

**2022 年度**

**生産技術研究所  
機械系研究室案内**

## 目次

|               |    |
|---------------|----|
| 山中研究室.....    | 1  |
| 加藤研究室.....    | 3  |
| 須田研究室.....    | 5  |
| 大島研究室.....    | 7  |
| 吉川研究室.....    | 9  |
| 佐藤研究室.....    | 11 |
| 鹿園研究室.....    | 13 |
| 白樫研究室.....    | 15 |
| 中野研究室.....    | 17 |
| 梅野研究室.....    | 19 |
| 吉岡研究室.....    | 21 |
| 土屋研究室.....    | 23 |
| 長谷川研究室.....   | 25 |
| 古島研究室.....    | 27 |
| 山川研究室.....    | 29 |
| アズィツズ研究室..... | 31 |
| 栃木研究室.....    | 33 |

## 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

# 2022 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 2022年6月10日(金)～11日(土) 10時～17時

| 公開担当者 | 公開題目 |
|-------|------|
|-------|------|

## 【基礎系部門】

|       |                             |
|-------|-----------------------------|
| 吉川 暢宏 | 炭素繊維強化プラスチック                |
| 梅野 宜崇 | 材料強度と機能の本質に迫る: ナノ・マイクロ機械物理学 |

## 【機械・生体系部門】

|            |                                    |
|------------|------------------------------------|
| 山中 俊治      | Prototyping & Design Lab           |
| 加藤 千幸      | 大規模数値シミュレーションの応用研究と空力騒音の数値解析       |
| 須田 義大      | 車両の運動と制御                           |
| 大島 まり      | 予測医療に向けて -血流シミュレーションと可視化計測-        |
| 佐藤 文俊      | 生体分子やナノ分子の革新的なシミュレーション             |
| 鹿園 直毅      | 固体酸化物形燃料電池と次世代熱機関の研究               |
| 白樫 了       | 生体の高品位保存技術                         |
| 中野 公彦      | モビリティにおける計測と制御                     |
| 吉岡 勇人      |                                    |
| 土屋 健介      | 高効率生産のための加工・組立の要素技術                |
| 長谷川 洋介     | 熱流体工学における逆問題と最適化                   |
| 古島 剛       | 先進塑性加工技術: 精密プレス成形とマイクロチューブフォーミング   |
| 山川 雄司      | 人間を超える高速ロボット                       |
| アズィツ ムハンマド | 持続可能なエネルギーシステムに向けた二次エネルギー源の高度生産・利用 |
| 栃木 栄太      |                                    |

## 【革新的シミュレーション研究センター】

|  |  |
|--|--|
| 加藤 千幸、吉川 暢宏、<br>大島 まり、佐藤 文俊、<br>梅野 宜崇、長谷川 洋介 | データサイエンスと融合した HPC シミュレーション技術の<br>研究開発と社会実装 |
|--|--|

## 【次世代モビリティ研究センター (ITS センター)】

|                       |                   |
|-----------------------|-------------------|
| 須田 義大、中野 公彦、<br>山川 雄司 | 次世代の交通システムをデザインする |
|-----------------------|-------------------|

## 【持続型エネルギー・材料統合研究センター】

|       |                      |
|-------|----------------------|
| 鹿園 直毅 | 固体酸化物形燃料電池と次世代熱機関の研究 |
|-------|----------------------|

## 【海洋観測実装工学研究センター】

|        |                         |
|--------|-------------------------|
| 長谷川 洋介 | 海洋観測実装工学研究センターにおける研究の展開 |
|--------|-------------------------|

## 【価値創造デザイン推進基盤】

|              |                          |
|--------------|--------------------------|
| 山中 俊治、長谷川 洋介 | RCA-IIS Tokyo Design Lab |
|--------------|--------------------------|

※公開研究室、テーマについては予告なく変更することがございます。詳しくは HP (komaba-oh.jp)をご覧ください。

※2022 年度は、来場するためには事前登録が必要となります。以下のサイトから事前登録をお願いいたします。

事前登録サイト: <https://2022.komaba-oh.jp>

## 東京大学生産技術研究所

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



## 1. 研究室の概要

今日のデザインは「意匠」のフレームを脱し、そもそも何を作るのか、そのためにはどのような技術を開発すべきなのかを考えるビジョンメイキングのプロセスとなった。本研究室は、科学と芸術、論理思考と美的直観を駆使して先端技術を具現化するプロトタイプを制作し、未来の人工物と人の関係を研究する。

## 2. 研究内容

### プロトタイプをデザインする

本研究室は、学内外の多数の研究者や企業と連携して、先端技術を具現化するプロトタイプを制作し、発表しています。以下はその事例です。

- 1) Bio-likeness の研究：「生き物らしさ」を認知させるファクターを抽出して、人にとって心地よい振る舞いをするロボットのデザイン
- 2) 美しい義足プロジェクト：失われた身体の補完を超えた身体拡張装置としての、パラリンピック・アスリート用義足のデザイン
- 3) 積層造形（3Dプリンタ）を核とした、一人一人の身体にフィットするカスタマイズ製品のデジタルデザイン手法の研究
- 4) 積層造形がもたらす「構造触感」、「3Dカム」などの新しい機構、質感の研究
- 5) 最先端のバイオエンジニアリングを利用した、生きた細胞を用いた人工物のデザイン

### 展示という発表手法

技術と社会を繋ぐ体験的な価値共有の場として「展示」を重視します。海外を含む様々な展示会、展覧会に出品すると同時に、研究室独自の展覧会も開催しています。

### 東京大学でデザインを学ぶということ

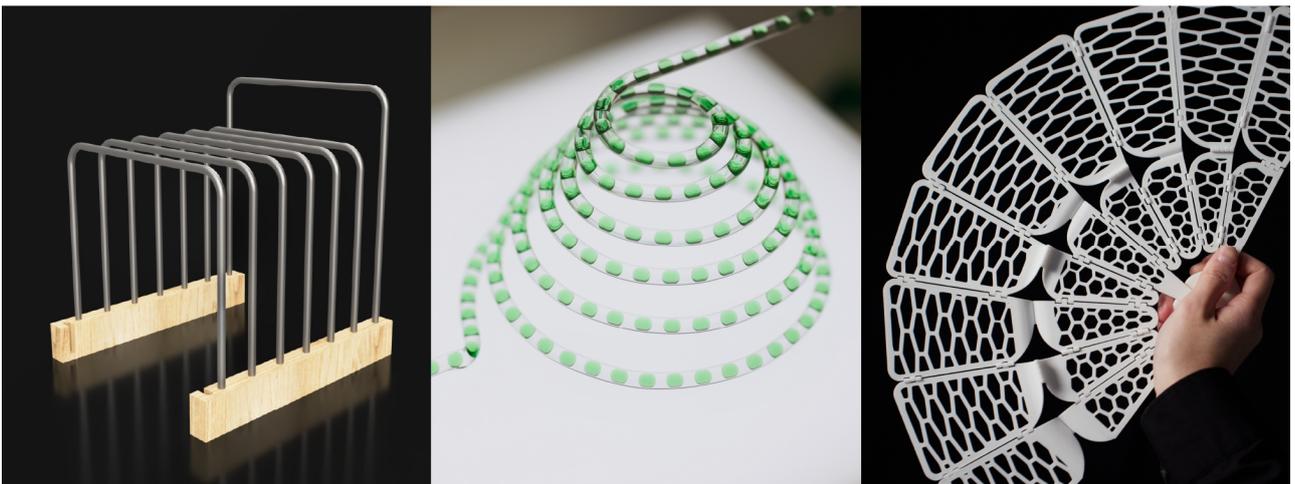
プロトタイピングの実践を通じて、技術知識と美的感覚を併せ持つ新しいタイプのデザイナーを育てたいと考えています。教授、助教を始めスタッフも経験が豊かなデザインエンジニアであり、メカトロニクスやプログラミング、スケッチや立体造形などの基礎的なデザイン技法の勉強会を定期的に行なっています。また、2016年に立ち上げた生産技術研究所と英国ロイヤルカレッジ・オブ・アートとの共同デザインラボとのプロジェクトや人的交流を通じて、アーティストとしての思考方法や制作技法を学ぶこともできます。



Ready to Fly : カブトムシの翅の折りたたみ構造を AM (3D プリンタ) を用いて再現したプロトタイプ (左)

Ready to Crawl : 動作機構全体が一度に積層造形されたロボット群 (中央)

RAMI : パラリンピックアスリート高桑早生選手のために AM (3D プリンタ) を用いて制作された陸上競技用義足 (右)



2020 年度修士生による修士研究の一例

(左 : チタン端材のパイプを用いた家具の提案、中 : スラグ流という流動現象を用いたアート作品「流点」、  
右 : ハサミムシの翅の展開構造の AM (3D プリンタ) によって再現したプロトタイプ「Ohrwurm」)

連絡先: TEL: 03-5452-6788,

E-MAIL: [design-lab@iis.u-tokyo.ac.jp](mailto:design-lab@iis.u-tokyo.ac.jp)

研究室 Web サイト : <http://www.design-lab.iis.u-tokyo.ac.jp/>

オンライン展示「DiaLog」 : <https://yamlab-exhibition.firebaseio.com>

## 1. 研究室の概要

本研究室では本年3月9日から共用を開始した「富岳」のプロジェクト（文部科学省の補助金事業）や民間企業、大学等の共同研究という形で、風車やファンなどのターボ機械や自動車や鉄道、船舶などの輸送機器を対象として、非定常な流れの現象やそれに伴い発生する空力音に関する研究を行っています。また、スーパーコンピュータを用いた大規模な流体解析や空力音響解析を実施し、新しい解析モデルの提案や従来の解析では明らかにできなかった現象を解明する基礎研究から、試験の代替、既存製品の性能向上など実用化を目指した応用研究まで幅広く実施しています。さらに、研究室が保有する低騒音風洞やダブルチャンバー装置を用いて流れ場や空力音の実験計測も実施し、数値解析の精度を検証するとともに新たな知見を得ています。

## 2. 研究内容

### 2.1 エネルギー変換機器に関する研究

#### ■大規模 LES 解析による大型洋上風車の性能と荷重変動の予測

洋上ウインドファームに設置される風車は、風上側に設置された風車の後流の影響を受け、発電量が大幅に低下したり、動翼に大きな流体力変動が生じ、疲労荷重が増大したりすることがあります。そこで、本研究では数億要素規模の解析メッシュを用いて、大型風車まわりの流れの大規模 LES 計算を実施しています。本研究ではサブミリオーダーの動翼まわりの渦から数 10 m オーダーの大気乱流境界層中の渦まで解析する必要がありますが、これまでに風車性能の定量的な予測を実現しており、現在、大気境界層中の乱れやタンデム配置された 2 機の風車の相互干渉を考慮した解析を実施しています。



図1 大型洋上風車まわりの流れの大規模数値解析

#### ■LES のための壁面モデルに関する研究

LES は流れの中の支配的な渦を解像することで高精度な予測を実現しますが、自動車で約 1,000 億、水力機械で 500 億～3,000 億、船で 300 億～500 億程度の格子数が必要となり、多数のケース・スタディを実施する設計最適化には適用できません。そこで、数億から数 10 億の計算格子でも高精度な LES 解析を実現するために、LES 用壁面モデルを研究しています。これまでに、平板境界層や風車の動翼まわりの流れを対象とした調査により、従来の壁面モデルの問題点を明らかにしてきました。

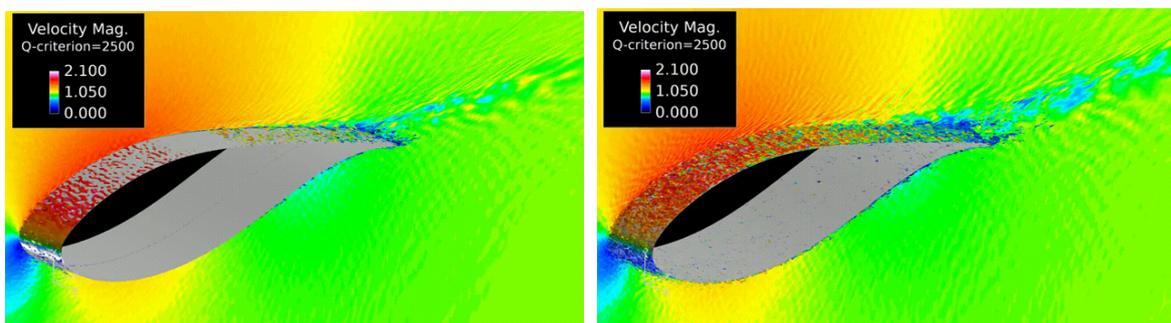


図2 壁面モデルを適用した風車動翼の LES 解析（左：壁面モデル無し、右：壁面モデル有り）

## 2.2 非定常乱流と空力音の予測と制御

### ■ 流入乱れの影響を受ける翼まわりの流れと発生する空力音に関する研究

風車やファンの動翼に流入する流れは乱れを伴うことがあり、このような場合、発生する音が急激に増大することが知られています。しかし、音が大きくなる原理的なメカニズムは解明されていません。本研究では、任意のスケール・強度の乱れを発生させることが可能な特殊な装置を低騒音風洞の中に設置し、流入乱れの影響により、翼まわりの流れや発生する音がどのように変化するかを調査し、流入乱れのスケールや強度と発生する音との関係を明らかにしました。さらに、上流に設置された円柱の後流の影響を受ける翼まわりの流れの数値解析と音響解析を実施し、流入乱れの中にあつた渦が翼の前縁近傍で急激に引き延ばされることが音が大きくなる本質的な理由であり（下図3の右上）、この時に前方に大きな音が放射される（同右下）ことを明らかにしました。

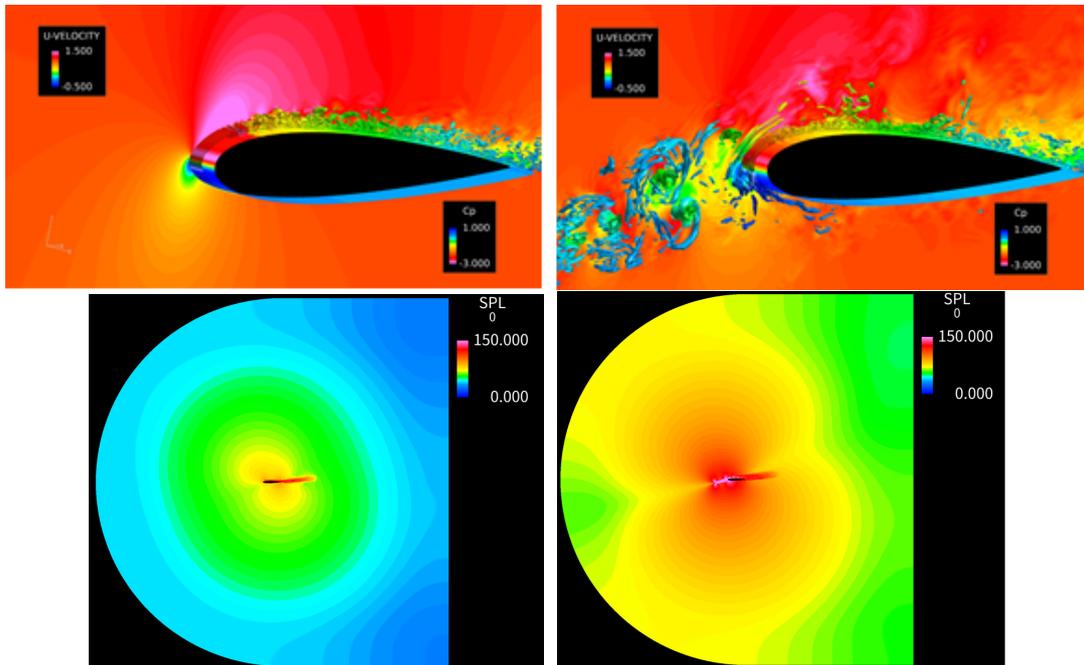


図3 流入乱れによる翼周りの流れと音場の変化（左：流入乱れ無し，右：流入乱れ有り）

### ■ ファンの性能と騒音の予測と最適設計

高精度な流体解析と音響解析により、小型のファンの性能と騒音の定量的な予測を実現し、最終的には数値解析だけにより、従来よりもはるかに性能が高く、かつ、音が小さいファンを実現することを目指して研究しています。流体解析にはLESを使用し、また、音響解析では羽根車に作用する流体力変動を音源として、音場の基礎方程式（ヘルムホルツ方程式）を数値的に解いています。自由音場の解である、Curleの式やFW-Hの式による音の予測も可能ですが、これではファンのケーシングや周囲にある物体表面の音響効果（音の反射）を考慮することはできません。下図4に示すように、本研究では既に定量的な音の予測を実現しています。

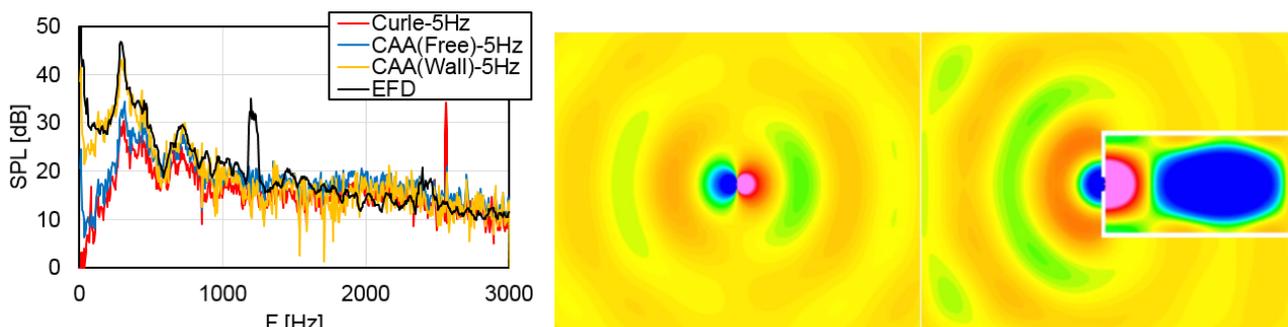


図4 ボックスファンの騒音スペクトルと音場（左：反射無し，右：反射あり）の比較

# 車両の運動と制御

生産技術研究所 次世代モビリティ研究センター 須田研究室

## 1. 研究室の概要

本研究室は専門分野を制御動力学（Dynamic systems and control）であり、1990年4月に開設された。主な研究対象は鉄道車両、自動車、PMV（パーソナル・モビリティ・ビークル）などのモビリティであり、運動力学・振動制御・マルチボディダイナミクスを用いる手法から、ICTの活用やビッグデータ解析や生体計測・脳活動計測を用いる手法などまで研究対象を広げて幅広いテーマの研究を行っている。モビリティの性能向上や安全性評価に留まらず、ITS（高度道路交通システム）における自動運転システムの実用化に向けた取り組み、ユーザ視点による快適性評価など、社会実装に向けた実践的な研究を産官学連携の下に取り組んでいる。駒場リサーチキャンパスのほかH29年度に千葉実験所が機能移転した柏キャンパス、フューチャーセンター推進機構（柏の葉キャンパス駅前サテライト）にも拠点を置いて研究活動を行っている。また、情報学環においても兼担として研究・教育活動を行っている。最近の研究プロジェクトの概要を図1に示す。



図1 須田研究室における研究の概要と領域

## 2. ビークルの運動解析と制御

### マルチボディダイナミクスによる鉄道車両・自動車・パーソナル・モビリティ等のモデリングと運動解析, 鉄道車両の自己操舵台車, 独立回転車輪台車/逆勾配をもつ新型車輪を用いた台車の開発

車両は多くのパーツ（マルチ・ボディ）から構成され、このように複雑な車両の動力学も、マルチボディダイナミクスの技術を利用することで動解析が大幅に容易になる。レールと車輪の弾性接触問題やタイヤのモデリングのように対象をフレキシブル・マルチボディシステムとした解析手法の検討などを行うとともに、大型車両やPMVへの適用、電磁サスペンションの開発やセルフパワードアクティブ制御の活用研究などを実施した。

鉄道車両走行においては、安定性を確保しつつ曲線通過性能を大幅に向上させる鉄道車両用自己操舵台車の研究を行い、前後非対称方式自己操舵台車を考案し、平成6年にJR東海「ワイドビューしなの」号にて実用化した。1/10スケール模型車両走行実験装置及び1/1スケールの試験線を活用した研究や、ジェットコースターの技術を活用した省エネ・低コスト自動運転公共交通システム「エコライド」の開発も行った。

## 3. ITS（高度道路交通システム）プロジェクト

### 隊列走行・自動運転, 車車間通信・路車間通信を用いた実証実験, 駐車場ITSプロジェクト

機械・交通・情報分野の研究室で構成される次世代モビリティ研究センター（ITS センター）に所属し、自動車交通における安全性向上、渋滞防止、環境改善、交通における車車間通信技術の応用など ITS の研究を進めている。自動運転プロジェクトとして大型トラックの隊列走行に関する研究では、HMI、車両制御、社会受容性評価など幅広い取り組みを行い、柏キャンパスシャトルバスの営業実証実験にも取り組んでいる。広島地区を対象として実証的に V2X に関する研究開発を展開するとともに、文科省の東北復興次世代エネルギー研究開発プロジェクトに参画し、平時および災害時を対象とした再生可能エネルギーを活用できるエネルギーモビリティマネジメントシステムの研究開発を行い、震災復興を支援する研究開発を展開している。

#### 4. モーション・シミュレータを用いた研究

##### 複合現実感交通実験スペース, HMI, 車両の乗り心地評価, 模型車両実験プラットフォーム

ドライビングシミュレータと交通シミュレーションを連携させた複合現実感交通実験スペースの構築を行い、その臨場感向上に向けた取り組みとその評価を行うとともに、HMI のみならず乗り心地評価、快適性評価や模型車両実験のプラットフォームとしての取り扱いなど、幅広い活用研究を行っている。

#### 5. 車両・インフラ・人間系の動特性と状態検出とその活用

##### ビッグデータ解析による車両異常検知・脱線予兆検知, 車輪/レールおよびタイヤ/路面の接触力学, ドライバ特性, 乗降位置可変型ホーム柵, 準静電界センシング, 脳活動計測による HMI

交通システムや次世代モビリティビークルの研究には、車両単体での評価だけではなく、インフラと人間系との境界領域、融合領域の研究が重要である。この視点から多くの研究を実施してきている。車両センサ計測データによる鉄道車両の脱線予兆検知、地上センサ計測データのビッグデータ解析による車両の異常検知、ITS 車両による路面状況計測技術、ドライビングシミュレータによるドライバ行動計測とドライバモデルに関する研究などに取り組んでいる。近年では、脳活動の計測を用い、工学および生理学の見地からドライバモデルに関する研究を展開している。さらに、準静電界技術を用いた路面センシング等の新たな手法の開発や、安心安全な鉄道を目指して列車によって乗降位置を自由に調整可能な乗降位置可変型ホーム柵「どこでも柵」の開発など先進的かつ実践的な取り組みも行っている。

#### 6. 社会実装に向けたエコシステム、快適性評価に関する研究

##### 自動運転システムの社会受容性評価, 快適性の定量評価手法, 公共交通システムの情報提供システム, 車両のシートアレンジ評価

自動運転システムなどの新たなモビリティの実用化については社会受容性の確保が重要であり、そのために社会実装のためのエコシステムの研究を行っている。その他の方策として、モーション・シミュレータを用いた HMI の評価や、従来客観的な評価が困難であった自動車や鉄道車両の車内の快適性を定量的に評価する手法を開発し、実物大モックアップや実車両での実験を基に乗客の着席行動に着目した理論構築を行った。鉄道車両における快適な座席配置を提案し、東急電鉄にて実用化したほか、自動車への適用としてミニバンのシートアレンジメントの開発も実施した。さらに、スマートフォンアプリとデジタルサイネージによる公共交通システムの情報提供システムの構築も行い、柏 ITS 推進プロジェクトでの実証実験を経て JR 東日本アプリなどへ展開している。

#### 7. 先進モビリティ研究のための設備構築

##### ドライビングシミュレータ, 柏キャンパス大規模実験高度解析推進基盤(旧千葉実験所)ITS R&R 実験フィールド(軌道試験線, 走行試験路, 交通信号機)

# 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。

2022年度の在籍者は、大島まり(教授)、大石正道(技術専門職員)の職員2名に加え、研究員2名、博士課程学生2名、修士課程学生12名、研究実習生3名、事務補佐員1名の計22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。

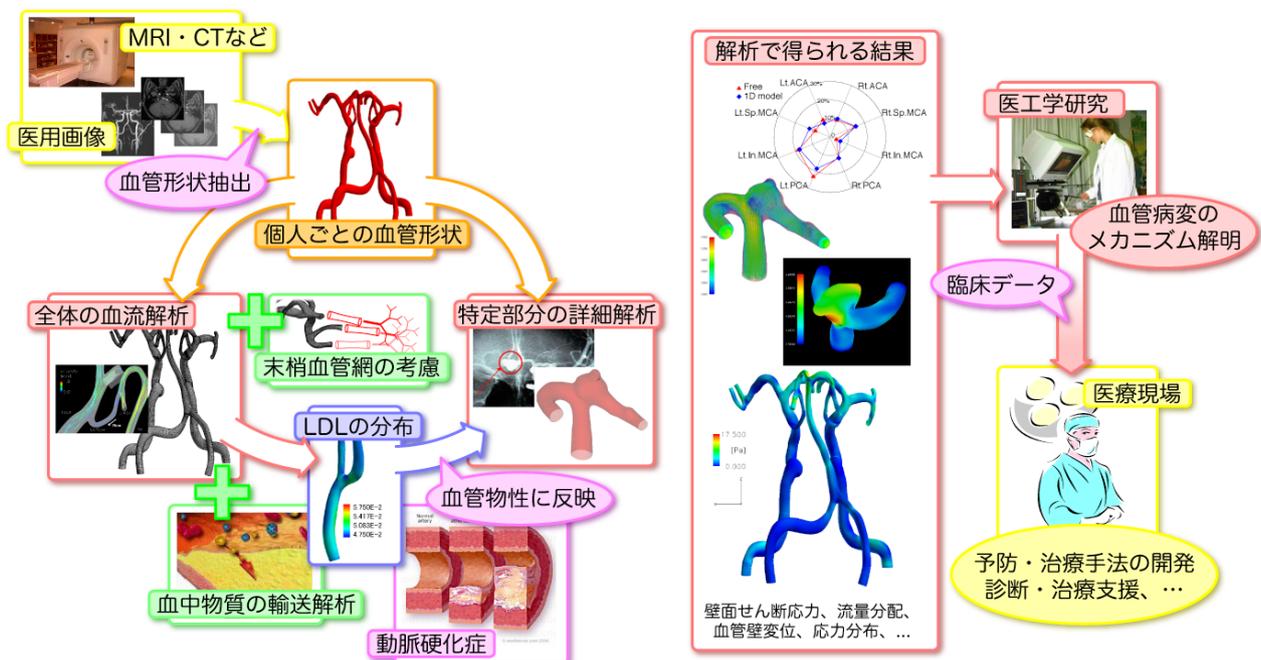


Fig. 1 循環器系統合シミュレーションシステムの概要

## 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。

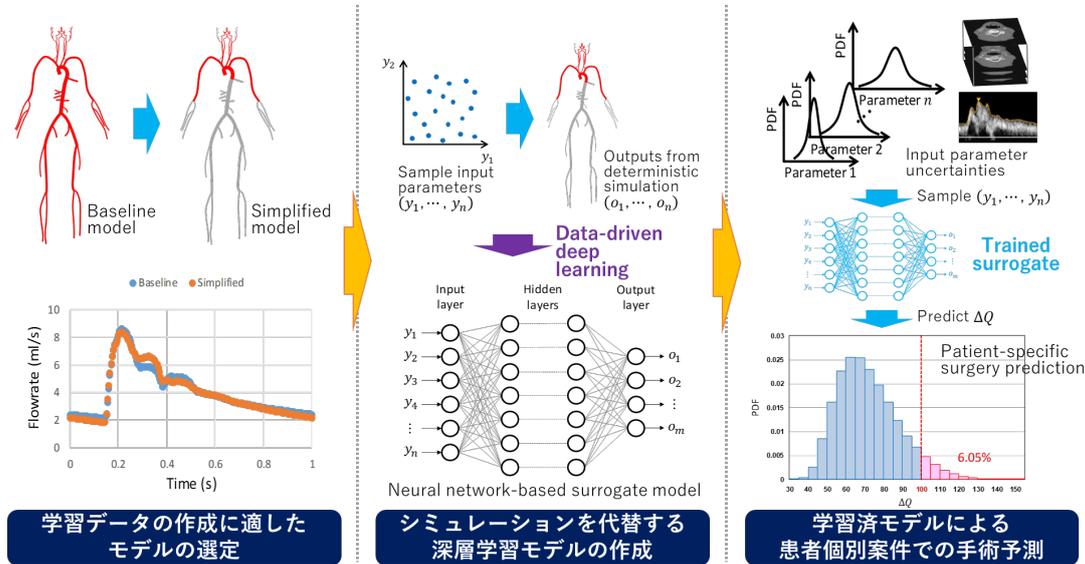


Fig. 2 代理モデルを活用した不確かさ評価

## 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。

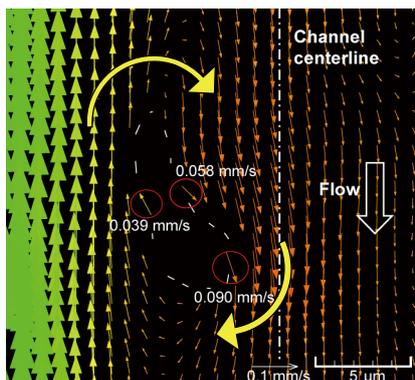


Fig. 3 赤血球の膜回転運動と周囲流動

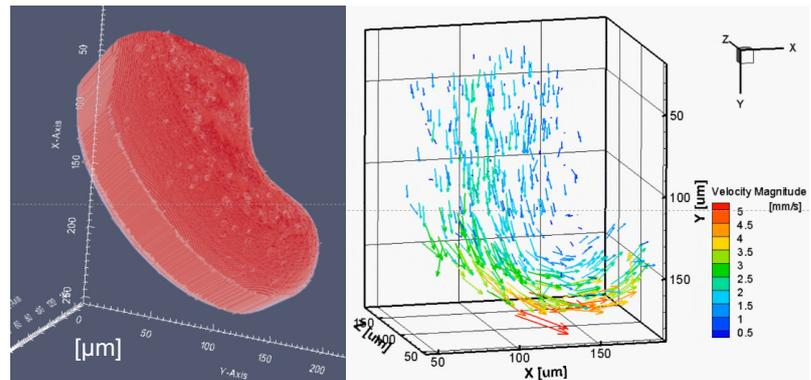


Fig. 4 水-油界面の3次元形状と内部3次元流動

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

# 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

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) に代表される複合材料は破壊力学の適用を拒んできた。非均質性による応力場の局所的な不連続性がその主因である。CFRP 製品開発の歴史は破壊力学の適用範囲拡大の歴史と重なるが、その試みはことごとく不発に終わり、試作と破壊試験を繰り返す試行錯誤設計に終始しているのが現状である。その状況を打開するためには方法論から根本的に構築し直す必要があり、そのための有力なツールが「富岳」に代表される大規模並列計算機である。すなわち、計算機能力向上により現実的となった炭素繊維/樹脂レベルでのミクロスケールシミュレーションにより局所的応力場を正確に評価することで、CFRP の時間強度まで含めた信頼性評価を高精度で実行可能であると思われる。その新たな方法論により CFRP 部材の設計を合理化することを目標に、シミュレーションソフトウェアの開発と強度評価問題への活用を中核として以下の研究開発を実施している。

### (1) 複合材料強度信頼性評価シミュレーターの開発

炭素繊維と樹脂、あるいは繊維束と樹脂を明確に区分して、形状と配置を正確に表現する、ミクロスケールあるいはメゾスケール有限要素モデルを機軸とした確度の高い強度信頼性解析を行うため、シミュレーションソフトウェアの開発を行っている。炭素繊維単体の破壊則と樹脂単体の非線形挙動および破壊則を独立に導入できるため、実態を正確に表す材料モデル化が可能になる。強度に影響を与える因子を特定し定量化することで、試作と破壊試験を繰り返す試行錯誤的设计に陥っている現状を打開できるものと考えている。製品価値を決定する最重要因子である疲労破壊強度特性に関しても、樹脂の疲労強度特性が複合材の疲労特性を支配するとの仮定の下、Interfacial Normal Stress を規準として疲労強度予測が可能であることを示している。また炭素繊維が空間的不確定配置となる短繊維複合材の確率強度モデルの開発も行っている。

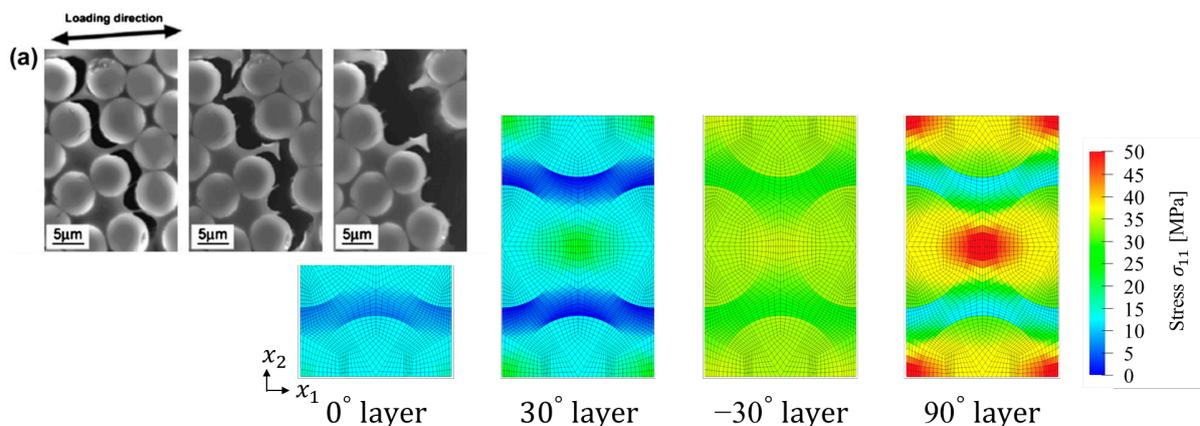


図1 クロススケール有限要素解析に基づく CFRP の疲労寿命予測

### (2) CFRP 製造プロセスシミュレーターの研究開発

製造プロセス段階にまで立ち入って強度信頼性評価を行うため、熱硬化および熱可塑 CFRP の成形プロセスシミュレーションを実行するソフトウェアを開発した。CFRP 材料を炭素繊維束と樹脂の複合

システムとしてメゾスケールモデル化することにより、樹脂の熱特性を直接的に導入でき、成形プロセス後の残留応力・ひずみを精度よく評価できる。炭素繊維配置の自由度を格段に向上させ、設計の自由度を飛躍的に向上させる Automated Tape Laying などのファイバステアリング成形方法の実用性を向上させるため、連続加熱熱可塑成形のシミュレーション手法を開発した。

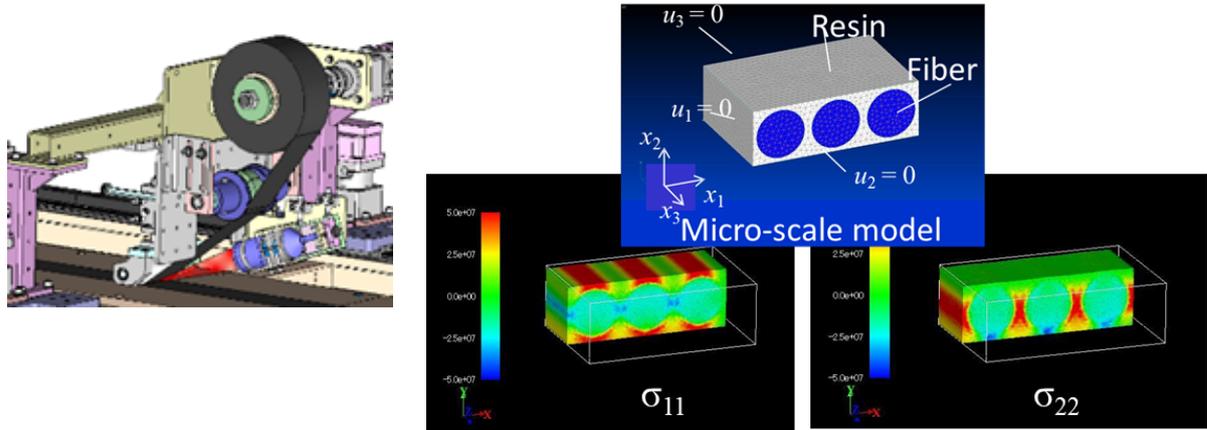


図2 Automated Tape Laying 熱可塑 CFRP 成形シミュレーション

### (3) 燃料電池自動車用高圧水素容器の開発

燃料電池自動車普及の隘路となっている炭素繊維強化プラスチック製高圧水素燃料タンクの低価格化のため、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。繊維束と樹脂を区別した有限要素モデルをフィラメントワインディングプロセスに従い作成するソフトウェアを開発し、実証解析を通じて強度評価シミュレーションの妥当性を検討した。設計変数が膨大となる容器の最適設計問題を解決するため機械学習を活用した最適解探索手法を開発した。

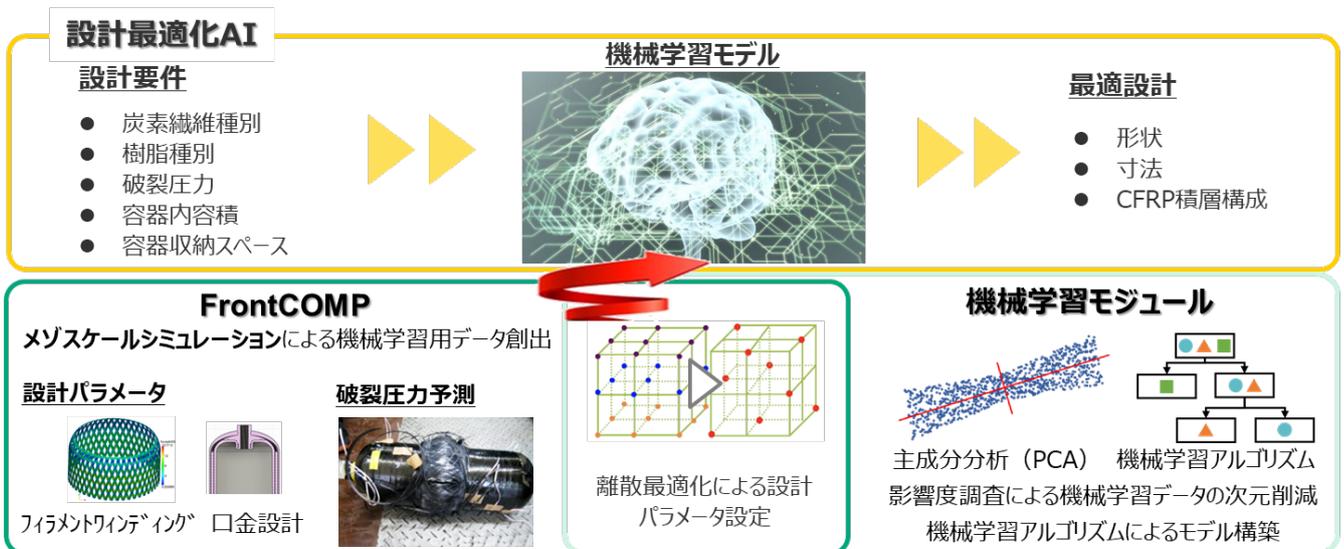


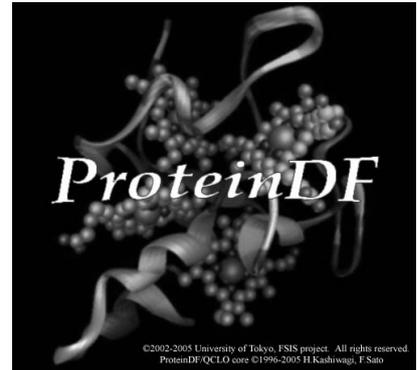
図3 機械学習を利用した CFRP 製高圧水素容器の最適設計

# 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

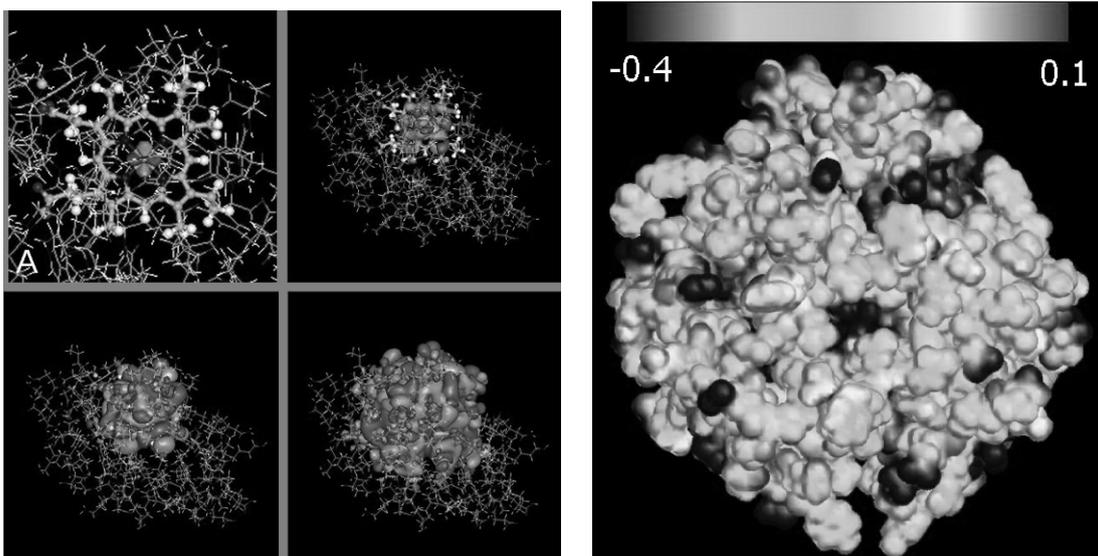
## 1. 研究室の概要

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、量子化学を用いて反応機構を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/QCLO 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分子軌道の世界を明らかにしてきました。また最近、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：世界で初めて明ら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。

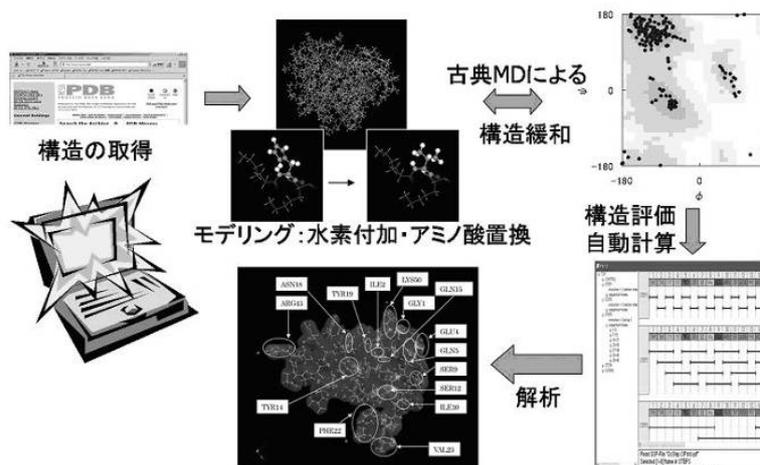
右：306 残基インスリン 6 量体の静電ポテンシャル。

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

- A. 様々なスパコンの性能を活か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
- D. タンパク質波動関数データベースの構築
- E. シミュレーションを支援・評価・解析するツール
- F. 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、応用研究としてホルモンの仕組みの解明や新規酵素、絶縁体材料を設計する共同研究等を推進しています。なお、ProteinDF/QCLO 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/)

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。



ProteinDF/QCLO によるタンパク質の正準分子軌道計算

### 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、助教、学術専門職員、事務補佐員で、4名の修士がおります。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, 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っ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

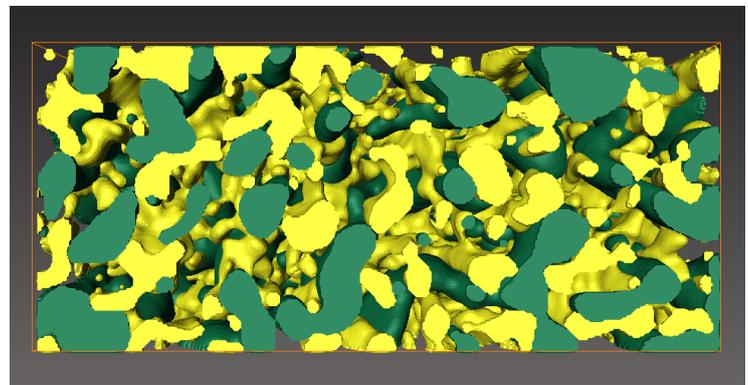


図 1 FIB-SEM により再構築された燃料極 3 次元構造  
黄色 : YSZ, 緑 : Ni

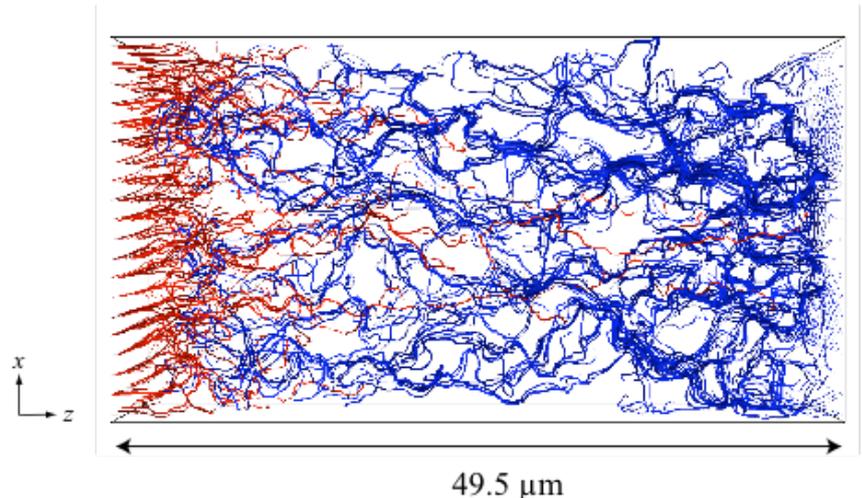


図 2 燃料極内のイオン電流(赤)および電子電流(青)

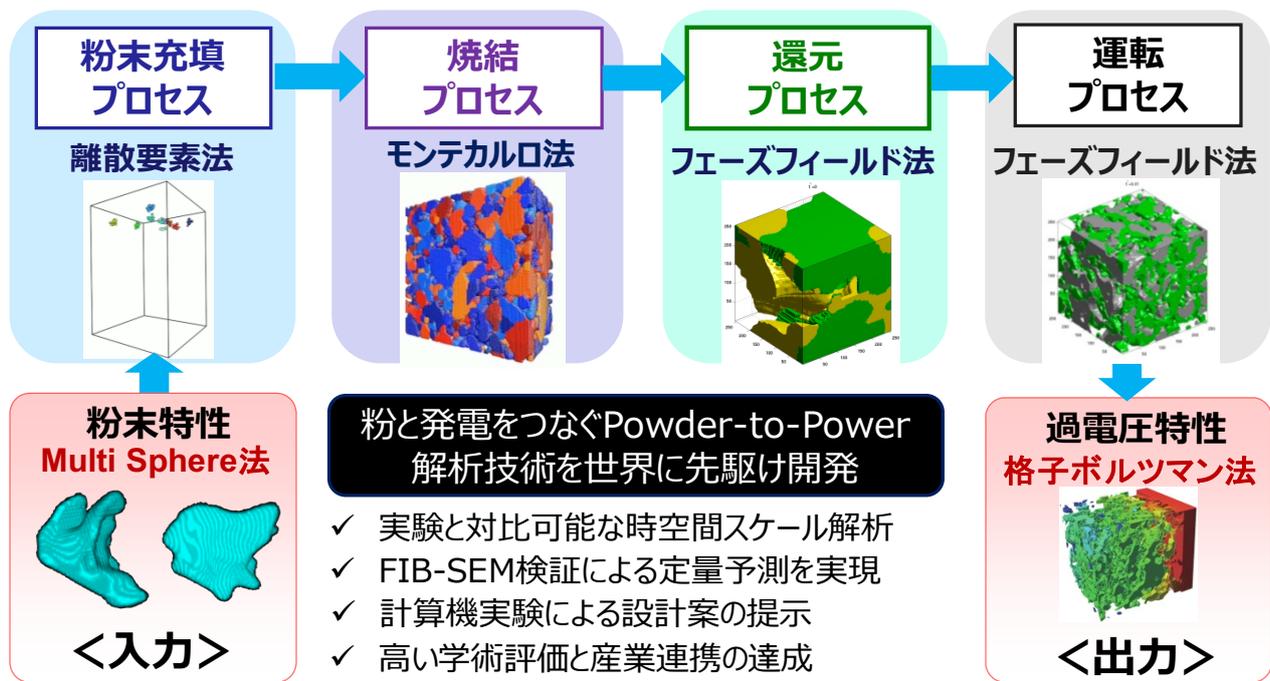


図3 数値シミュレーションを用いた SOFC&SOEC 電極の予測技術

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

熱の有効利用は省エネルギーを実現する上で最も重要な課題の一つである。その実現のためには、様々なプロセスに存在する温度差を低減させることが重要である。本研究室では、Trilateral サイクルと呼ばれる新規な熱サイクルの研究を行っている。Trilateral サイクルは、加熱した圧縮液を蒸発させることなく液相の状態で膨張機に導入し、断熱気液二相膨張させる新規な熱サイクルである。高温熱源からの熱吸収を液相単相との熱交換で行うため、排ガスや地熱等の高温熱源が温度変化する場合に、最もエクセルギー損失の小さいサイクルを実現することができる。Trilateral サイクルの膨張過程は、減圧沸騰を伴う気液二相膨張であり、この気液二相膨張において高い断熱効率を実現することが技術的な課題となる。現在、図4に示すような実証機による性能評価を実施している。



図4 トリラテラルサイクル気液二相膨張機

# 相変化熱工学 研究室

生産技術研究所 白樫研究室

## 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～))で運営している。現在所属する学生数は、博士課程3名(内留学生2名)、修士課程2名、4年生(他大学)1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。本研究室では、

- 1) 相変化(沸騰, 蒸発, ガラス化, 凝固)の速度過程・熱力学特性の計測と、それらを含んだ熱物質輸送現象の(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

### 2. 誘電分光で検出される細胞や水分子, 分散粒子の緩和ダイナミクスで, 測定対象のマクロ特性を予測できるか? (応用誘電分光, 赤外分光)

→ 細胞内の水分子の誘電分光および水素結合数の測定, 保護物質による水分子運動抑制と分子動力学計算, 結合水を有する材料内の水分の分子運動緩和時間の測定, 褐炭の低温酸化反応速度の予測, 皮膚の自由水量の測定, 小麦粉代替となる米粉ゲルの老化予測

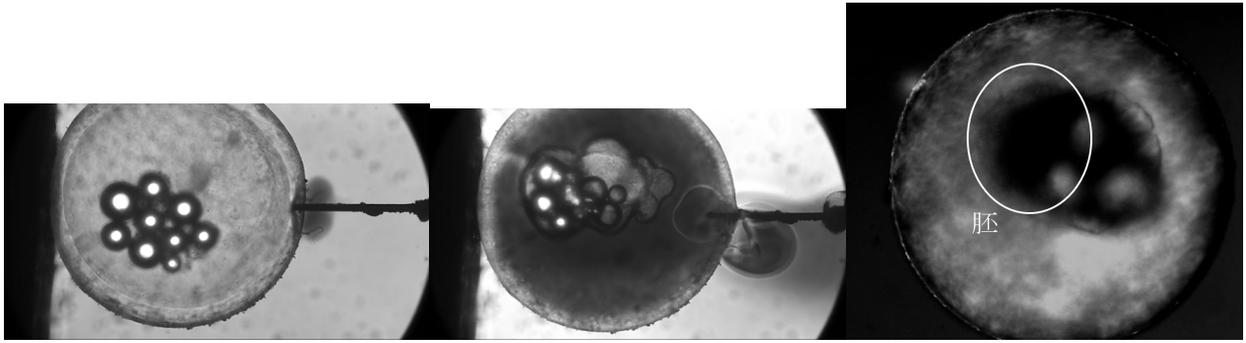
### 3. 水分子の運動状態や水素結合の状態は, 共存する物質の物性より予測・制御できるか?

→ 分子動力学計算および分光測定による保護物質の物性と水分子運動の関係の解明

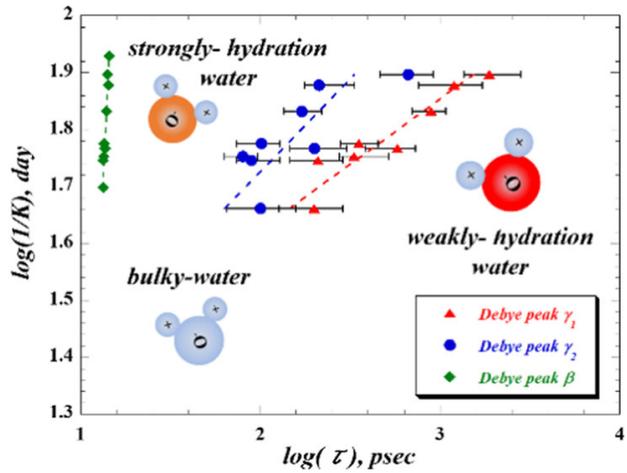
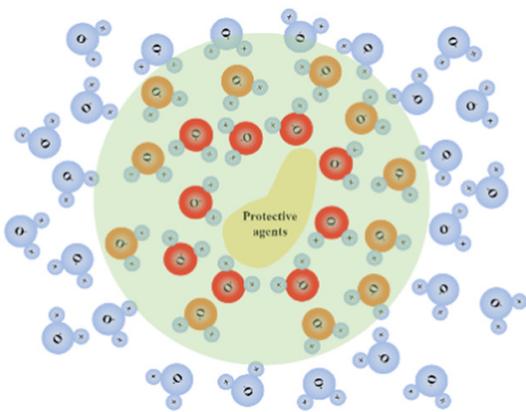
研究テーマ:

- ・魚類の完全養殖のための魚卵の長期保存 (1, 2)
- ・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, 2)
- ・ワクチン・リポソーム薬剤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, 2)
- ・過飽和状態のタンパク質, 生体保護物質水溶液の水の物質輸送特性の測定 (1, 2)
- ・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, 2)
- ・分子動力学計算による保護物質の物性と水分子運動の解明 (2, 3)

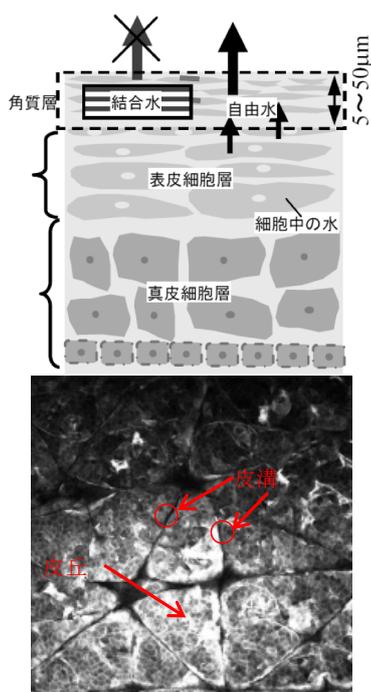
(括弧内は, 上記で示した問題の番号)



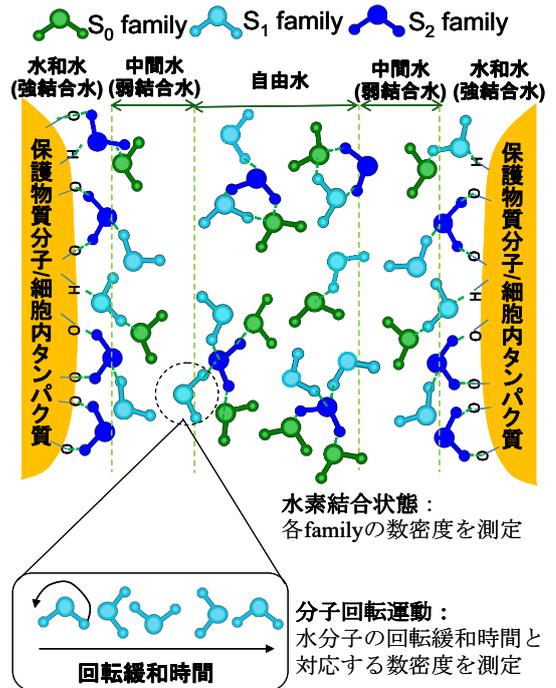
φ39μm の固定中空針を用いた電気穿孔法によるメダカ卵細胞への物質注入と冷却解凍後の魚卵内



保護物質周囲の水分子の回転速度とバイオマーカー (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・結合測定概念図

白樫教授連絡先: phone 03-5452-6217, fax 03-5452-6219, e-mail:aa21150@iis.u-tokyo.ac.jp

http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/~aa21150

# 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

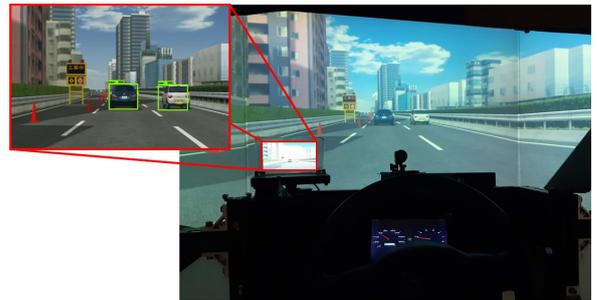
## 1. 研究室の概要

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 ドライバ主導の運転引継のためのヒューマン・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、ドライバーはシステムの機能限界を理解し、目の前で起きる事象に適切に応答する必要があります。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メンタルモデルを醸成する、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。人間の筋骨格系のモデル化、ドライビングシミュレータ実験などを通じて、シェアード・コントロールの有効性を検討しています。

### 2. 3 自動運転バスの制御系設計

バスの自動走行を実現する制御器の設計を行っています。自己位置推定を含めた車両運動制御系の設計手法を縦方向と横方向の制御に分けて論じ、センサおよび磁気マーカー等のインフラ情報が、制御系設計と性能に及ぼす影響を明らかにしました。本成果は自動運転バスの実証実験に活かされています。

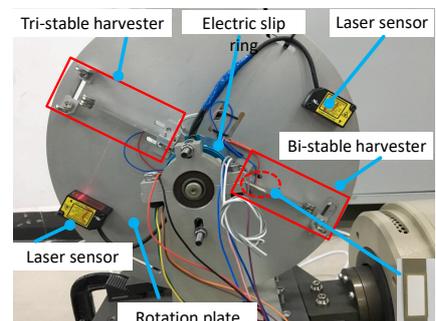


### 2. 4 自動運転車両の環境監視用センサ故障を想定した縮退運転システム

レベル4以上の自動運転を行う場合は、自動運転機能に故障があった場合は、最小のリスクで自動車を止める必要があります。その運転過程は縮退運転と呼ばれています。重要な技術ですが、あまり学術的に議論されてこなかった縮退運転の制御手法を提案し、数値計算を通じて妥当性の検討を行っています。

### 2. 5 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. 6 鉄道車両の減速度低下検知

鉄道車両上で計測した加速度とブレーキノッチから、減速度低下を検知することを試んでいます。減速度低下は降雪時等においてよく起きる現象であり、安全運転の妨げになります。タブレット等により、検知した情報を他車両の運転士と共有することにより、運転を支援することを目指します。

## 2. 7 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。

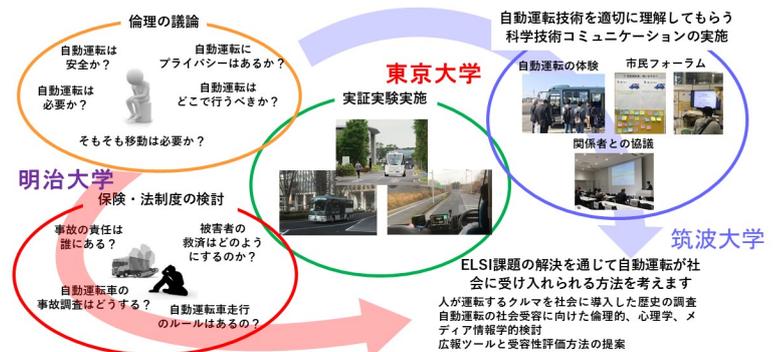
## 2. 8 携帯電話回線を利用した鉄道車両と自動車の統合型交通制御システム



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、交通信号機および、自動運転・運転支援車両を含めた、多モードの交通車両の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. 9 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. 10 協調型レベル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。経済産業省事業の下、関連省庁と連携しながら、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）の実証実験を活用し、近い将来に、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。



# 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

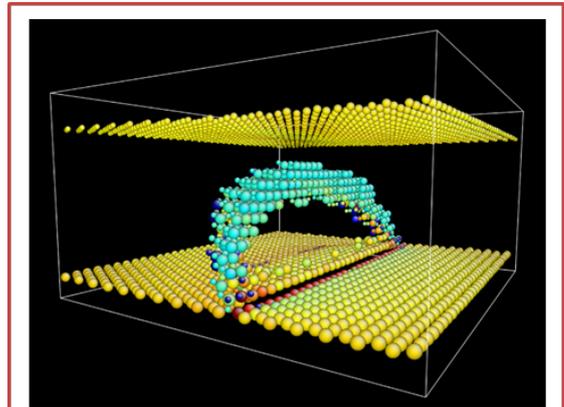


## ナノ・マイクロ材料強度と物性の本質を解明し応用を目指す

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原子モデリング法の開発など、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

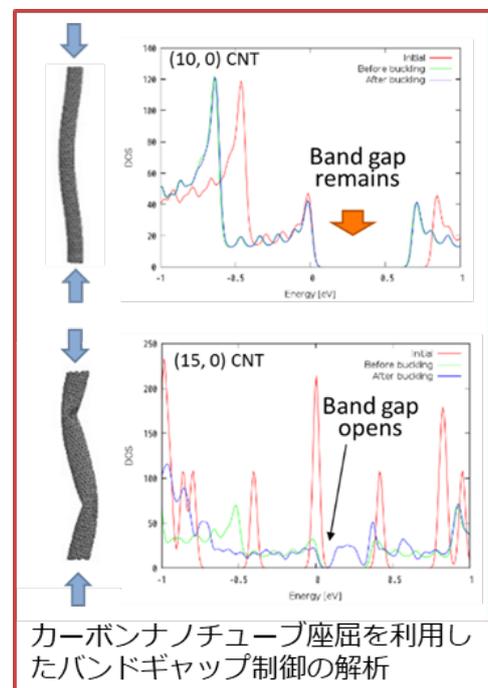
亀裂進展や結晶すべりによる塑性変形のメカニズムを明らかにすることは材料強度の本質を理解するうえで重要です。原子間結合の断裂やズレとそれらの集団的挙動を追跡することができる原子モデル解析は、こうしたメカニズムの解明のための強力なツールとなります。また、量子力学に基づく第一原理計算によって結晶の理想強度を定量的に評価することも、材料強度のナノレベルのメカニズム解明に寄与します。本研究室では、密度汎関数理論に基づく第一原理理想強度解析や、分子動力学法を用いた転位運動のシミュレーション、原子構造不安定モード解析など様々な計算科学的手法を駆使し、材料強度の発現機構の解明に取り組んでいます。



転位運動と結晶すべりの分子動力学シミュレーション

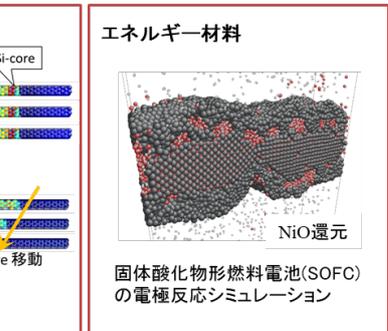
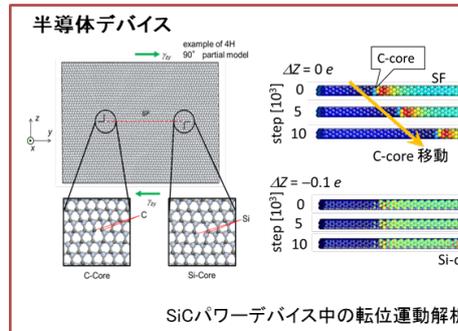
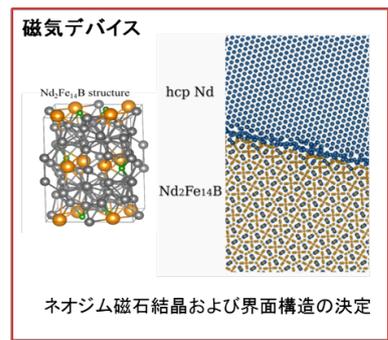
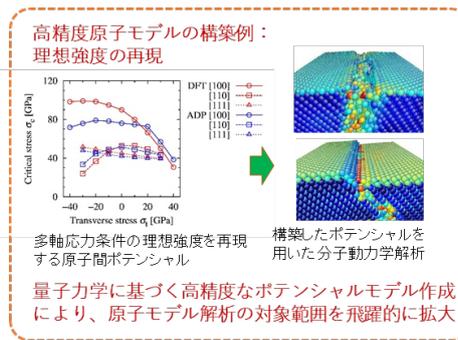
### ②ナノ構造材料の特異な変形および物性変化の原子・電子モデルシミュレーション

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ーションを行い、次世代ナノデバイスの理論設計を試みています。



### ③Bottom-up 型マルチスケール解析のための高精度原子モデル構築

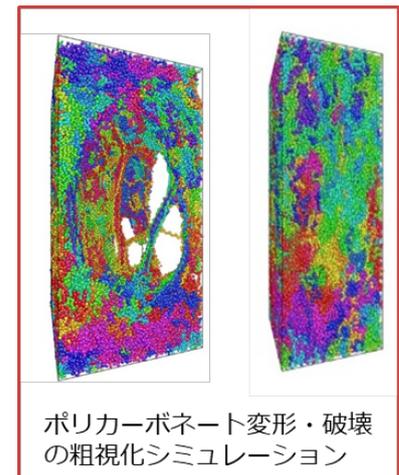
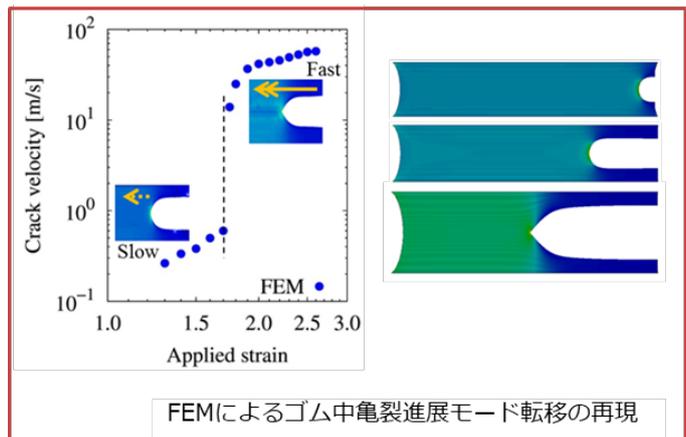
分子動力学法などの原子モデル解析が広く用いられるようになったものの、力場（原子間相互作用を記述するポテンシャル関数）を構築することが困難を伴うため、その対象範囲はまだ限られています。本研究室では、酸化物などの多元系のための力場、さらには化学反応も記述可能な反応力場の構築に取り組んでいます。力場フィッティングのための独自のアルゴリズム開発やツール整備を行っており、原子モデル解析が適用できる材料や現象の飛躍的な拡大に貢献しています。これによって、ネオジム磁石界面の構造と磁気特性シミュレーション、SiCパワーデバイス材料の転位運動シミュレーション、燃料電池電極材料の反応シミュレーションの実現に成功しました。さらに、ニューラルネットワークモデルを用いた新しいマルチフィジクス原子間ポテンシャルの提案など、機械学習・深層学習を活用する新たな試みも行っています。



### 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/>

# 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“もの創り”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

### 超精密機械要素の研究開発

工具によって工作物を削り取る機械加工においては、運動誤差は直接的に加工誤差につながるため、高精度な機械加工を実現するためには、加工システムの正確な運動が必要不可欠となります。本研究室では、機械システムの直線運動要素および回転運動要素など、システムを構成する基本ユニットの超高精度化に取り組んでいます。図1は、1軸の超精密位置決め機構を設計および試作した例です。運動誤差の原因となる摩擦や非線形挙動を排除するとともに、運動学的に誤差を最小化するように重心駆動および重心計測となる配置で構造設計することで、ナノメートルオーダの位置決め分解能を有するシステムを実現しています。実際のシステムでは、分解能だけでなく、高速化や多自由度化なども併せて要求されるため、さらなるユニットの高度化に取り組んでいます。

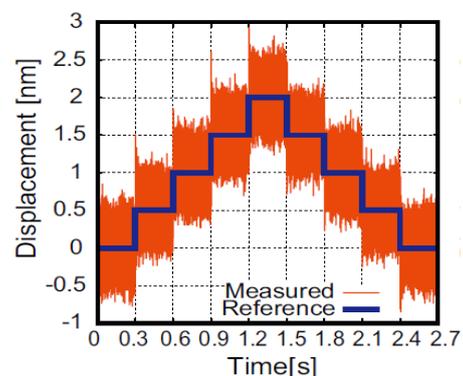


図2 超精密加工システムとナノメートルオーダの形状創成

### 超精密加工システムの研究開発

実際に精密な加工を実現するためには、個々の精密機械要素を単純に組み合わせただけでは難しく、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2は、研究室で設計および開発した超精密加工システムの外観です。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することで、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。

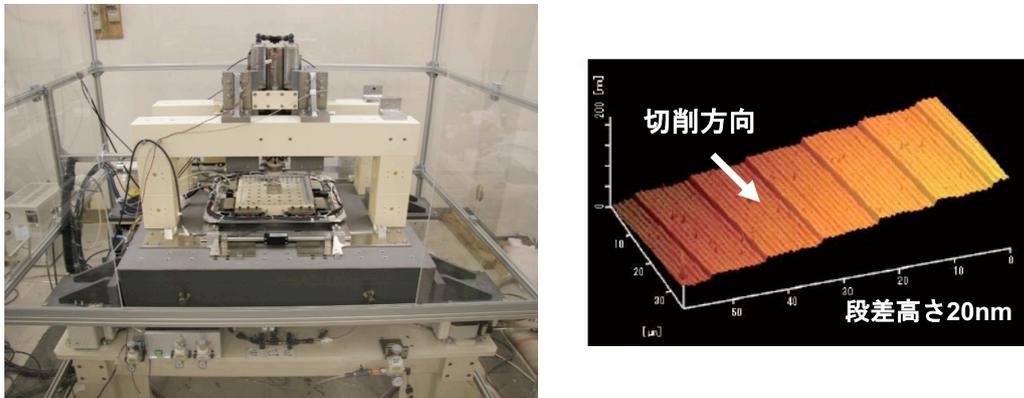


図2 超精密加工システムとナノメートルオーダの形状創成

### 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ニ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。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能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。

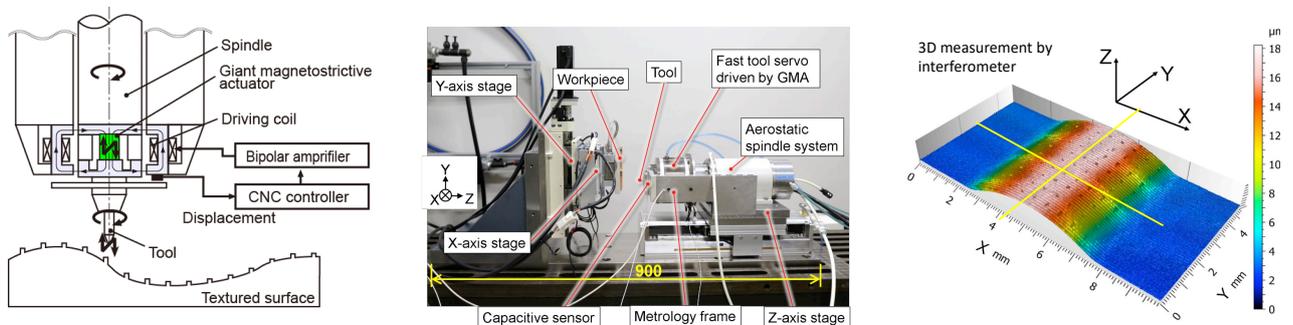


図3 構築した高速工具サーボと加工面の一例

# 高効率生産のための加工・組立の要素技術

生産技術研究所 土屋研究室

## 1. 研究室の概要

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。2022年4月現在の在籍者数は、准教授1名、研究員4名、技術員1名、学術支援職員2名、大学院学生5名の合計13名となっている。研究拠点は駒場リサーチキャンパスのほか、柏キャンパスにも大型実験設備を展開している。

## 2. 研究内容

当研究室は、おもに機械加工に関する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。特に、工具と工作物の界面で起きるミ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アプローチする。

### 2. 1 顕微鏡下の微細作業システムに関する研究

微細構造物の組立・接合作業や、解体・強度試験などを目的として、リアルタイムで観察しながら必要な作業を行うシステムを開発している。顕微鏡・マニピュレータ・工具を組み合わせることや、対象物・視野・工具先端・回転中心などをすべて一箇所に集中させることなど、いくつかの設計指針に従えば課題を達成できることである。

このようなシステムの応用先として、当初は微小機械の組立を主目的として研究開発したが、次第に医療や生命の分野で生体組織に操作を加える研究がメインとなり、低侵襲の不妊治療やDNA切り出し作業、染色体の解体作業などに応用してきた。近年はナノメートルの領域での材料特性を調べるツールとして、ナノワイヤの強度試験、微小寸法材の疲労特性評価(図1)、超微粒固定砥粒の保持強度評価(図2)などに応用し、破壊のメカニズム解明を進めている。つまり、対象とする微細物の寸法は小さい方向へ進み、その目的もものづくりからサイエンスの方向へシフトしてきた。

現在は、単一の単粒による加工試験を電子顕微鏡観察下で行うことで、機械化学研削加工の素過程を解明する研究を進めている。機械化学研磨加工は、次世代半導体材料の加工技術であると同時に、持続可能な開発目標(SDG's)の一部として注目されているが、その加工メカニズムに不明点があり実用化

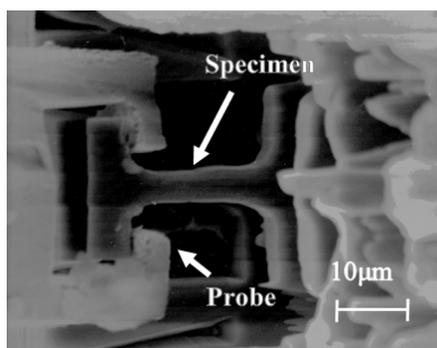


図1 2×3μm のマグネシウム合金 AZ31 試料の疲労試験

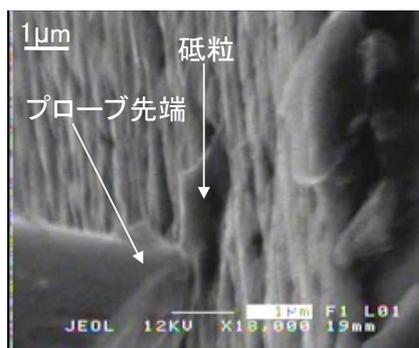


図2 1μm の砥粒の保持強度試験



図3 微細組立システムの量産試作機

に至っていない。そこで、数 $\mu\text{m}$ ～サブ $\mu\text{m}$ の砥粒一粒に注目し、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、加工点、荷重、加工速度を自由に設定し、様々な条件の加工試験を行う。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。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、各種条件最適化によって加工性能を向上させる。

その一方、経産省の戦略的基盤技術高度化支援事業の支援を受け、一般の中小企業にも導入可能な微細組立システム(図3)を開発して販売を開始するなど実用化の方向へも力を入れて取り組んでいる。

## 2. 2 刃物の先端微細形状が切断性能に及ぼす影響

包丁やカッターなどの刃物の切断性能は、使った感覚から曖昧かつ主観的にしか評価されず、研磨手法や条件は最適化されていない。そこで、刃物の研磨条件と刃先形状、刃先形状と切れ味の関係をそれぞれ明らかにし、切れ味を高めるために適した研磨条件を提案した。具体的には、様々な条件で研磨を行える研磨装置と、切れ味を定量的に評価できる切断装置を用いて、研磨条件と切れ味との関係を明らかにした。また、刃物が材料を切断するときには、刃物先端の微細な凹部に材料が入り込むことによって切断されるというメカニズムに基づき、刃物の稜線形状から有効に作用する稜線の長さを算出し、断面の先端径と合わせて刃物形状の評価指標を新たに提案し、切断性能との相関関係があることを示した。

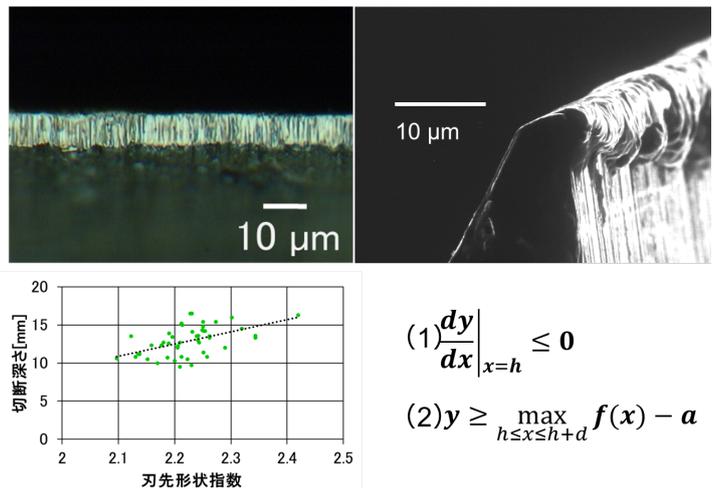


図4 (上段右)刃物刃先の稜線観察画像、(上段左)刃先断面先端径観察画像、(下段)刃先形状指数の算出式および刃先形状指数と切断性能との相関

## 2. 3 長疲労寿命面を創成する応力下切削法

航空機など高い信頼性を求められる分野では疲労寿命の長い部材が必要とされる。我々は、熱処理やショットピーニングなどの後工程を必要とせず高い疲労寿命をもつ部材の加工法として、応力下切削法を開発している。材料にあらかじめ引張荷重を与えた状態で切削加工を行い、加工後に除荷することで圧縮方向の残留応力を付与することができる。これは、切削加工時に表面近傍で材料の再結晶が起こり、引張応力が緩和されるためである。現在までに、材料の降伏点以下の範囲において予応力に応じて高い圧縮残留応力が得られること、また、バニング加工やショットピーニングなどと併用することでさらに高い圧縮残留応力が得られることを明らかにした。

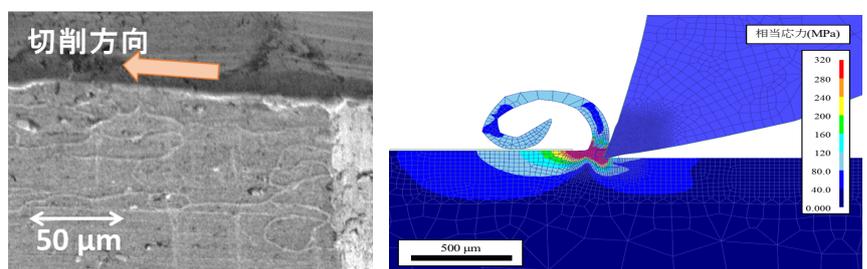


図5 (左)応力下で切削した工作物の断面観察像、(右)応力下で切削したときの応力分布のシミュレーション結果

# 熱流体工学における逆問題と最適化

生産技術研究所 長谷川研究室

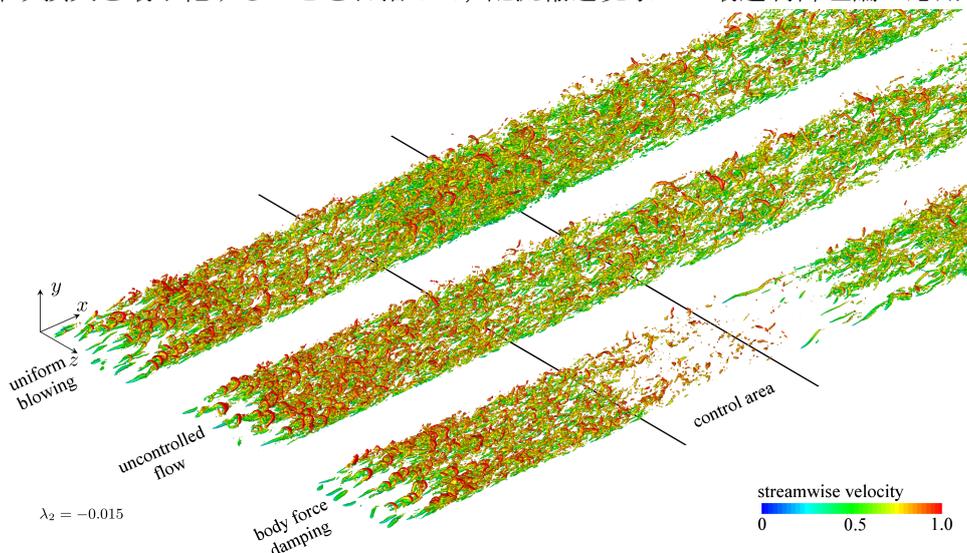
## 1. 研究室の概要

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多くの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。流体现象は、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。原因が与えられたとき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。

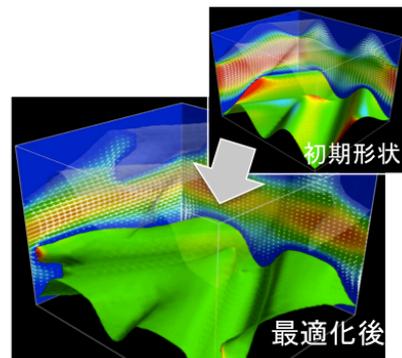


### 熱流体システムにおける複雑3次元形状最適化

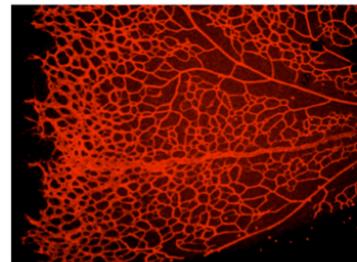
我々の生活を支える多くのエネルギー機器では、界面における輸送現象を自在に制御することが鍵となる。例えば、壁面と流体の界面で生じる摩擦抵抗は、航空機等の高速輸送機器のエネルギー損失を支配している。熱交換器や冷却器の設計では、圧力損失を抑えつつ、熱伝達特性を飛躍的に向上させること

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。

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。



熱交換器伝熱面形状の最適化例



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

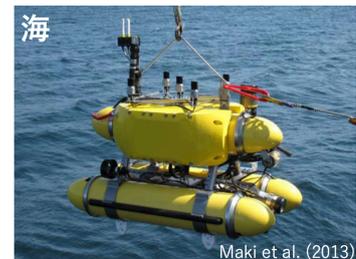
近年、原子力発電所からの汚染物質の拡散や海洋における原油流出事故等、人間の安心、安全を脅かす事例が生じており、環境乱流中における物質放出源推定のニーズが高まっている。災害発生直後は、当該地域における人間活動は大きく制限される場合が多く、移動ロボットが自律的に濃度シグナルを頼りに物質放出源を特定することができれば、災害後の迅速な対応や汚染物質の拡散予測に大きく貢献



陸



空



海

Maki et al. (2013)

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/> <https://www.youtube.com/channel/UCBps-pPTXwpRV8sE4Qu3I5w>

# 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ってこそ、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）。

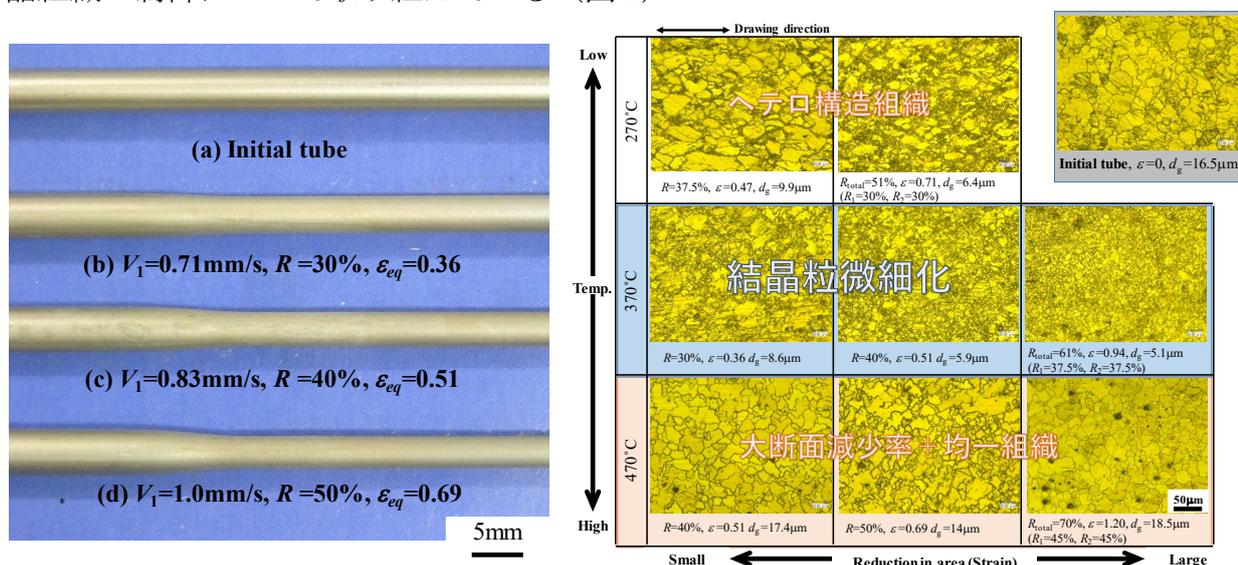


図1 生体吸収性マグネシウム合金の極細管の創製と結晶組織制御

## (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、 $\beta$ 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)。

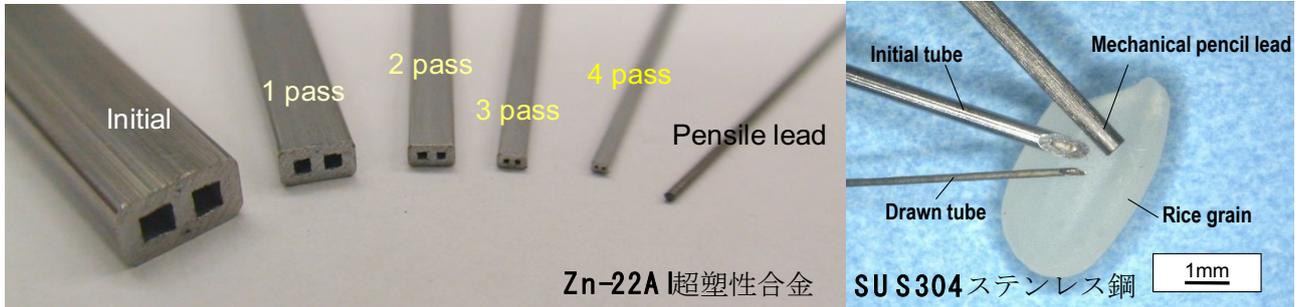
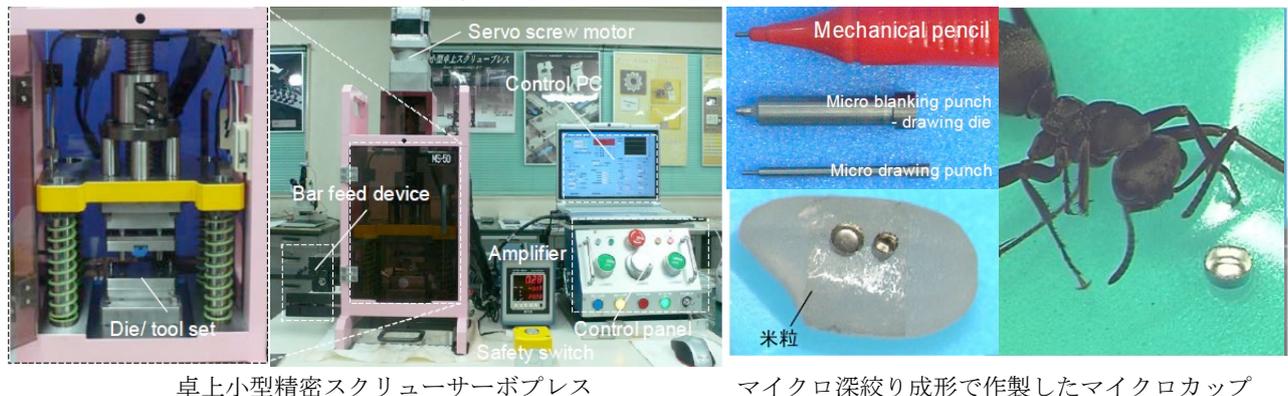


図2 ダイレス引抜きによって創製した金属マイクロチューブ

## (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)。



卓上小型精密スクリーサーボプレス

マイクロ深絞り成形で作製したマイクロカップ

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、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、アクチュエーションシステム（ロボット等）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. 高速ロボットシステム
2. 動的物体操作
3. 人間ロボット協調
4. 先進運転支援システム・自動運転
5. 高速センサネットワーク

## 2. 研究内容

### 高速ロボットシステム

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、1秒間に180度の開閉運動が可能で、掌に高速カメラを搭載した高速ロボットハンド（図1）や、高速に対象の動きに追従して三次元位置を1,000 Hzで計測するシステム（図2）等を開発しています。



図1 高速ロボットハンド

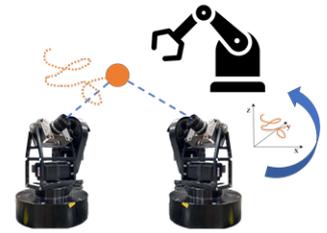


図2 Active Vision System

### 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（図3）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



図3 布の動的折り畳み動作

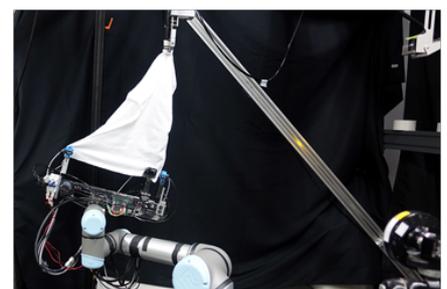


図4 布の展開動作

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（図4）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。その具体的な人間機械協調システムの一例として、勝率100%じゃんけんロボット(図5)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し、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人間機械協調システムに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に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(図6)を実現しています。従来のシステムは機械学習や予測を用いて対応しているものに対して、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。

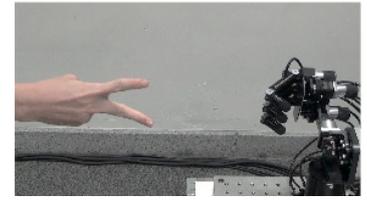
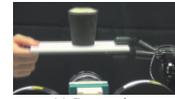


図5 勝率100%じゃんけんロボット



(a) Cooperation



(b) Assistance



(c) Enhancement

図6 人間ロボット協調の実現例

## 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をネットワーク上に接続し、高い時間分解能で同期することにより、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。このシステムは広域性と即応性の両立を可能とすることから、物陰から急に現れた自転車や、道路に急に飛び出してきた人に瞬時に反応して回避行動が取れるような、より安心・安全な先進運転支援システムの実現を目指して研究を進めています。



図7 移動体の障害物回避

また、車載型の高速ビジョンシステムの一例として、路面が見えるように車両に取り付けた高速ビジョンを用いた高速近接路面解析技術を開発しています。これは、走行中の車両から見える路面の模様(テクスチャ)を捕捉・解析することで、車両自身の姿勢や自己位置を推定するものです。この技術によって、GPSの精度が著しく低下するような高速ビルに囲まれた都心やトンネル内でも車両の位置を正確に知り、より高度な自動運転に貢献する車載高速ビジョンシステムの実現を目指しています。



図8 高速近接路面解析

## 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。

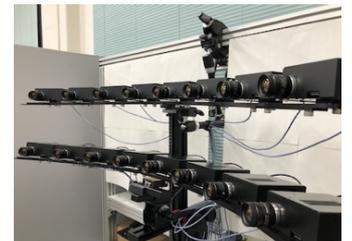


図9 高速カメラネットワーク

連絡先: TEL: 03-5452-6178, FAX: 03-5452-6180, E-MAIL: y-ymkw@iis.u-tokyo.ac.jp  
<http://www.hfr.iis.u-tokyo.ac.jp/>

# 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

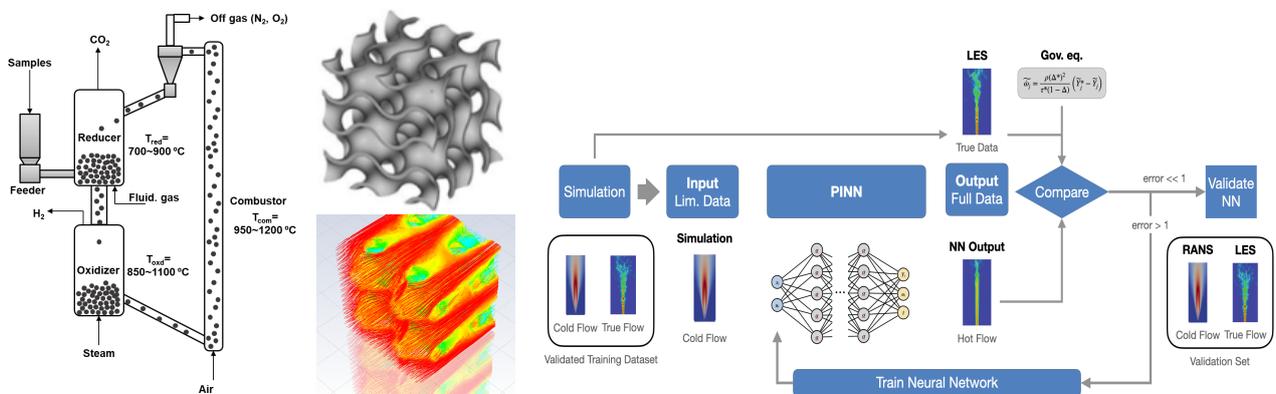
## 1. 研究室の概要

「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、CO<sub>2</sub>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、液化水素・有機ハイドライド、アンモニアの生成システムを検討・評価する。最後に、水素利用においては、水素・アンモニアの燃焼（専焼・混焼）の数値シミュレーションおよび予測を行い、また、電力および他の二次エネルギーへの変換システム（高効率な水素サイクルなど）の構築・評価も行う。

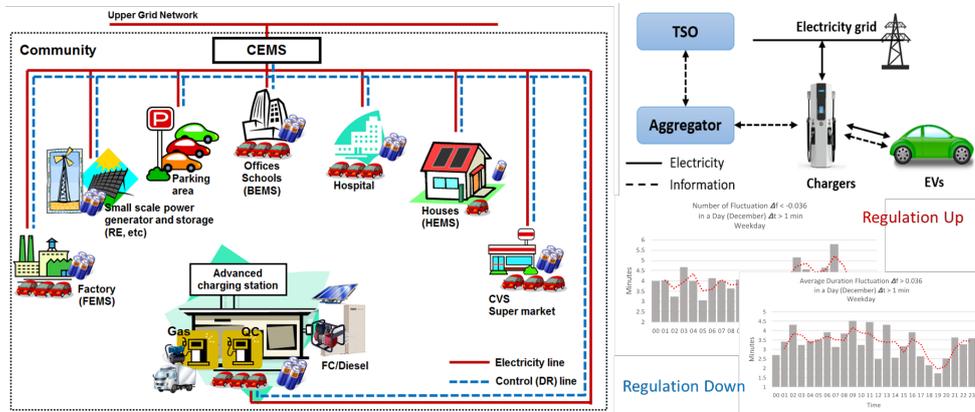


三つの反応器を持つケミカルルーピングシステム（左）、三重周期極小曲面を応用した水素貯蔵合金の構造（中央）、非カーボン系の燃料の燃焼・予測（右）

### エネルギーマネジメントシステムおよび次世代電気自動車の高度利用

本研究では、様々なスケールにおけるエネルギーマネジメントシステムのモデル化および最適化を行う。

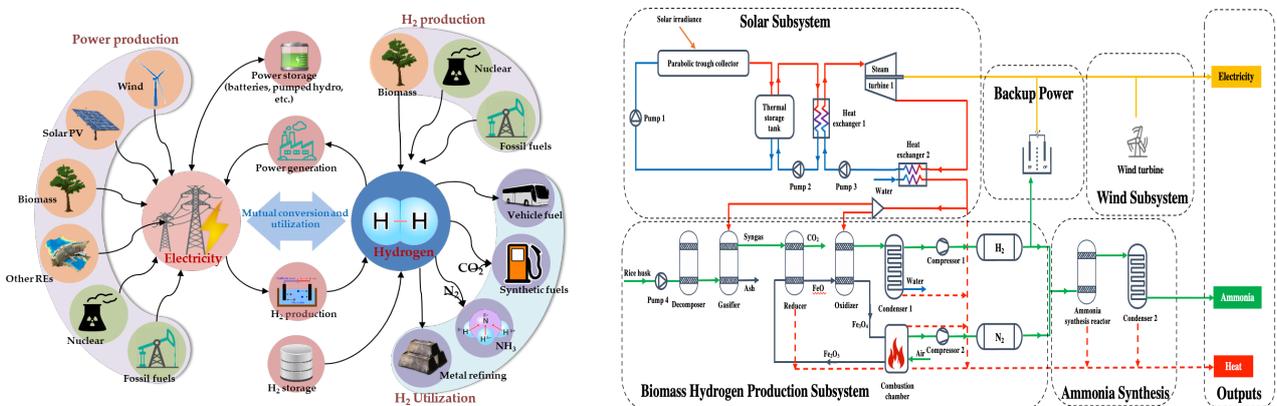
また、電気自動車の高度利用については、分散されている電気自動車がアグリゲーションシステムによって電力系統へのアンシラリーサービスを提供することができる。アンシラリーサービスでは、周波数調整、負荷平準化、無効電力を含む電圧調整、系統の混雑・管理などがあげられる。本研究ではそれらのサービスを検討・評価を行い、実際の適用検討も行っている。電気自動車を利用することで、従来型の周波数調整装置と比較し、非常に速い応答の周波数調整が得られた。また、電気自動車だけではなく、電気自動車からのリユース電池に関する高度利用についても研究対象となる。



エネルギーマネジメントシステム（左）、電気自動車によるアンシラリーサービス（右）

### 再生可能エネルギーおよび低品位燃料によるマルチジェネレーションシステム

様々な一次エネルギー源を高効率的に生活に必要・便利なエネルギー形態に変換するために、統合したマルチジェネレーションシステムの構築および最適化を行う。本研究では、マイクロスケールからマクロスケールまでのシステムを想定し、技術的なシステム検討・設計だけではなく、経済性および実用性についても検討する。再生可能エネルギーの導入拡大および低品位燃料による高度なエネルギー生産に向けて、様々なシステムを提案・構築する。具体的には、再生可能エネルギーによる変動を吸収するために、power-to-gasなどのシステムを検討する。また、既存の地熱発電所における熱利用の最適化も行い、よりエネルギー効率の高い地熱発電所を実現する。産業廃棄物については、加熱水処理・熱分解などによる燃料化の実験・評価を行いながら、低品位燃料によるコプロダクションシステムの検討も行う。



非カーボン系二次エネルギーの相互利用・変換（左）、マルチジェネレーションシステム（右）

連絡先: TEL: 03-5452-6196, FAX:03-5452- 6657, E-MAIL: maziz@iis.u-tokyo.ac.jp  
<http://epi.iis.u-tokyo.ac.jp/>

# 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:  $\text{SrTiO}_3$ )、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。

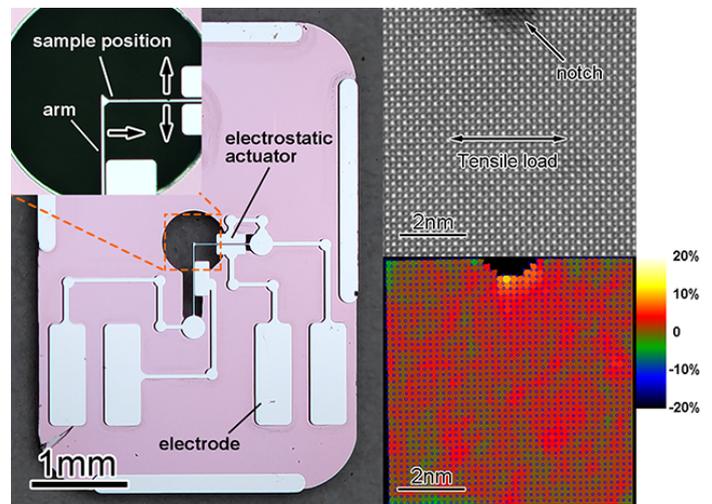


図 1. (左) 原子分解能その場 TEM 荷重負荷用 MEMS デバイス, (右上) 荷重負荷時に取得した原子像 (試料:  $\text{SrTiO}_3$ ), (右下) 原子像に対応するひずみマップ.

### 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テ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。

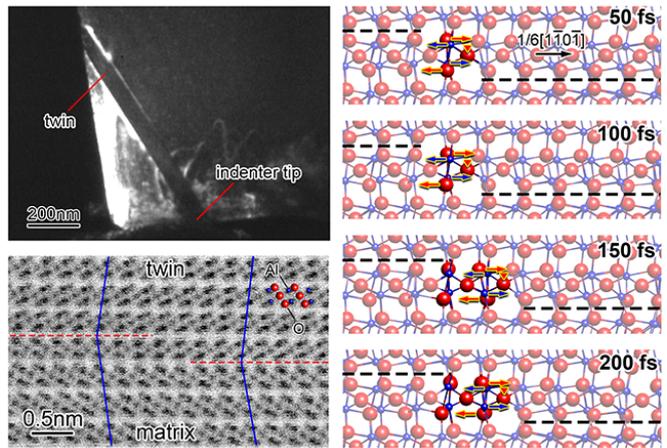


図2. (左上) $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ における双晶の成長挙動観察, (左下)界面原子構造, (右)第一原理分子動力学シミュレーション.

### 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。

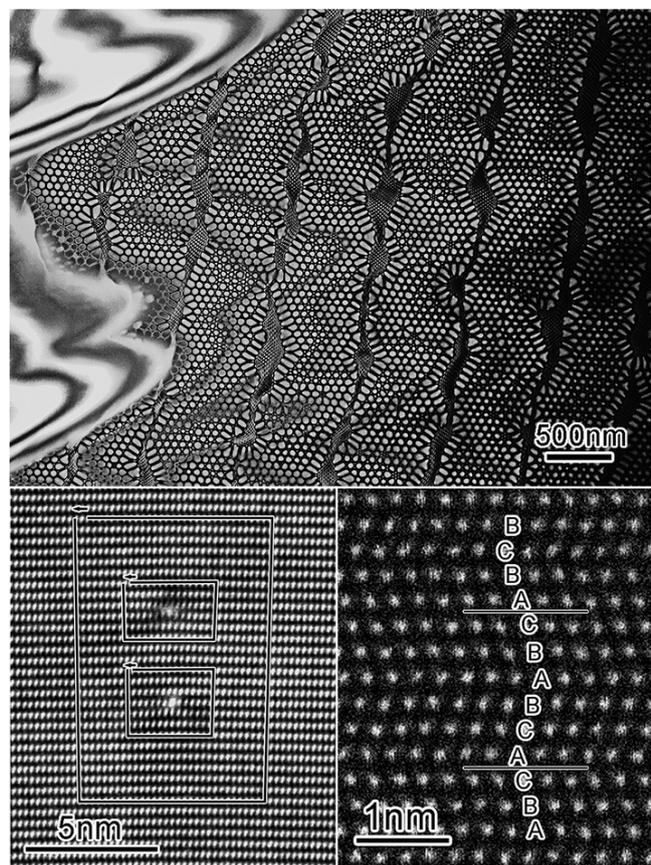


図3. (上)らせん転位ネットワーク( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), (左下)転位のコア構造( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), (右下)積層欠陥構造(4H-SiC)

### 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).

連絡先: TEL: 03-5452-6112, E-MAIL: [tochigi@iis.u-tokyo.ac.jp](mailto: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>