

I S S N 0916-6726

令和2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. 50

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
工業材料科 主任研究員	福田 洋 平
工業材料科 科 長	瀧 内 直 祐
食品・環境科 主任研究員	三 木 伸 一
2. AI を用いた監視装置の開発	5
機械システム科 科 長	田 口 喜 祥
機械システム科 研 究 員	久保田 慎 一
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	7
機械システム科 主任研究員	入 江 直 樹
4. 生体組成の非侵襲計測技術の開発	12
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
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	14
電子情報科 主任研究員	堀 江 貴 雄
6. 水素ガスの光学式検知技術の開発	16
電子情報科 主任研究員	田 尻 健 志
7. レーザー樹脂溶着の高品質化に関する研究	18
電子情報科 主任研究員	田 中 博 樹
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	21
工業材料科 専門研究員	重 光 保 博
9. 木型と鋳物砂の改善による鋳造品の品質向上	27
工業材料科 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
10. 海水魚用展示蓄養水槽の開発	31
食品・環境科 科 長	大 脇 博 樹

1 1. 県内食品産業の加工技術高度化に関する研究 33

食品・環境科	主任研究員	玉 屋 圭
応用技術部	部長	河 村 俊 哉
食品・環境科	主任研究員	横 山 智 栄
食品・環境科	研 究 員	井 内 智 美
食品・環境科	研 究 員	野 田 響 子

1 2. 微細気泡を活用した浄化・洗浄システムに関する研究 36

食品・環境科	主任研究員	三 木 伸 一
--------	-------	---------

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

(切削加工シミュレーションによる工具温度の見える化)

工業材料科 主任研究員 福 田 洋 平
工業材料科 科 長 瀧 内 直 祐
食品・環境科 主任研究員 三 木 伸 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①に関連し、切削加工シミュレーションによる工具温度の見える化について報告する。

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り、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）の開発に取り組むものである。

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た^[1]。本報では、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する。

2. シミュレーションによる工具温度の見える化

2. 1 工具温度解析の概要

専用ソフトウェアを用いた切削加工のシミュレーションを実施することで、切削加工時の工具温度を計算することができる。しかし、のこ刃状切りくずが生成される非定常な切削シミュレーションにおいて、数秒間におよぶ切れ刃近傍の詳細な温度分布を計算した場合、計算量が膨大となり、シミュレーションに多大な時間を要する。

そこで、図1に示すように微小時間の詳細な切削加工シミュレーションを実施し、被削材の最高温度およ

び工具との平均接触領域の情報をあらかじめ取得することによって、工具温度の解析を単純な伝熱解析に置き換える。詳細な切削加工シミュレーションにより取得した被削材の最高温度を表1、工具との平均接触領域を表2に示す。

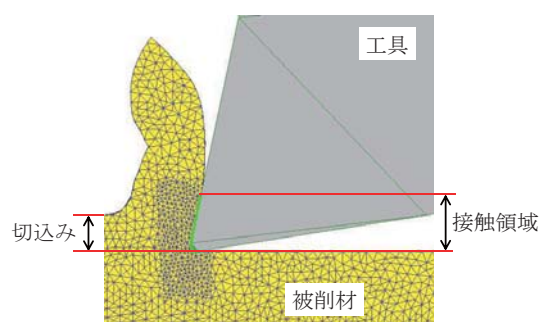


図1 切削加工シミュレーション

表1 工具温度解析に用いる被削材の最高温度

切削速度 m/min	被削材の最高温度（℃）	
	チタン合金	ニッケル合金
20	390	414
40	480	502
80	590	612
160	690	720

表2 工具温度解析に用いる接触領域

切込み mm	工具と被削材の接触領域（mm）	
	チタン合金	ニッケル合金
0.050	0.050	0.100
0.075	0.075	0.125
0.100	0.100	0.150
0.125	0.125	0.175

2. 2 解析条件

解析対象の工具は、 $\phi 12$ mm および $\phi 20$ mm の 4 枚刃超硬エンドミルとし、計算に用いるモデルは 1/4 軸対称の簡易モデルとした。図 2 に工具モデルと境界条件の設定を示す。

工具すくい面は切削油剤 (20°C) により冷却されるとし、熱伝達率を切削速度の関数 $hr=1350V^{0.5}$ とした。被削材との熱伝達率は、チタン合金で $300\text{ kW/m}^2\text{K}$ 、ニッケル合金で $200\text{ kW/m}^2\text{K}$ とした。なお、工具逃げ面は切削油剤による冷却効果が限定的^[2] とし、断熱面とした。

解析する切削条件を表 3 に示す。回転工具による切削のため、送り量が表 2 に示す切込みに相当するとし、切れ刃が被削材に食い込んでから抜けるまでの間の接触領域は一定であると仮定した。また、接触面の被削材温度は表 1 に示す被削材の最高温度とした。なお、すくい面における工具と被削材との摩擦による発熱は考慮していない。

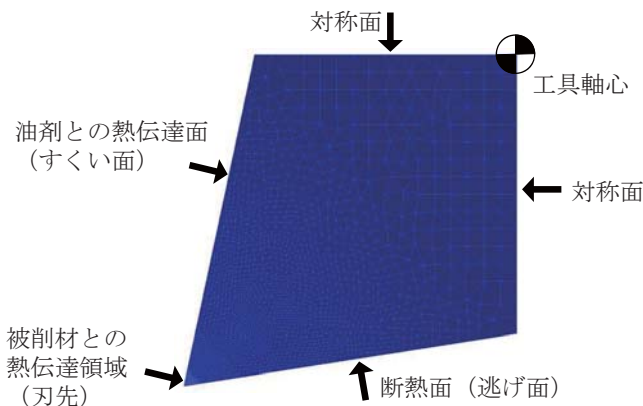


図2 工具モデル

表3 解析条件 (計 256 条件)

被削材	チタン合金、ニッケル合金
工具径(mm)	12、20
切削速度(m/min)	20、40、80、160
送り量(mm/tooth)	0.050、0.075、0.100、0.125
径方向切込み(mm)	0.1D、0.2D、0.3D、0.5D ※Dは工具径
解析対象時間(sec)	2

2. 3 解析結果

解析結果の一例を図 3 に示す。解析結果より切削時に上昇した工具温度は空転時に切削油剤により十分冷却されると考えられる。工具温度が工具摩耗および損

傷に最も影響を及ぼすと考えられ、解析対象時間内における最後のピーク温度を工具温度として評価する。

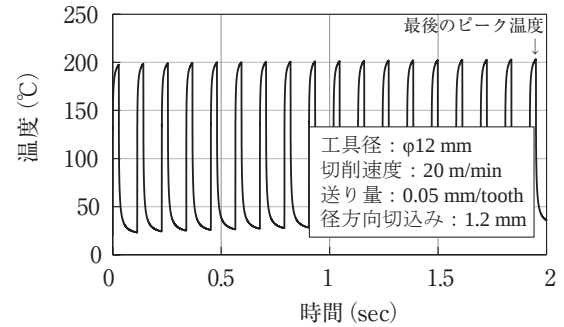


図3 解析結果 (工具温度)

2. 4 被削材の比較

チタン合金およびニッケル合金の解析結果、各 128 条件の工具温度の分布を図 4 に示す。各材料における工具温度の平均値は、チタン合金で 298°C 、ニッケル合金で 310°C であった。

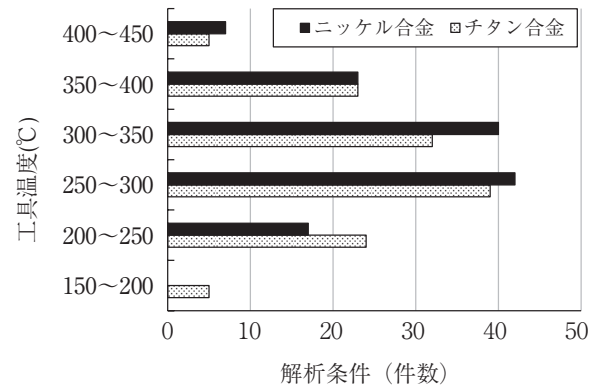


図4 被削材による工具温度の分布

2. 5 切削条件の比較

チタン合金の解析結果 128 条件について、図 5 に切削速度、図 6 に送り量、図 7 に径方向切込みのそれぞれが、工具温度に与える影響を示す。

切削速度 20 m/min の平均値は 236°C であり、能率 8 倍となる切削速度 160 m/min における平均値は 354°C であった。送り量 0.050 mm/tooth の平均値は 249°C であり、能率 2.5 倍となる送り量 0.125 mm/tooth における平均値は 339°C であった。径方向切込み $0.1D$ の平均値は 286°C であり、能率 5 倍となる径方向切込み $0.5D$ における平均値は 309°C であった。

これらの結果から、工具温度の上昇を抑えながら加工能率を高めるには、径方向切込みを大きく設定することが有効と考えられる。

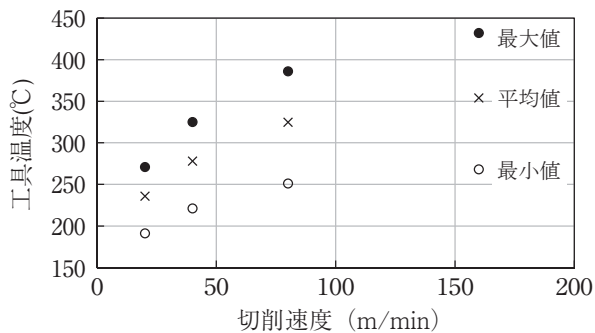


図5 切削速度の影響

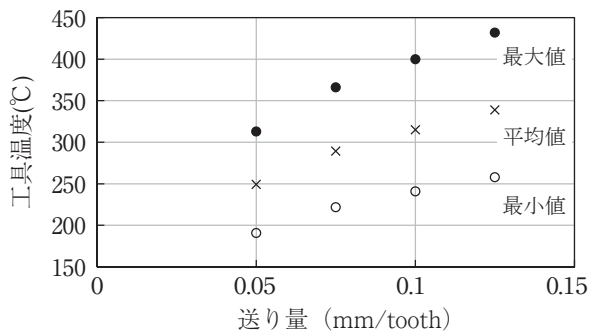


図6 送り量の影響

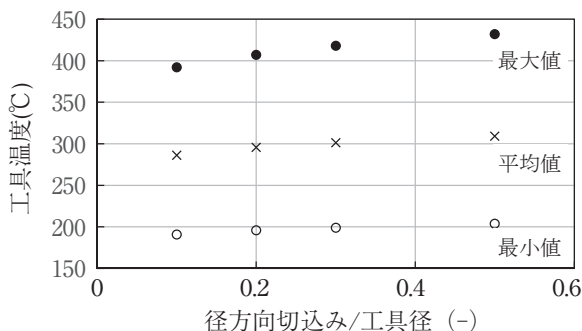


図7 径方向切込みの影響

3. 切削実験

3.1 実験条件

工具温度の上昇を抑えながら加工能率を高めるために径方向切込みを大きく設定することが有効であることを検証するため、切削実験を実施した。

切削実験の概要を図8に示す。肩削りの走査線加工により、ワークを上層から除去していく。切削条件は表4に示す条件を基準とし、①基準条件、②切削速度4倍の条件、および③径方向切込み4倍の条件で切削実験を実施し、工具の刃先状態を比較した。なお、切削実験に使用する工具は、突発的な損傷を抑制するため、切削速度20 m/minの条件で約30分の予備加工を実施した。

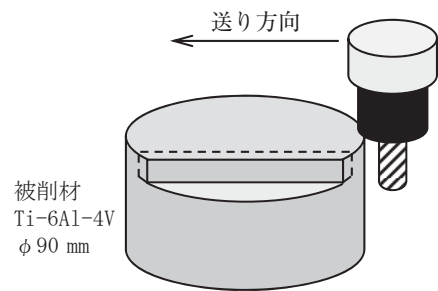


図8 切削実験概要

表4 基準となる切削条件

使用工具	ヘッド交換式エンドミル (三菱) ヘッド: IMX12C4HV120R05012 ホルダ: IMX12-U12N017L080C
工具径	φ12 mm
工具突出し	36 mm
切削速度	40 m/min
送り量	0.050 mm/tooth
軸方向切込み	4.0 mm
径方向切込み	1.2 mm (0.1D)
冷却方法	ノズルクーラント

3.2 実験結果

図9に、ワークを15層除去した後の工具刃先の状態を示す。切削速度を4倍にした場合は刃先が激しく損傷しているのに対し、同じ加工能率となる径方向切込みを4倍にした場合は安定した摩耗の進行となった。

①基準条件



②切削速度
4倍



③切込み
4倍



0.2 mm
↔

図9 刃先状態 (15層加工後)

①基準条件



③切込み
4倍



0.2 mm
↔

図10 刃先状態 (51層加工後)

切削実験を継続し、ワークを 51 層除去した後の工具刃先状態を図 10 に示す。基準条件に対し、径方向切込みを 4 倍にした条件では刃こぼれが生じているが、切削加工を継続するには十分な状態を保っている。

4. 高速仕上げ切削実験

4. 1 実験条件

今回実施した解析では、切削速度 160 m/min においても、送り量と径方向切込みを小さく設定することで、工具温度を 300℃ 以下に抑えることができる結果となった。これは、送り量と径方向切込みを小さく設定する仕上げ加工時において、従来よりも高い切削速度を適用することができる可能性を示唆するものであるため、高速仕上げ切削実験を実施した。

表 5 に実験条件を示す。切削距離が 220 m（実加工時間：約 4 時間 20 分）になるまで実験を実施した。

4. 2 実験結果

図 11 に仕上げ面の表面粗さを示す。評価面は壁面、測定方向は送り方向とし、評価長さは 8.0 mm、カットオフ値は 0.8 mm とした。高速切削加工条件での長時間加工であるが、表面粗さは良好な数値となった。

図 12 に実験後の刃先状態を示す。刃先の一部には刃こぼれが生じているが、切削加工を継続するには十分な状態を保っている。

5. 結 言

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み、下記の結果を得た。

- 1) 詳細な切削加工シミュレーションにより取得したデータを基に、工具温度の解析を単純な伝熱解析に置き換える手法を提案した。
- 2) 工具温度の解析結果より、工具温度の上昇を抑えながら加工能率を高めるためには径方向切込みを大きく設定することが有効であることを示した。
- 3) 送り量と径方向切込みを小さく設定する高速仕上げ切削加工を提案し、有効性を検証した。

謝 辞

本研究事業を推進するにあたり、長崎大学大学院工学研究科の矢澤孝哲教授、桃木悟教授、大坪樹助教、長崎大学情報データ科学部の小林透教授、荒井研一准教授、白濱謙弥氏、システムファイブ株式会社の佐藤康彦代表取締役、水野勇一部長と株式会社新田鉄工所

の松尾章弘専務に多大なるご協力とご支援をいただいた。

表 5 高速仕上げ切削加工条件

使用工具	ヘッド交換式エンドミル（三菱） ヘッド：IMX12C4HV120R05012 ホルダ：IMX12-U12N017L080C
工 具 径	φ 12 mm
工具突出し	36 mm
切 削 速 度	160 m/min
送 り 量	0.050 mm/tooth
軸方向切込み	4.0 mm
径方向切込み	0.4 mm
冷 却 方 法	ノズルクーラント

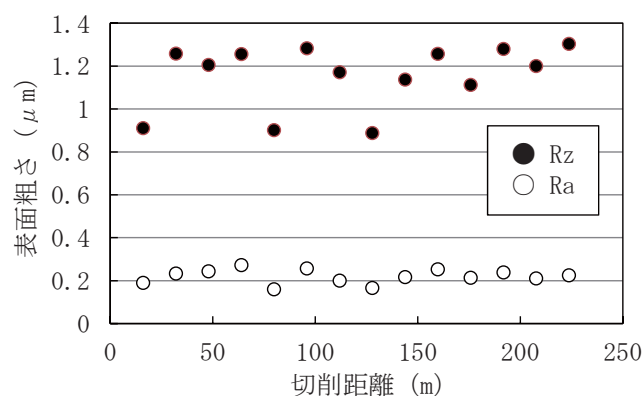


図 11 高速仕上げ切削加工による表面粗さ

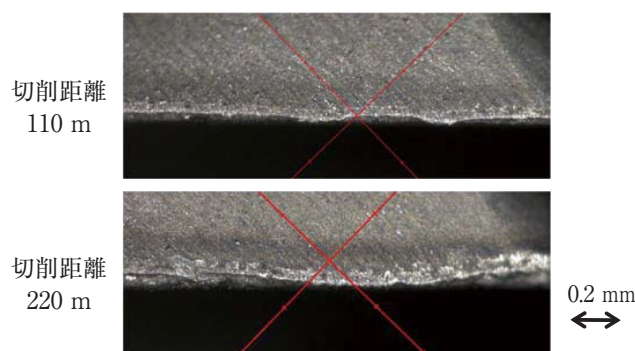


図 12 刃先状態（切削距離 220 m 加工後）

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 ほか：エンドミル逃げ面における水溶性切削油剤の冷却効果の検討、精密工学会九州支部佐世保地方講演会講演論文集、pp. 81-82, 2019.

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 研 究 員 久保田 慎 一

生産性を向上させるためには、機械装置の稼働状況を監視し、稼働率を上げることが必要となる。稼働率を上げるためには現在の稼働状況を把握する必要があるため、県内の企業からIoT（Internet of Things）技術を用いて工場内で稼働している機械装置を監視したいとの相談が増えている。IoTの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、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。また、近年AI（Artificial Intelligence）技術に関する研究が注目されており、様々な分野で応用され成果を上げている。

そこで、本研究開発では、県内企業が使用しているIoT機能が搭載されていない機械装置を対象として、機械装置本体に改造を加えずに稼働状況や保全予測を行うAIを用いた監視装置を開発することを目的とする。

1. 緒 言

近年、生産現場では、IoTやAI技術を用いた遠隔監視に関する開発や取り組みが注目されている。そのため、これまでもIoTを製造現場に活用するための研究開発が数多く報告されている^{[1]~[3]}。

このような中、長崎県内の企業からも、工場稼働している機械装置を監視したいとの相談が増えている。そのため、当センターでは、既存の機械装置において電流や振動を計測し、取得したデータから稼働状況を監視する装置の開発を行ってきた^[4]。

これまで試作した装置を用いて県内企業で運用試験をしていたところ、取り付けが難しいセンサの情報などを用いた監視を行いたいなどの要求があった。その中で、センサは取り付けられないが、機械装置の制御画面に稼働状況やエラー情報などが表示される場合があり、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ことが判明した。

そこで、本研究では近年性能向上が著しいAI技術を用いて、機械装置の制御装置画面から情報を収集すると共に、各種センサからの情報と併せて監視を行うAIを用いた監視装置を開発することを目的とする。

開発する装置のシステム構成図を図1に示す。この装置は、IoT機能が搭載されていない生産設備や工作機械に簡易に取り付け可能なセンサユニット部、センサユニット部やTVカメラの情報を基に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ため監視装置から制御装置を操作するエミュレータ部で構成される。令和元年度には、監視装置のハードウェア部を試作し、センサデータや画像データを収集する基本

プログラムを制作し、各種センサからのデータ収集、カメラ映像の処理、制御装置画面の操作が可能であることを確認した。

令和2年度はAI技術を用いるために、AI技術の導入と、プログラムの試作を行ったので報告する。

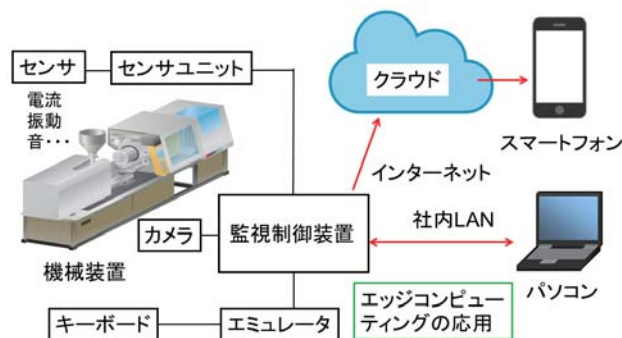


図1 システム構成

2. 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できることを目標としている。そのため、監視制御装置は安価で導入が容易なRaspberry PiやLATTEPANDAなどの組み込み型マイコンボードを用いて試作している。このような組み込み型マイコンボードは、通常のパソコンと比較して演算処理の能力が劣るため、AIの学習処理自体を行うことが難しい。そこで、別途学習装置を用意し、AIの学習処理は学習装置で実施し、学習結果を組み込み型マイコンボードに転送して使用することとした。製作した学習装置の仕様を表1に示す。

表1 学習用装置の仕様

OS	Windows10 Home
CPU	Intel® Core i7-10700F
メモリー	64 GB
GPU	NVIDIA® GeForce RTX 2080
ストレージ	SSD 2 TB

AIの学習処理は、SONYのNeural Network Consoleを使用して実施した。センサユニットやカメラで収集したデータを用いてAIの学習を行い、学習結果のみを組み込み型マイコンボードで使用する構成とした。

3. AI処理の結果

独自のデータを集めてAIを学習させる前に、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。

まず、TVカメラからのデータ処理を行うことを想定して、動画画像から物体認識を行うYOLOv3^[5]ライブラリの導入を行った。YOLOv3ライブラリを用いた物体認識の結果を図2に示す。

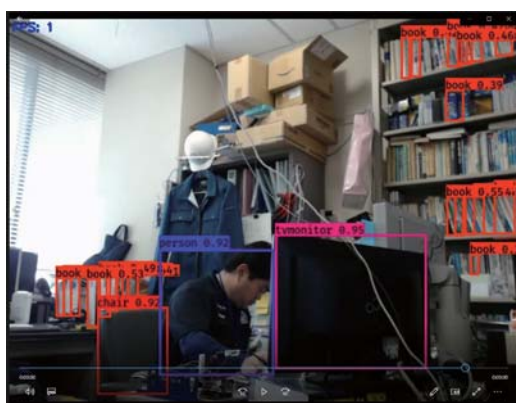


図2 物体認識結果

YOLOv3の学習済みのモデルを用いることで、動画画像から物体を認識し切り出すことが可能であった。しかし、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動作させることは難しいことが判明した。今後、独自のデータを用いて制御装置の画面から必要な箇所のみを認識して切り出すプログラムを開発する必要がある。

次に、センサユニットで収集したデータとTVカメラ画像を用いて機械装置を監視するプログラムを試作した。試作したプログラムを図3に示す。プログラムの制作にはPython3.7を用いた。

現状ではAIの学習が終わっていないため、稼働時間監視の機能しか無いが、今後TVカメラの映像とセンサユニットからの情報を用いたAI処理を追加し、

作業状況推定や故障予兆検出などの機能を追加したい。

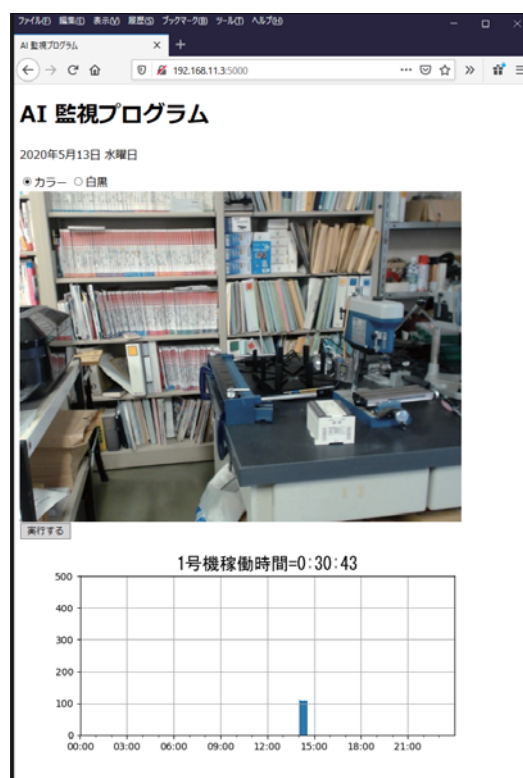


図3 監視プログラム

4. 結 言

生産設備や機械装置の監視を可能にするためにAI技術の導入に関する検討を行った。AI技術を用いた監視プログラムの試作を行い、AIの学習を行うためのデータ収集を継続している。今後収集したデータを基にAIの学習を行い、IoT機能が搭載されていない機械装置の故障予兆監視などが可能な監視装置を完成させたい。

参考文献

- [1] 成瀬：AI活用が期待される工場のIoT化、日本総研経済 Research Focus No. 2019-032, pp. 1-7, 2019-11.
- [2] 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、No. 48, pp. 5-10, 2019.
- [5] <https://pjreddie.com/darknet/yolo/>, Accessed 2020-05.

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。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、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。地場企業が取り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に対策を講じる上で非常に重要である。その流れ現象の速度分布を計測し可視化する手法として、速度分布を構成する各速度ベクトルを計測する際に、画像相関法とよばれる所定領域の輝度パターンの移動を追跡して求める手法：PIV (Particle Image Velocimetry：粒子画像流速測定法) と、個々の粒子像の移動を追跡して求める手法：PTV (Particle Tracking Velocimetry：粒子追跡法) がある^[1]。

本研究においては平成 30 年度から令和元年度にかけて図 1 に示す可視化システムを試作し、画像相関法を用いて送風機（模型）内部の速度分布を計測した。そして、その送風機内部の速度分布計測結果と流体解析シミュレーションの結果を比較することによって、研究開発した可視化システムの計測精度と流体解析シミュレーションの解析精度について検証した^{[2]、[3]}。

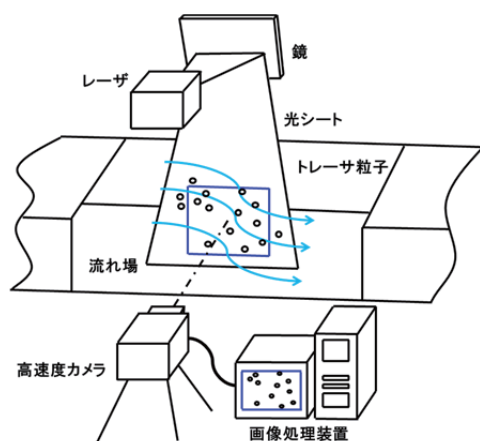


図1 可視化システム

令和2年度は新たにPTVの手法を導入して、個々の粒子像の移動を追跡することにより各粒子像の速度を計測する可視化システムを検討し、粒子の特性となる抵抗係数と反発係数を算出した。さらに、送風機内部に当該粒子が混入した際の粒子挙動をその算出した抵抗係数と反発係数を用いて流体解析シミュレーションした。

この結果、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できる可視化システムを開発したので報告する。

2. 実験方法と結果

2. 1 粒子について

本研究において対象とした粒子は、石松子（ヒカゲノカズラの胞子）^[4] である。その特性を表 1 に示す。石松子は粒子径がそろっている、吸湿しない性質を持ち湿度による密度変化が少ない、非付着性であるといった特性を有している^[5] ことから選定した。

表 1 石松子の特性^[4]

粒 子 径	30～40 μm
安 息 角	32～34度
密 度	1.05 g/cm^3

2. 2 終端速度の計測

本研究においては石松子の粒子径の範囲からストークス則に従い、対象粒子の終端速度を計測して空気動力学径と抵抗係数を算出する。これは送風機内部を浮遊する粒子を考慮するにあたり、粒子の沈降速度が影響を及ぼすと考えているためである。図 2 に粒子の終端速度を計測するために開発した可視化システムを示

す。篩から測定対象の粒子を自由落下させ、シートビームレーザ（可視化照明用シートビームレーザ3Wタイプ、ウシオ電機(株)製）をシート面が重力方向に対して垂直となるように照射する。照明された粒子は散乱されるため粒子像をハイスピードカメラ（型番：PL3、シナノケンシ(株)製）により撮影でき、記録媒体に二つの時刻の瞬間的な粒子画像として記録する。その二つの時刻の粒子画像から求めた移動量と画像間の時間間隔から、粒子の終端速度を計算する。図3に終端速度の測定実験を、図4に撮影した画像を示す。ハイスピードカメラの撮影速度は8,000フレーム毎秒、画素数は288ピクセル×160ピクセルである。

測定対象の石松子はミクロン単位の微粒子であり、空気中における自由落下では落下後瞬時に終端速度に達することが報告されている^[6]。篩の位置はシートビームレーザの上面から約10 cmとした。予めハイスピードカメラの画角におけるシートビームレーザの厚さを校正しておき、その厚さに相当する距離を通過するために要した時間は粒子が散乱して撮影できている時間とし、シートビームレーザの厚さに相当する距離を粒子が散乱している時間で除することにより終端速度を求めた。

その求めた終端速度と、重力加速度、空気の粘性係数、水の密度を用いて空気動力学径を算出した。各パラメータと計測結果を表2に示す。抵抗係数については粒子レイノルズ数により計算式が異なるため、本研究における標記は省略する。

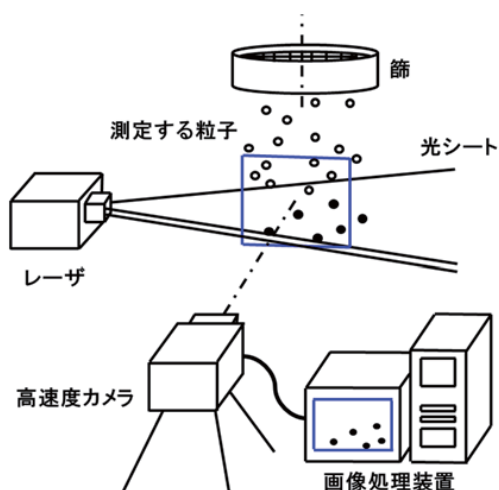


図2 終端速度を計測するための可視化システム

2. 3 反発係数の計測

反発係数を計測するための実験も、図2に示した終



図3 終端速度の測定実験

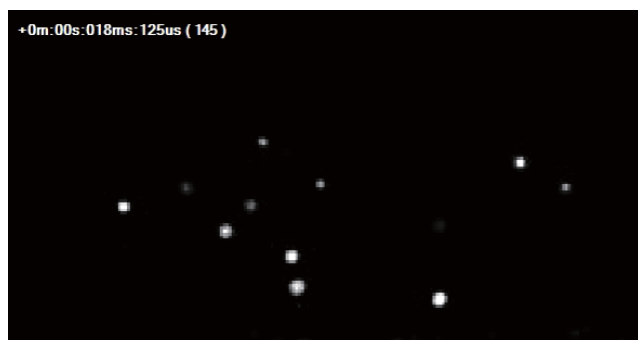


図4 自由落下する粒子の画像

表2 各パラメータと計測結果

終端速度	$2.96 \times 10^{-1} \text{ m/s}$
重力加速度	9.81 m/s^2
粘性係数(空気)	$1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
密度(水)	$1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
空気動力学径(平均値)	$31.76 \text{ }\mu\text{m}$

端速度を計測するための可視化システムと同様の実験装置で実施した。本計測においては、シートビームレーザのシート面が重力方向に対して略平行となるように所定の面に照射して、当該シートビームレーザで散乱する粒子像をハイスピードカメラにて撮影する。図5は反発係数の測定実験を示しており、先端にスリット状の開口を有するノズルを取り付けた噴霧器（ニューポーレングスター、型番：PD-1GN、(株)アグリ製）から測定対象の粒子を噴出して所定の面に吹き付ける。当該粒子が反発する様子を時系列に並べた画像を図6に示す。反発係数は粒子が所定の面に衝突する前後における速度比（衝突後の速度を衝突前の速度で除する）から計算できる。本研究の計測結果から反発係数の平均値は0.53であった。

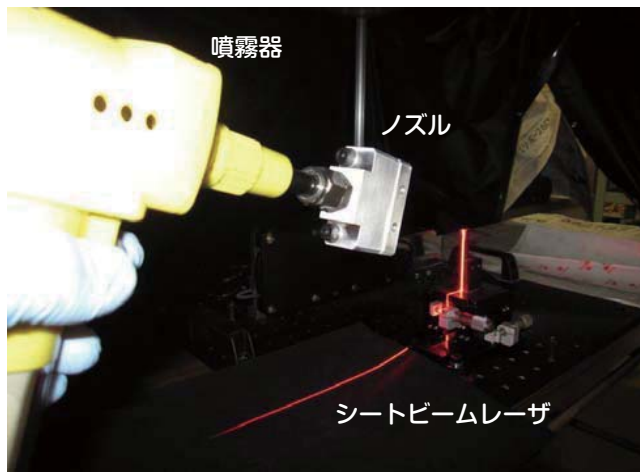


図5 反発係数の測定実験

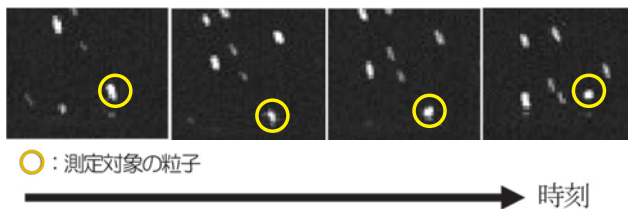


図6 所定の面で反発する粒子の画像

2. 4 粒子の噴出条件に係る測定

送風機内部の粒子挙動を流体解析シミュレーションするにあたり、送風機のエアー吸入口から粒子を混入するモデルを設定する。これを受けて、図5に示す噴霧器から噴出する粒子の噴出量と噴出速度を測定した。噴出量については噴霧器の粒子吹き出し口をビニール袋で塞ぎ、1秒間にわたり粒子を噴出して採取した。図7に示すように電子天秤（型番：FZ-200i、(株)エー・アンド・デイ製）を用いて粒子を包含したビニール袋の重さを測定し、予め粒子を噴出する前に測定しておいた粒子を包含していないビニール袋の重さとの差分をとることにより粒子の噴出量を測定した。

また、噴出速度については風速計のセンサユニットに噴霧器の粒子吹き出し口から噴出される風を当てることにより測定した。その計測結果を表3に示す。

2. 5 送風機内部の粒子挙動観察

図8に示す送風機（模型）内部のインペラを一定の回転数で回転させ、エアー吸入口から粒子を混入して送風機内部における粒子の挙動を観察した。当該送風機は羽根枚数8枚、出口外径φ104 mmのインペラをケーシングに格納した構造をしており、送風機とケー



図7 粒子の噴出量測定

表3 噴出速度の計測結果

噴出量	0.0836 g/s
噴出速度(平均値)	4.0 m/s

シングは可視化のためにアクリルを用いて製作した。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、図5に示す噴霧器を用いて表3に示す噴出条件と同様に粒子を1秒間噴出し、シートビームレーザ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上で散乱する粒子像をハイスピードカメラで撮影した。粒子を噴出してから10ミリ秒経過した画像を図9に示す。

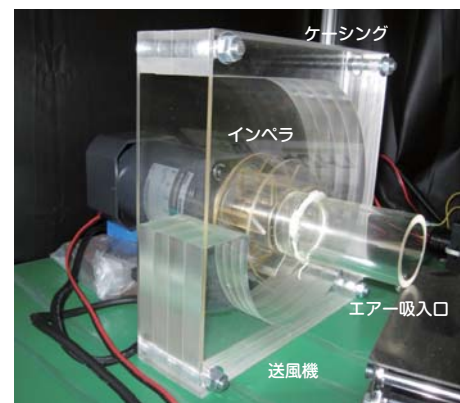


図8 送風機（模型）の外観



図9 送風機（模型）内部の粒子挙動

2. 6 流体解析シミュレーションを用いた数値解析

図10は送風機の3次元デジタル形状データである。当該モデルを対象として、流体解析シミュレーションを用いた数値解析を実施した。流体解析シミュレーションはアンシス・ジャパン(株)製のFluent(R17.1)を使用している。送風機のインペラが一定の回転数で回転する際における送風機内部の流れは、非圧縮性定常流れ、乱流モデルをk- ϵ モデル、非構造格子(テトラメッシュ)の計算格子を用いて全体の格子数を54万点程度とした条件にて解析している。当該送風機の内部流れにおける粒子挙動の解析は混相流モデルとなり、個々の粒子の動きをラグランジュ的手法で追跡するDPM(Discrete Phase Model)を用い、粒子特性として本研究の計測結果である空気動力学径(表2記載)、反発係数の平均値0.53、送風機のエアー吸入口における粒子の噴出条件(表3記載)を用いて数値解析した。その結果を図11に示す。色付けした流線は送風機の内部流れを示しており、白色の流線は粒子の移動軌跡である。

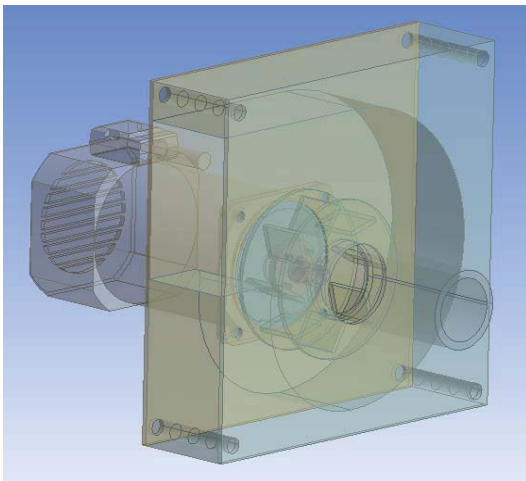


図10 送風機(模型)の3次元デジタル形状データ

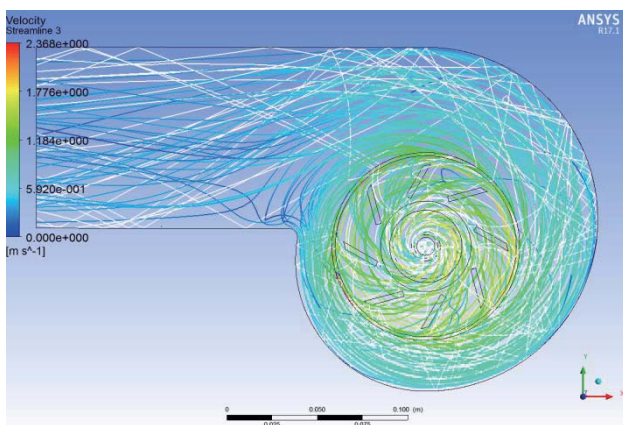


図11 流体解析シミュレーションの結果

3. 考 察

3. 1 終端速度の計測

本研究にて計測した終端速度を用いて算出した空気動力学径の平均値は $31.76 \mu\text{m}$ であった。石松子の空気動力学径の測定は先行文献に $33 \mu\text{m}$ (平均値)と報告されており^[7]、本研究の結果はほぼ同等であることから信頼性の高い数値と考えられる。

3. 2 反発係数の計測

本研究にて計測した反発係数の平均値は0.53であった。計測値のバラツキは0.42から0.66の範囲にあり、反発係数は粒子が面に衝突する直前の自転の有無によって異なることが考えられ、より高速、高感度なハイスピードカメラにて粒子内の輝度分布を追跡しながら反発する現象を撮影するなどの検討が必要である。

3. 3 送風機(模型)内部の粒子挙動観察

エアー吸入口から混入した粒子は、送風機内部のインペラに設けた羽根間を通過してケーシングに放出される。ケーシング内部の壁面に当たり反発する粒子の領域と、粒子が壁面をなぞりながら移動する領域を観察できた。壁面をなぞりながら移動する粒子の運動は粒子の特性である流動性や付着性に関連すると考えられ、送風機内部の摩耗による劣化対策を講じる上で考慮すべき現象である。

3. 4 流体解析シミュレーションを用いた数値解析

送風機内部における粒子挙動の流体解析シミュレーションを行った結果、粒子が反発する領域について検討することができた。実際の送風機の現象で見受けられるケーシング内部において粒子が壁面をなぞりながら移動する現象については、解析可能なソフトウェアが異なり今後検討していく予定である。

4. 結 言

本研究の成果について以下に要約する。

- 1) 粒子が浮遊する際により深く関連する粒子特性である空気動力学径と反発係数を実測する可視化システムを提案した。
- 2) 実測した空気動力学径、反発係数、粒子の噴出条件を用いて送風機を対象とした実験と流体解析シミュレーションを実施し、送風機内部における粒子挙動を考察した。その結果、粒子が反発する領域と壁面をなぞりながら移動する領

域が見受けられた。

平成30年度から令和2年度にかけて研究開発した可視化システムと流体解析シミュレーション技術は、地場企業との共同技術開発などの技術支援に活用している。

謝 辞

本研究事業を推進するにあたり、株式会社ツバキ・ナカシマ世知原工場の古田浩之課長から多大なるご協力とご支援を頂いた。

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] 入江：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、長崎県工業技術センター研究報告, No. 48, pp. 11-12, 2019. 10.
- [3] 入江：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、長崎県工業技術センター研究報告, No. 49, pp. 9-11, 2020. 7.
- [4] http://appie.or.jp/introduction/organization/technical_center/testpowders/sekishoshi/020, Accessed 2018-05.
- [5] 山田：粉体入門、日刊工業新聞社, 2020. 6
- [6] 椿：粒子・粉体工学改訂第2版、日刊工業新聞社, 2016. 12.
- [7] 中根：スギ花粉の浮遊飛散挙動と落下後の跳躍挙動に関して、日本機械学会論文集 B 編, Vol. 78, No. 790, pp. 1220-1234, 2012. 6.

生体組成の非侵襲計測技術の開発

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。本研究では、皮下の体液量とアルブミン濃度を体外から光を当てるだけで測定し、リンパ浮腫を早期に発見する非侵襲計測技術を開発する。特に、生体の光学的測定では生体組織による散乱に加え、測定部位の温度変化や色素等の夾雑物による吸収が測定誤差の大きな要因となる。一方、著者らが開発した光計測手法 TFDRS (Three-Fiber-Based Diffuse Reflectance Spectroscopy) は上記の測定誤差の影響を排除した測定を可能とする。本報告では、令和2年度に試作したTFDRSを活用した非侵襲測定装置について述べる。

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し、その後リンパ管で回収されない水分やアルブミンが皮下の間質液にたまり腫れた状態になる。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。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しており、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^[1]。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^[2]。これは安価な連続光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^[3]、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。

本研究では、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^[4] を応用して生体組成の非侵襲計測技術を開発する。TFDRSは散乱光路長に依存しない物理量「相対吸光度比」を非破壊計測の指標としており、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である。

本報告では、令和2年度に試作した TFDRS を活用した非侵襲測定装置について述べる。

2. 研究内容と結果

2. 1 非破壊計測手法 TFDRS

TFDRSでは、果実等の被検体の1箇所からレーザー光などの単色光を照射し、異なる距離2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) $R(\lambda_k) = i_{\text{sig}} / i_{\text{ref}}$ を用いて下記(1)式で表される相対吸光度比 γ を非破壊計測の指標とする。

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

(1)式で表される相対吸光度比 γ は散乱の影響を受けない物理量で、果実糖度と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。

一方、生体は果実と異なり、水分、脂肪、蛋白、さらにはヘモグロビン色素等の多くの吸収因子が含まれる。TFDRSを用いた生体組成計測では、波長の異なる複数の相対吸光度比 γ_k ($k=1, \dots, n$)を用いた1次多項式により、特定の生体組成 C_k ($k=1, \dots, n$)を夾雑物（他の生体組成）の影響を受けることなく推定することができる⁵⁾。

2. 2 非侵襲測定装置

試作した非侵襲測定装置の外観を図1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LED（SFH 4736、OSRAM社製）を用いた。

本装置で測定した反射スペクトルはBluetooth又はUSBを用いてモバイル端末に転送される。モバイル端末側では反射スペクトルから水、蛋白等の重量比を計算して表示する。

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
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)

図2(a)は上記測定装置により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2(b)の光源の分光分布が示すように、上記波長域でLEDの光量が不足していることに起因している。

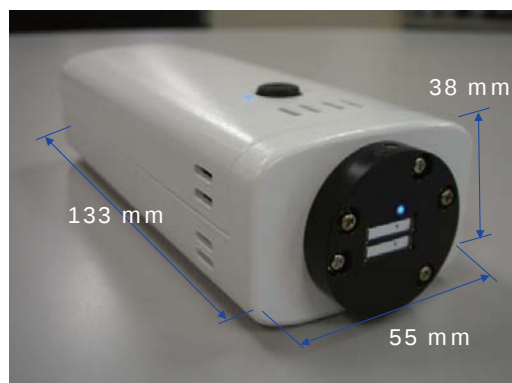


図1 試作した非侵襲測定装置の外観

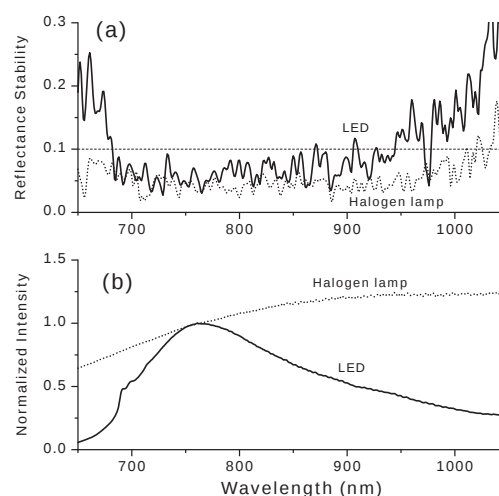


図2 (a) 反射率のSN比、(b) 光源の分光分布

3. 結 言

TFDRSを活用した非侵襲測定装置を試作した。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)を実現した。しかしながら、使用したLED光源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。今後は、上記安定性を改善するために、ハロゲンランプへの変更や不足する波長域をカバーする別のLEDを併用する等のいくつかの対策を検討する。

参考文献

- [1] Ridner, S. H. et al.: Ann. Surg. Oncol. 26 (2019) 3250.
- [2] A. Maki et al.: Med. Phys. 22 (1995) 1997.
- [3] M. Oda et al.: J Jpn Coll Angiol. 49 (2009) 131.
- [4] 下村義昭：レーザー研究 39 (2011) 233.
- [5] Y. Shimomura et al.: Proc. of IEEE LEOS Annual Meeting, p. 274 (2009).

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)

電子情報科 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で移動ロボットを自律制御することを目的とした。これまで開発してきたニューラルネットワークをベースに、カラー画像、距離画像、方位角による位置推定を行った。次に、RNN(Recurrent Neural Network)を用いて、時系列データによる推定を実現した。この結果、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た。

1. 緒 言

近年ではディープラーニング(深層学習)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]を用いたディープラーニングによりカラー画像と車両の方位角から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]。

令和2年度は、距離画像データを入力データに追加し、さらに時間変化を考慮した推定に取り組んだ。

2. CNN による模倣学習 (カラー画像、距離画像)

模倣学習によって移動ロボットを制御するために、カラー画像、距離画像、方位センサデータ、ゴール番号、ルート番号からゲームパッド操作量を推定するネットワークを設計する。学習させるデータセットを表1に示す。

表1 自動操縦用データセット

input	output
カラー画像 (3×45×80)	スピード値 (-1 ~ 1)
距離画像 (3×45×80)	平行移動方向値 (-1 ~ 1)
磁気センサ X (-1.0 ~ 1.0)	回転速度値 (-1 ~ 1)
磁気センサ Y (-1.0 ~ 1.0)	
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)	

昨年度までの研究^[2]で、カラー画像と方位センサデータ、ゴール番号、ルート番号からゲームパッド操作量を推定するニューラルネットワークを実現している

ため、これを活用することにした。

このネットワークはConvolution層13層、全結合層6層からなるが、これをカラー画像、距離画像それぞれに適用し、出力結果を最後に全結合層に入力して、最終的なゲームパッド操作量を推定するようにした。設計したネットワークを、ソニー社製オープンソフトウェアのNeural Network Console^[1]の自動探索機能を用いて、より計算量が少なく、性能が劣化しないものを求めた結果、図1に示すネットワークを得た。

また、このネットワークによる屋内移動実験を実施したところ、カラー画像のみのネットワーク同様に移動制御を実現できたことを確認した。

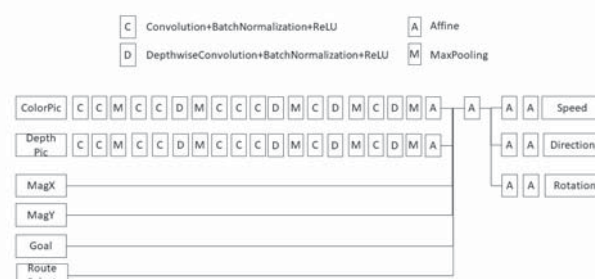


図1 ゲームパッド操作量推定ネットワーク

3. RNN による模倣学習

3. 1 カラー画像を用いた RNN

屋内廊下に障害物を配置し、回避しながらの目的地移動を確認した。様々な条件で検証をした結果、廊下中央部に障害物を配置した場合、車両後部が障害物に衝突する不具合を確認した。車両前方に配置されているカメラから障害物が視認されている間は障害物回避の動作をとれるが、カメラが障害物を通過した後は障害物を認識できないため、ニューラルネットワークが通常の走行パターンとして車両を急速に廊下中央に戻す制御を行うためであると考えた。

この現象を回避するため、廊下中央から外れた場合、

水素ガスの光学式検知技術の開発

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。初年度である令和2年度は、Mie 散乱理論により水素ガスを検知する微小球の仕様について検証した。

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。さらに、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 WGM) 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 WGM 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、水素を検知できる微小球プローブを Mie 散乱理論により解析し、パラジウム (Pd) 薄膜をコーティングしたシリカ微小球の仕様を選定したので報告する。

2. 研究内容と結果

2. 1 微小球プローブの選定

微小球の光閉じ込め効果は、周辺媒質との屈折率差が大きいほど高いため、高い屈折率を持つ微小球を選定する必要がある。また、微小球径が大きくなるほど共振ピーク波長の間隔が狭まるため、高分解能の分光器が必要となる。そこで、Mie 理論に基づき微小球の散乱断面積を計算し、最適な屈折率と微小球径を検証した。

図1は、Mie 理論に基づいたシリカ (SiO₂) 微小球における散乱断面積の解析解である。微小球の直径(d)と屈折率(n_s)は 10 μm と 1.40、周囲媒質は空気 (屈折率 ($n_{\text{air}}=1$)) としている。励起する波長は実験で目視確認できる 500 nm ~ 600 nm とした。波長全域で WGM が励起され、共振ピーク波長が周期的に発生することを確認した。また、短波長ほど共振ピーク波長が鋭く高感度になることを確認した。

図2 (a) と (b) は、図1で共振ピーク波長が発生する 528.4 nm と 531.4 nm の波長を持つ光を入射した電界強度分布を示す。図2 (a) と (b) は TE 偏光と TM 偏光でそれぞれ励起している。このため、図1の共振ピーク波長は、TE 偏光 TM 偏光が対となり発生

していることがわかる。なお、本研究では、入射面に対して電界ベクトルが垂直、および平行となる方向を、それぞれ TE 偏光、TM 偏光としている。

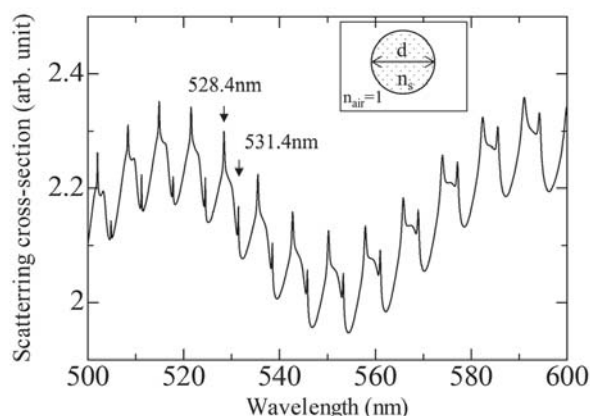


図1 SiO₂ 微小球の散乱断面積

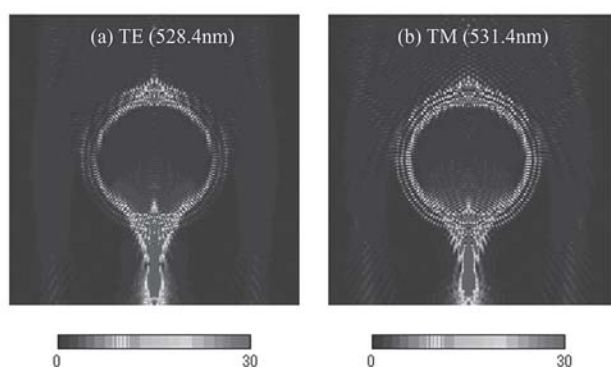


図2 電界強度分布

2.2 水素吸蔵合金の検討

水素吸蔵合金には、チタン(Ti)、ジルコニウム(Zr)、パラジウム(Pd)、マグネシウム(Mg) などがある^[5]。水素吸蔵合金は水素を吸収すると膨張し、屈折率に変化が生じる。このため、水素吸蔵合金をコーティングした状態で微小球を励起すると、共振ピーク波長に変化が生じる。本研究では水素を常温で吸蔵し、シリカ微小球(10 μm)にコーティングできるパラジウム(Pd)を選定した。

2.3 コーティング微小球の検討

水素吸蔵合金は光の吸収係数が大きいため、微小球全体をコーティングすると WGM を励起することができない。図3は Pd の屈折率(n)と消衰係数(k)を示す。長波長になるほど消衰係数(k)が大きくなり、WGM を励起できない。しかし、表面波を利用したボールセンサーによると、感応膜のコーティング領域を小さくし薄膜にすることで表面波の減衰を抑えられる

ことが報告されている^[6]。そこで本研究では、微小球を伝搬する周回上に Pd 薄膜を部分的にコーティングし、WGM の励起を行う。また、微小球表面から染み出すエバネセント光と Pd 薄膜の作用を抑えるため、Pd 薄膜の厚みを100 nm以下とした。

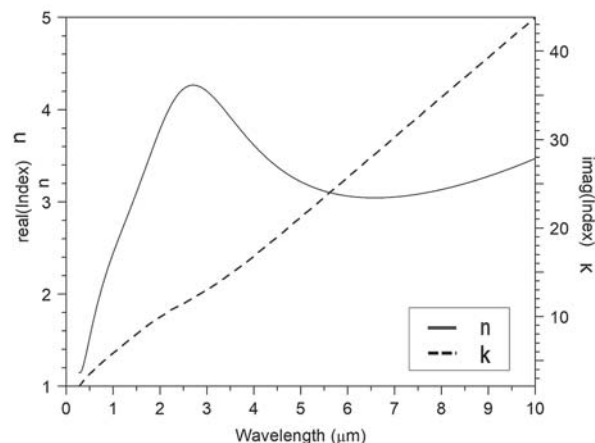


図3 パラジウムの光学定数

3. 結 言

水素を検知するコーティング微小球の仕様を選定した。共振ピーク波長の間隔、検出強度、実験操作性を考慮し、直径10 μm 、屈折率1.40のシリカ微小球を選定した。WGMの励起波長には500 nm～600 nmを選定した。また、100 nm以下のPd薄膜を微小球表面に部分的にコーティングすることで、光の吸収を軽減できることがわかった。次年度は、蒸着、およびめっきによりプローブを作製し、顕微分光計測システムの構築を行う。

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)。
- [5] 宮村弘, 軽金属, 55巻12号, pp. 629-632 (2005)。
- [6] 山中一司, 日本音響学会誌, 67巻8号, pp. 351-355 (2011)。

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、使用する材料を専用の型で成形する前処理を行うことなく、上記課題を解決する技術を開発する。本年度は、レーザー樹脂溶着用の実験装置を作製した。装置は加工用光源にYbファイバーレーザーを用い、対向するステージ上に設置されたターゲットの樹脂材料にレーザー光を照射して溶着する。溶着は樹脂材料を加圧しながら行う必要があるが、この加圧力も溶着状態に影響する。そこで、ターゲットホルダーにロードセルを組み込み、加圧力の調整を可能とした。また、溶着後の樹脂材料の引張りせん断応力の測定が行えるように材料形状の検討を行い、その形状に合わせた固定治具を作製した。上記装置を用いてアクリル樹脂板にレーザー照射し、溶着が可能なことを確認した。

1. 緒 言

工業製品の製造工程において、樹脂同士を接合する場合、接着剤を利用するのが最も一般的である。しかし接着剤には、ランニングコストがかかる、接着剤の管理が煩雑、硬化時間が必要、経年劣化により気密性が失われる、といったデメリットがある。このようなデメリットが問題となる場合、熱を加えて接合する技術が用いられる。また、加熱接合は気密性を確保しやすいため、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、材料間にあ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などの前処理が必要で、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ない。

2. 研究内容と結果

本研究では、専用の型で突起部を成形する前処理を行うことなく、レーザー光の照射方法を工夫することにより、上記課題を解決する技術を開発する。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作製した装置を用いて、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。③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。

令和2年度は、上記①の研究項目を実施したので、その内容を以下に詳述する。加工用光源にはYbファ

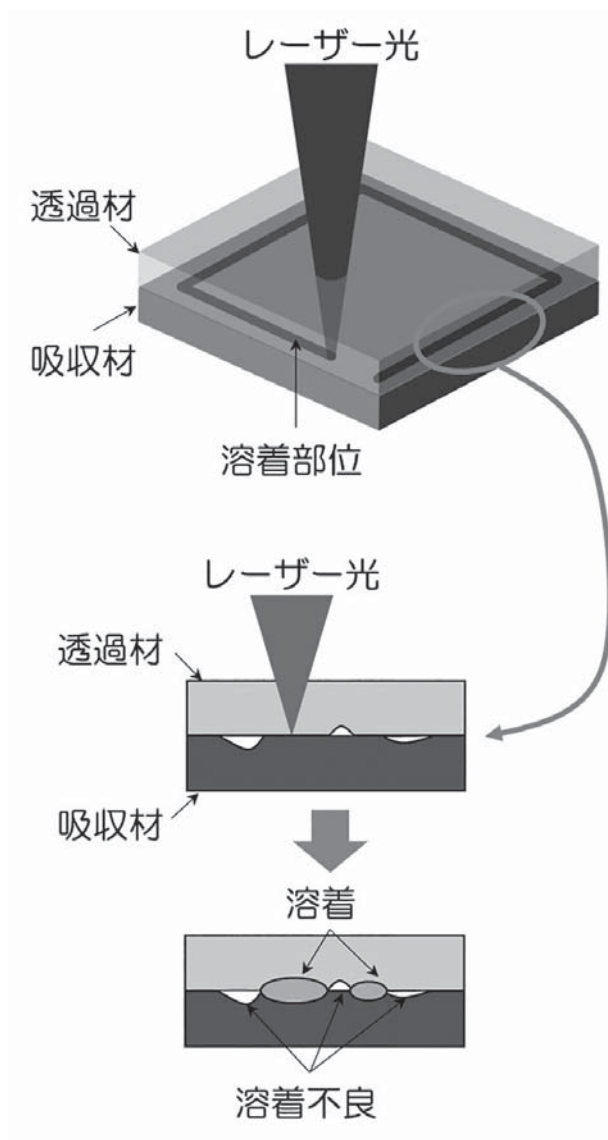


図1 レーザー樹脂溶着時の材料間の隙間に起因する溶着不良の模式図

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

図2に作製した装置の写真を示す。レーザー照射ヘッドの下部には、照射ターゲットとなる樹脂材料を設置するターゲットホルダー、ならびに高さおよび水平

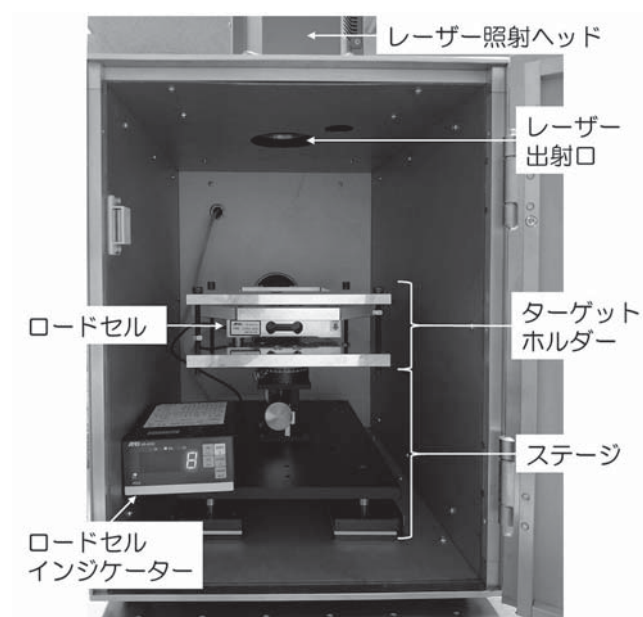


図2 作製した装置の写真

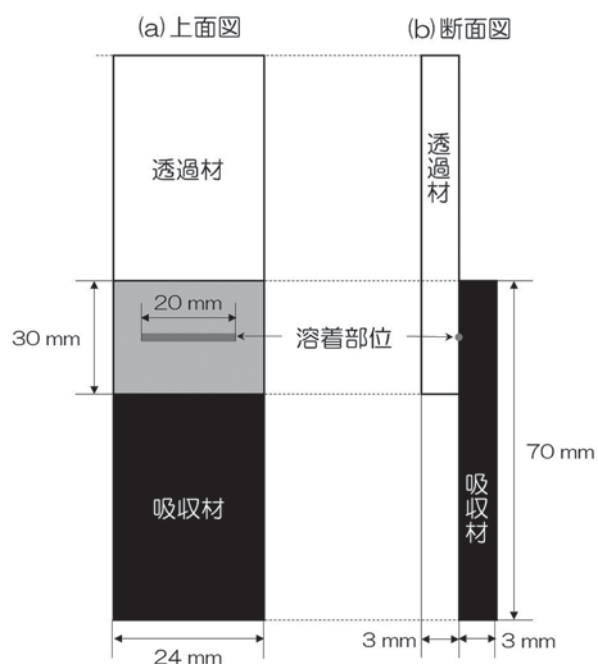


図3 樹脂材料の形状および溶着部位

回転の可動軸を有する移動ステージがある。ターゲットホルダーには重ね合わせて設置した樹脂材料を加圧する機構がある。この加圧力も溶着状態に影響するパラメーターと考えられる。そこで、ターゲットホルダーにロードセルを組み込み、加圧力の調整を可能とした。

一方、検証実験では加圧力やレーザー出力等のパラメーターを変えながら溶着を行い、溶着後のサンプルの性能を評価する。重要な性能の一つに溶着時の接合

強度があるが、その評価方法として引張りせん断応力の測定を考えている。そこで、検証実験で用いる樹脂材料の形状および溶着部位は図3のようにした。

図3に示した形状の樹脂材料は、別途作製した専用の固定治具を用いてターゲットホルダーに取り付けた。上記装置を用い、アクリル樹脂板をターゲットとしてレーザー照射を行ったところ、条件によっては樹脂板を溶着可能であることが確認できた。

3. 結 言

本研究は、レーザー樹脂溶着において、材料間の隙間に起因する接合強度や気密性の低下を、樹脂材表面に専用の型で突起部を成形する前処理を行うことなく防止する技術を開発することを目的としている。今年度は、その検証実験を行うための装置の作製を行った。

装置の加工用光源には Yb ファイバーレーザーを用い、そのレーザー照射ヘッドの下部には、移動ステージおよびターゲット材料を加圧する機能を有するターゲットホルダーを設置した。ターゲットホルダーにはロードセルが組み込まれており、加圧力を調整可能である。

溶着後のサンプルで引張りせん断応力の測定を行い、やすいようにサンプル形状を検討し、その形状に応じた固定治具を作製した。上記の装置および治具を用い、アクリル樹脂板に対してレーザー照射を行い、溶着が可能であることを確認した。

次年度以降は、溶着状態に影響する各種パラメータ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：樹脂材のレーザ溶着方法，特開 2008-302700，2008. 12. 18.

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3報)

工業材料科 専門研究員 重 光 保 博

信頼性の高い解析が困難な複雑事象に対して、連続体力学に基づくマクロ解析と分子レベルのミ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の活用が待望されている。本報告では、(1) 水分子の膜透過モデルに対するマクロ流体力学とミクロ分子動力学の比較、(2) 粗視化法を用いた有機溶媒・溶液系の分子動力学シミュレーションの研究成果を総括する。

1. 緒 言

近年、人工知能やIoT等のデジタル技術トレンドと並行して、シミュレーション技術のモノづくりへの活用が進み、シミュレーションは実験の検証にとどまらず、モノづくりを主導する役割を果たしつつある。長崎県では海洋関連工学・再生可能エネルギー分野を推進しており、CAE (Computer-Aided Engineering) 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期待されている。

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

県内CAE 関連企業の支援シナリオのひとつとして、従来技術では解析困難な複雑事象を扱う高度なシミュレーション技術導入による技術力強化が考えられる。本研究は、前段研究を継続発展させ、マルチスケールシミュレーション環境の構築を通じて県内企業の技術支援につなげることを目的とした。

具体的目標として、流体力学の基礎方程式であるナビエ-ストークス方程式、分子拡散を記述する拡散方程式、さらに分子レベルのミクロ挙動を記述する分子動力学シミュレーションをリンクし、流れ場の中で化学反応が生起する複雑事象の解析を指向した。

このようなマクロとミクロをつなぐ凝縮系の物性理論は、「階層構造」の枠組として構築されている^[1]。流体を分子レベルからみると、個々の分子の膨大な相互作用が刻一刻と変化する多体相関状態であり、方法論としては第一原理分子動力学法で直接的に記述することができる。しかし結晶状態のような秩序構造を持たないため、シミュレーションの膨大な情報から流体物性を決める重要な因子を取り出す「粗視化」を通じて、膨大な自由度を絞り込む困難がある。

さらに、マクロスケールの相関因子を取り出すために長時間のミクロシミュレーションを必要とするため、計算精度と計算高速化の両立が重要になる。

マクロとミクロが連成している複雑事象の例として、膜透過現象がある。分子動力学法による精力的な研究が行われており、シミュレーションとモデリングの両方で着実な改善が得られている^[2]。未だ困難な定量的予測に向けて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。

本報告では、以上のようなスケール連成の実現に向けた試みとして、(1) 水分子の膜透過モデルに対するマクロ流体力学とミクロ分子動力学の比較、(2) 粗視化法を用いた有機溶媒・溶液系の分子動力学シミュレーションの研究成果を総括する。

2. 膜透過スリットモデルに対する水透過係数の比較^[3]

ナノメートルサイズの細孔を通過する流れについて、透析や淡水化プロセスで使用されている高分子膜の分子構造を考慮したナノスリットモデルを作成し、シミ

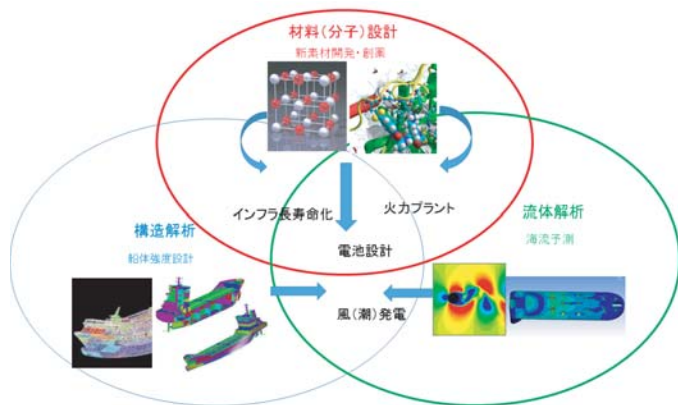


図1 連成解析のイメージ図

ュレーション解析を行った。

流体解析厳密解と分子動力学法の結果を照合し、マクロな流体现象を再現する分子シミュレーションの有効性について検討した。

2. 1 モデリング・計算手法

吉田らの多層グラフェンスリットモデル^{[4], [5]}を参考にして、ポリアミド (PA) 膜を模した多層スリットモデルを構築した (図2)。PAオリゴマーは、代表的なPA膜であるFT-30の分子モデリングを踏襲して^[6]、meta-Phenylene Diamine (MPD) と Trimesoyl Chloride (TMC) の 1:1 の共重合体として作成した (図3)。

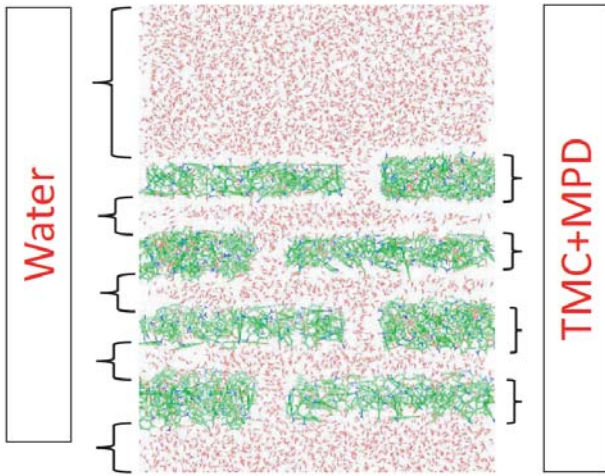


図2 PA オリゴマーと水の4層スリットモデル

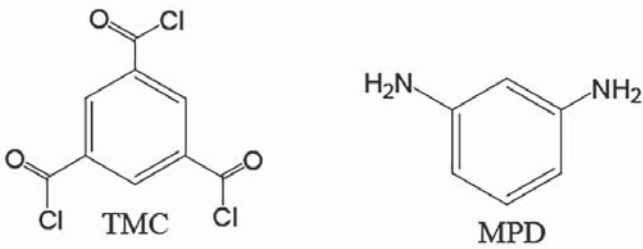


図3 PA 共重合モノマーの分子式

PA スリットモデルの幾何パラメーターは、吉田らのモデルを踏襲したが、PA スリットの厚みを考慮した付加項を追加した。

N層からなるPAスリットの透過係数 $L^{(HD)}$ は、式 (1) の合成和になる。 $L^{(n)}$ はそれぞれ、(1) スリット開口部への流入ステップ、(2) スリット層間への流入ステップ、(3) スリット層間を通過するステップ、(4) スリット開口部からの流出ステップ に対応する。

$$L^{(HD)} = \left[\frac{N}{L^{(1)}} + \frac{N}{L^{(4)}} + (N-1) \left(\frac{L^{(2)} + L^{(3)}}{2L^{(2)}L^{(3)}} \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

一方、分子動力学シミュレーションは LAMMPS で実行した。セル上方の水層から圧力 ΔP を印加して、スリットを介した水分子の透過シミュレーションを行った。1 ps のシミュレーションからトラジェクトリを抽出し、スリット出口から流出する水分子数をカウントして流出量 (フラックス) Q を直接求めた。透過係数 $L^{(MD)}$ は、以下の式 (2) に基づき計算した。

$$L^{(MD)} = \frac{Q}{\Delta P} \quad (2)$$

2. 2 結果

$L^{(HD)}$ の解析解と $L^{(MD)}$ の数値解は、 $N=1, 2$ の $L^{(MD)}$ の場合を除いて、スリット数の増加に対して透過係数は単調に減少した (表1)。

表1 水透過係数の比較

層数 (N) の単位：枚、透過係数 (L) の単位：nm/Pas

Layer(N)	1	2	3	4	5	6	7
$L^{(HD)}$	1.7	0.68	0.42	0.30	0.21	0.19	0.16
$L^{(MD)}$	1.9	4.3	14	6.8	5.4	5.4	2.7

水分子のミクロ挙動に注目すると、圧力印加によるPAスリットのたわみや、たわみに影響された水分子の跳ね返り様相がみられる。PAスリット内部を通過する水分子はなく、全ての透過水分子はPAスリット間隙を通過していた。この2点については、印加圧力とシミュレーション時間の調整が必要と考えられ、解析を続けている。また、すべり長、実効スリット幅などの境界層パラメーターの値によっても、 $L^{(MD)}$ は大きく変化する。

3. 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

流体連続場と溶媒分子としてのミクロ相互作用が異なるタイムスケールで影響を及ぼす場合、そのタイムスケールに従って種々の粗視化手続が考えられる。コロイド溶液のように溶媒分子と溶質分子のサイズが大きく異なる場合は、溶質分子の挙動を流体力場と分子

間相互作用下でのブラウン運動として近似する方法が用いられている（ブラウン動力学法）。溶媒分子の挙動をあらわに扱いたい場合は、仮想的な散逸粒子として溶媒分子を考え、そのブラウン運動を追跡する方法がある（散逸粒子動力学法）。分子動力学法は溶質・溶媒の両方の分子構造をあらわに考慮して分子レベルのミクロ現象を追跡する正統的シミュレーション手法であるが、大規模系の長時間シミュレーションは計算コストの観点から困難である。計算コストを削減し、マルチスケールシミュレーションの実現に向けた「スケールの壁」の克服のため、分子動力学法における粗視化モデル法を検討した。

3. 1 粗視化手法の概要^[7]

分子の粗視化（CG: Coarse-Graining）とは、複雑な分子自由度をシンプルなモデルに「縮約」させることである（図4）。置換基単位で粒子（サイト）に置換する構造縮約や、原子間相対自由度を凍結する凍結縮約が考えられる。構造縮約の場合、分子構造のトポロジカルなマッピングを行った後に、元の分子構造での力場を近似的に再現する力場再適合（Force matching）が必要となる。自由度を大きく落とす力場再適合を行う場合は、分子間相互作用の異方性因子が平均化されて落ちてしまうため、精度が悪化する。この力場再適合が計算精度を決定する粗視化モデルの本質的部分であり、様々な手法による粗視化力場ライブラリが考案されている。

本研究では、プリセットされた粗視化力場ではなく、分子動力学シミュレーションから得られるトラジェクトリ（軌跡）を使って on the fly で直接力場再適合を行うマルチスケール粗視化法（MS-CG）を採用した。MS-CG では、対象とする系の特性を柔軟に反映した高い精度の粗視化モデルが構築されることが期待される。

力場再適合は、式(3)の目的関数をパラメーター $\{g\}$ に対する最小二乗法で極小化して行う。

$$\chi^2 = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N \left| F_{il}^{ref} - F_{il}^p(g_1, g_2, \dots, g_M) \right|^2 \quad (3)$$

F_{il}^{ref} 参照元のトラジェクトリから得られた力場

F_{il}^p 新しく生成する粗視化力場

ここで i は原子インデックス、 l は分子の配座インデックスを表し、トラジェクトリ中に変化する複数の

配座での力場を反映するようにフィッティングされることで「マルチスケール」粗視化を実現している。

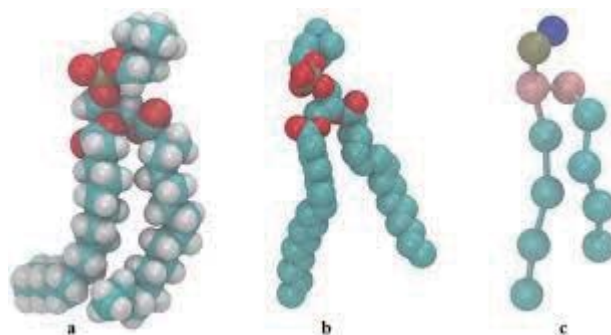


図4 分子の粗視化（イメージ）

3. 2 粗視化シミュレーションの環境^[8]

MS-CG 粗視化は、Voth らの OpenMSCG ツールを用いた。OpenMSCG は python 環境で動作し、ウェブアプリケーション jupyter notebook でブラウザ上から対話的に実行可能な利便性を有する。電子状態計算との接続（QM/CG）も可能であり、マルチスケール計算への柔軟性にも優れている^[9]。

本研究では、力場再適合を実行するための巨大トラジェクトリファイルは分子動力学シミュレーションを実行して生成しておき、jupyter notebook 上から on the fly で力場再適合を行う（図5）。分子動力学シミュレーションには GROMACS、力場再適合で生成された粗視化パラメーターを用いたシミュレーションには LAMMPS を用いた。入力用全原子トラジェクトリは、10 ns の NPT (1 atm, 300K) 平衡化計算から抽出した。

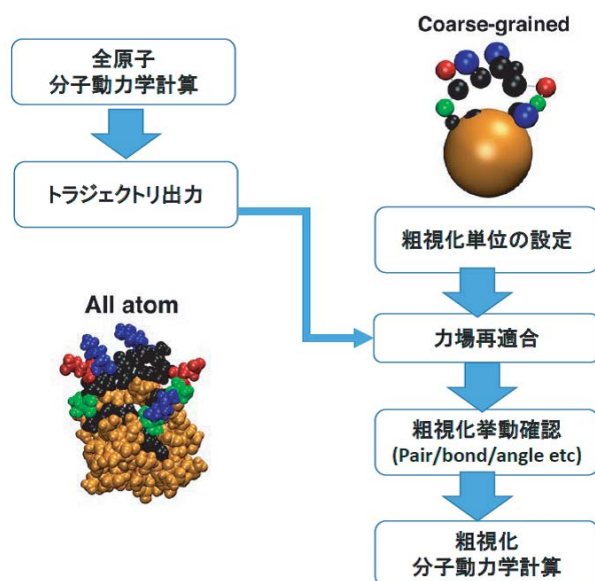


図5 MS-CG 粗視化法のスキーム

3. 3 解析結果：エタノール (2-site/3-site)

エタノール液体の MS-CG 粗視化および粗視化 MD シミュレーションを実行した。エタノールは2-サイトモデルで粗視化し、エチル基とヒドロキシル基の各重心付近を粗視化サイトの中心に取っている (図6)。粗視化前の全原子モデル (AA) と粗視化モデル (CG) に対して、($\text{C}_2\text{H}_5\text{-C}_2\text{H}_5$), (OH-OH), ($\text{C}_2\text{H}_5\text{-OH}$) の相対ポテンシャルおよび Force を算出した (図7)。 $\text{C}_2\text{H}_5\text{-C}_2\text{H}_5$ は常に反発挙動、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{-OH/OH-OH}$ は極小を持ち定性的に正しい挙動になっている。

各ペア動径分布関数と ($\text{C}_2\text{H}_5\text{-OH}$) の結合長を算出・比較した (図8)。ペア分布関数では AA/CG でズレがみられるが、分布のピーク位置の一致は良好である。結合長は良好な一致が得られたことから、2-サイトモデル粗視化によって分子内の相対原子位置は良い精度で再現されていると判断される。

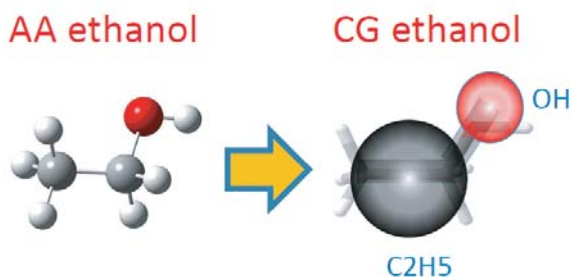


図6 エタノールの全原子 (AA) /2-site 粗視化 (CG)

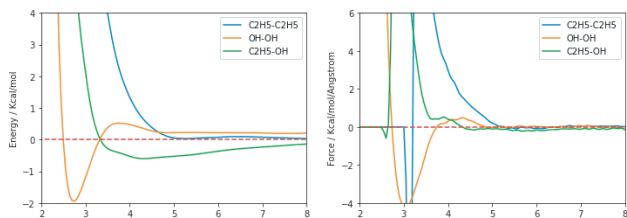


図7 粗視化エタノール (2-site) のポテンシャル・相対力

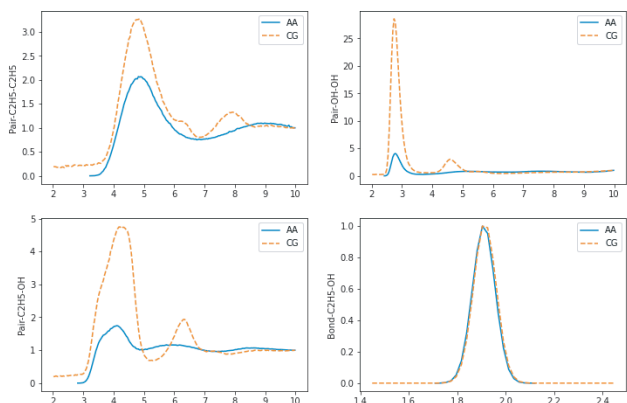


図8 粗視化エタノール (2-site) のペア分布と距離分布
(左上：ペア ($\text{C}_2\text{H}_5\text{-C}_2\text{H}_5$)) (右上：ペア (HO-OH))
(左下：ペア ($\text{C}_2\text{H}_5\text{-OH}$)) (右下：結合長 ($\text{C}_2\text{H}_5\text{-OH}$))

次に、エタノール液体の MS-CG 粗視化を / メチル基 / メチレン基 / ヒドロキシル基 / の3-サイトモデルで粗視化した (図9)。相対ポテンシャルおよび Force については、 $\text{CH}_2\text{-CH}_2$ は常に反発挙動、 $\text{CH}_2\text{-OH/OH-OH}$ は極小を持ち定性的に正しい挙動になっている (図10)。次に CH_3/CH_2 と OH の各ペア動径分布関数と ($\text{CH}_2\text{-OH}$) の結合長を比較算出した (図11)。CG サイトを増やしたことによる精度向上が期待され、($\text{CH}_3\text{-CH}_3$) の各ペア動径分布関数の再現は良好で、($\text{CH}_2\text{-OH}$) 結合長分布も良好な一致が得られた。

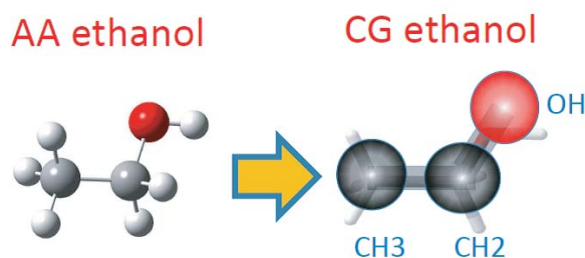


図9 エタノールの全原子 (AA) /3-site 粗視化 (CG)

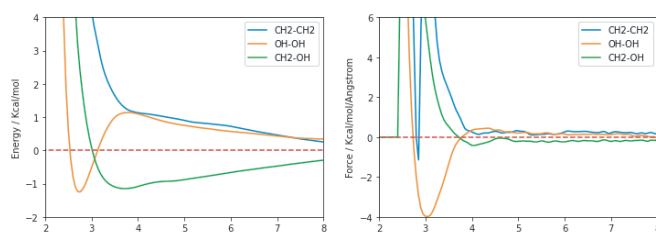


図10 粗視化エタノール (3-site) のポテンシャル・相対力

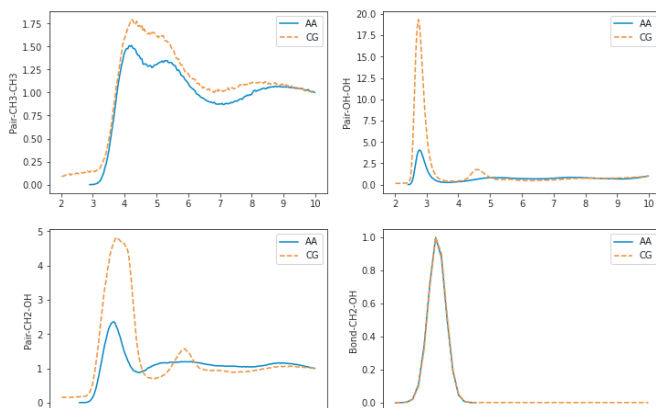


図11 粗視化エタノール (3-site) のペア分布と距離分布

(左上：ペア ($\text{CH}_3\text{-CH}_3$)) (右上：ペア (HO-OH))
(左下：ペア ($\text{CH}_2\text{-OH}$)) (右下：結合長 ($\text{CH}_2\text{-OH}$))

3. 4 解析結果：有機分子 (DBNA)

分子サイズの拡大による MS-CG 粗視化スキームの

信頼性を調査するとともに、高分子を含めた一般分子への適用有効性を調べるため、N-[4-Dimethylamino-Benzylidene]4-NitroAniline (DBNA) の単成分系にMS-CG粗視化を適用した。ベンジリデンアニリン結合部位のZ/E異性化反応のダイナミクスを調べるため、粗視化は6つのCGサイト(ジメチルアミノ(DMA)/アリール1(AR_1)/メチレン(CH_2)/アゾ窒素(N)/アリール2(AR_2)/ニトロ(NO_2))に分割した(図12)。相対ポテンシャルおよびForceに関して、特徴的なサイトを抽出して比較した(図13)。(CH₂-CH₂)の相対ポテンシャルは反発挙動を示す一方、(NO₂-AR₁)では浅いポテンシャル極小値が存在する。(NO₂-NO₂), (NO₂, AR₁), (AR₁-AR₁)のペア動径分布関数ではAAとCGの一致が悪化している(図14)。これはエタノールからDNABへの分子サイズの拡大の結果、粗視化精度が悪化していることを示唆している。(N-CH₂)

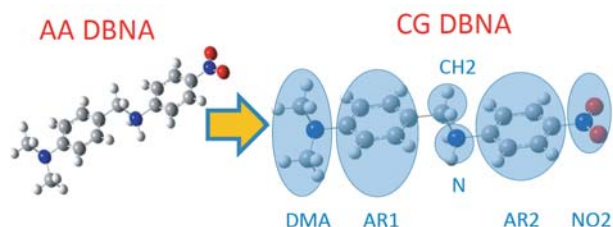


図12 DBNAの全原子(AA)/6-site粗視化(CG)

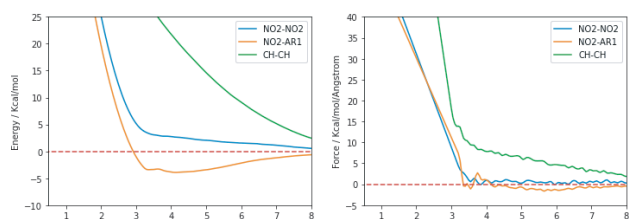


図13 DBNAの粗視化ポテンシャル・相対力

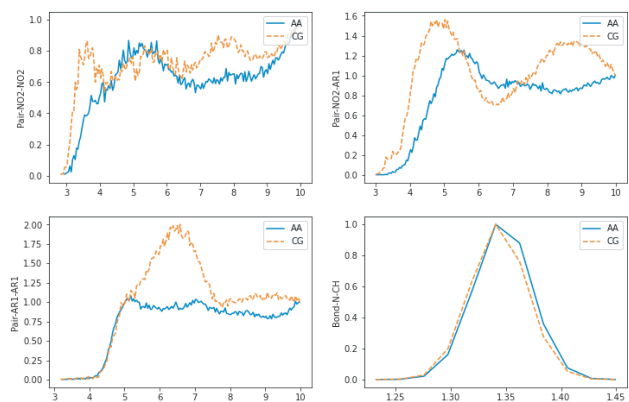


図14 DNABのペア分布と距離分布

(左上: ペア (NO₂-NO₂)) (右上: ペア (NO₂-AR₁))
(左下: ペア (AR₁-AR₁)) (右下: 結合長 (N-CH))

の結合長は両者の粗視化単位が小さいため良好な一致が得られたと考えられる。

3. 5 解析結果: 溶液 (DBNA in ethanol) (図15)

有機溶液の粗視化例として、DBNAをエタノールに溶かした有機溶液系の粗視化を行った。エタノールは2-サイト、DBNAは6-サイトにそれぞれ粗視化した。相対ポテンシャルおよびForceに関して特徴的なサイトを抽出し、特に分子間サイトの粗視化相関について注目した。DBNAのメチレン部位(CH₂)とメタノールのエチル基(C₂H₅)の分子間ポテンシャルは正常な近距離反発を示しているのに対して、DBNAのアリール部位(AR₂)とメタノールのヒドロキシル基(OH)の分子間ポテンシャルでは近距離反発が消えており、粗視化精度の限界と考えられる(図16)。(NO₂-C₂H₅), (AR₁-C₂H₅), (C₂H₅-C₂H₅)のペア動径分布関数は、明らかにAAとCGの一致が悪くなっている(図17)。(N-CH)の結合長についてもAA/CGのピーク位置がずれて全体的な一致が悪化している。これは、粗視化精度の悪化に加えて粗視化MDのトラジェクトリサンプル数が不十分なことも反映していると考えられる。

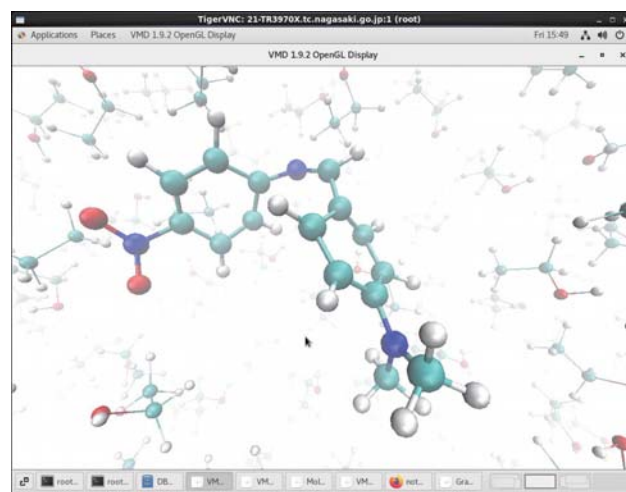


図15 エタノール中のDBNAスナップショット

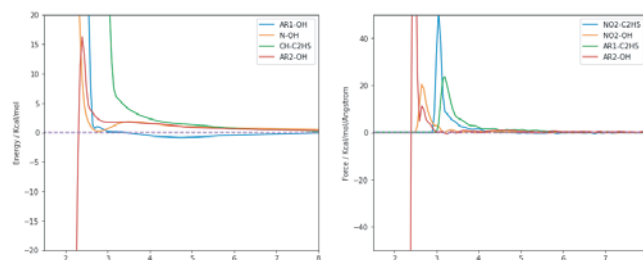


図16 DBNA in ethanolのポテンシャル・相対力

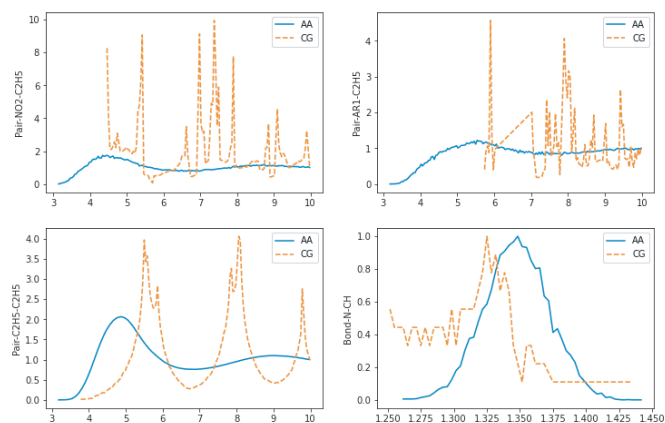


図 17 DNAB in ethanol のペア分布と距離分布

(左上: ペア (NO₂-NO₂)) (右上: ペア (NO₂-AR₁))
(左下: ペア (AR₁-AR₁)) (右下: 結合長 (N-CH))

4. 結 言

複雑事象シミュレーションに関する2つの研究テーマ (1) 水分子の膜透過モデルに対するマクロ流体力学とミクロ分子動力学の比較、(2) 粗視化法を用いた有機溶媒・溶液系の分子動力学シミュレーションの成果を総括した

(1) 今回のシミュレーションでは、すべり長、実効スリット幅などの境界層パラメーターは所与の値を用いたが、これらのパラメーターを分子動力学シミュレーションから直接に見積もることができれば、境界層様相を理論予測することが可能になる。膜分子と溶媒・溶質とのミクロ相互作用を適切に考慮してマクロな濃度分極モデルに取り込むことが、信頼性の高い膜透過シミュレーションの鍵となる。

(2) シンプルな分子構造のエタノールから着手し、一般的な有機溶媒への粗視化法の適用を試みた。MS-CG粗視化スキームに基づく力場再適合は柔軟性があり、各モデル系の特徴を的確に反映した粗視化が実現された。ただし、複雑な粗視化モデルの分子動力学シミュレーションは不安定で長時間のトラジェクトリ抽出に難点がある。膜透過現象に適用する際のハードルと考えられる。

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] H.Ridgway, J.Orbell and S.Gray, *J.Membrane Sci.*, 524, pp. 436-448 (2017).
- [3] 重光保博、長崎県工業技術センター研究報告、49, pp. 27-30 (2020).

- [4] 吉田広顕、「ながれ」, 35, pp. 285-290 (2016).
- [5] H.Yoshida and L.Bocquet, *J.Chem.Phys.*, 144, 234701 (2016).
- [6] M.J.Kotelyanskii, N.J.Wagner and M.E.Paulaitis, *J.Membrane Sci.*, 139, pp. 1-16 (1998).
- [7] S.Izvekov, and G.A. Voth, *J. Chem. Phys.* 123, 134105 (2005).
- [8] OpenMSCG, <https://software.rcc.uchicago.edu/mscg/>
- [9] A.V.Mironenko and G.A. Voth, *J. Chem.Theory and Comput.* 16, pp. 6329-6342 (2020).

木型と鋳物砂の改善による鋳造品の品質向上

工業材料科 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。

本研究の初年度となる令和2年度は、三次元計測点列群の隣接点列の変化量から点列群を領域化し、摩耗／欠損領域を検出する手法を検討した。また、有機自硬性鋳物砂の各種試験方法の確立およびパラメータ調査のため、日本産業規格（JIS）、東海支部法（TJFS）をもとに実証実験を行った。

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に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4社立地しており、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、鋳物砂では砂の性状を管理して経験的に新しい砂を補給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、デジタイジング、3Dプリンタ技術を活用した検査、計測手法を導入し、効率化と高品質

化を図る。検査・修復処理の流れは図1のとおりである。

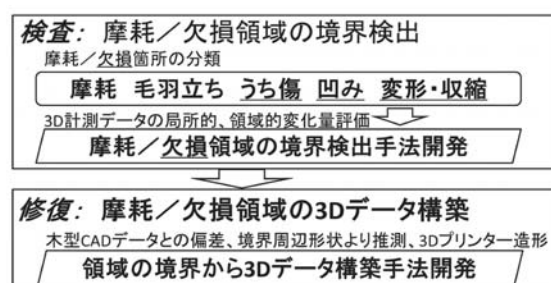


図1 全体処理の流れ

摩耗した木型の計測データを入力データとして、摩耗／欠損領域の境界を検出し、木型 CAD データと摩耗データの偏差や境界内部及び周辺点列形状からの形状推測により3Dデータを構築し、3Dプリンタによる磨耗／欠損領域部分の造形を行う。摩耗／欠損領域の境界は、木型に現れる特徴的な稜線（以下、特徴稜線という）を検出し、その境界（以下、特徴境界という）の内部側領域、外部側領域の形状状態を調べることでより判別する。木型に現れる特徴境界は、鋭角な稜線、境界稜線、領域として現れるフィレット部の稜線、形状変化の大きな領域である。今回は、特徴境界の検出手法の検討を行った。以前、計測データを活用したモデリング手法として提案した「三次元計測データから形状特徴を抽出しCADデータとして曲線や曲面データへ再構成するモデリング技術」の形状抽出手法を応用活用する¹⁾。

2.2 再利用鋳物砂の品質管理

再利用された鋳物砂のパラメータを把握するため、再生機で再生する前後の鋳物砂を各月ごとに採取し、表1の内容で試験した。

表 1 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
粒度試験	JIS Z 2601 付属書 2 による。 試験は同一試料で 4 回行った。また、図 2 は粒度試験を示す。
通気度試験	JIS Z 2601 付属書 3 による。 試験は迅速法により、同一試料で 3 回行った。
圧縮強さ試験	JIS Z 2601 付属書 4 による。 試験は同一試料で 3 回行った。
水分試験	JIS Z 2601 付属書 5 による。 試験は同一試料で 3 回行った。
強熱減量試験	JIS Z 2601 付属書 6 による。 試験は同一試料で 6 回行った。
表面安定度試験	TJFS 106 ^[2] による。 ただし、使用したふるいは 14 メッシュ（目開き 1.19 mm）、振とう時間は 2 分間。 また、図 3 は表面安定度試験を示す。
コンパクタビリティ試験	TJFS 107 ^[3] による。 試験は同一試料で 3 回行った。
かさ比重測定	内径φ50 mm、高さ100 mmの円筒状の容器に鑄物砂を充てんさせ、その砂の質量よりかさ比重を測定。 試験は同一試料で 3 回行った。



図 2 粒度試験



図 3 表面安定度試験

3. 結 果

3. 1 摩耗／欠損木型の検査、修復

特徴境界の検出手法では、木型の計測データである三角形ポリゴンメッシュから得られる形状特徴情報である法線ベクトルを利用する。図 4 に示すように、隣り合う三角形ポリゴンの法線ベクトルの内積値を求め特徴稜線の抽出を行う。

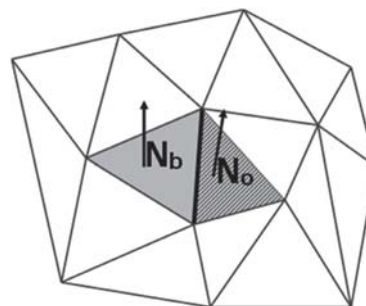


図 4 特徴稜線抽出のための形状特徴量

三角形ポリゴンメッシュが表現している形状特徴としては、稜線そのものが特徴を表している境界稜線や鋭角な稜線部分と、曲面部分等に現れる複数の面が一つの形状特徴を表しているフィレットや形状変化の大きな部分が存在する。前者を局所的抽出、後者を領域的抽出と場合分けし、それぞれを以下の方法で抽出する。

(1) 局所的抽出

局所的抽出を行う稜線のタイプは、境界稜線と鋭角な稜線の 2 種類である。

<境界稜線>

これは、稜線に接続する三角形ポリゴン調べれば簡単に抽出可能で、本手法で処理される三角形ポリゴンは多様体を前提としているため、稜線に接続している三角形ポリゴンの一つの稜線が境界稜線である。

＜鋭角な稜線＞

立方体の稜線部分のような折れた形状特徴を表している鋭角な稜線は、隣り合う三角形ポリゴンの正規化された法線ベクトル N_b, N_o (図4参照) の内積値により抽出する。閾値 C を指定し、以下の式により評価する。

$$N_b \cdot N_o < C$$

(2) 領域的抽出

フィレット形状部分や、形状変化の大きな曲面部分の形状特徴は複数の稜線により表現されるため、各稜線の評価だけでは抽出できない。そこで、このような形状特徴部分は、形状を表現する複数の稜線を抽出した後、抽出稜線の集合体の境界部分を特徴稜線とする。

＜フィレット部の稜線の抽出＞

フィレット部の隣り合う三角形ポリゴンの法線ベクトルの変化は、特に、接する境界部分では微小であるため、単純な法線ベクトルの比較では安定した抽出は望めない。そこで、フィレット境界稜線部と内部稜線部分に分け、以下のように抽出する。

○フィレット境界稜線部の抽出

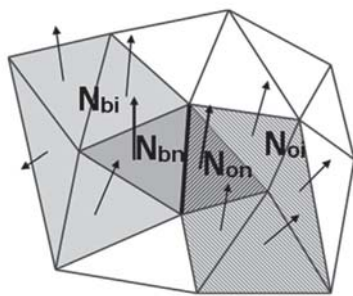


図5 フィレット領域の法線ベクトルの算出

図5に示すように、フィレット領域の境界部分に相当する稜線の隣り合う三角形ポリゴンの正規化された法線ベクトル N_{bn}, N_{on} は、この位置で隣の形状と接しているため変化は小さく、また、ポリゴンメッシュの細かさにより、その差異は大きく変動する。そのため、より安定した抽出を行うために、この N_{bn}, N_{on} はそのまま使用せず、現在評価中の稜線に隣接する三角形ポリゴンの法線ベクトルを参照し、抽出時の法線ベクトルを以下のように決定する。

現在評価中の三角形ポリゴン (図5の濃いグレーで示す三角形ポリゴン) に隣接し、かつ、評価相手の三角形ポリゴンに隣接しない三角形 (図5の薄いグレーで示す三角形ポリゴン) を見つけ、 N_{bn}, N_{on} と隣接する三角形ポリゴンの正規化された法線ベクトル N_{bi}, N_{oi} 間の内積値をそれぞれ求め、その中で最小の内積

値を C_b, C_o とする。

$$C_b = \min (N_{bn} \cdot N_{bi})$$

$$C_o = \min (N_{on} \cdot N_{oi})$$

評価用の閾値を C_f とし、以下の条件式を満足する稜線の特徴稜線とする。

$$C_o \leq C_f < C_b$$

$$C_b \leq C_f < C_o$$

○フィレット内部稜線部分の抽出

フィレットの内部の法線ベクトルは、なだらかに連続して変化していくため、以下のように、内積値の最小と最大の閾値 C_{min}, C_{max} を与え、以下の式により特徴稜線を判定する。

$$C_{min} < N_{bn} \cdot N_{on} < C_{max}$$

＜形状変化の大きな領域の稜線の抽出＞

形状変化の大きな領域は、複数の形状特徴により形状を定義すべき部分であり、閾値を C_c で与え、以下の条件式を満足する領域を特徴稜線とする。

$$C_c > N_b \cdot N_o$$

3. 2 再利用鋳物砂の品質管理

(1) 粒度試験

図6に粒度試験の結果を示す。ふるいの呼び寸法が $300 \mu m$ のときに粒度が最大となり、 $850 \mu m$ 以上および $75 \mu m$ 以下では粒度がほとんど見られなかった。また、微粉と区分される $53 \mu m$ 以下の砂の粒度の合計は1%未満と低い値を示した。

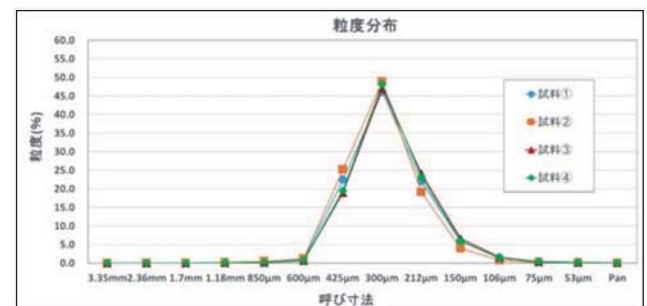


図6 粒度試験における粒度分布

(2) 通気度試験

通気度の値は、月別の変化が大きく同一試料での変化が小さかった。また、月数の経過とともに通気度が増加する傾向を示した。

(3) 表面安定度試験

試験片をふるいに設置する際の姿勢について JIS や TJFS に記載されていない。そのため、地面との設置面積の大きい面を下にした場合 (縦向き) と小さい面

を下にした場合（横向き）で結果に違いが見られるか検証した。その結果、横向きの姿勢の方が縦向きに比べて試験後の試験片形状に違いが見られなかった。

4. 考 察

4. 1 摩耗／欠損木型の検査、修復

本手法の有効性を検討するために、本手法をインプリメントし実験を行った。その結果を図7に示す。与えられた三角形ポリゴンメッシュ形状のうち傷、凹みに相当する穴やフィレット形状から、所望の稜線が抽出できることが確認できた。

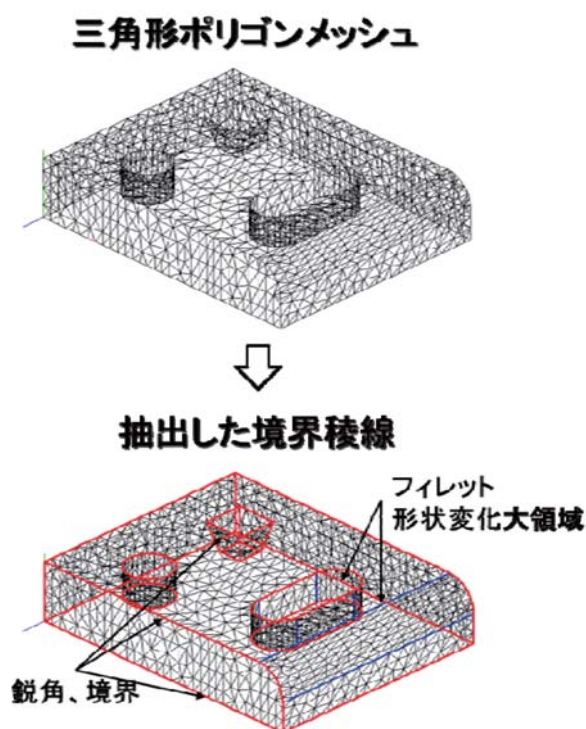


図7 特徴稜線抽出結果

4. 2 再利用鋳物砂の品質管理

大きなメッシュにおける粒度の増加、および粒度指数の低下に伴って通気度が増加した。砂粒子の粒径が全体的に大きくなれば、砂粒子間の隙間が大きくなる。これと同時に、大きな粒子は粒子間の空隙に入り込みにくくなり、空隙が増加したため通気度が上昇したと考えられる。

表面安定度試験は、試験片を設置する際に横向きにすることで結果が安定した。これは、試験片を縦向きに設置した場合、振とう時に長時間転倒せずに姿勢を保つため、試験片に作用するふるいからの外力が偏ったため結果が安定しなかったと考えられる。

5. 結 言

5. 1 摩耗／欠損木型の検査、修復

鋳造用の摩耗／欠損した木型の検査、修復を行うため、摩耗／欠損箇所の検出手法を検討した。三次元計測点列群の隣接点列の変化量から点列群を領域化して検出する手法のインプリメント実験を行い、特徴境界が検出できることが確認できた。今後は、境界内部及び周辺点列形状からの形状推測により3Dデータの構築方法を検討し、摩耗／欠損した木型のデジタル修復を図っていく。

5. 2 再利用鋳物砂の品質管理

鋳物砂の品質を管理するため、表1で示した8項目の試験を実施した。その結果、試験項目ごとの傾向や相関関係、試験片の姿勢などが確認できた。今後は、成分の違う砂との比較や鋳造欠陥との関連性について調査する。

参考文献

- [1] 小笠原耕太郎、山内英夫：三次元計測データ処理に関する研究、長崎県工業技術センター研究報告, No. 30, pp. 35-41 (2001).
- [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. 22p (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. 23-24 (2017. 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)

食品・環境科 科 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、①「漁獲地での蓄養」、②「高密度・長時間の輸送」、③「消費地での展示蓄養」が必要となる。当センターではこれまでに、①「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、②「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」を行ってきた。

本研究では、③「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し、実際の店舗での運用試験まで行うことを目指す。

研究開発2年度目となる令和2年度は、本装置で使用する電解槽の予備試験を実施し、実際の店舗での試験を実施するための試作機を製作した。

1. 緒 言

水産業振興と近年急速に増加してい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、水産部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、大消費地に活魚を安価に届けることが技術的に可能となってきた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濾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においが移ること等の問題があり(図1)、比較的短い頻度で水換えや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。また、オキシダントの殺菌効果により微生物の繁殖を抑制することで、飼育水の着色や悪臭の発生を抑制できる。このシステムは生物濾過システムと比較して著しく低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、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。



図1 生物濾過の影響で着色した展示水槽

2. 検討内容

(1) 本システムで使用する電解槽の予備試験

海水を電解する際、陰極にスケールが析出する。これは、電解によって陰極表面から水素が発生することにより陰極表面近傍の海水がアルカリ性になるためである。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、電解槽の流路を塞ぐ等の問題が発生することになる。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ことが必要である。

今回採用する電解槽は、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し、かつ海水浄化ユニット全体の小容量化にも寄与できるものである。

実験室内に試験水槽システムを組み、試験魚は入れずにこの電解槽を使った連続電解試験を3か月間実施した。3か月後の陰極表面にスケールの析出は認められず、試験期間中の電解電圧の増加も認められなかったが、流路上電解槽の後に設置している貯水タンクに白色沈殿が認められた。この結果から、電解によってスケールが析出しなかったのではなく、わずかに生成されたスケールが電極表面から剥離した、もしくは電極に付着しないまま泡沫槽外に排出されたものと思われる。この試験により、今回採用した電解槽では、長期間のメンテナンスフリーを実現できる可能性を確認できたが、電解槽の後の流路上に沈殿物を回収するための工夫が必要であることが判明した。

(2) 試作機の製作

令和元年度に決定した仕様（水槽容量 500L、透明アクリル製の水槽、金属製の架台、架台内部に全ての浄化ユニットを収納、浄化ユニットの構成は物理濾過槽＋電解槽を内包した泡沫分離装置＋活性炭槽＋温調装置＋流量計とする）を満たす海水魚用展示蓄養水槽試作機を製作した（図2）。

3. 結 言

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いる。そのため、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

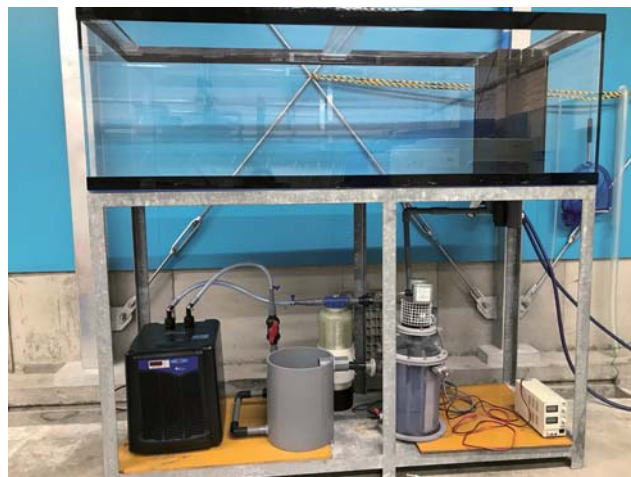


図2 試作機の外観
（浄化ユニットが確認できるように下部カバーを外した状態）

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。

研究2年度目となる令和2年度は、本システムで採用する電解槽の評価と、初年度に仕様を決定した試作装置の製作を行った。

その結果、今回採用する電解槽は長期のメンテナンスフリーを実現できる可能性があることを確認できたが、現場では魚から排出される多量の有機物等が存在することになり、今回の予備試験より一層厳しい環境となるため、現場試験を通じてメンテナンス間隔を確認していく必要がある。

試作機については、現場での検証も重要であるが、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。

来年度、試作機的能力評価と現場試験を行って問題点を抽出し、装置の改良を行った後に製品化へと進む予定としている。

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).

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・環境科	主任研究員	玉屋	圭
応用技術部	部長	河村	俊哉
食品・環境科	主任研究員	横山	智栄
	研究員	井内	智美
	研究員	野田	響子

県内食品産業の振興を目的として開設される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35.6%、従業者数の27.5%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年度に開所することを決定した。

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) ニーズ調査及び食品開発支援センターの紹介を行ったので報告する。

2. 方法

(1) 導入機器の活用条件の検討

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

価・解析するための分析条件を検討した。

表1 食品開発支援センターに導入した分析装置一覧

No.	装置名
1	レーザー回折式粒度分布測定装置
2	卓上型電子顕微鏡
3	マイクロトーム
4	分光光度計
5	超純水装置
6	アミノ酸・有機酸分析システム
7	ビタミン分析システム
8	色差計
9	水分活性測定装置
10	水分計
11	高圧蒸気滅菌装置

(2) 機器の標準手順書の作成

表1に示した11種の各分析装置について、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。

(3) ニーズ調査及び食品開発支援センターの紹介

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

(1) 導入機器の活用条件の検討

新規導入した分析機器に関して、食品試料の評価・解析に対応した分析条件を検討した。主な事例を表2に示す。

表2 分析条件を検討した主な事例

検討内容	使用機器
ビワ茶の品質評価（クロロゲン酸など）	ビタミン分析システムなど
野菜加工品の品質評価（色、 γ -アミノ酪酸、糖、有機酸など）	色差計、アミノ酸・有機酸分析システムなど
水産加工品の品質評価（遊離アミノ酸、旨味など）	アミノ酸・有機酸分析システムなど
加工食品に含まれるビタミンC分析法の確立	ビタミン分析システム
発酵食品に含まれる機能性成分の測定	ビタミン分析システムなど
米粉を用いた菓子の食感と保存性の検討	水分計
漬物製品の保存性検討	水分活性測定装置など

本検討により、食品の品質成分であるアミノ酸、有機酸、糖、栄養成分であるビタミン、そして機能性成分である 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2年度の分析条件検討数は計28件であり、年間数値目標（22件）を達成した。

今後、県内企業の装置利用促進のために、企業関係者を対象として分析条件を公開する予定である。

（2）機器の標準手順書の作成

11種の各分析装置について、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、水分活性測定装置の手順書を図1に示す。

令和2年度の作業手順書の作成数は計11件であり、年間数値目標（11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。

（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ならびに企業のニーズ調査を実施するために、令和2年度は企業訪問及び現地技術支援（44件）を行った。

特に、本センターの機能である①企画支援、②技術支援、③設備開放ならびに依頼試験、④技術開発について紹介した。これらの機能について、具体的な内容を表3に示す。

水分活性測定装置測定手順

2021.1. 担当 玉屋 圭

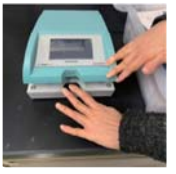
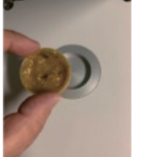
1		(装置名) LabTOUCH-aw (Novasina社) 装置の正面の黒いボタンを押して、本体の電源を入れます。黒いボタンを押すと、カバーが開きますので、閉めて下さい。
2		立ち上げが終了すると、測定画面が表示されます。画面にタッチすると、メインメニュー画面（右の写真）に変わります。 
3	 	空の試料容器（上の写真）に、試料を入れます（下の写真）。試料を入れる目安は、容器の高さの半分から8分目です。容器の中央に線が入っていますので、この線を越えるように試料を入れてください。 
4		黒いボタンを押して、カバーを開けます。
5		測定室中央の穴（写真左）に、試料容器をセット（写真右）した後に、カバーを閉じます。
6		① 測定画面にタッチして、メインメニューを呼び出します。スタートボタン（左写真の赤丸）を押します。 ② Analyzingのランプが点滅し、分析中であることが確認できます。
7		測定が終了すると、「Stable」の表示が出ます。その下に、測定した試料の水分活性値（aw）が表示されます。
8		カバーを開けて、試料容器を取り出します。次に測定したい試料がある場合、試料の入った容器をセットし、メインメニューのスタートボタンを押して測定を行います。
9		(測定を終了する時) ① カバーを閉じた後に、測定画面にタッチして、メインメニューを呼び出します。左写真のボタン（赤丸）を押します。 ② 測定画面に、シャットダウンの表示が出て来ます。「Yes」を押すと、電源オフになります。

図1 標準手順書（水分活性測定装置）

表3 食品開発支援センターの機能

機 能	内 容
① 企画 支援	商品開発、デザイン、加工技術等の各種相談対応
② 技術 支援	新製品の開発、既存商品のブラッシュアップ等に関する技術支援
③ 設備開放 依頼試験	・一次加工から製品化までの試作 ・栄養成分分析等の依頼試験 ・施設での営業許可取得後の試験製造、販売
④ 技術 開発	県内企業、生産者との共同技術開発や共同研究

さらに、令和2年度に新たに導入した食品試作加工装置についても使用目的、原理などを紹介した。主要な加工装置を表4に示す。

表4 新たに導入された食品加工試作機

No.	装 置 名
1	ブラストチラー & ショックフリーザー
2	インライン式搾汁機
3	多機能磨砕機
4	製麺機
5	熱風乾燥機
6	凍結乾燥機
7	レトルト殺菌装置
8	加圧・減圧攪拌機
9	スチームコンベクションオープン
10	充填機

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

- ・「こんなものを作りたい」といったざっくりとした内容、あるいはアイデアがまだまとまっていない段階でも相談にのってほしい。
- ・「センターの装置を利用すると、どういった製品ができ上がるか」を示す事例をまとめた冊子を作成し、配布してほしい。
- ・加工食品を開発するには、包装容器、パッケージデザインなど製品を完成させるのに必要な要素がある。これらを専門とする業者をセンターで紹介してほしい。

- ・開発した製品をいきなり販売するのはなかなか難しい。売れるかどうかの反応を見るために、試験販売を実施することは重要である。センターで、販売可能な試作品を製造できれば意義がある。

4. 結 言

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年度に開所することを決定した。

本研究では、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。

令和2年度は、導入機器の活用条件の検討、機器の標準手順書の作成、ニーズ調査及び食品開発支援センターの紹介を行った。

その結果、活用条件の検討（28件；目標数値22件）、機器の標準手順書の作成（11件；目標数値11件）、ニーズ調査及び食品開発支援センターの紹介（44件；目標数値40件）といずれの項目においても数値目標を達成した。

センターが開設される令和3年度以降は、前年度に導入した食品加工試作機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、装置活用に関する作成資料などを用いて県内食品関連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] 経済産業省 2019 年工業統計調査。

微細気泡を活用した浄化・洗浄システムに関する研究

食品・環境科 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な泡はファインバブルと呼ばれ、従来の泡の概念を変える吸着、溶解、分解、生理活性など様々な効果があることから、応用分野の広がりが大きいプロセス技術として期待されている。そのアプリケーションの一つが、本研究のターゲットの洗浄である。微細気泡を用いた洗浄では、水温や水中の含有成分が微細気泡の状態に影響を与え、また、洗浄物の材質、汚れの種類など洗浄対象の性状によっても洗浄効果が異なる。そのため、洗浄案件別に条件を調整し、適切な洗浄ができるようきめ細かな対応が求められる。このとき、単位体積あたりの気泡数（個数密度）の把握は、洗浄プロセスの管理において重要な項目の一つである。しかしながら、微細気泡の個数密度の正確な計測は、高額な計測機器及び測定者の技術の習熟が不可欠であり、産業洗浄の現場では、コストや手間をかけて正確な値を求めるよりも、およその量がわかれば良いとするケースが多い。そこで本研究では、ポリスチレン粒子を標準試料とした微細気泡の個数密度の簡易計測手法に関する検討及び解析を行った。

1. 緒 言

気泡の産業利用は古くから行われている。たとえば、金属加工業における部品洗浄としての利用や、水産業におけるカキの養殖への活用などがある。気泡の活用が進むなか、気泡を微細化する取り組みも盛んに行われるようになった。気泡の微細化により、気体の溶解力が向上し、気泡の浮遊時間を長くできる。数マイクロメートル程度まで気泡サイズを小さくすると、肉眼では泡と認識できず白濁した溶液に見え、浮遊速度は1分間で数ミリメートルと非常に遅い。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。2000年以降、さらに小さい数百ナノメートルサイズの気泡の存在が知られるようになった。この数百ナノメートルの気泡は、可視光の回折限界を超えており、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する。一方、コンタミネーションとの区別が難しく、その真偽が議論されてきたが、計測器の進歩に伴い、その存在が証明された。今日では、ISOの国際規格化が進み、泡のサイズ等によって名称が明確に定義されるに至っている（表1）。

この非常に微細な気泡は、従来の気泡にはない様々な特徴を持っている。とりわけ、泡のサイズが数十ナノメートルから1マイクロメートルのウルトラファインバブルは、大きな刺激がなければ、数か月にわたって安定であることが知られており¹⁾、これまでの泡のイメージとは全く異なった様相を示す。また、ラジカルの発生や内部圧力の急速な増大などの化学的及び物

表1 気泡の名称と分類

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

理的な作用は、排水処理や殺菌など幅広い応用が期待されている²⁾。

微細気泡をより効果的に活用するには、洗浄対象ごとに最適な洗浄条件を見出し、その条件を管理することが大事である。微細気泡の個数密度は、洗浄管理において重要な項目の一つであるが、正確な計測は難しく、計測機器も高額である。そのため、専門機関への分析依頼も選択肢に挙がるが、その都度分析依頼を行うのはコストや手間がかかり、また、輸送時や保管時の温度変化や振動によって個数密度が変化する。微細気泡のおよその個数密度を現場で把握することは、現実的な取り組みとして必要である。

微細気泡の有無の簡易的な確認方法として、レーザーポインターを利用して散乱光を観察することが行われる。しかしながら、光量や照射条件などによっても散乱の様子が変わるため、散乱光の観察だけではどのぐらいの量が含まれているかは不明である。また、微

細気泡の散乱に関する理論的な考察もほとんど行われていない。

そこで、本研究では微細気泡の散乱に関する理論解析を行うとともに、屈折率や粒子径が既知で性状が安定なポリスチレン粒子を標準試料とする微細気泡の個数密度の簡易計測法についての検討を行った。

2. 理論計算及び実験方法

2. 1 微細気泡の散乱性の理論計算

粒子の散乱については、ミー理論に基づく散乱係数の算出により理論的に求めることができる。性状が不安定な微細気泡の個数密度を実験的手段のみで定量しようとする、予期せぬ誤差や偶然の相関が含まれるおそれがある。また、隠れた因子の発見や得られたデータの背後にあるメカニズムの解釈においても、理論的背景の理解は欠かせない。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、同一の照射条件では、散乱係数が大きいほど光は強く散乱する。本研究では、散乱光強度を検出していることから、散乱係数の理論解析が重要である。

理論計算に必要なパラメータの一つとして粒子径がある。ウルトラファインバブル領域の微細気泡の平均径はおよそ100 nmで安定しており、大きくは変化しないが、サイズの影響について考察するため、100 nmから500 nmの範囲で計算を行った。このとき、実際の微細気泡の粒子径は、ある程度の分布の広がりを持つが、代表値で表すことができ、考慮しないものとする。また、光の波長は、400 nmから633 nmの範囲とし、微細気泡の屈折率については、文献値を参考に1.25とした¹³⁾。

2. 2 標準試料の調整

通常、定量分析では物性が既知の標準試料を用いて、検量線作成や校正を行う。しかしながら、性状が不安定な微細気泡は、個数密度が恒久的に維持されないことから、そのものを標準試料として使えない。したがって、性状が安定で、屈折率及び粒子径が既知なポリスチレン粒子を標準試料に適用した。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て使用した。

2. 3 微細気泡水の調整と散乱光検出

定量評価に用いる微細気泡は、久留米工業大学において生成いただいた。気体としては空気を用いた。微

細気泡の粒子径及び個数密度は Malvern Panalytical 製ナノ粒子解析システム NanoSight (ナノサイト) を用いて計測し、取水後、ブチルゴムパッキンを付けたガラス瓶で保管した。

散乱光の計測に用いる光源は、波長 633 nm のヘリウムネオンレーザーを用いた。レーザー照射により生じた散乱光は、ホーザン株式会社製のCMOSカメラを用いて検出した。検出した散乱光データは画像としてパソコンに取り込み、散乱光の強度を数値化した。

3. 結果

3. 1 微細気泡の散乱性の理論計算

図1 (A) に横軸を波長として、粒子径 100 nm の微細気泡の散乱係数を計算した結果を示す。個数密度は1,000 万個 /ml、1 億個 /ml 及び 10 億個 /ml とした。一般的に微細気泡は1,000 万個 /ml から 10 億個 /ml の範囲で使用される。また、図1 (B) は、気泡径を変化させたときの計算結果を示す。このとき、粒子径の変化により気体の総体積は変化しないものとし、粒子径が100 nm、個数密度 1 億個 /ml における気泡の総

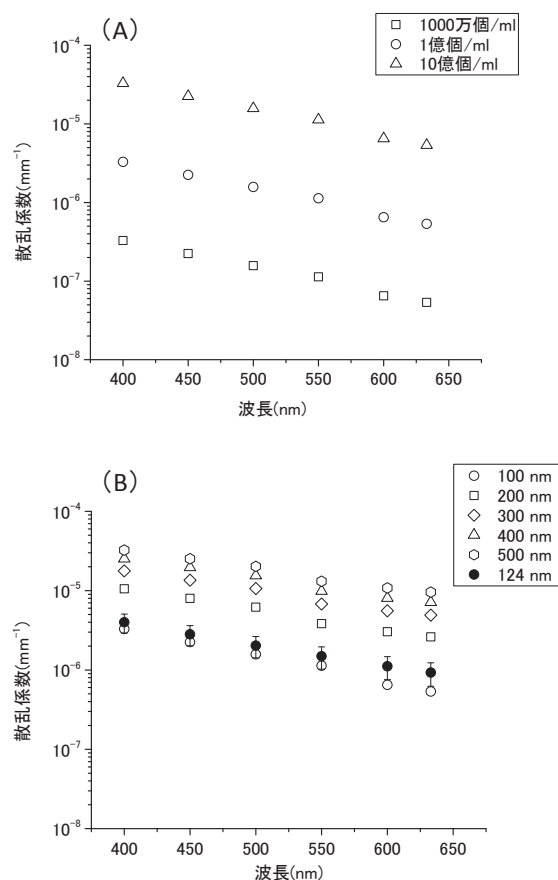


図1 微細気泡の散乱係数の理論計算

(A) 個数密度変化 (粒子径固定 100 nm)
(B) 粒子径変化 (粒子体積固定)

体積を基準とした。

理論解析の結果、波長は短いほど、個数密度及び粒子径は大きくなるほど、散乱係数は大きくなることからわかる。このことは、同じ測定系において散乱光強度が変化した場合、個数密度、粒子径のどちらに起因しているか判別しにくいことを意味する。ただし、同一条件で生成した気泡の粒子径は大きくは変化しない。このことから、想定より強く散乱している場合は、大きな粒子のコンタミネーションの可能性がある。異なる日に調整した微細気泡水の粒子径データを無作為に抽出したところ ($n=5$)、平均粒子径は 124 nm、標準偏差は 18 nm であった。図 1 (B) に、粒子径 124 nm の微細気泡の理論計算値を標準偏差のエラーバーを付して併せてプロットしている。この結果から、気泡の粒子径のばらつきが散乱に及ぼす影響は限定的であり、理論上、1 億個/ml 程度の精度で定量的な分析が可能である。

3. 2 ポリスチレン粒子の個数密度

標準試料として、粒子径が 100 nm のポリスチレン粒子を用い、検量線作成や校正のための試料を調整した。理論上、吸収がなく、粒子径が同じであれば、個数密度を調整することにより、異なる物質においても散乱パターンはほぼ等しくなる。しかしながら、単純にポリスチレン粒子の個数密度と微細気泡の個数密度を同じにすればよいものではない。なぜなら、散乱は異なる屈折率を有する媒質の境界面を光波が通過するときに生じる現象であり、屈折率が異なると散乱の大きさが変化するからである。そこで、微細気泡の個数密度に相当するポリスチレン粒子の個数密度を、理論計算により求めた。波長 633 nm においては、ポリスチレン微粒子の個数密度に 0.095 の係数を掛けたものが、同じ散乱係数を示す微細気泡の個数密度となった。なお、波長によってこの係数の値が異なることに留意する必要がある。

3. 3 散乱光の検出と定量性評価

個数密度の異なるポリスチレン粒子溶液を調整し、レーザー光を照射した。図 2 にレーザー光を照射したときの散乱の様子を示す。このとき得られたデータを画像解析し、散乱光の強度を数値化した。図 3 に横軸を微細気泡の個数密度に換算した検量プロットを示す。この検量線の定量性を評価するため、あらかじめ、ナノ粒子解析システムで個数密度を測定した微細気泡の散乱光の測定を行った。この結果、ナノ粒子解析システムの計測値を真値として、8,000 万個/ml 程度の標準

偏差で計測できることがわかった。本手法の定量下限は 2 億個/ml であり、ある程度個数密度が高い微細気泡については、定量可能であるといえる。より簡易的には、個数密度が異なる複数のポリスチレン粒子の標準試料とサンプルの分光セルを一行に並べてレーザー光を照射すれば、微細気泡のおよその濃度範囲を肉眼でも判断可能である。

4. 結 言



図2 微粒子の散乱の様子

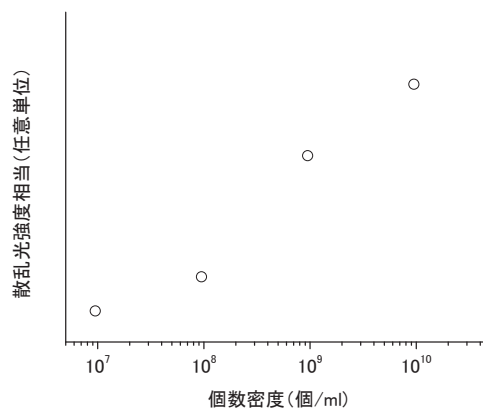


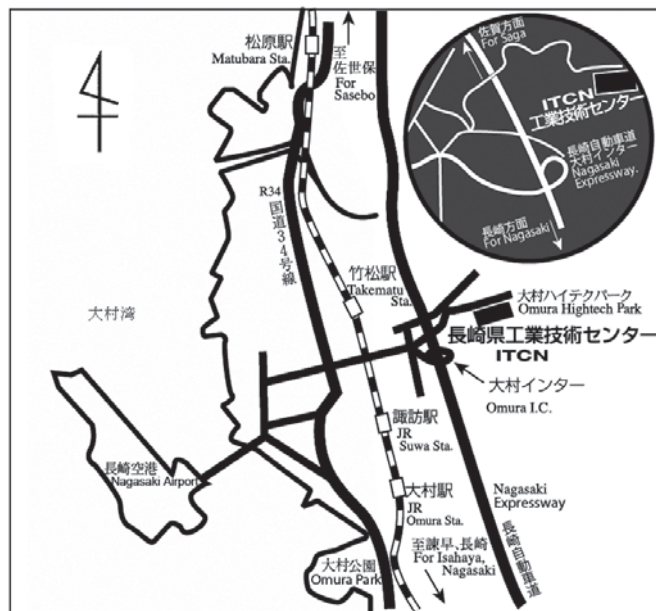
図3 ポリスチレン粒子による検量プロット

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の一環として、微細気泡の個数密度の簡易計測方法に関する理論解析及び標準試料にポリスチレン粒子を用いた定量試験を行った。この結果、個数密度が 2 億個/ml 以上であれば簡易的に計測できることがわかった。

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] A.Sonoda: 54, pp. 590-595, J. Soc. Powder Technol. (2017).

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

発行日：令和3年7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>