊糖度計を実現するなど装置の低コスト・小型化で競合製品を差別化できる強力な武器となっている。非破壊糖度計を実現した計測手法TFDRS (Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy)<sup>1)</sup>の概略を図1に示す。TFDRSでは、農作物や生体などの散乱体の表面から光ファイバで光を照射し、反射光の一部を2本の受光ファイバで受光する。受光した2つの反射光量  $i_{ref}$ 、 $i_{sig}$  から反射率  $R = i_{sig}/i_{ref}$  を算出し、下記式で表される相対吸光度比  $\gamma$  を求める。

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

ここで、 $R(\lambda_1)$ 、 $R(\lambda_2)$ 、 $R(\lambda_3)$  は波長  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  での反射率をそれぞれ表す。散乱体に入射した光は散乱と吸収を繰り返し、物質内部を減衰しながら伝播する。非破壊計測において知り得たい情報量は、多くの場合、内部に含まれる物質の成分量であるが、光による計測の難しさは、物質に光を照射し、ある地点で観測された光が、散乱により減衰したのか、吸収により減衰したのか、わからないところにある。一方、TFDRS法は、(1)式で表される相対吸光度比  $\gamma$  が散乱の影響を受けない物理量で、物質内に含まれる成分量と良い直線相

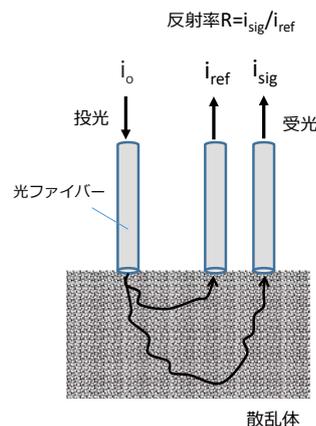


図1 TFDRSの概略

関を示すため、非破壊計測において高いパフォーマンスを期待できる。

TFDRSの基本原理を基とした装置開発において、単にサンプルに投光した光を2か所の検出位置で受光すれば測定できるかという、そう容易なものでもない。なぜなら、測定対象によって適した検出位置や選択波長が異なり、実用的には、測定対象の性状や使用環境などに応じた光学部品の選定、光学系の設計、解析手法の確立が不可欠だからである。この際、実験的にすべての条件を求めるのは、時間と手間がかかり、現実的ではない。そこで、理論的及び実験的なアプローチの両面から装置仕様の決定を行っている。例えば、先述の携帯型の非破壊糖度計開発では、モデル計算による測定精度の予測と波長可変レーザーによる実験的な検証を行っている。理論計算の例として、図2に果

実糖度計測を想定した SN 比  $\eta$  の算出結果を示す。SN 比  $\eta$  は糖度の測定精度（測定誤差の標準偏差）を  $\Delta C$  として  $\eta = (1/\Delta C)^2$  で定義される。(1) 式の波長  $\lambda_1$ 、 $\lambda_3$  をそれぞれ 900 nm、1060 nm として波長  $\lambda_2$  のみを変化させているが、SN 比  $\eta$  の実測値（実線）と理論値（点線）は良く一致している。

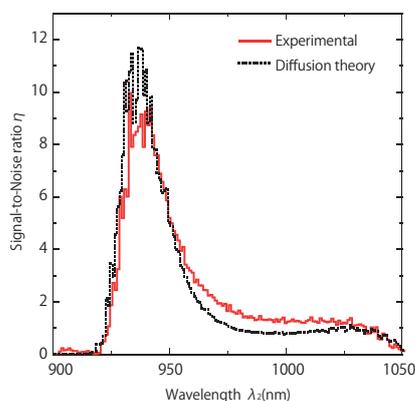


図2 果実糖度計測における SN 比  $\eta$  の理論計算

しかしながら、様々な測定対象に同じ開発プロセスをあてはめようとすると、光学特性の情報不足に起因するモデルの不完全さが問題となる。光学特性とは、ある被検体の単位長さを通ずる光の散乱及び吸収の割合のことで、吸収係数、散乱係数と呼ばれる長さの逆数を単位とした物理量で定義される。光学特性の値がわかれば、より正確な理論モデルを構築でき、非破壊計測装置の開発の幅を広げ、開発是非の判断、開発スピードの向上につながる。透明な糖水溶液の散乱体でモデル化できる果実では、一般的な分光光度計などを用いて、その光学特性値を容易に測定することができるが、穀物や生体では、含まれるタンパク質や炭水化物が不溶性（不透明）のため、光学特性値の測定が困難である。

不溶性物質を含む光学特性値の測定については、これまでに、逆モンテカルロ法<sup>2)</sup>、飛行時間計測法<sup>3)</sup>など様々な研究がおこなわれている。しかしながら、これらで得られた光学特性値は特定のサンプルの代表的な値にすぎず、測定条件、解析条件も様々である。非破壊計測装置開発のためには、結局のところ、光学特性値の計測装置を製作し、目的とする分析対象や分析条件などに応じた実用的なデータの取得が必要となる。そこで、本研究では、不溶性物質の光学特性を正確に測定する手法を確立し、穀物や生体等の光学特性のデータベースを構築することを目的とした。

## 2. 研究内容と結果

### 2.1 単一光子計測装置の試作

本開発では、飛行時間計測法を基とした測定系を構築した。図1で時間幅が数 ps のパルス光を入射光  $i_0$  とした場合、反射光  $i_{ref}$  (又は  $i_{sig}$ ) のパルス幅は入射光に比べて数 100 倍と大きくなる。この反射光の時間分解計測で得られた波形は検出距離や散乱係数等、被検体固有の光学特性の関数として解析的に算出することができる。これにより、散乱係数等の光学特性を測定した反射光の時間波形と理論値が一致する値として非線形最小二乗法で決定することができる。このとき、非常に短い時間で伝播する反射光の時間波形を得るために、時間相関単一光子計数（以下 TCSPC: Time Correlated Single Photon Counting）の手法を用いている。TCSPC 法は、サンプルに入射した単一光子の伝播する時間を繰り返し計測し、ヒストグラムを作成することで、時間波形を得ることができる。

図3に本研究で開発したシステムの概略を示す。照射光源に繰り返し数 80 MHz、パルス幅 3 ps 以下の波長可変 Ti:sapphire レーザー (Tsunami, Spectra- Physics 社製) を用いた。被検体からの反射光を光ファイバ (NA=0.22, コア径 0.1 mm) で受光し、光検出器 PD1 (PHD-400, Becker & Hickl 社製) と PD2 (SPD-100-CTE, Micro Photon Devices 社製) で入射光の一部と光ファイバで受光した反射光をそれぞれ検出する。このとき、ND フィルターを用いて、PD2 の検出器に検出される光子数が  $2 \times 10^6$  個/秒以下となるようにレーザー出力を調整した。

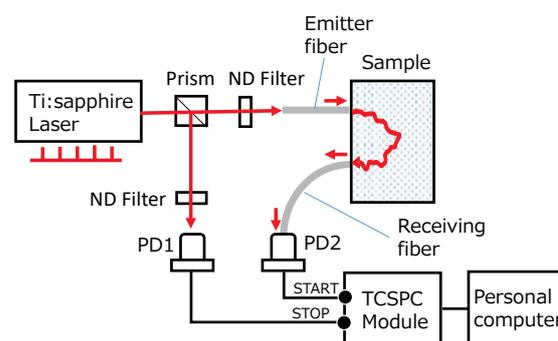


図3 TCSPC 法をベースに構築した時間分解分光システムの概略図

この条件により、レーザーの繰り返しは 80 MHz ( $8 \times 10^7$  Hz) であるので、1パルスのレーザー照射に対して検出できる光子数は 1 よりも十分に小さく（複数の光子が検出される可能性が確率的に低く）、単一

光子を計測できる。各光検出器からの信号を TCSPC 回路 (SPC-130EM, Becker & Hickl 社製) に入力してレーザー光の照射から単一光子検出までの時間を繰り返し測定することにより、反射光の時間波形が得られる。

## 2.2 単一光子計測

単一光子計測では、高感度な検出器を用いるため、光学系からのわずかな反射光や外乱光がノイズとなる。そのため、光の導光部に反射光や外乱光が進入しにくい光学系の設計と光学部品の選定を行った。使用する光ファイバは黒色のポリエステルエラストマーで被覆した。また、光ファイバの先端スリーブ及び光ファイバ固定用の治具は黒色の樹脂材 POM (ポリアセタール) で製作した (図4)。

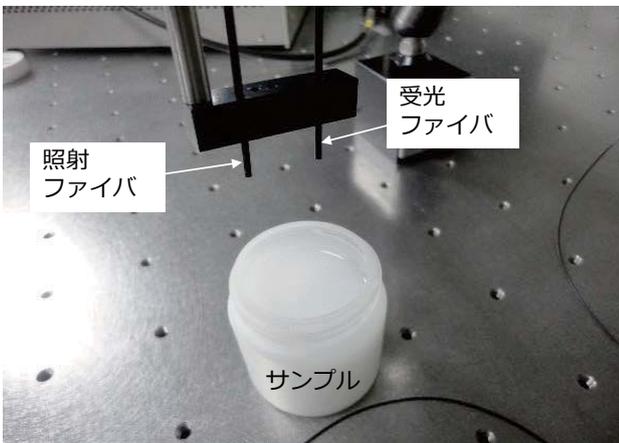


図4 レーザー照射プローブ

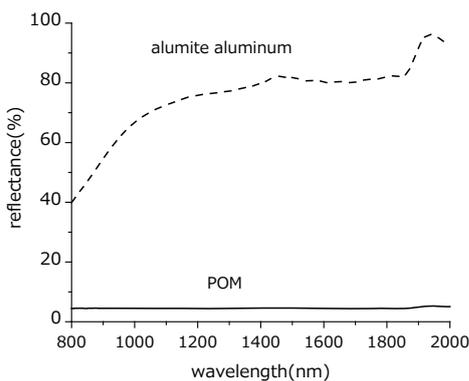


図5 アルマイト処理したアルミニウム及びPOM素材の反射率

POM は赤外域においても反射率が小さく (図5)、また、機械的強度に優れ、加工しやすいことから、本装置におけるプローブの素材に適している。試作した装置の外乱光の影響を調べるためバックグラウンドの

光子数とレーザー照射により検出される光子数を比較した。同一時間の計測において、レーザー照射による光子のカウント数は数百万個であったのに対し、バックグラウンドの光子のカウント数はわずか1000個程度であり、外乱光の影響は非常に小さいことが確認できた。

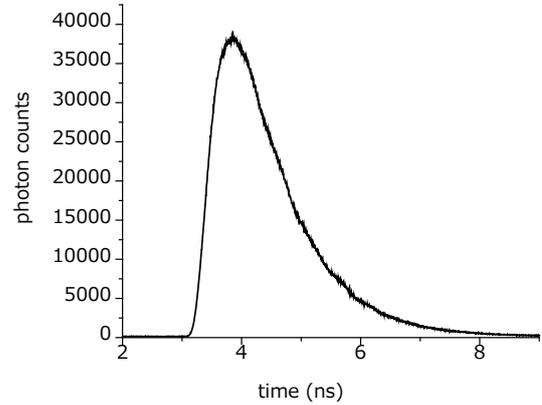


図6 濃度 0.4 wt%、直径 600 nm のポリスチレン微粒子溶液で測定した反射光の時間

次に、光学特性が既知の濃度 0.4 wt%、直径 600 nm のポリスチレン微粒子溶液を用いて測定精度の検証を行った。入射光ファイバと受光ファイバ間の距離は 20 mm とし、Ti:sapphire レーザーの波長は 801.3 nm とした。得られた時間波形を図6に示す。時間波形の理論式<sup>4)</sup>を得られた波形にフィッティングすることにより散乱係数、吸収係数を得ることができるが、図6の時間波形には、装置固有の応答特性 (装置関数) が畳み込まれ、真の波形よりパルス幅が広がっている。

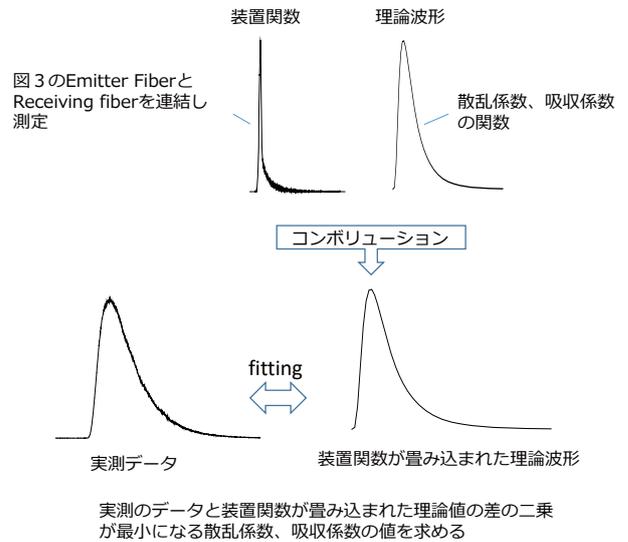


図7 コンボリューションによるフィッティングの概念

理論的には、測定した時間波形と装置関数をデコンボリューションすることにより機器の応答特性を除去した真の波形を得ることができる。

しかしながら、デコンボリューションで得られた真の波形の結果が測定データのノイズの影響を受け、フィッティングで得られる散乱係数等の誤差が大きかった。そこで、理論波形と装置関数をコンボリューションした波形（装置関数が畳み込まれた理論波形）を実測の時間波形に最小二乗法によりフィッティングして吸収係数、散乱係数を求めた（図7）。これにより、ポリスチレン溶液の散乱係数を理論値に対して精度よく測定できることが確認できた。

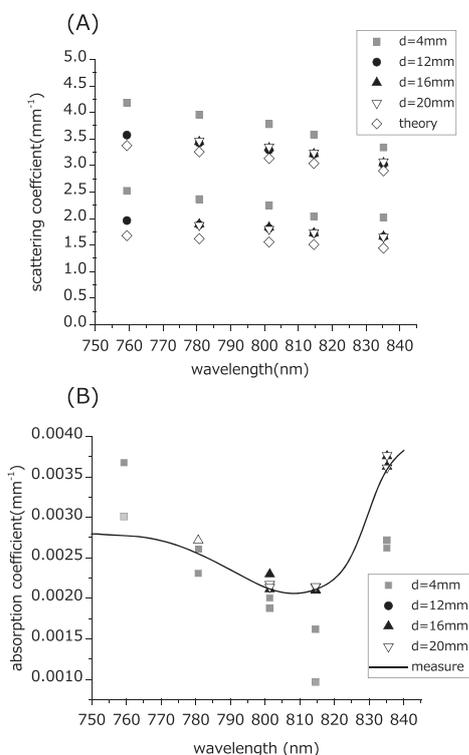


図8 ポリスチレン微粒子溶液のサンプル濃度、検出距離、波長の違いによる光学特性の算出結果 (A) 散乱係数 (B) 吸収係数

図8にポリスチレン溶液の濃度（0.5 wt%、1.0 wt%）、受光距離（4 mm、12 mm、16 mm、20 mm）、波長（759.3 nm、780.7 nm、801.3 nm、814.6 nm、835.2 nm）を変化させ、散乱係数（図8 (A)）、吸収係数（図8 (B)）を求めた結果を示す。散乱係数のグラフにはミー理論から計算した理論値、吸収係数のグラフには分光光度計による水の吸収係数の測定値もあわせて表示する。このとき、受光距離が4 mmにおいては、他の計測値よりも誤差が大きい。これは、点光源とみなす理論式と光源が有

限の幅を持つ実測とのギャップによるもので、受光距離が短いほど、相対的に誤差が大きくなる。一方、受光距離に留意すれば、濃度1.0 wt%のポリスチレン溶液について7%以内の精度で光学特性の測定ができており、良好な結果が得られている。

これらの結果を踏まえ、生体及び農作物の光学特性値の測定を行った。緒言でも述べたが、農産物の品質管理や生体計測によるヘルスケアにおいて非破壊計測装置のニーズは高い。表1に生体の光学特性の測定結果を、表2に農作物関連の光学特性値の測定結果を示す。測定波長はすべて801.3 nmとした。

表1 生体の光学特性  
(上下段の数値データは被験者が異なる)

生体部位	散乱係数 (mm <sup>-1</sup> )	吸収係数 (mm <sup>-1</sup> )
指 (人差し指)	0.85	0.019
	0.89	0.018
手 (母指球)	0.56	0.030
	0.84	0.021
手 (手のひら)	1.05	0.030
	1.02	0.027
前腕	0.86	0.028
	0.82	0.021

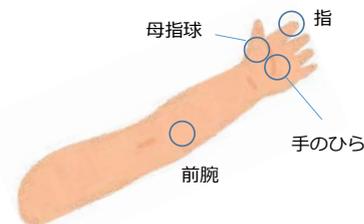


表1の生体に関して、今回の計測結果では、被検者間の差よりも測定部位による差が比較的大きかった。被験者1及び被験者2は共に成人男性であり、同じ部位では組成や構造が似通っていると考えられる。また、吸収係数はヘモグロビンなど生体に含まれる色素の量と関連があるが、表1では、指先の吸収係数の値が他の部位よりも小さい。これは、800 nm付近の波長において吸収をもたない骨などの影響と考えられる。

また、農作物においては、リンゴのような1つの固体から米などの粒の集合体など、大きさや形状、あるいは色の違い、構造の違いなど、性状が多様であり、散乱係数、吸収係数の値はサンプルによって大きく異なっている。また同一のサンプルにおいても、光学特性の値が大きく変化するものもある。例えば、表2の木片の光学特性値については、繊維方向にプローブを

表2 農作物関連の光学特性

農作物の種類	散乱係数 ( $\text{mm}^{-1}$ )	吸収係数 ( $\text{mm}^{-1}$ )
リンゴ	1.32	0.0021
ぶどう	0.65	0.020
木片 [繊維方向] (トチノキ)	4.41	0.012
粳 (粒)	1.33	0.0071
精米 (粒)	1.20	0.0023
小麦デンプン (粉)	45.4	0.0012
グルテン (粉)	39.7	0.031

配置して測定しているが、繊維と垂直方向にプローブを配置した場合、内部に伝播した光が大きく減衰し、光学特性値が測定できなかった。これは、木の節における光の反射によるものと考えられる。また、粳においては、表2に測定結果の一例を示したが、粒間の空隙が大きいと、サンプル容器内の粳のパッキング状態などによって、散乱係数でおよそ  $0.2 \text{ mm}^{-1} \sim 2.3 \text{ mm}^{-1}$ 、吸収係数で  $0.001 \text{ mm}^{-1} \sim 0.0097 \text{ mm}^{-1}$  の範囲で光学特性値が変化した (30 回繰り返し測定)。こうした情報は、計測に適したプローブ構造や、サンプルの測定位置、光ファイバの配置など、非破壊計測装置の構成を決める手助けとなる。今回、開発した装置を用いて様々な物質の散乱係数と吸収係数を取得できた。今後も、非破壊計測装置の開発促進のため、被検体の種類や測定波長の範囲を拡大して光学特性を蓄積したいと考えている。

### 3. 結 言

本開発では、不溶性物質の光学特性を測定するために、TCSPC 法をベースにパルス幅 3 ps 以下のチタンサファイアレーザーを測定用光源とした時間分解分光システムを構築した。導光部の改良によるノイズの低減、及び検出器など装置固有の光学応答に起因したパルス幅の広がりや補正する信号処理方法を確立し、ポリスチレン微粒子の光学特性を精度良く測定できることを確認した。また、生体や農作物などの実際のサンプルの散乱係数や吸収係数を算出できた。今後、被検体の種類や測定波長の範囲を拡大して光学特性を蓄積することで、非破壊計測装置の開発を促進したいと考えている。

### 参考文献

- [1] 下村義昭：レーザー研究, Vol. 39, No.4, pp.233-238, 2011.
- [2] 本多典広, 石井克典, 南篠卓也, 栗津邦男: JJSLSM, Vol.32, No.4, pp.421-427, 2012.
- [3] O.H.A. Nielsen, A.A. Subash, F.D. Nielsen, A.B. Dahl, J.L. Skytte, S. Anderson and D. Khoptyar, J: Near Infrared Spectrosc., Vol.21, pp.375-383, 2013.
- [4] M. S. Patterson, B. Chance, and B. C. Wilson: Appl. Opt., Vol.28, No.12, pp.2331-2336, 1989.

# 三次元デジタル製造に関する要素技術の確立と実部品への応用

電子情報科 専門研究員 小笠原 耕太郎  
工業材料科 科 長 瀧内 直祐  
工業材料科 主任研究員 福田 洋平

三次元デジタル製造技術の業務への応用化に関する実証及び可能性試験を実施し、技術及びノウハウの集積、県内中小企業の業務での有効活用、そして、市場性の高い製品を自社開発する企業への展開を図ることを目的とする。本研究開発の初年度である平成30年度は、リバースエンジニアリング環境の構築と3Dプリンター技術の樹脂利用に関するデータベースの構築として樹脂の形状再現性の性能評価を行った。

## 1. 緒言

付加製造技術を中心とする三次元デジタル製造技術は、新たな産業の創出や既存産業へ革新をもたらす今後の核となる技術として期待されており、2020年での経済波及効果は20兆円を超えると予想されている。重厚長大産業に特化した企業が大部分を占める本県においては、特に、この状況から脱却し製品開発型中小企業への展開を図る技術として特に重要となる。これら技術の導入は、これまでの設計や生産のやり方の変更が生じ、また全く新しい分野となるため、技術課題やリスクがあり、工業技術センターに実証や可能性試験による先導的役割が求められる。そこで、3Dプリンター技術の樹脂利用に関するデータベースと、リバースエンジニアリング環境の構築及び計測データから3DCADモデル化技術を開発する。また、生産工程等の実部品用途への先導実験を実施する。

本研究開発の初年度である平成30年度は、リバースエンジニアリング環境の構築と、3Dプリンター技術の樹脂利用に関するデータベースの構築として、形状再現性の性能評価、最小物の造形に関する機器の基本性能評価を実施した。

## 2. 実験方法

### 2.1 3Dプリンター—非接触三次元デジタイザ

三次元デジタル製造技術は、3Dプリンター技術、三次元スキャニング技術と、三次元形状データを構築、修正するソフトウェア技術であるデジタルエンジニアリング技術からなる。

3Dプリンター技術は、コンピュータモデル(CADデータ)から迅速に精密な試作品を造形する三次元造形装置により構成される。当センターの導入機器は、インクジェットノズルから紫外線硬化造形材料を紫外

線照射により固めながら積層するインクジェット方式である。3Dプリンター装置(Stratasys社製Connex350)の仕様を表1に

示す。本装置を利用した試作品製作の流れは、図1のとおりである。まず、三次元CADソフトウェアを用いてCADデータ(コンピュータモデル)を作成する。作成したCADデータから造形機用の形状データであるSTL(Stereolithography)ファイルを作成する。



図1 試作品製作のフロー図

表1 3Dプリンター装置仕様

機能	内容
方式	インクジェット紫外線硬化
造形精度	±0.1mm
造形解像度	600dpi(X,Y軸)、160dpi(Z軸)
積層厚	16µm、30µm
造形サイズ	342mm×342mm×200mm
モデル材	アクリル樹脂(硬質、透明、ゴム系、ABS系、PP系)の13種類
マルチ/デジタルマテリアル	物性の異なる2種類の樹脂を同時使用/ミックス使用が可能
サポート材	水圧除去
入力データ形式	STLデータ

三次元スキャニング技術は、既存製品等の立体物を高密度の点列データとしてコンピュータに取り込む三次元測定装置により構成される。当センターの導入機器は、CCDカメラを用い非接触で三次元形状の取り込みを行う方式の非接触三次元デジタイザである。こ

の非接触三次元デジタイザは、デザイン模型等の試作模型からCADデータを作成する業務や、CADデータにより作成された製造品と元のCADデータとの形状比較のための形状評価業務において利用される。この非接触三次元デジタイザ（GOM社製 ATOS I）の仕様を表2に示す。

表2 ATOS I Standard仕様

機能	内容
測定方式	非接触 CCD カメラ方式 距離算出方式・CCD カメラ 2 個による三角測量方式
一測定あたりの測定点数	800,832(1,032×776)点
測定範囲	500mm×400mm×400mm
測定精度(Z)	±0.05mm
任意方向からの測定データのマージ	ターゲットによる 自動マージ
出力測定データ形式	STL, ASC II

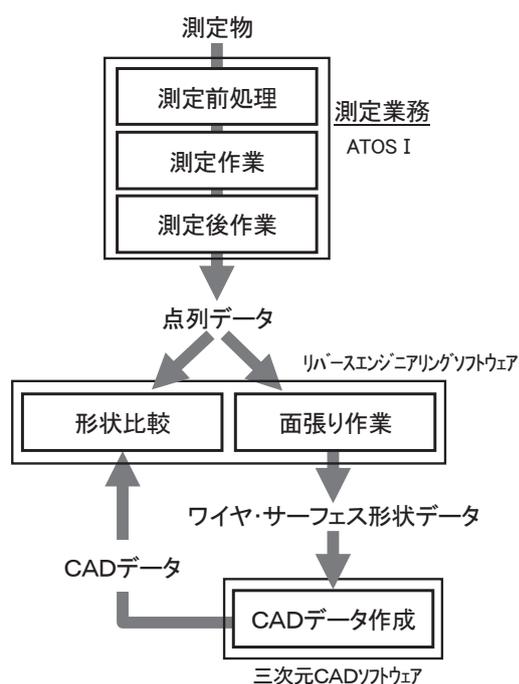


図2 測定業務のフロー図

本装置を利用した測定業務の流れは、図2のとおりである。まず、測定物に必要な応じ白色の塗料を塗布後、測定データのマージのためのリファレンスポイントと呼ばれるシールを貼り付け、測定物の準備を行う（測定前処理）。次に、測定前処理を施した測定物を本

機器により測定し、測定物の形状を複数ショットの点群データとして得る（測定作業）。得られた点群データは、他のCAD関連ソフトウェアで利用可能なデータ形式ではないため、本機器の制御ソフトウェアを用いて、複数点群データのマージやポリゴン化、そして、点群データの出力データ形式（以下、点列データという）への変換処理を行う（測定後処理）。この時点で、CAD等で処理可能な点列データが得られるので、CADデータと製造品間の形状評価を行う場合は、点列データ処理ソフトウェアを用いたCADデータとの形状比較が行われる。また、測定物からCADデータを作成する場合は、点列データ処理ソフトウェアを用いて、得られた点列データ上に形状定義カーブやサーフェスを作成（面張り作業）する。これら作成したカーブやサーフェス等の形状データを三次元CADソフトウェアに渡し、実際の製品形状のCADデータの設計が行われることとなる。

## 2.2 実験方法

2.1で述べた3Dプリンターを利用する際に問題となる機器の基本性能評価を実施した。

### 2.2.1 機器の基本性能評価：最小物の造形能力、耐水能力

本造形装置の造形方式は紫外線硬化タイプのアクリル樹脂をインクジェットノズルから射出し積層造形するインクジェット方式であり、細かい多数のノズル穴から樹脂を射出することから、他の造形装置と比べ最小物の造形に問題があると考えられる。また、造形物は実験模型で使用されることが多く、その際、耐水能力が求められる。そこで、樹脂の耐水性の試験も行った。

本装置では、物性の異なる様々な樹脂造形を行うことができるため、それぞれの樹脂での性能の差を把握することも必要となる。比較評価する樹脂としては、アクリル樹脂の一般的な硬質材として使用されるVero White Plusと、靱性の高いポリプロピレン樹脂をエミュレートされた樹脂であるRGD450樹脂の2種に関し評価した。造形仕上げ方式として、サポート材で造形物全体を覆うMatte仕上げとサポート材を必要な箇所のみ付与するGlossy仕上げの2種類の方式があるが、試験に応じ使い分ける。

#### ○ 最小板厚

図3の図面に示す0.1mm厚から1.5mm厚までの立

壁を造形し、最小の板厚としてどこまで造形できるかの実験を行った。

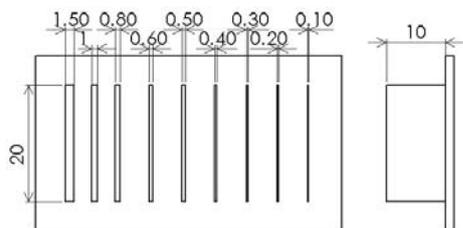


図3 最小板厚造形

### ○ 最小穴径

図4に示す直径0.1 mmから5 mmまでの穴を造形し、造形された穴の円形度と真の値との誤差を計測し、最小穴の造形能力を検討した。

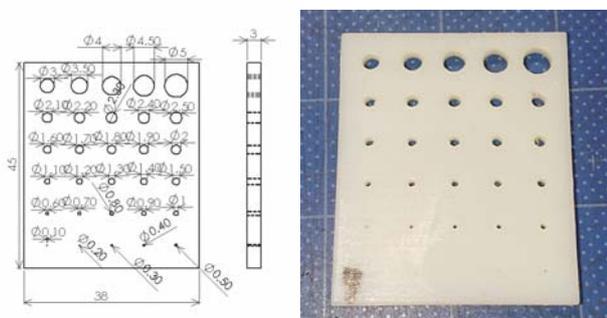


図4 穴造形図面 (左) とテストピース (右)

### ○ 耐水性

図5の図面に示すテストピース (体積 600 mm<sup>3</sup>) を造形し、真水に0分から3日まで浸水した前と後の重さを計る実験を行った。

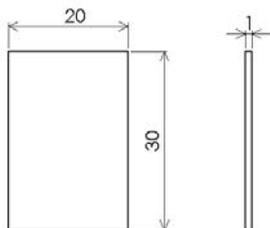


図5 耐水試験テストピース図面

## 3. 結果と考察

2. 2で述べたそれぞれの実験方法に関し、その実験結果と考察を以下に述べる。

### ○ 最小板厚

造形方式は Glossy 方

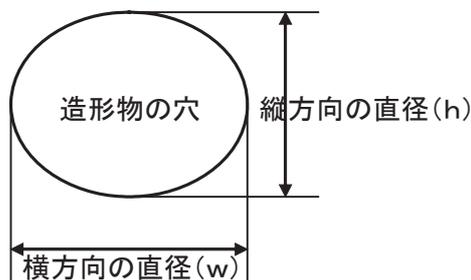


図6 最小板厚造物

式のみで試験した。図6にその造形結果を示す。波線円で囲む0.2 mm以下の板厚の壁が造形できていない。サポート除去が無ければ0.3 mm以上の立壁であれば造形できる。

### ○ 最小穴径

図7に示す造形された穴の円形度と真の値との誤差 (図中の誤差の式) を各造形物に対し計測した。横方向の w は、造形時の射出する際の移動方向に合わせている。造形方式は Matte と Glossy 両方式で行っている。その結果をグラフ化したものが図8と図9である。



$$\text{誤差} = \text{平均直径} : (w+h) / 2 - \text{真の直径}$$

図7 円形度と真の値との誤差

円形度は、図8のグラフから明らかなように、材質による違いはなく、ほぼ1より小さい値となっており、これは造形する際ヘッドが横方向に動くため、そのためのずれによる影響と考えられる。

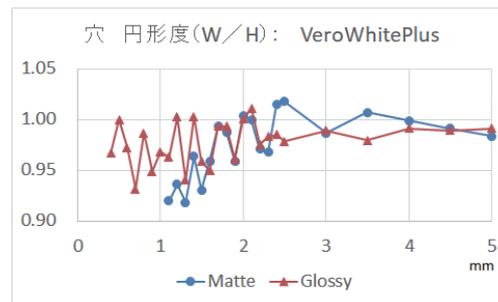
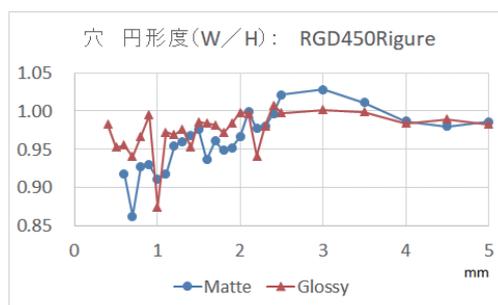


図8 穴 円形度グラフ

図9のグラフより、より正確な造形はRGD450 Rigureで行えているが、Vero White Plusの場合は、Matteの場合0.1 mm程度縮んで造形され、RGD450 Rigureの場合はMatte,Glossyとも0.05 mm程度膨らんで造形されることがわかる。

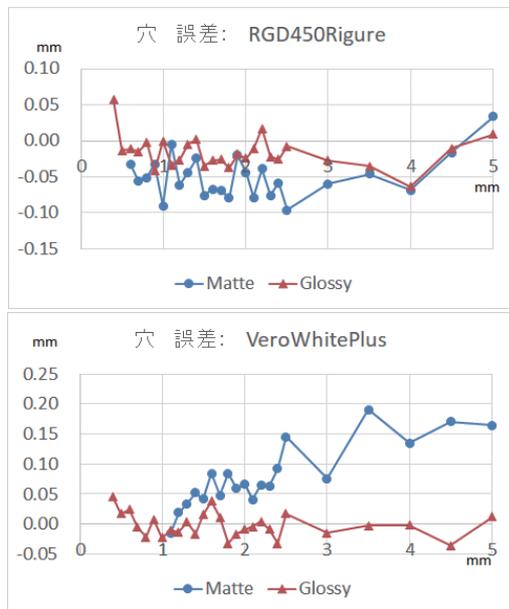


図9 穴 誤算グラフ

### ○ 耐水性

造形方式はGlossy方式のみで試験した。樹脂はVero White PlusとRGD450 Rigureの2種類で試験した。その結果を図10に示す。

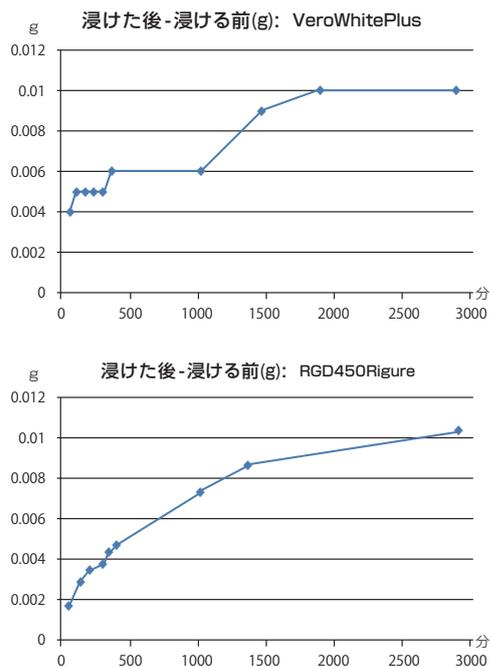


図10 浸水試験

Vero White Plus に関しては、長時間浸けても重さの変化は体積の0.002%で吸水性は無いが、RGD450 Rigureに関しては、浸ければ浸けるほど吸水し続けるとの結果が出た。そのため、Vero White Plus に関しては水に浸けた後の形状の硬さに変化は無いが、RGD450 Rigureは、つけた後はふやけた形状となる。RGD450 Rigureは水がからむ箇所には使用できない。

### 4. 結言

リバースエンジニアリング環境の構築と、3Dプリンター技術の樹脂利用に関するデータベースの構築として、形状再現性の性能評価、最小物の造形に関する機器の基本性能評価を実施した。今後は、得られた成果をもとに、リバースエンジニアリング環境の構築及び計測データから3DCADモデル化技術開発を進め、生産工程等の実部品用途への先導実験を実施する。

# 低コストで高機能な発光サイン用導光板の開発

(導光板用金型をレーザー加工で安価に作製することで低コスト・高機能な発光サインを実現する)

電子情報科 主任研究員 田中博樹

導光板は側面から入れた光を拡散させ、表面に光を出す板状の部材で、主に液晶ディスプレイ等のバックライトに用いられている。最近では、文字やロゴマークといった一定のパターンで発光するように加工した導光板を各種案内表示に利用する発光サインの用途が増えている。本研究では、発光サイン用導光板の金型を安価に作製する技術を確認し、さらに光源の照射方向により発光パターンを切り替えることができる導光板の実現を目指している。今年度は、昨年度に考案したドット形状を導光板に形成するための金型を検討してレーザー加工により試作した。また、いくつかの形成条件で試作した金型を用いて導光板を作製してその輝度を測定した。その結果、光源の照射方向により10倍以上の輝度比が得られる金型の作製条件を見出した。

## 1. 緒言

導光板は側面から入れた光を拡散させ、表面に光を出すアクリル板で、液晶ディスプレイのバックライト（以下、液晶バックライトという）や発光する看板のバックライト（以下、看板バックライトという）として主に用いられている。また、最近では、導光板表面を均一に発光させるのではなく、文字やロゴマークといった一定のパターンで発光するように加工し、導光板そのものを各種案内表示等に利用しているもの（以下、発光サインという）もある。

上記用途の中で、液晶バックライト用導光板で特に求められるのは、高輝度であることと均一な面発光であることである。また、大量生産が前提であるため、多数のV字溝を持った金型で射出成型を行い、表面に多数のプリズム構造を持つ導光板を製造するのが一般的である。

一方で、看板バックライト及び発光サイン用導光板の製造では、アクリル板にレーザーで多数の細かな傷を付ける方法が主に用いられている。また、看板バックライト用導光板の製造では、散乱体をインクジェット印刷する方法も用いられている。これは、看板バックライト及び発光サイン用導光板の生産量が液晶バックライト用導光板ほどは大量でないため、同様の方法で金型を作製してはコストが合わないためである。

しかしながら、一品物ではなくある程度の数量の看板バックライト又は発光サイン用導光板を製造する必要がある場合、上記のレーザー加工やインクジェット印刷では量産性が低いため、より量産性が高い製造方法の確立が求められている。

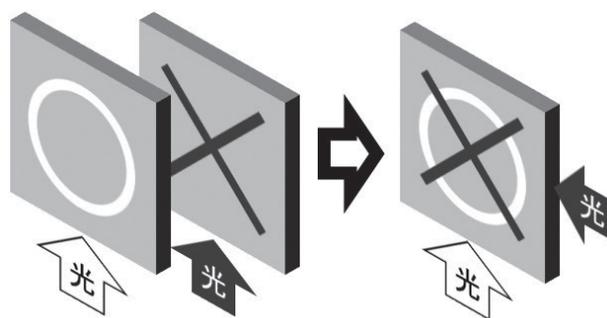


図1 光源照射方向によるパターン切り替えのイメージ

本研究では、発光サイン用導光板の金型をレーザー加工により安価に作製する技術を確認することを目的としている。これにより、従来手法と比較して発光サインの低コストでの量産が可能となる。

また、発光サインを各種案内表示に使用する場合に、複数枚の導光板を用い、点灯させる導光板を切り替えることで表示内容（発光パターン）を変えるといった使い方もある。そこで、本研究では、図1に示すような光源の照射方向により発光パターンを切り替えることができる導光板の実現も目指す。これが実現できれば、発光パターンの切り替えに必要な導光板の枚数を半減でき、材料減と製造時間の短縮によるさらなる低コスト化が可能となる。

## 2. 研究内容と結果

上記の目的を達成するために、本研究では4つの研究項目、①光学設計とシミュレーション解析による発光パターンの切り替えに最適な導光板の表面形状の検討、及び検証実験、②前記の導光板の表面形状を形成

できる金型の検討、及びレーザー加工による金型の作製条件の探索、③金型を用いて導光板に所望の表面形状を安定的に形成する加工条件の探索、④発光パターン切り替え型導光板の設計・試作、及び機能評価を実施する。今年度までに実施した内容を以下に記述する。

本研究で試作する導光板は一定のパターンで発光させる必要があるため、表面に微小なドットを所望のパターンで配置していくことを想定している。また、導光板の材質は透光性が高く安価なアクリルを用いることとした。

1枚の導光板で発光パターンの切り替えを実現するには、アクリル導光板の側面に入射させる光の方向によって導光板表面からの発光強度を大きく変化させるドット形状が必要となる。したがって、ドットの形状は単純な半球状ではなく、複雑な構造を持つことになる。この形状については、昨年度に光線追跡法<sup>[1],[2]</sup>に基づくシミュレーション解析により検討して最適な形状を考案した。

今年度は、考案したドット形状を導光板表面に形成できる金型を検討し、レーザー加工によって試作した。金型の素材にはステンレス (SUS304) の表面を40番バフによっての研磨仕上げしたものを用いた。加工用レーザーには、Ybファイバーレーザーマーカ (パナソニック製 LP-Z250) を用いた。また、試作した金型を用いて導光板を作製した。さらに、導光板の側面のある方向とそれと垂直な方向からLEDライトの光を入射させ、それぞれの入射方向での導光板表面の輝度を色彩輝度計 (トプコンテクノハウス製 BM-7A) で測定し、入射方向による輝度比を求めた。

金型のレーザー加工条件のうち図2に示したレーザー光を走査する本数と走査線間距離の設定値を変えて複数の金型を試作した。表1に金型のレーザー加工条件、及び各金型で作製した導光板で得られる最大の輝度比を示す。No.5、No.11、No.12及びNo.15の条件において、10倍程度の輝度比が得られた。今回の実験では、同一条件で作製したサンプル数が少ないので輝度比の安定性の評価には至っていないが、No.11とNo.12の条件では走査線間距離が10 $\mu\text{m}$ 変化しても10倍以上の輝度比が得られており、金型の寸法誤差に対して安定した輝度比をもつ導光板の作製が可能と考えられる。

### 3. 結 言

今年度は、昨年度に考案したドット形状を導光板表面に形成できる金型を検討し、レーザー加工によって

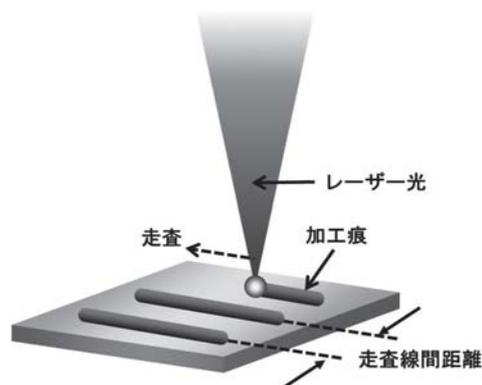


図2 レーザー光の走査イメージ

表1 レーザー走査条件を変えたときの最大輝度比

No.	走査本数	走査線間距離	最大輝度比
1	2	30 $\mu\text{m}$	6.72
2	2	40 $\mu\text{m}$	7.85
3	2	50 $\mu\text{m}$	4.68
4	3	30 $\mu\text{m}$	7.24
5	3	40 $\mu\text{m}$	9.77
6	3	50 $\mu\text{m}$	6.59
7	4	30 $\mu\text{m}$	5.74
8	4	40 $\mu\text{m}$	6.92
9	4	50 $\mu\text{m}$	4.82
10	5	60 $\mu\text{m}$	7.61
11	5	70 $\mu\text{m}$	10.08
12	5	80 $\mu\text{m}$	10.08
13	5	90 $\mu\text{m}$	8.52
14	6	60 $\mu\text{m}$	7.72
15	6	70 $\mu\text{m}$	9.82
16	6	80 $\mu\text{m}$	6.33

試作した。また、いくつかのレーザー加工条件を変えて作製した金型を用いて導光板を試作した。さらに、試作した導光板の輝度測定を行い、光源照射方向により10倍以上の輝度比が得られる金型の作製条件を見出した。

次年度は、より高く、さらに安定した導光板の輝度比が得られる金型の作製条件を検討する。また、具体的な発光サインのパターン設計等を行い、複数パターン切り替え型導光板を試作して機能を評価する。

### 参考文献

- [1] 草川徹：レンズ光学、東海大学出版会、1988.
- [2] 牛山善太, 草川徹：シミュレーション光学、東海大学出版会、2003.

# 難削性非鉄材料の高効率切削加工技術の開発

工業材料科 科 長 瀧 内 直 祐  
工業材料科 主任研究員 福 田 洋 平  
食品・環境科 主任研究員 三 木 伸 一

長崎県内の金属加工業では、環境問題等を考慮して、切削油剤を使用しない冷却方法に関する要求が高まっている。材料の高機能化、多様化等により、チタン合金 (Ti-6Al-4V) 等の難削材料に関する切削加工技術の確立が望まれている。しかし、チタン合金 (Ti-6Al-4V) の切削加工の問題点として、チタン合金 (Ti-6Al-4V) は熱伝導率が小さく、切削熱が発熱部の切れ刃と工具すくい面に集中し、局部的に切削温度を上昇させ、異常な工具摩耗が発生しやすい。そこで、環境問題等を考慮した冷却方法を検討することを目的として、平成 30 年度はチタン合金 (Ti-6Al-4V) における TiAlN コーテッド超硬エンドミル工具の界面活性剤水溶液ミストを用いたエンドミル切削加工実験を行った。切削油剤、油ミスト、発泡剤水溶液ミストを用いた時の工具の摩耗状況、加工面 (表面) 粗さについて、比較検討を行った。

## 1. 緒 言

長崎県内には、金属加工業の中小企業が多数存在しており、工作機械、切削工具等の進歩により、切削加工技術の高度化が進んでいる。しかし、金属系難削材料は、切削加工に長い時間を要し、工具寿命が短い等、非効率的な加工作業となっている。また、切削油剤の使用による作業環境の悪化、塩素系油剤の焼却時に発生するダイオキシンが問題になっているため、切削油剤の使用量を減らす要望が益々強くなっているのが現状である。そこで、本研究は、環境問題等を考慮して、切削油剤を使用しない冷却方法を検討し、切削工具の劣化防止及び適切な加工面粗さを得ることを目的とする。

筆者らは、難削材料の切削加工性の向上を目的として、ステンレス鋼における切削加工性について報告<sup>1)</sup>、<sup>2)</sup>を行った。

平成 30 年度はチタン合金 (Ti-6Al-4V) における TiAlN コーテッド超硬エンドミル工具の界面活性剤水溶液ミストを用いたエンドミル切削加工実験を行い、切削油剤、油ミスト、発泡剤水溶液ミストを用いた時の工具の摩耗状況、加工面 (表面) 粗さについて、比較検討を行った。

## 2. 実験方法

実験は基本的に前報<sup>2)</sup>と同様とした。実験装置は、汎用フライス盤 (牧野フライス製 KVJP55) を用いた。被削材は、チタン合金 (Ti-6Al-4V) を使用した。エ

ンドミル切削工具は、TiAlN コーテッド超硬エンドミル工具 ( $\phi 8$ , 4 枚刃) を使用した。エンドミル切削加工条件は以下のとおりである。

- ・切削速度 60 m/min、100 m/min
- ・送り速度 0.03 mm / 刃
- ・軸方向切り込み量 10 mm
- ・半径方向切り込み量 0.5 mm
- ・工具突き出し長 27 mm
- ・切削加工方法 (側面切削、ダウンカット)

界面活性剤水溶液ミスト、発泡剤水溶液ミスト、油ミスト、切削油剤を用いてエンドミル切削加工実験を行った。界面活性剤水溶液ミストにおける水溶液は、界面活性剤 5g/蒸留水 500 cm<sup>3</sup> (pH 9.0) である。発泡剤水溶液ミストにおける水溶液は、発泡剤 2g/蒸留水 500 cm<sup>3</sup> (pH 9.0) である。界面活性剤水溶液ミスト、発泡剤水溶液ミストの装置はスプレーガン (明治機械製作所製) を使用し、噴射量は 50 mL/min である。

切削油剤は、JX 日鉱日石エネルギー製ユニソルブル EM-H (20 倍希釈) を使用し、油ミストはブルーベ植物性切削油 LB-1 を使用した。

切削工具の摩耗 (最大の逃げ面摩耗幅、チップング幅等) については、工具顕微鏡 (30 倍) (ニコン製 MM-11B) を用いて、所定加工パスごとの工具刃先における最大の逃げ面摩耗幅等を測定した。さらに、加工面における表面粗さ (Rz) は、加工面の両端より 20 mm の所を、それぞれ A 部、B 部とし、その中心部の切削工具の進行方向を X 方向、切削工具の軸方向

を Y 方向として、超精密表面形状粗さ測定機（アメテック製 PGI1200）を用いて測定した。実験前のチタン合金 (Ti-6Al-4V) の表面粗さ (Rz) は、 $2\ \mu\text{m}$  であった。

なお、TiAlN コーテッド超硬エンドミル工具の刃先における逃げ面摩耗幅が  $100\ \mu\text{m}$  以上になるか、工具刃先が欠損した場合、エンドミル切削加工実験を終了した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 界面活性剤水溶液ミストを用いた時のチタン合金 (Ti-6Al-4V) における切削加工実験 (切削速度 $60\ \text{m/min}$ )

図 1 は、切削速度  $60\ \text{m/min}$  の切削加工実験における工具刃先の逃げ面摩耗幅と切削距離との関係を示す。

図中の▼印は水溶液 A (界面活性剤水溶液) ミスト、▲印は水溶液 B (発泡剤水溶液) ミスト、■印は油ミスト、●印は切削油剤の結果である。水溶液 A ミストの元となる水溶液は、蒸留水に界面活性剤、水溶液 B ミストの元となる水溶液は、発泡剤を添加した溶液である。

水溶液 B (発泡剤水溶液) ミスト、切削油剤は、著しく逃げ面摩耗幅が増大し、水溶液 A (界面活性剤水溶液) ミスト、油ミストは逃げ面摩耗幅が抑制された結果となった。

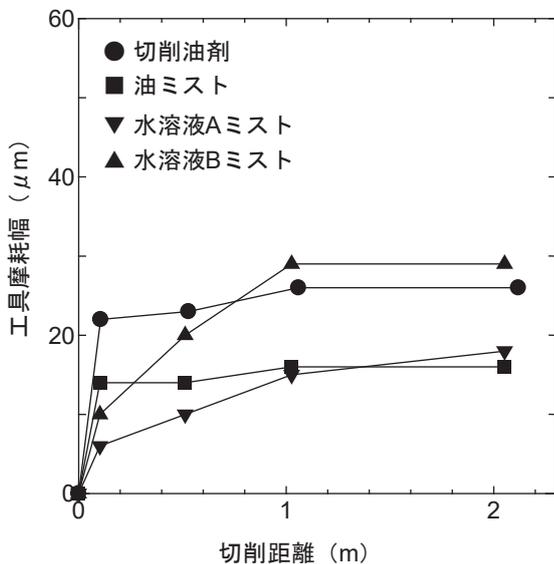


図 1 切削距離と摩耗幅との関係

図 2 は、切削速度  $60\ \text{m/min}$  の切削加工実験における表面粗さ (Rz) と切削距離との関係を示す。

図中の▼印は水溶液 A (界面活性剤水溶液) ミスト、▲印は水溶液 B (発泡剤水溶液) ミスト、■印は油ミスト、●印は切削油剤の結果である。図中の表面粗さ

(Rz) の値は、Y 方向 (工具の軸方向) の表面粗さ (Rz) の値を示す。なお、Y 方向 (工具の軸方向) の表面粗さ (Rz) は、工具軌跡の影響のため、X 方向 (工具の進行方向) の表面粗さ (Rz) に比べて、高い値を示した。

表面粗さ (Rz) は、油ミストを使用した場合、 $5\ \mu\text{m}$  以上であり、水溶液 A (界面活性剤水溶液) は水溶液 B (発泡剤水溶液) ミスト、切削油剤と同様に良好な表面粗さ (Rz) となった。

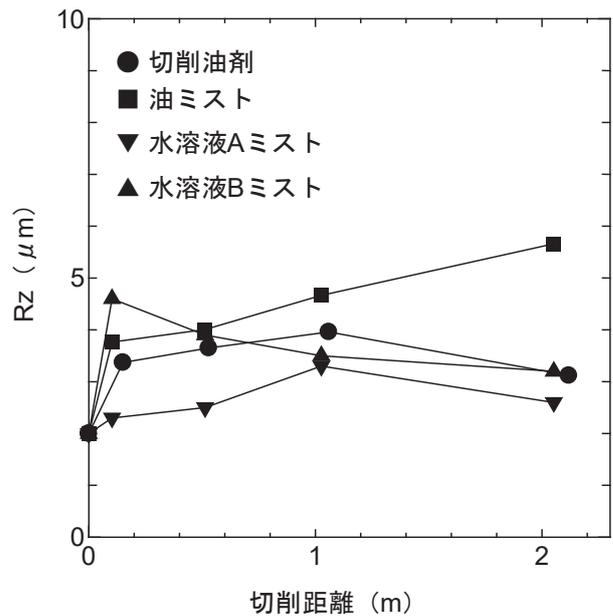


図 2 切削距離と表面粗さ (Rz) との関係

#### 3.2 界面活性剤水溶液ミストを用いた時のチタン合金 (Ti-6Al-4V) における切削加工実験 (切削速度 $100\ \text{m/min}$ )

図 3 は、切削速度  $100\ \text{m/min}$  の切削加工実験における工具刃先の逃げ面摩耗幅と切削距離との関係を示す。

図中の▼印は水溶液 A (界面活性剤水溶液) ミスト、△印は水溶液 B (発泡剤水溶液) ミスト、□印は油ミスト、○印は切削油剤の結果である。水溶液 A ミストの元となる水溶液は、蒸留水に界面活性剤、水溶液 B ミストの元となる水溶液は、発泡剤を添加した溶液である。

切削距離  $2\ \text{m}$  における逃げ面摩耗幅は、水溶液 A (界面活性剤水溶液) ミストを使用した場合に  $20\ \mu\text{m}$  であった。水溶液 A (界面活性剤水溶液) ミストは切削油剤、水溶液 B (発泡剤水溶液) ミストと同様に良好な結果となった。油ミストは切削距離が  $0.5\ \text{m}$  の場合、工具摩耗幅が  $100\ \mu\text{m}$  以上となり、切削加工実験を終了した。

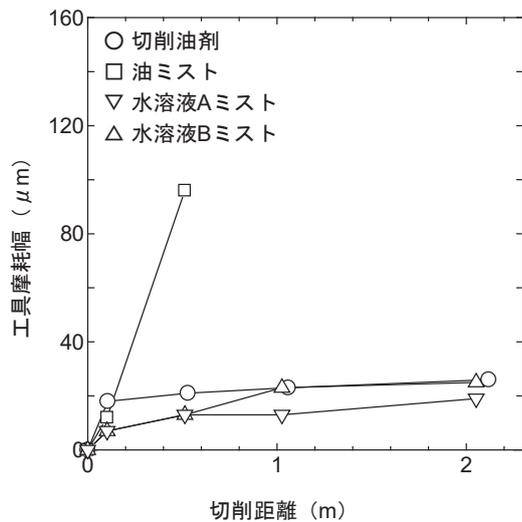


図3 切削距離と摩耗幅との関係

図4は、切削速度 100 m/min の切削加工実験における表面粗さ (Rz) と切削距離との関係を示す。図中の▽印は水溶液 A (界面活性剤水溶液) ミスト、△印は水溶液 B (発泡剤水溶液) ミスト、□印は油ミスト、○印は切削油剤の結果である。

なお、表面粗さ (Rz) は、前述の結果と同様に Y 方向 (工具の軸方向) の表面粗さ (Rz) の値を示す。表面粗さ (Rz) は、油ミストを使用した場合、8 μm 以上であり、水溶液 A (界面活性剤水溶液) ミスト、水溶液 B (発泡剤水溶液) ミスト、切削油剤を使用した場合は 3 μm であった。水溶液 A (界面活性剤水溶液) ミストは切削油剤、水溶液 B (発泡剤水溶液) ミストと同様に良好な表面粗さ (Rz) となった。

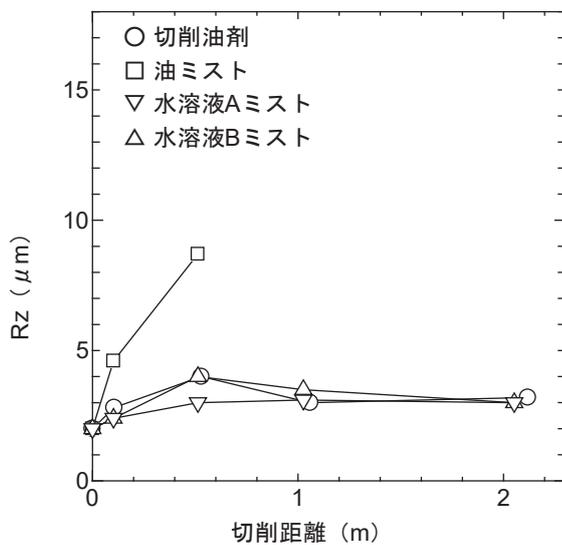


図4 切削距離と表面粗さ (Rz) との関係

### 3.3 切削速度 60 m/min、切削速度 100 m/min における界面活性剤水溶液ミストを用いた時のチタン合金 (Ti-6Al-4V) における切削加工実験

図5は、水溶液 A (界面活性剤水溶液) ミストを用いた時のエンドミル工具における工具刃先の逃げ面摩耗幅と切削距離との関係を示す。図中の▼印は切削速度 60 m/min の結果、▽印は切削速度 100 m/min の結果である。比較のために、水溶液 B (発泡剤水溶液) ミストの結果も示す。水溶液 B (発泡剤水溶液) ミストの結果において、▲印は切削速度 60 m/min の結果、△印は切削速度 100 m/min の結果である。

切削距離 2 m における水溶液 A (界面活性剤水溶液) ミストの逃げ面摩耗幅は、水溶液 B (発泡剤水溶液) ミストの逃げ面摩耗幅に比べて、工具摩耗幅が小さい結果となった。

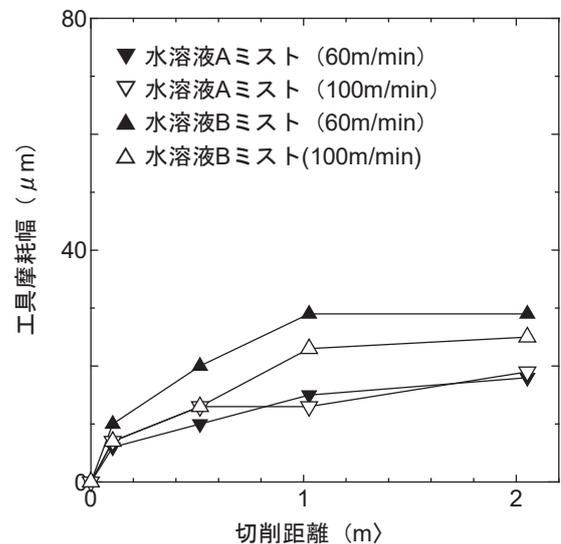


図5 切削距離と摩耗幅との関係

図6は、水溶液 A (界面活性剤水溶液) ミストを用いた時のエンドミル工具における表面粗さ (Rz) と切削距離との関係を示す。図中の▼印は切削速度 60 m/min の結果、▽印は切削速度 100 m/min の結果である。比較のために、水溶液 B (発泡剤水溶液) ミストの結果も示す。水溶液 B (発泡剤水溶液) ミストの結果において、▲印は切削速度 60 m/min の結果、△印は切削速度 100 m/min の結果である。

なお、表面粗さ (Rz) は、前述の結果と同様に Y 方向 (工具の軸方向) の表面粗さ (Rz) の値を示す。切削距離 2 m において、水溶液 A (界面活性剤水溶液) ミスト、水溶液 B (発泡剤水溶液) ミストの結果において、切削速度 60 m/min 及び 100 m/min の表面粗さ (Rz) は 3 μm であった。

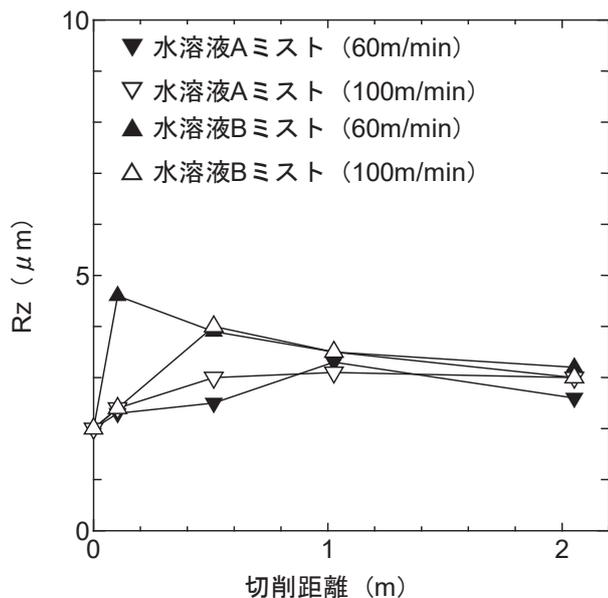


図6 切削距離と表面粗さ (Rz) との関係

#### 4. 結 言

チタン合金 (Ti-6Al-4V) における水溶液 (界面活性剤を添加した水溶液) ミストを用いた時のエンドミル切削加工実験を行い、切削油剤、油ミスト、発泡剤水溶液ミストを用いた時の工具の摩耗状況、加工面 (表面) 粗さについて、比較検討を行った。

その結果は、以下のとおりである。

- (1) 切削速度 60m/min の場合、界面活性剤水溶液ミストは、工具摩耗幅、表面粗さ (最大高さ Rz) が良好な結果が得られた。
- (2) 切削速度 100m/min の場合、界面活性剤水溶液ミストは、工具摩耗幅、表面粗さ (最大高さ Rz) が良好な結果が得られた。
- (3) 界面活性剤水溶液ミストを使用した場合、切削速度 60m/min、切削速度 100m/min の切削加工実験は工具摩耗幅が小さく、表面粗さ (最大高さ Rz) において良好な結果が得られた。

#### 参考文献

- [1] 瀧内直祐, 福田洋平, 三木伸一: 新規冷却法による高精細加工技術の開発, 長崎県工業技術センター研究報告, No.43, pp.32-35(2014).
- [2] 瀧内直祐, 福田洋平, 三木伸一: 新規冷却法による高精細加工技術の開発, 長崎県工業技術センター研究報告, No.44, pp.35-38(2015).

# 複雑事象解析に対応可能な連成シミュレーション技術の開発（第1報）

工業材料科 専門研究員 重光 保博

信頼性の高い予測が困難な複雑事象に対して、連続体力学に基づく CAE（Computer-Aided Engineering）とマイクロシミュレーションを融合したマルチスケール連成シミュレーションが待望されている。本報告では、多孔質等の不均一媒体中における粒子の脱吸着挙動に対する解析に向けた理論研究を行った。拡散係数が濃度・位置依存する記述する拡散方程式に対して Fourier 級数展開を用いた解法を用い、2 次の対角項まで考慮した計算アルゴリズムを新たに導出した。

## 1. 緒言

近年、人工知能や IoT 等の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工学分野を推進しており、CAE は関連インフラ設計や地理・気象解析へ貢献する先端技術として期待されている。シミュレーション解析を受託ビジネスとする県内 CAE 関連企業は、県内の潜在 CAE マーケットにとどまらず、県外への積極的な展開を実現するため、従来の技術では解析困難な複雑事象を扱うことができる高度なシミュレーション技術を必要としている。平成 27 年に導入した CAE 統合ソフトウェア ANSYS は、従来の CAE 解析機能である構造解析・流体解析・電磁界解析機能を包括的に統合した代表的な CAE 解析ソフトウェアである。ANSYS の特徴として、独立事象解析だけでなく、それらが複雑に絡む事象に対する連成解析も実行可能である。

前段研究「連成統合シミュレーション技術（注1）の開発と普及支援（平成27年度～平成29年度）」では、ANSYS を活用して CAE 関連企業の技術支援を行い、高度な CAE 解析である連成シミュレーションの性能評価と普及を試みた（図1）。

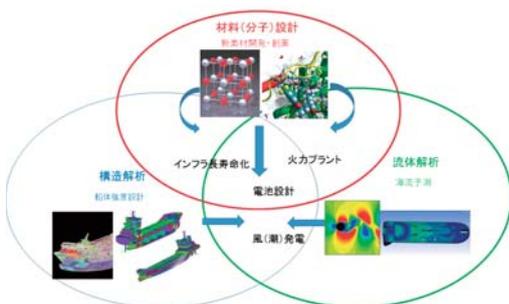


図1 連成解析のイメージ図

本研究においてこの技術開発を継続発展させ、マルチスケールシミュレーション（注2）環境の構築およびそれを活用した県内企業の技術支援を行う。流体シミュレーションのマクロ基礎方程式である Navier-Stokes 方程式と、分子拡散を記述する拡散方程式、さらに分子レベルのマイクロ挙動を記述する分子動力学をリンクし、流れ場の中で化学反応が生起する複雑事象の解析を目指す。

本年度は、多孔質等の脱吸着を記述する拡散方程式のうち、拡散係数が濃度依存する挙動を示す場合について（図2）、Fourier 級数展開を用いた解法で、2 次の対角項まで取った場合の数理アルゴリズムについて考察した。

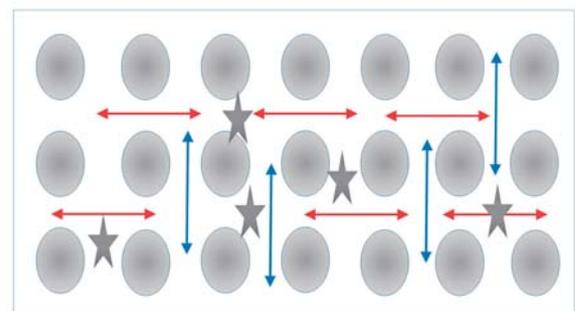


図2 多孔質中の分子拡散のイメージ図

## 2. 手法・結果・考察

### 2.1 座標依存型拡散係数を有する拡散方程式

不均一媒体中の分子拡散挙動は、通常の拡散方程式において、位置に依存した拡散係数とポテンシャル中での Brown 運動によって記述される。

分子濃度  $P(x,t)$  の時空発展の一般形は Fokker-Planck 方程式で表現されるが、運動量変化が十分小さい仮定の下では、座標依存拡散係数を有する Smolchouski 方程式（式(1)）として表される<sup>1)</sup>。

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D(x) \exp(-\beta U(x)) \frac{\partial}{\partial x} [\exp(\beta U(x)) P(x,t)] \quad (1)$$

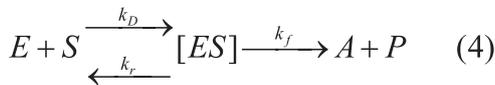
ここで拡散係数  $D(x)$  は、Einstein 関係式を用いて式 (2) のように記述される。

$$\frac{1}{D(x)} = \frac{1}{D_e} + \beta^2 \int_0^\infty \langle \delta F_x(t) \delta F_x(0) \rangle_x dt \quad (2)$$

ポテンシャル  $U(x)$  に Parabolic 近似および有限幅の壁を導入すると、有効拡散係数  $D_e$  とポテンシャルの座標微分を含む簡易表現 (式 (3)) を得る<sup>[1],[2]</sup>。

$$D(x) = \frac{D_e}{1 + \frac{1}{12} \frac{\partial w(x)}{\partial x}} \quad (3)$$

一般的に式 (1) で記述される分子拡散プロセスは、拡散過程に速度支配されるタイプの化学反応を記述する基礎方程式となる (Diffusion-influenced reactions)。このタイプの反応速度理論には多くの蓄積がある<sup>[3]</sup>。たとえば Michaelis-Menten 機構をモデルとすると、



ここで実効反応速度定数  $k_{eff}$  は、生成物への変換が十分に早い仮定の下で正方向の反応速度定数に等しくなる。

$$k_{eff} = \frac{k_p k_f}{k_r + k_f} \approx k_D \quad (5)$$

Smolchouski の古典的な 2 成分会合モデルでは、 $k_D$  は

$$k_D = 4\pi(D_A + D_B)(R_A + R_B) \quad (6)$$

となる。 $(D_A, D_B)$ 、 $(R_A, R_B)$  は、それぞれ化学種 A, B の拡散係数と有効粒子半径である。A と B の間に働く分子間力を  $U(r)$  とすると、

$$k_D = 4\pi(D_A + D_B) \left[ \int_{R_A+R_B}^\infty \frac{\exp(U(r))}{r^2} dr \right]^{-1} \quad (7)$$

と一般的に表現される。

一方、Levich によるマクロ流体モデルでは、 $k_D$  は、

$$k_D = 4\pi DR \left[ 1 + 0.64 \left( \frac{vR}{D} \right)^{1/3} \right] \quad (8)$$

と表現され、ここで  $(vR/D)$  は Peclet 数である。この表現では、ミクロな分子間相互作用からの寄与は、Peclet 数に実効的に取り込まれていることになる。

さらに、ポテンシャル中の拡散過程を記述する (式 (1)) に対して、位置に依存した化学反応が生起する場合 (Sink term が存在する場合)、Smolchouski 方程式は以下のように改変される。

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D(x) \exp(-\beta U(x)) \frac{\partial}{\partial x} [\exp(\beta U(x)) P(x,t)] - k(x) P(x,t) \quad (9)$$

この Agmon-Hopfield 型 Smolchouski 方程式については、多くの解析がなされており (図 3)、筆者らも Sink term を介した自由エネルギー変化に関して報告している<sup>[4],[5]</sup>。

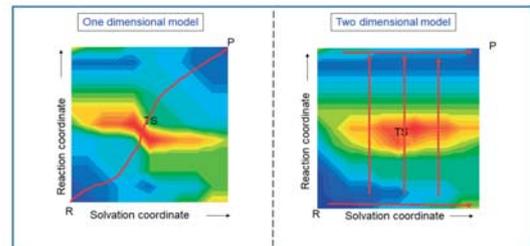


図 3 Agmon-Hopfield モデルに基づく反応機構

## 2. 2 濃度依存拡散方程式の解法 : Fourier 変換

溶質-溶媒相互作用に起因する散逸項と粒子間ポテンシャルが十分小さいとして無視できる場合、Smolchouski 方程式はさらに簡素化され、散逸項が無い拡散方程式となる。

$$\frac{\partial P(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (D(x) \frac{\partial P(x,\tau)}{\partial x}) \quad (10)$$

座標依存拡散係数を濃度依存拡散係数に置き換えて解析を進める。

厚さ  $L$  の二次元無限領域での 1 次元拡散を考える。(図 4)

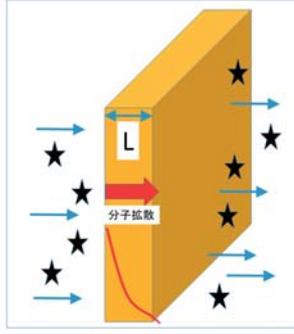


図4 一次元拡散方程式のモデル図

式(10)を無次元化すると、

$$\frac{\partial \phi(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (A(C) \frac{\partial \phi(z,t)}{\partial z}) \quad (11)$$

パラメーター  $A = \frac{D(C)}{D_0}$  は、濃度依存拡散係数比の摂動展開を表す。

$$A = \frac{D(C)}{D_0} = 1 + \lambda \phi + \frac{1}{2} \lambda^2 \phi^2 + L \quad (12)$$

境界条件として、 $z = \pi x / L$  の両端  $[0, \pi]$  で

$$\phi(z,t) = \frac{(C - C_{bath})}{(C_i - C_{bath})}$$

は、ともに0になるので解  $\phi(z,t)$  は

Fourier Sine 展開で表現することができ、その Fourier Sine 係数  $f_n(t)$  は以下の階層構造を有する無限展開で決定される<sup>[6],[7],[8]</sup>。

$$\phi(z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{\frac{2}{\pi}} f_n(t) \sin(nz) \quad (13)$$

$$\frac{df_k}{dt} = \sum_{n: \text{odd}} [\alpha_{kn} + \beta_{kn}] f_n \quad (14)$$

$$\alpha_{kn} = \left(-\frac{2n^2}{\pi}\right) \int_0^{\pi} A \sin(kz) \sin(nz) dz \quad (15)$$

$$\beta_{kn} = \left(\frac{2n}{\pi}\right) \int_0^{\pi} \frac{\partial A}{\partial z} \sin(kz) \cos(nz) dz \quad (16)$$

(Case I)

式(12)において、濃度依存拡散係数の摂動展開を1次摂動で打ち切る<sup>[7],[8]</sup>。

$$A = \frac{D(C)}{D_0} \approx 1 + \lambda \phi \quad (17)$$

$f_n(t)$  の階層展開 (式(14)) を  $n=1$  で打ち切ると、 $f_1(t)$  に対する閉じた方程式を得て、以下の  $f_1(t)$  の具体形を得る<sup>[7]</sup>。

$$f_1(t) = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \frac{3\pi^2 \exp(-t)}{3\pi^2 + 16\lambda - 16\lambda \exp(-t)} \quad (18)$$

さらに、 $f_n(t)$  の階層構造展開を  $n=3$  まで行い、対角項のみ考慮 ( $n=1,3$ ) すると、 $f_3(t)$  と  $f_1(t)$  の階層関係式を得て、以下の  $f_3(t)$  の具体形を得る<sup>[8]</sup>。

$$f_3(t) = \{0.53 - [\frac{1.55\lambda}{(9+7.2\lambda)}] \exp(-t) + [\frac{0.61\lambda f_1^2}{(9+4.6\lambda f_1)}] \} \exp(-9+7.2\lambda)t \quad (19)$$

(Case-II)

次に、濃度依存拡散係数の摂動展開式 (式(12)) を2次摂動まで考慮する。

$$A = \frac{D(C)}{D_0} \approx 1 + \lambda \phi + \frac{1}{2} \lambda^2 \phi^2 \quad (20)$$

$f_n(t)$  の展開を  $n=1$  で打ち切り、対角項のみ考慮すると、 $f_1(t)$  に対する閉じた方程式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{df_1}{dt} = & \left(-\frac{2}{\pi}\right) I_1 f_1 + \left(\frac{2}{\pi}\right) \sqrt{\frac{2}{\pi}} \lambda_1 (I_2 - I_3) f_1^2 \\ & + \left(-\frac{4}{\pi^2}\right) \lambda_2 (I_4 - I_5) f_1^3 \quad (21) \end{aligned}$$

ここで、

$$I_1 = \int_0^{\pi} (\sin z)^2 dz, \quad I_2 = \int_0^{\pi} \sin z (\cos z)^2 dz, \quad I_3 = \int_0^{\pi} (\sin z)^3 dz$$

$$I_4 = \int_0^{\pi} (\cos z)^2 (\sin z)^2 dz, \quad I_5 = \int_0^{\pi} (\sin z)^4 dz$$

この微分方程式の解析解を数式処理ソフトウェア Mathematica で求めた。ただし、 $f_1(t)^3$  を含む表現では解析解を導出できなかったため、この高次項を落とした近似表現を用いた。解は以下の式(22)となった。ここで、 $B[n,z]$  は Bessel 関数、 $G[x]$  は Gamma 関数を表す。

$$\begin{aligned} f_1[t] = & (3^{1/3} B[-(1/3), 2/3 \sqrt{e^{-3t}}] G[2/3]) / (2 (e^{-3t})^{1/6}) \\ & - (1/2) 3^{1/3} (e^{-3t})^{1/3} (B[-(4/3), 2/3 \sqrt{e^{-3t}}] - B[2/3, 2/3 \sqrt{e^{-3t}}]) G[2/3] \\ & + 3^{1/3} B[1/3, 2/3 \sqrt{e^{-3t}}] G[4/3] / (2 (e^{-3t})^{1/6}) \\ & - (1/2) 3^{1/3} (e^{-3t})^{1/3} (B[-(2/3), 2/3 \sqrt{e^{-3t}}] - B[4/3, 2/3 \sqrt{e^{-3t}}]) G[4/3] \\ & / ((3^{1/3} B[-(1/3), 2/3 \sqrt{e^{-3t}}] G[2/3]) / (e^{-3t})^{1/6}) \\ & - (3^{1/3} B[1/3, 2/3 \sqrt{e^{-3t}}] G[4/3]) (e^{-3t})^{1/6} \quad (22) \end{aligned}$$

### 3. 結 言

拡散係数が濃度・位置依存する記述する拡散方程式に対して Fourier 級数展開を用いた解法を用い、2 次の対角項まで取った場合の計算アルゴリズムを考察した。今後、導出した理論表現を用いて、多孔質等の不均一媒体中における粒子の脱吸着挙動に対する解析を進める予定である。

#### 参考文献

- [1] A.M.Berenzhkovskii and E. Pollak, J.Chem.Phys. 135 074108 (2011).
- [2] R.Zwanzig, J.Phys.Chem., 96, 3296 (1992).
- [3] D.Calef and J.Deutch, Ann.Rev.Phys.Chem., 34, 493-524 (1983).
- [4] Y.Shigemitsu and Y.Ohga, J.Sol.Chem., Vol.43, Issue 9-10, 1746-1754 (2014).
- [5] Y.Shigemitsu and Y.Ohga, J.Sol.Chem, 47(1), 127-139 (2018).
- [6] T.Tsang, Ind.Eng.Chem., 52, 707 (1960).
- [7] T.Tsang, J.Appl.Phys., 32, 1518 (1961).
- [8] T.Tsang and C.Hammarstrom, Phys.Stat.Sol. (B), 136, K95 (1986).

(注1) 連成統合シミュレーション：材料力学解析と流れ解析を組み合わせ、両者が相互に影響する複雑事象を解析するシミュレーション。通常は、前者は連続体力学の構成方程式、後者は Navier-Stokes 方程式に基づき、独立して求解される。しかし構造変形とそれに伴う流れ変化の相互作用が無視できない場合、両者を連立して求解することで正しい解を得ることができる。連成統合シミュレーションの具体例は、海中構造物の荷重解析・風車の空力解析・血管中の血液流れ解析など。

(注2) マルチスケールシミュレーション：サイズの大きく異なる複数要素から構成されている解析対象では、各要素が別々の物理方程式に支配されている。このような場合、それぞれの支配方程式を解いてそれを接続する必要がある。膜分離プロセスを例にとると、配管内の流れは巨視的 Navier-Stokes 方程式、膜内外の物質収支は現象的拡散方程式、膜を介した分子イオン挙動はマイクロ Newton 方程式（分子動力学）でそれぞれ記述され、これらの解を接続してマルチスケールシミュレーションを実現する。

# 分子複合による耐熱性樹脂材料の開発

工業材料科 主任研究員 市瀬 英明  
佐世保工業高等専門学校技術室 里見 暢子  
佐世保工業高等専門学校 特任教授 古川 信之

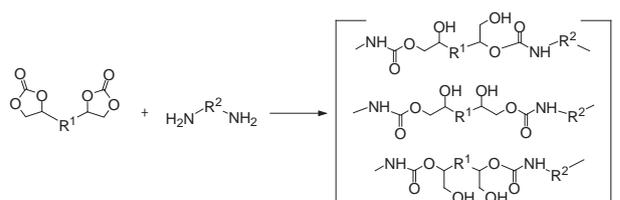
ポリヒドロキシウレタンは、側鎖に水酸基が存在することにより、ガラス転移温度の向上や基材表面への密着性、ガスバリア性の向上が期待される。とくに本県においては、産業集積度が高いシート材やライニング材等の分野において「密着性」と「耐水・防水性」を両立する合成樹脂材料として期待が高い。しかし、ポリヒドロキシウレタンは実用上の耐熱温度が十分ではないなどの課題もある。そこで、本研究では、ポリヒドロキシウレタンの耐熱性向上を目指して、分子構造のネットワーク化を検討した。すなわち、三官能型エポキシ樹脂を基材として、対応する三官能環状カーボネートを合成した。次いで、三官能環状カーボネート化合物と各種脂肪族ジアミン類との反応により、フィルム形成能を有するネットワーク型ポリヒドロキシウレタンが得られることを明らかにした。また、フィルム成形したポリヒドロキシウレタンの熱機械的特性、及び化学的耐熱性に及ぼす脂肪族鎖長の影響を検証した。

## 1. 緒言

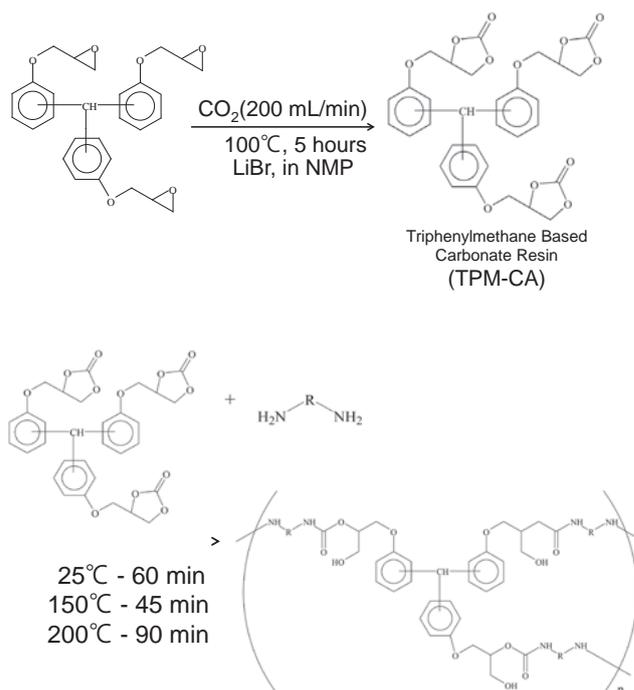
二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の炭素資源としての利用法として、エポキシドとの反応が広く検討されている。すなわち、エポキシ化合物にハロゲン化アルカリ金属等を触媒として添加し、CO<sub>2</sub>と反応させることでカルボニル基を有する五員環構造をもつ化合物、五員環カーボネートが合成できることが報告されている<sup>[1]-[3]</sup>。二官能性エポキシ化合物とCO<sub>2</sub>の反応により二官能性環状カーボネートを合成し、これをジアミンと反応させることでスキーム1のように側鎖に水酸基を有するポリウレタン、すなわちポリヒドロキシウレタン(PHU)が合成できることも報告されている<sup>[4]-[6]</sup>。側鎖に水酸基が存在することにより、ガラス転移温度の向上や基材表面への密着性、ガスバリア性の向上が期待できる。とくに本県においては、産業集積が高いシート材やライニング材等の分野において「密着性」と「耐水・防水性」を両立する合成樹脂材料として期待が高い。しかし、これまで報告されてきたPHUは分子構造が直鎖のものが多いために、実用上の耐熱特性が十分ではないとの指摘もあった。

そこで本研究は、シート材、またはライニング材用ベース樹脂材料の合成検討の一環として、PHUの耐熱化を目指して、PHU分子構造のネットワーク化を検討した。すなわち、三官能型エポキシ樹脂を基材として、対応する三官能環状カーボネートを合成し、次いで、三官能環状カーボネート化合物と各種脂肪族ジ

スキーム1 PHUの合成



スキーム2 三官能型五員環カーボネート (TPM-CA) と PHU-NWP の合成



アミン類との反応により、フィルム形成能を有するネットワーク型ポリヒドロキシウレタン (PHU-NWP) が得られることを明らかにした (スキーム 2)。また、フィルム成形したポリヒドロキシウレタンの熱機械的特性、及び化学的耐熱性に及ぼす脂肪族鎖長の影響を検証したので報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 試薬

エポキシ樹脂としてトリフェニルメタン型エポキシ樹脂 (TPM-EP、エポキシ当量 161 g/eq.) (新日鉄住金化学(株)製) を使用した。触媒には臭化リチウム (LiBr) (キシダ化学(株)製) を使用した。溶媒には N-メチル-2-ピロリジノン (NMP) (和光純薬(株)製) を使用した。脂肪族ジアミン類にはエチレンジアミン (関東化学(株)製)、1,3-プロパンジアミン (関東化学(株)製)、1,4-ブタンジアミン (東京化成工業(株)製)、1,5-ペンタンジアミン (和光純薬(株)製)、1,6-ヘキサンジアミン (関東化学(株)製)、1,7-ヘプタンジアミン (Thermo Fisher Scientific社製)、1,8-オクタンジアミン (和光純薬(株)製)、及び m-キシリレンジアミン (関東化学(株)製) の 8 種を使用した。いずれも精製することなく市販品をそのまま使用した。

### 2.2 環状カーボネートの合成

攪拌翼とアーリン型冷却管を取り付けた四口セパラブルフラスコ中に TPM-EP と LiBr を 20:1 の当量比で NMP に溶解し 20 wt% 溶液とした。溶液を 100℃ に加熱し、攪拌しながら流量 200 mL/分 で CO<sub>2</sub> を吹き込み、反応を開始した。5 時間経過後、CO<sub>2</sub> の吹き込みを停止し、直ちに蒸留水 30 mL を添加した。析出物を捕集して 5 倍量の純水で洗浄後、吸引ろ過した。この洗浄操作を 2 回繰り返した。生成物を 12 時間風乾し、次いで 30℃ で 4 時間真空乾燥した。最終生成物 TPM-CA として白色固体を得た。(単離収率 92%)

### 2.3 フィルムの作製

ガラス反応器中に TPM-CA とヘキサンジアミンを官能基当量比 (カーボネート基当量 / アミノ基当量) が 1/1 になるように NMP に溶解し 20 wt% 溶液とした。溶液を室温に保ち、1 時間攪拌した。その後、アルミカップに反応溶液を流し込み、ホットプレートを用いて 150℃ -45 min、200℃ -90 min の段階的な加熱処理を行った。放冷後、アルミカップからフィルム状の重合

生成物 (PHU-NWP) を剥離して得た。その他の脂肪族ジアミンを用いた重合系についても同様の方法にて重合生成物を得た。

### 2.4 分析方法

【核磁気共鳴 (NMR)】核磁気共鳴装置 JNM-ECX400II (日本電子(株)製) を用いて DMSO-d<sub>6</sub> 溶液におけるスペクトルを得た。

【フーリエ変換赤外分光分析 (FT-IR)】フーリエ変換赤外分光光度計 (IRTracer-100、(株)島津製作所製) を用いて ATR 法により分光スペクトルを得た。

【化学的耐熱性】示差熱重量同時測定装置 (DTG-60AH、(株)島津製作所製) により評価した。5% 重量減少温度 (Td5)、10% 重量減少温度 (Td10) を求めた。測定は窒素気流下で行い、昇温速度は 10℃ /min とした。

【動的粘弾性測定】動的粘弾性測定装置 (DMS-6000、セイコーインスツルメンツ(株)製) により測定した。測定は短冊状試験片 (長さ 30 mm、幅 5 mm) を用いて周波数 1 Hz、昇温速度 3℃ /min、及び印加ひずみ 0.2% の条件で実施した。損失正接 (tan δ) のピーク値をガラス転移温度とした。なお、架橋密度は動的粘弾性測定の結果から、以下の Mooney-Revlin 式を用いて算出した<sup>17)</sup>。

$$\rho = \frac{E}{3RT}$$

ここで、 $\rho$  は架橋密度、E はゴム弾性領域の貯蔵弾性率で T<sub>g</sub>+50℃ の温度における貯蔵弾性率 E' の値を用いた。R は気体定数、T は温度である。

## 3. 結果と考察

### 3.1 五員環カーボネート TPM-CA の合成

NMR 測定より、原料 TPM-EP におけるエポキシ構造由来のメチンプロトンの吸収ピーク (3.3 ppm) の消失、及び五員環カーボネート構造由来のメチンプロトン吸収ピーク (5.1 ppm) の発現を確認した。

FT-IR 測定より、原料 TPM-EP におけるエポキシ構造由来の吸収 (910 cm<sup>-1</sup>) の消失、及び五員環カーボネート構造由来のカルボニル基の吸収 (1780 cm<sup>-1</sup>) の発現を確認した。

### 3.2 ネットワーク型ポリヒドロキシウレタン (PHU-NWP) の熱機械的特性

PHU-NWP の動的粘弾性測定 (DMA) を行い、その

熱機械特性を評価した。その結果を図1、及び表1に示した。C2、C4、C6のPHU-NWPは70℃付近から貯蔵弾性率E'が徐々に低下し、120℃以上の温度領域でゴム弾性領域を示した。またC3、C5、C7、C8のPHU-NWPは室温から貯蔵弾性率E'の低下が始まり70℃以上でゴム弾性領域を示した。このことは、これらの材料は架橋構造が形成されていることを示している。またC3、C6を除くPHU-NWPにおいては、2か所にtanδの極大値が観測され、異なる温度領域で熱的緩和過程（低温側のtanδの極大値Tg<sub>1</sub>、高温側のtanδの極大値Tg<sub>2</sub>）が存在することを示している。これはPHU-NWPがネットワーク構造中にウレタン基とヒドロキシ基を有しているため、局所的に水素結合が生じた構造単位が存在し、一部のポリマー鎖はTg<sub>1</sub>でミクロブラウン運動を開始するが、残りのポリマー鎖は水素結合によりTg<sub>2</sub>に至るまでは運動が凍結されたままとなるために観測されたものと推測される。

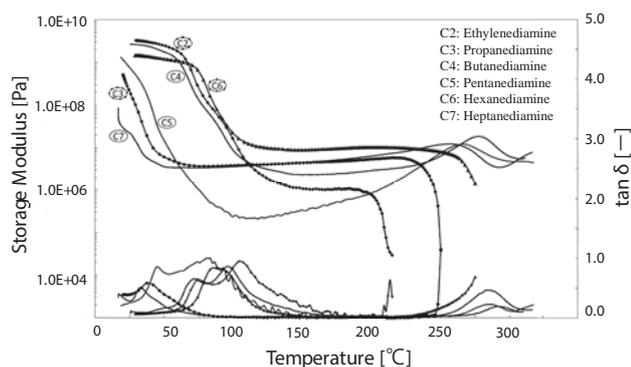


図1 PHU-NWPの動的粘弾性測定結果

表1 PHU-NWPのガラス転移温度と架橋密度

PHU-NWP	conversion ratio(%)	Tg <sub>1</sub> (°C)	Tg <sub>2</sub> (°C)	ρ(m <sup>3</sup> )
C2	70.8	69.1	103.6	91.7
C3	80.1		37.3	413.5
C4	64.6	70.9	95.2	215.5
C5	66.7	44.2	83.1	23.2
C6	97.2		87.6	853.8
C7	97.0	17.2	32.3	387.4
C8	84.9	20.9	35.9	481.6
Xy	92.4	77.7	98.4	940.0

また、鎖長の異なる脂肪族ジアミン類を架橋剤に用いたPHU-NWPのガラス転移温度(Tg<sub>2</sub>)を比較すると、メチレン鎖が短いほどガラス転移温度が高くなる傾向にあった。C2は反応率が70%程度であるにもかかわらず100℃以上のガラス転移温度だった。また、C6

～C8の反応率は80%以上であるものの、ガラス転移温度は32℃～35℃程度であった。これは、メチレン鎖が長くなるに従ってPHU-NWPの自由体積が大きくなり、低温で分子運動が起こりやすくなるためであると考えられる。しかし、C3においては37.3℃となり、C4の95.4℃よりも低いガラス転移温度を示した。また、C5は83.1℃で、C6の87.6℃よりも低いガラス転移温度を示した。C7においても32.7℃で、C8の35.9℃よりも低いガラス転移温度を示した。これは、脂肪族ジアミンのメチレン鎖長が偶数か奇数かにより水素結合能が異なる、すなわち『偶奇則』がPHU-NWPにおいても影響している可能性を示唆している。また、m-キシレンジアミンを架橋剤として用いたXyは98.4℃のガラス転移温度(Tg<sub>2</sub>)を示した。これは、剛直なフェニレン基の導入による運動性の低下、及び芳香族構造間の分子間相互作用による分子運動性の低下に起因しているものと考えられる。本研究のPHU-NWPでは、架橋密度ρとガラス転移温度Tg<sub>2</sub>の相関関係は得られなかった。これは、上述した局所的な水素結合がガラス転移温度に大きく影響を及ぼしているためと考えられる。

### 3.2 ネットワーク型ポリヒドロキシウレタン(PHU-NWP)の化学的耐熱性

PHU-NWPの化学的耐熱性を評価するために、熱重量分析(TG/DTA)を行い、その結果を図2、及び表2に示した。いずれのPHU-NWPも250℃～300℃付近から重量減少が観測された。250℃以上の温度においては、ヒドロキシウレタン構造は加熱すると逆反応が進行し、カーボナートが再生されることが報告されている<sup>[8]–[9]</sup>。解重合反応により架橋剤として用いたジアミン類が再生し、揮散することによるものと推定される。また、いずれのPHU-NWPにおいても300℃以上では重量減少率が大きくなった。これはネットワークを構成するウレタン結合の開裂およびC-C結合の開裂によるものであると考えられる。

さらに、加熱によるネットワーク形成過程を検討するため、C6において200℃の熱処理におけるFT-IRスペクトルの経時変化を観測した。その結果、熱処理時間の経過とともにウレタン結合由来のカルボニル基(1694 cm<sup>-1</sup>～1699 cm<sup>-1</sup>)以外に、尿素結合由来のカルボニル基に帰属される吸収スペクトルが1650 cm<sup>-1</sup>付近に観測された。解重合反応により生成したアミン末端は、ウレタン部位と反応して尿素結合を形成するこ

とが報告されている<sup>[8]-[9]</sup>。このことから、熱分解過程において、一部は尿素化合物などの低分子が生成し離脱ため 250 °C からの重量減少が起こった可能性も考えられる。

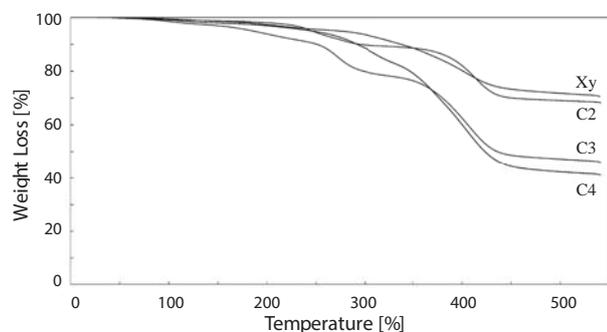


図2 PHU-NWP の熱重量分析結果

表2 PHU-NWP の化学的耐熱性

PHU-NWP	Td <sub>5</sub> (°C)	Td <sub>10</sub> (°C)
C2	245.6	295.2
C3	185.6	251.1
C4	245.8	292.0
C5	234.5	299.7
C6	241.1	290.5
C7	203.7	285.5
C8	240.0	343.9
Xy	274.1	338.3

#### 4. 結 言

本研究により、三官能エポキシ樹脂を原料として用いた CO<sub>2</sub> 付加反応により、三官能環状カーボナート化合物を高収率で合成できることが明らかとなった。また、三官能性環状カーボナート化合物とジアミン類との反応により、フィルム形成能を有するネットワークポリマー (PHU-NWP) が得られることも明らかとなった。化学的耐熱性においては、いずれの PHU-NWP も 250 °C ~ 300 °C 付近から重量減少が観測された。これは、熱による解重合反応の進行により低分子成分が揮散することに起因しているものと考えられた。また、PHU-NWP のガラス転移温度はメチレン鎖が短いほど高くなる傾向がみられた。ガラス転移温度はジアミンの構造により変化し、C2、及び Xy は今回検討した PHU-NWP では最も高い温度を示した。また、メチレン鎖長が偶数か奇数によりガラス転移温度に影響している可能性が示唆された。

PHU は分子設計の自由度が高く、またネットワーク化の進展により一層の高性能化・高機能化ができると考える。また、CO<sub>2</sub> の炭素資源としての利用法としてもその効果は高い。今後、シート材やライニング材としての応用を目指して、密着性や防耐水性等の実用試験を行いたい。

#### 参考文献

- [1] N. Kihara and T. Endo, *J. Org. Chem.*, 58, 6198 (1993).
- [2] 遠藤剛, 落合文吾, *化学*, 63, 34 (2008).
- [3] 遠藤剛, 落合文吾, *日本接着学会誌*, 45, 118 (2009).
- [4] H. Tomita, F. Sanda, and T. Endo, *J. Polym. Chem. Part A: Polym. Chem.*, 39, 851 (2001).
- [5] N. Kihara, Y. Kushida, and T. Endo, *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.*, 34, 2173 (1996).
- [6] Y. Ochiai, Y. Satoh, and T. Endo, *Green Chem.*, 7, 765 (2005).
- [7] 金城徳幸, 尾形政次, 沼田俊一, 横山隆: *熱硬化性樹脂*, 6, 157 (1985).
- [8] 前田真也, 須藤篤, 遠藤剛: *ネットワークポリマー*, 34, 298 (2013).
- [9] 市瀬英明, 里見暢子, 古川信之, 遠藤剛: *ネットワークポリマー*, 39, 111 (2018).

# 健康維持と美味しさを求めるアクティブシニアのための食品開発

食品・環境科 主任研究員 横山 智 栄  
食品・環境科 主任研究員 玉 屋 圭  
食品・環境科 主任研究員 松 本 周 三

長崎県では全国平均より速い速度で高齢化が進行しており、高齢者向けに健康機能性を有する食品開発が望まれている。本研究ではアクティブシニア向けのおやつとして、抗酸化作用のあるセサミンを多く含むごまや抹茶を使用した長崎県の甘い抹茶ごま豆腐に着目した。本研究では保存性を向上させるため、レトルトの強熱にも耐えうる抹茶ごま豆腐の開発を目的として、抹茶の変色に抑制効果のある物質について検討した。また、保存性を向上させるための別の方法として、冷凍処理についても検討した。ごま豆腐を冷凍後自然解凍させると食感の品質が低下することから、自然解凍しても冷凍前の品質を維持できる加工条件について検討した。その結果、レトルト処理に対して完全に変色を抑制できる物質は確認できなかった。一方、冷凍処理においてはトレハロースを添加することで、ごま豆腐の材料であるデンプンの老化が抑制され食感の改善効果が認められた。

## 1. 緒 言

長崎県は高齢化率が全国平均より高く<sup>1)</sup>、高齢化の進行している地域である。高齢者人口のうちの約8割は「アクティブシニア」と呼ばれている元気な高齢者である。この層の市場開拓は食品産業界の課題であり、県内食品製造企業からもアクティブシニア向けの食品開発が強く求められている。

アクティブシニアが健康増進を図るために栄養成分を手軽に摂取する方法として、補助的な食事であるおやつに着目した。長崎県で作られているごま豆腐は甘く、また、ごま豆腐には抗酸化作用のあるセサミンを多く含むことから機能性おやつにもなり得る。近年、抹茶の人気が高まっており、長崎県内でも抹茶を使用した食品の開発を希望する企業は多い。ごま豆腐は冷蔵で4日～10日と保存できる期間が短いため、保存性を高めるために抹茶ごま豆腐をレトルト処理すると緑色から赤褐色に変色し、商品価値が著しく低下することが問題となっていた。

本研究では、常温流通可能な抹茶ごま豆腐を開発するため、加熱により生じる抹茶成分の変動について検討した。併せて、変色の軽減化についても検討した。さらに、常温流通とは別の方法として、ごま豆腐を冷凍することで保存性を向上させ、冷凍解凍後も冷凍前と近い品質が維持できる加工条件について検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 熱による抹茶成分の変動の検討

抹茶成分であるクロロフィル類の変化に及ぼす温度

の影響を検討するために、市販の抹茶粉末を純水に懸濁し、一定温度(60℃、80℃、100℃、110℃)で一定時間(0、10分、30分、60分)加熱後、クロロフィル類の分析を行った。

クロロフィル類の分析はKohataらの方法<sup>2)</sup>に準じて行った。すなわち、抹茶粉末100mgを50mLポリプロピレン製遠沈管に正確に採取後、純水5mLを添加し懸濁させる。これにアセトン10mLを加えてホモジナイズした後、遠心分離(1,080×g、5分間)した。上清を50mLメスフラスコに採り、残渣に85vol%アセトン水溶液10mLを加えてホモジナイズした後、遠心分離(1,080×g、5分間)し、上清を50mLメスフラスコに採取した。以上の操作を3回繰り返し、集めた上清を85vol%アセトン水溶液で50mLとした。孔径0.22μmのメンブレンフィルターでろ過後、高速液体クロマトグラフ(HPLC)に10μL注入した。クロロフィル類の抽出方法を図1に示す。

HPLCにはWaters社製のACQUITY UPLCシステム(ACQUITY UPLC フォトダイオードアレイ検出器)を用いた。検出波長は405nmに設定した。分析用カラムには東ソー株式会社製東ソー TSKgel ODS-80TS(150mm×4.6mm内径)、ガードカラムには東ソー株式会社製東ソー TSKguradgel ODS-80TS(150mm×3.2mm内径)を使用した。カラム温度は40℃とした。溶離液は0.005N NaCl含有95%エタノール溶液及び0.005N NaCl含有80%エタノール溶液を用い、流量は0.8mL/分で、リニアグラジエント溶出を行った。グラジエント勾配は以下のとおり設定した。: B 95% (0分)

→5% (10分)→5% (35分)→95% (40分)。

抹茶粉末試料 100 mg を遠沈管に採る

アセトン 10 mL を加えてホモジナイズ後、遠心分離 (1,080×g、5分)

残渣に 85 vol%アセトン水溶液 10 mL を加えてホモジナイズした後、遠心分離 (1,080×g、5分)

3回繰り返す

メスフラスコで 50 mL に定容

ろ過 (0.22 μm)

高速液体クロマトグラフに 10 μL 注入

図1 クロロフィル類の抽出方法

## 2.2 抹茶ごま豆腐の変色抑制効果の確認

抹茶ごま豆腐は以下の配合を基本配合とし、調整した：甘藷デンプン 1g、ねりごま 1g、抹茶 0.05g、純水 10g。変色抑制効果を確認するために、抹茶ごま豆腐の基本配合に対して、塩化マグネシウム（無水）、カゼインナトリウム、アルブミン（卵由来）、たん白粉末（大豆由来）、アスコルビン酸ナトリウム、フェルラ酸、銅クロロフィリンナトリウム、脂肪酸グリセリン及び大豆レシチン（すべて富士フィルム和光純薬）を添加した抹茶ごま豆腐を試作した。添加量は 0.05g とした。

材料を 50 mL ポリプロピレン製チューブに入れ加熱攪拌し、粘性が上昇してからさらに 30 秒間加熱攪拌した。オートクレーブで 120℃で 1 分間加熱し、加熱前後の色の変化を見るため、色差計（CR-13 コニカミノルタ製）を用いて  $L^*a^*b^*$  を測定した。

## 2.3 冷凍抹茶ごま豆腐の品質維持効果の確認

### 2.3.1 増粘多糖類の効果

抹茶ごま豆腐は以下の配合を基本配合とし、調整した：甘藷デンプン 20g、ねりごま 20g、抹茶 1g、ショ糖 10g、純水 149g。抹茶ごま豆腐の基本配合に対して、カッパカラギナン（オルノー<sup>®</sup>CM、オルガノフードテック株式会社）、イオタカラギナン（オルノー<sup>®</sup>J、オルガノフードテック株式会社）、キサンタンガム（オルノー<sup>®</sup>X2、オルガノフードテック株式会

社）、カードラン（CD-99L、オルガノフードテック株式会社）を各試験区 1g 添加した抹茶ごま豆腐を試作した。調製後の試料は 20g ずつポリプロピレン製容器に分注し、100℃で 30 分間加熱殺菌した。試料を放冷後、-20℃で 24 時間凍結した試料を 25℃で自然解凍し、クリープメーター（RE2-33005C 株山電製）を用いて破断強度を測定した。測定条件として、プランジャーは φ16×H250 mm の円柱型を使用し、格納ピッチ 0.1 sec、測定歪率 70%、測定速度 1 mm/sec とした。解析はクリープメーター用自動解析ソフトウェア（破断強度解析 Windows ver.1 株式会社山電製）にて行った。

### 2.3.2 糖の効果

抹茶ごま豆腐は以下の配合を基本配合とし、調整した：甘藷デンプン 20g、ねりごま 20g、抹茶 1g。抹茶ごま豆腐の基本配合に対して、ショ糖（和光純薬）、果糖（和光純薬）またはトレハロース（トレハ<sup>®</sup>、株式会社林原）を一定割合（5%、15%または 25%）となるよう添加し、総量 200g となるよう純水で調製した抹茶ごま豆腐を試作した。調製後の抹茶ごま豆腐は 22g ずつ容器に分注し、100℃で 30 分間加熱殺菌した。試料を放冷後、-20℃で 24 時間凍結した試料を 25℃で自然解凍し、2.3.1 と同様の方法で破断強度を測定した。

## 3. 結果

### 3.1 加熱による抹茶成分の変動の検討

抹茶懸濁液中のクロロフィル類の量の変化を図 2 に示す。クロロフィル量は a と b とともに加熱温度及び加熱時間とともに減少した。クロロフィル a は 80℃では 30 分後に 80%、110℃では 30 分後にほぼ 100% が消失した。クロロフィル b は 80℃では 30 分後に 50%、110℃では 60 分後に約 96% が消失した。フェオフィチン a 量は 100℃30 分で、フェオフィチン b 量は 80℃10 分で 2 倍量に増加した。

### 3.2 抹茶ごま豆腐の変色抑制効果の確認

抹茶ごま豆腐への添加剤による変色抑制効果の結果を図 3 に示す。ほとんどの試験区で  $a^*$  値がマイナス（緑）からプラス（赤）へと転じ、加熱後の試料は赤褐色の入った緑色となった。D アルブミン及び G フェルラ酸試験区は  $a^*$  値がプラス（赤）までは上昇しなかったが、十分に変色を抑制することはできなかった。

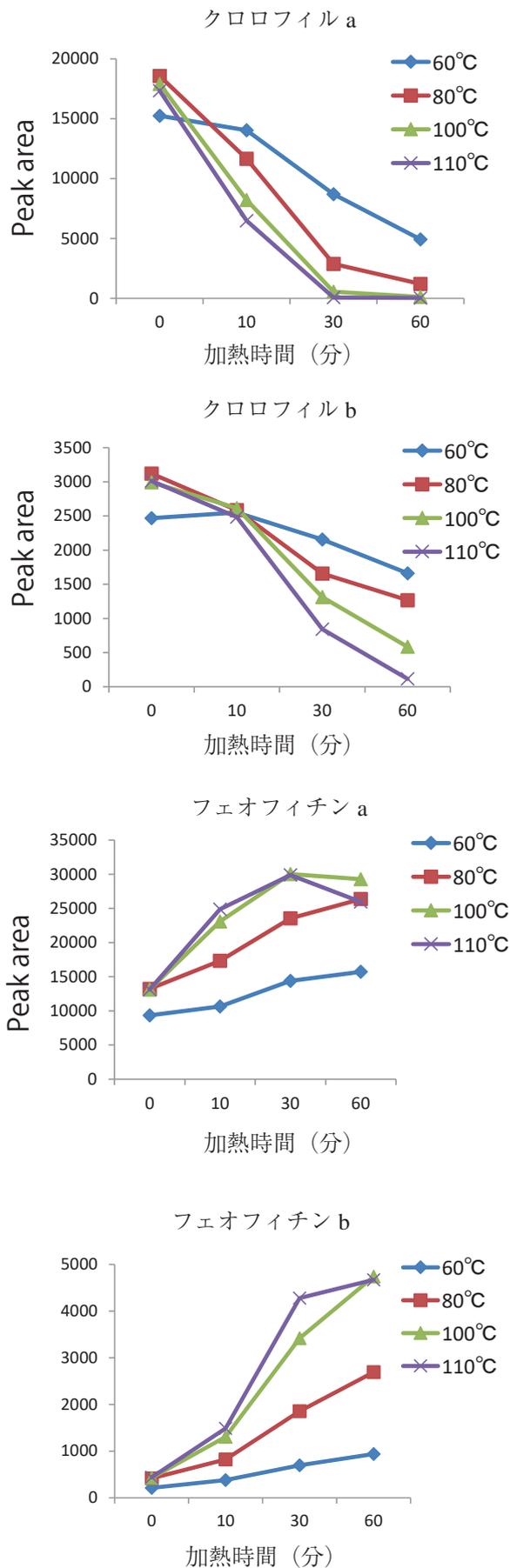
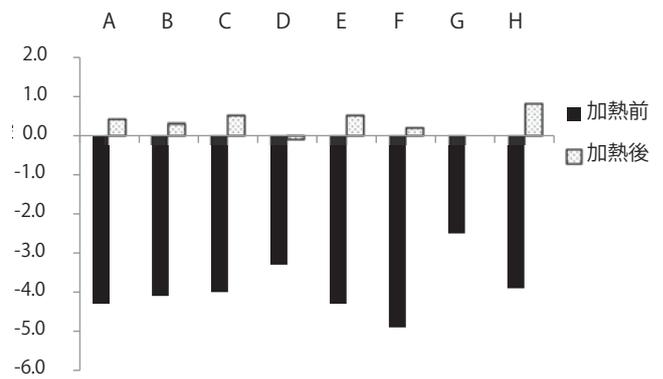


図2 抹茶懸濁液中のクロロフィル類の量変化



A 無添加、B 塩化マグネシウム（無水）、C カゼインナトリウム、D アルブミン（卵由来）、E たん白粉末（大豆由来）、F アスコルビン酸ナトリウム、G フェルラ酸、H 脂肪酸グリセリン及び大豆レシチン

図3 抹茶ごま豆腐の色調変化

### 3.3 冷凍抹茶ごま豆腐の品質維持効果の確認

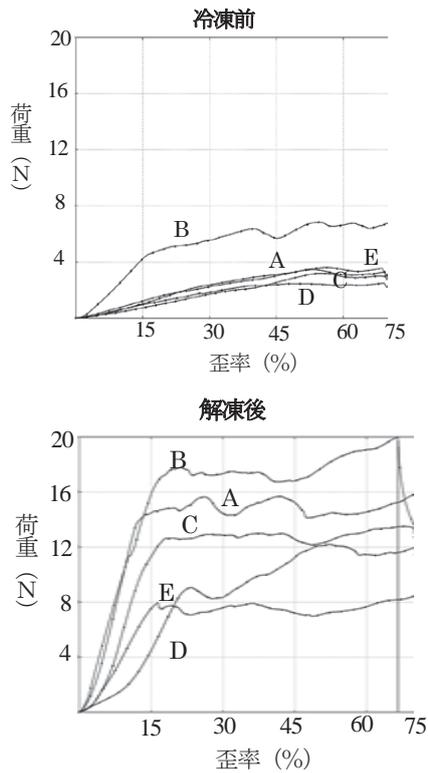
#### 3.3.1 多糖類の効果

増粘多糖類を添加した抹茶ごま豆腐を調製後、100℃で30分間加熱殺菌したときの冷凍前及び解凍後の物性変化を図4に示す。すべての試験区において解凍後の破断強度は増大したが、Eカードラン添加区における歪率20%時の破断強度は他の試験区と比べると低く、柔らかい食感であることが示唆された。

#### 3.3.2 糖の効果

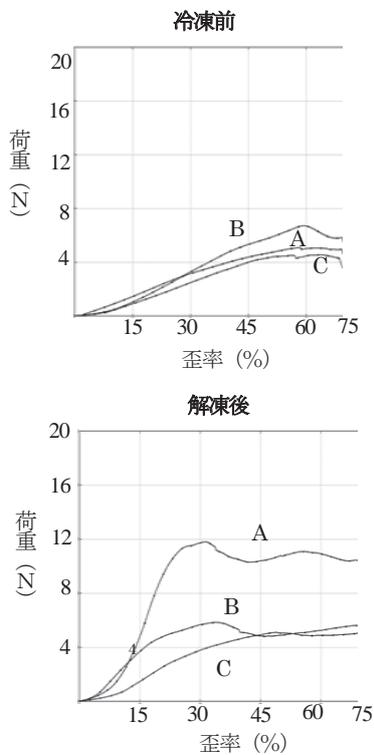
糖を25%添加した抹茶ごま豆腐を調製後、100℃で30分間加熱殺菌したときの冷凍前及び解凍後の物性変化を図5に示す。すべての試験区において解凍後の破断強度は増大した。各歪率（20%及び50%）における破断応力を表1に示す。歪率20%での破断応力は果糖、ショ糖、トレハロースの順に高いが、歪率50%時にはショ糖とトレハロースは同程度の強さとなった。ショ糖添加区では破断初期に最大破断強度に到達したのに対し、トレハロース添加区ではゆるやかに最大破断に到達した。ショ糖添加と比較して、トレハロースを添加するともっちりとした食感となることが示唆された。

トレハロース添加量の違いによる抹茶ごま豆腐の物性変化を図6に示す。添加量が増加するほど破断強度は低下した。ショ糖及び果糖においても、添加量の増加に対して破断強度は低下した（データ省略）。



A 無添加、B カップカラギナン、C イオタカラギナン、  
D キサンタンガム、E カードラン

図4 多糖類添加による抹茶ごま豆腐の物性変化



A ショ糖、B 果糖、C トレハロース

図5 糖添加による抹茶ごま豆腐の物性変化

表1 糖を添加した際の各歪率における  
抹茶ごま豆腐の破断応力 (Pa)

	歪率 20%	歪率 50%
ショ糖	2.34E+04	2.43E+04
果糖	4.42E+04	5.36E+04
トレハロース	1.21E+04	2.51E+04

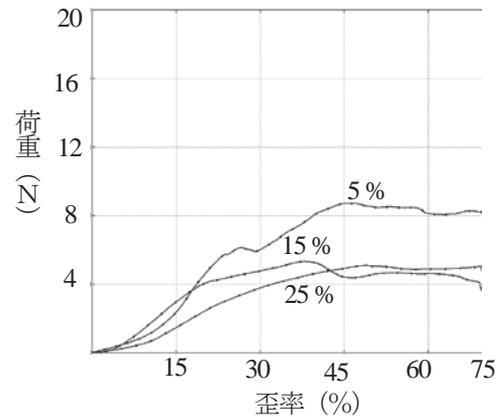


図6 トレハロース添加量の違いによる抹茶ごま豆腐の物性変化

#### 4. 考察

##### 4.1 加熱による抹茶成分の変動の検討

クロロフィル a の構造式を図7に示す。クロロフィルはポルフィリンに各種側鎖が付き、中心にマグネシウムが配位した構造をもつ。加熱によりクロロフィル量が減少し、フェオフィチン量が増加したのは、クロロフィルから中心金属であるマグネシウムが脱離し、フェオフィチンとなることで、クロロフィル量が減少しフェオフィチン量が増加したものと考えられる。

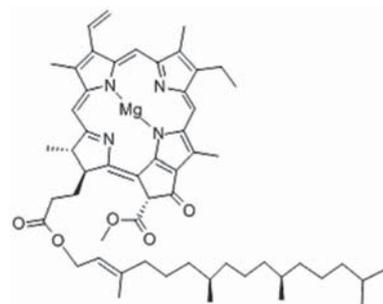


図7 クロロフィル a の構造式

##### 4.2 抹茶ごま豆腐の変色抑制効果の確認

フェルラ酸は食品の退色・変色防止効果を期待された酸化防止剤として食品加工に使用されていることが

ら、抹茶の変色にも効果を示したものと考えられる。アルブミンに若干の変色抑制効果は見られたのは、クロロフィルと結合しクロロフィル結合タンパク質として何らかの作用を示した可能性があるが、作用機序については不明である。

#### 4. 3 冷凍抹茶ごま豆腐の品質維持効果の確認

##### 4. 3. 1 多糖類の効果

ごま豆腐を冷凍解凍処理すると弾力のない硬い食感となる。増粘多糖類には冷凍解凍耐性があると報告<sup>[3]</sup>されている。デンプンの増粘作用を補強することによる物性改善の効果を検討したが、今回はいずれも物性の改善効果は得られなかった。

##### 4. 3. 2 糖の効果

本研究において試作したごま豆腐には、デンプンが使用されている。冷凍解凍時にデンプンの老化が進行することで、食感の低下など品質の劣化が起こる。老化はデンプンの直鎖構造であるアミロース部分の水分子が抜け、アミロースどうしが水素結合により会合することによって起こる。トレハロースはデンプン鎖中に分散している水分子と入れ代わることで、アミロース間の水素結合生成を阻害し、デンプンの老化を抑制するのではないかと考えられている<sup>[4]</sup>。トレハロースを25%添加することで、適度な柔らかさを有しながらデンプンの老化抑制にも効果を示したのではないかと考えられる。

## 5. 結 言

抹茶成分である緑色のクロロフィルは60℃の加熱でも褐色のフェオフィチンへと変化することから、食品を加熱殺菌すると容易に変色することが考えられる。変色防止のために添加剤について検討したが、変色抑制することは困難であった。一方、増粘多糖類や糖を添加し、冷凍解凍によるデンプンの老化抑制効果について検討した結果、トレハロースを添加することでデンプンの老化を抑制でき、解凍後の食感を改善することができた。

## 参考文献

- [1] 国立社会保障・人口問題研究所：日本の将来推計人口（平成29年推計）、2017.
- [2] Kohata, K., Hanada, K. and Horie, H: High performance liquid chromatographic determination of

pheoforbide-a and its related chlorophyll derivatives in Tea Leaves. Food Sci. Technol. Int. Tokyo, 4 (1), 80-84, 1998.

- [3] 越智敬志：ハイドロコロイドの食品工業への応用、食品工業 34(14), 18-30, 1991.
- [4] 福田恵温：トレハロースの開発とその応用吉備国際大学研究紀要（医療・自然科学系）第29号、41-49, 2019.

# 乳酸発酵並びに酵素利用技術を用いた機能性食品の開発

食品・環境科 主任研究員 玉屋 圭  
応用技術部 部長 河村 俊哉  
有限会社伊東精麦所 代表取締役 伊東 清一郎

大麦は九州地域で広く生産されており、味噌、焼酎などの原料として利用されている。通常は、外皮などを搗精加工して得られる胚乳部（精白麦）を食用として用いているが、この加工工程で発生する外皮、果皮、種皮などを含む大麦糠は家畜用の飼料として活用されているに過ぎない。

そこで本研究では、大麦糠の利用拡大を目的として、複数の搗精加工機を用いて各種の歩留率の糠を調製し、含有されるポリフェノールなどの機能性成分を測定した。

## 1. 緒言

近年、食生活の欧米化とともに、がん、循環器系疾患、肥満、アレルギー性疾患などの生活習慣病が若年から老年層にわたって増大している。

この状況から、食による疾病予防に対するニーズは依然として高く、機能性食品の市場は6432億円（特定保健用食品；2018年度）と大きな規模を保っている。2015年4月から機能性表示食品制度も開始され、今後の高齢化の進展や医療費の増大を考慮すると、疾病リスクを軽減する機能性食品の開発は新事業の創出及び育成に繋がると考えられる。

また、機能性食品素材には健康機能だけでなく安全性の担保も強く求められる。この観点から、原料産地の明確化は重要であり、県産の地域資源を用いての機能性食品開発はニーズが高いものと考えられる。

そこで、九州地域で広く生産されており、味噌、焼酎などの原料として利用されている大麦に着目し、検討素材とした。近年は、含有される $\beta$ -グルカンの健康機能により注目が集まり、更なる利用が期待されている。

大麦は、外皮などを搗精加工して得られる胚乳部（精白麦）を食用として用いているが、この加工工程で発生する外皮、果皮、種皮などを含む大麦糠は家畜用の飼料として活用されているに過ぎない。

本研究では、大麦糠の利用拡大を目的として、複数の搗精加工機を用いて各種の歩留率の糠を調製し、含有されるポリフェノールなどの機能性成分を測定した。

## 2. 実験方法

### ① 試供材料

大麦品種は、サチホゴールド（佐賀県産）を用いた。大麦糠の調製は、(有)伊東精麦所に設置されている横型大麦搗精機を用いて行った。

原麦を1～10号機まで直列に設置された搗精機に投入し、各機から排出される糠を採取した。本操作により得られた糠を試料として、以下の項目を測定した。

### ② 大麦糠からの抽出液の調製

粉碎した大麦糠粉末0.5gに対して、80%エタノール40mlを加え、16時間暗所で放置後、遠心分離し、上清を得た。残渣に再度80%エタノール7mlを加え攪拌して得られた上清と先に得られた分とを合わせて50mlに定容した。

### ③ 総ポリフェノール量の測定

総ポリフェノール量の測定はフォリン・デニス法<sup>1)</sup>により測定した。脱イオン水1.6mlを添加した試験管に、①で得られた80%エタノール抽出液100 $\mu$ Lを加え、次いでフォリン・デニス試薬100 $\mu$ L、飽和炭酸ナトリウム溶液200 $\mu$ Lを添加して30分間反応を行った。その後、760nmでの吸光度を測定し、乾燥重量100gあたりのクロロゲン酸相当量として算出した。

### ④ フェルラ酸の測定

(総フェルラ酸) 大麦糠に含まれる総フェルラ酸の測定は、西澤らの方法<sup>2)</sup>により行った。粉碎した大麦糠0.1gに0.5Mの水酸化ナトリウム5mLを添加し、均一な懸濁液になるまで攪拌を行った。本溶液を60℃に90分間保持し、加水分解を行った。本操作により、エステル結合していたフェルラ酸が遊離する。次いで、1.0Mの塩酸溶液を5mL添加し、酸性にした溶液に対して、80%濃度になるようにエタノールを加え、

50 mL に定容した。この溶液を逆相 HPLC に供し、総フェルラ酸を測定した。HPLC の測定条件は以下のものである。

カラム ; Waters ACQUITY UPLC BEH C18 カラム (直径 2.1 mm × 100 mm)、流速 ; 0.3 ml/min、測定波長 ; 325 nm、溶離液 ; A; 0.2 % ギ酸、B; アセトニトリル (グラジエント ; B: 1% → 25%, 30 分)

(遊離フェルラ酸) 大麦糠に遊離状態で存在するフェルラ酸の測定は松田らの方法<sup>13)</sup>により行った。粉碎した大麦糠 0.1 g に 0.5 M の蒸留水 5 mL を添加し、攪拌した。本溶液を 60 °C に 90 分間保持し、抽出を行った後、1.0 M の塩酸溶液を 5 mL 添加した。さらに、エタノールを 80 % 濃度になるように加え、50 mL に定容した。この溶液を逆相 HPLC に供し、遊離フェルラ酸を測定した。

#### ⑤ フラバノール (カテキン + プロアントシアニジン) の測定

フラバノールの定量は、カテキンおよびプロアントシアニジンの C8 位の炭素に結合する 4-dimethylaminocinnamaldehyde (DMACA) を検出試薬<sup>14)</sup>として実施した。粉碎した大麦糠 0.3 g にメタノール 45 mL を添加し、16 時間暗所で放置した。その後、遠心分離により得られた上清を 50 mL に定容し、試験溶液とした。試験溶液 200 μL に検出試薬溶液 (0.1 % DMACA / 0.12N HCl - メタノール) を加えて混合し、室温に 10 分間放置した後に、640 nm で吸光度を測定した。なお、乾燥重量 100 g あたりのフラバノール量を (+) - カテキン相当量として算出した。

#### ⑥ DPPH ラジカル消去活性

DPPH ラジカル消去活性の測定は沖らの方法<sup>15)</sup>に準じ、DPPH 溶液の 520 nm における吸光度を 96 穴マイクロプレートリーダー法にて測定した。DPPH ラジカル消去活性は乾燥重量 1 g あたりの Trolox 相当量として算出した。

### 3. 結果

#### ① 大麦糠の調製と精麦率の算出

今回の試験に用いた大麦糠は、各々の搗精機が原麦を精麦して排出したものを採取して得られた。通常の前麦では、各機で得られた糠は移送ラインによりタンクに送られた後、まとめて回収されるのに対して、今回の検討では各機から排出される糠を直接採取する方式を採用した。各搗精機での歩留率を表 1 に示した。なお歩留率は、精麦により得られた丸麦の原麦に対す

る重量の割合を示している。算出は以下の式を用いた。  
歩留率 = (各搗精機から得られた大麦 100 粒の平均重量 (g)) / (搗精前の原麦 100 粒の平均重量 (g)) × 100

表 1 各搗精機での歩留率の算出

搗精機 (号機)	歩留率 (%)
3	93
4	89
5	87
6	86
7	85
8	82
9	80
10	78

表 1 に明らかなように、搗精機による精麦が進行すると糠の除去が進む結果、生成する丸麦の割合を示す歩留率の値は小さくなっていった。外皮、果皮、種皮などの部分が削られて、食用部である胚乳が得られた結果と考えられた。また、今回の検討に用いた搗精機は、10 号機による操作終了時に歩留率が 70 ~ 80 % となるように設定したものであった。精麦した結果を見ると、10 号機での歩留率は 78 % であり、想定される範囲の値であることが確認された。なお、今回のサチホゴールデン品種の精麦については、麦のかたさなどの状態を考慮し、1 号機からではなく、3 号機からの搗精を行った。

#### ② 大麦糠の総ポリフェノール量

各精麦段階で得られる大麦糠に含まれる総ポリフェノール量を表 2 に示した。ポリフェノール量は歩留率が 93 % のときに、1100 mg/100 g と最も高い含量を示した。その後、87 % まではほぼ 1000 mg/100 g の含量を保っていたが、歩留率が小さくなるにつれて総量は徐々に低下し、78 % の歩留率では 680 mg/100 g 程度であった。

この結果は、歩留率が高い段階、すなわち外皮などが精麦される段階で得られた糠がポリフェノールを多く含むことを示していた。食用部である胚乳がある中心部分よりも、外皮などの皮にポリフェノールが多く含まれていることを確認した。穀類のポリフェノール含量としては、黒米や赤米などの有色米についての報告<sup>16)</sup>がなされており、その含量は 330 ~ 1220 mg/100 g - 乾燥重量の範囲にあった。また、当センターでは県産のばれいしよに含まれるポリフェノール量を測定<sup>17)</sup>

表2 各種の歩留率で得られる大麦糠の  
総ポリフェノール量

歩留率 (%)	総ポリフェノール量 (mg/100 g- クロロゲン酸相当量)
93	1100
89	1090
87	950
86	720
85	840
82	740
80	570
78	680

しており、160～800 mg/100 g - 乾燥重量の範囲であった。これら値と比較しても、大麦糠の本成分含量は高いレベルにあることが判明した。

### ③ 大麦糠のフェルラ酸含量

②での検討の結果、大麦糠が高いポリフェノール含量を有することが明らかになった。

そこで、糠のポリフェノールを構成する成分を検討するため、その一つであるフェルラ酸を測定した。フェルラ酸は穀類の細胞壁に含まれるフェノール酸の一種であり、その多くが食物繊維のアラビノキシランとエステル結合した状態で存在している。フェルラ酸はいくつかの報告で抗酸化性を有することが示されており、さらにラットの消化器系から循環器系に吸収されることも確認<sup>12)</sup>されていることから、生体内での抗酸化作用を発揮することが示唆されている。

本検討では、大麦糠に含まれるフェルラ酸含量を明らかにするため、糠を水酸化ナトリウム溶液により加水分解し逆相 HPLC 法に供することにより総フェルラ酸量を測定した。

また、熱水抽出した試料を同様に HPLC 法に供することにより、遊離フェルラ酸量を測定した。

表3に、大麦糠に含まれるフェルラ酸の測定結果を示した。歩留率93%で得られる糠が、総量及び遊離型のどちらにおいても最も高い含有値を示した。特に、総フェルラ酸量は225 mg/100 gと高値であり、報告されている押麦<sup>12)</sup> (34 mg) の6倍の数値であった。

さらに、歩留率が小さくなるほどフェルラ酸量は総量、遊離型ともに低下し、②の総ポリフェノール量の結果と同様の傾向であった。歩留率93%の試料では総ポリフェノール量は1100 mg/100 gであり、それに占めるフェルラ酸総量 (225 mg/100 g) の割合は20%

表3 大麦糠に含まれるフェルラ酸含量

歩留率 (%)	総フェルラ酸 (mg/100 g)	遊離フェルラ酸 (mg/100 g)
93	225	10.8
89	174	8.8
87	170	5.4
86	118	3.5
85	92	4.1
82	77	2.1
80	68	1.6
78	64	1.5

程度であった。

また、遊離型のフェルラ酸の全体量に対する割合は約5%であり、したがって本成分の95%は細胞壁に結合していることを確認した。

### ④ フラバノール (カテキン+プロアントシアニジン) の測定

③の検討で、ポリフェノールの一種であるフェルラ酸が大麦糠に多く含まれることを明らかにした。さらに、糠のポリフェノール成分を明らかにするため、カテキンやプロアントシアニジンを主とするフラバノールをその検出試薬である DMACA を用いて測定した。

その結果、歩留率93%の糠において、含まれるフラバノール量は最も高い値 (470 mg/100 g) を示し、その後87%まで同程度の数 (450 mg/100 g) を有していた。②の総ポリフェノール量、③のフェルラ酸含量と同様に、歩留率が小さくなるほど、フラバノール含量は低下する傾向にあった。

歩留率93%の試料では総ポリフェノール量は1100 mg/100 gであり、それに占めるフラバノールの割合は43%と算出され、フェルラ酸 (20%) よりも高い割合を示していた。

フラバノールに分類されるプロアントシアニジンは、大麦にも含まれることが報告<sup>13)</sup>されており、カテキンから構成される二量体、三量体が主であることがわかっている。大麦プロアントシアニジンの機能は未だ不明な点が多いが、他食品素材 (ブドウ種子、カカオなど) に含まれるプロアントシアニジンは抗酸化、糖代謝促進作用<sup>14)</sup>などを有することが報告されている。大麦に含まれるポリフェノールとしては、プロアントシアニジンを含むフラバノールは、フェルラ酸よりも含有量が高いこともあり、機能が発揮されることが期待できると考えられた。

### ⑤ DPPH ラジカル消去活性の測定

表4 各種の歩留率で得られる大麦糠のフラバノール量

歩留率 (%)	フラバノール量 (mg/100 g- (+)-カテキン相当量)
93	470
89	450
87	440
86	320
85	280
82	310
80	250
78	260

これまでの検討で、大麦糠が抗酸化性を有するポリフェノール、特にフェルラ酸やフラバノールを豊富に含有することを明らかにした。次いで、糠の抗酸化性を検討するために、DPPH ラジカル消去活性を測定した。表1に、各歩留率の大麦糠の有する DPPH ラジカル消去活性を示した。

②、③、④の検討で得られた結果と同様に、歩留率93%の糠が最も高いラジカル消去活性を示した。89%の試料も93%とほぼ同等の活性の高さを有していたが、歩留率が低下していくほど活性は低いものとなっていた。

これは、外皮などを含む高い歩留率の糠がフェルラ酸、フラバノールなどの抗酸化性を有するポリフェノールを多く含有し、その結果優れたラジカル消去活性を発揮したと考えられた。

表5 各種の歩留率で得られる大麦糠のDPPH ラジカル消去活性

歩留率 (%)	DPPH ラジカル消去活性 ( $\mu$ mol-Trolox/g)
93	470
93	470
89	450
87	440
86	320
85	280
82	310
80	250

#### 4. 結 言

本研究ではまず、サチホゴールデン品種の搗精機ごとの歩留率と総ポリフェノール量との関係を検討し

た。その結果、93%の歩留率において、高いポリフェノール含量(1100 mg/100 g)を有することが判明した。しかしながら、搗精を進めていくほど、含量は低下(600~700 mg/100 g)していた。

次いで、糠のポリフェノール成分を明らかにするため、大麦糠に含まれるフェルラ酸を測定したところ、歩留率93%で得られる糠が、総量及び遊離型のどちらにおいても最も高い含有値を示した。特に、総フェルラ酸量は225 mg/100 gと高値であった。

さらに、カテキンやプロアントシアニジンを中心とするフラバノールを測定した結果、歩留率93%の糠において、含まれるフラバノール量は最も高い値(470 mg/100 g)を示し、その後87%まで同程度の数値(440 mg/100 g)を有していた。総ポリフェノール量、フェルラ酸含量と同様に、歩留率が小さくなるほど、フラバノール含量は低下する傾向にあった。

また、ポリフェノール各種成分は抗酸化性を有すると考えられることから、糠の有する機能を明らかにするため、DPPH ラジカル消去活性を測定した。最も高い含有量を示した歩留率93%の糠が中でも高いラジカル消去活性を示した。89%の試料も93%とほぼ同等の活性の高さを有していたが、歩留率が低下していくほど活性は低いものとなっていた。この結果は、外皮などを含む高い歩留率の糠がフェルラ酸、フラバノールなどの抗酸化性を有するポリフェノールを多く含有し、その結果優れたラジカル消去活性を発揮したためと考えられた。

今回の試験に用いた大麦糠は、各々の搗精機が原麦を精麦して排出したものを採取して、得られた。通常、精麦では、各機で得られた糠は移送ラインによりタンクに送られた後、まとめて回収される。これまでの報告では、カナダ産の大麦品種から得られる歩留率80%から90%の糠をまとめて原料として、有機溶媒による抽出物の抗酸化性を検討した例<sup>8)</sup>は見られる。しかしながら、各機から得られる糠に含まれるポリフェノール成分を直接測定した例は認められない。

今回の検討で明らかになった歩留率を選択することにより、高ポリフェノール含量の大麦糠を獲得できることが明らかになった。さらに、獲得した糠に溶媒や分画カラムなどの各種方法を適用することで、機能性成分を高含有する抽出物を製造することも可能となる。

本研究では、今後乳酸菌などの微生物発酵、酵素利用といった手法を用いて、高付加価値の抽出物やエキ

スの開発を実施していく。

#### 参考文献

- [1] 津志田藤二郎：食品機能研究法，318-322, 光琳 (2002).
- [2] 西澤千恵子、太田剛雄、江頭祐嘉合、真田宏夫：日本食品科学工学会，45 (8), 499-503 (1998)
- [3] 松田茂樹、工藤康文：日本醸造協会誌，100-106 (2001).
- [4] 柳沢貴司、神山紀子、阿部大吾、長嶺敬、高橋飛鳥：大麦粉のフラバノールおよび総ポリフェノール含量を簡易に定量する方法，近畿中国四国農業研究センター 2010 年の成果情報，農研機構 HP.
- [5] 沖智之、増田真美、古田收、西場洋一、須田郁夫：日本食品科学工学会，48 (12), 926-932 (2001).
- [6] 伊藤史朗、水口聡、石々川英樹：愛媛県農林水産研究所報告，2, 43-51 (2010).
- [7] 玉屋 圭、芋川あゆみ，ほか 2 名：有色ばれいしょの加工品開発 長崎県工業技術センター報告，41, 7-10 (2011).
- [8] 玉川浩司、小林敏樹、飯塚崇史、池田彰男、小池肇、長沼慶太、小宮山美弘：日本食品保蔵科学会誌，25 (6), 271-276 (1999).
- [9] 山下陽子、芦田均、：化学と生物，54 (10), 747-752 (2016).

# 新規電解槽の開発

(多機能型電解槽の開発)

食品・環境科 専門研究員 大 脇 博 樹

国内における消費者の「魚離れ」が進行し、国民1人1日当りの水産物の摂取量が減少傾向にある一方、欧米での健康志向の高まりやアジア諸国、インド等の経済発展に伴って世界的には水産物の消費量が急速に増加し、水産物の貿易量も急速に増大している。今後も水産物の需要は拡大することが予測されるが、天然水産資源は有限であり、天然水産物の漁獲量は頭打ち状態となってきていることから、今後は養殖による生産量の増大が必要不可欠であり、生産された水産物を流通させるための鮮度保持技術の発展も重要な課題となる。また、生産された水産魚介類を生きたまま流通させる活魚輸送は、水産物の高付加価値化を目指す上では非常に重要である。

本研究開発では、海水電解を利用して海水魚介類を水換え無しで高密度・長時間飼育するための海水浄化システムの高度化を目指して、この海水浄化システムで利用するための新規電解槽の開発に取り組み、新たな構造の電解槽内の流れの解析や、この電解槽を使用した魚の飼育試験を実施して、その性能を確認した。

## 1. 緒言

世界的な水産物消費量の増大に伴って、世界的に漁業・養殖業を合わせた水産物生産量は増加し続けている。1960年以降、世界の漁業・養殖業を合わせた生産量は増加し続けているが、その中の漁船漁業生産量は1980年代後半以降頭打ち傾向が続いているのに対して、養殖業生産量は著しく伸びている<sup>1)</sup>。天然資源の管理の重要性が示されていることもあって、今後養殖業の重要性は増していくものと思われる。

一方国内では、魚介類消費量の減少が続くなどマーケットが小さくなっているが、水産物の輸出は増加傾向にあり、特に経済成長の著しい東アジアに対しても長崎県産の高品質な水産物の輸出拡大が求められている。鮮魚については、県内の民間企業が20年程前から中国市場への輸出を行っており、鮮度保持の観点から2005年から航空便が利用され、その後輸出量は年々増加して高級品として高値で取引されている。しかしながら、航空便での活魚輸送は困難であり、活きたまま輸送する技術・装置の開発が求められている。

これらの背景のもと、当センターでは、海水魚を水換え無しに陸上で飼育するために必要となる海水浄化技術として、海水電解を利用した海水浄化システムの開発を行い、活イカ輸送装置の開発や閉鎖循環式陸上養殖システムの構築に向けた検討を行っている。

本研究開発では、上記海水浄化システムに適用するための、陽極水と陰極水を分離でき、海水を電気分解する際に問題となる陰極表面へのスケール析出を抑制できる新たな構造の電解槽を開発することを目的とし

た。電解槽を流れる飼育水の流速を速くすることで、陰極表面のスケール析出抑制が可能であることを確認しているが、流速を上げるために流量を増やすことは飼育システム全体の海水循環量を増やすことになり、コスト等の問題から現実的ではない。そこで、電解槽を通過する流量を増やさずに陰極表面の流れを速くすることで陰極へのスケール析出抑制を行うことを目指した。

本年度は、考案した電解槽内の流れの可視化を行いコンピュータシミュレーション結果と照合すること、本電解槽に使用する隔膜の選定、試作した電解槽を使ったクエの飼育試験を行って、陰極表面に析出するスケールの析出状況の確認を行った。

## 2. 実験方法

### (1) 新規電解槽の構造

新たに開発・試作した電解槽の外観を図1に、内部構造のイラストを図2に示した。

電解槽の通水部には、外側に円筒形の陰極を、中心部に円柱状の陽極を配置し、その間に隔膜で覆った多数の貫通孔を有する塩化ビニル管(中筒)を設置して陰極水と陽極水が混合しない構造とした。飼育水は電解槽に流入する前に2流路に分岐し、陰極水は電解槽の側面から、陽極水は電解槽上部からそれぞれ流入する。陰極水側と陽極水側のそれぞれの流量は、電解槽に流入する前に設置したボールバルブを用いて制御した。陰極水の電解槽への流入部の断面積を小さく絞り、流入速度が速くなるよう工夫した。また、本年度は陰



図1 電解槽の外観

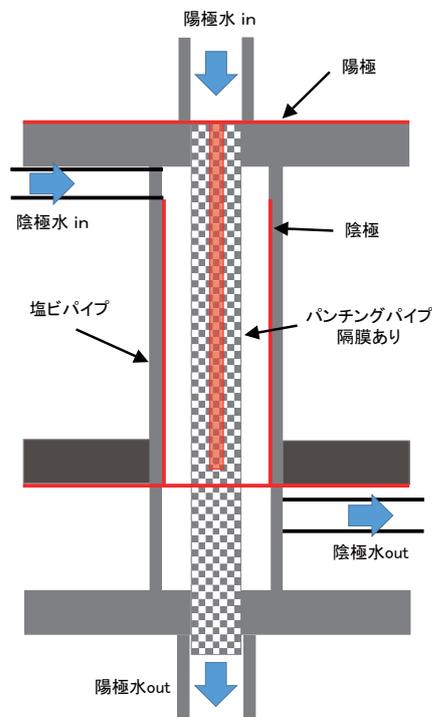


図2 電解槽内部構造イラスト

極と中筒間の流れを均質化するための部品を取り付けてスケール析出の抑制に取り組んだ。

## (2) 新規電解槽内の流れの解析と流れの可視化

電解槽側面から流速を速くした飼育水を陰極側に導入して、陰極と中筒間をらせん状の旋回流として流すことで流量を増やさずに流速を上げる工夫をした。

昨年度の報告書<sup>2)</sup>に記載した電解槽内の流れのシミュレーション結果にて、電解槽の陰極と中筒間でらせん状の旋回流が生じていること、電解槽出口付近ではそ

の流れが遅くなり、スケールの析出につながっていることを報告した。

本年度は、電解槽の最外筒となる部分を透明塩化ビニル管に置換した装置を製作し、流体内にトレーサ粒子（粒径0.6 mm～1.2 mmのネオライトサンド）を混入させて流れを可視化し、その粒子の2次元平面内の速度および方向を非接触で求める流体計測手法である粒子画像速度測定法（PIV：Particle Image Velocimetry）を用いて陰極側の流速を算出した。

## (3) 隔膜の選定

今回開発した電解槽では、飼育水のpH調整と溶存二酸化炭素濃度を下げる機能を付与するために、陽極水と陰極水を分離する必要があった。電解槽の構造を工夫することで隔膜を使用せずに陽極水と陰極水を分離することも可能であったが、陽極側の閉塞等のトラブルにより陰極水側に陽極水（オキシダントが含まれる）が混入すると、短時間で飼育魚が全滅する可能性が高いため、今回は隔膜を利用することにした。

隔膜に求められる物性は、海水魚を飼育する上で支障のない程度に陽極水と陰極水を分離できること、電解電圧が低いことである。今回は、株式会社ユアサメンブレンシステムの表1に示したA、B、Cの3種類の多孔質メンブレンフィルターを用いて検討を行った。

表1 評価した隔膜の物性

	A	B	C
厚さ (mm)	0.11	0.17	0.22
平均孔径 (μm)	0.4	2.5	—
電気抵抗 (Ω・dm <sup>2</sup> )	0.0007	0.0003	0.0018
透水性能 <sup>注)</sup> (mL/min/cm <sup>2</sup> )	24	272	0.05

(注：50.7 kPa, 25 °Cにおける評価)

## (4) 新規電解槽を使用したクエの飼育試験とスケール析出状況の確認

図3に電解槽の評価を行うために行ったクエの飼育試験システムの外観を、図4にその流路図を示した。

使用したクエは約550 g/尾を20尾で計約11 kg、飼育水槽（200 L容）、沈殿槽、物理濾過槽（20 L）、泡沫分離装置（(株)プレスカ製FSR-002P）、温度コントロール装置（26 °Cに維持）（図4には記載無し）、前記電解槽、反応槽、活性炭槽、循環ポンプ、酸素供給装置を備えた飼育システムを構築して、15 L/分で飼育水を循環・浄化し、3日毎に飽食給餌を行いなが

ら水換え無しで1か月間飼育した。飼育水浄化のための電解電流値は適宜調整した。飼育水量は150Lであったため、クエの飼育密度は7.3%であった。1週間毎に電解槽を分解して陰極表面へのスケールの析出状況を確認した。



図3 クエの飼育試験システム外観

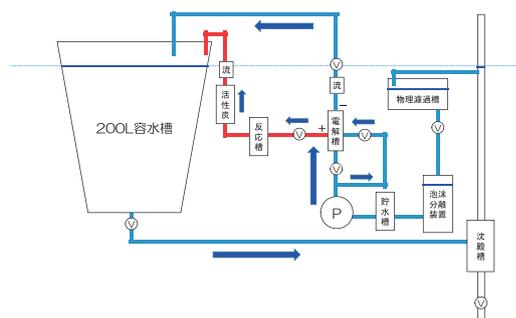


図4 クエの飼育試験システム流路図

### 3. 結果および考察

#### (1) 新規電解槽内の流れの解析と流れの可視化

コンピュータシミュレーション結果では、陰極側流量が1.5 L/minでは旋回流は起こらないが、2.5 L/min以上であれば旋回流が生じること、流量が大きくなるほど旋回流の速度は大きくなることが確認された。

図5に最外筒となる部分を透明塩化ビニル管に置換した装置を示した。この透明電解槽にトレーサ粒子を流して、高速度カメラで撮影した動画とPIVソフトウェアを用いて測定を行った。その結果、コンピュータシミュレーションで陰極と中筒間で確認された旋回流が起こっていること、流量が大きくなるほど旋回流の速度が大きくなることが確認された。

流速の計算結果と動画から得られた流速では一致し

ない点もあったものの、横軸方向の流速等は一致しており、今回の解析方法が電解槽の構造を検討する際に有力なツールとして活用できることが確認できた。

#### (2) 隔膜の選定

隔膜の選定に際しては、図4に示したシステムを使用した。飼育魚は入れずに評価を行った。

表1に示した3種の隔膜を使用して、電流値を0.3 Aから1.0 Aまで変化させた際の電圧を測定した結果を図6に示した。平均孔径が最も大きく電気抵抗が最も小さかったBが最も電解電圧が低かったが、その差は小さく、今回の隔膜の選定には電解電圧を考慮する必要がなかった。

AとCは陰極側出口のオキシダント濃度は検出限界以下であり、陽極水と陰極水の混合は認められなかったが、平均孔径が最も大きかったBを使用した際には、陰極側出口で微量のオキシダントが検出されたことから、魚を入れた試験には使用できないことが確認された。そこで、クエの飼育試験ではCの膜を使用した。

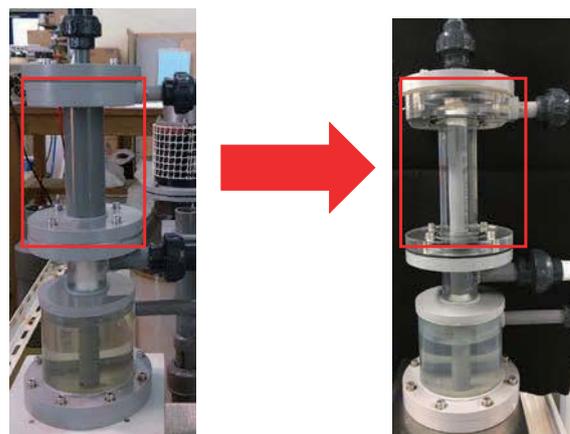


図5 透明電解槽の制作

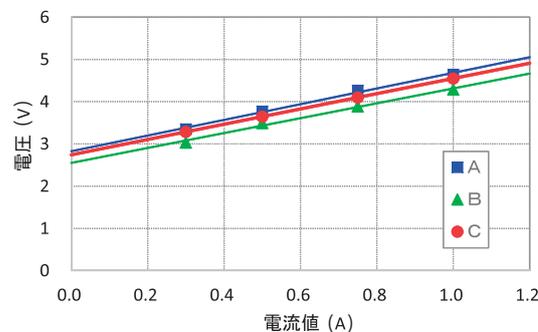


図6 隔膜の電流値－電圧曲線

#### (3) 新規電解槽を使用したクエの飼育試験とスケール析出状況の確認

1 か月間の飼育期間中、クエの斃死等の問題は発生しなかった。この間、飼育水中のアンモニア濃度が 0.5 ppm から 10 ppm の範囲で推移するよう電流値を調整した。

陽極水中の過剰のオキシダントは、電解槽と飼育水槽の間に設置した活性炭槽で分解される。電解槽で分離された陰極水は、活性炭槽を通過せずに飼育水槽に戻るため、オキシダントを含む陽極水との分離が不十分な場合は、飼育水槽中にオキシダントが流入することになるが、今回の試験中は飼育水中にオキシダントが混入することはない、陽極水と陰極水の分離が問題なく行われていたことが確認された。

電解槽は、1 週間に 1 度分解して陰極のスケール析出状況を目視にて確認した。昨年度の評価では、約 2 週間で電解槽出口付近の陰極表面に多量のスケール析出が確認されたが、今年度の改良した電解槽では 4 週間後でもほとんどスケールの析出が確認されなかったことから、その改良の効果を確認することができた。



上面（流入口付近）からの視点 下面（流出口付近）からの視点  
図7 対策前のスケール析出状況（2週間目）



上面（流入口付近）からの視点 下面（流出口付近）からの視点  
図8 対策後のスケール析出状況（4週間目）

#### 4. 結 言

2 年間実施した本研究開発により、陰極水と陽極水を分離でき、1 か月間以上メンテナンス不要な電解槽を開発することができた。陰極表面の流速を大きくすることでスケールの析出が抑制されることはわかっていましたが、通常の電解槽で流速を上げることはシステム

全体の流量を上げることと等しく、大容量の飼育水槽では実現できなかったが、本電解槽を利用することでこの相反する要求を満たすことが可能となった。

この電解槽を利用することにより、飼育水中の溶存二酸化炭素濃度のコントロールを行うこと、経時的な pH の低下を抑制することが可能となるため、今後の閉鎖循環式陸上養殖システムや長時間・高密度の活魚輸送システムへの適用が期待される。

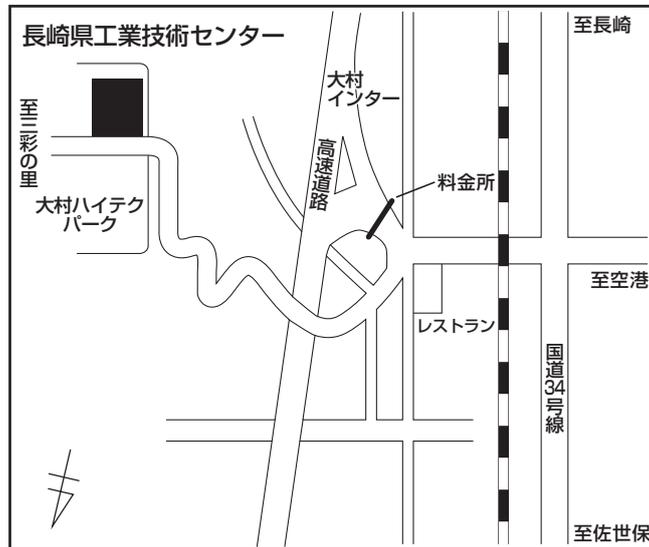
#### 謝 辞

電解槽内の流れの可視化を実施していただいた、独立行政法人国立高等専門学校機構 佐世保工業高等専門学校 物質工学科 城野祐生 准教授と物質工学科 山田雄士氏に謝意を表す。

#### 参考文献

- [1] “第 2 章 第 3 節 水産業をめぐる国際情勢” 水産白書, 平成 29 年度版, 水産庁, 2017, pp. 97-102.  
<http://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/29hakusyo/attach/pdf/index-13.pdf>, (参照 2018-7-20).
- [2] 大脇博樹：新規電解槽の開発 長崎県工業技術センター研究報告, No.47, pp.35-36, 2018.

# 位置図



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

発行日：令和元年10月1日

発行所：長崎県工業技術センター

〒856-0026 大村市池田2丁目1303番地8

TEL 0957-52-1133

FAX 0957-52-1136

ホームページ <http://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。