2024

京都大学工学部 物理工学科 研究内容紹介



機械システム学コース P1~28 材料科学コース P29~41 エネルギー応用工学コース P42~53 原子核工学コース P54~66 宇宙基礎工学コース P67~74

物理工学科の理念と目標

物理に関連する知見を基に、機械システム、 材料、エネルギー、宇宙空間活動、などに 関する新しい科学技術の研究開発を行うた めの基礎的な教育の場を提供し、専門的能 力と広い視野を持つ人材を育成する。



- ・社会が必要とする優れた人材の養成に努力
- 新しい技術の創造のために、その基礎となる学問
 を講義

情報学 研究科 (一部)		エ 学 研 究 科				エネルギー
		機械理工学 専 攻	マイクロエンジ ニアリング専攻	航空宇宙 材料 工学専攻 専	斗工学 原子核工 政 専	学科学研究科 攻 (一部)
コ ス	機机	¢システム学 □ − ス 105名	宇宙基礎工学 コース 20名	材料科学 コース 55名	原 子 核 エ 学 コ ー ス 20名	エネルキ [・] −応用工学 コース 35名
第 4 学		特別研究	特別研究	特別研究	特別研究	特別研究
子 年		専門科目	專門科目	専門科目	専門科目	専門科目
第3学年	村 の; 量· シン	料、熱、流体 力学や物性、 子物理、機械 ステムの解析	流体、推進、 構造、制御 及び 結次字中 10世	材料の物性と 機能、材料設計 さらに材料	ミクロな世界の 物理学に基づく 核エネルギー・	種々のエネルギー 変換利用技術、 材料の物性・
第2	と診	設計·製造· 制御	机至于面力子	702999		創要・リサイクル
 年			全 学	共 通	科目	
第 1 学 年		人文・社会科学、外国語、自然科学、健康・スポーツ キャリア形成、統合科学、少人数教育、情報学の各科目群				

物理工学科の教育と関連する研究科

機械システム学コース

機械システム学コース



カ学を中心とした解析科目,設計などの創生科目,卒業研究からなる教育システム

創生科目として,機械設計演習,機械製作実習,機械システム工学実験

CADによる設計演習



機械システム学コース 機械理工学専攻

機械システム創成学講座

講師 中西 弘明

人間の知を探り,機械の知を究め,共創の知をデザインする

機械システム創成学研究室では、人と機械が関わるさまざまな活動を円滑化し、人間知と 機械知を融合した知的システムを実現するための理論と応用について研究しています。

現代社会では、人々の作業負担を軽減したり仕事を効率化したりするために、さまざまな 領域でさまざまなシステム化技術が導入されています。機械やコンピュータは、定型化された 作業やデータ処理において人間を遥かにしのぎ、その性能は日々進歩しています。しかし、 どれほどその能力が向上したとしても、人の判断や介入を仰ぐことは避けられません。 プログラムされた以上の機能を機械は発揮することはできないのです。そのため、人と機械が うまく協力して働くための仕組みのデザインが欠かせません。

機械システム創成学研究室のメンバーは、

『人間の知を探り,機械の知を究め,共創の知をデザインする』

をモットーに、

- 人(々)の認知・判断・行動の特性理解とモデル化
- 複雑で不確かな環境に適応できる知能化技術の開発
- 人同士や人と機械の円滑なコミュニケーションの設計 と関連する幅広い研究テーマに取り組んでいます。





人間機械システムの安全解析 ystem ynthesis ynergy 研究室7

waragilab

研究室ホームページ:http://www.syn.me.kyoto-u.ac.jp/ja/

3



一先進複合材料の固体力学と破壊力学—

当研究室では、航空宇宙、運輸、エネルギー等の先端分野における先進複合材料の高性能化の研究を行っている. 複合材料のものづくりは、構成要素から材料設計と形状設計を同時に行い、構造を一体成形するという特徴があり、 材料力学・流体力学・熱力学・高分子化学といった異分野融合による基礎科学の構築が欠かせない、このような複合 材料のものづくりを対象として、実験・計算マイクロメカニクスの観点から、強度や機能性発現のためのメカニズム の解明に取り組むとともに、材料を非破壊に評価する方法を援用することにより、先進複合材料の健全性を高度に 評価し、環境や求められる機能に適応する複合材料システムを創成することを目的として研究を行っている.

先進複合材料強度学

先進材料の多くは、複数の素材の組み合わせにより、単一の素材では 実現できない機能を実現する「賢い」「複合材料」となっている. 複合材料の微視的構造がその変形・破壊特性や機能に及ぼす影響につ いての詳細な解明と、より高性能な複合材料の設計・製造法の確立を 目指している.

特に、炭素繊維(高強度)と樹脂(軽量)を組合わせたCFRPは、軽量 化により環境問題を劇的に改善する切札として期待されている.ここで は強度発現の微視的基礎や、品質保証に欠かせない成形時に発生した欠 陥や残留応力の構造強度への影響を解明する研究に取り組んでいる.

近年のCFRP積層構造では中間基材の高度化により、層間樹脂層や微視的 **粒子強化層**が形成されていたり、層の薄層化が行われている.これらの 材料の強化により積層構造の破壊特性を最適化するため、走査型電子顕 微鏡や高解像度光学式マイクロスコープを利用した観察実験を援用し, 破壊力学に基づく評価や理論解析を進めている.

・成形シミュレーション 強度

複合材料構造の強度や成形プロセスをシミュレーションを用いて最適化 することを目指している. 例えば、ボイドに代表される欠陥の形成、繊 維配置とボイド分布を考慮したマイクロメカニクスによるマクロ力学特 性の評価、熱可塑性樹脂を用いた複合材料の成形など、複合材料の高性 能化を目的に多面的に検討している.

CFRP構造の成形プロセスについて、民間旅客機の製造に用いられている **オートクレーブ成形法や**,曲面構造を賦形可能な自動積層プロセスなど, より効率的な生産プロセスを創出するための研究が盛んに行われている. 特に、プリプレグテープ基材による曲面構造賦形時の変形や積層時の欠 陥、欠陥レス・均一硬化のための成形方法の確立、樹脂含浸・硬化過程 におけるボイド発生や残留応力発生、成形された材料の長期耐久性(力 学特性や疲労特性)といった課題について実験的評価を基に,**固体力学** を基礎とした理論的基礎の構築を目指している.

材料の力学機

先進複合材料の力学機能を必要とされる性能要求に対して材料特性から 適応的に制御することを目指し,剛性や強度といった従来の構造材料に 必要とされてきた特性のみならず、成形性や難燃性、熱伝導特性といっ た複数の機能を同時に満たすバランスの取れた材料設計論を力学シミュ レーションを援用して確立することに取り組んでいる.

剛性・強度といった特性に対しては、例えば、繊維強化複合材料におい て繊維方向に直交した層内で起きる破壊(トランスバース破壊)は主要 な破壊形態の一つである. こうした複合材料中の損傷をシミュレーショ ンにより再現することによって, 層の薄層化が破壊力学的に損傷抑制に 有効に作用する機構を調べることができる.金属強化を用いたマルチマ **テリアル化**による損傷抑制の相乗効果についても評価を進めている.

航空機構造材料に対して近年,性能要求水準が高まっている**難燃性**の課 題について、燃焼解析と構造の熱伝導解析を連成した多物理にわたる力 学シミュレーションにより、CFRP材料の特性に関する熱的異方性や CFRPを構成する樹脂の熱分解特性が及ぼす影響について評価している.

先進複合材料



CFRPプリプレグ 積層構造の破壊





薄層化CFRP積層板の力学特性や損傷の解析



成型時欠陥の評価(赤外線・シミュレーション)



CFRP積層板に対する燃焼実験とその解析



ミクロな世界の破壊現象の解明に挑む

なぜモノは壊れるのか。材料の変形や破壊は複雑な物理現象であり、多くの未解明問題があります。とくに、材料 の寸法がナノ・マイクロメートルのスケールになると、私たちがよく知るマクロな材料とは異なる変形・破壊特性 を示しますが、そのメカニズムや支配法則は未解明です。高度な機能を産み出すナノ・マイクロ構造物の発展は著 しいですが、一方で予期しない破壊が生じることも事実です。当研究室では、ナノ・マイクロテクノロジーを駆使し た独自の実験方法を開発して、薄膜や細線などのナノ・マイクロ材料に対する信頼できる材料強度実験を実施する ことにより、ミクロな視点から複雑な破壊現象や電子物性との連動作用について研究を行っています。



主な研究トピックは、ナノ・マイクロスケールの材料強度と材料力学、電子によるリライタブル材料強度、クリー プ・疲労破壊の機構と支配力学、二次元材料・原子層構造体の力学、ナノ構造体・薄膜に対する機械的特性評価実験 法の開発、高強度・高機能ナノ構造材料の創製、力学と電子物性のマルチフィジックスなどです。

変形や破壊を支配する「力学」と機能を創り出す「物性」に着目して、ミクロな視点から複雑な物理現象を解き明 かす学理の構築を目指しています。



機械システム学コース 機械理工学専攻 機械材料力学講座 熱材料力学分野



http://mtfm.me.kvoto-u.ac.jp/

熱流体機器の超小型化・高効率化を目指して

助教 栗山怜子

本研究室では,熱・流体・エネルギーに基づく機械・分析機器の超小型化と高効率化の実現に向けて, 基礎研究と技術開発を行っています.これらの機器の小型化・高効率化には様々な技術的問題点があり, 単純に実現できる訳ではありません.**伝熱,流動,物質輸送**に関する基礎現象の理解と新規技術の開発 に向けて,<u>熱・流体の制御手法と高度な計測技術の開発</u>を行っています.

2024年度の構成

教員:栗山怜子(助教) 職員:技術補佐員 2名 学生:修士課程 4名,学部生 1名

学術的基礎

特に, 伝熱工学, 流体力学, 熱力学, 熱物質輸送 ☆学部で学んだ知識を深めつつ,新しいことを学びながら研究します. (光学,マイクロナノ工学,表面科学,高分子レオロジー,etc…)

蛍光偏光法を用いた温度計測技術の開発



温度計測は電子機器の発熱の検知、熱流体機器の伝熱特性の評価など様々な場面で求められますが、マイクロスケールの 空間分解能で高精度な温度計測を実現することは容易ではありません. 本研究室では分子のブラウン運動特性から液体温度 を求める蛍光偏光法を開発しています. この技術を応用しジェル型体温センサやフィルム表面温度センサの実装も進めています.









フィルム表面温度センサ

力応答性蛍光分子を利用した流体応力場の計測

流体機器の設計や循環器系疾患のメカニズム解明などの様々な分野で、流れ場の力学的特性を知るための流体応力場計測 が欠かせません.本研究室では,カに可逆的に応答する特殊な蛍光分子を用いて,流れの中の応力分布を非接触·高空間 分解能で可視化する全く新しい計測手法の開発に取り組んでいます.



壁面近傍100nmの輸送現象の計測と制御

物質の界面で光を全反射させると100nmほどの薄い電磁場の層(エバネッセント場)が浸み出します. この電磁場を利用 して, 流路壁面近傍の液体温度計測技術や, 壁面近傍マイクロ粒子群のマニピュレーション技術の開発に取り組んでいます.

ウィルス1個分 くらいのスケール!	エバネッセント場	光学システム		Evanescent spot	微粒子群の 非接触操作
00 100 nm	溶液	Laser		e 000000000000000000000000000000000000	
$\nu - \mathfrak{T}(\lambda) = \theta$	ガラス	Evanes	scent spot	<u>100 µ</u> m 。	^{**} 23倍速



乱流現象の解明と工学応用

「*ながれ*」は大気・海洋などの環境中,自動車や航空機などの輸送機器,工業装置など 至る所でみられます.本分野では,*ながれ*の中でも特に*乱流*に着目した研究を行ってい ます.また、翼周りのながれなどの空気力学(空力)に関する研究も行っています.

<u>研究テーマ例</u>

- ・乱流の発達と減衰過程 ・衝撃波と乱流の干渉
- ・高速流(噴流、混合層、境界層など)中の乱流現象
- ・浮力や旋回を伴う乱流場の構造と熱輸送現象
- ・微気象環境下の乱流輸送現象
- ・超音速流れ場における熱物質拡散・混合・反応・燃焼現象の解明と数値モデルの開発
- ・翼周りの流れの制御・計測・数値予測

乱流の発達と減衰過程

準一様等方性乱流(格子乱流など)の発達と減 衰過程を明らかにすることを目指しています.



圧縮性乱流

超音速機周りの境界層や超音速噴流などの圧 縮性乱流に関する大規模数値計算や圧縮性乱 流場生成装置を用いた実験を行っています.



超音速噴流と圧力波の伝播

衝撃波/乱流干渉

次世代民間超音速旅客機の実現に向けて、ソ ニックブームの正確な予測が重要となっていま す. 乱流と干渉した衝撃波の特性の変化やソ ニックブーム低減に関する研究を行っています.



乱流中を伝播する 衝撃波の変形

浮力を伴う乱流場

大気や海洋などにみられる圧縮性乱流に関する 大規模数値計算や圧縮性乱流場生成装置を用い た実験を行っています.



安定密度成層(浮力)を伴う乱流混合層



本研究室では,成層流体(鉛直密度差のある流体)の流れ、乱流、水面波など、複雑な 流れとその中での物質や熱の輸送について、計算機シミュレーション、実験、および数学 的理論による研究を行い、流体運動のメカニズム解明と応用を目指しています。



鉛直密度差のある流体中を下降する球による流れ



成層流体中の乱流における運動エネル ギー(赤)と密度撹乱(青)の分布

流体は重力場中で放置すると、自然に上が軽く下が重い成層流体となります。成層流体 は、浴槽の湯や大気・海洋などの身近な流体ですが、強い鉛直ジェット流の形成(左上図) など、特異な挙動を示します。こうした研究成果は、国際的学術誌の表紙に取り上げられ た他、気候変動評価の観測データが不足している深海の観測ブイの設計などに利用されて います。

一方、水面波が流路の起伏により励起される様子の計算機シミュレーションも行っています。現在は、mm(ミリメートル)のスケールで重要となる表面張力の効果を研究していますが、大きい(km以上)スケールでは津波のモデルとなる現象です。



底面の起伏(X=0にある)により励起された表面張力重力波の時間発展



~エネルギー変換・輸送・貯蔵の未来を開拓~

燃料電池や二次電池といった電気化学デバイス内の現象や,水素,炭化水素,アンモニア およびそれらの混合燃料の触媒反応(改質・酸化・熱分解)を対象に,熱・物質・電荷輸 送という機械工学的な観点からアプローチし,ミクロからマクロにわたる複雑現象を解明 するとともに,これらデバイスの更なる展開につながる本質の理解をめざしています.ま た新たなエネルギーシステムの創出に向けた研究を行っています.

高効率発電

高い発電効率を有する固体酸化物形燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell: SOFC)の研究を行ってい ます. 電極に用いられる多孔質体の3次元構造観察技術と, 熱・流体・電荷の連成シミュ レーション技術を駆使してSOFCの高性能・高耐久化を目指しています.



水素製造

水素は貯蔵性や運搬性に課題があるため、化合物の状態で貯蔵・輸送を行い、必要な時に水 素を取り出すことが考えられています。そこで、炭化水素やアンモニアから効率的に水素を 製造するための研究を行っています。触媒における反応量を調べたり、温度分布の可視化や 数値解析を駆使して反応メカニズムを解明し、物理モデルの構築を行っています。



蓄エネルギー技術

再生可能エネルギーの導入が進み、電気を貯める技術の重要性が高まっています.数値シ ミュレーションによるリチウムイオン電池内部現象の解明、ケミカルループ法に用いられる 酸素キャリアの反応特性の解明、SOFCと鉄の酸化還元反応を組み合わせた新規蓄電デバイス の実証などを行っています.





研究の概要

光は物質と密接に関連しています。物質が発する光を調べることによりその本質に肉薄し、 物質に光を作用させることにより、そのありようを制御できます。また、光を用いた計測技術は、 人や物が直接触れることのできない対象の観測手段として大変有効なものです。

我々はプラズマ・気体・固体が関わる様々な現象に対して、新しい光計測手法を開発し、 その理解および利用・制御のための基礎的な研究を行っています。特に新しい計測手法の開発に 関しては、従来手法の改良的な視点ではなく、原理からの抜本的検討により、波長分解能、波長範 囲、強度、時間分解能、偏光、空間分解能、空間範囲などの積で2桁以上の性能向上 を目指してお り、その達成により、これまで見出されてこなかった様々な現象を発見しています。



研究室



プラズマ駆動水素透過のモデル

水素透過実験装置

マルチモードファイバを伝播する光(モード) 出射光強度分布



https://material.me.kyoto-u.ac.jp

皆さんにとって、「夢の機械」は何ですか?

ガンダムのような巨大な高出カロボット、宇宙空間を旅する惑星探査機や月と地球を結ぶ軌道エレベータ、とても小さなナノマシン、自動運転やAIなどの人間の 新しいパートナーなどでしょうか?未来の機械はわくわくする機能を備える反面、今の人類が扱う材料強度や機能では夢の機械を実現することは困難です。

私たちは、未来の機械を創るための材料機能開発を行っています



「欠陥」は 究極のナノマシン!

私たちは欠陥が従来材料にない機能を持ち、物質中を動き回って様々な仕事をする「<mark>究極のナノマシン」へと創り変</mark> わることを発見しました。





私たちは、材料に「力」を負荷することで、わずかな磁場 で作用する特殊な磁石を力学的に創り出すなど力とか たちによって新しい物性を開拓しています。





「理論上最強」

私たちは、電子を意図的に制御する技術によって原子間結合 を強化し、理論上の最大強度と信じられてきた「理想強度」を 超える強度を実現する科学と技術を開発しています。



機械システム学コース 機械理工学専攻 機械力学講座 機構運動工学分野 小森雅晴教授 寺川達郎 助教



http://www.mefd.me.kyoto-u.ac.jp/

機械とヒトのメカニズムと運動を創る!知る!

移動したり、作業をするロボットは、工場を効率化したり省力化することに貢献しています。また、パー ソナルモビリティなどの小さな乗り物は人の生活を便利にしてくれます。我々の研究室では、新しいロボ ットや機械のメカニズムの提案や、新しい機能を持った乗り物やエンターテイメントを目的とした乗り 物の提案をしています。また、ヒトは骨格と筋肉の構造を基にして様々な動きをすることができます。本 研究室では、ヒトの動作に含まれる不思議な未知な特性を発見し、ヒトの動作について理解を深める研究 や、足・脚の動作によってロボットなどを操作することの可能性を明らかにする研究を行っています。



┃ ロボットや機械のメカニズムを創る



┃ ヒトの動作特性の不思議を知る

┃ ライディングロボティクス



■ 足・脚による操作





機械システム学コース機械理工学専攻

機械力学講座 機械機能要素工学分野

教授 平山朋子 助教 安達真聡

物理メカニズムに立脚した機械要素の高性能化・高機能化

機械を設計する上で、"機械要素"と呼ばれる規格化された部品 – 例えば、軸受、歯車、軸継手、 ねじ、ばね、シール等 – の使用は必須であり、見渡せば私たちの身の回りにもたくさんの機械要 素が使われています。当研究室は「機械機能要素工学研究室」と銘打ち、機械要素で生じる物理 現象の基礎的解明とその知見に基づく機械要素の高性能化・高機能化、さらには従来の機械工学 技術関連のものとは異なる物理現象を利用した新しい機械要素技術の開発に取り組んでいます。





ソフトロボティクス

適応的な知能をロボットを作ることで理解する**構成論的** な研究をしています





世界最先端・独自の研究データは、オリジナルのナノ・マイクロオーダーの微細加工技術やデバイス、計測技術から生じるものと考えて研究を行っています。創造的・独創的なナノ・マイクロシステムの研究開発 する<u>3次元微細加工</u>と機械工学に基づいた設計・解析を主な基幹技術として、量子干渉効果を用いた超小型原子時計や医薬品開発・疾患機序解明における革新的なツールと期待される生体模倣システム (Body-on-a-Chip)など、世界をリードする分野融合型研究にも積極的に取り組んでいます。

キーワード: ナノ・マイクロ加工、ナノ・マイクロデバイス、量子センサ、生体模倣システム、1分子計測

ナノ・マイクロ加工:3次元微細加工技術と設計論の構築

後化が進むナノ・マイクロデバイスの高機能化・ 高性能化に対応する独自の3次元微細加工・集 積化技術(シリコン、ポリマー、ナノダイヤモンド)、 また設計・解析の方法論を構築することで、これまでにない機能デバイスを開発する研究を行っています。



量子センシング:高性能チップスケール原子デバイスの開発

→ 子科学技術を応用した高度な操作・制御技術の 進展により、センサの感度や計測分解能を極限 まで高める研究が活発になっています。例えば、 次世代情報通信基盤(Beyond 5G/6G)や自動運転技 術・スカイカーの時空間同期・制御を行うために使う「高 性能な超小型原子時計」の製造技術を開発しています。

Beyond	5G:	「時空間同期	」の実現によ	る未来像
(時刻と位	置を起	高精度にデバ・	イス自身が把握	できる)



バイオマイクロシステム:センサ・マイクロ流体技術を利用した生体模倣システムの創製



<u>桂図書館・「桂の庭」で紹介中</u> https://seeds.t.kyoto-u.ac.jp/seeds/hirai/

ナノバイオ科学:膜タンパク質の機能制御機構を解明する1分子動態計測技術

約 胞膜に存在する温度感受性(TRP)イオンチャネル 群は、生体マルチセンサとして熱や力、化学物質に よる刺激を感受して働くことが知られています。そ の本質的な機能を理解するために、マイクロデバイス技術を 使って物理・化学的刺激を TRP チャネルに印加し、機械の ように動く様子をその場で動画計測する「1分子計測技術」 に取り組んでいます。



機械システム学コース マイクロエンジニアリング専攻 構造材料強度学講座 林聖動 教授 泉井一浩 講師

Topology optimization -トポロジー最適化-

トポロジー最適化は、構造物の最 適な形状・トポロジー(穴の数) を、物理学・数学理論に基づくコ ンピュータ計算により自動的に求 める方法であり、次世代の機器設 計開発に必要不可欠な基盤技術と して、学術界・産業界において注 目されています。 当研究室では、 レベルセット関数による形状表現 (左図上)を用いた独自の最適設 計手法に基づき、機器の高性能 化・高機能化に加えて、今までに はない新しい機能を持つデバイス や材料の創成設計法の開発を、世 界に先駆けて取り組んでいます。



Electromagnetic devices

-電磁デバイス-

近年の環境問題に関連し、燃費に対する 規制が厳しくなっています。そのような 状況の中, 産業界では燃費向上のために 電磁デバイスを用いることが増えていま す.私たちの研究室では、下図のような 電磁デバイスの性能を向上させるための マルチフィジックス・マルチマテリアル の最適設計手法を開発しています。





国際競争を勝ち抜く 革新的な次世代機器 先駆的な新産業の創成を目指して

Design

domair

Design model

Re = 300

Results of 2D model

Re = 500

Heat source

Re = 100

Cooling device

Thermal fluid devices

-熱流体デバイス-代表的な熱流体デバイスとして, 流れによる熱交換・冷却を行う ヒートシンクがあります(右 図).熱・流体のように複数の 物理現象が連成する問題に対し ても、トポロジー最適化法を適 用することができます. 当研究 室ではこの他にも、ペルチェ素 子やピエゾ素子等の様々なマル チフィジックスデバイスの最適 設計法の開発を行っています.

Activities

-活動実績-

日本機械学会、日本計算工学会、精密工学会を中心として、 関連する講演会及び学術雑誌において,研究成果を発表しています. 国外では WCSMO を始めとする最適設計分野の国際会議, WCCM を始めとする計算力学分野の国際会議において講演発表を 行っています. さらには, "Computer Method in Applied Mechanics and Engineering"などの著名な国際雑誌において研究成果を発表し ています.

Temperature

Re = 1





only considering of area

considering of area, operation time, and manipulability

Lavout Design Optimization -レイアウト設計-

近年、多品種少量生産に対応可能なこ とから注目が集まっているロボットセ ル生産システムでは、ロボット等の機 器の位置を決定するレイアウト設計が 重要となります。当研究室では、遺伝 的アルゴリズムに基づく発見的手法に より、複数の評価基準を考慮したレイ アウトの最適設計を行っています.

機械システム学コース マイクロエンジニアリング専攻 ナノシステム創成工学講座 マイクロバイオシステム分野 教授 橫川 隆司, 准教授 藤本 和也, 特定助教 Hang Zhou, 特定助教 松本 倫美

研究室HP: http://www.mbsys.me.kyoto-u.ac.jp/

研究概要

マイクロ・ナノ加工技術を基盤として、細胞スケールの生体材料と融合した バイオメカニクスおよび再生医療研究を展開しています。ヒトiPS細胞由来 などの各種細胞を用いて、血管網と実組織の界面をマイクロ流体デバイス 内に再現します。臓器発生過程の理解を目指す基礎研究、薬物動態や安全 性を評価する流体デバイスの開発、機械学習による血管網の評価など、マイ クロ・ナノ加工技術の貢献する幅広い研究を対象としています。



Organ-on-a-Chip/MPS(生体模倣システム) デバイス内の組織を"見る" 体の中の組織を体の外で再現する



血管網と三次元組織の共培養により生体を再現

500 mm

疾患モデルとして診断や創薬技術に応用





生体機能を 見る



血管内皮細胞



デバイス内の構造 を詳細に観察

マイクロバイオ









2 mm

iPS細胞由来腎臓オルガノイド

生体機能を 作る

灌流可能な血管網 線維芽細胞スフェロイド 栄養.酸素 老廃物



がんや脳を再現した組織に 血管網を接続し薬剤開発へ

物質輸送や免疫応答を″測る″



₩ グルコース ● ● ● ● ● ● ● ■ **■** 尿細管上皮細胞 間質液 **〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇〇** 血管内皮細胞 毛細血管 血流 📥

腎臓の近位尿細管による 物質輸送機能







ウイルス感染への応答

デバイスで再現した組織で生体機能を評価

機械システム学コース マイクロエンジニアリング専攻 ナノシステム創成工学講座 ナノ・マイクロシステム工学分野

研究室構成員

教授 土屋 智由 准教授 廣谷 潤

講師 Amit Banerjee

特定助教 霜降 真希



秘書 1名、研究員 1名 学生: 博士課程 3名 修士課程 12名 学部生 6名 (2024年6月現在)



研究内容

主に半導体微細加工技術で作製するナノ・マイクロスケールの機械、すなわちナノ・マイ クロシステムに関する研究をしています。この領域では寸法効果によってマクロの機械と は異なった現象、たとえば身近にありながらあまり注目されない静電気、気体の粘性、さ らには量子効果に基づく現象を取り扱い、機械工学を新しい視線で理解することが求め られています。我々は、ナノスケールサイズの新材料や最新の加工技術、計測・評価技 術、設計・解析技術を駆使して、新たな機械を創成することを目指しています。

<詳細はホームページで> <u>https://www.nms.me.kyoto-u.ac.jp</u>



京都大学 ナノ・マイクロシステム工学研究室



ナノテクノロジーの扱う対象の大きさは1 nmから1 µm程度です。物質がこのような大きさになると、巨視的な大きさの物質とは異なる物理的・化学的性質が現れます。当研究室では、ナノスケールの領域での固体・液体の構造や性質に関する研究を行っています。

1 μ m (マイクロメートル) = $\frac{1}{1,000,000}$ m

 $1 \text{ nm} (\neq \neq \forall \forall = 1,000,000,000)$

m

🞯 高速イオンと表面の相互作用の解明

マイクロマシンや超LSIなど、工学のいろいろな分野で微細 化が進んでいます。扱う対象が小さくなると、表面の影響が大 きくなるため、表面の構造を知ることや表面を制御することが 重要になっています。当研究室では、高速のイオンを使って表 面を調べたり、表面を加工または制御したりするための基礎と して、高速イオンと表面の相互作用を調べています。



マイクロイオンビーム 解析実験装置 (京都大学量子理工学 教育実験センター)



高速イオンと表面との相互作用の結果、光放出 や二次電子・二次粒子放出などの様々な興味深 い現象が観察されます。

፼ 超小型高分解能RBS装置の開発と応用

ナノテクノロジーにおいては、原子数個分程度の厚さの各種の薄膜が主役になっています。望み通りの高品質の薄膜を作るためには、それらを測る(分析する)技術が不可欠です。このため原子レベルの分解能を持った分析手法の開発が求められています。当研究室では、高速イオンを使って世界で初めて1原子層ごとの組成分析・構造分析を可能にする高分解能RBS法を開発しました。さらに、神戸製鋼所との共同研究で装置の小型化と製品化に成功しました。

【右写真】イオン散乱分析(高分解能RBS)装置



🛞 高速クラスターイオンを用いた加工法・分析法の開発

多数の原子で構成されるイオンを クラスターイオンといいます。高速 のクラスターイオンを物質に照射す ると、非常に狭い領域に一度にエネ ルギーが与えられるので、1個の原 子から成るイオンを照射したときと 全く異なる効果が得られます。

高速クラスターイオンと物質との 相互作用の解明と、これを利用した 表面加工法や、高感度な表面分析法 の開発に取り組んでいます。



高速C₆₀イオンを斜めに照 射したアミノ酸薄膜の表 面(原子間力顕微鏡像)



高速のC₆₀イオンを薄膜試料に照射することで、試料表面に存在する生体分子を高感度で分析することができます。



生命現象に根差した新しい数理科学の創成と工学応用

細胞が作業員となり体を作る

生物から学ぶ完全変態技術 4Dプリント





^{多様性と適応進化} 進化的機械設計



^{不明瞭な境界} いきものらしさの数理





エ学研究科 マイクロエンジニアリング専攻 マイクロシステム創成講座 マイクロ加エシステム分野 教授鈴木基史,准教授名村今日子

http://www.mpe.me.kyoto-u.ac.jp

研究の概要 マイクロ・ナノデバイスにおいては様々な材料の微細な形状を整えることで,性能の飛躍的な向上や,新しい機能性の実現が期待できます.高度に発達したトップダウンの微細加工技術に加えてボトムアップのプロセスを取り入れることで,従来にない新しい構造をもったデバイスをデザインし,創り出すことが可能になります.本研究室では,ボトムアップの手法に基づいた新しいナノ形態の制御法の開発とその応用を目指した研究を行っています.

1. ナノ形態の制御: 原子や分子の蒸気が固体表面で凝集するプロセスを理解してそれを利用することで、10-8 mレベルの微小な要素の形を制御します.(図1)

2. ナノ形態を用いた光の制御: ナノ形態を制御すると、均一な物質にはないユニークで有用な特性が得られます。新しい機能の探索から実用化まで幅広い研究を行っています。(図2)



図1. 動的斜め蒸着法による螺旋型ナノコラム構造の形成. M. Suzuki et al., Jpn. J. Appl. Phys., 40, L398 (2001).



図2. 液晶プロジェクタに搭載された低反射 型ワイヤグリッド偏光板. M. Suzuki et al., Nanotechnology, 21, 175604 (2010).

3. ナノ形態を用いた流れの制御:光を熱に変換できるナノ形態を用いて,ごく少量の液体を操 る流れを発生できます.このユニークな流れの発生原理解明と制御に関する研究に取り組んで います.(図3,4)



図3. マイクロバブル周辺に誘起される典型的なマランゴニ対流の(a)顕微鏡像と(b)その模式図.

K. Namura et al., Appl. Phys. Lett., 106, 043101 (2015).



図4. 水蒸気マイクロバブルおよび 1 m/s オー ダーの劇的な対流の生成に成功. K. Namura et al., Sci. Rep., 7, 45776 (2017).

機械システム学コース・マイクロエンジニアリング専攻

マイクロシステム創成講座 精密計測加工学分野

教授 松原 厚, 准教授 河野 大輔,

特定助教 森 幸太郎,特定助教 大和 駿太郎,技術専門員 山路 伊和夫

精密計測加工学研究室では……現代の生産現場を支える機械加工についての研究を行っています.特に,機械を 作る機械である「マザーマシン」=工作機械の運動精度の向上や工作機械そのものの技術革新,さらに,加工の難 しい工作物のための加工プロセスの提案などに取り組んでいます.

より詳細は:研究室ホームページ http://mmc.me.kyoto-u.ac.jp/



「マザーマシン」=工作機械

日常にあふれる工業製品を生産するための機械,機械を作る機 械の意味で工作機械は「マザーマシン」と呼ばれるときがある.工 業生産の根幹を支える機械であり、日本のメーカは世界市場でト ップレベルにある.

Project 高能率・高精度な加工機 のための技術

産業革命以来の長い歴史を持つ工作機械は、それを構成する要素技術の多くは成熟している.しかし、近年の更なる高能率化・高精度 化の要求に応えるためには、加工・制御・計測・機械要素・設計技術など多方面からの技術的なブレークスルーが必要である.右の写 真は本研究室で試作したテストスタンドである、学生や教員のアイ デアに基づいて、センサや駆動軸の追加など、少しずつ改良が加え られ、案内や駆動機構などの機械要素の誤差解析とその改良、誤差 補正技術の提案、加工や機械の状態のモニタリング技術などの研究 に使用されている.



Additive Manufacturing を前提とした加エプロセス AMの自由度の高さを活用するために、最適化手法を応用して、 製品と加工用の冶具を同時に設計・生産するプロセスを研究している。

Project 多軸加工機の高精度化

日常にあふれる工業製品の多くは、工作機械と総称される機械 を用いて生産される.近年、直交3軸(X,Y,Z)に加え、工 作物・工具の傾きを制御するための回転軸を持った工作機械が 急速に普及している.特に、回転テーブルとその傾斜軸を持っ た5軸制御工作機械は航空機エンジン用タービンブレードの加 工などで活躍している.5軸制御工作機械による加工は、回転運 動と直進運動の組み合わせになる.そのため、5軸制御工作機械 は、従来の3軸制御工作機械と比較して加工精度が劣ることが 多い.しかし、回転軸・直進軸が持つ誤差要因が複雑に影響し、 最終的な加工精度として転写されるために、誤差の原因分析や 低減は非常に難しく、多くのメーカで課題とされている.本研 究室では、3軸・5軸制御工作機械の運動誤差の測定法、測定装 置開発,誤差の原因分析に基づく補正法提案などに取り組んで いる.



3軸のテストスタンド 本研究室で試作した超精密テストスタンド 市販機と異なり,様々なセンサや付加駆動軸を搭載可能.

Project

次世代の生産加工技術のために

現代の生産工程において、切削・研削などの除去加工と、プレスな どの成型加工は中心的な役割を果たしている.近年は 3D プリンタ とも呼ばれる Additive Manufacturing (AM)が発達し、AM を応用 した生産加工技術の発展が期待されている.また、従来型の加工技 術であっても、低い環境負荷や生産環境(保有機器の稼働状況、サ プライチェーン、etc.)の変動に対する生産継続性など、新たな課 題解決への要求が高まっている.社会の幸福を持続的に維持できる 次世代の生産加工のために、新旧様々な機械の混在する生産現場で あっても情報を共有・分析でき、人の意思決定を助けるようなシス テム、ものづくりのハードルを下げて、人の創造性を自由に発揮で きるシステムの実現を目指している.

機械システム学コース マイクロエンジニアリング専攻 バイオメカニクス分野

教授 安達 泰治 助教 牧 功一郎 助教 竹田 宏典

研究概要

生物の発生過程における細胞分化、形態形成、成長、さらには生体組織・器官のリモデリングや再生 による環境への機能的適応など、多様な生命現象における自律的な制御メカニズムの解明を目指し、 力学、生命科学、医科学を含む学際的研究を行っている。特に、細胞・分子レベルにおける要素過程と、 それらの複雑な相互作用により組織・器官レベルにおいて創発される生命システム動態の本質を理解 するため、「力学環境への適応性」と「構造・機能の階層性」に着目し、実験と数理モデリング・計 算機シミュレーションを組み合わせたバイオメカニクス・メカノバイオロジー研究を進めている。

研究テーマ

- (1) 力学環境に応じた生体システムの構造・機能適応のメカニズム
- (2) 多細胞組織の発生・形態形成の多階層力学モデリングとシミュレーション
- (3) 骨細胞の力刺激感知と細胞間コミュニケーションによる骨リモデリング
- (4) ゲノムDNAの力学動態を介した細胞分化・老化メカニズム
- (5)細胞内構造の力学制御に基づくマイクロ・ナノマシナリー

骨組織の機能的適応のバイオメカニクス





骨細胞による

力学刺激感知



骨梁の形態変化

海綿骨の形態変化





大腿骨の 機能的適応

細胞間張力の感知

は周囲の力学環境変化に応じてリモデリングすることで、外部形状や内部構造を能動的に変化させる。本研究では、力学刺激に対する骨構成細胞の協調的な代謝活動が、骨組織の機能的適応変化を引き起こすメカニズムの解明を目指している。

形態形成ダイナミクスの多階層バイオメカニクス



骨リモデリングによる機能的適応



多細胞の増殖による組織形態形成



骨組織内のメカノセンサ細胞



細胞による力感知の分子メカニズム



力 学的な視点から、細胞・分子レベルの複雑な相 互作用より組織・器官レベルにおいて創発される生命 システム動態の理解を目指し、実験や数理モデリング・シミュレーション、人工 ナノ・マクロシステムを駆使して研究を進めている。

細胞核内におけるDNAの力学動態



Our research endeavors focus on elucidating the cross-scale system from single cells to complex organisms and understanding the mechanisms underlying diseases that arise from organizational disruptions. We pioneer innovative omics methodologies, leveraging advancements in micro/nanofluidics and electrokinetics, to unravel these fundamental guestions

Exploring cell mechanics with single-cell omics approaches

The mechanical properties of cells are known to be associated with physiological states in various biological contexts, such as cell differentiation, cancer, and aging. To elucidate the intricate molecular mechanisms governing cellular behavior in diverse biological processes, We have developed novel methods capable of integrating cell mechanics profiling with unbiased transcriptomics for thousands of single cells (Shiomi *et al., Nat Commun.,* 2024).



Linking phenotypic response to perturbation and transcriptome



ŀ

Genetically identical cells can show diverse responses to drugs, leading to different cell fates, such as drug resistance in cancer. To study the molecular cascade of how the variation in gene expression gives rise to different phenotypic responses, we introduced a method combining optical indices from cells and hydrogel beads with single-cell RNA sequencing, linking cellular drug responses to gene expression variations (Tsuchida *et al., LabChip*, 2024).

Hunt for aiding and abetting cells in metastatic niches with secretory GFP reconstitution

During metastasis, cancer cells interact with nearby tissue-resident cells to form niches that support their growth. However, the molecular mechanisms promoting metastatic growth are not fully understood due to the lack of methods to analyze cell-cell interactions. We developed sGRAPHIC to fluorescently label and isolate these interacting cells, allowing for their characterization using single-cell RNA sequencing (Minegishi *et al.*, *Nat Commun.*, 2023).



Resolving the regulation of mRNA expression at subcellular resolution



Protein coding transcripts are synthesized and processed in the nucleus before being exported to the cytoplasm for translation. However, our understanding of nucleocytoplasmic isoform usage, nuclear export, and transcript degradation is limited at the population level, and their effects on cellular heterogeneity remain largely unexplored. We developed a method called single-cell integrated nuclear and cytoplasmic RNA sequencing (SINC-seq) (Abdelmoez *et al., Genome Biol,* 2018; Oguchi *et al., Sci Adv,* 2021).

研究室の場所 詳細はWEBで

所 医生物学研究所2号館4階411室 ⁵ <u>www.hshintaku.com</u>



更軟をDNAシーケンショングで測

機械システム制御分野

教授 東 俊一 ・ 助教 坂野 幾海

動的システムのダイナミクス(動き)をデザインするための学術的基盤が「システム制御理論」です. 本研究室では、システム制御理論の開発とそれを先端科学分野や産業界に展開します.特に、「物理と情 報をつなぐ」という視点から研究を実施し、新しい未来を拓く動的システムの創成に挑戦します.また、 この研究活動を通じて、学界や産業界においてシステム制御のリーダーになれる人材を育成します.



マルチエージェントシステムの制御と群知能化 マルチエージェントシステムとは、複数のエージェ ントの局所的な相互作用をもとに大域的な機能を発現するシステムのことです[東ほか、マルチエージ ェントシステムの制御、コロナ社、2015].近年、産業界で大きな注目を集めているスマートグリッド、 スマート物流、自動車の自律化(自動運転)を実転する技術として、また、システム生物学や群知能学 の数理モデルとして重要な研究対象になっています.本研究室では、エージェント間の情報の流れに注 目してマルチエージェントシステムの解析と制御のための理論を構築します.さらに、マルチエージェ ントシステムを、大規模システムを制御する「群知能」にまで昇華させるための研究を実施します.

量子化制御 大規模システムの制御においては,現実世界に存在する物理系をセンサで計測し,サイ バー空間でその情報を分析して制御入力を生成します.現実世界の物理量は連続的な値になるのに対し, サイバー空間で扱われる情報は離散的な値となります.このような連続値の物理量と離散値の信号が混 在したときに必要となるのが量子化制御です.本研究室では,サイバー空間で扱う情報量と現実世界で の制御性能の関係を明らかにし,それを基に量子化制御の設計理論を構築します.

データ駆動型システム解析と制御動的システムを解析する際の標準的なアプローチは、「計測デー タ ⇒ 数理モデル ⇒ 解析結果」という手順に従うことです.しかし、計測データが不十分な場合には、 精度の良い数理モデルが得られず、手順の途中で断念することもあります.そこで、計測データから、 モデルを構築することなく、直接、解析結果を得る、すなわち「計測データ ⇒ 解析結果」というデー タ駆動型のアプローチが重要です.本研究室では、データ駆動型アプローチが本質的に必要となる解析 問題や制御問題の特徴付けと、具体的な解法の開発を行います.

先端科学分野や産業界への展開

<u>化学・ロボティクス・AI</u>:分子ロボティクス,分子サイバネティックス,<u>医療</u>:疾患の予兆検出と予防, <u>生物</u>:生体ネットワーク,<u>データ科学・エージェント</u>:オープン群知能学,<u>交通</u>:トラックの隊列走行 制御,<u>エネルギー</u>:エネルギー管理システム

※ 研究室ウェブサイト: http://www.ctrl.sys.i.kyoto-u.ac.jp/



自分たちの研究で、社会をより良くしたい、人を幸せにしたい.これまでに培ったデータ解析・モデリン グ・制御の技術を基盤にして、対象を選ばないシステム科学的アプローチにより、その想いを実現する研究 に取り組んでいます.鉄鋼・製薬・半導体・化学などの製造業で高品質製品の安定生産を省資源・省エネル ギー下で実現するために、様々な病気が引き起こす苦しみから患者さんを解放し、人々が健康であり続ける ことを支援するために、あるいは美味しく栄養価の高い農作物の収量を最大化し、生産者と消費者の双方を 笑顔にするために、企業・病院・行政とも協力しながら、それぞれの現場に入り込み、解くべき重要な課題 を見付けて、粘り強く解決しています.

研究1)プロセスデータ解析・制御・最適化:企業との共同研究で本物の課題を解決

製品品質を制御したくても肝心の品質をリアルタイムには計測 できない.不良品をなくしたいが原因がわからない.超高効率 生産を実現したいが実現方法がわからない.そのような産業界 に共通する課題を解決するため、プロセス・インフォマティク ス(プロセスデータ解析技術)や制御技術を開発し、様々な産 業界で研究成果の実用化を進めています.製造分野でのデジタ ルトランスフォーメーション実現の鍵を握る研究です.

研究2)物理モデル自動構築 AI の開発

製造プロセスを思い通りに動かすためには、プロセスの挙動を 正確に表現できる物理モデルが欠かせません。しかし、物理モ デルの構築は極めて難しく、専門家が長い時間をかけて取り組

まなければなりません。その労苦から専門家を解放し、短期間でモデルを利用可能にするため、文献情報から自動的に物理モデルを構築できる人工知能(AI)を開発するという壮大な目標を掲げて挑戦しています。

研究3)生体信号処理による医療・ヘルスケアサービスの創出

ウェアラブルヘルスケアサービスに注目が集まっています。本分野 では、ドライビングシミュレータや脳波計、回路製作環境を整備し、 病院や企業と共同でウェアラブル心拍センサを用いたてんかん発 作予知・運転時居眠り検知・ストレス評価などの医療・ヘルスケア サービスを開発しています。研究成果を社会実装するため、2018年 にクアドリティクス株式会社を創業しました。

研究4)農業システム工学:生産者と消費者の共栄を目指す地域密 着型研究開発

種子島の自治体や生産農家さんと一緒に、スーパー安納いもプロジ ェクトを推進しています.自然を相手にする農業では、いかに美味 しい農作物を安定して栽培するかが課題です.そこで、土壌、気象、 栽培、貯蔵のデータを収集し、モデル化することで、最適な農作業 を助言できるシステムを開発しています.さらに、美味しさを予見 できる非破壊分析技術の実現、最高に美味しい焼き芋を焼くための 焼き芋シミュレータの開発にも取り組んでいます.









あらゆるシステムのモデリング,解析,設計,制御

人間,機械,社会,環境などさまざまな対象を包含する今までにないシステムを解析・設計し共 生と調和を実現するには、システムのモデリング,解析,設計,制御における普遍原理の解明が 不可欠です.そのために、さまざまな問題で根本的な困難となる非線形性や不確かさを扱う新し い方法論や,動的最適化アルゴリズムについて研究しています.そして、あらゆる分野への応用 に取り組み,理論的かつ実践的な教育・研究を行っています.



材料科学コース

材料科学コース

「物質」を, 電子・原子・分子・結晶格子・組織構造という様々な階層レベルで設計し, 新しい「材料」を創造する理論・技術を構築しています.



材料科学コース

コースの	歴史 1	20年の伝統	統	1	
明治30年(1897年)	採鉱冶金学科設立(京都	帝国大学の創立と同時	時に設立)		
昭和17年(1942年)	 採鉱冶金学科が冶金学科と鉱山学科の2学科となる (鉱山学科は後に資源工学科となる) 				
昭和36年(1961年)	昭和36年(1961年) 冶金学科が金属加工学科を新設する			冶金学教室	
平成6年(1994年)	 治金学科と金属加工学科は改組により、材料工学専攻とエネルギー応用工学専攻になる。材料工学専攻が現在の物理工学科の材料科学コースを兼担する 国際融合創造センター(旧メゾ材料研究センター)の2講座が材料工学専攻に加わり、全12研究室に 				
平成20年(2008年)					
現在の研究分野		材料物性学 量子材料学分野	材料機能学 磁性物理学分野	ホームページ http://www.s-es.t.	
才料設計工学 対料設計工学分野	材料プロセス工学 表面処理工学分野	構造物性学分野	松貝利仰子力野機能構築学分野		
も端材料設計・教育分野	物質情報工学分野	先端材料物性学	先端材料機能	学 (1997)	

京都大学工学部 物理工学科 材料科学コース

先端材料機能学分野

先端材料物性学分野

ナノ構造学分野



-新規解析手法の開発によるナノ~原子スケールの材料評価-

材料設計工学分野では**放射光**を用いたナノ構造の制御解析, 走査トンネル顕微鏡 (STM)を用いた原子~ナノスケールの構造の物性評価を行っています.



三次元の複合材内部でナノ構造がどのように 分布しているのかを非破壊計測する手法を開 発しています、複合材を壊さず特性予測する 設計評価法につながります.



リアルタイムX線散乱回折のデータからは材料内 部のナノスケールの構造の情報が得られます. 本研究では、「Mg-LPSO合金」と呼ばれる合金内 部の組織形成の詳細を捉えることに成功しました.

STMを用いた表面ナノ構造の評価・バルク材料の評価



STMは表面を"なぞる"ことに よって原子像を得る手法です. これを用いて、表面に形成さ れたナノ構造やバルク材料内 部の構造の、観察・評価を 行っています.

実際の時間の流れ

材料(31)最弱点特定

放射光は金属材料の内部を 可視化(3D)でき,その場試験 と組み合わせて材料の破壊や 変形の時間発展挙動(4D: 3D+ 時間)を直接観察できます. こ れを用いて材料の最弱点の 特定などを行っています。

材料の破壊の時間発展挙動

鲁裂

金属材料外形



「夢の金属チタン】

- ▲ 予約型属 フラン】 ・ 資源埋蔵量が豊富
- ・重量当たりの強度が金属材料で最高クラス

しかし、チタンの生産量は伸び悩んでいる それは、チタンの製造コストが高いから!

・海水中での耐食性が金・白金等の貴金属並みに高い

チタン鉱石からの金属チタンの製造は、70年前に Kroll 博士が開発した手作業に近い手法のまま! 連続法によるチタン製錬法の革新が必要

【R2 (Reduction and Refining) 連続新製錬プロセス by 京都大学】 チタン化合物 (TiCl₄)を Bi-Ti 液体合金中に還元し、蒸留によって Ti を分離



真空蒸留後 Ti 粉末

50µm

球状化処理後



真空蒸留により、Bi-Ti 合金から 高純度 Ti 粉末が得られた 32



物質情報工学分野

教授 岸田 恭輔. 助教 LI Le

原子スケールでの結晶・欠陥構造解析に基づく材料設計

構造材料を主たる研究ターゲットとし、新しい力学特性評価法 であるマイクロピラー機械試験法を駆使したマイクロ~サブミ クロン領域での力学特性評価と、原子分解能電子顕微鏡法をは じめとする各種解析手法を活用した結晶構造・結晶欠陥構造の 精密解析を組み合わせることにより、各種結晶性材料の塑性変 特性発現機構を明らかにする研究を行っています。 形機構

世界最高性能の透過電子顕微鏡による (a) (b)原子スケールでの結晶・欠陥構造解析 極めて高い空間分解能(約0.08nm)で原子配列を直接観察すること 0.5nm により、従来構造解析が困難であった非常に複雑な結晶の構造決 **b**=a/3[1210] 定に成功しています. 1nm Ti₃SiC₂ MAX相中の刃状転位の転位芯構造 Mo₅Si₃C MoSi₂基超耐熱 Mo₅Sia 1nm 合金中の異相界 長周期積層構造Mg合金の 球面収差補正走査透過電子 面の原子構造 顕微鏡 (Cs-corrected STEM) 走杳诱渦雷子顕微鏡像

マイクロピラー圧縮試験法による 力学特性評価・変形機構解析

近年,新しい力学特性評価・変形機構解析法として,集束イオン ビーム(FIB)加工により作製した微小試料を、フラットパンチ型ダ イヤモンド圧子を備えたナノインデンター装置を用いて圧縮する 試験法であるマイクロピラー圧縮試験法が注目されています.

これまでに大型単結晶の育成が困難な試料や複相材料中の 微小単相領域, バルクサイズでは室温で脆性的な性質を示す 材料等の力学特性評価・変形機構解析を行い、様々な新しい知 見を得ています.





FeCr の相単結晶で活動したZonal転位の転位芯構造

2µm



レアメタルフリー太陽電池の開発 一新規太陽電池材料ZnSnP2一 太陽光発電の更なる普及には、安価で高効率な太陽電池を実 現する必要があります. 当グループでは、レアメタルフリー太陽 電池の実用化を目指して研究を進めています。
 1. 半導体物性の評価・制御 化合物のバルク結晶成長 光学,電気特性評価および制御 3. 薄膜作製プロセスの開発 反応メカニズム解明 薄膜の表面形態制御 富効率 Zn Sn P 太陽電池の実現 前駆体作製 0 2. デバイス化技術の確立 pn接合形成を用いた太陽電池 デバイス構造の最適化 リン蒸気と反応 15 ■ Zn ● Sn ◆ ZnSnP₂ cm⁻² 10 Before illuminated ۳A 5 density / 0 dark arl -5 J_{SC} = 11.17 mA/cr V_{OC} = 0.439 V ntensity -10 Current AM 1.5 G -15 100mW cm -20 -0.6 -0.4 -0.2 0.0 0.2 0.4 0.6 40 Voltage / V 20 / dearee Zn-Sn膜のリン化反応を利用 ZnSnP2太陽電池が発電する

してZnSnP2膜の作製に成功.

ことを世界で初めて確認.

ヘテロ接合界面における構造と特性

デバイスにおけるキャリア輸送は、金属/半導体接合、半導体/ 半導体接合などの界面反応の影響を強く受けます。 当グル-プでは、平滑な表面が得られるバルク結晶を用いた実験と熱 カ学に基づく考察の両面から基礎研究を進めています.



熱処理により、Mg/Zn₃P2 界面で反応拡散が起こり、これま で知られていなかったMg-P-Zn化合物が形成されることを初 めて見出しました.この化合物は、太陽電池の高効率化の 鍵を握ると考えています.

平衡状態の性質に対する空間的拘束の 役割の解明 -次元の呪いへの挑戦-

平衡状態に対応する微視的状態は,系のサイズと共に指数関 数的に増加します.私達は構成粒子に対する空間的拘束(格子 等)に着目し、平衡状態の物理量を特徴付ける特殊な微視的状 態を解明しました、現在、この理論の応用研究を進めています、



結晶性固体の「固い」空間と「柔らかい」 空間の統一 - 構造と物理量をつなぐ -

内部エネルギー等を古典系で扱う場合、系の微視的構造は通常 部分系のテンソル空間で表します。一方でトポロジーの情報が重 要になる物理量も考慮すると、統一的な記述が必要になります. 私達は両方の利点・特徴を保持した記述の統一に成功し、物理量 を表現する新しい枠組みを構築する基礎研究を進めています。



結晶格子の離散化ラプラシアンへの分解

2 4






コンピュータシミュレーションに基づいた合理的な材料設計

近年,量子論に基づいた計算技法の進歩とコンピュータの演算能力の飛躍的 な向上により,元素の組み合わせや並べ方を決めたときにどのような性質が 現れるか,実際にその物質を合成しなくてもシミュレーションによって予測 することが可能になってきました.目的とする機能を最大限に引き出すため の設計図をコンピュータ上で描くことができるようになりつつあり,私たち はこれを量子材料設計法と呼んでいます.合理的かつ経済的な材料探索を可 能とする量子材料設計法は,近い将来,材料開発に革新をもたらすこととな るでしょう.私たちはその先鞭をつける仕事をしています.





教授 乾 晴行, 助教 CHEN Zhenghao

http://imc.mtl.Kyoto-u.ac.jp

高エントロピー合金等の新規構造用金属材料の基礎研究

結晶性材料の特性はナノ・スケールの結晶欠陥により左右されます。この ようなナノ・スケール結晶欠陥そのものの特性(Defect Properties)を評価し, それらの構造や配列を制御することによりバルク結晶の特性向上を図る基 礎研究(Defect Engineering)をおこなっています.

ハイエントロピー合金の特異な力学特性の発現機構

5つ以上の元素をほぼ等モル量含む合金で、大きな 混合エントロピー効果により単純な結晶構造(FCC, BCC等)を持つ単相固溶体が安定化された合金のこ とをハイエントロピー合金といいます. 最近の研究に より, ハイエントロピー合金とその派生合金の中に, 従来の希薄固溶体合金にない特異な力学特性を示 す材料が見出されたことから,新規構造材料の候補 として国内外で盛んに研究が行われています.

これまでに異なるサイズの原子が混ざり合うことに 起因して生じる結晶格子 歪が存在し, 強度特性に影 響を及ぼすことを明らかにされてきました。私たちは 結晶格子歪を格子点からの平均原子変位量として定 量化し、その値により合金強度を予測する新しいモデ ルを提案しています.



新規耐熱構造材料の開発

現在, ガスタービンやジェットエンジンで 用いられているNi基超合金を超える力学 特性を有するCo基耐熱合金や、高融点で 高温強度に優れた遷移金属シリサイドを組 み合わせたBrittle(脆性)/Brittle複相材料と いう全く新規な概念のもと、Ni基超合金な どDuctile(延性)相を含む旧来の合金では 達成できない燃焼温度1800°C級ガスター ビンでの使用に耐える超高温用耐熱材料 に関する基礎研究を行っています.

ハードマテリアルの室温塑性変形挙動

半導体やセラミックスなどは、バルク サイズの試料を用いた機械試験で は一般的には室温では非常に脆く 簡単に壊れてしまいます. 最近の研 究でこれら極めて脆い材料も、試験 片サイズをµmオーダーまで小さくす ると、室温でも塑性変形することが わかってきました. 我々の研究室で は、マイクロピラー圧縮試験法という 新しい実験手法を用いて, SiCや結 晶構造が複雑な金属間化合物相な どの各種ハードマテリアルの室温塑 性変形に関する研究を行っています.

溶融めっき鋼板めっき被膜中の金属間化 合物相の塑性変形

合金溶融亜鉛めっき鋼板は耐食性に優れていますが,複数の Fe-Zn系やFe-Al系金属間化合物相で構成されるめっき被膜が鋼 板の成型加工時に剥離するという問題があります. 我々はこれを 解決するため, めっき

δık

Γ₁ Γ

被膜中に形成される 種々の金属間化合物 δ4 相の塑性変形・破壊 挙動を調べ、被膜剥 離が極限まで低減さ れる最適な被膜構造 の設計指針確立を目 指しています.

合金化溶融亜鉛メッキ鋼板メッキ被膜の模式 図と、構成相のマイクロピラー圧縮変形挙動

教授 辻 伸泰, 准教授 高 斯, 助教 朴 明験, 助教 吉田 周平 特定助教 崇 巌, 特定助教 黄 錫永, 特定助教 Gholizadeh Reza

研究室HP http://www.tsujilab.mtl.kyoto-u.ac.jp/ja

安心・安全で環境にやさしい社会基盤材料の革新

社会の基盤を支え、安全性・信頼性 を高めるために、様々な金属材料が 用いられています。私たちの研究室 では、鉄鋼・アルミニウム合金と いった構造用金属材料のナノ・ミク ロ組織の形成機構やナノ・ミクロ組 織と力学特性の相関に関する基礎研 究を行っています。

バルクナノメタルの創製とその力学特性

我々は、ARBという大きな塑性変形を施す巨大 ひずみ加エプロセスや新しい加工熱処理プロセス を独自に開発し、超微細粒・ナノ組織の創製に成 功しています。結晶粒径1μm以下のバルク金属 (バルクナノメタル)は、粒径数+μmの従来金属 に比べて優れた力学特性を示します。たとえばバ ルクナノメタル材は同じ化学組成で従来粒径材の 4倍にも達する強度を有しています。

我々の研究室では、バルクナノメタルの創製プロセスやバルクナノメタルが示す優れた力学特性の発現原理を明らかにするための研究に取り組んでいます。

ARB法で作製した超微細粒 アルミニウム

組成で強度が3倍以上に!

局所変形挙動の定量解析

金属結晶の塑性変形は、本質的に不均一です。そうした不均一な変形の重ね合わせの結果として、材料の平均的な強度や延性が決定されます。変形の不均一性は、結晶の構造やナノ・ミクロ組織と強く相関していると考えられます。我々は、引張試験時の二方向その場外形変化測定システムや、画像相関ひずみ解析 (Digital Image Correlation: DIC)法などを駆使して、変形の不均一性とマクロな力学物性との関わりを基礎的に明らかにすることを目的とした実験研究を行なっています。

金属の加工硬化と変形組織の関係

金属材料に塑性変形を施すことで転位等の格子欠陥 から成る変形組織が発達します。変形組織は、金属材 料の力学特性を決定する最も重要な因子の一つです。 我々は、様々な金属材料において発達する変形組織 を電子顕微鏡による組織観察や変形中のその場放射 光X線/中性子回折測定等により詳細に解析し、変形組 織発達のメカニズムの解明や、優れた力学特性を有す る革新的な新材料設計のための指針獲得を目指して 研究を行っています。

液体窒素温度で 引張変形を施し た Ti-0.30 合 金 における変形組 織. 微細な双晶 (twin)が生成して いる.

実証データに立脚した新しい材料・材料プロセスの開発

材料を製造するプロセスである融液からの凝固・結晶成長プロセスは、材料 の特性を発現させるために重要なプロセスですが、高温・光学的不透などの 理由により未解明の現象が少なくありません。本研究室では、放射光(X線) を用いた時間分解その場観察などの実験手法を開発し、金属合金を中心に 凝固組織形成の素過程を実証的に解明し、物理モデルの構築・シミュレー ションにより検証を行い、新しい組織制御手法や材料プロセスの開発を目指 しています。また、物質の磁場などの外場に対する応答性を顕在化させ、材 料プロセスに応用する原理の構築から、結晶が高次に配向した組織などを 実現する新しい材料プロセッシングに関する研究を行っています。

大型放射光施設SPring-8(兵庫県)での実験風景

凝固組織形成の様子 (透過X線イメージング)

組織形成の3D解析(時間分解X線トモグラフィー)

新たな磁気材料と新奇磁気現象の発見

磁石は社会のあらゆる分野で利用される機能性材料です。物質のもつ磁気的性質は物質を構成して いる原子やイオンがもつ磁気モーメントの集団の振舞によって決まり、それを理解するには量子力学 と統計力学を駆使する必要がありますが、一筋縄ではいかず、新たな発見が後を断ちません。

基礎的な磁性物理の進歩と磁性材料の機能の開発は車の両輪であり、我々は、新奇な磁気現象の 発見とその物理の基礎的理解を通し、新たな磁性材料や磁気的機能の開発を目指しています。例えば、 下に挙げているのはスカーミオンと呼ばれる原子の磁気モーメントが渦状に巻いた特異な磁気的状態 です。我々はGaV₄S₈という物質でこのスカーミオンが出現していることを見出しました。一つ一つのス カーミオンを情報のビットとして利用することが考えられています。また、現在永久磁石材料として広く利 用されているM型Srフェライトの性能向上を目指して、単結晶試料を育成して基礎物性の解明を目指し ています。

原子のもつ磁気モーメントが渦を巻いた²⁰ ように見える配列

B(mT)

欠損スピネル化合物GaV₄S₈の 温度磁場相図 図中のSkLと書かれてある領域で スカーミオンが三角形に並んだ スカーミオン格子が実現している

永久磁石材料M型Srフェライトの結晶構造 5つの異なるFeサイトがあり、Fe³⁺イオンの スピンが上向きのサイトの下向きのサイト があるフェリ磁性体である

永久磁石材料M型Srフェライトの単結晶の写真 Na₂Oフラックスを使って育成した単結晶試料 これらの単結晶試料を用いてSrフェライトの 磁気的性質を研究している

溶液系の電気化学と熱力学に基づく材料プロセッシング

私たちの研究室では、水溶液や有機電解液 を用いて、電気化学、溶液化学、ならびに化 学熱力学を学問ベースとする新しい湿式製 錬、電池材料、電気めっき法の研究を行っ ています。

水溶液は安価で工業的に重要です。例えば 純度99.9%の金属銅は水溶液を用いた電解 製錬により生産されます。私たちは水溶液 を用いて、銅製錬の高効率化や、ユニーク な光学特性をもつ多孔質シリコン電極、酸 化物太陽電池材料を研究しています。

水溶液からは熱力学的に得られない金属を 室温で合成するプロセスも研究しています。 金属Mgや金属AIがその例であり、有機溶媒 やイオン液体という非水系の電解液を用い ます。MgやAIの室温合成プロセスは、高い 起電力を実現する次世代電池や、さびにく いアルミニウムの電気めっきといった応用に つながります。特にイオン液体は、分子性溶 媒である水や有機溶媒と異なり、イオンの みからなる新しい液体材料です。揮発しにく いというメリットを活かした、安全な材料作製 技術の開発に取り組んでいます。

准教授 一井 崇 助教 宇都宮 徹

https://www.nsa.mtl.kyoto-u.ac.jp/

固体/液体界面の原子・分子材料工学

私たちの研究室では、材料表面・界面の物理と化学に立脚した原子ス ケール解析技術開発と構造形成プロセス創成に取り組んでいます。界 面とは2つのものが接する面であり、固体と液体が接する場合は固液 界面と呼ぶことがあります。固液界面は電気化学反応や結晶成長など の反応「場」です。そこがどうなっているかを見る、そして描くこと を目指した原子間力顕微鏡(AFM)を開発しています。特に電池の 充放電過程、液体金属中の合金化過程といった固液界面が関わる各種 現象を原子分解能で直接観察することを目指しています。また、二次 元原子・分子薄膜材料を用いた半導体表面構造形成プロセスにも取り 組んでいます。

固液界面現象の原子スケール解析

原子間力顕微鏡の開発

融液中で得られた合金表面 (AuGa₂(111)結晶面)の原子像

エネルギー応用工学コース

エネルギー社会工学分野

准教授:奥村英之,准教授:小川敬也 技術職員:武本庸平,秘書:岡田玲香

エネルギー社会工学分野では、地球環境調和型社会シ ステムの構築を目指し、エネルギーや資源の有効利用 と評価システムの体系化に関する研究を行っています。 資源生産性の向上、すなわち出来るだけ少ない資源(エ ネルギー資源、鉱物資源、土地資源など)で出来るだけ 豊かな暮らしを提供するにはどうしたらよいか?を目的と して、以下のような研究を進めています。

■材料科学からのアプローチ■

「機能性材料・新素材(エコマテリアル)の開発」と「新し いプロセス(エコプロセス)の開発」の 2 つを軸とし、材料 という観点から地球環境に優しい資源の有効利用を研 究しています。

<u>主な研究テーマ</u>

↓ 高機能(光)触媒材料の開発

反応性 RF スパッタリン グによる窒素ドープ酸 化チタン薄膜を作製 し,光触媒能を評価

- ・ 光触媒等を利用した二酸化炭素固定/変換プロセスの開発や水分解用光触媒の研究
- 勃率的エネルギーキャリヤや農業肥料等に資する 高効率アンモニア合成とプロトン伝導膜作製
- ↓ 磁場による材料/プロセスの高機能・高効率化
- ↓ Li 窒化硼素層間化合物の作成と二次電池の電極 への応用
 - Q 太陽電池等の透明電極にも用いる ITO 材は, In(インジウム)が枯渇すると聞きましたが?
 - A In に置き換わるものとして Zn が注目されてい ます。当研究室でも Al をドープした ZnO を研 究していて既に一部が実用化されています。

■社会分析・評価からのアプローチ■

LCA や産業連関分析法によって,既存もしくは新しい製品, プロセスおよびシステムの環境影響評価を行い,地 球環境との調和について研究しています。

<u>主な研究テーマ</u>

- ↓ シナリオ分析に基づく廃棄物・資源管理戦略
- ↓ 地域再生可能エネルギー導入計画策定
- ↓ 新規アンモニア合成プロセスの経済性評価
- ↓ エネルギーリテラシーの構造分析
 - Q 最近太陽電池をあちこちで見るんだけど、 どれだけ役立っているのかよくわからないの ですが?
 - A 2022 年で太陽光発電は 9.6%程度をまか なっており、日本全体の年間電力需要に対 する自然エネルギーの割合は 20.5%に増 加しています。今後、更なる普及が期待さ れます。研究室では次世代半透明太陽電 池の農業応用についても分析しています。
 - Q いろいろとテーマがあるのはわかりましたが どのように関連しているのですか?
 - A 太陽光を利用して環境汚染物質を分解、 二酸化炭素を有効利用、水を分解して水 素を製造したり農業肥料に役立つアンモニ アを合成したりなどの研究だけでは実用に なりません。その技術がどの程度役に立つ かを LCA などを用いて評価するとともに、さ らに効果的な利用法や制度などについても 考えて、本当に役に立つ技術にしていかな ければならない、と考えています。

エネルギー応用工学コース

量子エネルギープロセス分野

(量子化された状態を巧みに利用するエネルギー変換材料を創る)

佐川尚教授 蜂谷寬准教授 http://www.quantenepro.energy.kyoto-u.ac.jp

研究概要

自然光である太陽光や人工光であるレー ザーを利用する材料について研究してい ます。すなわち、

- (1)金属硫化物や金属酸化物の量子ド ット、ナノワイヤー、導電性ポリ マーやらせんポリマーのナノファ イバーなどの新材料の設計と多重 積層薄膜作製プロセスの開発
- (2)上記材料の光学特性評価、電気特性評価
- (3)上記材料を用いたエネルギー変換 素子の組み立ておよび光電変換や 発光などの機能評価

を行なっています。

研究実施例

当分野で作製した材料とそれらの材料を 用いたエネルギー変換素子の研究実施例 を以下に示します。

種々の金属硫化物量子ドットが 示す多様な発光特性

金属酸化物や金属硫化物のナノ構造 体と導電性ポリマーを積層して作製 した有機無機ハイブリッド太陽電池

スプレー塗布法で 作製した有機薄膜 太陽電池(4×7 = 28)モジュール

水素発生用の金属酸化物ファイバー光触媒

以上のように、ナノテクノロジーを利用 した太陽光エネルギー利用・変換システ ムの材料・プロセス設計と高機能化を検 討します。エネルギー変換効率の低さや、 不安定性といった理工学的な問題の解決 に向けて、高変換効率新材料・高耐久性材 料作製プロセスを検討しています。

エネルギー化学分野 (分子・原子レベルでのエネルギー変換と貯蔵)

松本一彦 准教授 黄珍光 助教

二次電池 Secondary Batteries

近年、二次電池はすでに実用化しているモバ イル機器だけでなく、自動車用電源や余剰電力 貯蔵への利用を目的に大型化・高出力化が盛ん に研究されています。

大型化・高出力化するに当たっては安全性を 高める必要があり、我々は可燃性溶媒を用いて いる現在の二次電池のかわりに、難燃性である イオン液体を用いた新しい二次電池を提案して います。また、レアメタルの使用について、将 来、大量に二次電池が普及した場合は資源枯渇 の懸念があるため、特に資源偏在性が低いナト リウムを用いた二次電池に注目し、低温から高 温まで幅広い温度域で作動する二次電池を開発 しています。

図1 イオン液体を用いたナトリウム電池

機能性フッ素化合物 Functional fluorides

フッ素は全元素中最も大きな電気陰性度を持ち、 ハロゲン中で最も小さな原子半径を持つため、その 化合物は高い機能性を発現します。例えば、電池用 電解液の多くには高電圧に対して安定性の高いフ ッ化物が使用されていますし、フライパンの表面に は高温において安定であり、焦げ付きにくいフッ素 系高分子であるテフロンが使用されています。

我々は取扱いが難しい無機フッ化物を用いて、新 規化合物を合成し、その物性や構造を調べることで、 様々な場面で役立つフッ素化合物の開発に取り組 んでいます。

図2 フッ素化合物の結晶構造決定

イオン液体 Ionic Liquids

イオン液体は第3の液体ともよばれ、塩化ナトリ ウムと同様に陽イオンと陰イオンから成るイオン 性の化合物であるにもかかわらず、室温付近で液体 となる物質です(水でも有機溶媒でもないという意 味で第3の液体)。イオン間のクーロン相互作用を 弱めるため、比較的大きな陽イオンや陰イオンを用 いることでこのような状態を作り出すことができ ます。

我々はイオン液体の難揮発性、難燃性、低融点と いう特長を生かして、安全な二次電池や電気化学キ ャパシタへの応用を目指した研究を行っています。 また、これまでに世界で最もイオン電度率の高いイ オン液体の開発に成功しています。さらに、原子、 分子レベルでのミクロな構造的特徴をマクロなイ オン液体物性につなげるという視点で基礎研究も 行っています。

石澤 明宏 教授 今寺 賢志 准教授 松井 隆太郎 助教

宇宙で最も普遍的な物質状態である「プラズマ」は、高い自由度を有する荷電粒子多体系です。このプラズマが創出する複雑現象の探求は、カーボンニュートラルなエネルギー源として期待されている核融合や、 プラズマ過程が深く関与する宇宙・天体物理の物質科学の進展に重要な役割を果たします。

我々の研究室では、そのようなプラズマの複雑な非線形・非平衡現象を、スーパーコンピュータによる数 値シミュレーションや統計・乱流・カオス理論により研究しています。そして、核融合や宇宙・天体プラズマを 中心に、光量子など産業応用も視野に入れた幅広い理論研究と教育に取り組んでいます。

1 核融合プラズマの乱流現象および電磁流体現象に関する理論・シミュレーション

力-ボンニュートラルなエネルギー源として期待されている核融合に関する研究は、国際熱核融合実験 炉ITERが2025年頃に稼働開始を予定しており、21世紀後半における実用化を目指して、今まさに大きな転換 期を迎えようとしています.

プラズマ・核融合基礎学分野では、核融合におけるミクロな乱流現象やそれに伴う自発的秩序形成、及び電磁流体(MHD)現象と呼ばれるマクロなダイナミックスに関する理論・数値シミュレーションを行うことで、そのような核融合エネルギーの実現を目指しています。また同様のダイナミックスによって支配される宇宙プラズマも対象とすることで、プラズマ物理の多角的な理解を行っています。

国際熱核融合実験炉 (ITER機構)

陽子線

陽子線生成(光速の70%)

Laser

x (µm)

/ (µm)

[https://www.fusion.qst.go.jp/] [https://www.qst.go.jp/site/jt60]

02 レーザー生成高エネルギー密度プラ ズマに関する実験・シミュレーション

高エネルギー密度プラズマは, 次世代の小型の粒子線がん 治療装置の開発など,医療・ 産業等への幅広い応用研究 が期待されています.

プラズマ・核融合基礎学分野では、超高強度レー ザーと物質との相互作用の実験・シミュレーション研 究を基礎に、高エネルギー密度状態の科学に関わる 様々な学術・応用研究に取り組んでいます。

データ駆動的アプローチを用いた プラズマ現象の数理モデリング **プラズマ・核融合基礎学分野**ではまた、得られた データを機械学習することで、そのデータがどのよ うな物理方程式系で支配 入力層 中間層 出力層 損失関数 されているか推論するアル ゴリズムを開発し、プラズ (x_i) $(f_i^n) \longrightarrow L(w_{i,j}, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{b})$ マ現象の数理モデリングを а $\frac{\partial f}{\partial t} + au\frac{\partial f}{\partial x} - b\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = 0$ 試みています.

研究室 URL http://plasma-fusion.energy.kyoto-u.ac.jp/

熱エネルギー変換分野(クリーン燃焼の研究)

教授 林 潤

カーボンニュートラル (CN) 社会の実現に向けて、熱機関およびこれを中心とする動力システ ムの高効率化、水素や合成燃料などの新燃料の有効活用が不可欠であり、その利用に際して、有 害物質の排出防止を図ることも重要です。本分野では、上記を目的とした研究・開発を進めてお り、主に、(1) 水素やそれをもとに製造される合成燃料などの新燃料を用いる機関の熱効率向上 と排気浄化、(2) ディーゼル機関およびガス機関などの高熱効率化手法の立案、(3) 燃料噴霧、 噴流の着火・燃焼現象の解明、(4) 熱機関の燃焼室内における壁面熱伝達現象の解明、(5) エ ネルギー損失を低減・回収するシステムの総合的検討、などを行っています。

水素および CN 燃料の高効率利用

燃焼機器における水素の活用は CN 社会を実現するうえで必須のアイテムと言わ れており、内燃機関においても水素の利用が強く望まれています。水素を専焼で用 いるだけでなく、メタンとの混焼や、水素をもとに製造された合成燃料との混焼利 用においても、高熱効率かつ低エミッションで運転するための設計・運転指針を明 らかにするために、エンジン実機を用いた研究や、燃焼過程および壁面からの非定 常な熱伝達過程を明らかにするための研究を行っています。

反応性流体と熱移動に関する基礎試験

反応性流体は、宇宙機推進を含めて多くの機器に用いられ ており、CN を目指した既存燃料の燃焼改善だけでなく、新燃 料の燃焼機構に対する研究開発が望まれています。特に複数 の物理状態(相)が混在する環境における燃焼現象は、複雑で あり効率が良く、環境負荷物質の排出の少ない燃焼が求めら れます。(右図:小型宇宙機の推進に用いられるスラスタ内部 で起こる燃焼現象と壁面冷却を模擬した試験の図)本研究室 では、実用機器内の複雑な環境を、単純な反応性流れ場を用 いて表現することで、物理現象を抽出するための研究を行っ ています。

図:左) こうのとりの外観,中)スラスタ模式図, 右上)スラスタ内部の燃焼の様子,右中下)スラス タ壁面に形成される液膜を模擬した実験の様子

プラズマ支援を用いた点火・燃焼制御

燃料の希薄化などによって顕在化する燃焼の不安定化 を解決することを目的として、誘電体バリア放電を未燃混 合気および燃焼場に対する重畳や、レーザー点火、ナノ秒 繰り返し放電による点火支援などのプラズマや電界を用 いた燃焼支援・点火支援に関する研究を行っています。プ ラズマを利用した点火支援によって、反応始動に必要な時 間が短縮する(右図)ことが示されるなど、低炭素社会を 実現するために必要な技術として期待されています。

図:ナノ秒繰返し放電 (NRP) と火花放電によって形成さ れる火炎核の成長の様子.

研究室ホームページ:http://cpel.energy.kyoto-u.ac.jp

変換システム分野(クリーンエンジンの研究)

教授 川那辺 洋, 准教授堀部直人

高効率、安全かつ環境に調和した熱エネルギー変換システムの設計・制御・評価を目的として、種々 の変換システム構築の基礎となる熱流体媒体の物理・化学過程の解明とその制御に関する研究を行いま す。特に、流速・温度・濃度などのレーザー画像計測、ガス流動と燃焼の数値流体力学シミュレーショ ン、有害物質生成の反応動力学、などの燃焼診断・予測手法を基礎として、気体噴流・液体噴霧の挙動 ならびに着火・燃焼過程の解析、自由噴流火炎および噴霧火炎における乱流混合とその作用、低環境負 荷システム制御とその関連事項などを対象とします。

エンジン燃焼に関する基礎的研究ー複雑な燃焼現象の解明

当研究室では高出力・高効率でクリーンなディーゼル機関を 実現するために、過給装置および電子制御高圧燃料噴射システ ムを備えた単気筒ディーゼル機関を用いて、PCCI 燃焼などの新 燃焼方式を含めた燃焼制御ならびに新燃料や排気後処理に関す る実験研究を実施しています。

またガスエンジンに他対して、出力全域での高い熱効率を実 現するために、過給装置を備えた単気筒機関を用いて、予混合 圧縮着火(PCCI)燃焼や軽油を着火油として用いるディーゼル デュアルフューエル (DDF) 方式の燃焼に関する実験研究を行 っています。

エンジンテストベンチ (性能・排気試験,可視化)

レーザーを応用した燃焼計測・診断

空気一燃料の混合は、各種燃焼システムの中で基本かつ重 要な過程です。効率的な燃焼制御や有害物質生成の予測・抑制 のためには、その流動および混合について理解を深める必要 があります。

当研究室では、PIV(粒子画像流速測定法)やLIF(レーザ - 誘起蛍光法)等の各種レーザー計測法を用いて、自由噴 流・噴流火炎の流動、濃度および温度の計測を行い、噴流の 混合過程の解明を試みています。

流れと燃焼のシミュレーション

当研究室では、シミュレーションによる燃焼現象の理解や、より有用なシミュレ ーションツールの構築を目指して、次のような研究を実施しています。

- 1. FAE (Flame Area Evolution) モデルを用いた火花点火機関内燃焼の CFD シミ ュレーション
- 2. セル内の混合気濃度・温度の不均一性を考慮した RANS による PCCI 燃焼の シミュレーション
- 3. CFD に組み込み可能な化学反応動力学モデルの開発
- 4. Soot 生成・酸化モデルの開発
- 5. ゼロ次元確率過程論混合燃焼モデルの開発

研究室ホームページ:http://cpel.energy.kyoto-u.ac.jp

装置配置図(LIF 法)

エンジン筒内の数値解析 (燃料濃度分布)

レーザー光学計測

49

教授 澄川貴志 准教授 安部正高 研究室 HP:https://www.force.energy.kyoto-u.ac.jp/

ナノ・マイクロ材の未知の力学現象を紐解く。

エネルギー関連におけるナノ~マイクロサイズの材料が持つ特有の強度・疲労特性やマルチフィジ ックス特性の解明とともに新奇材料の設計・創成を目指し、実験的・解析的研究を行っています。

ナノ・マイクロ材料の強度・疲労特性の解明

ナノ~マイクロサイズの材料は、特異な機械特性を示すことが予測されています。当研究室は、電子顕微鏡内での力学実験については世界トップレベルの技術を有しており、さらに力学解析を援用してナノ~マイクロ材の強度や破壊機構、疲労挙動などの解明を行っています。

ナノ構造体のマルチフィジックス特性の解明

強誘電性、磁性および電気特性等の物性は、カや変形などのカ学場との相 互作用(マルチフィジックス)を示します。とくにこれまで知られてきた現象とは 大きく異なる挙動を示すナノスケールの材料を対象にして、そのカ学作用を 電子顕微鏡内実験や各種シミュレーションによって明らかにしています。

メカニカルメタマテリアルの開発

材料中に制御した人工的な構造を持たせることで、自然界の物質では現れ ない物性を発現する「メタマテリアル(物質を超える物質)」を創り出すことがで きます。当研究室では、遺伝的アルゴリズムなどを用いてメタマテリアルの構 造設計を行い、3次元プリンタを用いて実際に作製してその変形・破壊挙動を 解明し、新たな材料の創製を試みています。

最新の研究ができる多くの実験・解析装置を所有しています。

機能システム設計分野

(未来を担う材料開発と非破壊評価技術)

教授 今谷 勝次 准教授 木下 勝之

構造材料だけでなく、電磁気・光材料、形状記憶材料や発泡金属材料など、より高機能な先 進材料等の変形や機能を、理論や実験、コンピュータシミュレーションによって解明し、よ り高機能で知的な材料システムを設計、創製することを目指しています。また、材料のモデ リングならびに熱,超音波,電磁場を利用した機械材料や構造物の機能の劣化、損傷・欠陥 などを評価する非破壊計測技術の開発にも力を入れています。

複雑だが、、、究極の軽量材料(材料のモデリング)

気孔率が 90%を超える発泡金属に代表されるセル構造 体は,究極の軽量材料と言えます.セルは複雑な構造を持 っため,簡単な実験プロセスのシミュレーションでさえも, 膨大な計算時間を要します.このような複雑な構造を持つ 物質の変形機構を理解した上で,機械特性や機能特性を記 述できる新しい巨視的材料モデルを構築し,利用促進/機 能向上に貢献しています.

温度と変形を連成させて,,,背面のき裂を探る

下を向いて道路を歩いてみてください...10分も歩くうちに数十基のマンホールを見つけることができますよ.設置後数十年も経過したマンホールが一杯あるのです.それが突然壊れたら,,,社会基盤設備の健全性を確保するために,表面から熱を加え,構造表面の凹凸や変形を計測することで,裏面を見ることなしにその場で危険なき裂を見つける探傷装置を開発しています.

超音波を利用して、、、材料の内部を見えるようにする

超音波は、医学での内臓検査や漁業での魚群探知機など 様々な場所で活躍しています。最近はフェーズドアレイと 呼ばれる超音波を送受信できる素子を多数並べて、材料の 内部を可視化する手法が注目されています。我々は,信号 の処理方法に独自の手法を考案し、従来あるものより、よ り詳細に材料内部を可視化できる手法を研究しています。

材料の磁気的な特性を利用して,,, 材料の応力や劣化を診断する

鉄鋼材料は、現在最も構造物や機械部品に使われている 構造材料であるだけでなく、磁石にくっつきやすい強磁性 という性質も持っています。この性質を持っている材料は 力によって材料が変形したり,繰り返し使用され材料が劣 化したりすると磁気的な特性が変化する特徴を持っていま す。我々は、それらの磁気的特性の変化を計測できる様々 な計測法を開発しています。

材料プロセス科学分野

教授 三宅 正男, 助教 池之上 卓己

持続可能な未来に向けて、新しいエネルギー変換・貯蔵デバイス、材料およびその製造プロセスに 関する基礎及び応用研究を行っています。電気化学を基礎とする電池や材料合成、表面処理、マイク ロ構造体の形成に関する研究や、新規電子デバイスの創製に向けた半導体製膜に関する研究を推進し ています。

1. アルミニウム電池の開発

再生可能エネルギーの不安定な供給を制御するためのエネルギー貯蔵デバイスとして、高エネルギ ー密度の電池が必要とされています。現在、Li イオン電池が普及していますが、その性能向上は限 界に近づきつつあります。また、火災の危険性や Li 資源の安定供給への不安からも、Li イオン電 池に代わる次世代電池の開発が必要とされています。

そこで当研究室では、金属 Al を負極とする新しい電池(Al イ オン電池, Al 空気電池)の開発に取り組んでいます。Al の電気 容量は、重量当たりでは Li の次に大きく、体積当たりでは Li を凌ぎます。また、Al は、資源が豊富で安価であり、さらに、 金属 Li や Na, Mg に比べてはるかに安全性が高い特長があり ます。これらの理由から、Al 電池が次世代電池の有力候補とし て期待されています。当研究室では、独自の非水系電解液を開発 するとともに、負極 Al の電析/溶解反応挙動や正極グラファイ

トへのイオンのインターカレーション反応を解析し、新しい材料 を開拓することで、高エネルギー密度かつ高出力の Al 電池の実現を目指しています。

2. ミスト CVD 法による半導体製膜と太陽電池への応用

パソコンやスマートフォンをはじめとする現代の暮らしを支え る電子機器には、半導体材料が必須です。これらの半導体材料の 多くは、これまで、真空を利用するプロセスで作製されてきまし た。しかし、真空プロセスには、エネルギー消費が多い、高コス ト、大面積への製膜が困難などの課題があります。

そこで当研究室では、大気圧下でも高品質な半導体膜を成膜で きるミスト CVD 法という独自の手法を用いた成膜の研究をし ています。次世代の太陽電池として期待されるペロブスカイト太 陽電池や、透明な酸化物半導体である NiO, NiMgO, 金属–非金

属転移を発現する VO2 などの材料を製膜し、その電気的特性を評価するとともに、これらの薄膜を 使ったデバイス(X線撮像素子,紫外線 LED,スマートウィンドウなど)の作製を行っています。

研究室ホームページ: http://www.mater.energy.kyoto-u.ac.jp

現在の典型的な AI 電池の模式図

ミスト CVD で製膜された ペロブスカイト薄膜

エネルギー応用工学コース

「熱化学(化学熱力学)」を基礎学理として、材料の生産プロセスの研究に取り組み、日本の カーボンニュートラルの実現に貢献することを目指しています。各種材料の生産・リサイクルプロ セスを検討し、どうすればより少ないエネルギーと資源で材料が生産できるかを追求しています。

酸化物の相平衡と成分活量

金属材料の生産では、不純物を酸化物相 (スラグ)に吸収させますが、環境保護の観 点からフッ素レス化やスラグ発生量の低減

が求められています。 当研究室では、様々 なスラグ系の相平衡 関係や成分活量を 明らかにし、工業的 要請を満足する精錬 能を持ったスラグの 新しい設計指針を提 したいと考えてい ます。

赤熱した試料

環境調和材料の結晶成長

結晶成長は、結晶の特性を発現させるためになくてはならない、材料製造プロセスの 心臓部です。そこで、創エネルギーや省エ ネルギーの鍵を握る太陽電池材料やパ ワー半導体材料の結晶成長を行っていま

環境調和材料の硫化スズ結晶

ハロゲン元素の無害化

廃電池や廃プラスチックを再資源化する際、フッ素や塩素といったハロゲン元素が 反応容器内に放出され、設備の腐食や有

塩素を吸収する包接化合物

高温反応場のその場観察

材料の高品質化や素材製造プロセスの 高効率化を実現するため、反応場で生じる さまざまな現象の解明が求められています。

そこで、最高1800 ℃まで観察可能なそ の場観察顕微鏡を 開発しました。これ を用いて、次世代半 導体材料の結晶成 長など、高温での複 雑な界面現象を明 らかにしています。

高温その場観察顕微鏡

プロセス熱化学分野HP : http://www.lupin.mtl.kyoto-u.ac.jp/

原子核工学コース

原子核工学コース

┏子核,原子,分子などのミクロの視点から 最先端の**量子テクノロジー**を追求しています!

- 新しい機能を備えた素子の開発
- 信頼できるエネルギーシステム開発など

原子核工学コース

① 量子エネルギー物理工学	② 量子エネルギー物理化学
(1.1) 核エネルギー変換工学 (1.2) 量子制御工学	(2.1) 燃材料工学 (2.2) 重元素物性化学
核融合 などの反応によって 生成するエネルギーを 安全かつ効率的に利用	エネルギーの効率的な リサイクル 核融合炉の構築に必要な 材料工学
② 昌スシフテル工学	《 旱之物好工学
3.1) 量子ビーム科学 (3.2) 粒子線医学物理学	 (4.1) 量子物理工学 (4.2) 由性子工学
(J.Z) 植了 版 医子 切 建子 量子ビームを用いた	(4.3) 中性子源工学 (4.4) 中性子応用光学
ナノマテリアル開発 最先端の 粒子線がん治療 の基盤技術	ペ ペ

工学部 物理工学科

原子核工学コース

https://www.s-es.t.kyoto-u.ac.jp/nuc/ja

■ 量子の科学と工学

原子レベルのミクロスケールは、粒子と波動の二重性を持つ量子の世界です。20世紀初 めに量子が発見され、その二重性による不思議な現象は、量子力学で説明されています。 そして今では、量子ビーム、レーザー、半導体、超伝導、エネルギーなど、さまざまな分 野に利用されています。21世紀はこのような量子の科学や、それを応用した工学がどんど んと生まれ、物質、エネルギー、生命、環境などに役立てられることになるでしょう。

■ 原子核工学コースの構成

原子核工学コースは、学部では物理工学科・原子核工学コース、大学院では原子核工学専 攻という名称で、4 つのグループ、10 の分野(研究室)から成り立っています。各グルー プ・分野が協力しあって、量子の科学と工学について研究と教育を行なっています。

(1-1) 核エネルギー変換工学

~ 限りあるエネルギーを限りなく安全に、かつ有効に利用するために ~

教授:横峯健彦 講師:河原全作、成田絵美

■ 混相流工学一理論・実験・シミュレーション・応用

混相流とは、気・液・固相(体)が複数共存する流れで、極めて複雑な構造と動きを見せます。とりわけ、異なる相が接する境界界面で生じる様々な現象が、流れを複雑にし、理論の成立を妨げます。また、私たちの研究室では、界面の物理と熱物質移動の理論的研究、マイクロメートルスケールから原子炉・ 核融合炉スケールの混相流を対象とした実験的研究、数値シミュレーション、そこで構築した理論・ア イデアの社会実装に関する応用研究を行っています。

■ 核分裂炉・核融合炉のエネルギー変換と安全性に関わる伝熱流動

現在利用されている軽水炉の革新的な高度化や次世代の核分裂炉である高速炉、核融合炉など、エネ ルギーを社会に供給する原子炉には様々なタイプがあります。そこで発生したエネルギーを安全に効率 よく利用するために、関連する伝熱流動現象に関する研究を行っています。

■ 機械学習を用いた核融合プラズマの理解・予測

核融合炉において燃料となるプラズマの理解や予測のために機械学習を利用した研究を進めていま す。プラズマ中の熱の流れは微視的な揺動によって支配されています。数値計算によって可視化された 揺動の解析や熱の流れの高速な予測を行うニューラルネットワークモデルを開発しています。

(左) 核融合炉の構造と(中央) プラズマ中の揺動の波数空間上での可視化、(右) 機械学習モデルによる温度の予測

(1-2) 量子制御工学 ~ 核融合の実現をめざして超高温プラズマにおける物理現象の解明と制御手法の開発 ~ 教授:村上定義 助教:森下侑哉

■ 核融合開発が新たな段階へ

核融合発電を目指す国際協力(日、欧、米、露、中、韓、印)が進め られています。国際熱核融合実験炉(ITER)の建設がサン・ポール・レ・ デュランス(フランス)で本格的に開始され、完成まであと数年となり ました(図1)。核融合反応を維持することができる実験炉の完成によ り、核融合開発が新たな段階に進もうとしています。

■ 核融合プラズマ中の輸送現象

約1億度の核融合プラズマを効率的に閉じ込めるためには、プラズマ 閉じ込めを支配している物理機構の解明が必要です。単純な拡散現象で は説明できない急峻な圧力勾配をもつ輸送障壁が実験的に観測され、ト ーラスプラズマの閉じ込め性能向上に寄与しています。このような輸送 障壁形成を説明する輸送モデルの構築や定量的な解析を行うための輸 送シミュレーションを進めています。

■ 波動によるプラズマの制御

高温プラズマを制御する有力な手段としての電磁波が利用されてい ます。数 10 kHz から 数 100GHz までのさまざまな電磁波が、プラズ マの生成、加熱、電流駆動、計測等に広く用いられています。その物理 機構を解明し、有効なプラズマ制御手法を開発するために、波動の励起、 伝播、吸収とそれに伴うプラズマの時間発展の解析を進めています。

図1:サン・ポール・レ・デュランス (フランス)に建設中の国際熱核融 合実験炉 (ITER)

図 2:電磁流体平衡における Pfirsch-Schlüter流

■ データ駆動科学による核融合プラズマの解析・制御

近年、核融合の分野でもデータ駆動科学の活用が進められて来ています。本グループでも機械学習を 用いた輸送モデルの構築やデータ同化手法を用いた解析・制御システムの開発など、核融合研究へのデ ータ駆動科学の応用を進めています。

図3:可視光トモグラフィーによる電磁流体平衡の推定

図4:データ同化を活用したデジタルツイン制御

発雷所

■ キーワードは放射性廃棄物、廃炉工学、物理化学

使用済み燃料から発生する高レベル放射性廃棄物や福島第一原発事故で生じた燃料デブリの安全か つ合理的な処理・処分には、廃棄物や燃料デブリの性状およびそれらに含まれる放射性物質の環境中 での移行挙動の理解が欠かせません。私たちの研究室では、化学平衡や反応速度など物理化学的な視 点から、様々な核種の振る舞いを明らかにする研究を行っています。

■ 福島廃炉への貢献

福島事故によって発生した燃料デブリの 取り出し、処分に向けては、燃料デブリの 物性や挙動を明らかにすることが不可欠で す。そこで、ウランを含む模擬デブリを高 温合成し、最先端の物性評価を行うととも に、地下水との反応を調べています。これ により、燃料デブリの処分を見据えた合理 的な処理法の提案、数万年にわたるより安 全で信頼性の高い処分方策を確立できると 考えています。

■ 高レベル放射性廃棄物の処分

高レベル放射性廃棄物を酸素の無い地下 深くに埋設する地層処分では、地下での放 射性物質の非常に遅い状態変化を予測し、 遠い将来の人間や環境の被ばく線量を見積 もる必要があります。複雑な地下水場での 核種挙動を熱力学的観点で記述するため、 特殊な地下環境を模擬するラボや深地層の 研究所で実験と解析を積み重ねています。

■ アクチノイト'固体・液体の多様な分光研究

上記の知見をより確かなものにするに は、模擬デブリや廃棄物を構成する固体・ 液体のミクロスコピックな化学構造やその 状態変化を明らかにすることが重要です。 SPring-8やJRR-3など学外大型施設で最先端 の分光装置を活用した分析実験を推進し、 核種の自然界での複雑な振る舞いのモデル 化を目指しています。

■ 医療分野への挑戦

治療や診断に放射性物質を活用した最先 端の医療分野では、核種を含む薬剤の安定

(地上) 浅い 地下水 いつ 何が 放射性 どれだけ? 深い 物質 除染や処分 地下水 のより適切な 方法は? |廃棄物処分場(地下)| 種々の放射性物質を取り巻く環境 デブリ高温合成 大型施設での分光実験 最先端の物性評価 ・地下水反応 核燃料の高温炉反応 R-4(8 岩石・鉱物へて、の収着反応 機/有機イオン コロイドの生成 との錯生成反応 放射性核種の 下水による移行 腐植物質(フミン酸) の相互作用 沈殿溶解反応 加水分解反应 沈殿·固相

地下環境中での核種の様々な反応 🍯

性確保や、その生体標的への有効性の評価が必要です。本研究室では基礎的な観点から、モデル物質の開発やその生体内での安定性評価等に挑戦しています。

(2-2) 重元素物性化学 ~ 重元素アクチノイドの興味深い性質を探り、活用し、安定化に寄与~ 教授:山村朝雄 助教:外山真理

■ 未解明の性質を秘める発見 70 年余の元素群

原子炉でウラン燃料の核反応を起こし、一部は重い人工 元素であるプルトニウム等の重元素を作ります。これらの 元素は周期表では「アクチノイド系列」に属し(図1)、 15 個の系列元素の全てが放射性です。この系列の人工 元素は人類により発見されて70年余しか経っておらず、 未解明の興味深い物性化学的性質を秘めています。

長寿命放射性廃棄物であるマイナーアクチノイ ドの安定化は人類にとってのチャレンジ

原子炉で生まれるネプツニウムやアメリシウムは、 燃料として再利用できるウランやプルトニウムに比べ ると量が少ない「マイナーアクチノイド」と呼ばれま す。このマイナーアクチノイドは数千年~数百万年も の半減期を持ち、アルファ線という強い毒性を持つ、 長半減期放射性廃棄物とされています。マイナーアク チノイドを安全に管理できる方法を見出すことは人類 にとって原子力を利用するために欠かせない課題です。

伝播性ガン核医薬が放射性廃棄物から作られる

いきなり話が変わりますが、全身に転移した伝播性 ガンに対して、アルファ線しか出さない RI(放射性同 位元素)を利用した標的治療薬により治癒した例が 2016年に報告されました。ガン細胞の抗体に特異的に 結合する抗原を、アルファ線を出す RIにつけた錯体の 配位子にリンクすることで、ガン細胞以外を傷つけず に効率的に治療を行うことができるのです(図3③)。 こうした核医薬に適した RIの特徴をもつアクチノイド 元素は、放射性廃棄物から作られるものが多いです。

■ 相対論的量子化学による重元素の物性化学

人類に功罪半ばするアクチノイドを使いこなすため、電 子的性質を放射光などを使って調べますが、私たちは相対 論効果を十分に取り入れた計算を行ってきた実績があり ます。重元素物性化学は、核医薬用の錯体化合物の合成・ 探索や、放射性廃棄物の安定化のために注目されている研 究分野です。

図 1 アクチノイド系列のウランより重い人工元素は 発見されて 70 余年の謎の多い元素群

図2 核医薬用 Ac³⁺のモデルとしての U³⁺(左と中央) と U⁴⁺

図3 アルファ放射体としてのアクチノイド錯体の 核医薬への利用や、安定化の検討

(3-1) 量子ビーム科学

~ 量子ビーム科学を学び先進科学・技術に活かす~

教授:斉藤学 准教授:土田秀次、松尾二郎、間嶋拓也 講師:瀬木利夫 助教:今井誠

■ 加速器からの量子ビームにより「原子衝突反応ダイナミクス~生体物質の照射影響」を探る

荷電粒子ビーム(イオンや電子)あるいはレーザーなどは総称して量子ビームと言います。これらを 物質(固体・液体・気体・プラズマ)にあてると物質を構成する原子や分子に大きなエネルギーが与え られます。その結果、様々な量子現象が起こり電子の状態は全く別のものに変わってしまいます。さら には量子ビームによる特異な衝突反応場によって通常では考えることも作ることもできない構造をも つ新奇な粒子・物質が形成されたりします。このように、量子ビームは個々の原子や分子に直接作用し て物質のナノスケールレベルでの状態を変えるため、これにより我々が知覚しているマクロスケールの 性質に変化をもたらしたり、我々の想像を超えた新しい性質・形質を発現させたりすることが出来ます。

当研究室では、精密に制御した量子ビームをあらゆる物質に衝突させ、原子分子レベルで起こる反応 の基礎的解明から生命科学や宇宙科学への応用までを考えたテーマで研究を行っています。中でも、加 速器からの重イオンビームを使って、液体中の原子分子衝突反応を詳細に調べる研究を世界に先駆けて 行っています。この研究では、液体中の生体分子に対してイオンビームからのエネルギー付与によって 起こる特異な分子損傷ダイナミクスを調べることが可能になり、放射線によるがん治療などを行う際の

物理学的基礎データを提供しています。 また、極低温まで冷却した分子イオンに 量子ビームを照射する技術の開発研究 も行っています。この技術によって、低 温な宇宙空間での分子生成や進化に対 する宇宙紫外線や放射線の影響を、宇宙 に行くまでもなく、研究室で調べること ができるようになります。

MeV イオン加速器のビームライン

■ 量子ビームによる革新的ナノプロセス・評価技術の開拓

革新的な量子ビームを用い、ナノテクノロジーや生命科学分野で使われる新しいプロセス技術、評価、

シミュレーション技術の研究開発を行っています。例え ば、多数の原子集団であるクラスターのイオン、1000万 電子ボルトという非常に大きなエネルギーを持った重 粒子、パルスの幅が 10⁻¹² 秒以下の極短パルスのレーザ ーなどの様々な量子ビームを使った研究を行っていま す。量子ビームの持つ特異な性質を利用することで、こ れまではできなかった新しいナノプロセスや評価を実 現することができます。例えば、次世代の微細デバイス に用いられるナノレベルの加工技術、生体材料の分子イ メージング、さらには物質中の電子応答や格子振動など の超高速で起こる物理現象の観測もできます。

様々な量子ビームを用いた研究・評価装置

■ 医学物理学とBNCT

医学物理学とは、医療、特に放射線医療・粒子線医療を 支える物理・工学の総称です。重要な使命は「放射線治療 法の高度化の促進」と「品質保証」です。がん細胞を選択 的に破壊できる特徴を持つ硼素中性子捕捉療法(BNCT)に 重点を置き、医学物理学に関する研究に取り組んでいます。

■ 照射システムに関する研究

原子炉および粒子線加速器を利用した照射システムについて研究しています。成果として「京都大学研究炉(KUR)重水設備」の改造および「サイクロトロンベース熱外中性子源(C-BENS)」の開発(住友重機械工業・ステラファーマと共同開発。2020年3月に医療機器として承認)があります。

原子炉を利用した照射システム(KUR 重水設備)

粒子線加速器を利用した照射システム(C-BENS)

■ 線量評価に関する研究

他の放射線治療と同様に、BNCT でも、照射システムの特性評価時、品質保証/品質管理(QA/QC)時、 患者への治療照射時、などの各フェーズにおいて適正な線量評価が必用です。特に治療時における簡 便・低労力で 3D かつリアルタイムの線量評価を究極の目標として、様々な評価手法を研究しています。

線量評価統合システム

BNCT 時の線量分布評価

物理工学科原子核工学コース

(4-1) 量子物理学 ~ ニューラルネットワークによる自然科学の理解 ~ 助教:小暮兼三

■ ニューラルネットワークとは

ニューラルネットワーク(NN)は、脳をモデルとした人工知能です。脳細胞が電気刺激を次の脳細胞へ伝える機構を、計算機上で再現しています。その中で、脳細胞は活性化関数という簡単な関数で近似し、活性化関数を連続して何段にもつなげた合成関数を作ることで、脳全体の模型としています。

近年、NN は画像認識・生成、音声認識・生成、文書認識・生 成など多くの分野で実用化されています。特に、生成能力が急速 に進化してきています。

また、NN は物理学における関数の近似法である「変分法」 のパラメータが非常に大きいものだと見ることが出来ます。

DALL-E が生成した「自然科学を理解する ニューラルネットワークのイメージ図」

■ NN による自然科学の理解

NNは、実用的には成功をおさめつつあります が、NNの物事の理解は非常に多くのパラメータ に埋め込まれているため、NNがどのように物事 を理解しているのかを知るのは、簡単ではあり ません。

当研究室では、1次元量子力学のポテンシャル を入力とし、エネルギースペクトルを出力 として NN を学習しました。この学習済み の NN に対して、入力による微分を計算す Existence probability distribution

入力データとしても出力データとしても与えていない物理量 を NN は学習の過程で学んでいた

ることにより、学習中に与えられていない波動関数の大きさをすでに知っていたことを示しました。

■ NN と自然科学のこれから

NN の自然科学への応用もすでに始まり、 加速していますが、実用分野に比べるとま だまだこれからという所です。自然科学の 分野においては、理解に重点が置かれるた め、NN からどのように理解を引き出すのか が一つの課題だと考え、研究を進めていま す。

データ取得可能領域で学習して、仮想実験を行える

(4-2) 中性子工学

~中性子と物質の相互作用の理解に基づく材料・要素技術開発と応用~

教授:檜木達也 准教授:田崎誠司 助教:安部豊

中性子に耐える材料・要素技術の開発

中性子は、原子との衝突により欠陥生成などを引き起こし、材料特性に大きな影響を与えます。米 国の研究炉(HFIR 炉)などにより、中性子と物質の相互作用の理解に基づき、中性子照射下において も強度の劣化しない、10μm 径程の炭化珪素繊維で強化した新たな材料、要素技術開発を行っています。 原子力・核融合への応用をはじめ、優れた耐環境特性から航空・宇宙への展開も期待されています。

炭化珪素繊維及び本分野で開発した炭化珪素繊維強化複合材料

小型中性子源の新展開

近年、大強度中性子発生施設に加え、陽子加速 器を利用したコンパクトな中性子源の利用によ り、中性子利用のすそ野を広げ、より広範囲の応 用分野に適用しようとする研究が進んでいます。

本研究室では、理学部の小型中性子源を利用 し、設置する装置にあわせた減速材形状・材質の 効率化の研究を行っています。例えば、数meV と

いう低いエネルギーの中性子強度は、冷やした減速材の前に前 置減速材を置いた方が強くなります。さらにその中性子を用い た透過実験、スピン干渉実験、回折実験等への応用についても 研究しています。また、これらの研究結果を基礎として、日本 原子力研究開発機構の JRR-3 などのより大型の中性子源への研 究展開も行っています。

減速材表面の冷中性子分布。左がポリエチレン前置 減速材のない場合、右がある場合。前置減速材があ る方が冷中性子強度が強い。

(4-3) 中性子源工学 ~ ミクロからマクロまで、基礎から応用まで、加速器から原子炉まで~ 教授: 堀順一 准教授: 石禎浩、高橋俊晴、山本俊弘、 助教:上杉智教、栗山靖敏、沈秀中、寺田和司

■ 中性子の核反応断面積の測定・評価

原子炉等における中性子の振る舞いを評価するため に必要な物質と中性子の相互作用に関するデータ(核反 応断面積)の測定を原子炉実験所の電子線型加速器や原 子力機構の J-PARC などの実験装置を用いて行っていま す。この研究では、反応する中性子のエネルギーを精度 良く決めるために、その速度を測定してエネルギーに換 算する飛行時間分析法と呼ぶ方法を用います。マイナー アクチニドや長寿命半減期を持つ核分裂生成物など、革 新型原子炉の開発や放射性廃棄物等の処理処分技術の 開発に必要な核種の反応断面積の測定を行なうととも に、精度向上のための手法開発を行っています。

反応断面積の測定例。マイナーアクチニド核種といわ れる Np-237 について、その中性子捕獲断面積の新し い測定結果を示している(Present(TOF))。

■ FFAG 加速器を中心とした加速器開発およびその応用に関する基礎研究

加速器駆動未臨界システム(ADS)、強力中性子源等に用い られる FFAG 加速器の開発とその応用について研究を行って います。なかでも FFAG 加速器における非線形ビーム力学、 イオン化ビーム冷却法などの加速器物理工学に関する研究 開発を進めています。ADSとは、加速器からの高エネルギー 陽子を使ってパルス状の中性子を発生させ、それを未臨界状 熊の原子炉に入射して、大量のエネルギーや中性子を利用で きるようにするものです。現在、私達は、FFAG 加速器から のビームを用いた基礎実験を行い ADS の実現のために、 FFAG の開発を進めています。

■ 原子力施設の安全性研究

原子力施設・設備を安全に運転・管理するための研究として、原子 炉の核・熱特性に関する研究、核燃料の臨界安全性に関する研究を進 めています。原子炉の核・熱特性研究は、核特性解析手法の高度化・ 精度向上を目的として、研究用原子炉 KUR の臨界性、反応度特性、 燃焼特性等の測定・評価を行っている他、コールド試験装置による熱 水力挙動に関する研究や次世代炉燃料の健全性評価等に取り組んで います。また、核燃料の臨界安全性の研究では、モンテカルロコード による未臨界体系のシミュレーション技術の開発や臨界事故解析手 法の開発を行っています。

京大 FFAG 陽子加速器複合系 : 負水素イオン線 形加速器と FFAG シンクトロンを用いて陽子 ビームを 150MeV まで加速し、隣接する臨界 集合体にビームを導入する。

運転中の KUR 炉心。 チェレンコフ光 と呼ばれる原子核反応特有の青い光 を見ることができます。

(4-4) 中性子応用光学 ~中性子光学デバイスを駆使した低速中性子の高度利用~ 教授:日野正裕 助教:中村秀仁、樋口嵩

■ 中性子?

物質を構成する原子は原子核と電子で構成されています。水素より大きな原子の原子核は陽子と中性 子で出来ており、中性子は皆さんの体をはじめ、物質の重さの半分近くは中性子と言うこともできます。 ただ原子核の中に束縛されていない自由な中性子は約 15 分の寿命で崩壊します。この自由な中性子の 寿命は私達の宇宙の成り立ちに関する重要なパラメータで、質量を持つ中性子は重力研究でも重要な研 究対象です。電気的に中性な中性子ですが、もしプラスとマイナス電荷がほんの少しだけずれて存在(電 気双極子)していれば、新粒子の発見に繋がります。我々は中性子自身を研究すると共に、新たな中性 子利用による発見を目指しています。

■ 中性子ミラー?

電気的に中性な中性子ビームを制御(曲げる)ことは大変難 しいです。しかし中性子の速度が遅くなれば「波」としての性 質が顕著になります。これは量子力学という学問体系で記述で きますが、この波の性質を活かすと、ニッケルとチタン等の薄 膜を交互に精密に積層することで、中性子を反射できるミラー

(鏡)が出来ます。私達は世界最高レベルの中性子ミラー開発 技術を持ち、量子力学の基礎から分光器開発まで中性子光学を 活かした研究を展開しています。

利用が開始された J-PARC MLF 中性子共 鳴スピンエコー分光器群 (VIN ROSE)

■ ロゼワイン?~世界最高の中性子共鳴スピンエコー分光器実現を目指して~

中性子ミラーを用いてスピードの遅い中性子ビームを取り出し、スピンという物理量を精密に制御することで、今までどの装置でも見えなかった物質の時間—空間領域が見える装置:中性子共鳴スピンエコー分光器(VIN ROSE)を世界最強のパルス中性子源を持つ茨城県東海村にある J-PARC の物質生命科学研究施設(MLF)で高エネルギー加速器研究機構(KEK)のスタッフと協力して開発しています。

VIN ROSE:フランス語でロゼワインの意味です。時間が経過して熟成することにより価値を上げ、研究者たちが楽しんで研究が行えるようにと願って、当研究室がこの装置の命名をしました。

■ 中性子イメージング?量子ビーム検出?新たな研究用原子炉?

中性子は、強い透過力を持ち、物質内部の水の振る舞いや金属容 器内の構造を3次元的に見ることが可能です。さらに中性子の位相 に注目したイメージング手法は、サブミクロンの平均構造のゆらぎ も同時に見ることが可能となります。中性子利用のさらなる発展、 よりよい未来を目指して、福井県敦賀市「もんじゅ」サイトで建設 計画が進行中の新たな試験研究炉の発展に向けて精力的に活動し ています。また紫外線や放射線によって光るプラスチックを開発 し、安価で高感度の放射線検出器開発を推進する等、広く開発研究 を行っています。

開発した回転楕円体中性子集光スー パーミラー

宇宙基礎工学コース

京都大学工学部物理工学科

宇宙基礎工学コース

航空宇宙工学の基礎をなす6つの研究分野で構成

- 航空宇宙力学分野
- 流体力学分野
- 流体数理学分野
- 推進工学分野
- 制御工学分野
- 機能構造力学分野

航空宇宙力学分野

力学的理解と運動知能に基づく航空宇宙システムの 知能化制御とシステム設計

人間の技能の解明に 基づく宇宙ロボットの

流体数理学分野

物材

■ ■動量源によるB点への運動層

物体

自律的制御

確立とその応用

昆虫の運動知能に基づく脚型宇宙探査 ローバの制御(上)と 蝶の飛翔原理の解 明(下)

応用例:ラジオメータ効果の研究

radiometric force

resulting heat flux

流体力学分野

高速複雑流体の解明

- 高速気体力学の数理解析・ シミュレーション
- 衝撃波捕獲スキーム
- 希薄気流の数値解析
- 分子気体効果の工学的応用

推進工学分野

プラズマと固体との相互作用の理解・制御を通して、次世代の 新材料・推進システムの高性能化・高信頼性化の研究

機能構造力学分野

フォノニック結晶

68

材料・構造の動的非線形挙動解析と高機能化

非線形超音波効果

高速き裂進展

制御工学分野

航空宇宙における制御工学・統計的学習の 基礎理論と基盤技術

宇宙機の軌道計画と姿勢制御

uniform flow

強い非平衡状態にある流体中で起こる現象の研究 希薄気体に対する相反定理の 応用例: ラジオメータ効果の研究

ドローンの自律飛行実験

エ学研究科・航空宇宙工学専攻/工学部・物理工学科・宇宙基礎工学コース 航空宇宙力学講座 教授泉田啓 http://space.kuaero.kyoto-u.ac.jp 研究目標 対象のことを力学的に理解する.また、動物が巧妙に運動を生成する知能(運動知能)を解明する. この力学的理解と運動知能に基づき航空宇宙システムの知能化制御とシステム設計を行う. 研究内容 蝶の羽ばたき飛翔(右図)は

航空宇宙工学専攻

流体力学分野 講師 杉元 宏

高速複雑流体の解明

超音速で航行するジェット機の周りには衝撃波が形 成されます。衝撃波は非常に薄い層で、そこで大気 は圧縮され、運動エネルギーは熱エネルギーに変換 されますが、その変化はほとんど不連続的です。ま た機体の表面近くでは境界層の剥離や乱流への遷移 等の様々な不安定現象が生じ、流れは非常に複雑に なります。本研究室では高速複雑流体の簡便で信頼 性の高い数値解法の開発を行い、その過程で生まれ た計算法を航空宇宙流体解析に応用する研究を行っ ています。

逆方向ジェットを利用した極超音速空力加熱に対する熱防御

極超音速宇宙機ノーズのアクティブな冷却法として、亜音速 逆方向ジェットによるフィルム冷却の研究を行なっていま す。2次元の解析では翼前縁付近の熱流は90パーセント近 く減少しましたが、3次元解析では種々の不安定現象、乱流 遷移により50~60パーセントにまで低下します。少量の 冷媒で高い冷却を行える可能性を探っています。

当研究室のもう一つの研究テーマは、希薄気流や マイクロ・ナノオーダーの気流の実験的研究で す。このような気体では分子運動論的効果が顕著 になり、例えば止まっている壁でも流れが生じた りします。現在、分子運動論的効果を利用した混 合気体の成分分離などを行う様々な新規デバイス の開発に取り組んでいます。

数十度の温度差で混 合気体の濃度を変更 する実験。マイクロ 流路を用い大気圧で 動作します。質量が 異なれば同位体でも 動きます。

◀ 無 電 力 気 体 分 離

温度場で駆動される低圧気体の流れ

▶低圧気体の流れのデモ装置.
光を当てると低温部分から高温部分へ
気体が流れ、羽根車が回ります。

▼混合気体分離装置の解析

上側の高温高圧流路・下側の低温低圧流路の間のマイクロチャンネルで分子が交換され、混合気体の組成が変化します。

航空宇宙工学専攻 **流体数理学分野** (高田 滋 教授·初鳥 匡成 助教)

おもに局所平衡から大きくずれた状態にある流体の理論的研究を行っています。 運動論方程式に基づくメゾスコピックな立場から流体中に起こる様々な現象を深く 理解し、従来の概念だけでは手が届かなかった流体力学、気体力学の新しい適用 の場を開拓することを目指しています。



▶ 日本航空宇宙学会関西支部分科会「非平衡流体への運動学的アプローチ」主催

物理工学科・宇宙基礎工学コース / 工学研究科・航空宇宙工学専攻

推進工学分野(Propulsion Engineering Lab.)

教授 江利口 浩二 助教 占部継一郎



研究テーマ

プラズマと固体との相互作用に関する研究(例:欠陥形成による材料劣化)
新材料創製による高性能推進システムに関する研究(例:耐酸化・耐腐食材)
宇宙マイクロ・ナノ工学に関する研究(例:長期ミッションにおける高信頼性技術)

プラズマと固体との相互作用を科学的に理解・制御することで、極限環境下で利用される次世代の新材料・推進システムの高性能化・高信頼性化を実現する

宇宙基礎エ学コース 航空宇宙システム工学講座 制御工学分野 教授 藤本健治, 准教授 丸田 一郎

制御工学・システム工学の基礎理論と基盤技術

₫ システム制御

システムとは入出力を持つ対象を数理的に表現したものであり、特にダイナミ クスを有するシステムの解析設計手法がシステム制御である。この分野は数学・ 物理・工学・経済学など、多様な領域にまたがる横断的な研究分野であり、様々 な対象を統一的な理論で扱うことができる。当分野では航空宇宙に限らず機 械・電気・物理・化学・情報・社会など、様々なシステムを扱うためのシステム制 御理論の構築を行っている。扱う主なテーマは線形制御論、最適制御、非線形 制御、確率システム制御、航空宇宙システム、ロボット工学、統計的学習、モデル 低次元化、力学的制御などである。

これらの理論の構築には、多くの分野の知識を総動員する必要があり、特に線 形代数、微分幾何、関数解析、解析力学、航空宇宙力学、確率統計、統計的学習、 メカトロニクス、計算機等の知識を融合して行う。近年は、解析力学に基づく力 学的な非線形制御、統計的学習理論を用いたシステムの推定とばらつき抑制の ための確率最適制御、力学理論に基づく最適軌道計画、非線形特異値解析とモ デル低次元化等のテーマを重点的に開発している。

🗛 システム同定

システム制御においては対象システムのダイナミクスを表す数理モデルが重要 であり、設計された制御器の性能や安全性は、用いられたモデルの精度に強く 依存する。しかし、複雑なダイナミクスを持つシステムのモデルを構築することは 容易ではなく、大量のデータに基づいて系統的にモデル構築を行う方法、すなわ ちシステム同定法が必要とされる。

当分野では、強い非線形性を持つシステムのモデルを構築可能なシステム同 定法と、得られたモデルを活用する制御理論の開発に取り組んでおり、航空宇宙 に限らず機械系や化学系などへの応用についても研究を行っている。

😥 航空宇宙システム

航空宇宙分野のシステムは様々な特徴を有している。航空機分野では、空気 との複雑な相互作用と流体力学のモデルが必要であり、機体の軽量化による振 動の問題、また部品点数が数百万個にも及ぶ大規模複雑なシステム等を扱う必 要があり、様々なシステム制御理論が必要となる。当分野では、気流との相互作 用によって生じる不規則な外力を確率モデルとして取り扱い、統計的学習と確率 システム制御を組み合わせることにより統計的なアプローチによる制御手法や 大規模な航空宇宙システムを信頼性を保ったまま簡便に扱うためのモデル低次 元化技術などを開発している。

宇宙工学における制御対象の多くは、機械系と電気系の融合したメカトロニクス系であり、当分野ではこれらの系に特化した制御理論を開発している。メカトロニクス系のダイナミクスは、エネルギー保存則等のシンプルな力学法則によって記述でき、解析力学のツールを用いることでこの系特有の性質を利用することができる。これらの対象をハミルトンの正準方程式で記述し、その保存則、対称性、可積分性などの性質を用いることで、より自然で信頼性の高い制御則を開発している。これらは宇宙機の姿勢制御、軌道計画、ランデブー制御など、航空宇宙における様々な問題に適用できる。







工学部物理工学科 宇宙基礎工学コース 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻

機能構造力学分野

教授 琵琶 志朗

助教 石井 陽介

本研究室では、複雑な微視構造を有する材料や構造の動的かつ非線形な力学挙動(弾性波伝搬挙動、高 速き裂進展挙動)を明らかにするとともに、航空宇宙工学をはじめとした幅広い分野における構造の高 機能化・健全性評価の基礎学理を築くための理論的、数値的ならびに実験的研究を行っています。

複合材料構造における超音波伝搬挙動

航空宇宙分野では軽量かつ高剛性・高強度という特徴を有 する炭素繊維強化複合材料の適用が拡がっています。本研究 室では、複雑な微視構造や積層形態、巨視的異方性特性を持 つ複合材料構造における超音波伝搬挙動を解明し、超音波ス ペクトロスコピーによる材料特性や微視欠陥の非破壊評価の 高度化につなげるための基礎的研究を進めています。



超音波ポーラスキャンによる繊維強化

複合材料積層構造コーナ部における 複合材料積層板の異方性弾性特性の測定超音波伝搬挙動の数値シミュレーション

薄肉構造における弾性波伝搬挙動

軽量化のために薄肉化された構造では弾性波の伝搬挙動は 極めて複雑になり、多モード性(同じ周波数をもつ多くの伝搬 形態が存在すること)や分散性(伝搬速度が周波数に依存す ること)などの特徴があらわれます。本研究室では各種の薄肉 構造における弾性波の線形・非線形伝搬挙動を明らかにし、 構造健全性評価への応用を図っています。



平板を伝わる弾性波(ラム波)の 非線形周波数ミキシングの数値解析



き裂によるラム波散乱の数値解析

フォノニック結晶・メタマテリアルによる 弾性波機能構造

弾性波の波長スケールで特徴的な内部構造を付与した、既 存の材料では見られない弾性波伝搬特性を持つ人工的構造(フォノニック結晶、メタマテリアル)が盛んに研究されています。 本研究室では、さまざまな周期的構造を有する平板構造やラ ティス構造における弾性波伝搬挙動の特徴(遮断、負屈折、集 束など)を理論・数値解析によって調べています。



フォノニック結晶平板における曲げ波の遮断(多数の散乱体の共振を利用)

固体材料中の高速き裂進展挙動

航空宇宙分野では、航空機への鳥衝突や宇宙機へのスペー スデブリの衝突などによる構造物の高速破壊が問題になって います。このような現象を正しく理解しより安全な構造物を設計 するためには、高速き裂進展挙動の解明が必要不可欠です。 本研究室では、フェーズフィールド法を用いた数値解析によっ て、固体材料中を音速と同程度で高速進展するき裂の進展メ カニズムを明らかにするための基礎的研究を行っています。



高速進展モード|き裂の分岐挙動の数値シミュレーション

2024 京都大学工学部 物理工学科 研究内容紹介

〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL:075-753-4869/5181 工学部物理工学科事務室