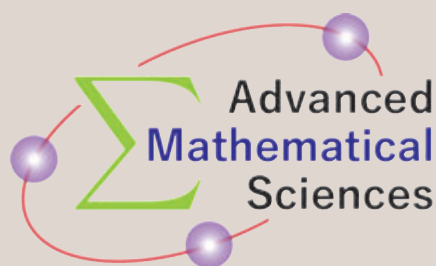


# 現象の数理モデル化と その解析

—理工学の真の融合を目指して—

自然現象の観測・観察から法則を導き、それによって一見複雑な現象が生じるしくみを平易に解き明かすことが科学(Science)の本質です。特に数理科学は現象の観察・観測から抽出された「数理モデル」と呼ばれる方程式の計算や解析などを通して研究を行う科学です。現在、最先端の数理科学では自然現象に限らず、生命現象や社会現象の数理モデル化が行われ、その解析や数値シミュレーションなどを通して現象の解明が行われると共に、得られた成果を利用した革新的な技術の開発や未来予測などが行われ、さらに新たな解析手法の研究も深化しています。本コースでは数理科学の中でも特に大規模・大自由度であったり非線型性の強い複雑な現象などを中心に、研究と教育が行われています。特に教育面では、物事の理(ことわり)を明かにする理学的な側面と、得られた知見をものづくりに活かす工学的側面を総合的に身につけることを目指し、最先端の数理科学において理学と工学を俯瞰できる優れた人材の輩出を目指しています。





# 先端数理科学コースへの誘い

情報学研究科では「現象の数理モデル化とその解析」を研究科の目指す「情報学」の礎の重要な一角と位置づけており、1998年の研究科発足時よりこれに対応する学域である数理科学の先端的な研究と教育に重点をおいています。研究科の発足時には、当時の先端的な数理科学をあらわす学術用語であった「複雑系科学」を冠する新専攻を立ち上げ、研究科の目指す教育研究の方向を掲げました。しかし先端的な数理科学の発展はとどまるところを知らず、徐々に「複雑系科学」が研究科の目指す先端的な数理科学を必ずしも的確に表現する術語ではなくなってしまってきた感があります。一方でコンピュータとそのネットワークの進化によって莫大なデータが容易に扱えるようになり、現象の数理モデル化とその解析の研究・教育また社会における重要性は一層の高まりを見せています。このため、情報学研究科では2017年度より「複雑系科学専攻」を「先端数理科学専攻」に改称し、研究科の目指す教育と研究の方向を再確認するとともにその取り組みを一層明確にしたいと考えています。

一口に「先端的な数理科学」といっても極めて幅の広いものですが、研究科の目指す「広い意味での情報学」との関わりにおいて、本コースでは「自然・生命・社会現象の数理モデル化とコンピュータシミュレーション等を用いた解析」をその活動の根幹に据えています。ひと昔前にはコンピュータを利用した計算といえば力学を中心とする古典的な物理現象がその主流でしたが、今やそれらはもちろんのこと、生命現象や社会現象まで含む先端的な科学や技術の諸分野においては、コンピュータシミュレーションやコンピュータを用いたデータ解析は不可欠なものです。またその前提となる現象の数理モデル化では、古典的な微分方程式や離散モデルに加え、確率やフラクタル等の新たな概念を用いた数理モデル化も必要となっており、またコンピュータシミュレーションではいわゆるスパコンによる大規模計算と共に多倍長数値計算環境といった新たな数値計算環境の活用も行われています。本コースでは、これらの先端的な数理科学の諸問に対して、最先端の研究推進とその成果を基盤とした人材育成を目指しています。

我が国においては数理科学の基礎的な研究は理学系で、応用は工学系の組織に分れて教育されることが多いように思います。本コースは規模は小さいですが数学・物理・工学系の研究者を教員組織に抱え、「理工学の真の融合」をコース教育の標語に掲げ、真理の探求からものづくりで、先端的な数理科学を俯瞰的に身につける人材育成を目指した教育を行っています。また京都大学の基本理念に掲げられる「対話を根幹とした自学自修」を大切に、指導教員による丁寧な個別指導とともに、コースの大学院生一人一人が各自の研究テーマに対してに自主的にまた積極的に取り組むことを重視しています。

藤原 宏志  
FUJIWARA Hiroshi



大学院  
情報学研究科先端数理科学コース 教授

1999年京都大学理学部卒業、2003年京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了(複雑系科学専攻)、2003年4月情報学研究科助手、2007年4月より同助教、2015年9月同准教授を経て、2024年12月より現職、数値解析学、高精度・大規模数値計算、数値計算ソフトウェアの設計と実装、逆問題と非適切問題の研究に従事。2025年度コース長。

## 概 要

## ■ 研究室一覧

| 研究室名                      | 担当教員                                |
|---------------------------|-------------------------------------|
| 応用解析学                     | 木上 淳 教授 白石 大典 准教授 久保 雅義 講師 清水 良輔 助教 |
| 非線形物理学<br>(非線形力学・計算物理学)   | 宮崎 修次 講師 原田 健自 助教                   |
| 非線形物理学<br>(理論神経科学・非平衡系数理) | 青柳 富誌生 教授 寺前 順之介 准教授 筒 広樹 助教        |
| 計算力学                      | 藤原 宏志 教授 川越 大輔 助教                   |
| 応用数理科学                    | 田口 智清 教授 辻 徹郎 准教授                   |
| 統計的信号処理                   | 林 和則 併任教授 (国際高等教育院)                 |

## ■ 先端数理科学コースカリキュラム

| 博士(情報学)          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                      |                                                                                        |                                                                               |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|-------------|--------------|---------|---------|-------------|-----------------|---------|---------|---------------|----------------|---------|--------|------------------|--|--|--|----------------------|
| 博士論文             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                      |                                                                                        |                                                                               |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
| 3年               | <b>コース開設科目(計6単位)</b><br>数理科学特別セミナー E (2単位 必修)<br>応用解析学特別セミナー A、B E(各2単位) 非線形物理学特別セミナー A、B E(各2単位)<br>応用数理学特別セミナー A、B E(各2単位)                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                      |                                                                                        | 研究指導                                                                          |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
| 2年               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                      |                                                                                        |                                                                               |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
| 1年               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                      |                                                                                        |                                                                               |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
| 修士(情報学)          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                      |                                                                                        |                                                                               |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
| 修士論文             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                      |                                                                                        |                                                                               |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
| 2年               | <b>コース開設科目(選択8単位以上)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                      |                                                                                        | <b>研究指導科目(必修8単位)</b><br><br>数理科学特殊研究II (修士2年、6単位)<br><br>数理科学特殊研究I (修士1年、2単位) |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
|                  | <b>コース専門科目 (A、Bはそれぞれ隔年開講)</b><br>微分方程式特論A、B(各2単位) 非線形解析特論A、B(各2単位)<br>応用解析学特論I、II(各1単位) 非線形力学特論A、B(各2単位)<br>非平衡物理学特論A、B(各2単位) 非線形物理学特論I、II(各1単位)<br>計算力学特論A、B(各2単位) 数理科学特論A、B(各2単位)<br>応用数理学特論I、II(各1単位)                                                                                                                                                                                                                     |                      | <b>セミナー科目</b><br>応用解析学セミナーII<br>非線形物理学セミナーII<br>応用数理学セミナーII<br>(博士後期課程進学予定者 修士2年、各4単位) |                                                                               |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
|                  | <b>コース基礎科目 (A、Bはそれぞれ隔年開講)</b><br>応用解析学通論A、B(各2単位) 非線形物理学通論A、B(各2単位)<br>応用数理学通論A、B(各2単位)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                      | 応用解析学セミナーI<br>非線形物理学セミナーI<br>応用数理学セミナーI<br>(修士1年、各4単位)                                 |                                                                               |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
| 1年               | <b>研究科共通科目(選択必修 ◎の科目を2単位以上、4単位以下)</b> ◎プラットフォーム学展望(2単位)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                      |                                                                                        | 研究科が提供する<br>その他科目                                                             |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
|                  | <table><tr><td colspan="2"><b>研究科共通展望科目</b></td><td>計算科学入門(2単位)</td><td>計算科学演習A(1単位)</td></tr><tr><td>◎情報学展望1</td><td>◎情報学展望2</td><td>◎情報と知財(2単位)</td><td>イノベーションと情報(2単位)</td></tr><tr><td>◎情報学展望3</td><td>◎情報学展望4</td><td>情報分析・管理論(2単位)</td><td>情報分析・管理演習(1単位)</td></tr><tr><td>◎情報学展望5</td><td>(各2単位)</td><td>情報学における社会貢献(1単位)</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td>情報学におけるインターンシップ(1単位)</td><td></td></tr></table> |                      |                                                                                        |                                                                               | <b>研究科共通展望科目</b>   |                       | 計算科学入門(2単位) | 計算科学演習A(1単位) | ◎情報学展望1 | ◎情報学展望2 | ◎情報と知財(2単位) | イノベーションと情報(2単位) | ◎情報学展望3 | ◎情報学展望4 | 情報分析・管理論(2単位) | 情報分析・管理演習(1単位) | ◎情報学展望5 | (各2単位) | 情報学における社会貢献(1単位) |  |  |  | 情報学におけるインターンシップ(1単位) |
| <b>研究科共通展望科目</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 計算科学入門(2単位)          | 計算科学演習A(1単位)                                                                           |                                                                               |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
| ◎情報学展望1          | ◎情報学展望2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | ◎情報と知財(2単位)          | イノベーションと情報(2単位)                                                                        |                                                                               |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
| ◎情報学展望3          | ◎情報学展望4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 情報分析・管理論(2単位)        | 情報分析・管理演習(1単位)                                                                         |                                                                               |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
| ◎情報学展望5          | (各2単位)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 情報学における社会貢献(1単位)     |                                                                                        |                                                                               |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 情報学におけるインターンシップ(1単位) |                                                                                        |                                                                               |                    |                       |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |
| 入学前              | 微積分                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 線型代数                 | 初歩的な常微分方程式                                                                             | 複素関数論の初歩的な内容                                                                  | 力学(質点・質点系および剛体の力学) | 学部で学習する程度の各自のコース学術基礎等 |             |              |         |         |             |                 |         |         |               |                |         |        |                  |  |  |  |                      |

※Eと記された科目は英語だけでも修得可

## コース全体での取り組み

先端的な数理科学の学修と研究においては数学的な基礎学力とコース学術の知識の両方が必須である。このため修士課程の入学試験では線形代数と微積分の基礎的な問題を全員が解いた上で、各自の得意とするコース学術に関する問題を選択して解答することになっている。1点を競うような筆記試験の結果だけが本コースでの学修や研究で必要ではないため、筆記試験において一定の成果を挙げた志願者に対して、各自の学術的な興味と本コース教員のカバーする学術とのマッチングをコース教員全員で行う口頭試問により、合格者を決めている。また博士後期課程の入学試験では、志願者がそれぞれの研究テーマに対してどう取り組んできたかをコース教員全員で評価して合格者を決めている。

修士課程の科目は共通科目と専門科目から構成されており、全員が3つの共通科目を履修するように指導を行い、講義を通して数理科学における理学と工学の両方の視点の涵養を目指している。研究指導は各学生の適正に応じた個別指導を中心とし

た形で行われるが、博士後期課程進学を希望する学生には「セミナー II」(2年次配当)を用意し、研究指導に加えて先端的な学術を効率的に修得できるように配慮している。博士後期課程では指導教員による研究指導に加え、コース教員、理学研究科と工学研究科の関連教員からも広く助言を受けられるようにしており、数理科学の最先端の幅広い知見が修得できるように配慮されている。コース教育の様々な場面で、各自の研究テーマに関する学修の深化と共に理工学の両面からの数理科学の俯瞰が図られていることは、他に類を見ない教育である。

また、概ね毎年、話題となるような先端的な数理科学のトピックを選んで、公開講座を行っている。



## 応用解析学研究室

## 21世紀の解析学の展開をめざして

## ■フラクタル上の解析、フラクタル幾何学

自然界の新しい数理モデルとしてのフラクタル上で、どのように熱や波が伝わるかという問題の数学的な基礎理論に興味を持って研究しています。また最近、進化を記述する数理生物学の数理モデルにも興味をもっています。

[木上 淳]

## ■ブラウン運動、ランダムウォークの軌跡の研究

ブラウン運動あるいはその離散版にあたるランダムウォークは確率論において最も基本的な過程です。その軌跡の構造を調べる問題は昔から多くの研究者を魅了してきました。しかしながら現在でもなお理解の進んでいない部分は多く残されており、そのような不透明な部分の解明を目指して研究を行っています。

[白石 大典]

## ■微分方程式の逆問題、脳の数理モデル

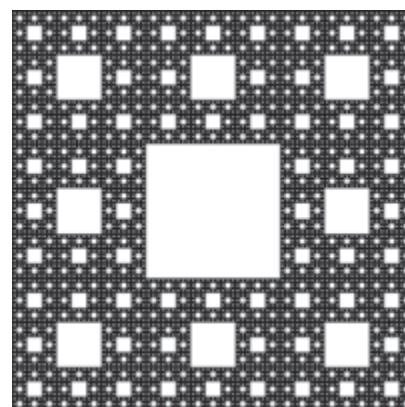
微分方程式で記述される逆問題の数学解析と、脳科学に現れる数理モデルの解析の研究をしています。

[久保 雅義]

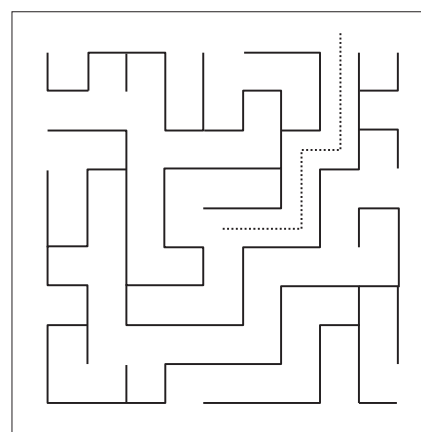
## ■フラクタルと距離空間上の解析学・幾何学

近年の距離空間の幾何学に関する研究から生じた問題意識を背景に、フラクタルを含む複雑な空間における非線形ポテンシャル論といった解析学の基礎理論に関する研究を行っています。特に、擬等角幾何学とのつながりや、古典的設定では起こり得ないフラクタル特有の特異的現象の解明を目指しています。

[清水 良輔]



シェルピンスキーカーペット



一様全域木(実線)と dual path (点線)

## 非線形物理学研究室

## ■理論神経科学・非平衡系数理グループ

## ■非線形物理学を基礎とした結合力学系や生命・脳神経系の理論まで

比較的単純な素子が集団となり、単体からは予想もできない複雑な振る舞いや高度な機能を発現する協力現象は、物理系だけでなく脳神経系や社会現象まで普遍的に見られます。これらの系は、固有のダイナミクスを示す要素（ニューロンなど）がネットワーク（シナプス結合など）を形成し、要素の状態と結合構造が同時に変化するネットワークの自己組織化現象として捉えることができます。このような系に対して、非線形力学系の観点から、リズム現象などに着目して研究しています。

[青柳 富誌生]

## ■脳型情報処理と学習の非線形物理学

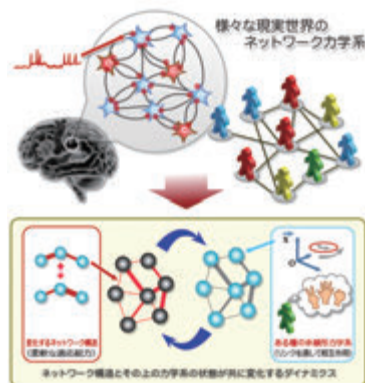
私達の脳では、一千億個もの神経細胞が巨大なネットワークを組むことで、高次元の非線形ダイナミクスを生み出し、最先端の機械学習でも真似できない柔軟で高度な情報処理を実現しています。そこでは揺らぎや非線形性が重要な役割を果たしていることが分かってきましたが、その本質は未解明に残されています。私たちは、脳科学、情報科学、非線形物理学を数理的に結びつけ応用する事で、脳の情報処理の数理を拓き、脳型の人工知能を生み出す研究に取り組んでいます。

[寺前 順之介]

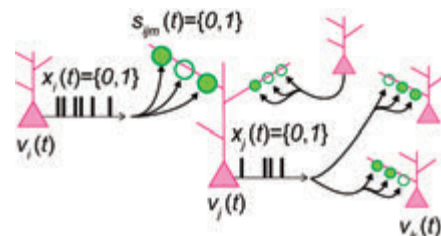
## ■非平衡物理学に基礎をおいた分子機械の動作原理の探求

生体分子モーターは、複数のタンパク質が巧妙にからみ合うことで、有用な動き（ポンプ、物質輸送）を生成する機械機構を内在させています。私は非平衡物理学の観点による数理モデルを用いてこのような機械の動作原理を探求しています。

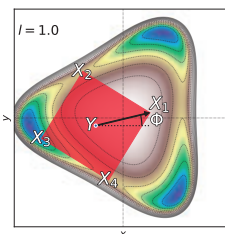
[筒 広樹]



神経系や社会的な繋がりネットワークは、ダイナミックな素子が互いの結合構造を変化させながら発展する大自由度非線形力学系であり、共通する不変構造が隠れている場合がある。



シナプス（緑の丸）を介して、スパイク発火と呼ばれるインパルス電流を伝達することで相互作用する脳内のニューロン（ピンク）の概念図。ニューロンやシナプスの状態を確率変数としてモデル化することで数理解析が可能になる。



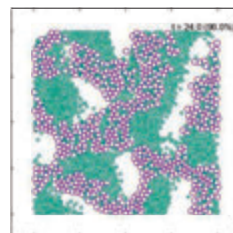
Wankel 型ロータリーエンジンを模倣したローター（4点からなる剛体）とローターハウジング（ポテンシャル）からなる回転ラチェットモデル。

## ■非線形力学・計算物理学グループ

## ■周期外力下の粉粒体・帯電微粒子の研究

パウル・トラップを簡略化した装置（ACTラップ）にマイクロサイズの複数の帯電微粒子を投入した実験や、イオンチャネルの粉体モデルとその異常輸送に関する先行研究に触発され、周期外力が働く粉粒体や帯電微粒子の集団運動を主に研究しています。実験の設定を忠実に再現する数値解析用の数理モデルの提案、ACTラップに投入した巨視的帯電微粒子の集団運動や加振粉体に生じる諸種の分岐に付随して生じる臨界現象の解析等を行っています。

[宮崎 修次]

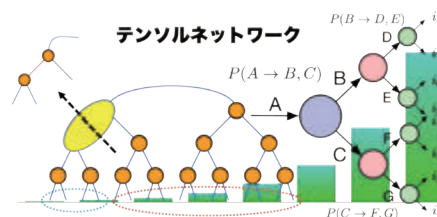


大小二種の粒径の粉体を水平加振すると、二種の粉体が分離し、縞模様が見られることが知られている。大小二種の粒径をそれぞれ平均粒径の周りで分布させて水平加振すると、二種の粉体が分離し、網目模様が形成されることを見出した。

## ■計算論的アプローチを用いた統計物理学

多数の要素が相互に非線形な影響を及ぼすことでシステムに生まれる多様な構造や特性は統計物理学の研究対象です。私は、主にシミュレーション技術を用いてこの問題に取り組んでいます。研究対象は、ミクロからマクロまでの様々な多体系（例えば、原子スケールの量子的揺らぎによる量子的臨界現象から、伝染病などの浸透拡散系における非平衡定常分布など）や、量子情報を記述するツールであるテンソルネットワーク形式を用いた古典・量子機械学習理論の構築まで多岐にわたっています。

[原田 健自]



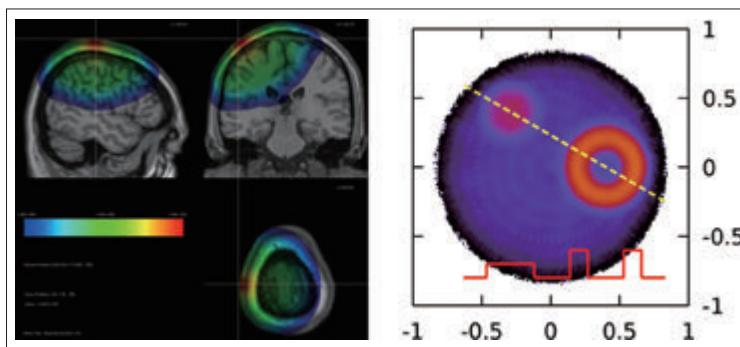
指数関数的に増大するビッグデータや深層学習モデルのパラメータ等に対し、量子状態空間を効率よく記述するテンソルネットワーク形式（図中のネットワーク）を駆使した新しい圧縮・解析手法の研究が活発に行われている。

## 計算力学研究室

### 数値シミュレーション：信頼性の高い数値解析手法の開発と逆問題への応用

数理モデルをもちいた現象の理解は、様々な科学・技術の発展へと応用されています。本研究室では、偏微分方程式や積分方程式で記述される現象の理解と応用のため、数値計算手法の開発や医用イメージングなどの逆問題の解析に取り組んでいます。具体的には、数値計算手法そのものの解析、多倍長計算、大規模並列計算、さらには数理モデルの性質を明らかにするための数学解析を研究しています。

[藤原 宏志・川越 大輔]



生体内の光伝播のシミュレーション(左)と、光学特性値の同定例(右)

## 応用数理科学研究室

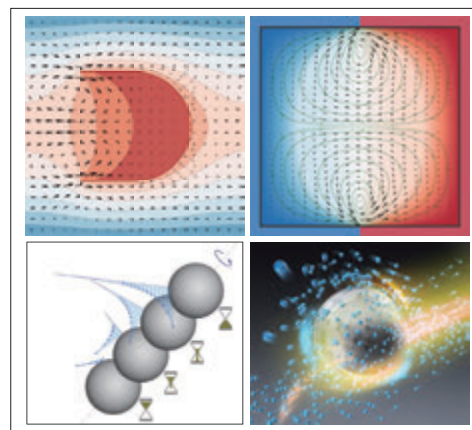
### 非平衡流に対する新しい流体力学に向けて

局所的な非平衡性が顕在化する流体の振る舞いを研究しています。多数の粒子集団の振る舞いを統計的に記述する運動論にもとづく理論解析や大規模・中規模数値シミュレーションを介して、非平衡流の力学的・熱力学的性質を理解することを目指しています。また、非平衡流を記述するための新しい巨視的理論の構築や付随する数理モデルの導出を行い、連続体理論の深化に貢献することを目指しています。

[田口 智清]

非平衡流の理解は、近年急速に微細化が進んでいるマイクロ・ナノマシンの熱・流体解析や、マイクロ・ナノスケールの物質輸送の制御に必要です。特に、流体と物体の運動が連成する移動境界問題や非平衡現象に起因する微小粒子の運動に対して、数理的観点および実験による実証的観点から理解し、応用研究へと展開することを目指しています。

[辻 徹郎]



一様に加熱したU字型物体周りの一方流れ(左上)  
容器温度の不連続性により起こる流れ(右上)  
球の突発的な回転によって引き起こされる流れ(左下)  
回転するマイクロ粒子によるマグナス効果(右下)

## 統計的信号処理研究室

### モデルベースとデータ駆動の融合

統計的信号処理は、観測された生のデータから有益な情報を抽出するための方法論を体系化した学問分野で、情報通信をはじめ、計測、画像処理、生体信号処理など幅広い応用があります。当分野では統計的信号処理を武器に、データのセンシング、収集、伝送、解析、利活用など、データサイエンスに関する様々な問題に取り組んでいます。特に最近では、信号のスパース性や離散性を利用した劣決定線形逆問題の解法について研究しています。

[林 和則]

深層展開を用いた光通信受信機の構成例

情報通信分野の従来からの知見とデータ駆動のアプローチの融合により、出力における損失関数をもとに光通信受信機内の全てのパラメータを一括して決定できます。

