

2025 年度

生産技術研究所
機械系研究室案内

目次

梅野研究室	1
大島研究室	3
佐藤研究室	5
鹿園研究室	7
白樫研究室	9
中野研究室	11
長谷川研究室	13
吉岡研究室	15
吉川研究室	17
アズィツズ研究室	19
シチョンシコ研究室	21
土屋研究室	23
栃木研究室	25
古島研究室	27
山川研究室	29

生産技術研究所へのアクセス

東京大学生産技術研究所(駒場リサーチキャンパス内)
所在地:〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

行き方:

- 小田急線および東京メトロ千代田線代々木上原駅より徒歩 12 分
- 小田急線東北沢駅より徒歩 7 分、井の頭線駒場東大前駅より徒歩 10 分
- 井の頭線池ノ上駅より徒歩 10 分

2025 年東京大学生産技術研究所公開 機械系研究室公開題目

駒場Ⅱキャンパス 5月30日(金)～31日(土) 10時～17時

東大駒場リサーチキャンパス公開 2025

komaba-oh.jp

東京大学生産技術研究所

<http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/>



ナノ・マイクロ域の機械物理とマルチスケール解析

生産技術研究所 梅野研究室



研究室 HP



YouTube

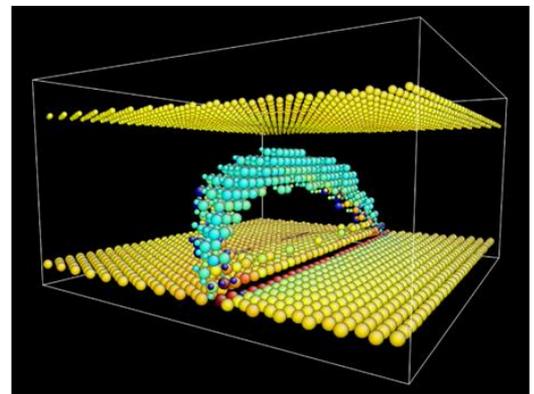


ナノ・マイクロ材料強度と物性の本質を解明し 応用を目指す

本研究室では、固体材料の変形・破壊およびそれに伴う物性変化を解明することを目的として、数値シミュレーションによる計算科学的アプローチを行っています。材料強度・物性変化の本質に迫るための**第一原理計算や原子モデル解析、高精度原子間ポテンシャル作成といった基礎的研究から、ポリマーやセラミックコーティングなどのマルチスケール解析といった実用的研究まで**多岐にわたる研究課題に取り組んでいます。現在、固体結晶の変形・破壊の原子レベル解析、座屈を積極利用した次世代ナノデバイスの特性予測と設計、境界潤滑状態の粗視化分子動力学解析、固体酸化物形燃料電池の高効率化・長寿命化のためのモデリング、ポリマー材料設計のための指導原理の確立、深層学習を活用した新たなマルチスケールモデリング手法の開発など、多岐にわたる研究を展開しています。

①材料強度の本質に迫る第一原理・原子モデル解析

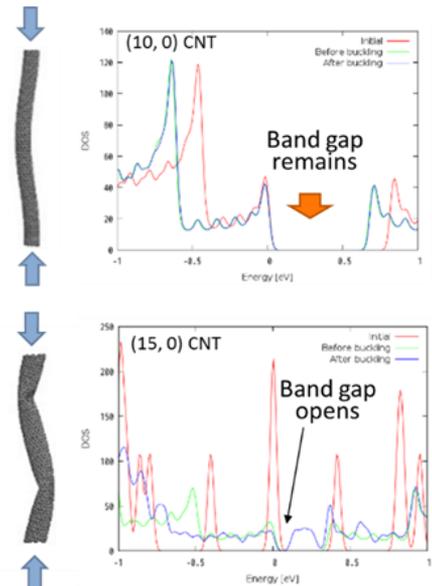
亀裂進展や結晶すべりによる塑性変形のメカニズムを明らかにすることは材料強度の本質を理解するうえで重要です。原子間結合の断裂やズレとそれらの集団的挙動を追跡することができる原子モデル解析は、こうしたメカニズムの解明のための強力なツールとなります。また、量子力学に基づく第一原理計算によって結晶の理想強度を定量的に評価することも、材料強度のナノレベルのメカニズム解明に寄与します。本研究室では、**密度汎関数理論に基づく第一原理理想強度解析や、分子動力学を用いた転位運動のシミュレーション、原子構造不安定モード解析など**様々な計算科学的手法を駆使し、**材料強度の発現機構の解明に取り組んでいます。**



転位運動と結晶すべりの分子動力学シミュレーション

②ナノ構造材料の特異な変形および物性変化の原子・電子モデルシミュレーション

カーボンナノチューブなどのナノ構造材料が注目されるようになって久しいですが、その特異な変形挙動や、それに伴う物性変化を利用した新たなナノデバイスの創出に向けた研究が続けられています。例えば、ナノチューブの座屈現象を積極的に利用し、**小さなひずみで巨大な物性変化の獲得を狙う全く新しい機序のナノデバイス**などが考えられます。こうした新奇ナノデバイスの特性予測のためには、原子・電子モデルシミュレーションが威力を発揮します。本研究室では、カーボンナノチューブや強誘電体ナノワイヤなどを対象としたシミュレシ



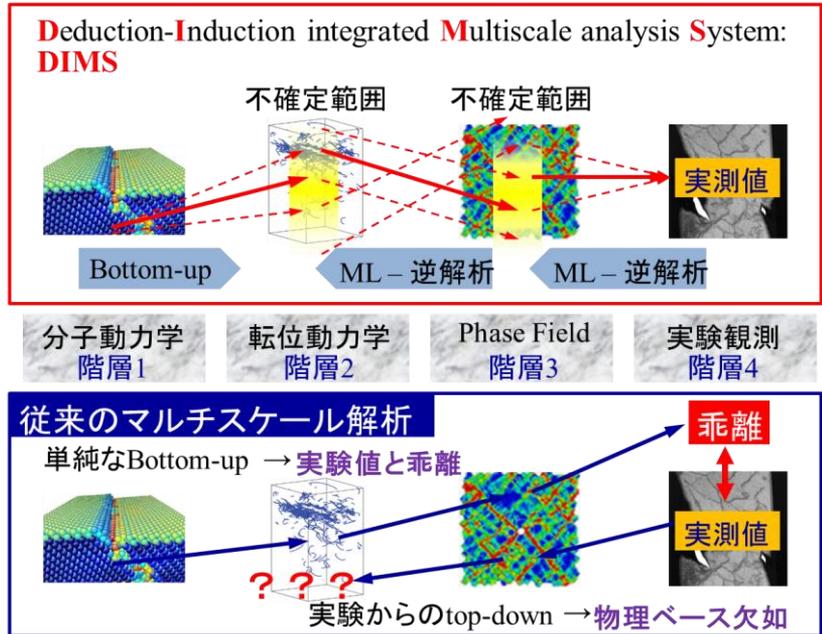
カーボンナノチューブ座屈を利用したバンドギャップ制御の解析

ョンを行い、次世代ナノデバイスの理論設計を試みています。

③機械学習を活用した新しい階層型マルチスケール解析手法の構築

固体材料の変形・破壊挙動を真に明らかにするためには、スケールレベルごとに適切なモデルを用いる必要があります。本研究室では、第一原理計算、分子動力学法、フェーズフィールド法、有限要素法など様々な手法により、ナノ～マクロの広範なスケールをカバーする「階層的マルチスケール解析」を行っています。

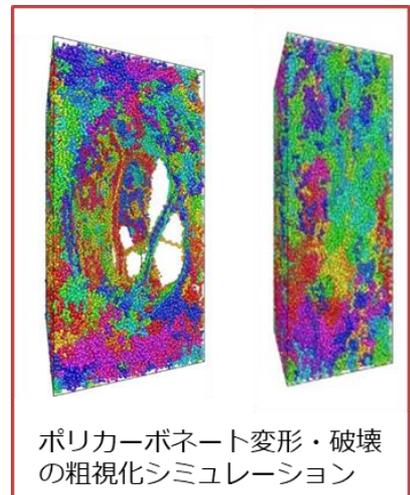
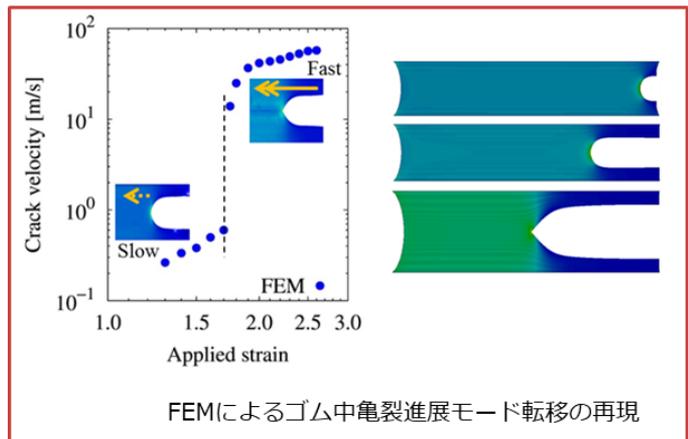
階層的マルチスケール解析では、スケール間接続（スケールブリッジ）を如何に実現するかが問題となってきました。そこで我々は、機械学習を活用し逆解析手法を用いることで、ボトムアップ的（演繹的）手法とトップダウン的（帰納的）手法を融合させるという画期的な取り組みを行っています。原子レベルから実測レベルまで矛盾なく接続することができる、全く新しいフレームワークの構築を目指しています。



④ポリマーの変形と破壊のマルチスケール解析

高分子材料（ポリマー）が構造材料としても応用範囲を拡大しており、より優れた機械的特性を備えた材料の開発が求められています。我々は優れたポリマー開発・製造のための指導原理を得ることを目的として、粗視化分子動力学（Coarse-Grained Molecular Dynamics; CGMD）および有限要素解析（FEM）を用いたマルチスケールシミュレーションを展開しています。

ポリカーボネートについて様々な多軸応力負荷条件の CGMD シミュレーションを行い、降伏応力をひずみ速度の関数として取得するなど、材料強度特性を計算機により獲得する取り組みを進めています。また、エラストマー（ゴム材料）の亀裂進展について、これまで不可能であった低速・高速亀裂進展モード転移現象（あるひずみエネルギーで亀裂進展速度が不連続に増大する現象）を FEM シミュレーションで再現することに世界で初めて成功しました。



連絡先: TEL: 03-5452-6902 FAX: 03-5452-6120
E-MAIL: umeno@iis.u-tokyo.ac.jp <http://www.cmsm.iis.u-tokyo.ac.jp/>

生体流体力学, マイクロ流体と生化学システム



大学院情報学環・(兼)生産技術研究所 大島 研究室

1. 研究室の概要

循環系疾患では、血流の流体力学的要因が重要な役割を果たしていると考えられています。そこで本研究室では、代表的な循環系疾患である脳動脈瘤・動脈硬化症の発症および進行のメカニズムを流体力学的な観点から解明することを目的とし、数値解析や流れの可視化計測を用いて研究を進めています。

また、マイクロスケールの流れを介して分析や反応を行う血液診断チップなどの生化学システムでは、その流れの物理は未知な部分が多く存在します。そこで、マイクロ PIV やデジタルホログラフィ顕微鏡という光学的手法を用いることによって、微小流路内を流れる混相流の可視化計測を行っています。

2023 年度の在籍者は、大島まり（教授）、博士課程学生 3 名、修士課程学生 7 名、研究実習生 1 名、学術支援職員 1 名の計 13 名です。

2. 研究内容

2.1 医用画像に基づく循環器系統合シミュレーションシステムの開発

脳動脈瘤や動脈硬化症など血管病変の発生・進行メカニズムには、血管形状に起因する血流の速度分布や壁面せん断応力などの流体力学的因子と、生物学的因子が複雑に絡んでおり、本研究では前者を数値解析により解明することを目的としています。

生体に対する数値解析では、実際の生体内を再現したモデル、境界条件を採用することが重要な課題です。ここでは CT や MRI など、患者個別の医用画像から 3 次元血管形状を自動的かつ高精度にモデリングする手法を開発し、血流と血管壁の変形を同時に解く流体構造連成解析や、末梢血管網など循環系全体の影響を考慮した境界条件を導出・適用した大規模血流解析システムを構築して、多角的な視点から血管病変のメカニズム解明に取り組んでいます。

図 1 に循環器系統合シミュレーションシステムの概要を示します。

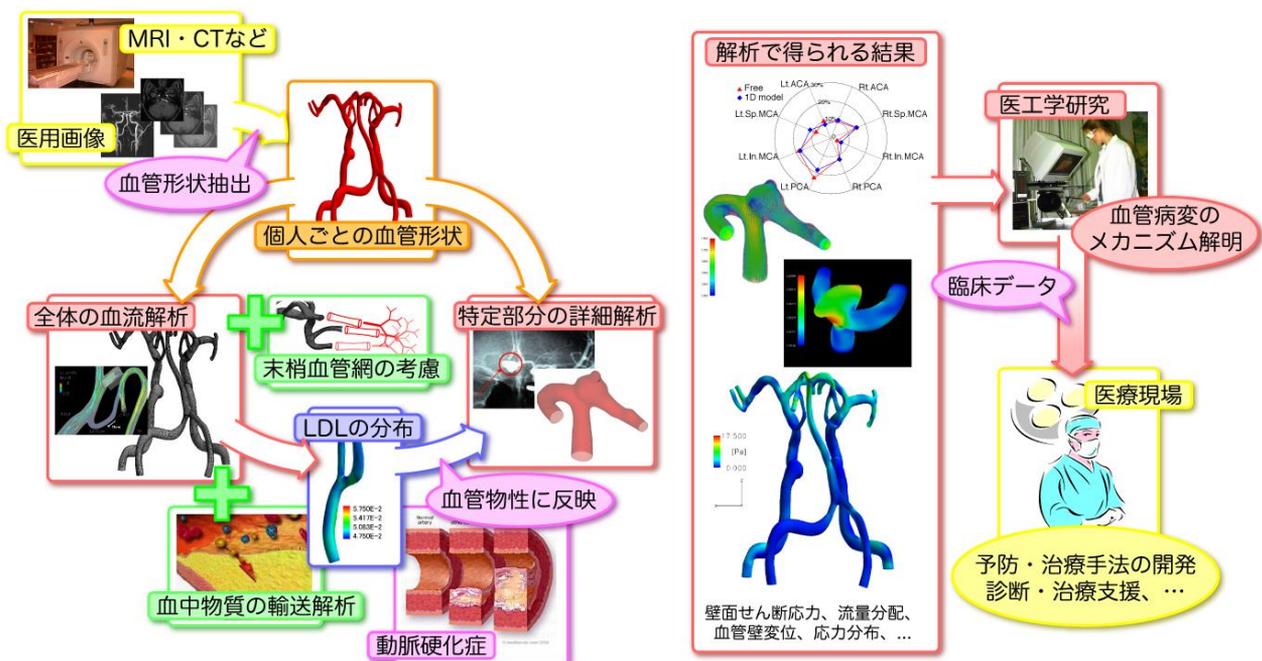


Fig.1 循環器系統合シミュレーションシステムの概要

2.2 シミュレーションと深層学習の統合による予測医療

血流シミュレーションの臨床応用に向けた大きな課題として、医用画像や医用計測データが持つ不確かさの反映と、シミュレーションに要する時間の長さがあります。本研究室では、医用データやモデルパラメータの不確かさを考慮し、予測結果のばらつきを確率分布として評価するための手法を構築しています（図2）。特に、従来のシミュレーションに代わって高速に血行動態を予測する深層・機械学習モデルの作成に取り組み、膨大なケーススタディを通じた不確かさ評価を一般的なPCでも即時に行えるような、実用性に富む手法開発を目指しています。

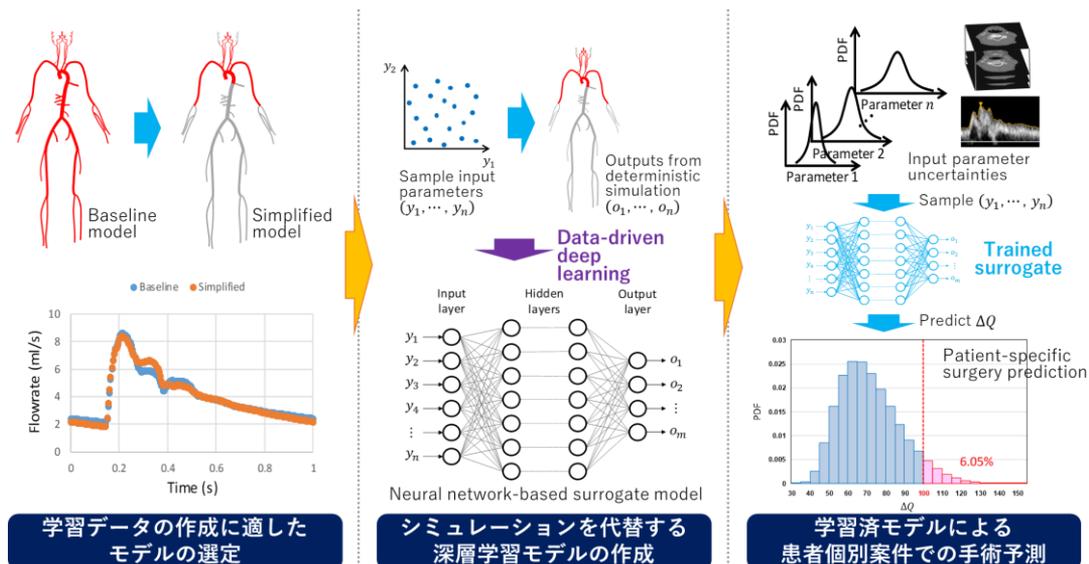


Fig. 2 代理モデルを活用した不確かさ評価

2.3 マイクロスケール混相流における相互作用の多次元可視化計測

マイクロ流体デバイス内における混相流動の解明に向けて、マルチカラー化した共焦点マイクロPIVシステムや3次元計測が可能なデジタルホログラフィ顕微鏡を開発し、可視化計測を行っています。

PIV (Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速測定法) では、流れの中に微小な蛍光粒子を混濁させ、撮影した連続画像を解析することで速度分布を求めます。また、異なる蛍光粒子像を光学的に分離することで、マイクロ混相流の相互作用を定量的に計測できます。図3は単一赤血球の計測例です。

デジタルホログラフィ顕微鏡では、光の干渉を利用して2次元画像から3次元情報を抽出できます。計測対象として、混合しない2種の液体を用いた、マイクロ液滴の生成現象（図4）を検証しています。

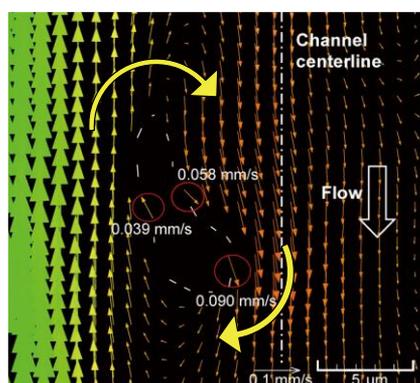


Fig. 3 赤血球の膜回転運動と周囲流動

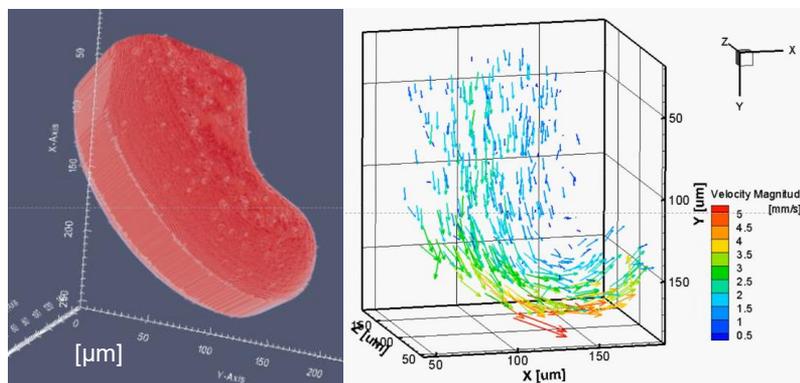


Fig. 4 水-油界面の3次元形状と内部3次元流動

連絡先: TEL / FAX: 03-5452-6205, E-MAIL: olab@iis.u-tokyo.ac.jp
<https://www.oshimalab.iis.u-tokyo.ac.jp/japanese/>

生体分子やナノ分子の革新的なシミュレーション

生産技術研究所 佐藤（文）研究室



1. 研究室の概要

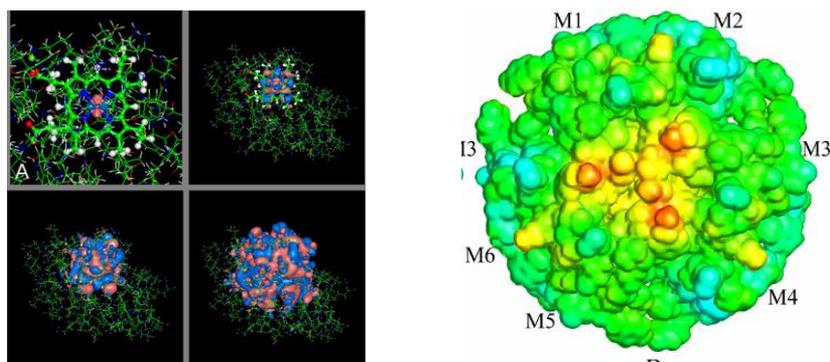
タンパク質はわずかなエネルギーで効率良く働く精密な分子で、機能の発現と大規模で複雑な構造を持っていることは不可分です。タンパク質の機能を本質的に解明し予測するためには、タンパク質分子構造を丸ごと、量子化学を用いて解析する方法

が正攻法です。当研究室では密度汎関数法によるタンパク質の正準分子軌道計算プログラム ProteinDF / QCLObot を開発・発展させており、新規酵素やナノ材料の設計などの応用に取り組んでいます。なお、当研究室は生産技術研究所・革新的シミュレーション研究センター (CISS) のメンバーです。(http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/)



2. 研究内容

2000年に104残基のヘムタンパク質シトクロムcの正準分子軌道計算に成功し、金属タンパク質の分子軌道を世界で初めて明らかにしました(下図左)。これを皮切りに、2006年には306残基のインスリン6量体(下図右)など、様々なタンパク質の電子の世界を明らかにしてきました。また、コレスキー分解法とグリッドフリー法を組み合わせ、超々並列計算に適した新たな密度汎関数法アルゴリズムの開発にも成功し、これを第3世代法と名付けました。



(左) 世界で初めて明かにしたシトクロムcの分子軌道

左上Aの等値面の値は0.05で、右上、左下、右下へと値を1/10にして描いている。分子軌道はタンパク質全体に広がっている。Aはスケールを2倍にして描いている。

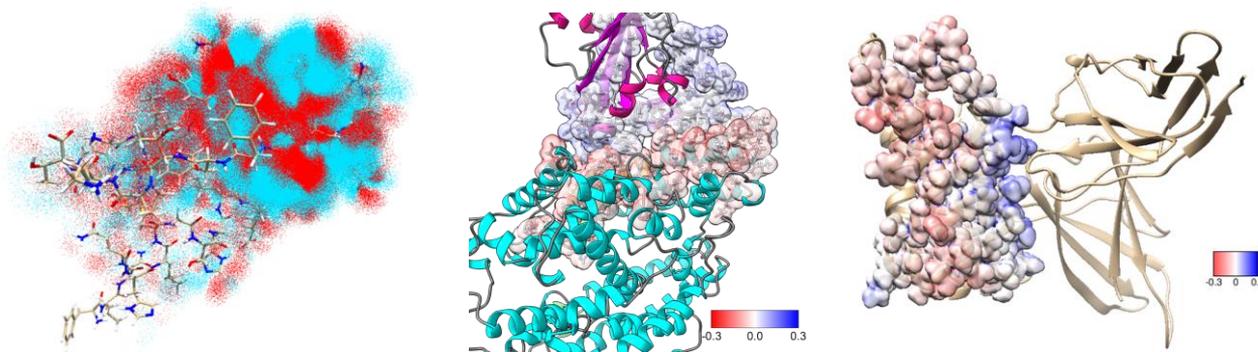
(右) 306残基インスリン6量体の静電ポテンシャル

このような特徴を持つ ProteinDF / QCLObot を基に、以下の項目による研究開発を進めています。

- A. 様々なコンピュータで性能を出す密度汎関数法アルゴリズム
- B. タンパク質などナノ分子のための正準分子軌道自動計算法
- C. 大規模分子の電子構造解析法
- D. シミュレーションを支援・評価・解析するツール
- E. 酵素、薬剤、材料の設計

タンパク質のような巨大分子の丸ごと正準分子軌道計算を実行できるという、世界でも極めてユニー

クな本方法は、バイオ・ナノ材料のための信頼性の最も高い基礎解析技術です。様々な実証計算を通して堅固な技術へと発展させており、応用研究としてペプチドアプタマーの仕組みの解明や新規酵素を設計する共同研究等を推進しています。なお、ProteinDF / QCLObot は GPL v3 オープンソースとして逐次最新版を公開しています。(https://proteindf.github.io/)



(左) インスリンの分子軌道(雲状表示)

(中) SARS-CoV-2 ウイルススパイクタンパク質と ACE2 の結合領域における静電ポテンシャル分布

(右) インターフェロン α 2 の Lys23Arg 変異体の静電ポテンシャル分布

本研究に関する理論書として「タンパク質密度汎関数法」森北出版 (2008)、プログラム演習書として「プログラムで実践する生体分子量子化学計算 - ProteinDF / ABINIT-MP の基礎と応用」森北出版 (2008) を出版しています。加えて、実践的なシミュレーションソフトウェア開発のための教科書 (基礎編) として「ソフトウェア開発入門: シミュレーションソフト設計理論からプロジェクト管理まで」東大出版 (2014)、参考書 (応用編) として「ソフトウェア開発実践: 科学技術シミュレーションソフトの設計」東大出版 (2015)を、それぞれ上梓しています。これを用いた大学院演習講義は情報処理学会で ISECON 2016 優秀賞を受賞しました。



3. 研究室

当研究室は生産技術研究所研究棟の De501-503 にあります。スタッフは教授、学術専門職員、事務補佐員で、3 名の修士課程、1 名の博士課程の学生がおります。国内外の学会参加以外にも、学々間、産学間との連携研究も進めております。

連絡先 : TEL: 03-5452-6665/6670, FAX: 03-5452-6668, E-MAIL: satofumi@iis.u-tokyo.ac.jp

<http://www.satolab.iis.u-tokyo.ac.jp/>

固体酸化物形燃料電池/電解セル と次世代熱機関の研究



生産技術研究所 鹿園研究室

1. 研究室の概要

本研究室では、600～1000℃という高温で作動する燃料電池である固体酸化物形燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell; SOFC) や固体酸化物形電気分解セル (Solid Oxide Electrolysis Cell; SOEC) , 数百℃以下の温度で動作する蒸気エンジンやヒートポンプ等, 熱をキーワードに, 将来の社会を支えるためのエネルギー技術の研究開発を行っている。

2. 研究内容

2. 1 固体酸化物形燃料電池の研究

SOFC や SOEC の電極は, サブミクロン程度の粒子を焼結した多孔質構造となっており, 電極反応の場である三相界面 (Triple Phase Boundary) とともに, イオン・電子・ガス種の拡散パスがその過電圧特性に大きな影響を与える。図 1 に, 収束イオンビーム走査型電子顕微鏡 (FIB-SEM) を用いて, 数 10 ナノメートルの撮像度で再構築した燃料極の 3 次元構造を示す。黄色がイットリア安定化ジルコニア (YSZ) , 緑がニッケル (Ni) である。この再構築構造を用いることで, 例えば三相界面長さや各相の導電性の指標となる屈曲度ファクター等, 従来は定量的な議論をすることができなかつた電極の微細構造パラメータを知ることができる。この構造を用いて, YSZ 内のイオン伝導, Ni 内の電子伝導, 空隙内のガス拡散, および三相界面での電気化学反応を連立させた数値シミュレーションを行い, 実際の電極構造を用いた過電圧を世界に先駆けて予測した。図 2 に, 電極内の酸化物イオン電気化学ポテンシャル分布, および電極内の電子電流およびイオン電流分布を示す。電極反応が電解質側の 10 数ミクロン程

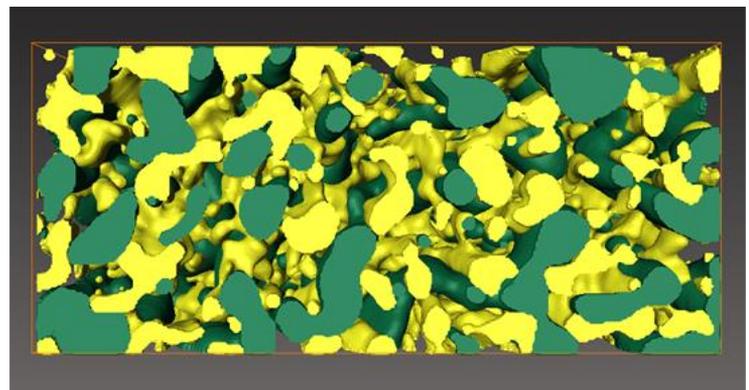


図 1 FIB-SEM により再構築された燃料極 3 次元構造
黄色 : YSZ, 緑 : Ni

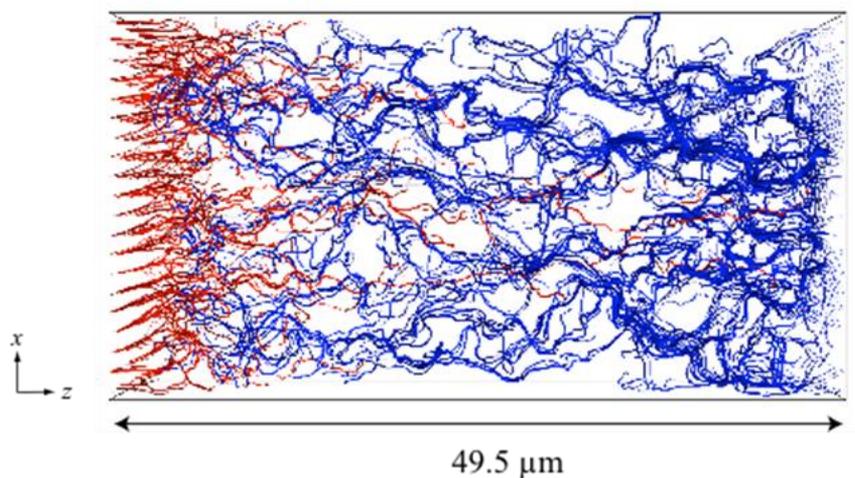


図 2 燃料極内のイオン電流(赤)および電子電流(青)

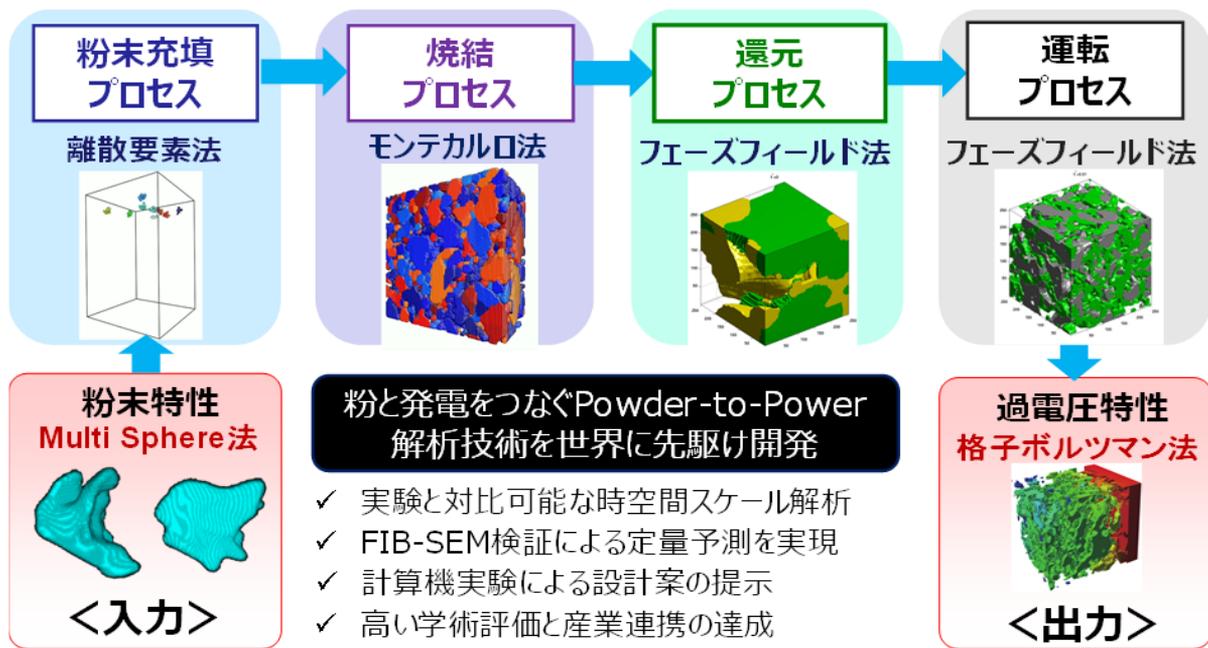


図3 数値シミュレーションを用いた SOFC&SOEC 電極の予測技術

度の範囲にあること、電流が非常に複雑な導電パスを通じて流れていることがわかる。

また、SOFC や SOEC の電極は高温で長時間運転されるため、微細構造の形態変化による劣化が課題となっている。現在、図3に示すようにモンテカルロ法やフェーズフィールド法を駆使して、材料粉体から長期運転の発電特性までを予測する数値シミュレーション手法を構築している。この数年は、機械学習を従来の実験や数値シミュレーションに組み合わせて適用することで、従来出来なかった観察や予測を実施できるようになっている。

2. 2 次世代熱機関の要素技術に関する研究

熱の有効利用は、カーボンニュートラルを実現する上で最も重要な課題の一つである。その実現のために、暖房や給湯需要へのヒートポンプの普及拡大が期待されているが、特に低温時の室外熱交換器への着霜による能力や性能の低下が課題となっている。本研究室では、レプリカ法と呼ばれる独自の手法により、非常に脆く溶けやすい霜の3次元構造を明らかにし、そのデータをもとに数値シミュレーションや機械学習を用いて霜の成長や予測を行う研究を実施している。図4に、取得した霜のレプリカを、X線CTを用いて3次元構造を調べた例を示す。温度、湿度、風速、時刻と非常に多くのパラメータ条件の下、霜の3次元構造データベースが整いつつある。

この他にも、沸点の異なる作動流体を混合した非共沸のローレンツサイクルと呼ばれる熱機関の研究を実施している。相変化中に温度が変化するという特性を活かして、ヒートポンプの大幅な小型化を目指している。

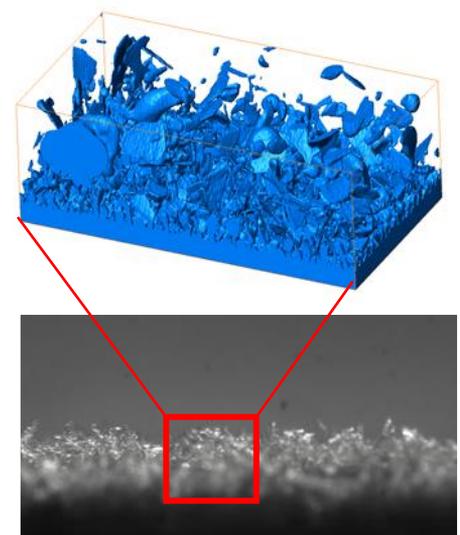


図4 レプリカ法による霜の3次元構造解析

水の分子熱工学と生体の高品位保存技術の研究

生産技術研究所 白樫研究室 (相変化熱工学)



1. 研究室の概要

本研究室は、平成9年4月に発足し、職員1名(松浦弘明助教(令和4年~))と運営している。現在所属する研究スタッフは、特任研究員(PD)1名、修士課程2名、で、国内外の他大学の研究室との共同研究を行っている。本研究室は、

- 1) 相変化(蒸発, ガラス化, 凝固)の速度過程・熱力学特性の計測と、それらを用いた熱物質輸送現象の(数値)解析,
- 2) 誘電分光による生細胞の各部位の電気特性の測定および非定常電場解析
- 3) 物質(生体等)内の水(自由水・結合水)の赤外・誘電分光と、水分子運動の緩和時間解析を学術的基礎としている。

2. 研究内容

上記の基盤学術1), 2), 3)を活用して、医・食・熱工学分野における下記の3つの問題を、→以下の事項を研究することで解決する。

1. タンパク質-細胞-生体組織等の生命系や食物, 生分解性材料等の'なまもの'の劣化・失活, を予測・評価し, 制御するにはどうしたらよいか?

→ 最適な耐凍結・乾燥保護物質の選定, 同保護物質の細胞内への導入, 凍結・乾燥プロセスの最適設計, 結合水の特性と劣化寿命の関係, ミオシン動特性の測定による赤血球寿命の予測

2. 誘電・赤外分光により, 含水物質内の水分子の水素結合状態やダイナミクスを定量化できるか?

→誘電分光による水の誘電緩和時間(水分子の回転緩和時間)の測定, 顕微短波赤外分光による水素結合エネルギー・水分子の回転緩和時間・拡散係数・局所水分活性の高空間解像度測定法の開発

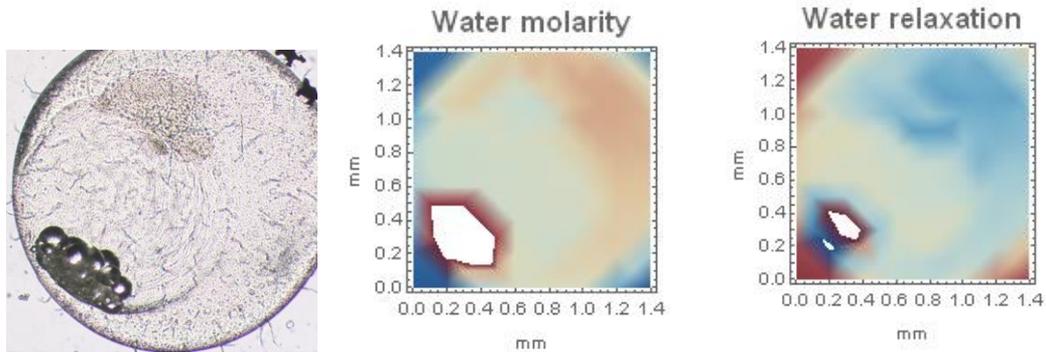
3. 生体内や含水材料の水分子の水素結合状態やダイナミクスから, マクロ特性を予測・設計できるか? (応用誘電分光, 赤外分光)

→ 細胞内の水分子の回転緩和時間と耐乾燥・凍結特性の関係, 保護物質による水分子運動抑制と分子動力学計算, 褐炭の低温酸化反応速度と含水分子の回転緩和時間の関係

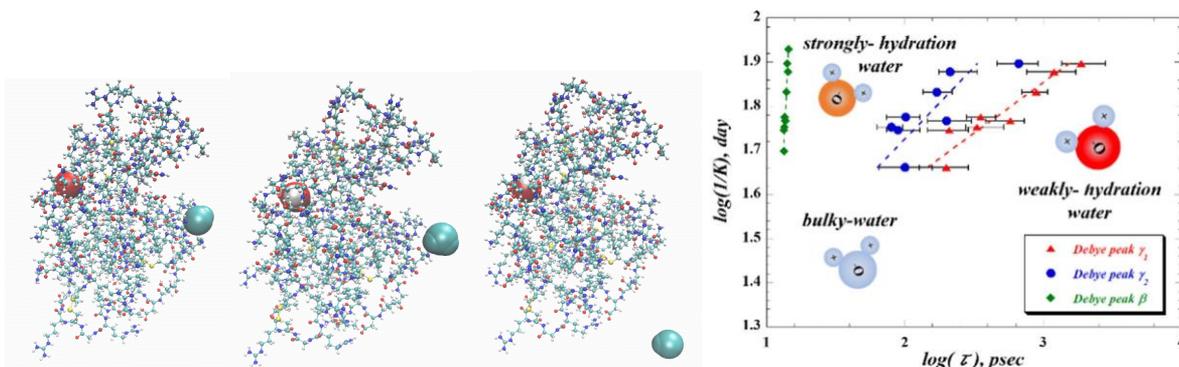
これまでの研究テーマ:

- ・酒造工程における原料米内の水分分布予測 (2, 3)
- ・疾患の早期診断で重要なバイオマーカーを含む臨床検体の常温乾燥による長期高品位保存 (1)
- ・ワクチン等のバイオ薬剤の常温乾燥による高品位保存法の開発(1)
- ・タンパク質, 生体保護物質と干渉する結合水のマイクロ特性と凍結・乾燥, 物質輸送特性の関連の解明 (1, 3)
- ・低品位炭の有効利用のための含水状態・反応速度の測定による自然発火現象の予測 (1, 3)
- ・小麦代替食材の粘弾性特性と含水分子のダイナミクスとの関係の解明 (3)

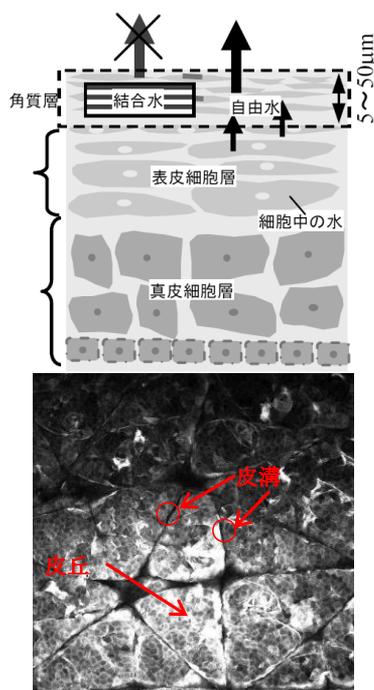
(括弧内は, 上記で示した問題の番号)



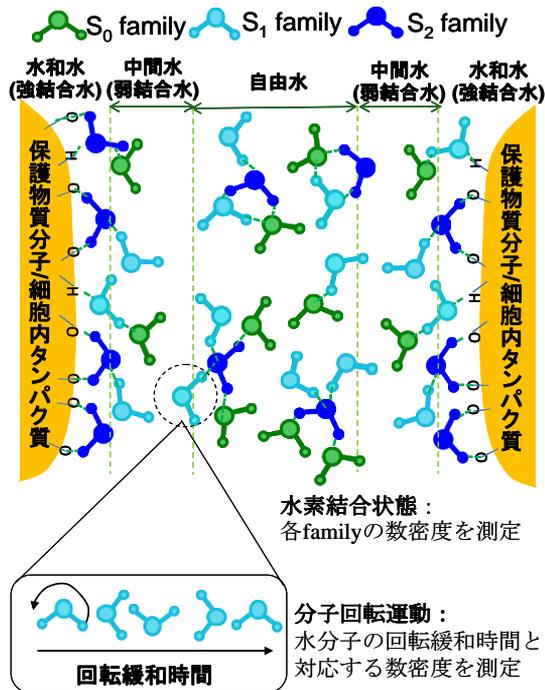
メダカ受精卵内の含水量と水分子回転緩和時間の分布



保護物質周囲の水分子の運動とバイオマーカー (LDH) 劣化速度との関係



皮膚の縦断面と横断面 (共焦点顕微鏡画像)



水分子の運動・結合測定 の概念図

モビリティにおける計測と制御 -機械生体システム制御工学-

生産技術研究所 中野（公）研究室



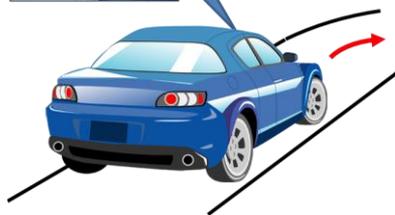
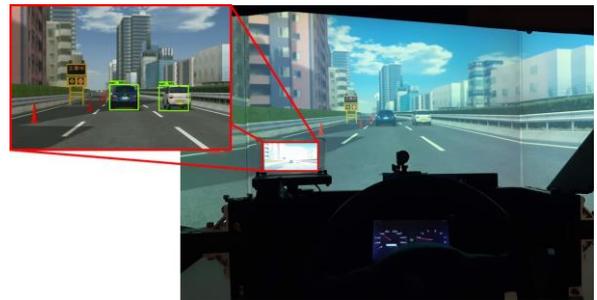
1. 研究室の概要

機械工学の知識を基に、自動車のヒューマン・マシーン・インターフェース、力覚支援操舵、自動運転制御系設計、自動運転の社会実装、自動車と鉄道の統合的交通制御、鉄道車両の状態監視、エネルギーハーベスティング(振動発電)など、モビリティにおける計測と制御に関する研究を幅広く行っています。

2. 研究内容

2. 1 運転支援用ヒューマン・マシーン・インターフェース

運転支援（運転の自動化レベル 2）においては、常に運転の責任はドライバーにあり、システムで対応できない事象については、適切に運転に介入する必要があります。特に、一般道にもレベル 2 の運転支援を展開する場合は、このドライバー主導の運転引継ぎを適切に行うためのヒューマン・マシーン・インターフェース（HMI）が必要になります。HMI の提案とドライビングシミュレータを用いた有効性の評価を行っています。

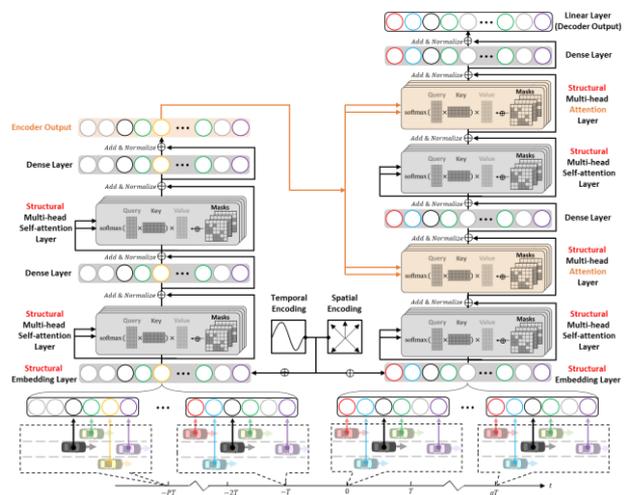


2. 2 シェアード・コントロール

シェアード・コントロールとは、機械と人間が一緒になって制御を行うシステムを指し、自動車の運転支援技術の一部がこれに該当します。理想とする軌道からの偏差に応じた操舵反力をハンドルに与えることによって、操舵を支援する力覚支援操舵を例にして、シェアード・コントロールの研究を行っています。支援効果向上のためには、ドライバーの意図に沿った将来の軌道の予測等の技術が必要とされています。ドライビングシミュレータ実験などを通じて、有効性を検討しています。

2. 3 交通シナリオの理解に基づく周辺車両の走行軌跡予測

高速かつ正確な周囲の車両の長期的な軌跡予測は、自動運転システムにとって重要です。高密度の交通流では、複数の周辺車両の相互作用を予測時に考慮する必要があります。しかし、既存のインタラクティブな予測手法は、大部分が Long Short-Term Memory (LSTM) を基にしており、車両を一つずつ分析し、軌跡のシーケンスをノードごとに分析するため、予測が遅くなるという課題があります。本研究では、Structural Transformer を用いて、高速でインタラクティブに軌跡を予測することを提案し、数値計算により、その有効性を示します。



2. 4 回転体におけるエネルギー・ハーベスティング

タイヤにセンサを設置することができれば、空気圧、接地状態のモニタリング等が可能になり、より安全な自動車の走行が可能になります。ただし、回転しているため、電源供給が困難です。非線形振動を利用して振動を増幅し、圧電素子を利用して回転体内で発電することを試んでいます。数値計算、実車実験を通じて、発電性能の計測を行っています。



2. 5 PQ 輪軸測定値からのレール・車輪間の状態推定

車輪の垂直荷重と横圧（車輪の横方向に作用する力）を測定可能なPQ輪軸は、脱線係数を求め、脱線の危険性を評価する際に用いられます。アタック角、摩擦係数などの脱線係数以外の数値をPQ輪軸によって推定することを試んでいます。



2. 6 携帯電話回線を利用した鉄道車両と自動車の統合型交通制御システム



鉄道車両の位置情報を、携帯電話回線を用いてセンターサーバーに送信し、踏切警報機・遮断機を制御するシステムが株式会社京三製作所より提案されています。そのシステムを拡張すれば、自動車、交通信号機への信号の送信も可能になり、自動運転、運転支援車両、さらに電動車いす等を含めた、多モードの交通制御が可能になります。柏キャンパスでの鉄道試験線と ITS 実験フィールドを用いた実験により、実現可能性を検討しています。

2. 7 ELSI を踏まえた自動運転技術の現場に即した社会実装手法の構築

ELSI とは、Ethical, Legal and Social Issues の略で、倫理的、法的、社会的課題を指します。当研究室では、自動運転バスの実証実験に関わってきましたが、社会実装をするためには、技術的課題の解決だけでなく、ELSI の解決も必要です。明治大学自動運転社会総合研究所および筑波大学公共心理研究室と共同で、ELSI を踏まえた自動運転技術の社会実装手法の構築に取り組んでいます。



2. 8 柏の葉におけるレベル4自動運転モビリティサービスの実現への取り組み

レベル4の走行を可能にする法整備も行われましたが、一般道などの混在空間で実現するためには信号情報を提供し、車両から死角となる障害物を検知するような路車協調システムを用いることが必要とされています。柏 ITS 推進協議会を実施主体として運行している柏の葉キャンパス駅と東京大学柏キャンパス間の自動運転バス（レベル2運用）の実証実験の実績を基に、経済産業省事業の下、関連省庁と連携しながら、柏の葉でレベル4の自動運転バスサービスを実現することを目指した活動を行っています。



熱流体工学における最適化問題への挑戦

生産技術研究所 長谷川研究室



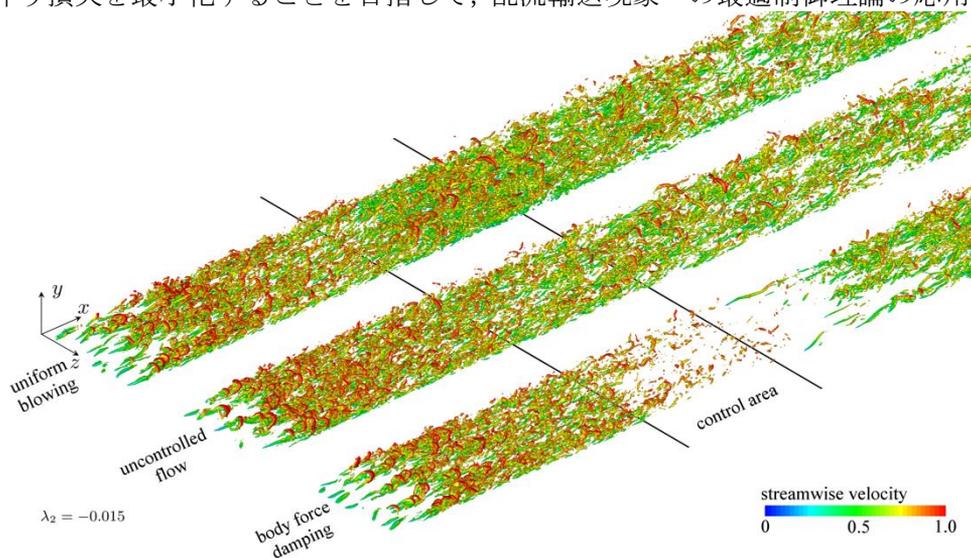
1. 研究室の概要

空気や水などの単純な流体については、古くからその支配方程式が知られており、近年では、これを数値的により解くことにより、様々な熱流体機器における流れ場やそれに伴う熱・物質輸送の時空間発展を再現することが可能となった。しかし、現象の支配方程式が与えられることは、必ずしも現象の正確な予測や自在な制御を保証するものではない。実際、天気予報は依然として不確実性を有しているし、航空機の翼や自動車の形状は、より高い性能を実現すべく年々変化している。熱流体現象は、強非線形性、マルチスケール性を有しており、僅かな攪乱に対してその挙動は時に予想不能な振る舞いを見せる。原因が与えられた時に結果を予測するのが順問題であるのに対して、逆問題は結果から原因を推定する学問領域である。本研究室では、大規模数値シミュレーション、実験計測、そして高度な最適化技法を組み合わせることにより、熱流体分野における様々な逆問題に取り組んでいる。

2. 研究内容

乱流輸送現象の最適制御

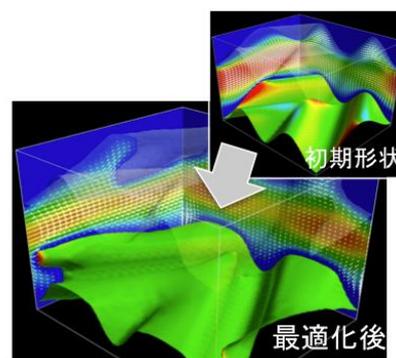
我が国の運輸部門のエネルギー消費は、全エネルギー消費の25%程度を占めており、自動車、航空機、船舶、パイプライン等の高速輸送機器で生じる流動抵抗を低減できれば、省エネルギー化、低コスト化に大きく寄与できる。一般に、乱流状態における壁面摩擦抵抗は、層流状態の値に対して極めて大きい。従って、乱れを抑制し、流れを層流化させることができれば、大幅な抵抗低減が期待できる。一方、熱や物質輸送は、乱流によって飛躍的に促進される。本研究室では、乱流の高い混合特性を維持しつつ、摩擦抵抗に伴う損失を最小化することを目指して、乱流輸送現象への最適制御理論の応用を進めている。



熱流体システムにおける複雑3次元形状最適化

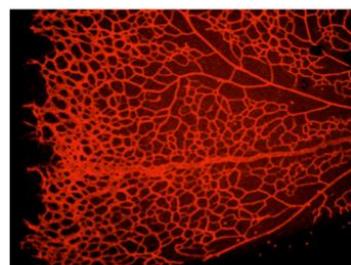
我々の生活を支える多くのエネルギー機器では、界面における輸送現象を自在に制御することが鍵となる。例えば、壁面と流体の界面で生じる摩擦抵抗は、航空機等の高速輸送機器のエネルギー損失を支配している。熱交換器や冷却器の設計では、圧力損失を抑えつつ、熱伝達特性を飛躍的に向上させること

が望まれる。固体酸化物形燃料電池の電極性能は、三相界面で生じる電気化学反応と各相内部のイオン、電子、燃料の拡散抵抗のトレードオフで決まる。これらの界面は複雑な3次元形状を有しており、その自由度も大きいことから、形状最適化は容易ではない。本研究では、随伴解析に基づき、多自由度設計変数の感度解析を行うことによって、トライ・アンド・エラーをせずに、数学的に3次元形状の最適化アルゴリズムを開発し、複数の企業と共同で次世代の熱流体機器を提案している。



熱交換器伝熱面形状の最適化例

形状最適化は工学以外の分野でも重要である。その典型例として、生体内部における血管網形成プロセスに注目している。血管網は、心臓のポンプ動力を抑えつつ、血流によって必要な酸素や栄養分を生体内に輸送するという本質的な機能を担っている。本研究では、海外の生物学者と協働して、生後間もないマウスの血管網形成メカニズムを明らかにすることによって、その最適化アルゴリズムを工学に応用することを目指している。



マウスの血管網形成プロセス

移動ロボットを用いた物質放出源推定に関する研究

近年、原子力発電所からの汚染物質の拡散や海洋における原油流出事故等、人類の安心、安全を脅かす

事例が生じており、環境乱流中における物質放出源推定のニーズが高まっている。災害発生直後は、当該地域における人間活動は大きく制限される場合が多く、移動ロボットが自律的に濃度シグナルを頼りに物質放出源を特定することができれば、災害後の迅速な対応や汚染物質の拡散予測に大きく貢献できる。本研究室では、有限、かつノイズを含む観測データに基づき、乱流中におけるスカラー源推定に取り組んでいる。



構築したアルゴリズムを自律型水中ロボットに搭載し、大型実験水槽において実証する。また、陸上走行型、ドローンを用いた飛行型のスカラー源探索ロボットの開発も進めている。

塗布乾燥プロセスにおけるナノ・マイクロ粒子の自己配列化に関する研究

次世代エネルギー機器として注目される燃料電池、太陽電池、リチウム電池等は、電極材料となる粉体を多成分溶媒に混合、分散させた後、基板に塗布、乾燥させることで製作される。このプロセスは、薄液膜流れ、固気液接触界面、相変化、熱・物資輸送を含む、複雑な熱流動現象であり、経験に大きく依存しており、科学的アプローチが遅れている。当研究室では、温度や湿度を制御した環境において、スラリーの塗布乾燥プロセスを再現する実験装置を構築しており、最新の計測技術や数値シミュレーション技法を駆使することによって、現象の理解、モデル化を進めている。

連絡先: TEL: 03-5452-6171, FAX: 03-5452-6171, E-MAIL: ysk @iis.u-tokyo.ac.jp
<http://www.ysklab.iis.u-tokyo.ac.jp/>

加工点制御による高精度機械加工の実現

生産技術研究所 吉岡研究室



1. 研究室の概要

2022年4月の着任に伴い活動を始めた新しい研究室です。研究室は駒場リサーチキャンパス内にあります。研究分野は、高精度機械加工、精密メカトロニクス、高精度機械システムの実現等です。

近年、工業製品の飛躍的な性能向上に伴い、構成部品に対する加工精度はさらに厳しくなると共に、その製造コストの削減も併せて要求されています。いわゆる“ものづくり”に関する生産工学分野は地味な印象があるかもしれませんが、設計した工業品を画餅で終わらせないための重要な役割を担っており、最終的な製品性能を左右するコア技術となっています。研究室では、広範囲な材料に対して、高精度、高能率、ならびに低生産コストを実現するための高い柔軟性を有する加工技術の確立を目的として、以下のような研究課題に取り組んでいます。

2. 研究内容

超精密加工システムの研究開発

実際に超精密な加工を実現するためには、機械システム内で生じる振動や発熱などを考慮し、制御系を含めたシステム全体として加工誤差の原因となる因子を抑制する必要があります。研究室では、独自に開発した超精密機械ユニットを組み合わせると共に、それらを支える本体構造を含めて最適化することで超精密加工システムを構築し、実際に加工特性評価を行っています。図1左は、様々な誤差因子を徹底的に排除した設計を行い開発した、ナノメートル以下の位置決め分解能を目標とした位置決めテーブルシステムです。また図1右は構造の軽量化及び低熱変形化をはかるため、全面的にセラミックス材料を採用し、各運動部を非接触構造とした超精密三次元加工システムです。加工中に接触しているのは加工点のみという状態を創り出し、数十ナノメートルの微細加工を実現しています。また加工力に起因する運動誤差を低減するため、加工中の切削力を推定し補償する機能を制御系に組み込むことで、加工力作用下においても高精度な加工を実現するべく研究を展開しています。

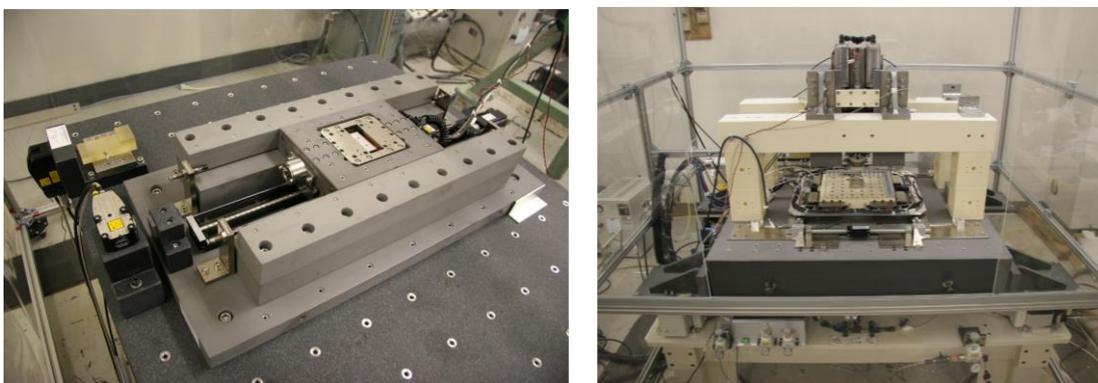


図1 (左) サブナノ位置決めシステム、(右) 超精密三次元加工システム

高速工具サーボによる自由曲面への微細パターンニング

近年、生体機能などを参考に、部品表面に微細構造を無数に配することで特異な機能を発現する機能

表面が注目されています。半導体製造技術を用いることで平面への微細構造の創成は容易ですが、曲面への適用は制約により困難です。一方で機械加工による創成では、曲面加工は可能なものの微細パターンを一つ一つ削り出すことに長時間を要してしまいます。研究室では、外部磁場の印加により微小に伸縮することが可能な超磁歪材料に着目し、切削工具の根本付近に組込みマイクロメートルオーダで刃先位置を高速に制御することで、曲面の創成および微細構造パターンングを同時に実現する技術について研究開発を行っています(図2)。この技術が実現した後は、光学、トライボロジー、装飾など様々な機能を付与する微細構造を自由曲面上に高効率に創成することが可能となり、様々な産業への適用が期待されます。

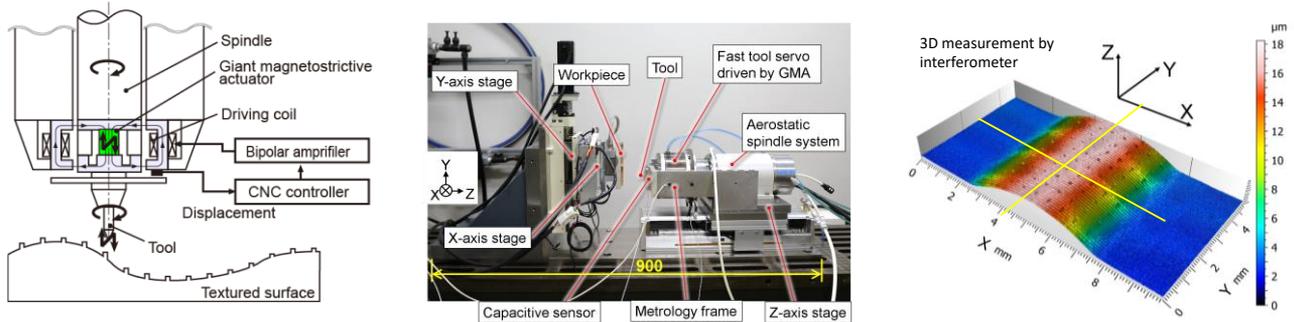


図2 構築した高速工具サーボと加工面の一例

超フレキシブル生産システムに関する研究

近年、製品ニーズの多様化に伴い、効率的な多品種変量生産システムの実現が必要になってきています。研究グループでは、これまでの生産システムに対してフレキシビリティが格段に高い生産システムの実現のため、新たな要素研究を行っています。

図3(左)は従来の工作機械と比較して生産ラインの組み換えが容易かつ自由度が高い産業用ロボットを用いた機械加工の研究に取り組んでいます。ロボットの姿勢による剛性変化、関節駆動方向以外の仮想関節を考慮した変位推定など、ロボット加工の高度化の研究を行っています。また、フレキシブルな生産システムは自由度が高いため、工程の組み合わせは無数に存在し、最適なスケジューリングを組むことは容易ではありません。本研究では、量子コンピュータを用いた量子アニーリングを計算に用いることで膨大な組み合わせの中から最適なスケジュールを導出することに取り組んでいます。図3(右)は導出したスケジュールの一例です。

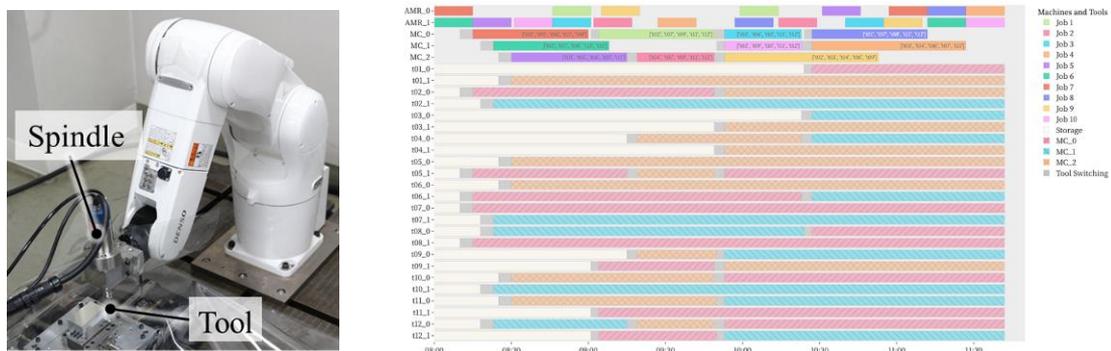


図3 (左) ロボット加工システムの評価, (右) 量子アニーリングを用いた最適スケジューリング

連絡先: TEL: 03-5452-6910, FAX: 03-5452-6911, E-MAIL: yoshi-ok @iis.u-tokyo.ac.jp
<https://yoshioka-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/> 研究室 WEB ページ



マルチスケール固体強度学

生産技術研究所 吉川 暢宏 研究室



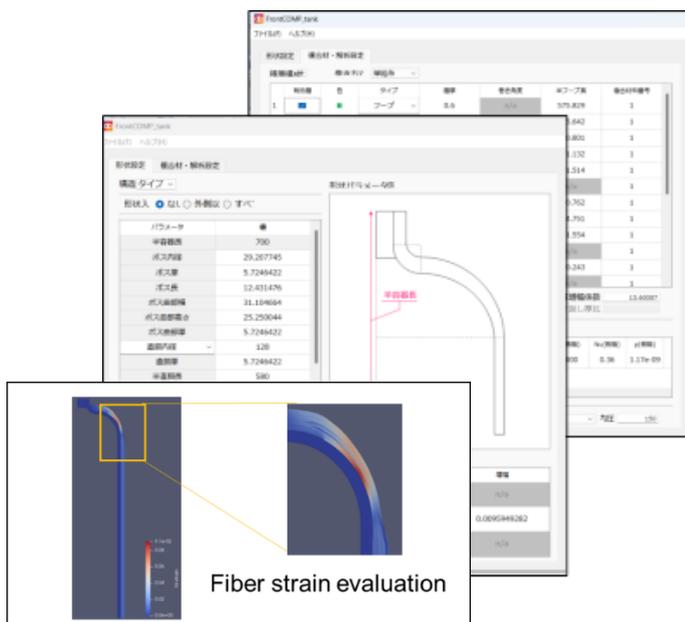
1. 研究室の概要

デジタルトランスフォーメーション (DX) による製造技術の革新に期待が高まっているが、製造現場での現物主義と人的資産崇拝の潮流が大きく変化することはない、シミュレーション技術を活用した設計の革新には程遠い状況である。炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) 製品開発の現場はその最たるもので、試作と試験を繰り返しながら、強度発現機構を見極めることなく経験的に設計諸元を定める行為が未だに横行している。その現状を打開し、炭素繊維強化プラスチックの強度発現機構を明らかにしたうえで設計の方法論を構築する、マルチスケールシミュレーション技術を開発している。特にフィラメントウィンディング製法で製造される燃料タンクの開発に焦点を絞り、以下の研究開発を実施している。

2. 研究内容

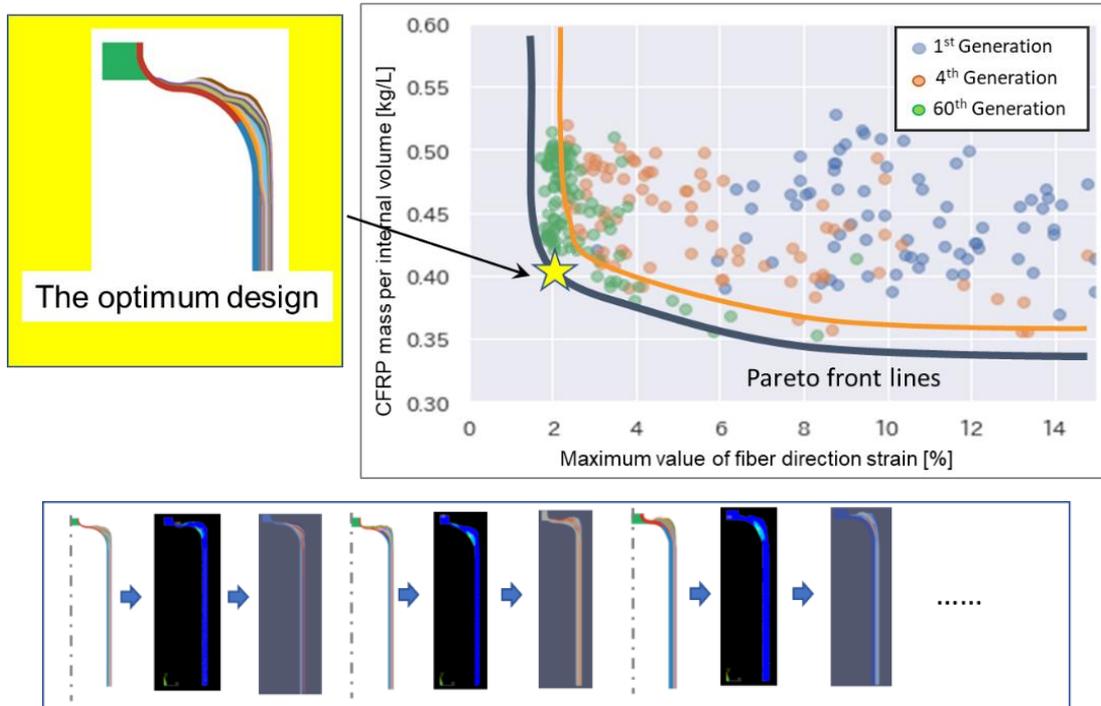
(1) CFRP 製高圧水素燃料容器の開発

グリーントランスフォーメーション (GX) を推進するための主要なエネルギー媒体である水素の活用を牽引する燃料電池自動車においては、高圧水素タンクの軽量化と低コスト化が必須の課題である。液化水素の活用も視野に入れた開発が進められてはいるが、現状では 70 MPa の超高压で水素を圧縮し搭載する CFRP 製高圧水素タンクの搭載が現実的である。合理的判断により設計を高度化するためのシミュレーション技術が求められているが、CFRP 材料の非均質性およびフィラメントウィンディングによる製法により発生する応力場の局所的不連続性により解析の信頼性を確保できるまでには至っていない。その解決策としてメゾスケールモデルを用いた強度評価法を開発している。設計に必須のマクロスケールモデル化への展開を行い、機械学習の枠組みで最適設計ソフトウェアを開発し、実容器の試作を通じてその有効性を検証した。



- Specification
 - Resistance pressure
- Tank size
 - Length
 - Inner diameter
- CFRP parameter
 - Number of layer, min. and max.
 - Helical layer angle, min. and max.
 - Hoop end position, min. and max.
 - Thickness of layer
 - Overlap volume around boss
- Doom shape parameter
 - Boss inner diameter, min. and max.
 - Boss length, min. and max.
 - Boss width, min. and max.
 - layer thickness, min. and max.
 - Doom axial length, min. and max.
 - Doom shape curvature, min. and max.

(a) 設計候補の自動生成と評価



(b) Pareto 最適解の探索

図1 機械学習による最軽量容器の探索

(2) 宇宙輸送機用 CFRP 製極低温推進薬タンクの開発

液化水素燃料充填時の熱衝撃による CFRP の損傷とマイクロクラックの貫通挙動を評価するためのマルチスケールシミュレーション手法を開発している. 直径 5m クラスの大型タンクの製造方法として, ドーム部と直胴部を個別に Automated Tape Placement によるファイバステアリング技術を用いて成形し, 接合により一体化することを想定し, CFRP 材料の異方性を活用して接合部での漏洩を防止する最適設計と製造プロセスの最適化を実現するためのシミュレーション技術を開発している.

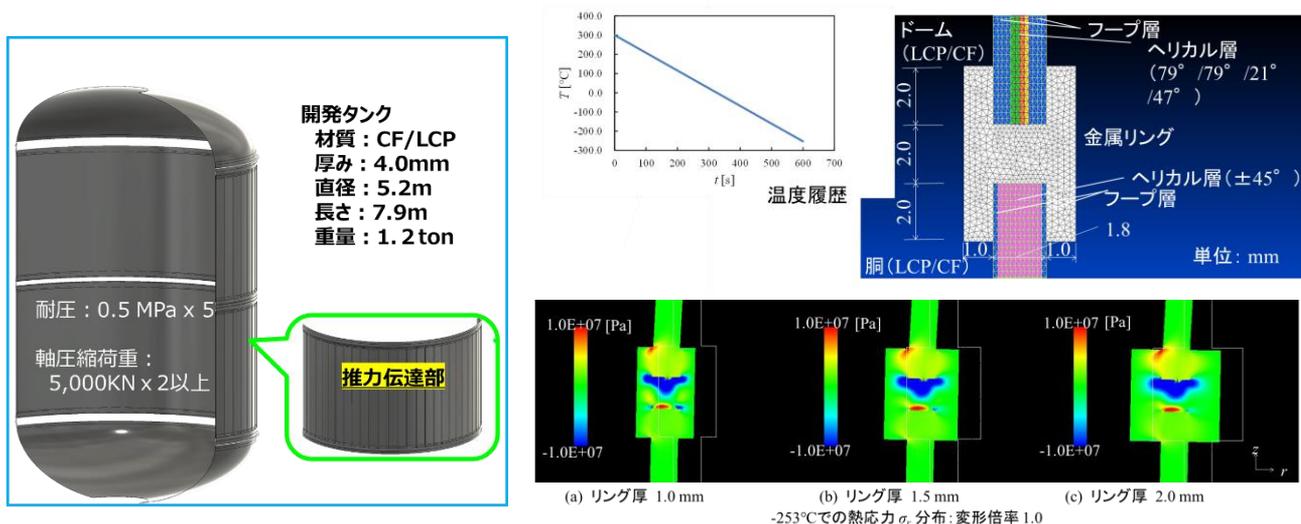


図2 ドーム部/直胴部接合構造のシミュレーションによる検討

次世代エネルギー変換・システムの統合化に向けて



生産技術研究所 Aziz 研究室

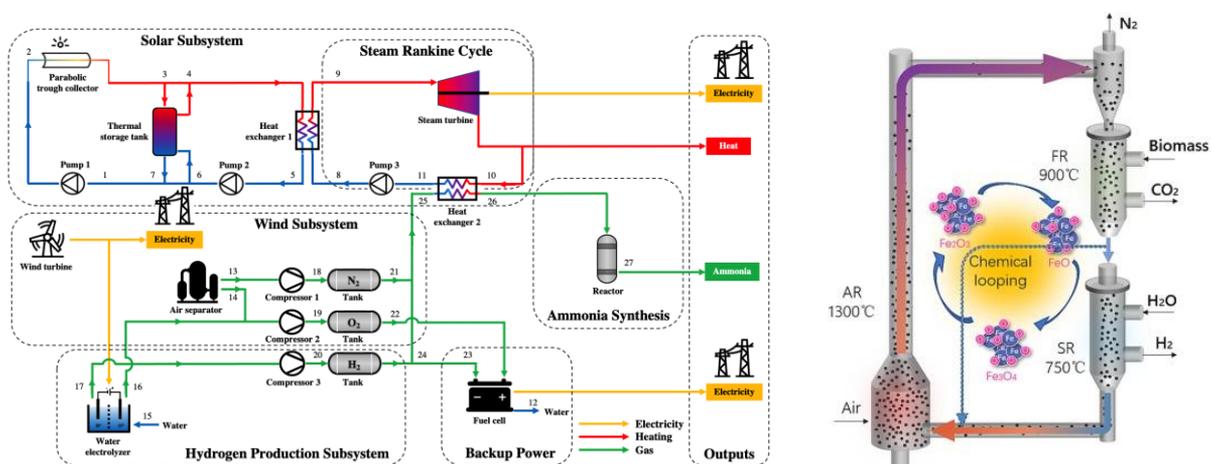
1. 研究室の概要

「低炭素社会」の実現は、21世紀において最大の課題の一つである。地球温暖化などに伴い、環境・エネルギー分野においても抜本的な技術戦略・開発を行わなければならない。しかしながら、エネルギー分野では、様々な低効率な従来型の変換プロセスが存在する。そのため、それらのプロセス・要素技術の高効率化・高度化が必要となる。そのため、当研究室（エネルギープロセス統合工学）では、持続可能な社会の実現を目指し、高効率かつクリーンなエネルギーシステムの構築を行う。各個のエネルギー変換プロセス・要素技術内のマイクロからマクロスケールまでの現象を解析・モデル化し、それらの知識を統合化・体系化する。また、革新的なプロセスを設計・最適化し、それに適する要素技術の開発も行い、飛躍的なエネルギー効率の向上および不要な副生成物の最小限・危険物の最小化を目指す。様々な革新的な省エネ・新エネ技術をモデル化・システム化しながら、基礎的な要素技術などに関する実験も行う。

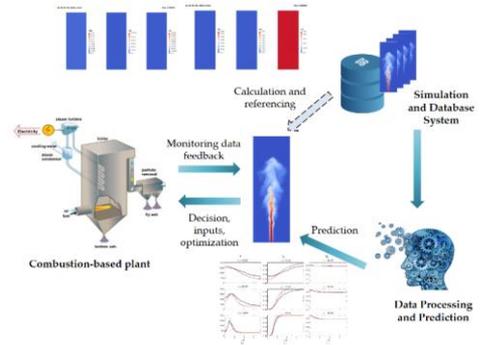
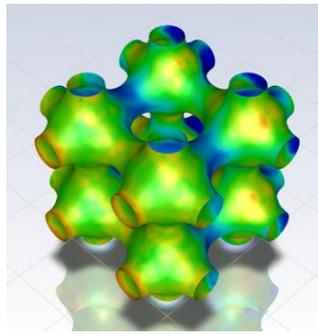
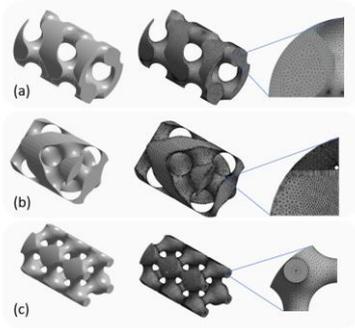
2. 研究内容

高効率水素製造・貯蔵・利用

本研究では、将来の水素社会の実現に向けて、低品位炭・バイオマス・産業廃棄物などによる高効率な水素製造・貯蔵・利用システムを検討し、エクセルギー回収およびプロセス統合技術によって全体のシステムにおけるエクセルギー損失を最小化する。水素製造システムでは次世代変換技術であるケミカルルーピングに着目し、基礎的な実験から全体のシステム評価まで研究を行う。三つの反応器を持つケミカルルーピングシステムを利用することで、CO₂の分離および高純度の水素製造が同時に行うことができる。また、水素貯蔵システムでは、水素吸蔵合金の新たな構造およびアンモニアの低温低压合成システムを検討・評価する。最後に、水素利用においては、主に電力への変換に着目し、高効率な水素サイクルなどのシステムを構築・検討する。また、水素・アンモニア燃焼の高度なシミュレーションおよび機械学習による燃焼の予測に関する研究も実施している。



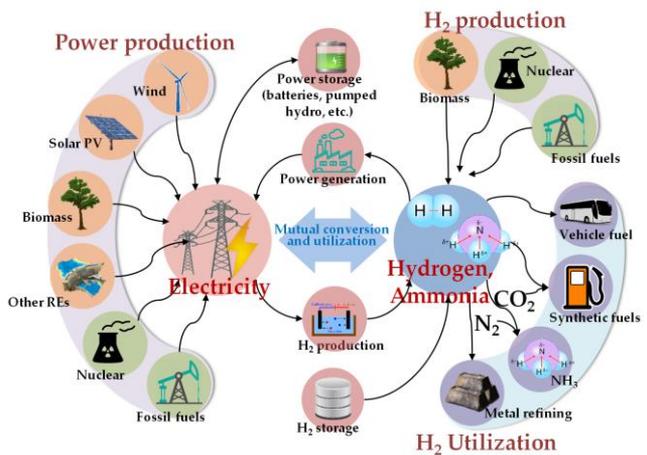
再生可能エネルギーによるマルチジェネレーションシステムの構築 (左)、三つの反応炉を持つケミカルルーピング CO₂フリー水素製造システム (右)



三重周期極小曲面 (TPMS) 構造を応用した水素貯蔵 (左)、燃焼・混焼のモデル化・予測 (右)

再生可能エネルギーおよび低品位燃料による高効率マルチジェネレーションシステムの統合化

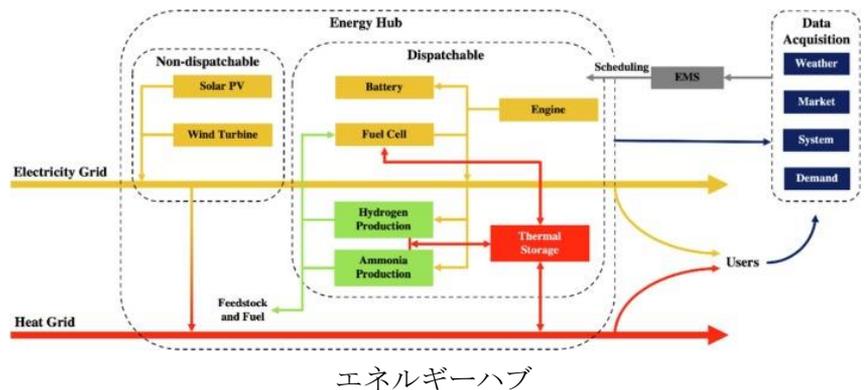
クリーンでカーボンフリーのエネルギー源（一次および二次）の導入、それらの相互変換と利用のためのシステムとネットワークの構築、新しい統合システムの構築や改修など、産業およびエネルギーシステムの設計、統合、最適化を行う。個々のエネルギー変換プロセスだけでなく、システム全体の統合と最適化も行われる。実現可能で動的なシステムをモデル化するために、様々なビッグデータを活用し、ビッグデータに基づく機械学習や遺伝的アルゴリズムなどによって最適な運転パラメータを設定し、システム全体の運転を評価する。また、技術的な評価だけでなく、経済的な実現可能性の検討も行う。



再生可能エネルギーおよび低品位資源による電力・水素の統合化

エネルギーマネジメントシステム・エネルギー貯蔵の高度利用

機械工学、化学工学、電気工学の多分野にまたがる将来のエネルギーシステムの開発も実施している。環境に優しい鉄系レドックスフロー電池の開発、電気化学エネルギー貯蔵システム（電解槽、燃料電池など）のナノスケール構造の最適化、エネルギーシステムにおける電気自動車（EV）と電池の利用、電力網システムにおけるエネルギー貯蔵としての水素の採用などである。電池とEVの利用については、いずれも周波数調整やエネルギー貯蔵など、システムのアンシリャーサービスを行う可能性がある。さらに、揚水発電とバッテリーの代わりに、大規模な電力システムシステムにおける水素貯蔵の分析を開発し、分析した。将来のエネルギーシステムにおいて、水素とバッテリー（EVを含む）は、産業システムを含め、エネルギー貯蔵とキャリアとして重要な役割を果たすため、大きな可能性を秘めている。



熱・電気化学プロセス工学： エネルギーと多孔体材料



生産技術研究所 Sciazko 研究室

1. 研究室の概要

効率的なエネルギー変換・利用とそのための燃料処理は技術的、環境的、および社会的観点から重要である。当研究室では、合成燃料製造・利用、特に電解および燃料電池システム内の電気化学反応に着目した研究を行っている。これらのエネルギー変換技術において、電極や触媒反応器は多孔構造を採用しており、その微細構造が性能を大きく左右する。微細構造と物性性能および劣化に至るメカニズムとの複雑な関係を理解する必要がある。しかし、微細構造の再構築や予測は時間を要し技術的にも課題が多く困難なため、機械学習を活用した評価・予測を開発し、エネルギー変換技術開発の高度化と加速を目指している。

2. 研究内容

2. 1 燃料製造・処理やエネルギー変換技術における多孔体構造の役割

合成燃料製造や水素社会への展開において、エネルギー変換デバイスの電極や反応器の多孔体構造は化学反応、吸着および分離などのプロセスにおいて重要な役割を果たす。特に、電解装置、燃料電池、燃料改質器およびエネルギー貯蔵システムなどにおいてはコンポジット材料やナノ粒子などを用いた複雑な多孔体材料が開発されている（図1）。

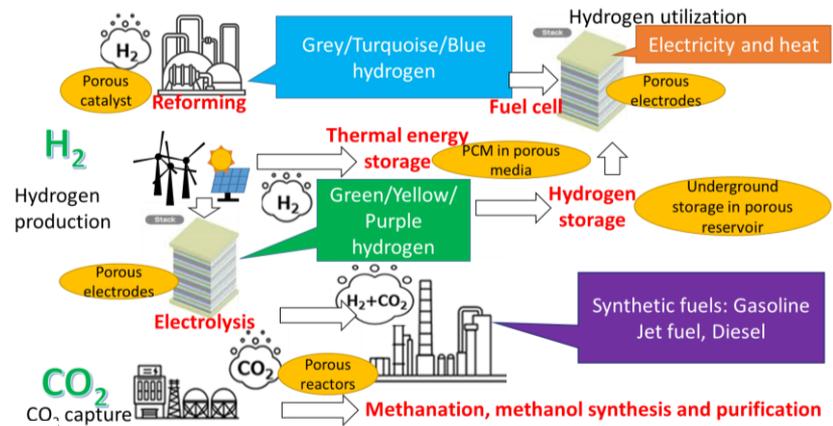


図 1. Porous materials for producing synthetic fuels and hydrogen economy.

構造の観察には、コンピュータ断層撮影 (CT) や収束イオンビーム-走査型電子顕微鏡 (FIB-SEM) などを用いる (図 2)。さらに、デバイスの性能と微細構造特性との相関性を理解し、材料の組成・微細構造の最適化、製造手法、高度な熱伝達設計および計測とシミュレーションを通じた包括的な性能評価が必要となる。

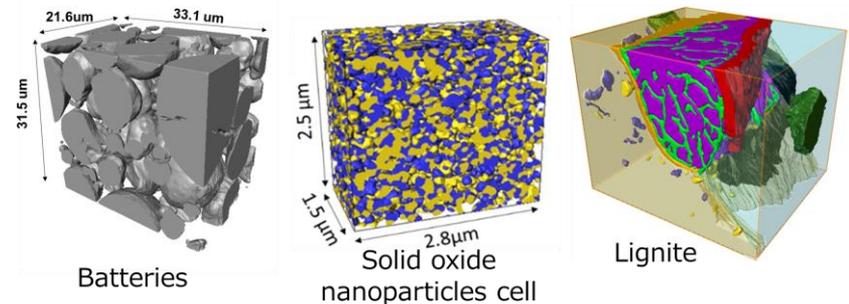


図 2. Reconstructed 3D microstructures of porous materials.

2. 2 機械学習を用いた多孔体構造と構造・性能変化の予測

機械学習による評価・予測は、複雑な物理現象の理解促進に貢献できる。エネルギー変換デバイスの微細構造と性能およびその劣化挙動との関係を把握する必要があるが、その構造の複雑さゆえに構造の評価と構造と性能の結び付けには多くの制約があり非常に困難である。これら問題に対処するために、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) など機械学習技術を活用し、FIB-SEM や CT スキャンから取得した 3 次元構造データの相判別の簡易化や解像度の向上を図り、これまで課題が多かった評価手法が改善された。また、敵対的生成ネットワーク (GAN) を使用して、2 次元断面画像から直接 3 次元モデルの再構築 (図 3A) や、条件付き GAN および Diffusion Model による人工的な構造モデルの作成手法 (図 3B) も開発した。CNN を活用することで、2 次元画像から直接複雑な微細構造特性を予測することが可能である (図 3C)。

機械学習による評価・予測手法においては、大量の教師データを必要とするが、実験上の制約などにより必ずしも十分な教師データを獲得することはできない。たとえば、材料劣化の予測においては、長期にわたるデータ取得も難しくコストも高い。これら課題解決のために、条件付き Unsupervised Image-to-Image Translation (UNIT) ネットワーク (図 3D) や長期・短期記憶ネットワーク (LSTM) を導入し、劣化現象を再現している。さらに、数値シミュレーションでは予測・説明が難しい現象に対しては、Physics-Informed Neural Network を用いることで予測・評価技術の洗練化を目指している。

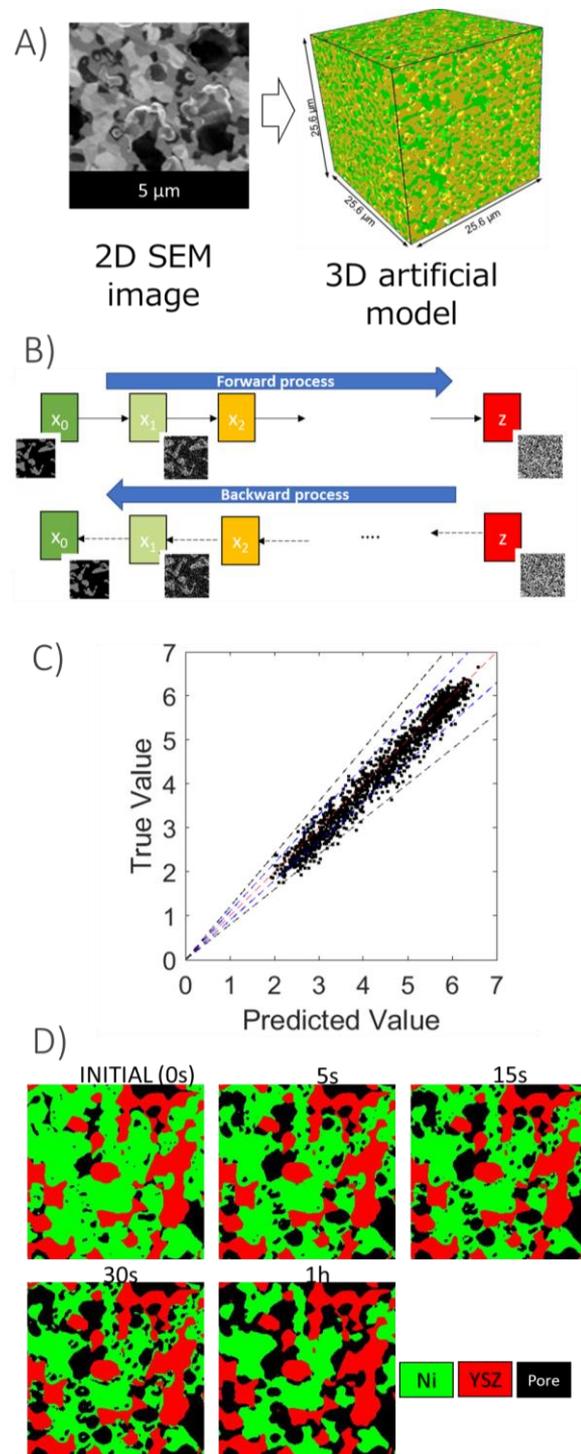


図 3. Examples of machine learning algorithms for porous materials application: A) fabrication 3D model from 2D microscope image, B) artificial microstructure generation, C) parameters prediction from cross-sectional image and D) degradation prediction.

高効率生産のための加工・組立の要素技術

Machining/Assembly Technologies for Highly Efficient Production

生産技術研究所 土屋研究室

Tsuchiya Laboratory, Institute of Industrial Science



1. 研究室の概要 Laboratory Overview

当研究室は、2005年12月に開設し、機械加工技術、転写加工技術、組立実装・分析技術などの研究を行っている。2025年4月現在の在籍者数は、准教授1名、研究員4名、技術専門職員1名、学術支援職員1名、事務補佐員1名、大学院学生3名の合計11名となっている。研究拠点は、駒場リサーチキャンパスと柏キャンパスの2か所に展開し、前者には小型加工装置や各種分析機器、後者には大型実験設備を配備している。

Our laboratory was established in December 2005 and conducts research on machining technology, transfer processing technology, assembly, mounting, and analysis technology, etc. As of April 2025, there are 11 members in total: 1 associate professor, 4 researchers, 1 technical specialist, 1 academic support staff, 1 administrative assistant, and 3 graduate students. The research center is located at the Komaba Research Campus. The research bases are located at the Komaba Research Campus and the Kashiwa Campus, the former equipped with small processing equipment and various analytical instruments, and the latter with large-scale experimental facilities.

2. 研究内容 Research Activities

研究内容は、生産技術にまつわる謎解きに重点を置いている。すなわち、生産・加工技術において未解明な現象を分析・解明することで、従来より生産性の高い加工・製造技術を開発する研究を行っている。近年は特に、工具と工作物の界面で起きるマイクロな現象に着目して、各種顕微鏡による観察、各種センサを用いた力計測、マニピュレータによる微細操作等のコア技術を使って、現象解明にアプローチしている。

The research focuses on solving mysteries related to production technology. In other words, research is conducted to develop more productive machining and manufacturing technologies by analyzing and clarifying unexplained phenomena in production and machining technologies. In recent years, we have focused on microscopic phenomena occurring at the interface between tools and workpieces, and have approached the elucidation of these phenomena using core technologies such as observation using various microscopes, force measurement using various sensors, and microscopic manipulation using manipulators.

2. 1 顕微鏡下における単粒切削

Single abrasive grain machining for elucidation of microscopic mechanism of polishing process

ガラスや次世代半導体材料の機械化学研削加工において、微視的な機械的・化学的現象を理解するために、多軸の微小力センサを有するマイクロマニピュレータを用いて、数 $10\mu\text{m}$ ～サブ μm の砥粒一粒で加工試験を行う。また、加工試験自体を電子顕微鏡観察下で行うことで、砥粒・加工物・切屑について、加工中の挙動と、形状や成分の分析をその場で観察・分析することができる(図1)。これらによって、単一砥粒による機械化学研削加工を詳細に解明し、各種条件の最適化によって加工性能の向上を図る。

To understand microscopic mechanical and chemical phenomena in the mechanical and chemical grinding of glass and next-generation semiconductor materials, we conduct machining tests with a single abrasive grain of several 10 μm to sub-μm in size using micromanipulators with multi-axis micro force sensors. The machining test itself is performed under electron microscope observation, allowing in-situ observation and analysis of the behavior of the abrasive grain, workpiece, and chips during machining, as well as analysis of their shape and composition (Fig. 1). These techniques are used to elucidate the details of mechanical and chemical grinding with a single abrasive grain, and to improve machining performance by optimizing the various conditions.

2. 2 CFRP 用切削工具の評価および切削現象メカニズム解明

Elucidation of Cutting Phenomena of CFRP

CFRP の加工面の高品質化，および工具寿命向上を目的として，切削時の炭素繊維の破壊現象，および炭素繊維－樹脂間の界面剥離現象を解明する．工具形状，加工条件，材料の繊維配向によってどのように加工現象が変わるかを明らかにする（図 2）．

To improve the quality of the machined surface of CFRP and the tool life, we will elucidate the fracture phenomenon of carbon fibers during cutting and the interface delamination phenomenon between carbon fibers and resin. We will clarify how the machining phenomena change depending on the tool geometry, machining conditions, and fiber orientation of the material (Fig. 2).

2. 3 その他の研究テーマ Other major research themes

そのほか，CFRP に対する PCD 工具の切削特性，10nm の分解能を有する接触式工具長測定器の開発，金属組織最適化によるラッピング工具表面制御，難削材加工における超高压クーラントに関する研究，グラビアオフセット印刷の安定化のための印刷ツールの最適化，などの研究テーマを推進中である．

In addition, cutting characteristics of PCD tool on CFRP, development of contact-type tool length measuring instrument with 10 nm resolution, surface control of lapping tool by optimization of metal structure, research on ultra-high pressure coolant in machining difficult-to-cut materials, cutting edge Optimization of cutting performance by optimizing the micro-shape of cutting tools, Optimization of printing tools for stabilizing gravure offset printing, and other research themes are underway.

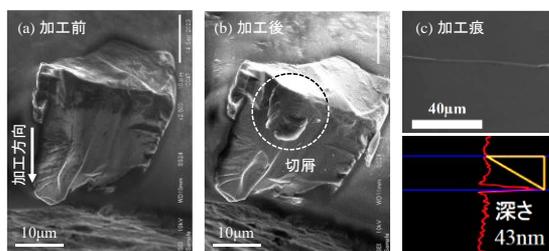


図1 (a)(b)加工前後の砥粒先端の形状および付着物，(c)被削物上の加工痕形状

Fig. 1 (a) (b) Shape of abrasive grain tip and deposits before and after machining, (c) Shape of machining marks on work piece

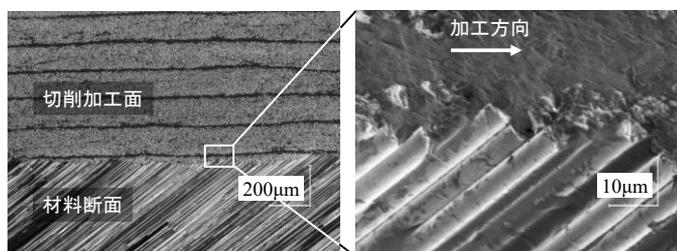


図 2 切削面における炭素繊維の破断面

Fig. 2 Fracture surface of carbon fiber on cutting surface

ナノ～原子レベル観察に基づいた 変形・破壊メカニズムの探究

生産技術研究所 栃木研究室



1. 研究室の概要

我々の社会を形作る様々な材料は、実用環境下において自重や外力、温度変化などにより荷重負荷状態にある。ひとたび大きな荷重が負荷されると、変形や破壊が生じ材料機能の喪失につながるため、およそすべての材料において変形・破壊現象は重要な問題である。ミクロな視点では変形・破壊現象は材料内部での構造欠陥の形成と成長に起因するものであり、さらには原子の変位および原子結合の破断に帰着する。従って、変形・破壊現象を理解するためにはミクロレベルの直接観察が不可欠と言える。当研究室では透過型電子顕微鏡法（TEM）を中心としたナノ～原子スケールの解析技術を駆使し、結晶性材料を対象として、原子レベル荷重負荷実験システムの開発、変形・破壊過程の動的観察、構造欠陥の構造解析研究などを進めている。

2. 研究内容

原子分解能 TEM その場機械試験システムの開発

透過型電子顕微鏡（TEM）は物質の微細構造・原子構造を直接観察する解析ツールとして広く活用されており、結晶の変形・破壊現象の解析には TEM 内にて試料に荷重負荷を行うその場 TEM 機械試験法が有効である。従来の機械試験用試料ホルダーは試料の方位制御や負荷荷重精度に限界があり、原子レベルでのその場機械試験は困難であった。当研究室では、MEMS 技術を活用した新規 TEM 用荷重負荷デバイスおよび制御システムの開発を進めている。図 1 は順に荷重負荷用 MEMS デバイス、荷重負荷中に撮影した原子分解能走査型 TEM 像（試料： SrTiO_3 ）、実験像に基づいたひずみ解析結果を示している。本システムにより、荷重負荷下においても原子像が明瞭に捉えられていることがわかる。また、ノッチ部に応力集中が生じ強い引張ひずみが生じていることが可視化されている。現在は実験システムのイメージング精度向上や温度制御機構の開発を推進するとともに、本システムを用いた応用研究を進めている。

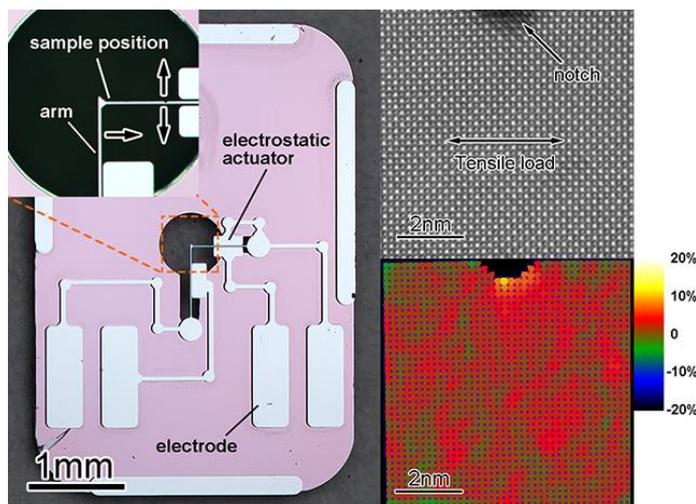


図 1. (左) 原子分解能その場 TEM 荷重負荷用 MEMS デバイス, (右上) 荷重負荷時に取得した原子像 (試料： SrTiO_3) , (右下) 原子像に対応するひずみマップ.

塑性変形に伴う格子欠陥の動的形成過程の観察と原子挙動の解析

結晶性材料の代表的な変形モードの一つに変形双晶がある。変形双晶は荷重負荷により結晶内部に鏡面对称もしくは二回対称の組織が形成するものであるが、その詳細なメカニズムは未だ不明な点が多い。当研究室では、変形双晶の形成メカニズムをその場 TEM 荷重負荷試験、原子分解能観察、理論計算を用いて総合的に解析している。図 2 は順にその場インデントレーション試験中に撮影した双晶の TEM 像

(試料: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)、界面ステップの走査型 TEM 像、第一原理分子動力学計算による界面ステップの移動に関わる原子シミュレーションを示している。 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ における菱面双晶は界面ステップの移動によって成長・収縮し、その移動は Al 原子 2 個、O 原子 3 個からなる原子グループが協調的に順次変位 (シャッフリング) することにより進行することが明らかとなった。このような変形現象の素過程を明らかにすることは、物質がどのように変形するかというごく単純な疑問に答えるものである。

結晶格子欠陥の構造解析

結晶性材料は転位、双晶、粒界といった種々の構造欠陥を内包しており、力学的特性をはじめとする諸特性に様々な影響を与えている。当研究室では、格子欠陥の微細構造・電子状態に着目し、ナノ～原子スケールの構造解析を進めている。図 3 は TEM によって撮影した実験像であり、順に $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ の小角粒界に生じたらせん転位ネットワーク構造、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 中の底面転位のコア原子構造、4H-SiC 中の積層欠陥の原子構造を示している。ここに示すように結晶内には多種多様な構造欠陥が形成され、それぞれが各々異なる局所特性を発現し、バルク全体の物性を決定づけている。TEM 観察により得られた構造情報に基づいて理論計算によるシミュレーションを実施することで、理論構造や形成エネルギー、電子状態といった情報を得ることができる。これらを総合することにより物質の変形メカニズムや力学挙動、局所物性に関する理解が進むこととなる。

参考文献

- [1] T. Sato, E. Tochigi, T. Mizoguchi, Y. Ikuhara, H. Fujita, *Microelectro. Eng.* 164, 43 (2016).
- [2] E. Tochigi, T. Sato, N. Shibata, H. Fujita, Y. Ikuhara, *Microsc. Microanal.* 25, S2, 770 (2019).
- [3] E. Tochigi, T. Sato, N. Shibata, H. Fujita, Y. Ikuhara, *Microsc. Microanal.* 26, S2, 1838 (2020).
- [4] E. Tochigi, B. Miao, A. Nakamura, N. Shibata, Y. Ikuhara, *Acta Mater.* 216, 117137, (2021).
- [5] E. Tochigi, Y. Kezuka, A. Nakamura, A. Nakamura, N. Shibata, Y. Ikuhara, *Nano Lett.* 17, 2908 (2017).
- [6] E. Tochigi, H. Matsuhata, H. Yamaguchi, T. Sekiguchi, H. Okumura, Y. Ikuhara, *Philos. Mag.* 97, 657(2017).

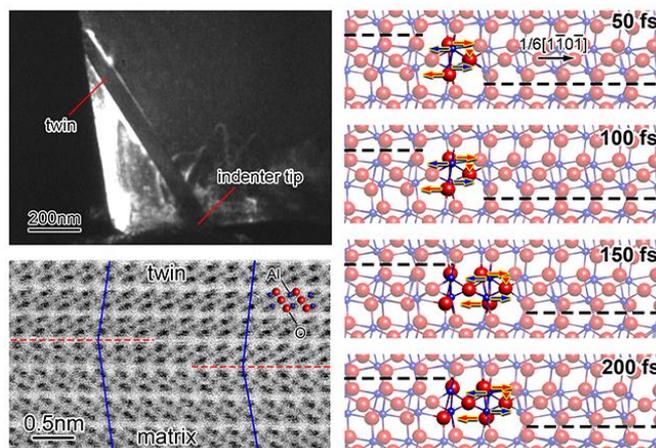


図 2. (左上) $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ における双晶の成長挙動観察, (左下) 界面原子構造, (右) 第一原理分子動力学シミュレーション.

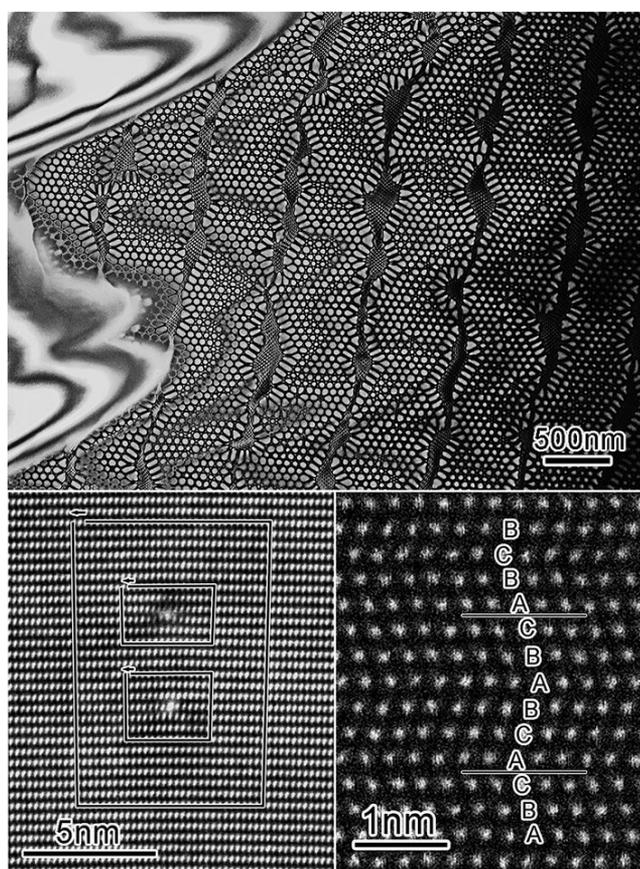


図 3. (上) らせん転位ネットワーク ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), (左下) 転位のコア構造 ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), (右下) 積層欠陥構造 (4H-SiC)

連絡先: TEL: 03-5452-6112, E-MAIL: tochigi@iis.u-tokyo.ac.jp

所在地: 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 Cw-305

ウェブページ: <https://sites.google.com/g.ecc.u-tokyo.ac.jp/nanoscale-strength>

変形加工学を応用した先進ものづくり技術



生産技術研究所 古島研究室

1. 研究室の概要

日本の強みは材料分野であると言われている。しかしながら、いくら素晴らしい新素材が開発されても、それを活かす加工技術があつてこそ、材料の機能が発揮できるものと考えられる。本研究室では、材料加工技術の中でも材料の永久変形を加工に応用した塑性加工・塑性工学に立脚した変形加工学を応用した先進ものづくり技術に関する研究を行っている。特に金属から非金属材料等、様々な材料の永久変形に着目し、主に金属材料を中心に塑性加工技術について研究を行い、生体吸収性材料（ステント）、医療・電子機器用超微細部品、自動車の軽量化に関する加工技術のマイクロからマクロに至る寸法横断的な実験および理論研究を行っている。また国際的な共同研究にも力を入れており、ロシア科学アカデミー（ロシア）、ウーロンゴン大学（オーストラリア）、東北大学（中国）、AGH 科学技術大学（ポーランド）、チェコ工科大学（チェコ）、ニューハンプシャー大学（アメリカ）と各種共同研究を行っている。

2. 研究内容

(1) 生体吸収性マグネシウム合金ステント用極細管の創製と結晶組織制御に関する研究

医療用ステントは、金属を材料とする網目構造を有し、生体内の狭窄している血管等の管状部位を広げ、狭窄を改善し十分な血流を得るための医療機器である。しかしながら、狭窄の治癒後に再度、埋め込んだステントを取り除く手術を行う必要があり、患者への負担が大きいのが現状である。一方、近年、生体内で分解・吸収される生体吸収性材料としてマグネシウム合金のステントが注目されている。治癒後に生体内でステントが吸収されてしまえば、再手術する必要がなく、患者への負担が少ないのが利点である。そこで本研究では、金型を一切使わずに金属管を細管化するダイレス引抜き法による生体吸収性マグネシウム合金ステント用の極細管を創製する手法の開発を行っている。特にダイレス引抜きは、加熱と冷却、そして塑性変形量を制御することにより極細管の創製と同時に内部結晶組織の制御について取り組んでいる（図1）。

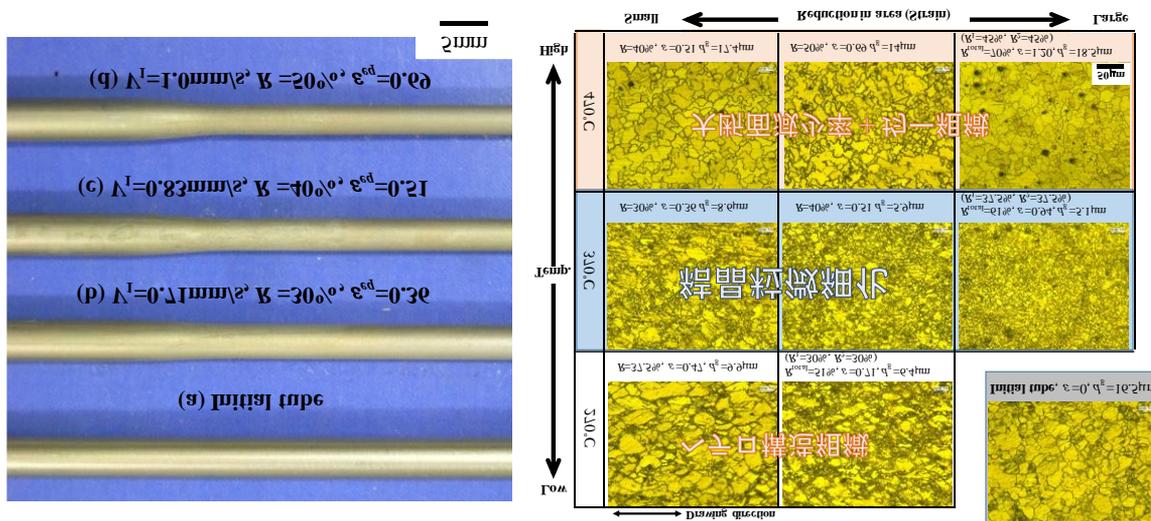


図1 生体吸収性マグネシウム合金の極細管の創製と結晶組織制御

(2) ダイレス引抜きによる金属マイクロチューブの創製に関する研究

金属マイクロチューブは、無痛注射針やマイクロノズル、放電加工用電極管等、医療、化学、電子機器分野で広くニーズがある微小中空部材である。しかしながら、金属マイクロチューブのような微小中空部材を従来の金型を用いた冷間引抜きで作ろうとすると、それに用いる金型も微小なものが必要になる。そこで本研究では、金型を使わずに局部加熱と引張変形によってチューブを微小化するレーザダイレス引抜き法を開発し、超塑性合金、ステンレス鋼、 β チタン等の様々な金属マイクロチューブの創製に取り組んでいる(図2)。



図2 ダイレス引抜きによって創製した金属マイクロチューブ

(3) 医療、電子機器部品を対象にした微細精密プレス成形に関する研究

近年、医療、電子機器分野の発展に伴い、それらに用いられる成形品のさらなる微小化・高精度化が求められている。そのためそれらを成形するプレス成形にもマイクロ化・高精度化が求められてる。しかしながら、様々な寸法効果により、ただ単純にプレス成形のスケールを小さくすれば良いというわけにはいかず、例えば、板材表面の表面粗さに着目すると、マイクロ化により被加工材の板厚が1/100になったとしても、表面粗さは1/100にはならない。すなわちマイクロスケールにおける微細精密プレス成形では、板厚に対する表面粗さの割合が相対的に大きくなる。そのため、表面粗さが板厚の不均一性となって、早期破壊を引き起こしたり、金型との接触において表面粗さの存在がプレス成形性自体に大きな影響を及ぼすことが考えられる。また同様の問題が、結晶組織にも当てはまり、材料寸法に対する結晶粒径の影響も大きくなることが考えられる。これらの問題に対し、微細精密プレス成形の実験、結晶粒径や表面粗さを考慮した材料モデルの構築、これらを考慮した破壊・成形限界に関する検討を行っている(図3)。



図3 医療、電子機器部品を対象にした微細精密プレス成形

高速柔軟ロボティクス ～高速知能システムの開発とその応用～

生産技術研究所 山川 研究室



1. 研究室の概要

高速ビジョンを中心として各種センサをネットワーク上に接続し、高速センサネットワークシステムを構築することにより実世界を高速かつ包括的に認識するとともに、駆動系（ロボットハンド、アーム、ステージ、光学系等）へとリアルタイムにフィードバックし、実世界との動的なインタラクション（相互作用）を実現する高速知能システムの開発を目指しています。

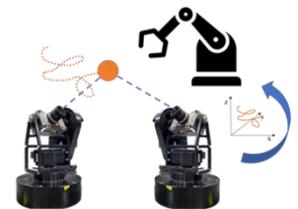
具体的には、以下のような研究テーマなどに取り組んでいます。

1. 高速ロボット
2. 高速センサネットワーク
3. 動的物体操作
4. 人間ロボット協調
5. 先進運転支援システム・自動運転

2. 研究内容

高速ロボット

リアルタイムでのセンサフィードバック、特に高速ビジョンと高速画像処理技術を駆使することで画像情報に基づく高速なロボット制御を実現するとともに、人間の運動速度を超える超高速なアクチュエーション・メカニズムを開発することにより、認識行動システムにおいて人間をはるかに超える高速ロボットを構築しています。例えば、180度の開閉運動が1秒間に10回可能で、掌に高速カメラを搭載した高速ロボットハンドや、高速に対象の動きに追従して3次元位置を1,000 Hzで計測するシステム等を開発しています。



高速センサネットワーク

毎秒1,000枚の高速撮像と画像処理ができる計測システムを用いて、広い範囲を高速で移動する複数の対象物を検知して安定してトラッキングするアルゴリズムの提案と実システムの開発をしています。高速性とネットワーク化という特徴により、ダイナミックな運動形態を時空間的に漏れなく観測することができ、セキュリティ分野など多様なIoTシステムへの応用が期待されます。



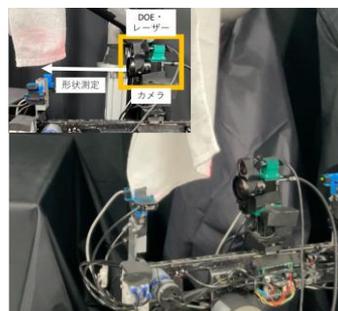
以上の高速ロボット（駆動系）と高速センサネットワーク（観測系）を開発するとともに、モーションプランニングや軌道生成（処理系）を提案し、様々な高速知能システムの構築と応用を実現しています。

動的物体操作

上述した高速ロボットシステムを用いて動的物体操作を実現しています。特に、従来困難とされてきたロボットによる柔軟物の操りに着目し、高速ロボットハンドシステムを用いた柔軟物の高速操りの実現を目指しています。これまでの柔軟物モデルは、行列微分方程式や偏微分方程式で記述するモデルが一般的でしたが、これらのモデルの複雑さゆえに、ロボットの制御則も複雑



化していました。加えて、ロボットの軌道生成も困難になるため、その実現は困難でした。そこで本研究室では、これらの課題に対して、ロボットの高速運動性を利用することにより、柔軟物の変形が代数方程式で記述可能であることを理論的に示し、かつロボットの制御則や軌道生成を簡易化することに成功しています。この成果と高速視覚制御を統合し、布の動的折り畳み動作を実現しています。また、その前工程も含めたより現実的なタスクとして、乱雑に置かれた状態の布から1枚を取り出して吊下げ、デプスカメラや機械学習を含む画像処理を用いてコーナを探索し、その位置に合わせて布を展開する動作を生成することで、1枚30秒程度と従来研究の分オーダーと比べて高速な整列動作を実現しています。



人間ロボット協調

高速ビジョンと高速ロボットハンドを用いて、ミリ秒オーダーでの人間の運動の認識とその認識結果に基づくロボット制御を実現する、人間の動作に完全対応可能な人間機械協調システムを開発しています。その具体的なシステムの一例として、勝率100%じゃんけんロボットを開発し、この研



究成果は動画投稿サイトYouTubeにおいて、500万回以上の再生回数に達するなど、世界中で注目されている技術です。このように、高速なロボットシステムを応用することにより、従来とは異なる、新しい人間ロボット協調システム像を実現しています。人間の動作に低遅延で反応し、高速に追従する技術を応用することにより、じゃんけんロボット以外にも、人間との協調動作、人間の作業支援、人間の運動機能拡張等を実現しています。



(a) Cooperation



(b) Assistance

(c) Enhancement

従来のシステムが機械学習や予測を用いて対応しているのに対して、リアルタイムに反応している点が革新的であり、今後も新しい人間ロボット協調に関する研究開発を行っていきます。

先進運転支援システム・自動運転

高速ビジョンを用いた車両と車両を取り囲む周辺環境の高速・高精度な認識により、先進運転支援システムや自動運転の高度化に資する画像センシング技術を研究しています。例えば、環境を取り囲むように設置した高速ビジョンネットワークにより、広大な空間を視野に収めつつ、視野内に存在する物体の動き情報を高速にセンシングするシステムを開発しています。広域性と即応性の両立を可能とすることから、自動運転車から見えない死角にいる自動車や歩行者の動きをいち早く検知して自動運転車両に知らせることで、より安心・安全な自動運転を実現することを目指しています。



また、車載高速ビジョンシステムの例として、周辺環境における死角領域を深層学習により推定し、その領域を優先的に監視することで、死角から飛び出してくる自動車や歩行者の存在をいち早く検出する技術の開発を行っており、自動運転車の安全性の向上に資する技術の開発を行っています。また、前方を走る車両の見かけの大きさの変化を高速かつ高精度に計測し、距離・相対速度・相対加速度を推定することにより、前方までの車間距離を詰めたより経済的な隊列走行に寄与する技術の開発を行っています。