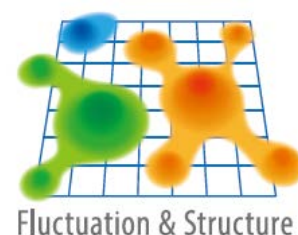


ゆらぎと構造の協奏

～非平衡系における普遍法則の確立～

News Letter Vol.8

2016.12.5 発行



本号では、領域会議や領域と関係する研究会の報告、ならびに新たに 2016 年度より本新学術領域研究に参加された公募研究の内容を掲載いたします。

3 名の方が SFS Research Award を受賞されました

A02 班・ニュースレター編集委員 北畑裕之

「ゆらぎと構造」領域において特に秀でた研究業績をあげられた研究者に贈られる領域賞（SFS Research Award）を東京大学 沙川氏、東京工業大学 車氏、山口大学 岩楯氏の 3 名が受賞されました。受賞内容は以下の通りです。

沙川 貴大 氏：

「非平衡統計力学の定式化とその応用」

車 兪澈 氏：

「GUV 内環境での脂肪鎖合成による
動態変化観察とその物理」

岩楯 好昭 氏：

「遊走細胞のかたちを決める分子ダイナミクス」



写真1:SFS Research Award 授賞式の様子。
(左から沙川氏、車氏、岩楯氏、佐野領域代表)。

6 月に開催された第三回領域研究会（“The 3rd Research Area meeting”）において、SFS Research Award の授賞式が行われました。授賞式においては、3 名に賞状と楯が佐野領域代表より授与されました（写真）。そのうち 3 名が受賞講演においてその成果を報告されました。

受賞講演のタイトルは以下の通りです。

沙川 貴大 氏：

“Fluctuation Theorem for pure quantum states”

車 兪澈 氏：

“Construction of lipid synthesizing protocell”

岩楯 好昭 氏：

“Shape determination and polarity generation for migration depending on stress fibers in fish keratinocytes”

受賞した 3 名により最新の研究成果が報告され、活発な議論が行われました。



写真2:授与された楯と賞状(岩楯氏の好意による)。

研究会報告

ゆらぎと構造の協奏 第3回領域研究会 開催報告

A03 班 有賀隆行

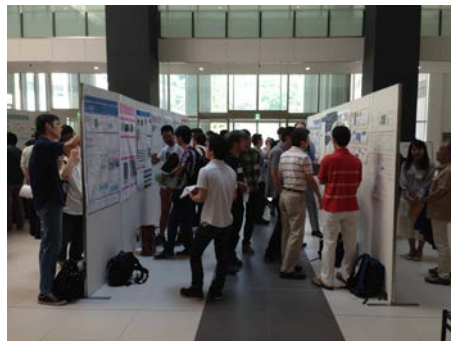
2016年6月17日から19日にかけての3日間、九州大学伊都キャンパスにて「第三回領域研究会（"The 3rd Research Area meeting"）」が開催されました。以前の箱崎キャンパスから伊都の山中に移転して最初の研究会であり、新しいキャンパスから見渡せる田園の景観と、交通の便の悪さを堪能しつつも、研究会は活気のあるものとなりました。

本学術領域研究も4年目へと突入し、本研究会では、新たに採択された公募研究班員による今後2年間への展望と、本領域に参画している私を含む特任教員や博士研究員による研究発表を主体とした総勢21名による講演、西森氏による招待講演、及び、3名のSFS Research Awardsの受賞講演が行われました。さらに、ポスター発表では69名が発表し、全参加者数が124名におよぶ大きな会となりました。また本研究会の特徴として、新たに国外出身の研究員も複数参画することになった経緯から、全ての口頭発表が英語で行われた点が挙げられます。英語だからといって講演で質問が滞るということもなく、学生からも活発に質問が飛び、激しく議論が交わされました。

講演では、佐野領域代表による簡単な挨拶の後、佐々氏によるボルツマンとネーターというこの分野の始祖とも呼べる歴史の紹介から新たなネーター保存量としてプランク定数を導く刺激的な発表に始まり、大塚氏、Ferrier氏によるナノデバイスをを用いた新規プローブの開発と量子的な非平衡ゆらぎの解析、鳥谷部氏、石島氏によるバクテリアの鞭毛モーターのトルク発生・制御機構の報告と続き、初日の第一セッションからこの領域の多彩っぷりが伺えました。西森氏による招待講演では数学者達によるアリ実験の苦労話で一笑いし（もちろん数理解析も！）、長屋氏の液晶に電気刺激を与えた際の負の粘性、前田氏のピーナッツ型基板が作るバクテリアの協同現象、鈴木氏の油滴の非線形加速と見ていただけで楽しい非平衡現象の報告が続きました。2日目には吉野氏によるガラス転移の平均場理論、岡本氏による脂質膜のパターン形成、木村氏の細胞内部での流れ場の解析、続いて、有賀（筆者）による分子モーターのゆらぎと応答の解析、渡邊氏によるイオンコンダクタンスを用いた新しい顕微鏡法、さらに石原氏による上皮細胞の変形モデルと、数理・実験の両面から報告が行われました。ポスター発表（図）を挟んだ後、前ページで紹介したSFS Research Awardの授賞式と受賞講演が行われ、夜は糸島の新鮮な魚介料理に舌鼓をうちました。最終日には竹内氏による界面成長、塚原氏による乱流、斎藤氏によるボーズアインシュタイン凝縮の持つ、それぞれの普遍的な構造について報告されました。高須氏、前田氏はそれぞれ冷却原子、及び摩擦を通じて非平衡ゆらぎの役割を報告し、和田氏、藤原氏の両氏はボルボックスと脂質膜の研究を通じて、なんと“人生の明と暗”まで報告がなされました。

当学術領域研究では「非平衡系における普遍法則の確立」を副題としています。この領域研究に参画する以前の筆者の私見（偏見）では、これまで非平衡系での研究といえば、解ける問題を作ってはそれを理解するといった研究を地道に積み上げて行く一方で、なかなか普遍法則の確立には程遠いだろうといった印象がありました。しかしこの研究会では、全体を見通してもそのような印象が全く感じられず、講演者・ポスター発表者それぞれに、自然に存在する非平衡現象への理解を通じて、普遍的な法則を解き明かしていくという大きな目標に向かって着実に歩を進めていることが実感できました。これだけ背景の異なる多彩な研究者があつまり、1つの大きな目標に向かう領域というのは他になく、分野を超えた普遍的な理解への到達もそう遠くないと期待できる研究会でありました。

最後に、会場の準備や運営に尽力してくださった木村康之氏と木村研の皆様にお礼を申し上げます。



図：大盛況だったポスター発表の様子。

研究会「異常拡散現象をめぐる最近の進展」の報告

A01 班 玉木脩二

2016年8月31日、9月1日の2日間、慶應義塾大学日吉キャンパス来往舎にて、「ゆらぎと構造の協奏」共催の研究会「異常拡散現象をめぐる最近の進展」が開かれました。台風一過の青空のもと、招待講演者14名を含む参加者約40名が集まり、異常拡散現象に関する様々な話題について活発に議論が行われました。異常拡散現象は様々な分野で見られるにもかかわらず、これまでは各分野で個別に論じられてきました。本研究の主旨は、これらの間に共通の側面を見出すことであり、そのことを反映して、物質・生命科学に止まらず、数理科学や経済物理といった非常に幅広い分野から講演者が招かれました。以下、簡単に講演内容を振り返ります。

研究会1日目は世話人である齊藤氏のあいさつに始まり、7件の招待講演が行われました。齊藤氏のあいさつでは、異常拡散現象が自然現象の様々な場面で見られることが述べられ、それらを統合的に扱うことの重要性が説かれました。最初の講演は、竹内氏によるもので、界面成長現象における界面のゆらぎが持つ異常拡散的な性質について論じられました。続く村山氏の講演では、1本のゆらぐDNA上をランダムウォークする生体高分子の挙動と、DNAのジャングル中でのビーズの拡散現象が論じられました。齊藤氏の講演では、低次元物質中における熱の異常拡散について、実験・理論・数理の歩み寄りによる近年の進展が説明されました。金澤氏の講演では、外国為替市場における階層構造が、分子運動論における階層構造になぞらえて説明されました。高安氏は企業間取引におけるお金の流れを記述する輸送モデルについて論じられました。上田氏は、乱流速度場中のブラウン粒子の軌道確率に見られるレプリカ対称性の破れについて論じたのち、異常拡散を記述するトラップモデルへの応用について発表しました。1日目の最後の講演は秋元氏によるもので、連続時間ランダムウォークの枠組みで、2乗変位の長時間平均から定義される拡散係数が本質的にゆらぐ量であり、この意味でエルゴード性が弱く破れているということが、異常拡散現象における一つの重要な側面として示されました。

2日目も7件の招待講演が行われました。まず佐藤氏による講演ではノイズの加わった力学系における異常拡散現象について、決定論的拡散の話も交えてわかりやすく論じられました。坂上氏は、1本の高分子を構成する1つのモノマーに着目し、その拡散挙動に関するモデルと実験について論じました。手塚氏の講演では、様々なトポロジーを持った合成高分子の性質について、拡散挙動との関連が述べられました。佐甲氏の講演では、細胞膜上のたんぱく質の状態変化が拡散挙動に及ぼす影響について隠れマルコフモデルを用いた説明がなされました。水野氏の講演ではクラミドモナスの運動によって作られる速度場中におけるコロイド粒子の拡散に関する研究が発表されました。大信田氏は、高密度中の拡散において見られる協同現象について、まず1次元の場合を理解するという立場から一列縦隊現象について詳細な研究結果を示しました。最後となる関氏の講演では、連続時間ランダムウォーク理論の最初の応用とされるアモルファス半導体における電子の異常拡散現象について論じられました。

すべての講演が終わったあとは、秋元氏のあいさつによって閉会しました。そこでは、本研究で初めて様々な分野の異常拡散現象が一つの場で議論されたことに対する重要な意義と、今後も継続して研究会が行うことができればという願いが述べられました。

研究会を通して特に印象的だったのは、分野が全く異なっているにもかかわらず、自らの研究手法や知恵を相手の研究に適用してみようという積極的な姿勢が多々見られた点です。例えば、村山氏の講演途中で、アンサンブル平均と長時間平均とを同時に行って求めた実験データに対し、異常拡散現象ではエルゴード性の破れが起こりうるから、これらは別々に見る必要があるという提言がされたことが印象的でした。また、参加者は、講演の間の休憩時間にも絶えず議論を行っており、分野の垣根を超えた理解をしようという熱心な姿勢が感じられました。異常拡散現象は、一見狭い話題に思われがちですが、実は非常に多くの場面で見られており、これから盛んに研究されて然るべき現象であると思われます。最後の秋元氏のあいさつにあったように、今回のような研究会が今後も継続して行われれば、非常に実りの多いものになるのではないだろうかと感じました。

最後に、ご多忙であるにもかかわらず、世話人として本研究会を企画・運営してくださった齊藤圭司氏、秋元琢磨氏に感謝申し上げます。

 玉木脩二(慶應義塾大学・理工学研究科・博士課程1年)

第 67 回 コロイドおよび界面化学討論会

シンポジウム「非平衡開放系でアクティブに振る舞うコロイドー研究の最前線ー」の報告

A02 班 小谷野 由紀

去る 2016 年 9 月 22 日、北海道教育大学旭川校にて行われた日本化学会の分科会である第 67 回コロイドおよび界面化学討論会において、本研究領域の協賛で「非平衡開放系でアクティブに振る舞うコロイドー研究の最前線ー」と題した一般シンポジウムが開催され、大盛況のうちに終わった。

シンポジウムは趣旨説明(図 1)と 6 つの講演で構成され、1 講演あたり 30 分で行われた。それぞれの講演内容について簡単に報告したい。小谷野(千葉大)は、水面上の樟脳粒を有限区間に閉じ込めたときの効果について講演した。江端研究員(九州大)は周期的な垂直加振に誘起される気液界面におけるファラデー波を用いた液滴の運動機構について講演された。続いて、西上研究員(京都大)



図 1: シンポジウムに先立って趣旨説明を行う同志社大学塩井彰久教授。

はアメーバの運動機構であるアクトミオシン系による脂質膜の変形について、さらに、細胞運動との関連について発表された。山本助教(同志社大)は白金を触媒とする化学反応を駆動力とした白金触媒粒子の、形状に着目した単独の運動と、さらに集団となったときの運動様相について講演された。伴講師(大阪大)は界面張力によって誘起されるマランゴニ対流を題材に、エントロピー生成と系の安定性について講演された。最後に、濱田准教授(北陸先端大)は脂質二重膜から作られるベシクルの変形、膜上における異常拡散、コロイド粒子との相互作用のダイナミクスについて講演された。

冒頭に述べた通り、今回のシンポジウムは日本化学会の分科会にて行われたが、化学、物理学、生物学、工学といったバックグラウンドを問わず、アクティブマターを対象とした研究を広く取り上げるよう構成されていた。そのため、質疑応答の場では、詳細に踏み込んだ質疑ばかりではなく、研究のモチベーションを問うものも多数あり、異分野間の交流促進に大きな寄与があったのではないかと感じた。聴講者も 100 人程度集まり、注目度の高さが伺えた。

最後になりましたが、塩井教授(同志社大)をはじめとする本シンポジウムのオーガナイザーの皆様に感謝致します。

企画提案者(敬称略)：

塩井彰久(同志社大学)、吉川研一(同志社大学)、中田聡(広島大学)、住野豊(東京理科大学)、原雄介(産業技術総合研究所)

発表プログラム：

「有限区間に閉じ込められた樟脳粒の運動」小谷野由紀(千葉大学)

「表面波を使い自由に泳ぐ液滴」江端宏之(九州大学)

「アクトミオシンにより駆動される脂質膜界面の変形」西上幸範(京都大学)

「化学反応を用いて水中で自発運動を行う白金触媒粒子」山本大吾(同志社大学)

「Marangoni 効果の熱力学～エントロピー生成を中心に～」伴貴彦(大阪大学)

「細胞サイズ空間で創発する膜とコロイドの動的カップリング」濱田勉(北陸先端大学院大学)

小谷野 由紀(千葉大学大学院・理学研究科・博士後期課程 2 年)

「冥王代生命学の創生」+「ゆらぎと構造の協奏」合同研究会の報告

A03 班 神保 岳大

2016年10月22日、秋の過ごしやすい気候の下、東京工業大学キャンパス イノベーションセンター CIC 田町にて、新学術領域「冥王代生命学の創生」+「ゆらぎと構造の協奏」合同研究会が開催されました。普段の私達の研究からは耳慣れない「冥王代生命学」という言葉ですが、地球誕生から約6億年の冥王代において、生命誕生がいつ、どこで、どのように誕生したかを、地球惑星科学と生命科学の融合として明らかにしようとする分野であります。ボトムアップ型アプローチとしての人工細胞の実現、化学進化モデルの実証と、トップダウン型アプローチとしての冥王代生命の類似環境・類似微生物の探索というそれぞれの研究を、中心となる冥王代地球班にフィードバックしながら、最終的に相互に整合的な「生命誕生場モデル」の実現を目指そうという試みが特徴的であるという印象を受けました。一方、本新学術領域でも、A03機能班において非平衡ダイナミクスとして見た生命機能の研究や人工細胞モデルの実現を目指す研究を行っており、非常に多いホットなトピックです。今回はそれぞれ領域から計12名の参加があり、少数ながら講演中もたくさんの議論を行うことができた、密接な研究会になったと感じています。

本研究会は8件の講演から構成されており、最初に今井正幸先生（東北大学）から本研究会の意義などのお話を頂きました。そして、それぞれの学術領域を代表して佐野雅己先生（東京大学）と黒川顕先生（国立遺伝研）から領域の概要と研究成果が紹介されました。前半部分は冥王代生命学の講演で丸山茂徳先生（東京工業大学）からは複雑系科学を研究するにあたっての俯瞰的な科学哲学に始まり現在の冥王代生命研究の計画をお話頂き、大島拓先生（奈良先端科学技術大学院大学）からは初期の生命機能を探る鍵となる細菌の原始的な細胞分裂が紹介されました。二つの新学術領域双方で研究されている車兪澈先生（東京工業大学）からは、人工細胞内での脂質合成代謝実現についての成果が紹介されました。後半は「ゆらぎと構造の協奏」から鳥谷部祥一先生（東北大学）が遺伝情報の起源をDNAライゲーションから説明する新しいモデル機構が紹介されました。続いて前多裕介先生（九州大学）から生命の起源における分子の濃縮の問題に対して熱温度勾配から選択的な分子輸送現象を引き起こす実験が紹介されました。最後に菅原正先生（神奈川大学）からデザインされた両親媒性分子を用い、形態変化、物質供給、遺伝子複製という原始的な「細胞周期」を持った、再帰的な人工細胞モデルの紹介がされました。

今、研究会を総括する段になって、黒川先生が「生命の理解・生命起源の研究は超学際的研究である」と、お話されていたことが思い出されます。本研究会は生命を題材としながらも、モチベーションやアプローチの方法が異なる二つの新学術領域研究が、お互いの垣根を超えて議論しあう、まさにその言葉通りのものであり、今後の協力を通じて双方のさらなる発展に繋がる期待を強く抱きました。

最後に、このような合同研究会を行うにあたり、中心になり企画運営を行われた、車先生、今井先生に感謝いたします。

神保 岳大（東北大学・理学研究科・博士課程3年）

Current and Future Perspectives in Active Matter

A01 班 谷田桜子

日増しに秋の深まりを感じる中、10月28、29日に国際会議「Current and Future Perspectives in Active Matter」が東京大学にて行われました。この研究会は名前が表すようにアクティブマターの研究の現在とこれからの見通しを参加者と共有できるような構成になっており、講演が5つのセッションに分けられていました。

初日の28日前半は「Session I: Various Interactions vs. Universality in the Standard Model」というセッション名でアクティブマターの集団的性質について6つの講演が行われました。様々な実験系における結果の報告があり、Fernando Peruani氏 (University of Niece)の理論研究の結果とともに集団運動の前線を見通せるものとなっていました。28日後半は「Session II: Cytoskeleton Dynamics, Mathematical Modeling」で細胞の運動に関連

する4つの講演が行われました。セッション全体で細胞の内側にある細胞骨格が引き起こす運動から細胞を外側から眺めて考える運動まで一連の流れとなっており、前セッションの中心的なテーマであった集団運動を想起するたんぱく質の協同性と細胞運動について洞観するものでありました。

二日目29日は3つのセッションとポスター発表が行われました。「Session III: Biological Active Matter, Flagella and Hydrodynamics, Modeling」では実際の生物の運動について微生物の運動機構を軸とした講演が3件行われました。前セッションの細胞とは異なる多様な運動について実験・理論双方から知識を深めることが出来ました。「Session IV: Modeling Cell Population」では実際の生物で見られるような細胞集団のダイナミクスについて2講演が行われました。単細胞の変形・移動等から細胞組織へ繋がる内容であり、アクティブマターという物理学的な見方から複雑な生物を考えるアプローチに個人的に刺激を受けました。最後に「Session IV: Synthetic Active Matter」では人工材料を使ったアクティブマターについての3講演が行われました。人工アクティブマターはこの分野の知見を深めるだけでなく応用を含めた分野の発展につながると感じました。Contributed Talkやポスターの発表、質疑応答でのやりとりも積極的に行われ、アクティブマター研究の活発さも肌身で感じる事が出来る会議でした。

研究会概要

日時：

2016年10月28日（金）10:00-18:00

2016年10月29日（土）9:30-16:30

会場：

東京大学理学部化学本館5階講堂

東京大学理学部4号館1220号室

発表件数：

講演19件（内 Contributed Talk 1件）

ポスター5件

参加人数：

45名（内、当日参加者8名）

公募班紹介

壁乱流亜臨界遷移の間欠乱流パターン形成の大規模DNS解析

A01 班 塚原 隆裕

古典物理である流体力学の永年課題として、乱流の起源探求、つまり乱流遷移過程の解明が一世紀以上にも亘り挑まれてきた。流体運動の支配法則 Navier-Stokes 式（または Orr-Sommerfeld 方程式）に基づく線形安定性解析により、（層流を維持し得る）臨界レイノルズ数 Re が半世紀前から研究され、例えば平行平板間（チャンネル）流れの基本解は $Re = 5772$ で不安定化し乱流状態に落ち着くものと理解されている。また、カノニカル流れの代表例である円管内流において $Re = \infty$ という臨界値は解析的に求められるが、通常、 $Re > 2000$ でも乱流状態になることが知られており、工業的にも $Re = 2000$ 程度を基準に管内流の状態（層流 or 乱流）を判断することが多い。この乱流遷移は、有限攪乱に起因した亜臨界遷移（バイパス遷移）によるものである。その臨界レイノルズ数は線形安定性理論によるものに比べて有意に低い値となり、この値は乱流を維持し得る臨界値（下臨界レイノルズ数）にも相当する。下臨界レイノルズ数の解明は流体力学的・工学的に重要な課題であるが、この解明には非常に大規模な実験流路またはシミュレーションが必要不可欠であると分かってきた。なぜなら、下臨界レイノルズ数付近で、流れが一様に“層流⇄乱流”のスイッチをするわけではなく、乱流領域が時空間的に局在した非平衡臨界現象を呈するためである。先の安定性解析は、いわゆるローカルな流れの線形不安定をみているのに対して、本研究はグローバルな流れの非線形・非平衡問題を対象として壁乱流の亜臨界遷移メカニズムおよび下臨界レイノルズ数の解明に挑むものである。

亜臨界遷移の例として、円管内の局在乱流パフを伴う臨界現象がある。近年、局在乱流の重要性が認識され、乱流パフの生存時間と分裂時間を評価し、2つの時間スケールが同値になるレイノルズ数が下臨界値に相当すると報告された。さらに、円管内遷移流は流れ方向の1次元空間と時間変化による1+1DのDP (Directed Percolation) 現象と提案され、亜臨界遷移がDP普遍クラスの実例として注目を集めている。本研究では、2方向に空間的自由度を持つチャンネル内遷移流に注目し、本研究者がこれまでに発見・解析をしてきた局在乱流構造“乱流縞”を再調査し、DP普遍クラスとしての特徴評価および乱流縞のマクロな間欠パターンを形成するメカニズムについて探っていく。主に数値実験に基づいて解析を進めるが、大型並列計算機を用いた直接数値計算（DNS）により、チャンネル内遷移流の再現を行う。図1に示すように、下臨界レイノルズ数付近では乱流縞の空間スケールが拡大し、従来の計算規模では捉えきれず、世界最大級のDNSを実現していかなければならない。

大規模DNSの実施、およびDNS結果についてDP転移の解釈を取り入れることで壁乱流遷移過程の解明とDP普遍クラスとしての普遍法則確立を本研究目的としている。これにより下臨界レイノルズ数の決定やDPモデル構築に繋げていきたい。本研究対象は、「ミクロゆらぎ：乱流微細渦」と「マクロ構造：乱流縞」の相互干渉で生じる「ゆらぎと構造の協奏」による臨界現象である。

レイノルズ数(または流速)を徐々に下げると、“乱流→層流”遷移途中で...

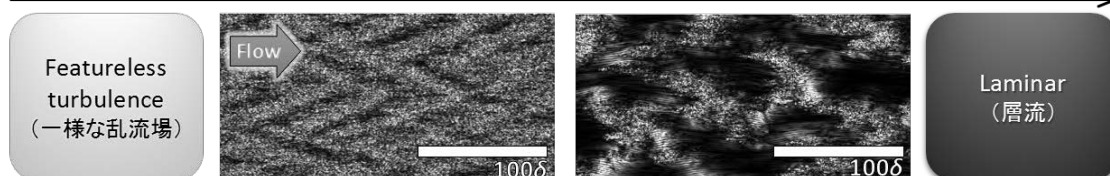


図1: 平行平板間乱流(チャンネル幅 2δ)において、層流化前の遷移域に見られる大規模間欠構造“乱流縞”。中間のコンター図は、チャンネル中心平面内の壁垂直方向速度分布の瞬時場を可視化したもので、白が有意な値を持っている領域(局在した乱流領域)を示し、黒が層流領域に相当する。計算領域の全域を可視化している。

高速量子プローブを用いた微小系の電子輸送ゆらぎの研究

A01 班 大塚朋廣

半導体微細加工技術の進歩により、単電子効果や量子効果が現れる微小な系を人工的に作製し、そのミクロな特性を電気測定で明らかにすることが可能となってきました。この人工微小系では各種パラメータを人工的に操作し、系統的に非平衡状態を作り出すことができ、さらに微小系では電流ゆらぎの出現が本質的となるため、非平衡系のゆらぎに関する現象を定量的に調べる上での理想的な実験系となっています[1]。この研究をさらに進め、ゆらぎの物理を調べるためには、微小系における局所電子状態を直接的に調べることができ、またそのダイナミクスまで明らかにできるプローブが有用となります。私たちは半導体微細構造中に形成される人工量子準位を利用してこの局所電子状態プローブを実現し、さらに高速ダイナミクス測定に向けて、高周波測定技術を使ってその動作を高速化してきました。

微小系における局所電子状態を調べるために、私たちは半導体量子ドットと呼ばれる、電子を微小な領域に閉じ込めた構造を利用します。量子ドットでは単電子効果や量子閉じ込め効果により、内部に離散的なエネルギー準位が形成され、この準位を操作可能な人工量子準位として利用できます。量子ドットを測定対象となる微細構造に結合させ、測定対象からドット内準位への電子のトンネルを調べることで、測定対象内の局所電子状態の情報を得ることができます。具体的には人工量子準位のエネルギーを走査しながら電子のトンネルを解析することにより、局所的な電子エネルギー分布、電気化学ポテンシャル、電子温度等を直接的に求めることができます。また量子ドット内のスピン依存準位を利用することによって、測定対象内の局所スピン状態も調べることが可能です[2]。

局所電子状態のダイナミクスを調べる上では、プローブの動作速度が重要となります。私たちは高周波測定技術を活用することによって、電子のトンネルの測定帯域を拡張し、プローブの動作速度を向上させました。新しい測定セットアップでは、高周波共振器の一部にプローブが組み込まれ、共振器からの高周波反射信号を測定します。この新しい方式では従来の測定に比べて 1000 倍程度のプローブ動作速度の改善を実現でき、10 μ s 程度の電子のトンネルを実時間で観測することができました。また電子温度や電圧バイアス等、電極状態の変化に対するプローブ動作の頑強性についても実証することができました[3]。私たちはこの新しい局所電子状態プローブを使って、微小系の電子輸送、特にそのゆらぎについて調べます。

[1] e.g. M. Ferrier *et al.*, *Nature Phys.* 12, 230 (2016).

[2] e.g. T. Otsuka *et al.*, *Phys. Rev. B* 86, 081308(R) (2012).

[3] T. Otsuka *et al.*, *Sci. Rep.* 5, 14616 (2015).

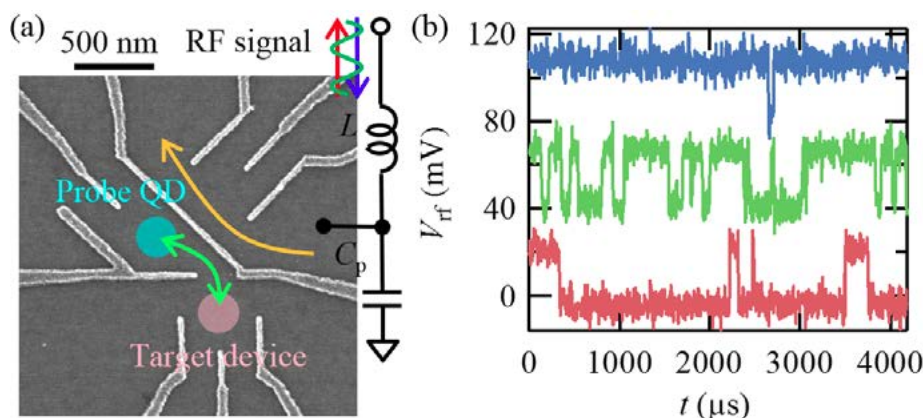


図 1:(a) 半導体量子ドットを用いた局所電子状態プローブの電子顕微鏡写真と測定セットアップの模式図。(b) プローブ量子ドットへの電子のトンネルの実時間測定結果

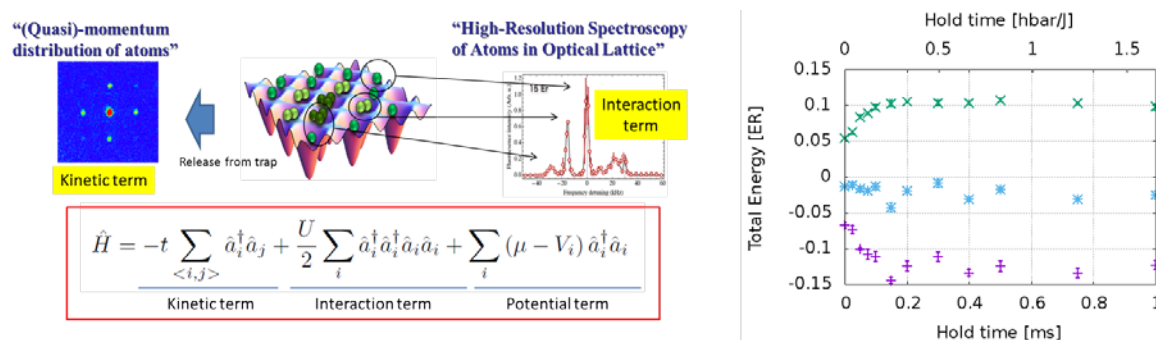
冷却原子を用いた非平衡孤立量子系の制御と前期熱化の研究

A02 班 高須洋介

孤立量子系における熱平衡化の問題は、量子統計力学の基礎にかかわる最重要問題の一つとして、非常に注目を集めている研究テーマであり、主に理論的側面から国内外で活発に議論されてきた。一方、孤立した量子多体系というものは、これまで対応する実験系が存在しなかったため、あくまで極限まで理想化した思考実験の対象物であった。近年、レーザー冷却された原子集団が孤立量子多体系として注目を集めている。レーザー冷却法および蒸発冷却法により、典型的には 10^5 程度のマクロな数の原子集団を量子縮退近傍までに冷却させることが可能である。原子集団は、超高真空中にレーザー光により閉じ込められていて、外界とは直接接触しておらず、まさに、「マクロで理想的な孤立量子多体系」が実現されている。また、冷却原子系では、実験の各種パラメーターの自由度が大きく、空間・時間の様々なパラメーターを様々に変化させることで、興味ある量子系を様々に模倣することが可能である。このような量子シミュレーションと呼ばれる研究テーマが実験面・理論面の両面から大きな興味を集めている。

本公募研究では、冷却原子を用いて、量子非平衡系を構築することを目的として行う。空間の次元性や、さらには原子同位体を変えることにより、可積分系、またはそれに近い系を構築して、量子状態の制御と前期熱化的な振舞いの観測を目指して実験的研究を行っている。具体的な研究対象として、光格子中において、光格子深さを急激に減少させた（クエンチ）後の時間発展ダイナミクス、および基底状態 ^{173}Yb 原子の核スピン由来の $\text{SU}(6)$ 対称性とその動的制御によるスピンの時間発展ダイナミクスの両方を対象として研究を行っている。

ごく最近のトピックスとしては、われわれが中心となって発案・実行した冷却原子気体の運動エネルギー・相互作用エネルギーの直接測定がある。ボース凝縮まで冷却された ^{174}Yb 原子を光格子に導入しモット状態を作る。超流動領域へクエンチを行い、その後光格子の深さを一定に保つ。その後、原子団の運動エネルギー、相互作用エネルギーのアンサンブル平均を観測した（図左）。その結果、原子のホッピング時間程度での運動エネルギー・相互作用エネルギーの再分配を観測することができ、その和は常に一定であった（右）。これは、冷却原子系の孤立性を検証した研究である。今後は、このわれわれが初めて確立した運動エネルギー・相互作用エネルギーの直接測定を通して、非平衡ダイナミクスや前期熱化の観測に向けた研究を進めていきたいと考えている。



図左: 光格子中の原子団の運動量エネルギー、相互作用エネルギーの直接測定

図右: 観測された運動量エネルギー(紫)、相互作用エネルギー(緑)、およびその和(青)

揺らぐ非平衡構造によるフィードバック制御：べん毛モーターのトルク発生機構の解明

A03 班 鳥谷部祥一

バクテリアのべん毛モーターは、300 Hz の高速回転によりバクテリアの 30 $\mu\text{m/s}$ という高速遊泳を実現する。さらに、状況に応じて回転方向や速度を制御可能な、高出力・高性能アクチュエーターである。べん毛モーターは長い研究の歴史があるが、構造が複雑であり、また、単離してべん毛モーターだけを調べることができていないため、回転メカニズムは良く分かっていない。たとえば、イオンの流れを使ってトルクを生み出しているが、イオン流をどうやってトルクに変換しているのかといった最も基本的なことも分かっていない。

べん毛モーターは、回転子とトルク発生を担う 10 個程度の固定子から成る。固定子をプロトンやナトリウムイオンが流れ、固定子はこれをトルクを生み出して回転子を回す。興味深いことに、回転中に固定子が結合・解離して動的に入れ替わることが発見された [1, 2]。固定子と言っても、常に固定されているわけではなく、動的な揺らぐ構造を形成しているのだ。さらに、固定子がモーターに組み込まれたり固定子がモーターから外れるレートがモーターにかかる負荷に依存することが分かった [3, 4]。つまり、「べん毛への負荷が大きくなると、固定子を増やしてトルクを増強する」フィードバック制御をしているらしい。しかし、モーターがどのようにトルクを感じ、そして、固定子数制御をしているのか、そのメカニズムは分かっていない。ひとつのヒントとして、固定子を流れるイオンの流れを阻害すると、モーターに固定子が安定に結合しないことが示唆されている [5]。しかし、たんぱく質がイオンの流れをどうやって感じることができるのだろうか。謎は尽きない。

本課題では、まず、(i) 動的な揺らぐ構造によって生み出されるトルクはどのような性質を持っているのか明らかにする。高精度のトルク制御・測定により、トルク特性を詳細に調べる。さらに、(ii) 1 分子蛍光測定により、固定子脱着の直接観察を行う。外部トルクを加えて固定子脱着の反応レートを測定することで、「揺らぐ非平衡構造によるトルク発生機構」、特に、固定子数制御のメカニズムの解明を目指す。

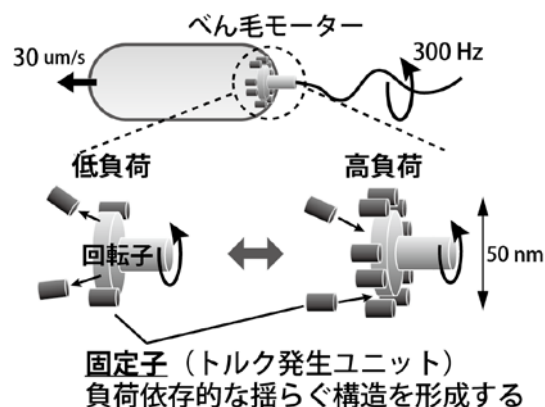


図 1: 揺らぐ構造によるトルク発生. イオン流をトルクに変換する固定子は、べん毛にかかる負荷に応じて、数が変化する。負荷が大きくなると数が増えてトルクを増強する。

- [1] Ryu et al., Nature 403, 444 (2000)
- [2] Leake et al., Nature 443, 355 (2006)
- [3] Tipping et al., mBio 4, 00551 (2013)
- [4] Lele et al., PNAS 110, 11839 (2014)
- [5] Fukuoka et al., Mol. Microbiol. 71, 825 (2009)

高分子溶液を内包したベシクルの外部揺動に伴う内部粘弾性と形の揺らぎ

A03 班 柳澤 実穂

細胞を覆う細胞膜の変形は様々な生命機能と結びついているが、その多くは細胞内の構造変化に対して可逆的である。これまでにリン脂質 2 重膜小胞（リポソームやベシクル、以下ではベシクルと呼ぶ）を用いた研究により、細胞で見られる多くの膜変形が人工膜系で再現され、また物理的にも説明されてきた。例えばわれわれは、膜内外が水である多成分ベシクルを用いて、膜陥入や細長い膜突起形成などを再現し、それらの膜変形を膜の弾性と脂質の膜内相分離のカップリングから説明してきた [1, 2]。しかし、生細胞でみられる膜形態とは異なり、ベシクルでみられる曲率の非常に大きな仮足状の膜突起は、熱ゆらぎや脂質の相分離に際して不安定となり、一旦収縮すると元には戻らない [2]。この事実と、生細胞の中身がゲル状の細胞骨格やゾル状の細胞質といった粘弾性流体であることを考慮すると、生細胞では、細胞骨格と細胞質が、膜と強く相関して応答することで、様々なゆらぎに晒しても安定な膜形態を実現しているという仮説が考えられる。

この仮説を検討する過程で、高濃度の高分子溶液を内包したベシクルを構築し、高浸透圧下での脱水過程を観察したところ、内部の高分子濃度が高くなるにつれて膜内の粘度が上昇すると、レーザー照射に伴う熱ゆらぎのもとでも安定した仮足状の膜突起が現れることを見出した（図 1 左） [3, 4]。また、内部を細胞骨格様のゲル薄膜で被膜されたベシクルでは、脂質の相分離がない場合でも、膜陥入小胞が生成されることも見出しつつある（図 1 右、未発表）。以上の実験結果は、生細胞の形態が膜と粘弾的な高分子との強い相関により生じていることを示唆する。このことを明らかにするためには、細胞が晒されている様々なゆらぎに対するベシクルの内部粘弾性と膜変形の応答と、その相関関係を解明することが必要である。そこで本研究では、高分子溶液を内包したベシクルを用いて、これを解明することを目的とする。本研究を介して、生命の形態形成原理を司る物理的機構に迫りたい。

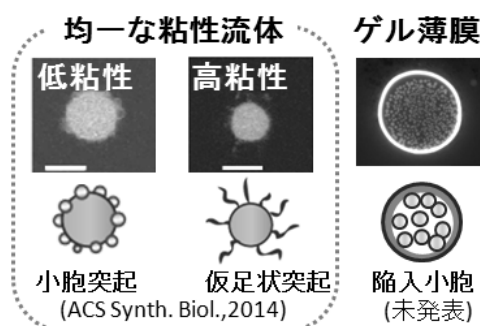


図 1: ベシクル内が粘性流体の時には突起形成、ゲル薄膜で被膜された時には膜陥入がみられる。

- [1] 柳澤実穂, 日本物理學會誌 **68**:534-537 (2013).
- [2] M. Yanagisawa, et al., Physical Review E **82**:051928 (2010).
- [3] K. Fujiwara & M. Yanagisawa, ACS Synthetic Biology **3**:870-874 (2014).
- [4] 柳澤実穂, 藤原慶, 生物物理, **55**:246-249 (2015).

柳澤実穂（東京農工大学・大学院工学研究院・特任准教授）

高速イオン伝導顕微鏡による生体膜ナノ計測技術の開発

A03 班 渡辺信嗣

研究代表者は、公募研究にて生体膜の時空間ゆらぎの計測技術を開発する研究を行っています。ここでは、生体膜計測を行うための開発中のプローブ顕微鏡技術について、簡単に紹介します。

細胞膜は細胞の内部と外部を決める境界であり、細胞の形を定義するものです。脂質で構成される柔らかく非常に薄い（厚さ～4ナノメートル）この膜には、力や熱、化学物質の濃度といった物理・化学的变化を検出する様々な分子センサーが埋まっており、細胞は外部の環境変化を感じて、環境変化に対して適切に自身の状態を変化しています。このような細胞応答の初期過程では、個々のセンサー自体の分子構造の変化のみならず、センサー近傍の細胞膜骨格が制御を受けて、種々のセンサーが協同的に局所空間に集合するなど、膜自体の構造や形状がナノスケールでダイナミックに変化する興味深い現象が進行すると考えられています。すなわち、ナノスケールで見れば、生体膜の構造は決して均質なものではなく時空間で揺らいでいます。このようなナノスケール膜動態の計測から、細胞の内部状態に関する情報さえ少なからず抽出できるはずですが、実験技術の様々な制限から、光学顕微鏡の解像度を超える 200 ナノメートル以下の世界で起きている細胞膜のナノ構造、特に、液中の生理環境下におけるその構造動態に関する情報を得ることが、現状では非常に困難である状況です。この従来技術の限界を突破し、ミクロの生体膜の構造動態に潜んでいる豊富な知見を明らかにすることを目標に、本研究代表者は、ナノスケール膜動態を計測しうる新しい顕微鏡の開発に取り組んできました。

この新しい顕微鏡を高速イオン伝導顕微鏡と称します。探針にナノポアを有するガラスピペットを使用し、その先端にイオン電流を誘起して、探針-試料表面の距離によって変化するイオン電流を検出することで、試料表面の形状を液中の生理環境下において得ることが可能です（図1）。ナノポアが小さければ高解像を得ることが可能で、数ナノメートルサイズの生体分子も可視化できます。更に、探針が試料に全く接触することなく計測可能なため、生体膜など機械的強度が非常に弱く、これまで容易に計測できなかった生物試料も扱うことも可能です。この顕微鏡の動作原理は、1989年に Hansma らが発明したイオン伝導顕微鏡が起源ですが、ナノポアに流れる微小イオン電流の検出感度や、プローブ走査機構に難点があり、従来のイオン伝導顕微鏡では時間分解能が研究実用レベルに全く達しておらず、バイオ研究のツールとしてはほぼ使いものにならない状況でした。本研究代表者は、100 倍以上の時間分解能の改善に成功し、高速イオン伝導顕微鏡としてこの技術を革新しました。

本研究では、高速イオン伝導顕微鏡を用いて、生体膜の局所的振動のゆらぎを計測する技術を開発します。さらに、膜ゆらぎから局所的力学特性を得ることを目標にします。計測対象としては、単離された生きているミトコンドリアを用います。ミトコンドリアは真核細胞に存在する細胞内小器官の一種で、その外膜は非常に柔らかく、生理環境の液中では熱ゆらぎにより数ナノメートルオーダーで振動することが明らかになりつつあります。また、この振動は、膜近傍のミトコンドリア内部の局所的機械力学構造に依存するものと考えられますので、膜振動の時空間マッピングを詳細に計測することにより、膜振動の起源に関する知見を得たいと考えています。また、本研究ではミトコンドリアのみならず、生細胞にも膜振動計測を行うことも考えています。

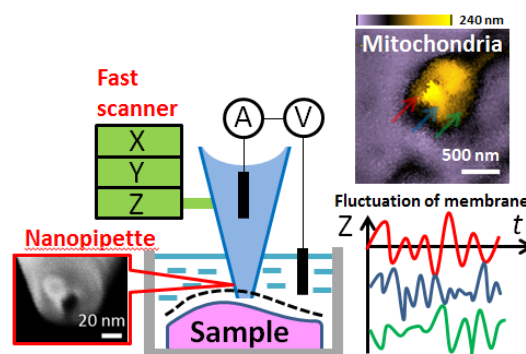


図 1: 高速イオン伝導顕微鏡装置および生物試料の生体膜計測の概略。

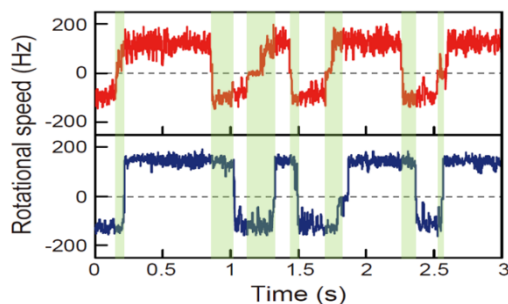
ゆらぎを伴う細胞内情報伝達機構の統合的理解

A03 班 石島 秋彦

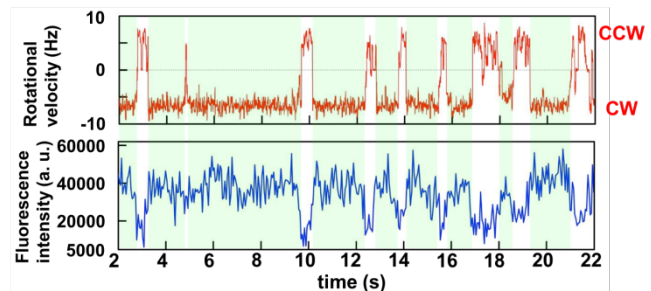
生体内においては、ナノスケールの生体分子が運動、情報伝達などの様々な機能を担っています。これまでに様々な研究が行われ、これらの機能に関与するタンパク質やその構造などはだいぶ明らかになってきました。しかし、本質的な動作原理はまだまだよくわかっておりません。動作原理を理解するためには、細胞内の分子の挙動を直接観察し、これに立脚した理論の構築が必要です。従来にもいくつかの計測手法が計画され、実行されてきましたが、細胞内生体分子反応の全体像をつかむまでには至っていません。当研究室ではこのナノスケールの生体分子の動作原理を解明するために、ナノメートル、ピコニュートンオーダーで生体分子の運動を生きたまま計測する、1分子計測、1分子イメージング装置の開発を行っています。これらの計測装置を用いて、アクトミオシンモーター、バクテリアベン毛モーターなどの運動タンパクの動作原理、情報伝達機構の定量的な解明を目指します。

我々は大腸菌などのバクテリアの走化性応答に着目しました。細胞外部からの誘因・忌避物質刺激に対する応答を調べるために、単一細胞上の複数のベン毛モーターの回転を直接計測したところ、ある時間遅れを伴いながら高度に同調することを明らかにすることができました。このことは数万もの分子で構成されている受容体クラスターが高い協同性を示し、あたかも1分子の様に振る舞うことを示します。さらにこの高い協同性は誘因・忌避物質の変化がなくても起こり、受容体クラスターは自発的に細胞内に情報を発信していることを強く示唆します。さらに情報伝達物質である CheY-GFP のベン毛モーターへの結合・解離とモーターの回転方向転換を同時に計測することにより、モーターへの情報伝達物質の結合・解離に伴う回転方向転換に高い協同性が存在することを明らかにしました。これらの結果が示すように細胞内情報伝達においては各所に高い協同性を示すことがわかりました。しかしながら、細胞内での情報伝達はゆらぎを伴う確率過程であるので、このような高い協同性が単純な拡散現象で成立するかはまだきちんと理解できておりません。

今後は、細胞外部からの誘因・忌避物質刺激に対する受容体応答の高ダイナミックレンジ検出機構及び細胞内情報伝達系を統合的に理解することを目的とします。



大腸菌内の二つのモーターの回転の変化, 赤: 受容体に近いモーター, 青: 受容体から遠いモーター. 縦軸: +が反時計回り, -が時計回り. 二つのモーターの回転方向転換が同調しており, 受容体に近いモーターの方が, 約 0.1 秒先んじているのがわかる



大腸菌テザードセルにおける回転方向転換(赤)と回転中心の蛍光強度変化(青). CW 中に蛍光強度が増加していることがわかる. つまり, CheY-P のモーター基部位に結合・解離により回転方向転換が起きている.

バクテリア集団運動にみるアクティブ液晶の秩序形成と制御

A03 班 前多 裕介

自律的に動く要素（アクティブマター）が多数あつまると、密波の伝搬や秩序だった集団運動が自発的に出現する。アクティブマターの代表例はロッド形状をしたバクテリアであり、メソスケールの乱流や巨大数揺らぎなど、集団運動に関する統計的性質を解明する良いモデルとなっている。ところが近年、枯草菌 *Bacillus subtilis* を円柱状の油中水滴に封入すると、乱流様のパターンではなく境界に沿う規則的な渦運動を示すことが報告された[H.Wioland, et al. PRL 2013]。アクティブマターと壁の配向が大域的なパターンを誘導することは、秩序形成のメカニズムを理解する上で重要な知見をもたらすと考えられる。しかし、実験系の制約から境界形状は円柱・球に限定され、その大きさも制御できないという課題がある。そこで本研究では、境界形状を自在に設計する微細加工技術を開発し、円や球に限らない様々な拘束条件下での集団運動の秩序形成を探索する。

バクテリア大腸菌 *Escherichia coli* の直進性変異体 RP4979 を薬剤処理し、細胞間のネマチック相互作用を制御する新規の系を構築した（図1）。さらに、表面処理を施した Polydimethyl siloxane チャンバーの微小容器内にバクテリア懸濁液を封入する手法を確立し、花型の境界形状をもつ微小容器内での集団運動を PIV（Particle Image Velocimetry）から解析を行った。

これまでに、回転集団運動が対をなした渦ペアが形成されること、渦の回転方向が同じ向き・反対向きの渦ペアが出現することを明らかにしている。2つの渦が接する領域の大小によって回転方向を制御することにも成功した（図2）。さらに、渦ペア形成をもたらす要因を明らかにするため自己駆動ロッドの数値計算を行った結果、密度揺らぎと局所的な境界形状が渦ペアの制御に重要な役割を果たすことを見出しつつある。今後、1つ1つの細胞を蛍光顕微鏡で可視化することで方向秩序を定量的に計測し、アクティブ液晶モデルとの比較を詳細に行う。また、渦が3つ形成されるフラストレートされた条件下では1つの渦が分裂し、小さな渦に分裂する「ミニ渦ペアの形成」が起こるなど、興味深い現象も観察されている。自在に境界形状を制御する独自の手法を用いて、集団運動における秩序形成と制御に関するシンプルな原則を明らかにしたい。

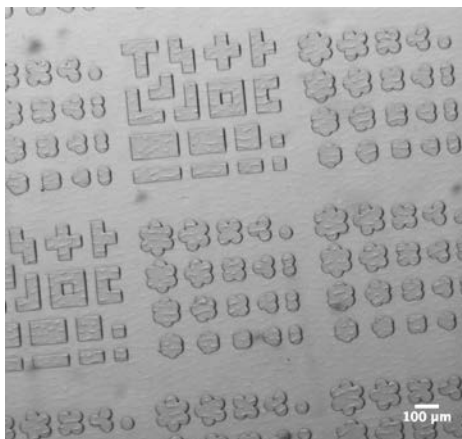


図 1: 様々な境界形状をもつマイクロウェル。バクテリア *E.coli* を封入し、集団運動を観察する。

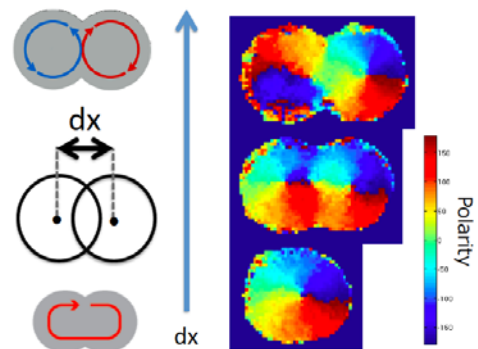


図 2: 集団運動における渦形成と渦ペア形成。境界形状を変えることでパターンが遷移してゆく。

細胞スケール閉鎖空間内における反応拡散波の物理

A03 班 藤原 慶

バクテリアの細胞分裂の起点は、Min タンパク質と呼ばれる 2 種のタンパク質 (MinD と MinE) が、細胞内を波状運動することにより決定される (図 1A、B)。Min の波が生じる分子メカニズムは、MinD が ATP と結合することで膜と結合し、MinD-ATP 同士の膜でのリクルート作用 (positive feedback) と、MinE による MinD 結合 ATP の加水分解を介した MinD の離脱 (negative feedback) である (図 1C)。Max Plank 研究所の Petra Schille らは精製した MinD、MinE、ATP の混合物が平面膜上で波状運動をすることを発見し、その物理特性が反応拡散モデルで説明できることを示してきた (M. Loose ら, Science, 2008, 320: 789-792)。この解析は、大腸菌形状の PDMS チャンバー中や、脂質ベシクルの外部表面にまでに拡張されてきたが、脂質ベシクルのように細胞サイズの閉じた系内部では再現されていない。そのため、Min 反応拡散波が細胞サイズ閉鎖空間でどのような振る舞いを見せるかは、生化学を含め、物理学的にも未解明なままである。しかし、平面膜上で波状運動を見せる MinD、MinE、ATP の混合物を、調製が容易かつ非常に安定な細胞サイズ閉鎖空間として用いられる脂質で覆われた油中水滴内に包したところ、均一に分布し、波は観察されない。

我々は生物学の立場から、要素を抽象化せず細胞の構成要素をそのまま用いた人工細胞の物性を解析してきた (K. Fujiwara & S.M. Nomura PLoS ONE 2013, K. Fujiwara & M. Yanagisawa ACS Synth. Biol. 2014 など)。この過程にて、油中液滴中において Min の波状運動を再現可能とする条件を見出した (未発表、図 2)。そこで本研究では、この条件でなぜ Min タンパク質が波状運動を示すのか、生化学と物理学の両面の立場からの研究を通し、平面の条件と細胞サイズ空間内包条件で反応拡散波を発生させる条件の差について理解することを第一の目的とする。

細胞サイズ (~数十 μm) の閉鎖空間においては、また反応拡散波自体がマイクロ空間に閉じ込められることで、波の打ち消し合いや、拡散による成分の均一化が生じやすいことが予想される。そこで、油中水滴内における Min システムの再構成系を用い、細胞サイズ閉鎖空間内での反応拡散波の振る舞いを時空間解析や摂動に対する応答解析を通して物理的に理解することを第二の目的とする。

これらの研究によって細胞スケール閉鎖空間内における反応拡散波の物理を理解するとともに、Min タンパク質が生み出す波と人工細胞内部物性 (粘性や電荷等) の相関解析、Min と位相が異なる細胞分裂因子が加わった場合の波状運動のモード変化解析など、より生命に近い条件で生じる変化を解析する。これらの結果と本領域の理論研究者との共同研究を通し、細胞内において反応拡散波を安定して生み出す条件を物理的に理解する。

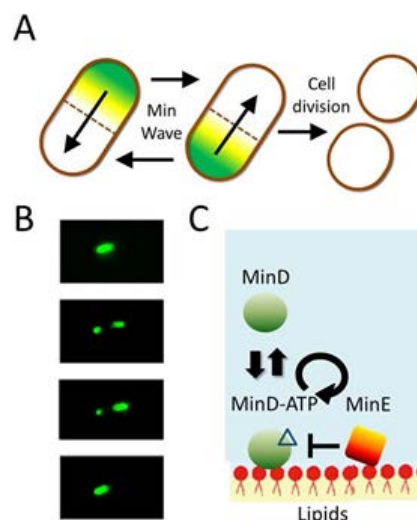


図 1. Min システムの概要

A: Min システムの波が細胞分裂面の決定に関与する。B: 細胞中の MinD の動き (緑色部分)、C: 分子メカニズム

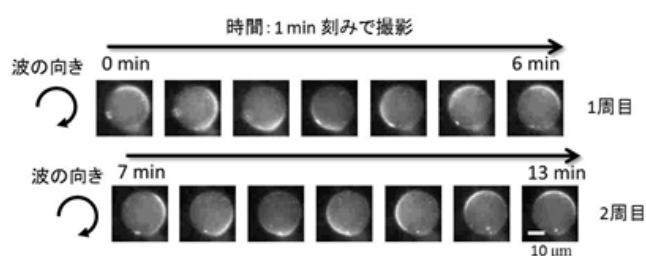


図 2. 油中水滴中に再構成された Min システムの波状運動

細胞質流動から迫る細胞質におけるゆらぎから構造が生じるメカニズム

A03 班 木村暁、木村健二

細胞質流動は細胞内で細胞質全体が流れるように移動する集団的な現象である。このような流動が生じるためには、細胞質を動かす原動力の方向が細胞全体でそろう必要があるが、そのメカニズムについては不明な点が多い。特に、我々が研究している線虫 *C. elegans* の初期胚における細胞質流動は、流動の方向が時折逆転することが観察されている。（このように流動の方向がそろうものの逆転する細胞質流動を「Circulation 型」の細胞質流動と分類する（図 1）。）流動方向の逆転現象は確率的に生じるため、流動の方向はあらかじめ定められているのではなく、細胞内で自己組織化的に定められ、さらには細胞内のゆらぎによって方向が変化するのではないかと考えた。すなわち、この線虫の細胞質流動は「ゆらぎと構造の協奏」が細胞内で機能している好例となる可能性がある。

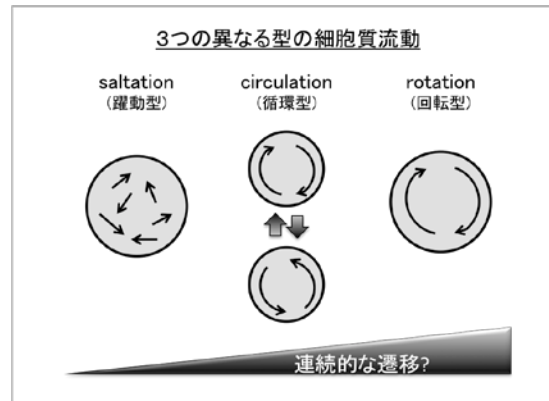


図 1: 3つのタイプ (Circulation 型、Saltation 型、Rotation 型) の細胞質流動の模式図。我々は3つのタイプの違いは、ゆらぎの相対的な寄与の違いによって生じるとする仮説を持っており、3つのタイプを統一的に説明するモデルの構築を目指す。

本研究課題では、線虫の細胞質流動を対象に「流動の方向性がどのようにしてそろうのか?、そしてどのようにして転換するのか?」をゆらぎと構造の協奏のコンセプトから解き明かすことを目的とする。流動の方向を規定する「構造」は細胞骨格と考えられる。細胞骨格の方向がそろうことが流動の方向がそろうために必要である。また、細胞骨格の方向が変化するのは、細胞骨格が確率的に生成と消滅を繰り返すことや力の発生が確率的に行われるという「ゆらぎ」に起因すると考えられる。そこで、我々は細胞の観察から得られた結果から、これらの構造とゆらぎを定式化し、この Circulation 型の細胞質流動を説明するモデルを構築する。

さらに、細胞質流動には Circulation 型と同様に細胞全体で方向がそろうが、Circulation 型とは違い方向転換が起きない「Rotation 型」や、細胞全体で方向がそろうわけではない「Saltation 型」に分類されるものが知られている（図 1）。我々は、このような細胞質流動の形式の違いは、構造とゆらぎの寄与の相対的な大きさの違いによって生じると考えている。すなわち、Circulation 型を基準とすると、ゆらぎが小さければ Rotation 型に、大きければ Saltation 型の流動が生じるという仮説である。本研究課題では、理論的、そして実験的にゆらぎの寄与をコントロールして、3つのタイプ (Circulation 型、Saltation 型、Rotation 型) の細胞質流動を統一的に「ゆらぎと構造の協奏」のコンセプトから説明することを目指す。

木村暁（国立遺伝学研究所・構造遺伝学研究センター・教授）

木村健二（国立遺伝学研究所・構造遺伝学研究センター・助教）

超伝導体磁束量子格子のダイナミクスを利用した固体界面摩擦の研究

—交流電導度測定により界面素励起・エネルギー散逸を論じる—

A04 班 前田 京剛

摩擦現象の物理的理解は近年着実に進展を見せている。摩擦力顕微鏡，表面力顕微鏡，水晶振動子微量天秤等の，制御された実験が可能な装置の開発や，大規模数値計算の実現などにより，そこで扱えるサイズの系については，理解が格段に深まったといえるかも知れない。しかしながら，現状は，物理学が目指す普遍的・微視的な理解からは程遠く，特に，(1) アモントン・クーロン（AC）則が成立するのはどのような場合か（適用限界はどのようなものか），(2) その限界を明確な方程式で定量的に表現できないか，(3) さらに，ストライベック線図のあらゆる領域を統一的に定量的に表現できないか 等の問題に関して，今後の物理的理解が急務とされている。

界面摩擦現象を実験的に研究する際の最大の難点は，界面の磨耗等による，同じ環境での繰り返し実験の困難さであろう。摩擦の物理が制御された実験科学となるためには，繰り返し実験の可能な新しいモデル系を利用するしかないと考えられる。我々は，以上の問題意識から，これまで，磁場下の超伝導体で形成される磁束量子渦糸（ボルテックス）格子のダイナミクスが界面摩擦のよいモデル系になるという立場[1, 2, 3]で，直流電流電圧特性測定およびフラックスフロー測定[2]や繰り返し駆動力に対する時間領域応答のエイジング効果[3]などを種々の形状・ピン止めの強さの試料に対して系統的に調べ，それらに基づき，界面摩擦における動摩擦の速度依存性，静止摩擦の待機時間依存性などを議論し，いわゆるアモントン・クーロンの法則が成り立つための簡単な判定条件を提唱した[3]。これにより，界面摩擦現象，特に，いわゆる dry friction についての現象論的な理解ができたと考えている。加えて，ボルテックスのダイナミクスを界面摩擦現象のモデルとみなすアプローチの有用性も同時に示すことができたものと考えます。

すると，次なるステップは，いよいよ界面摩擦現象を微視的に理解することである。界面摩擦現象は界面原子のダイナミクスが本質的役割を演じる現象であるので，界面原子のダイナミクスのスペクトロスコピーが行えれば，摩擦現象の微視的理解が進み，我々の摩擦現象の理解は一気に本質にせまることができるであろう。このような問題意識から，本プロジェクトでは，引き続きボルテックスのダイナミクスをモデル系として利用し，その交流伝導度を測定することを計画している。バルクの格子振動（フォノン）は通常赤外領域に現れるが，電荷密度波の滑り運動などの文献の事前調査から，界面のような乱れた環境下での原子の集団が関与して摩擦を決めるのは，それらより低エネルギー（周波数）での運動であると考え，ラジオ波～マイクロ波領域の交流電気伝導度測定に注目している。特に，磁束量子格子が動いた時の交流伝導度の変化の詳細を調べるのが重要である。

（参考文献）

- [1] 前田京剛：表面科学 30 (2009)580-586.
- [2] A. Maeda et al.: Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 077001/1-4.
- [3] D. Nakamura et al.: J. Phys. Cond. Matter. 22 (2010) 445702/1-7.

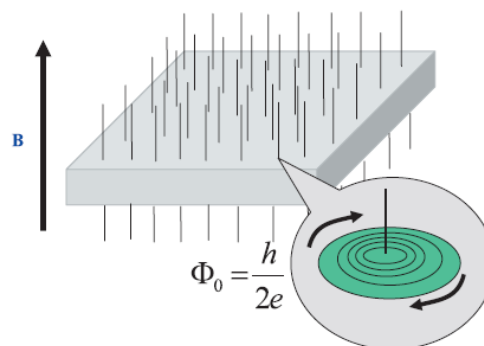


図 1: 超伝導体に磁場をかけたときに形成される磁束量子の格子。電流によって駆動される。

微生物のうごきとかたちの物理学

A04 班 和田 浩史

運動性は、生命現象の代名詞のひとつです。もとより生物とは、よりよい環境や栄養を求めて移動したり、不愉快な環境や捕食者を回避したりするものを指すからです。たとえじっとしている生物であっても、生命活動を維持するために細胞内には様々なスケールの輸送現象が絶え間なく起きています。

生物の運動性の起源と仕組みを理解することは、生命を理解するための重要な手がかりをもたらします。実際、バクテリアや単細胞の原生動物の運動性の研究から、医学や産業への重要な知見がこれまでにいくつも得られてきました。

細胞運動は、物質と力の法則のもとで内部から作りあげられた極微の生存機械といえます。そのグランドデザインを解き明かすには、高精度の計測による動きの定量化と力学的な数理モデルによる計算的手法が威力を発揮します。我々の研究室では、屈曲、滑走、遊泳、という現在の微生物学で知られる三つの主要な運動様式に注目してきました。モデル生物として、スピロプラズマ細菌、フバボバクテリウム細菌、緑藻類ボルボックスなどを対象とし、それらの詳細な運動計測、構造解析、力学モデルの構築と解析により、細胞壁、細胞骨格、鞭毛、膜、モーターといった各要素とそれらの集合体である細胞全体との関係を解明しようとがんばっています。らせん、引っ張り、曲げ、ねじり、応力、流動、粘弾性、といった概念や言葉遣いをおとして、個々の運動に通底するメカニズムの共通性に光をあてたいと思っています。こういったマクロからのアプローチは、本新学術が推進する研究とは親和性が高いですが、生命科学においては広く市民権をえた方法論とはいえません。生命科学にとっても価値あるものを生み出すことで、市民権の拡大に寄与したいと思っています。

生体運動のロジックを再構築するには、分離して詳細に分析するプロセスと、積み上げて統合するプロセスが必要です。これは生命科学の近景と遠景ともいえます。我々の研究室はおもに後者のところでよい仕事をして、力の集合という視点から運動性が創発するメカニズムを包括的に記述しようという、大きな学際的研究の枠組みづくりに貢献することを目指しています。

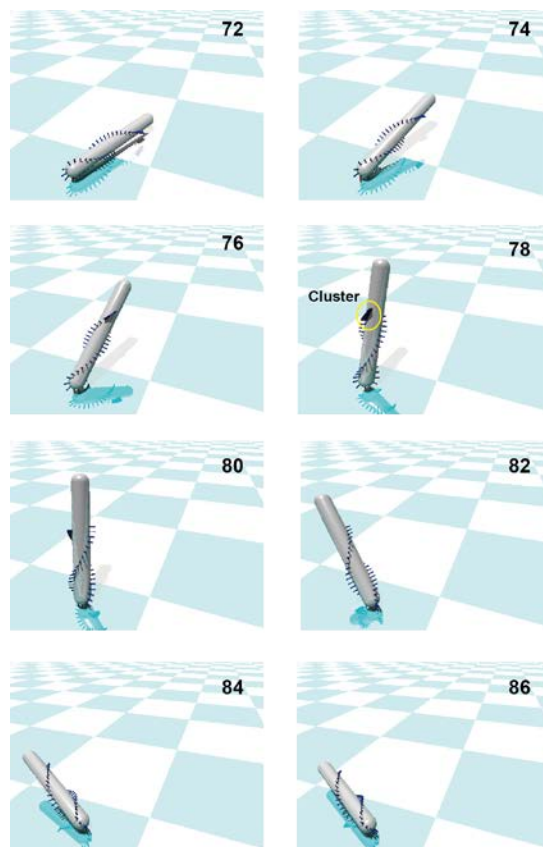


図 1: *Flavobacterium Johnsoniae* の滑走運動を調べる 3次元モデルの計算例。菌体がある極を起点として基盤から立ち上がり、再び倒れることで進行方向を変化させるうごき(フリップ)が、モデルの数値シミュレーションで観察される。実験で観察される他の運動モードもすべてモデルで再現される。モデルのインプットは SprB という接着性のタンパクが細胞表面をらせん状に流動する、という観測事実のみであり、実験的に未確認の仮定はひとつも置かれていない。すべての非自明な運動モードは、自発的な対称性の破れをつうじて生じる。

今後の予定

◎新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」主催

○International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (SFS2017)
2017年11月20日(月)～23日(木)
仙台国際センター

◎新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」共催

○第10回 物性科学領域横断研究会
2016年12月9日(金)～10日(土)
神戸大学 六甲台第2キャンパス

○アクティブマター研究会 2017
2017年1月20日(金)～21日(土)
九州大学 西新プラザ

○International workshop on Glasses and Related Nonequilibrium Systems
2017年3月21日(火)～23日(木)
大阪大学 中之島センター

○The Origin of Life – Synergy among the RNA, Protein, and Lipid Worlds –
2017年5月29日(月)～30日(火)
東京大学駒場キャンパス 数理科学研究科講堂

編集委員よりお願い

本ニュースレターでは、新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏：非平衡系における普遍法則の確立」による研究成果をできるだけ早く発信していきたいと考えております。自薦、他薦問わず重要な研究成果、あるいは関係する研究会報告などありましたら、編集委員までお寄せください。

ニュースレター編集委員

竹内一将（東京工業大学）kat@kaztake.org

北畑裕之（千葉大学）kitahata@chiba-u.jp