ファインメカニクス

Finemechanics

ファインメカニクスコース
ファインメカニクス専攻

祖山·久慈 研究室

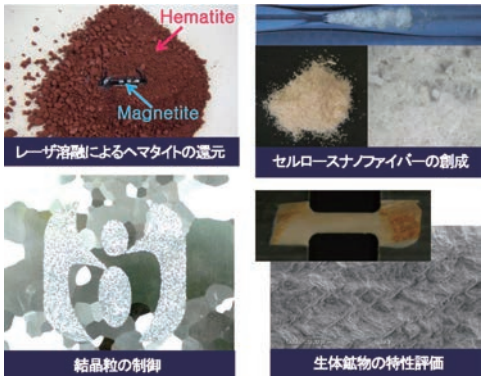
教 授
祖山　均

助 教
久慈　千栄子

材料メカニクス講座
知的計測評価学分野

http://www.mm.mech.tohoku.ac.jp/

表面力学設計に基づいた材料強化およびその知的評価



新機能材料の創成

表面力学設計による機器·構造物の信頼性向上

低環境負荷かつ安全·安心な社会の構築のため、当該分野において開発したキャビテーションテクノロジーに基づいたサステイナブル表面改質を用いた表面力学設計により機器·構造物に高機能表面層を付与し、疲労寿命の改善や水素脆化の抑止を目的として研究を行っている。表面層は力学的、化学的に苛酷な環境に曝されているため、表面力学設計により材料特性を大きく向上できる。昨今問題となっている橋梁などのインフラ構造物の老朽化に対する保全技術として適用できる一方、自動車などの移動体の構成材料を強化することで軽量化に繋がる。また、環境負荷低減を目途とした水素社会実現において水素を使用する際に懸念される水素脆化が障壁となっているが、サステイナブル表面改質によって表面層の耐水素脆化性を向上でき、構造材料に対して水素脆化抑止効果を付与することができる。

CWレーザを用いた酸化鉄の3次元積層造形

火星や月での構造物·機器の製造を目的として、酸化鉄を用いたレーザ溶融型3次 元積層造形について、NASA ジョンソン宇宙センターと共同研究を行っている。これまでに、酸化鉄を原材料としてCW レー ザを用いて3次元積層造形が可能であることと、レーザ溶融による3次 元積層造形時に、ヘマタイトがマグネタイトに還元して酸素を得られることを明らかにしている。

サステイナブル表面改質による生体材料の高機能化

高齢化社会を支える生体材料には高い信頼性が求められる。特に脊椎固定器具はロッドと固定器具の間に生じるフレッティング疲労が問題となっており、その耐性の改善が喫緊の課題である。そこで当研究室では、サステイナブル表面改質により脊椎固定用インプラントロッド表面層に高機能層を創成し、フレッティング疲労に対する耐性を劇的に改善する研究を行っている。

流動キャビテーションによる セルロースナノファイバーの創成

再生可能かつ持続可能な材料への需要の高まりから、セルロースナノファイバーが注目されており、生化学的改質、変換が困難な天然セルロースを効率的にナノファイバー化する技術が求められている。そこで当分野では、ベンチュリ管の絞り部でキャビテーションを発生させる流動キャビテーションを活用して、セルロース系バイオマスから効率的に製造するための研究を実施している。

バイオミネラリゼーションに倣った高機能材料の創成

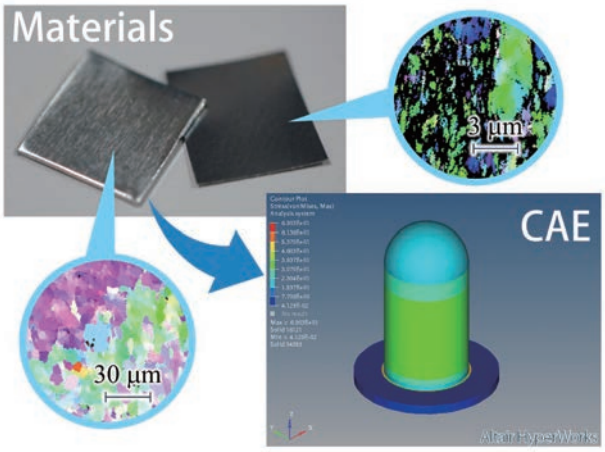
バイオミネラリゼーションにより生み出される生体鉱物は軽量かつ強靭であるが、その生成過程および機械的特性は亜解明されていない。生体鉱物は常温常圧で生産可能であることから新しい材料モデルとして期待されており、バイオミネラリゼーションに倣った高機能材料を製造できれば省資源·省エネルギー化に大きく貢献できる。当分野では貝殻や甲殻類の外骨格の機械的特性を評価している。

ファインメカニクスコース
ファインメカニクス専攻

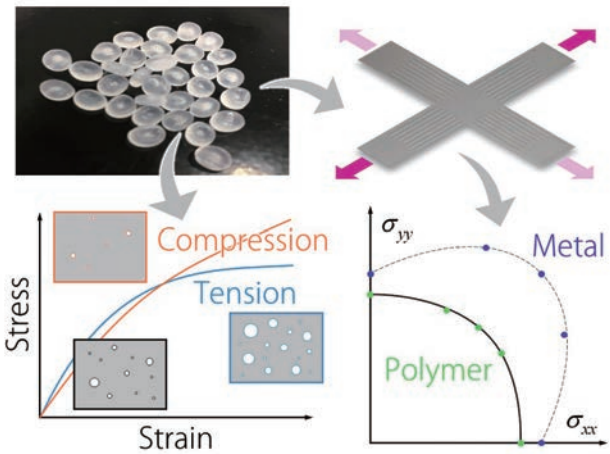
青柳 研究室

准教授
青柳　吉輝

材料メカニクス講座
機械材料設計学分野
https://web.tohoku.ac.jp/aoyagi/



超微細粒金属材料の微視構造を考慮した力学挙動の予測



熱可塑性高分子材料の力学非対称性・異方性評価

最先端材料に関する実験的マルチスケールメカニクス

我々の日常生活に必要不可欠な鉄、鋼、アルミニウムといった金属材料および樹脂、繊維、ゴムといった高分子材料は、過酷な状況下での使用や構造物の軽量化を目的として日々進化を続けています。構造材料としてのみならず、汎用性の高い最先端材料の成型性や信頼性を高めるために、その力学特性を材料の微視的挙動から理解し、変形挙動をより的確に表現可能な数理モデルの構築に期待が寄せられています。本研究室では、結晶構造に関する原子スケールと、構造体を巨視的に捉える連続体スケールといった異なるスケールの現象を同時に表現する理論体系、すなわちマルチスケールメカニクスに基づき、材料の複雑な振る舞いを計算シミュレーションによって解析していきます。さらに実験によって得られたデータと計算的研究とを融合させ、新しい知見を生み出すことを目的とします。

粒界･粒内転位源に基づくUltraFine-Grainedメタルの転位挙動シミュレーション

金属材料の結晶粒径を小さくしていくと機械的力学特性が向上することが経験的に知られています。しかしながら、結晶粒径が1μm 以下という「UFG メタル」の微視的メカニズムについては十分に解明されていないのが現状です。本研究では、転位源としての粒界の役割を考慮した FEM 解析を粒径の異なる Al 多結晶に対して実施し、粒径の減少に伴う降伏挙動の変化について検討します。

結晶性･非晶性ポリマの微視的変形機構に基づく高分子塑性論の構築

結晶性高分子材料は、分子鎖が規則正しく配列されている結晶質およびランダムコイル構造を有する非晶質部分を有します。このような材料に関する研究に対して工業的な要請は強いものの、各相の特性について全く未知な部分が多いのが現状です。本研究では、球晶の変形挙動に関する実験観察に基づき、結晶質部分と非晶質部分の混在する結晶性高分子塑性モデルを構築します。

微細組織から力学挙動を予測する実践的CAEシステムの創成

構造解析用 CAE に使用する降伏関数を数値解析的に予測します。その際に、実験観察・測定から得られる材料の微視構造の情報に基づいて変形挙動を記述する実験的マルチスケールメカニクスを用います。汎用の構造解析用ソフトウェアに求めた降伏関数を組み込むことによって、CAE による材料設計から開発、実用までの一連のプロセスをシームレスにつなぐことを目的としています。

熱可塑性複合材料におけるトランスクリスタルの影響

結晶性高分子材料を母材とする熱可塑性複合材料においては、強化繊維のまわりにトランスクリスタル（TC）と呼ばれる結晶組織が形成されます。本研究では、成形時の熱条件および強化繊維の材質を変えて、異なる組織の TC 層を持つ熱可塑性複合材料を作成します。組織観察や機械特性の測定を行うことによって、TC 層が熱可塑性複合材料に与える影響について評価します。

ファインメカニクスコース
先端材料強度科学研究センター

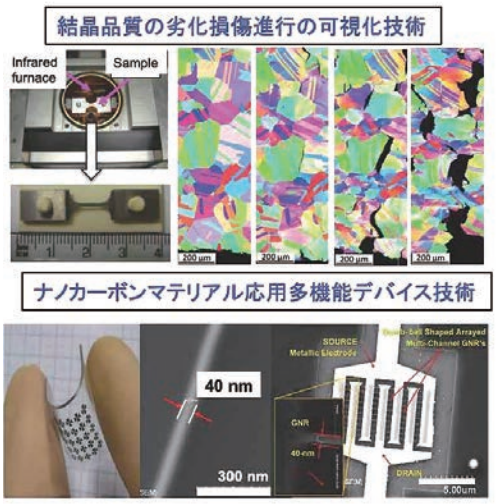
三浦 研究室

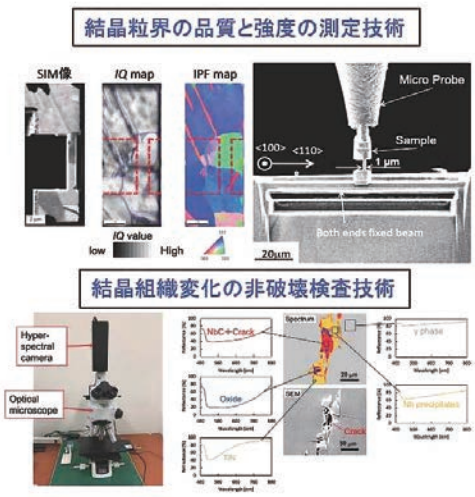
教 授
三浦 英生

教 授(兼)
陳 迎

材料機能・信頼性設計評価研究部門
破壊予知と破壊制御研究分野

http://www.miura.rift.mech.tohoku.ac.jp





先端構造材料と機能デバイスの破壊を予知･制御し防止する設計･評価技術の開発

地球温暖化防止対策のため各種電力システム、航空輸送システムなどで使用される構造機器の稼働環境は高温高速など苛酷化する一方であり、機器の稼働中に生じる構造材料の劣化損傷が加速度的に深刻化する傾向にある。また高度情報化社会、IoT 社会を支える高機能デバイスでは、構造の微細化とともに発熱密度が原子力発電を超えており、材料の劣化損傷の加速による「寿命の低下」が深刻化している。このため、原子レベルで材料の劣化損傷の発生メカニズムを解明し、稼働環境における破壊を防止する方法を確立し、安全安心な社会の実現に貢献するため、1) 原子レベルでの材料結晶組織の分析可視化技術、2) 高信頼材料の設計、製造技術、3) 稼働中の負荷のオンラインモニタリング技術、4) 非破壊検査技術等の開発研究などを推進しています。

原子配列の秩序性に基づく材料の劣化損傷可視化技術の開発

耐熱合金や高機能薄膜材料の機能や性能は材料を構成する原子の配列規則により決定されています。したがって、この原子配列の規則性がくずれると材料の性質は変化します。原子配列状態の変化を、電子線回折法を応用して定量的に可視化する技術の開発を進めています。これにより、使用環境中の材質の劣化を、温度や応力などの環境条件と時間の関数として解明することを目指しています。

高信頼高強度材料や高性能薄膜デバイスの設計、製造技術の開発

材料の劣化損傷は構成原子の異方的な拡散現象に基づき進行することを明らかにしていることから、様々な負荷環境に置ける材料中の原子拡散を抑制する方法を原子レベルシミュレーション技術を応用して提案し、提案材料を試作してその性能や信頼性を評価しています。特に多結晶材料の結晶粒界近傍の原子配列状態を制御することで、耐熱合金や薄膜材料の強度・信頼性を向上させています。

構造機器稼働中実働負荷のオンラインモニタリング技術の開発

各種構造機器や人体のヘルスモニタリングを実現するために、半導体技術やカーボンナノマテリアルを応用したひずみセンサや触覚センサなどの設計と試作評価を進めています。半導体材料の電気抵抗がひずみの作用で数桁も変化する現象を応用し、ナノ、マイクロスケールの超小型・高感度センサを開発し、社会におけるで安全で安心なヒューマンインターフェースの実現を目指しています。

構造機器材料劣化損傷の非破壊検査、モニタリング技術の開発

各種構造機器に使用されている材料の劣化損傷を非破壊で検査する技術の開発を進めている。特に各元素が有する光の反射率の波長依存性に着目し、波長制御光を照射してその反射光のスペクトル変化を分析することで、構造材料表面の組成分布の変化や、特定元素の局所的な偏析や析出を可視化する技術や、マイクロサンプリングによる強度劣化評価技術の開発などを進めています。

ファインメカニクスコース
先端材料強度科学研究センター

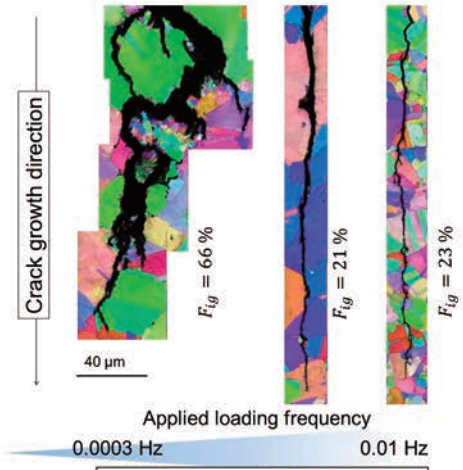
竹田 研究室

准教授
竹田　陽一

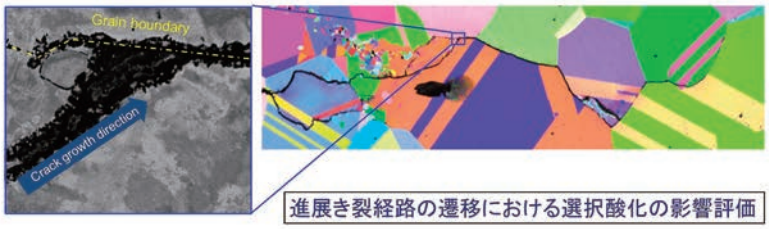
特任准教授
二本柳　保

電力エネルギー未来技術（東北電力）
共同研究部門

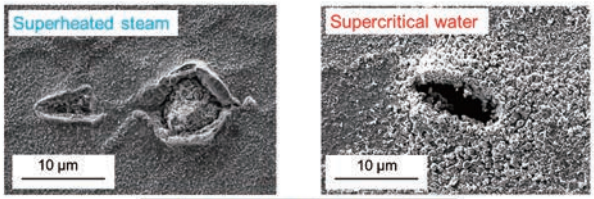
http://www.nakanotakeda.rift.mech.tohoku.ac.jp/



負荷変動下でのき裂経路選択過程



進展き裂経路の遷移における選択酸化の影響評価



超臨界水中特異酸化過程の解明

エネルギー高効率利用のための先端エネルギー利用システムの確立

本部門では、エネルギー変換プラントの安定的な運転のために、過酷環境にさらされる構造材料の劣化問題の解決と余寿命予測法の開発に取り組んでいます。また、再生可能エネルギーとの調和のため、タービンシステムにおいては、随時電気出力を変化させる負荷調整運転が必須となっています。このような運転条件の変化に対応し、既設の蒸気タービンシステムに対しては、高効率・高信頼化を目指し、高温水蒸気環境中における構造材料の劣化挙動の解明を進めています。加えてカーボンニュートラル社会を目指した非化石燃料利用の発電システムや原子力発電においては、耐熱合金と環境雰囲気の相互作用である酸化挙動に着目し、実機相当の雰囲気中試験や表面分析法を活用し、供用中に顕在化される損傷モードの予測やその検出法の開発を進めています。

タービンシステムの高効率化と運用性向上技術

蒸気タービンやガスタービンでは、高温の水蒸気や燃焼ガスにより駆動されています。さらなる環境負荷低減に向けて、高効率化のための高温化も進められています。また、起動停止回数の増加や起動時間の短縮化など、運転の多様化に直面しています。そこで、耐熱材料の高温雰囲気中での負荷変動下での材料劣化メカニズムの解明を通して健全性評価と材料強化機構の検討を行っています。

高温高圧水環境における材料損傷メカニズムに関する研究

プラント供用中の構造材料の損傷予測精度向上のため、プラント部材の表面状態に基づく損傷評価法の開発を最終目的として、割れ萌芽形成期における特異酸化や、合金／酸化皮膜界面の反応の推定を進めています。表面の酸化、割れ潜伏期からき裂形成に至る過程を追跡するための評価法の開発により、き裂発生メカニズムの解明を進めています。

次世代型発電システム確立のための長期信頼性評価

ゼロ・エミッション火力発電の実現のために水素や燃料アンモニアの利用が検討されています。例えばガスタービンでは、燃焼器ノズルは高温高圧の空気と燃料と接しています。また、損傷は部材の製造法やプラントの急速起動などの運転条件の影響を受けることが予想されます。このような実機条件を考慮した高温水素やアンモニア雰囲気でのプラント健全性評価を進めています。

水素製造･貯蔵システムの高効率化と高信頼化

次世代炉である高温ガス炉によるガスタービン発電と水素供給システムの高信頼化のため、高温の冷却材と接する耐熱合金の表面損傷挙動を評価しています。冷却材のガス組成や合金の脱侵炭挙動の評価を通して、寿命消費過程の全容解明を目指しています。また、高温の熱源を利用したカーボンフリー高効率水素製造のための安全評価技術の確立に関わる検討も進めています。

ファインメカニクスコース
ファインメカニクス専攻

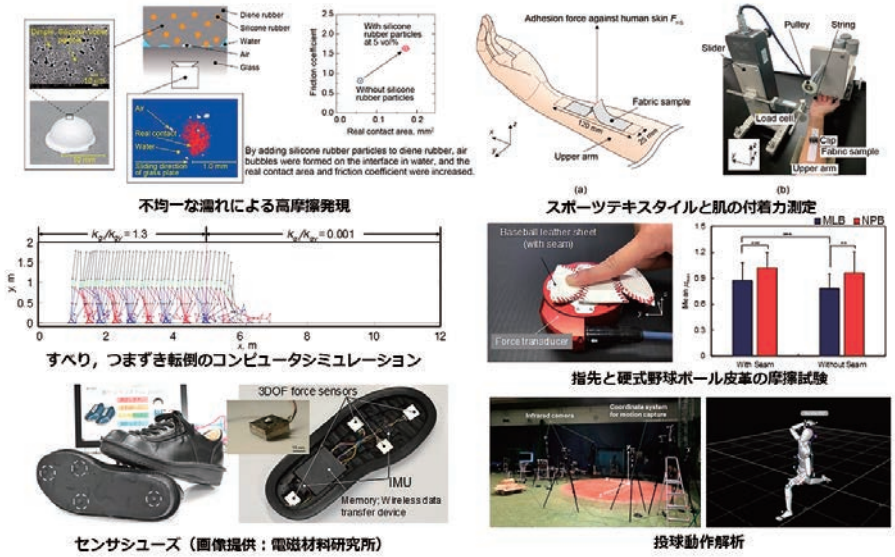
山口・西 研究室

教 授
山口　健

助 教
西　駿明

ナノメカニクス講座
ソフトメカニクス分野

https://web.tohoku.ac.jp/yamaguchi/



ソフトメカニクス&ライフサポート

山口・西研究室ではゴムや生体などのやわらかい材料（ソフトマテリアル）の摩擦制御や人間の運動解析を基盤として、機械システムの健全性・機能向上や人間の運動機能向上に向けた研究に取り組んでいます。これら一連の研究を通してライフサポート分野におけるイノベーションの創出を目指して、国内外の研究機関との分野横断型・異分野融合研究や、研究成果の社会実装のための産学共創にも力を入れています。

ソフトマテリアルのトライボロジー

靴底や自動車タイヤにおいて、ゴム材料の液体中での高摩擦化は長年の課題となっています。当研究室では水中や油中におけるソフトマテリアルの超高摩擦化を目指して、接触面観察技術や超高摩擦意匠、超高摩擦材料の開発に取り組んでいます。また布あるいは不織布などの繊維状構造体と肌の接触における摩擦制御にも取り組んでいます。

すべり･つまずき転倒の防止に関する研究

転倒事故は高齢者の寝たきりや労働災害の主要な原因となっており、解決すべき喫緊の課題です。転倒事故の多くは「すべり」や「つまずき」によって発生しています。当研究室では足底と床面間の摩擦に着目し、安定に歩行するために必要な足底と床面間の摩擦条件を実験的・理論的に解明するとともに、すべりやつまずきによる転倒を防止するための技術開発に取り組んでいます。

ヒューマンダイナミクスとトライボロジー

人間の運動（ヒューマンダイナミクス）と外界との接触・摩擦（トライボロジー）、その知覚との相互作用については、経験的かつ感覚的な理解にとどまっているのが現状です。当研究室では、野球の投球を対象として、ボールと指先間の摩擦の大小とその知覚が動作をどのように変容させ、パフォーマンスや障害にどのような影響を及ぼすのかについて研究を行っています。

産学連携の取り組み

当研究室では産学連携による研究成果の「社会還元・社会実装」に積極的に取り組んでいます。その他の研究内容、研究成果は当研究室 HP をご覧下さい。

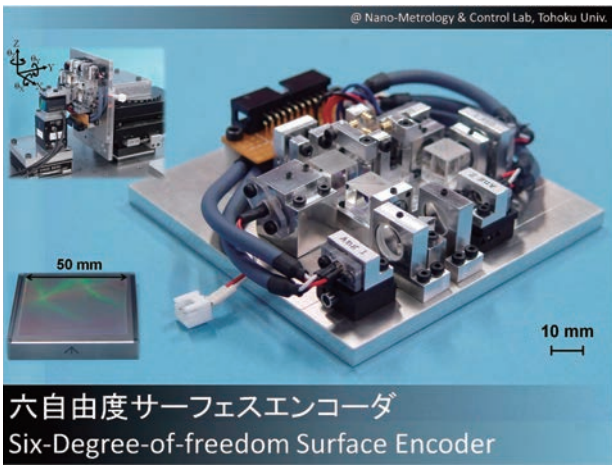
ファインメカニクスコース
ファインメカニクス専攻

高 研究室

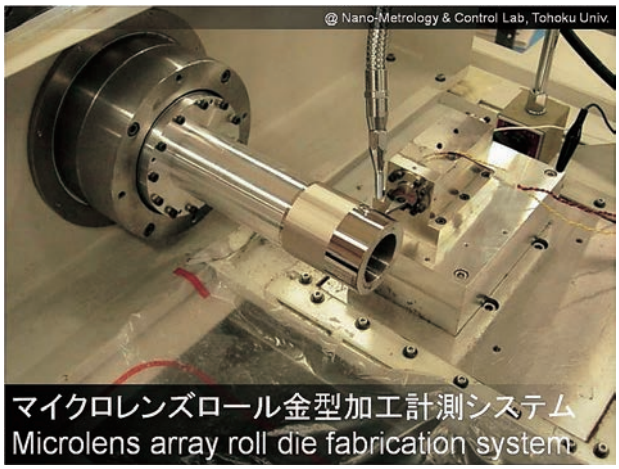
教 授
高 偉

ナノメカニクス講座
精密ナノ計測学分野

http://www.nano.mech.tohoku.ac.jp/



多自由度運動のナノ計測制御



高速工具サーボによる表面微細形状加工・計測

多自由度運動のナノ計測制御

当研究室では、精密加工品の形状及び精密機械の運動を必要な精度で計測するという精密ものづくり計測の研究に取り組んでいる。独自の計測原理に基づき、グレーティングなどの微細格子と波動光学系を組み合わせることによって、超精密ものづくり計測の基本道具となる高精度かつコンパクトな多軸変位、角度センサ（サーフェスエンコーダシステム）を提案してきた。本システムでは、回折光干渉型３軸変位センサとオートコリメーション法を原理とする３軸角度センサを組み合わせることで、１つのレーザープローブで、平面ステージの超精密位置決めに利用可能な最大６自由度の位置･姿勢検出を可能としている。また、これを並進および回転姿勢変化の多自由度を有するサーフェスモータステージと組み合わせ、簡便な構成で多自由度の位置・姿勢を制御可能なステージシステムの研究も行っている。

三次元微細形状測定のための走査型静電気力顕微鏡（SEFM）に関する研究

本研究では三次元微細形状測定のための非接触静電気力顕微鏡を提案し、その開発を行っている。水晶振動子に接着した探針と試料表面との間に働く静電気力を測定しながら試料表面を非接触で倣い走査する。50 nm 以上の探針・試料間距離を維持する完全非接触走査で、静電気力に影響を与える試料表面電荷分布等のパラメータをキャンセルしつつ探針・試料間の絶対距離を算出できる。

力センサ組み込み型高速工具サーボによる表面微細形状の加工･計測

３次元微細形状は、計測基準面、マイクロレンズアレイなど様々な分野において用いられている。本研究では、高速工具サーボ（FTS）と超精密旋盤を用いたダイヤモンド切削による３次元微細形状創成法を検討している。FTS に組み込んだ力センサからの出力をもとに、加工工具自身を測定プローブとして用い、加工ワーク形状プロファイルのオンマシン計測に用いる手法を提案している。

感度安定化角度センサの研究

レーザーオートコリメーション法を原理とする光学式角度センサは光スポット径が光源の光周波数ゆらぎに従い変動するため、長時間の角度計測の場合にはセンサ感度が安定しないという欠点があった。本研究ではフェムト秒レーザを光源とし、その周波数スペクトルである光コムの性質を利用してセンサ感度を安定化させることを目的とした角度センサの開発を行っている。

大型ロール旋盤の精密測定に関する研究

大型ロール金型を用いた大面積微細形状加工への需要が増加しており、金型を加工する大型ロール旋盤の加工機スライドには高い運動精度が要求される。本研究では、２本の静電容量型変位センサを用いることで、大型ロール旋盤の駆動スライドの真直度誤差及び平行度誤差をロール金型形状誤差と分離した形で評価するシステム及びアルゴリズムを提案している。

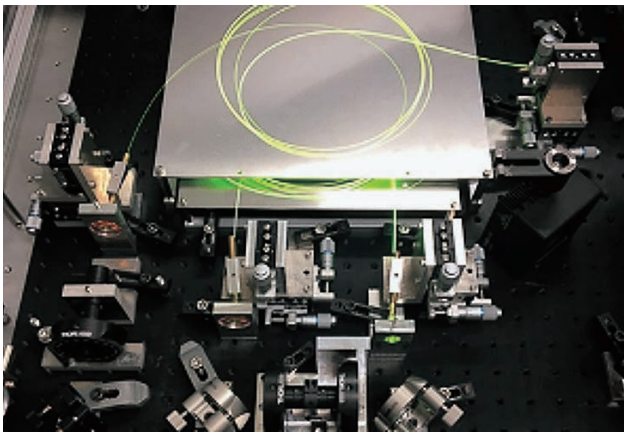
ファインメカニクスコース
ファインメカニクス専攻

准教授
松隈　啓

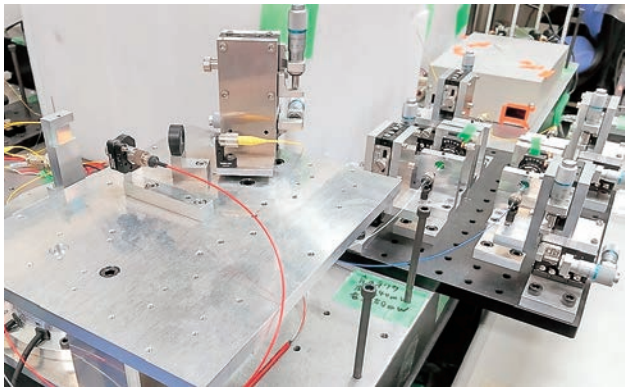
松隈 研究室

ナノメカニクス講座
精密ナノ計測学分野

http://web.tohoku.ac.jp/nanometrology/



中赤外ファイバーレーザーシステム



運動計測光センサ光学系

先進レーザー光によるものづくりのための計測技術の開拓

測れないものは作れない、という言葉があります。これは、測定ができるということがものづくりの根幹であることを示しています。半導体などの益々精密になるナノメートル精度製品の生産や、新しい材料の物性評価などを実現するために、計測学が重要な役割を果たしてきました。こういった物体の動きや形状を測定するためには、計測原理が必要であり、またそれを実現する測定装置・センサが必要です。

私たちの研究室では、これまで誰もできなかった測定に挑戦するために、新しい測定原理を創出し、それを深化させる研究を行っています。また、そのために必要な超短パルスレーザーや光周波数コム、中赤外線レーザーといった先進的なレーザー光源や、2軸スケール回折格子などの計測のために必要な道具を自らの手で設計・製作する方法についても研究し、これらを応用した測定にも挑戦しています。

光周波数コムによる運動および形状計測用センサ

近年、光周波数コムと呼ばれる周波数を精密に制御したレーザーを用いた光計測が盛んに行われています。私たちは、光周波数コムの精密な周波数を利用して、物体の運動および形状を桁違いに正確に測定する方法を研究しています。最近では、光周波数コムを2台用いたデュアルコム分光法に取り組み、極めて正確な角度の計測法の創出について研究しています。

中赤外線レーザーによる粗面の角度運動計測センサ

リニアガイドのような直線運動を行う装置の運動誤差（曲がって動いていないか）を測定するために、物体の回転運動を測定する装置が必要になります。従来、平滑面に対して可視光レーザーを用いた角度測定装置が用いられてきました。私たちは平滑面が得られない状況でも測定が可能となるよう、粗面を測定対象として可視光より波長の長い中赤外線レーザーによる測定センサを研究しています。

レーザー加工法の開拓

レーザー加工は従来の機械加工法では困難であった様々な加工を実現しています。例えば機械加工法では困難な難削材の加工、レーザーの高いエネルギー密度を利用したピンポイントの高効率加工などが挙げられます。私たちは干渉リソグラフィ法による微細形状形成や、透明加工材料の高能率加工、はっ水加工や導波路形成などの機能性表面・デバイスを付与するための加工を行っています。

レーザー光源の研究･開発

レーザー光は計測・加工に対して非常に有効であり、新しいレーザー光源が普及すると新たな学術分野・工学応用に広げられます。新しいレーザー光源を作る際のパラメータは光の波長、パルス幅、光エネルギー、偏光状態などがあり、これらの中から実現可能かつ応用範囲の広そうなレーザー光源の開発に挑戦しています。上記の研究の多くは、開発・設計したレーザー光源を用いて行っています。

ファインメカニクスコース
ファインメカニクス専攻

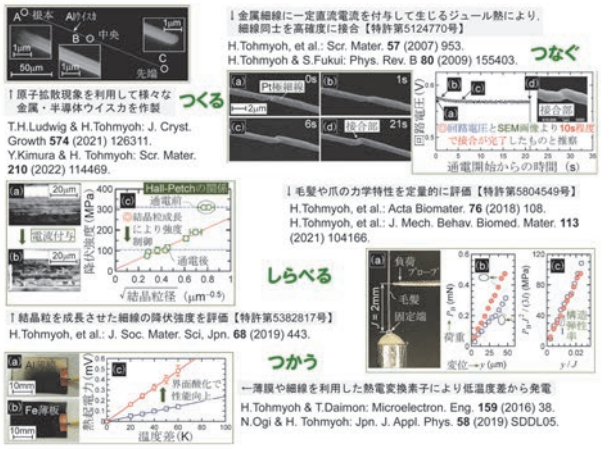
燈明・木村 研究室

教 授
燈明 泰成

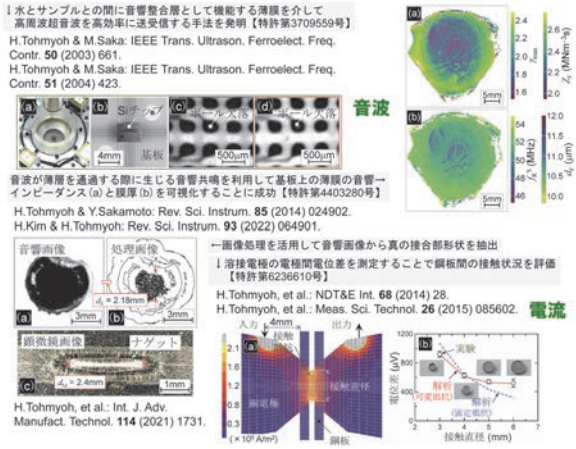
助 教
木村 由斉

ナノメカニクス講座
材料システム評価学分野

https://web.tohoku.ac.jp/tohmyoh/index.html



微細な材料をつくる・つなぐ・しらべる・つかう



音波や電流を利用した材料システムの先進評価

新しい材料システムを創るために～微細な材料をつくる･つなぐ･しらべる･つかう～

本研究室では学際的なアプローチにより新しい材料システムを創出するための研究を行っている。具体的に、優れた物理的諸特性と幾何学的特徴を有する微細材料を活用するための周辺技術に係る一貫した研究（材料をつくる･つなぐ･しらべる･つかう）を展開している（図1）。微細な材料同士の接触部に一定直流電流を付与した際、接触部がジュール熱により局所的に溶融する現象を支配する因子を発見して材料同士を高確度に接合可能にしている。また原子拡散現象を利用して作製した金属／半導体ウイスカ等の力学特性を評価してこれを制御、あるいは電気特性を評価してこれを活用したセンサを開発している。微細材料に関する独自の実験技術を駆使して毛髪や爪の研究も展開している。さらに次世代材料システムの性能と信頼性の鍵を握る接合界面や薄層を音波や電流を用いて検査する手法を開発している。

微細材料の力学／電気特性評価とその活用

微細材料を有効に活用するためにはその物理的諸特性を正確に把握する必要がある。極微小力を計測する荷重センサを開発して微細材料の力学特性を評価すると共に、ジュール熱により材料の結晶粒を成長させてその強度を制御することに成功している。また表面にナノワイヤを有する薄膜の電気特性を評価すると共に、その特性を活用して溶液の濃度を高感度に検知する液体センサを開発している。

毛髪や爪の力学特性評価と形状の理解

日々成長する毛髪や爪の物理的諸特性や形状には様々な分野で活用できると期待される有益な情報が含まれている。多層構造を有する毛髪や爪の外形寸法に依らない引張や曲げに対する変形能を表す構造弾性率を提案し、シャンプー・コンディショナー処理やマニキュア塗布が毛髪や爪の変形能に及ぼす影響を評価することに成功している。また毛髪の形状を決定づける因子の解明に取り組んでいる。

薄板や細線を利用した熱電変換素子の作製

鉄薄板の表面にアルミニウム薄膜を蒸着して異種金属界面を形成することで、薄板の長手方向の温度勾配に起因して起電力が生じる薄板型熱電変換素子を開発している。また身の回りの温度差を有効に活用すべく、鉄薄板の表面を酸化する、あるいは素子を積層する等して高出力化を図っている。さらに同様の原理に基づく熱電変換マイクロワイヤを作製し、極微小領域の温度計測を可能にしている。

音波や電流を利用した材料システムの先進非破壊評価

水と被検査物との間に薄膜を介して高周波数超音波を伝達するドライ超音波法を開発し、これにより電子部品の水非接触下における高分解能内部可視化に成功している（図2）。また当該超音波伝達系で生じる音響共鳴を利用した映像法を開発し、各種薄膜の物性値や膜厚を可視化することに成功している。さらに音波や電流を利用して材料システムの要である接合部を評価する手法を開発している。

ファインメカニクスコース
ファインメカニクス専攻

白須 研究室

准教授
白須　圭一

ナノメカニクス講座
材料システム評価学分野
https://web.tohoku.ac.jp/tohmyoh/index.html

グリーンマテリアルシステム創成のための研究開発スキーム

熱可塑性樹脂を活用したグリーンマテリアルシステムの創成

本研究室では、カーボンニュートラル実現に向けて熱可塑性樹脂あるいは炭素繊維やナノフィラーを含有した熱可塑性樹脂複合材料を活用したグリーンマテリアルシステムの創成に向けた研究開発を行っている。例えば、3D 積層造形による付加製造や異種材料への直接接合を進めることで、切削・接合工程の削減が可能となる。また、接着剤による接合は、機械的締結のための穿孔加工や締結作業の削減に寄与するだけでなく、金属ファスナー削減による軽量化で CO_2 排出量削減にも貢献するものであり、今後さらなる接着剤用ポリマーの高性能化や接着界面の改質、接着メカニズムの解明が求められる。今後は素材のリサイクルを考慮した材料設計も重要であり、複合材料のカスケードリサイクル、熱可塑性樹脂の溶融・固化による材料劣化挙動の理解や生分解性プラスチックの利用も視野に入れた研究を進める。

材料合成･成形/実験評価/シミュレーションのエコサイクルを循環させた研究開発スキーム

本研究室では、①樹脂合成、複合材料の成形・3D 積層造形などの材料合成・成形と②引張試験・界面破壊靭性試験、熱分析、構造観察などの実験評価を基盤としながら、③有限要素解析、分子動力学シミュレーションなどの解析も援用した研究開発エコサイクルを循環させることで、効率的な新材料の開発や構造・変形・破壊挙動の解明に関する研究を推進している。

3次元積層造形による熱可塑性複合材料/金属の異種材料接合技術開発とメゾスケール界面強度評価

近年、熱溶解積層（FFF）方式の 3D プリンタを用いた複合材料の造形技術が開発され、高強度・高剛性な複合材料を低コスト、短時間で自動的に立体造形できるようになってきている。本研究では、金属基板上に熱可塑性樹脂複合材料を直接造形したマルチマテリアル材料を開発し、接合界面のモード I、II 破壊靭性およびラップシェア強度を実験・有限要素解析の双方から評価を行う。

相分離系ポリマーアロイの材料特性評価･先端構造計測･分子構造モデリング

ポリマーアロイは、エポキシ樹脂などの熱硬化性樹脂の低靭性を改善するために熱可塑性樹脂をブレンドした言わば熱硬化性樹脂 / 熱可塑性樹脂複合材料である。本研究では、相分離系ポリマーアロイのネットワーク構造および各種材料特性の発現メカニズムを電子顕微鏡や分光分析による先端計測と分子動力学シミュレーションによる分子構造モデリングにより解明することを目指す。

熱可塑性樹脂複合材料の高効率リサイクルに向けた溶融･固化サイクルに伴う母材樹脂劣化挙動評価

熱可塑性樹脂やその複合材料は、再成形、低コスト製造が可能かつ低環境負荷であるサステナブル素材として近年注目を集めている。グリーンマテリアルシステム創成のためには、成形条件の影響や、溶融・固化過程における樹脂の構造・特性の変化を十分に理解する必要がある。本研究では、熱可塑性樹脂や複合材料の溶融・再固化サイクルを経ることによる構造・特性の変化の解明に取り組む。

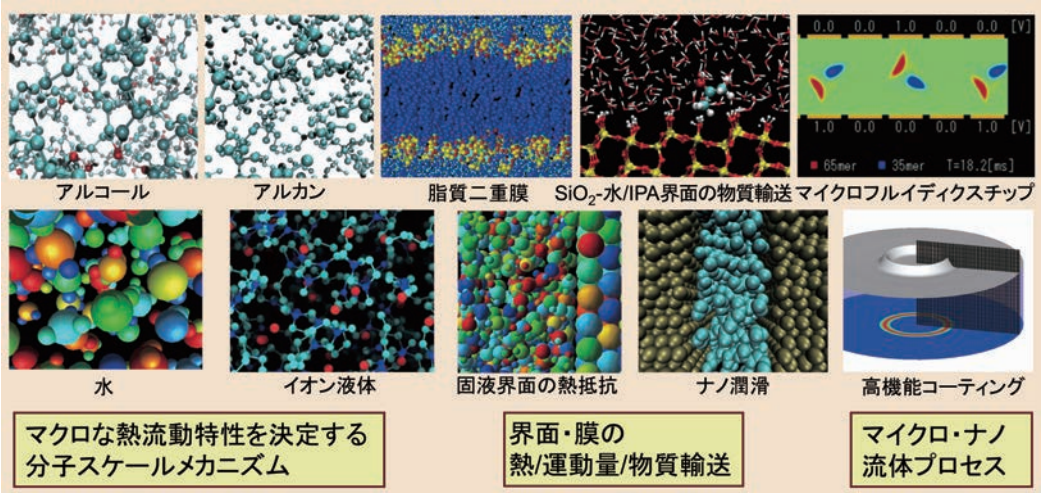
ファインメカニクスコース
流体科学研究所

小原・Surblys 研究室

教　授
小原　拓

助　教
Donatas SURBLYS

協力講座
分子熱流動研究分野
https://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/research/dv_nfrd/mhtl



分子熱流体工学

流体が示す熱・運動量・物質の輸送特性を、物性値や界面特性などのマクロな概念を越えて理解することは、近年のナノテクロノジーにおいて問題となる微細スケールにおける熱流動現象を理解するだけでなく、マクロな熱流動特性を決定する分子スケールのメカニズムを知って希望の特性をもつ流体や界面を設計することにつながる重要なステップである。液体・ソフトマターやこれらと固体壁面との干渉を主な研究対象として、熱伝導率や粘性などマクロ熱流体物性、輸送物性の異方性、固液界面の熱抵抗や物質輸送など、現象の解明と問題解決に取り組んでいる。これらの実践を通じて、ミクロ・マクロな熱流動特性を分子運動で表現するための学理と分子動力学シミュレーションとを主な道具に用い、物理化学的手法を機械工学における熱流体研究に組み入れた新しい体系の構築をめざす。

流体の構造と熱・運動量の分子スケール輸送特性

液体中には様々な構造が存在し、その動特性が液体中の熱・運動量・物質輸送現象を支配している。液体構造の輸送特性を解析することにより、なぜその液体の輸送物性値はその値なのか、希望の輸送物性をもつ流体はどのような分子構造をもっているべきか、などの疑問を解明する。また、脂質二重膜などソフトマターの構造と非等方性輸送現象を解析し、新しい材料としての応用をめざす。

固液界面における熱・物質輸送特性

固体・液体が接する界面における熱・物質輸送現象は、NEMS や多孔質体など微細構造系の総括的特性を支配している。また、半導体製造工程のウェットプロセスなど微細加工では、製品の成否を決定する鍵となっている。界面近傍の液体中に発現する特異な構造や、固体分子ー液体分子間のエネルギーの伝搬を解析する分子動力学シミュレーションにより、現象のメカニズムを解明している。

液体分子の熱エネルギー伝搬特性データに基づく熱媒流体の設計

エネルギーの高効率利用や熱機器の高機能化において、熱媒流体は大きな役割をもつ。分子を構成する様々な官能基など原子群がなす力学的エネルギー伝搬への寄与を解析し、それらが集積して発現する熱エネルギー伝搬特性のデータに基づいて、様々な使用条件に対して最適な熱媒を実現する分子を予測する。これにより、流体や熱流動現象の設計法を確立する。

高機能コーティング

コーティングは、気液・固液の界面現象とマイクロ・ナノスケールの流動現象が連成した複雑な応用技術である。半導体製造過程のレジスト塗布など、分子スケール膜厚のコーティングに要求される条件はますます厳しくなる一方、塗布膜分子の配向制御や塗布分子の吸着脱離を制御するダイナミックコーティングなど、新しい課題も出現している。分子熱流動解析の応用によりこれらを解決する。

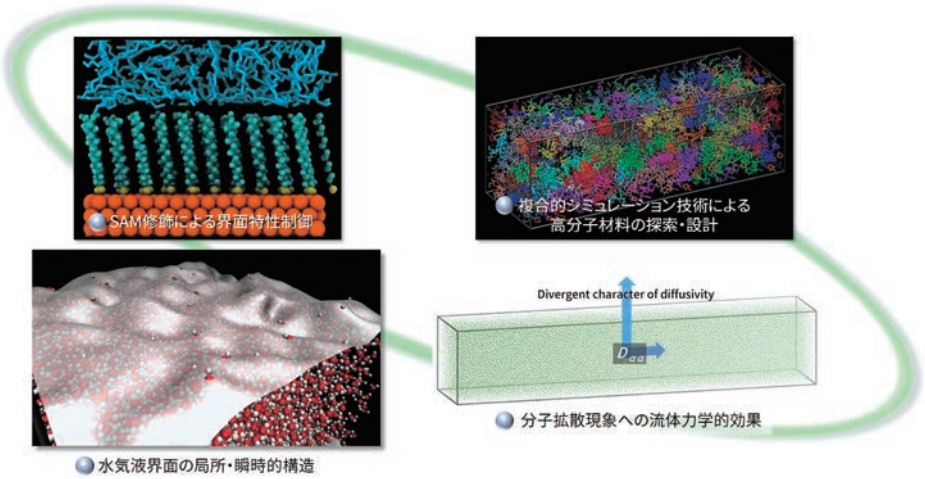
ファインメカニクスコース
流体科学研究所

准教授
菊川　豪太

菊川 研究室

協力講座
分子複合系流動研究分野

http://www.ifs.tohoku.ac.jp/mht/



分子シミュレーションを用いた
分子複合システムの解析

複合的なシミュレーション技術を用いた分子熱流体現象の解明

ナノスケールからマクロスケールに渡る多くの工業・産業プロセスにおいては、分子レベルの物理が複合的に関与する熱流動現象が数多く見られる。特に、デバイス表面での放熱性能の向上による次世代半導体デバイスの限界性能向上、熱流動特性や機械特性の最適化による新規高分子素材の探索・設計には、界面での熱流動特性や不均質媒体における分子スケール構造と輸送特性の相関など、複合的な視点での現象理解が不可欠となっている。そこで、分子動力学法をはじめとした大規模数値シミュレーションにより、熱流体工学におけるミクロスケールの熱・物質輸送現象およびマクロな熱流体物性を支配するミクロスケールメカニズムの解明を目指して研究を行っている。また、複数のスケールに渡る数値解析技法の統合によってマルチスケール性を有する熱流動現象の解析を目標としている。

有機分子膜による表面修飾の研究

自己組織化単分子膜（SAM）をはじめとした有機分子による表面修飾技術は、固体表面の物理化学的特性を制御する技術として、種々のプロセスやデバイスへの応用が進んでいる。有機分子薄膜の自己組織化や自発的構造形成を利用したボトムアップの表面修飾技術によって、特異な界面特性を得ることができる。これら界面の界面親和性や界面を介した熱・物質輸送特性を明らかにしている。

高分子材料の熱流動特性

産業的にも広く利用が進んでいる高分子材料の開発には、内部の分子スケール構造や相分離構造の制御によって、力学的・化学的特性のみならず熱流動特性を設計することが必要とされている。分子スケールからマクロスケールに至るスケール複合的な解析手法やデータ科学の技術を駆使して、有用な熱流動特性や機械特性を有する高分子材料の探索・設計を目指している。

不均質媒体/制限空間内の流体における輸送現象

流体やソフトマター界面、ナノスケール構造によって形成される制限空間内の閉じ込め液体においては、界面近傍における液体中の不均質（ヘテロ）な構造発現に伴い、特異な熱・物質輸送特性が現れる。本研究を通じて、均質なバルク液体中と大きく異なる閉じ込め液体の分子輸送特性を明らかにし、それらに基づくマクロな熱流体解析への橋渡しとなる物理モデルの構築を目指している。

分子拡散現象に対する流体力学的効果の解明

分子拡散現象は、多孔質体やナノ細孔、生体高分子を介した物質移動などナノ・バイオ工学レベルで広く重要な要素となっている。これらミクロスケールの拡散現象においては、流体力学的効果によって分子ダイナミクスが強く影響を受けることが明らかになっている。ヘテロな構造における輸送現象の本質的理解を目指し、流体力学と分子動力学の融合的な研究を行っている。

ファインメカニクスコース
流体科学研究所

徳増・馬渕・上根 研究室

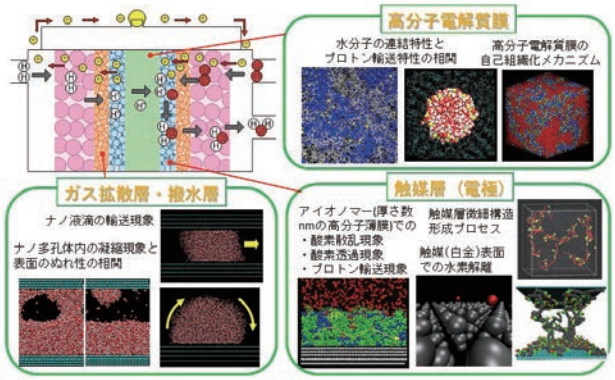
教　授
徳増　崇

（兼）助　教
馬渕　拓哉
（学際科学フロンティア研究所）

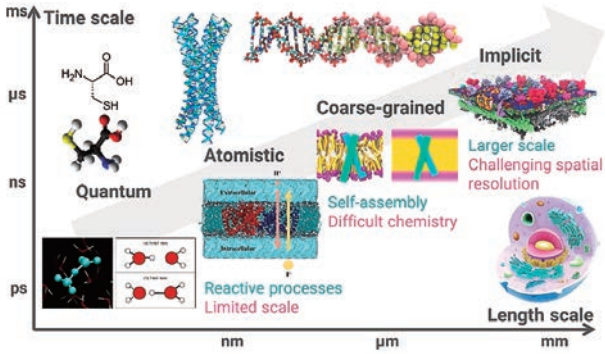
特任助教
上根　直也

ナノ流動学講座
量子ナノ流動システム研究分野

http://www.ifs.tohoku.ac.jp/nanoint/jpn/index.html



燃料電池内部の様々な場所で見られる物質輸送現象の分子動力学シミュレーション



生体分子のマルチスケールシミュレーション

物質の量子性が影響する分子スケール熱流動現象の解明と次世代電池開発への応用

原子・分子スケールの熱流動現象を考えるとき、原子・分子の持つ「量子性」が流れの特性に影響を及ぼすことがしばしば見受けられます。たとえば水素は分子の質量が軽いため位置と速度の不確定性が大きく、この影響により熱流動現象の数値予測が困難になることが知られています。また水素イオン（プロトン）の移動には結合の解離や再結合を伴う移動機構が発現し、そのため水分子よりも遙かに速い速度で液体・固体内を拡散します。化石燃料に変わるエネルギー源として重要な水素関連機器や電池を設計する際にはこのような現象を考慮して機器内部で生じる熱流動現象を解析する必要があります。当研究室では流体分子の「量子性」が熱流動現象に影響を及ぼす系を対象にして、その量子効果を取り込んだ様々な手法を用いてその性質を解明し、工学的に応用することを目的として研究を行っています。

固体高分子形燃料電池内部の反応物質輸送現象に関する研究

固体高分子形燃料電池は水素と酸素を反応させて電気を取り出す装置で、次世代のエネルギー源として期待されています。この燃料電池の発電効率を向上させるには反応物質（プロトン、酸素）をいかに速く流すかが重要になります。当研究室では、燃料電池内部の物質の動きを大規模分子動力学シミュレーションにより解析し、その特徴や性質をとらえることを目的として研究を行っています。

全固体Liイオン電池内部のLiイオン輸送現象に関する研究

現在のLiイオン電池の電解液を固体電解質に置き換えた全固体Liイオン電池は、次世代の二次電池として期待されています。当研究室では、この固体電解質内部やLiイオンを蓄える活物質内部でのLiイオンの輸送現象を分子動力学シミュレーションにより解析することで、イオン伝導性の高い材料や電池内部のナノスケール構造の特徴を捉えることを目的として研究を行っています。

生体分子システム内におけるタンパク質の液液相分離現象およびイオン透過現象に関する研究

生体分子システムで起きている幅広い時空間スケールの動的性質を解析するためには、時空間スケールの異なる計算手法を組み合わせたマルチスケールシミュレーション技術が重要です。量子化学計算や反応MDを用いたnmスケールのイオン輸送現象から粗視化MDを用いたμmスケールのタンパク質高次構造（液液相分離構造）形成現象までマルチスケールの動的現象に興味を持っています。

原子層堆積法および化学気相堆積法における成膜メカニズムの分子動力学的研究

半導体製造において、成膜プロセスは膜厚誤差±0.5Åという原子層レベルの制御が求められています。このような最先端の需要を実現可能な成膜手法として化学気相堆積法および原子層堆積法が広く利用されています。そのため本研究では、拡散現象および反応現象を融合した反応性力場分子動力学シミュレーションを実施し、成膜メカニズムの普遍的な理解を目指しています。

機械システムコース
流体科学研究所

遠藤 研究室

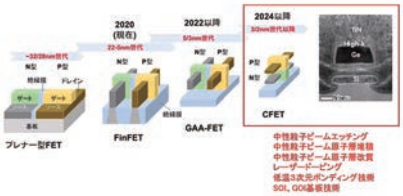
教 授
遠藤 和彦

特任教授
寒川 誠二

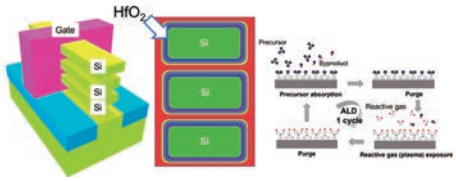
特任助教
大堀 大介

グリーンナノテクノロジー研究分野

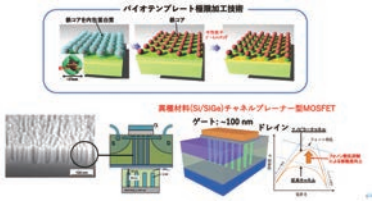
https://www.ifs.tohoku.ac.jp/gnt/endo/



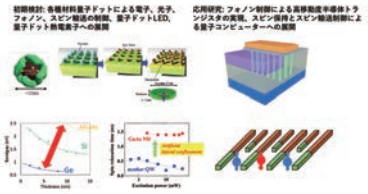
Si/Ge 異種チャネル集積プラットフォームの構築



ナノデバイスのための原子層堆積制御技術



フォノン場制御を用いた高移動度半導体素子


バイオテンプレート極限加工による設計制御可能な量子ドット作製技術

超低損傷プロセスによる革新的グリーンナノデバイス開発

次世代ナノスケールデバイスにおける高精度ナノプロセスを目指し、プラズマプロセス、ビームプロセスや原子操作プロセスにおける活性種（電子、正負イオン、原子・分子、ラジカル、フォトン）と物質との相互作用（エッチング、薄膜堆積、表面改質）に関する研究や、これら原子分子プロセスに基づいた先端バイオテンプレート極限加工技術に関する研究を進めています。さらに、実験と計算（シミュレーション）を融合し、原子層レベルの制御を実現できるインテリジェント・ナノプロセスの構築を目指しています。

2nm世代向けの Si/Ge異種チャネル集積プラットフォームの構築

中性粒子ビーム無欠陥原子・分子レベルの高精度ナノ加工技術によって、2nm 世代向けの Si/Ge 異種チャネルプラットフォームを、日本 - 台湾間で構築しました。中性粒子ビームと最先端の半導体プロセスを組み合わせることで、集積回路の３次元化による高集積化により、大幅な集積化とデバイスの高速化を目指して研究を行っています。

ナノデバイスのための原子層堆積制御技術

微細なナノデバイスや複雑な立体構造に薄膜を堆積するための原子層堆積制御技の研究を行っています。新規の原子層プロセスのための原料とダメージレス酸化技術を組み合わせて、ナノデバイスのための高誘電率ゲート絶縁膜の堆積技術に関する研究を行っています。

無欠陥ナノ周期構造による フォノン場制御を用いた高移動度半導体素子

バイオテンプレート技術と無損傷中性粒子ビーム技術の融合によるバイオテンプレート極限加工技術を提案しました。この手法を用いて、高密度・無欠陥・規則的なナノアレイ構造の形成に成功しています。この手法を使って、フォノン場（熱）を制御したトランジスタの作製を目指しています。

バイオテンプレート極限加工による 設計制御可能な量子ドット作製技術

バイオテンプレート極限加工技術を用いて、量子ドット構造を作製することができます。サブ 10nm で構造を制御することが可能な加工技術を用いて、電子や光の振る舞いを制御してきました。これらの基盤技術を応用することで、スピン保持とスピン輸送制御による量子コンピュータへと展開していく研究を行っています。

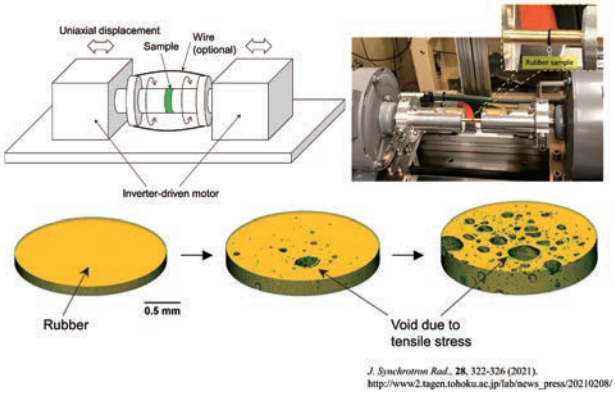
ファインメカニクスコース
国際放射光イノベーション・スマート研究センター

矢代 研究室

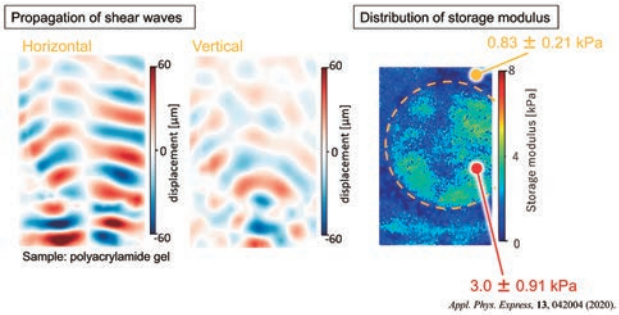
教 授
矢代 航

協力講座
表面物理プロセス研究分野

http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/yashiro/html/



Real-time 4D observation of rubber tensile fracture process (10 ms temporal resolution)



X-ray elestography by visualizing propagating shear waves

4D世界のフロンティアを拓く

私たちは三次元（3D）＋時間という「4D の世界」に生きていますが、μ m 以下かつ ms 以下の 4D 時空間領域には、最先端の計測テクノロジーでもアクセスできない広大な未知の世界が拡がっています。本研究室では、X 線などの高エネルギービームの量子性と、先端的なマイクロ・ナノファブリケーション技術、データサイエンス技術を駆使することで、従来の限界を超える新たなイメージング技術を開発し、未開の 4D 世界の開拓に挑んでいます。

本研究室で開発しているイメージング技術は、物質・生命科学における様々な非可逆・非平衡系（例えば、流動性のある材料や、生きた生物など）の新たな理解につながるだけでなく、持続可能社会の実現に向けた材料・マイクロマシンシステム開発や、病変の早期発見につながる医療診断機器の開発など、一般社会にも多様な波及効果を生むと期待しています。

ミリ秒時間分解能4DX線トモグラフィの開発・応用

世界に先駆けて、ミリ秒時間分解能の X 線トモグラフィ（CT）に成功しています。最近は、シンクロトロン放射光をマルチビーム化する光学素子を開発し、圧縮センシングと呼ばれるデータサイエンス技術を駆使して、試料を回転することなく 1 ミリ秒で X 線 CT が実現できることも実証しています。本技術の高度化とその応用により、未知の 4D 時空間領域の開拓を目指しています。

X線エラストグラフィの開発 —ソフトマテリアル内部の「硬さ」の4D可視化—

X 線イメージングにより試料内部の弾性率の分布を三次元的に（さらには 4D で）高空間分解能で可視化する技術の開発を行っています。例えば、生体内の弾性率の分布を可視化することにより病変を検出する医療診断機器の開発や、機能性ソフトマテリアルのダイナミクス研究への応用など、様々な波及効果が期待されています。

マイクロ・ナノファブリケーション技術による X線・中性子のための光学素子の開発

先端的なマイクロ・ナノファブリケーション技術により、従来の限界を超える X 線イメージング（あるいは中性子イメージング）を実現するための光学素子（高アスペクト比 X 線・中性子光学素子）の開発を行っています。物質・材料研究だけでなく、医療診断機器や天文衛生の開発など、様々な分野への波及効果が期待されます。

新たなモダリティの開拓

X 線による表面・界面構造解析と、先端的な X 線干渉計による（X 線の位相を利用した）X 線イメージング技術の融合により、表面・界面の構造パラメータの空間分布を可視化するなど、量子現象を利用した新たなモダリティの開拓にも挑戦しています。究極的には「X 線無被曝イメージング」のような夢のテクノロジーの開発も目指しています。

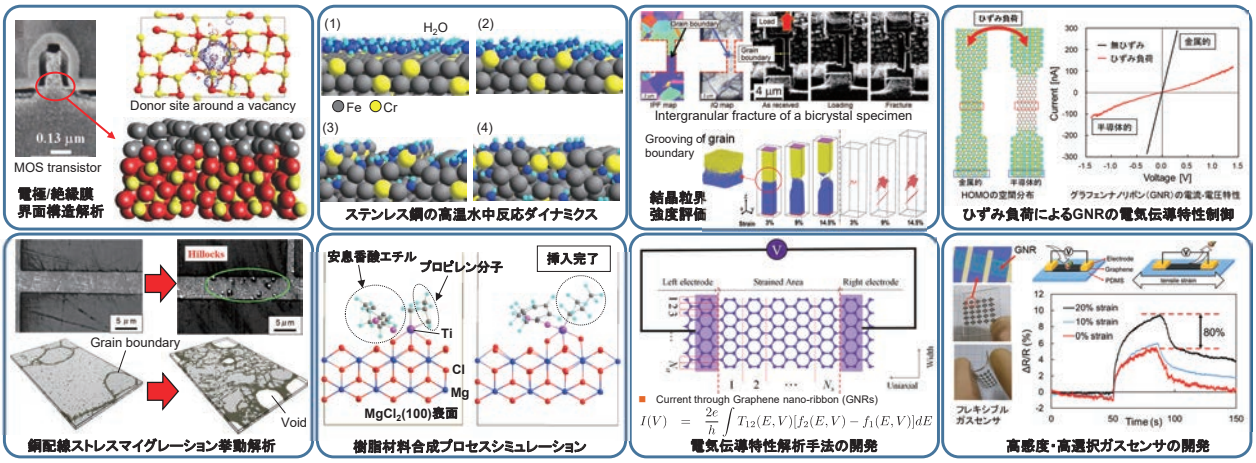
ファインメカニクスコース
グリーンクロステック研究センター

鈴木 研究室

教 授
鈴木 研

客員准教授
王 蕾

ソフト・機能マテリアル研究部門
材料機能信頼性設計学分野



原子レベルシミュレーションを活用した材料機能・信頼性設計

原子レベルシミュレーションによる材料特性評価と信頼性設計

持続発展可能な社会の実現に向けて、ナノスケールの電子デバイスから発電プラントのような巨大構造体に至るまで、各種機器の高機能、高性能、長寿命化が求められています。これまで新材料の開発や複合化などにより機器の高機能、高性能化が実現されてきましたが、その反面、材料システムは複雑化し、材料組織の不均一性や不安定性は増大する傾向にあります。さらに、資源循環型社会の実現のためには、新たな天然資源投入量を削減するため再生材原材料を用いた製品開発を実践する必要がありますが、再生材の品質ばらつきに起因した特性ばらつきや不良の発生が懸念されています。そこで、原子レベルシミュレーションを活用し、多種多様な材料の機能信頼性発現メカニズムを材料、環境、力学の相互作用の観点から明らかにし、組織の健全性に基づく高機能・高信頼材料の設計開発研究を推進します。

原子レベルシミュレーションによる材料機能設計

次世代材料システムの高性能化と長期信頼性向上を目的とし、量子力学に基づく原子レベルシミュレーションを用いて、ひずみ（応力）、組成、構造、環境の相互作用による材料組織および物性変動メカニズムの解明と、その支配因子に基づいた材料設計を実践しています。設計された組成や構造に対して試作評価を行い、理論と実験の両輪からなる材料設計・開発技術の確立を目指します。

材料組織、物性変動メカニズム評価手法の開発

今後予想される材料システムの多元素化、複雑化に対応するため、界面や粒界構造、組成、雰囲気、電場などが複雑に絡み合ったマルチフィジックス現象プロセスを解析可能な量子分子動力学シミュレータの開発に取り組んでいます。ナノ・マイクロオーダーの材料を試作し、界面組織変化や物性変動現象に対するシミュレーション結果と比較することで手法の精度、信頼性の向上を目指します。

ケミカルリサイクルのための化学反応シミュレーション

カーボンニュートラル社会や循環経済の実現に向けてプラスチック資源循環の取り組みが加速しています。廃プラスチックを新規材料と遜色ない品質で再生するには、ガス化、モノマー化、油化などケミカルリサイクルプロセスにおける複雑な化学反応を理解し、処理能力を高めていく必要があります。そこで、量子分子動力学法を用いて合成反応プロセスや分解反応機構の解析を行っています。

カーボンナノマテリアル応用実時間ヘルスモニタリングデバイスの開発

グラフェンをナノスケールのリボン形状に加工したグラフェンナノリボンは、構造に歪みを作用させることでその電子物性を半導体から金属まで可変制御することが可能です。この特性を利用した発電素子やガスセンサ、触覚センサなど様々なデバイスを開発し、少子高齢化社会において不可欠な実時間ヘルスモニタリングを実現するウエアラブルデバイスの実現を目指した研究を行っています。