

## わたしたちの研究 (20) 熱材料力学研究室



中部主敬  
(S56/1981卒)



巽 和也  
(H9/1997卒)



栗山怜子  
(H22/2010卒)



### 1. 研究室の生い立ちと教員の紹介

熱材料力学研究室 (MTFM Lab.: Mechanics of Thermal Fluid and Material Laboratory) は工学研究科機械理工学専攻の機械材料力学講座に属して、機械工学群の大学院教育研究に、また、工学部物理工学科の機械システム学コースの学部教育に携わっています。

大学院重点化改組による京都大学機械系教室の改編が平成6(1994)年に行われた後、平成17年度には機械工学専攻、機械物理工学専攻、精密工学専攻、航空宇宙工学専攻の4専攻が新しく機械工学群として、機械理工学専攻、マイクロエンジニアリング専攻、航空宇宙工学専攻の3専攻に再編されました。私たちの研究室(熱材料力学分野)は、その際に機械理工学専攻の研究分野の一つとして新設され、平成18年4月に中部主敬が教授として、巽 和也が助教として着任しました。その後、平成22年に巽 和也が准教授に昇任し、平成28年に栗山怜子が助教として着任し、現在に至っています。

中部主敬は機械系教室の伝熱工学研究室(佐藤俊教授)出身で、昭和56(1981)年に機械工学科を卒業し、昭和58年に機械工学専攻修士課程修了後、大阪大学の助手として採用されました。当時は博士学位を持たずとも、教員(文部教官)を務めながら論文博士として学位を取得可能でした。その後、前出の重点化改組が行われる平成6年に母校に戻る機会を得て、熱流体工学講座伝熱工学分野の研究室(鈴木健二郎教授)で助教授を務めていましたが、平成14年に大阪府立大学(現大阪公立大学)へ教授として異動しました。平成18年には前出の新3専攻体制下で

設置された現研究室に異動となり、再び母校に戻ることができました。

その間、大阪大学では機械工学科燃焼工学研究室において、燃焼反応に伴う各種ラジカル自発光と燃料油滴からのミー散乱を同時計測する手法およびその画像化方法を確立し、「液体燃料噴霧の燃焼特性と火炎構造に関する研究（平成2年度、工学博士取得）」などを行いました。平成3年からは約1年半の間、NIST（National Institute of Science and Technology）で招聘研究員として、スペースシャトル搭載用火災実験モジュール検討のための微小重力下における可燃平板の着火、燃焼に関する数値解析を行いました。本学伝熱工学研究室では衝突噴流や流路内構造体後流の伝熱特性の解明、ニューラルネットワークを利用した壁温分布の可視化技術開発などに取り組み、大阪府立大学ではエネルギー機械工学科のエネルギー機器学研究室において、マイクロガスタービン燃焼器や燃料改質器、伝熱フィンに関する研究、マイクロ流路内熱流動に関する研究などを行ってきました。

本章のタイトル右端にあるアイコンは私たちの研究室のロゴマークです。真ん中の赤い丸印は「Energy（エネルギー）」のEを絵文字とし、それに翼を付けて熱力学で学ぶガスタービン記号をデフォルメしたものを考案し、それを大阪府立大学時代の研究室ロゴとして使用していました。そのロゴを現在の熱材料力学研究室に異動した際に、「therm-（熱）」のTHで時計台前の樟を象ったものの中に埋め込みました。研究室メンバーが学会発表などを行う際に使ってもらっています。

巽 和也は前出の伝熱工学分野の研究室（鈴木健二郎教授）出身で、平成9年に機械工学科を卒業、平成11年に機械工学専攻修士課程を修了し、同専攻博士後期課程に進学して平成15年に「屈曲壁面やリブ付設壁面を持つ流路内の熱流動特性に関する研究」で博士（工学）の学位を取得しました。その後、科学技術振興事業団（現科学技術振興機構）研究員として大阪府立大学エネルギー機器学研究室（中部主敬）での共同研究に従事し、平成15年10月に大阪府立大学の助手として採用されました。平成18年には本学に戻り、熱材料力学研究室で助教を、平成22年からは准教授を務めています。これまで、超小型熱流体機器の実現に向けて、ミリ・マイクロ・ナノスケールの伝熱・反応制御技術およびマイクロ流体デバイスの開発と、その熱・流体・力学的性質に関する基礎と応用研究を行ってきました。小型熱・エネルギー機器では伝熱・反応促進に向けた流路構造の設計と新たな伝熱媒体として粘弾性流体を利用した研究を行っています。また、マイクロ流

路内の流れ・輸送機構を明らかにし、それらを制御する要素技術として、ポンプ・センサ、粒子と細胞の整列・同期・分取機構の開発を進めています。これらに関連して血球・血流・血栓のダイナミクスの解明、および血球の運動と輸送のモデル化を目指した実験的検証と解析・理論的検証も行っています。一方、ブラウン運動による蛍光偏光解消を利用した液体温度計測、サーモリフレクタンスイメージング法による固体表面温度計測など、マイクロスケールの光学温度計測技術の開発を行っています。

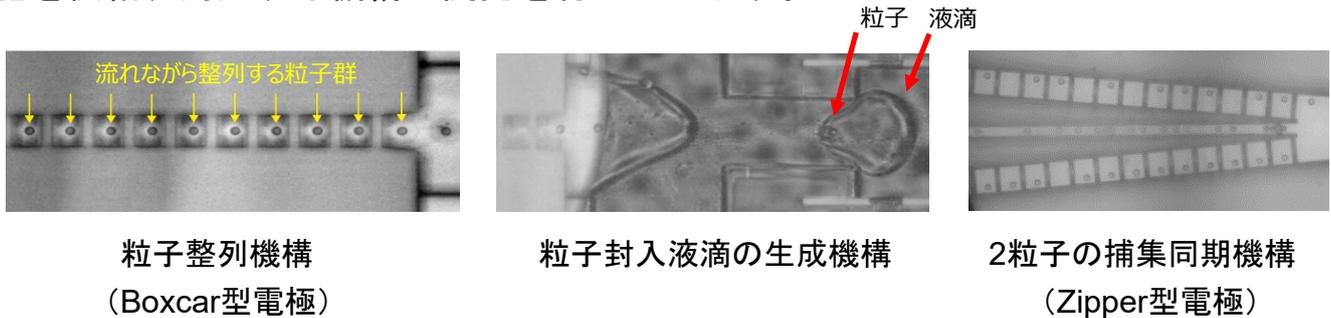
栗山怜子は慶應義塾大学工学部システムデザイン工学科の出身で、平成22年に卒業し、平成24年に同大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻前期博士課程、平成27年に同専攻後期博士課程を修了し、「ラマン散乱イメージングによるマイクロスケール熱流動場の非侵襲計測」に関する研究で博士（工学）の学位を取得しました。同年、（株）堀場製作所に入社し、開発部にてFT-IRエンジン排ガス分析装置の開発に関わった後、平成28年に本学に助教として採用され、熱材料力学研究室に着任しました。現在、全反射光学系背後のエバネッセント場をマイクロ流路壁面の極近傍に構築し、そこでの粒子駆動制御や蛍光利用による流体温度、粘度測定、光に反応して性質を変える化学物質を伝熱制御や流体応力計測に活用するなど、様々な光学情報を利用したマイクロ・ナノスケールの熱流動の可視化計測、制御、現象解明に関する基礎的研究に取り組んでいます。

## 2. 現在の主な研究

熱材料力学研究室では『熱・物質移動現象の究明とその制御技術展開』を主テーマに掲げています。高度分散発電システムで代表されるようなエネルギー・資源の高効率有効利用や地球規模の環境負荷軽減対策などにおいて、様々なエネルギー機器内の熱流動現象に関する先進的な機械工学的知恵と技術は、今後ますます重要になると考えます。また、超小型の検査・治療用診断システムのような先端医療技術開発分野においても、そのシステム内での試薬、体液、細胞などの流体・粒子の輸送・混合・反応制御技術の高度化は必須です。このような機器の開発に向け、流体どうしの混合や反応、流体と固体壁面との間の熱・物質輸送、流体中での粒子操作・輸送、熱流体センシングなどに関する基礎研究を行い、マイクロ熱流体デバイスやマイクロセンサーなどの実現を目指しています。

## ■ 誘電泳動力を用いた細胞整列・液滴内封入機構の開発

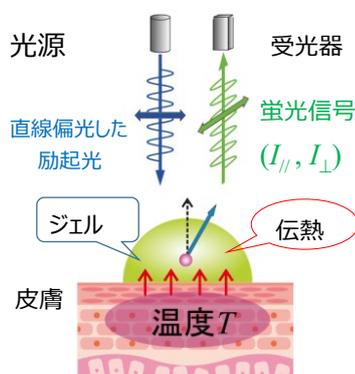
薬の新規開発等において、細胞を試薬の中に入れて効果を評価するスクリーニングというプロセスがあり、マイクロチップ上で1個の液滴に1個の細胞を封入する技術に注目が集まっています。これは細胞のスクリーニング検査を1細胞単位でできる利点があります。そこで、誘電泳動力を利用してマイクロ流路内を流れる粒子や細胞を等間隔に整列させ、1個の液滴が生成するたびにそこへ粒子や細胞を供給、封入する機構の開発を行っています。



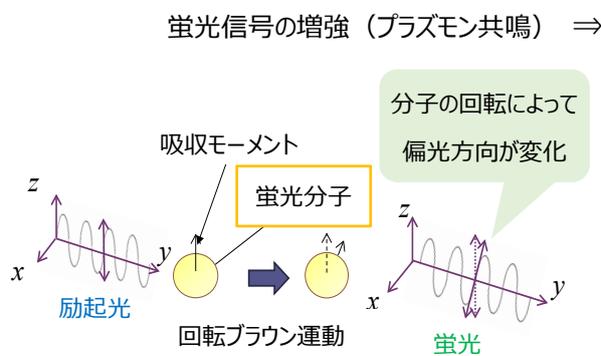
現在、球形粒子を1列に揃え、一定時間間隔で液滴が生成する領域に供給して液滴生成の周期と同期させることで1液滴1粒子封入の成功率100%を達成しました。また、1液滴に2個の細胞を封入して細胞同士の相互作用などを調べることを目的に、別々の系統から1個ずつ供給される粒子対を同時に捕集し、1液滴が生成する位相と同期させて封入する技術の開発も行っています。

## ■ 蛍光偏光法によるジェル型温度センサの開発

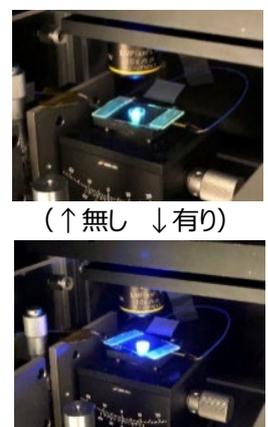
ヘルスケア分野への応用を目的にジェル状物質を皮膚に塗布して、皮膚からの分泌物をジェルに吸着させて体調を、また、ジェル自体の温度変化から体温を、同時に簡便に測定できるジェル型センサの開発を他研究室と共同で進めています。



ジェル型センサの概念図



蛍光分子の回転と偏光解消現象

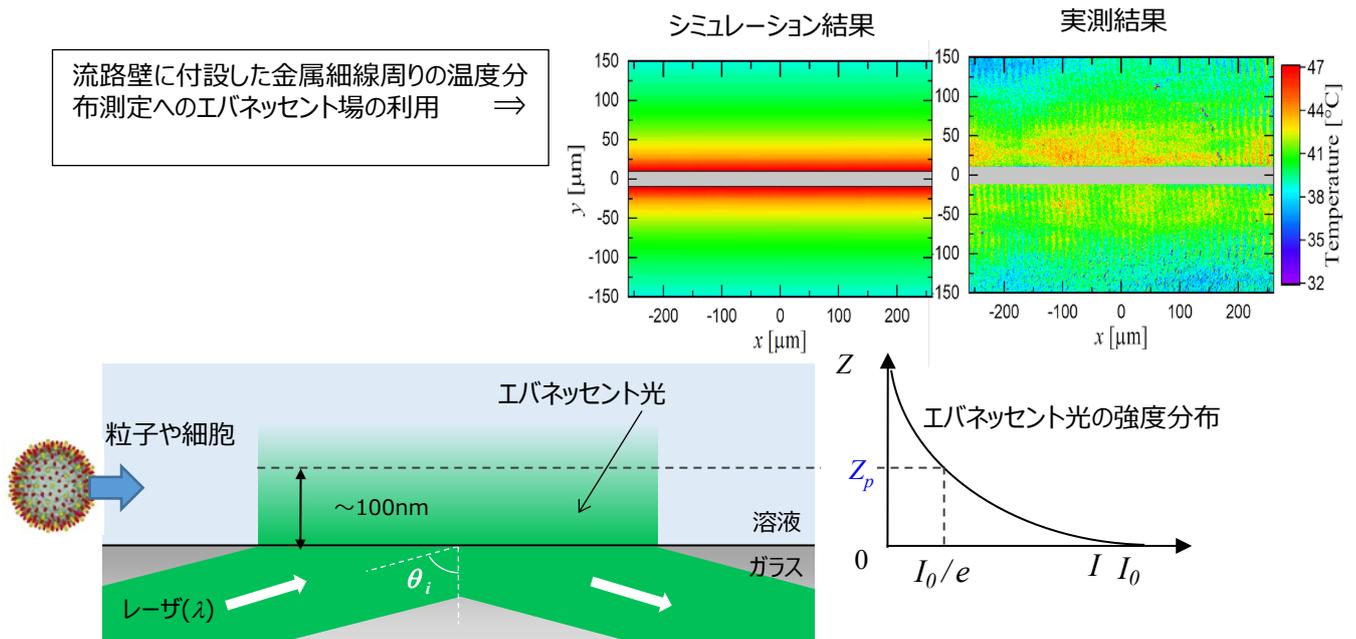


ジェル温度の測定ではジェルに混ぜ込んだ蛍光分子に直線偏光した光を照射し、

蛍光分子の回転ブラウン運動に起因する蛍光偏光解消現象を利用し、光学的に温度を測定します。また、塗布状態のジェルにおける伝熱モデルおよび蒸発モデルを考案し、温度測定時間の短縮や温度測定精度の向上を実現しています。一方で、更なる温度測定精度の向上を目指して、プラズモン共鳴を利用した蛍光の信号増幅についても検討しています。

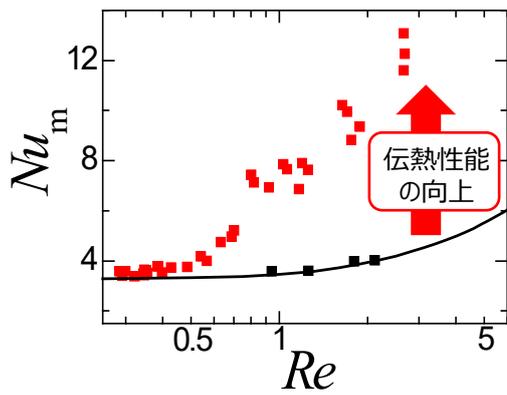
## ■ エバネッセント場を利用した壁面近傍計測

マイクロ流路内の流れ場では比界面積（体積に対する表面積の割合）が大きくなり、表面の影響が顕在化します。そのため、流路内の流れや化学反応を制御するには壁面近傍を選択的に注視し、その領域の温度や速度、粒子数密度などを計測することが必要です。そこで、流路壁を外部から照らす光が流体界面で全反射する領域の流体側に100nm程度の厚みで形成されるエバネッセント場を利用して蛍光分子の励起を行い、流路壁極近傍からのみの情報を高感度に獲得する計測法やその領域に存在する粒子のみを操作する手法を開発しています。

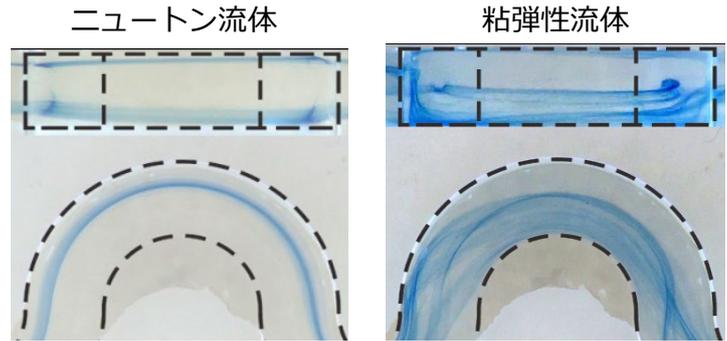


## ■ 粘弾性流体の伝熱促進効果に関する研究

低レイノルズ数領域でも伝熱促進効果が期待できる粘弾性流体の熱流動特性を解明し、さらにその制御を光照射で能動的に行うことを目的にPhoto-Rheological Fluidを利用した伝熱実験、解析を行っています。流れの可視化やPIV法（Particle Image Velocimetry）による流速測定、熱伝達率測定などの実験結果から、熱輸送媒体に粘弾性流体を用いた場合について、流れの非定常性の増大と主流方向断面内の2次渦により伝熱性能が向上することを明らかにしました。



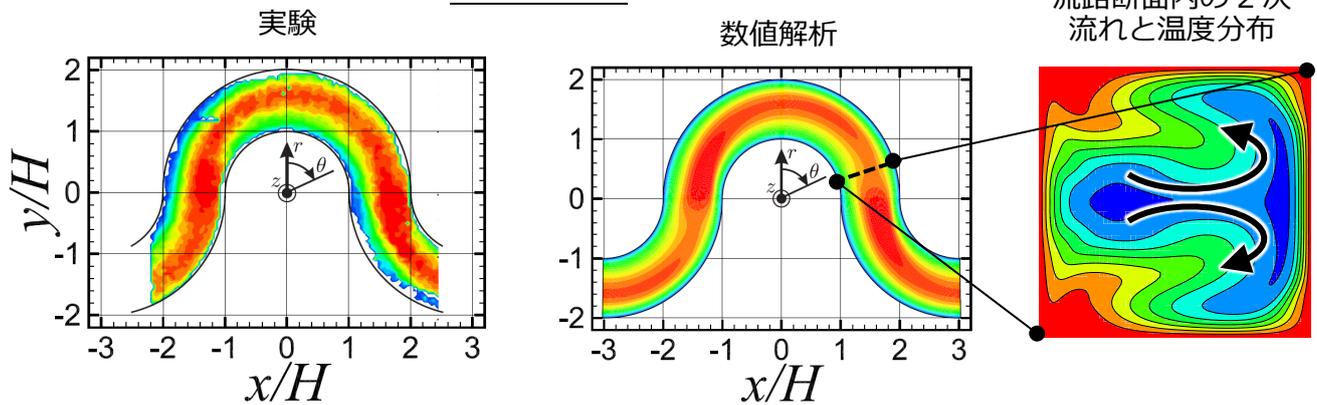
蛇行流路内流れの染料による可視化



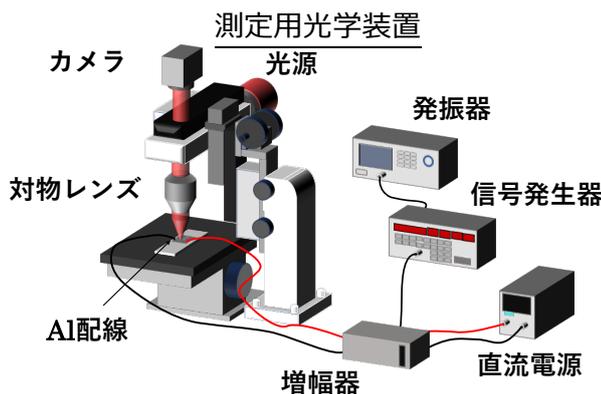
(上図) 水平方向からの画像 (下図) 鉛直方向からの画像

一方で、同様の流れ場および温度場について3次元数値解析を行い、実験の妥当性を確認するとともに、流路内の応力場や温度場を求めることによって粘弾性流体流れの伝熱促進機構を明らかにしました。

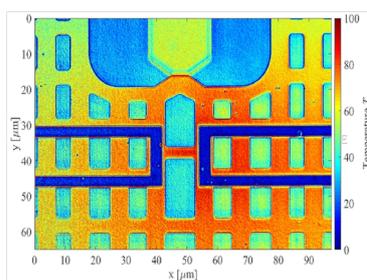
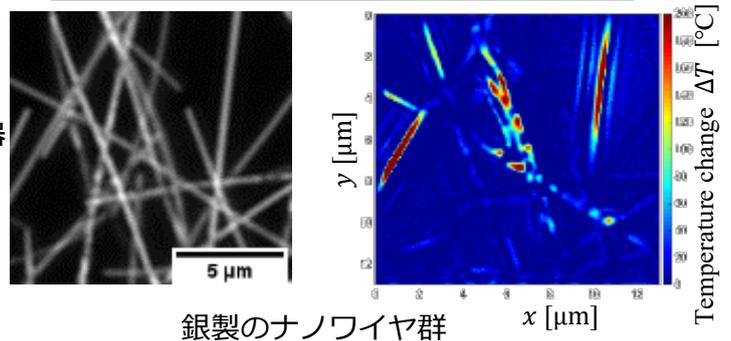
流れ場の比較



### ■ TRI法によるマイクロスケールの温度分布測定



温度分布測定の対象系 (左)と実験結果 (右)



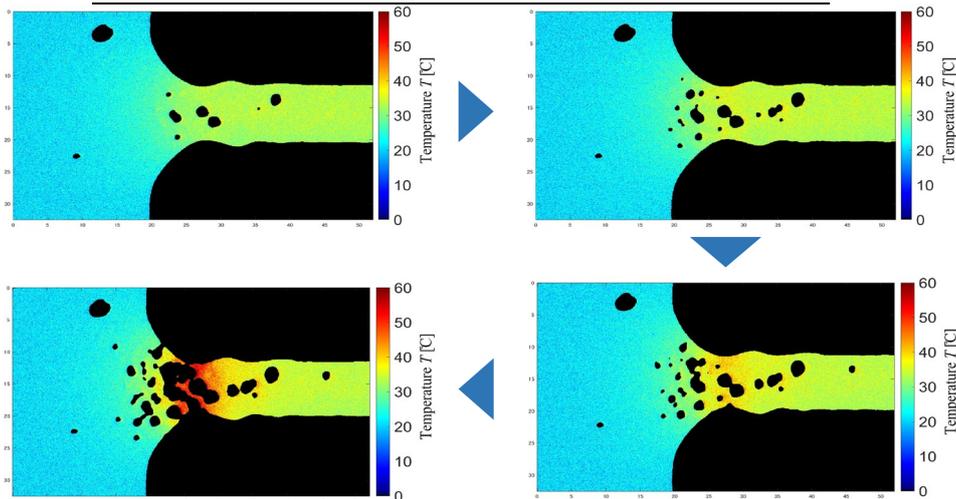
MEMS デバイス (部分) の温度分布



金製の電極から延伸する極細配線

エレクトロニクスデバイスの微細化に伴い、ミクロスケールで温度分布を測定する技術が求められています。本研究では、複雑な微細構造を持つデバイスやナノワイヤから成るネットワーク構造体などの物質が通電加熱される際に、電流経路および伝熱経路の分岐、合流による非一様な温度分布と伝熱特性を評価するため、TRI法（Thermo-Reflectance Imaging Method）を利用してナノメートルスケールの空間分解能を持つ計測技術とその数理モデルを開発しています。

極細配線内のボイドの時間的成長と高温領域の対比結果



また、高電流密度条件において極細配線上で局所的に発生するエレクトロマイグレーション（EM）現象に対しても、TRI法を利用した温度測定を適用し、ボイドの局所的な成長履歴を配線の温度分布とともに可視化する技術を開発し、EM現象解明に取り組んでいます。

熱材料力学研究室での主な研究活動は以上のとおりですが、下記のURLにも研究室の詳細を掲載していますので閲覧いただければ幸いです。引き続き宜しくお願いします。

研究室HP : <http://www.mtfm.me.kyoto-u.ac.jp>