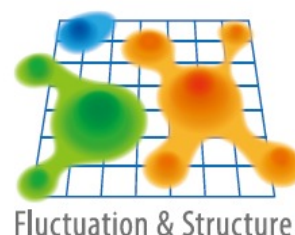


ゆらぎと構造の協奏

～非平衡系における普遍法則の確立～

News Letter Vol.4

2014.12.01 発行



新たに研究に参加された方々、異動された方々の紹介

昨年の秋に新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏」が開始されてほぼ1年になりますが、その間研究代表者、分担者の異動、また、特任教員・博士研究員として新たな研究者の雇用などがありました。本号では、異動された方々、新たに雇用された方々のご紹介をさせていただきます。

新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」関係者の異動情報

◎異動

中垣 俊之 (A02 班 折原グループ 研究分担者)

はこだて未来大学・システム情報科学部・教授 → 北海道大学 電子科学研究所 教授

笹本 智弘 (A01 班 佐野グループ 研究分担者)

千葉大学・大学院理学研究科・准教授 → 東京工業大学 大学院理工学研究科 准教授

吉野 元 (A01 班 宮崎グループ 研究分担者)

大阪大学・大学院理学研究科・助教 → 大阪大学サイバーメディアセンター 准教授

石原 秀至 (A02 班 櫻井グループ 研究分担者)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教 → 明治大学 理工学部 准教授

◎雇用 (博士研究員・特任助教)

松尾 貞茂 大阪大学 小林 G (A01 班) (その後、東京大学大学院工学系研究科 助教に転出)

國見 昌哉 電気通信大学 斎藤 G (A02 班)

鈴木 健太郎 神奈川大学 菅原 G (A03 班)

岡本 隆一 首都大学東京 好村 G (A03 班)

有賀 隆行 九州大学 水野 G (A03 班)

本号では、第3号に引き続き、公募研究代表者の方々に書いていただいた研究概要の紹介を掲載させていただきます。本号では A02 時空班と A03 機能班の公募研究紹介を掲載いたします。

実在モデル系としての球形分子会合体からなる液体のガラス転移

A02 班 齋藤一弥、山村泰久、菱田真史

ガラスは六千年以上の利用の歴史を持ち、実用材料として重要な地位を占めています。そのミクロ構造や発現メカニズムは依然として未解明な部分が多く、凝縮系の科学において最大の未解決問題ともいわれています。理論あるいは計算機実験の対象とするモデル系は、多くの場合、単純な分子（粒子）からなる系であり、その一方で、実験的な研究はガラス転移の実現しやすさのため複雑な（「いびつな」）形をもつ低分子液体を対象とすることが必然的に多くなります。このため、実験と理論モデルの比較には種々の困難があります。

私たちは、球形の会合体を選択的に形成する分子液体の（理論モデルと比較するための）実在モデルとしての可能性を探究しようと考えています。これまでに私たちは、ジシクロヘキシルメタノール（DCHM）あるいはトリシクロヘキシルメタノール（TCHM）というアルコールや、類似の嵩高い置換基を持つメタノール類が、液相において選択的に球状の4量体を形成すること、さらにガラス転移温度ではほとんどの分子が4量体になっていることを見出してきています。これまでに行ってきた実験は、熱容量（図1）、誘電率、赤外吸収スペクトルなどのもっぱら静的物性に注目したものでしたが、本研究ではこれを動的熱容量、誘電分散、動的粘弾性という動的測定へと展開することを計画し、TCHMとDCHMについては実験結果の解析に取りかかっています。

さらに、DCHM分子に最外縁部へアルキル基を置換すれば、球状会合体の外側にアルキルブラシの生えた会合体を作ることができると考えられます。この場合も、水素結合が局所的な原子配置で決まる相互作用であること、また水素結合まわりの立体障害に変化が無いことから、4量体を優先的に形成する傾向に大きな変化は無いと期待されます。こうして異なる長さのアルキル鎖のはえた球状4量体を手にすることができれば、粒子間相互作用の系統的变化に伴うガラス転移挙動の変化を実験的に（実際の物質で）観測できる様になると予想されます。現在、合成化学者の助言を得ながら合成に取り組みつつあり、望みの化合物の合成方法についてめどが立ちつつあります。必要な量が用意できたら、DCHMなどと同様、静的物性と分子振動スペクトル（赤外吸収スペクトル）の測定を通じて、液体中の会合状態を明らかにし、動的物性測定によりガラス転移挙動を明らかにして、相互比較を行う予定です。本領域にはガラスを専門とする理論・計算の研究者が参加されていますから、その方達と議論を深め理想系におけるガラス転移を実在系で実現し、ガラス転移の本質に迫りたいと考えています。

上記のガラスの研究以外にも、液晶の相転移や欠陥のダイナミクス、脂質膜の物性などについても研究を行っています。何かの機会にご紹介したいと思います。

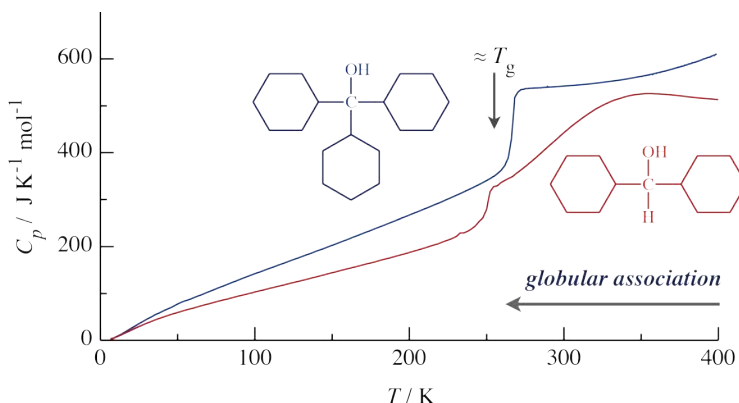


図1: DCHM(赤)とTCHM(青)のガラスと液体の熱容量。液体を冷却すると、水素結合によって会合が進み球状会合体(DCHMでは4量体, TCHMでは2量体)が形成される。

齋藤一弥（筑波大学・数理物質系・教授）
山村泰久（筑波大学・数理物質系・准教授）
菱田真史（筑波大学・数理物質系・助教）

光格子原子顕微鏡で探索する人工ゲージ場が織り成す非平衡現象

A02 班 上妻 幹旺、井上 遼太郎

レーザーによって極低温にまで冷却され、量子縮退状態に至った中性原子集団は、ポテンシャル形状から原子間相互作用に至るまで、あらゆるパラメーターを自在に制御することができる大自由度量子多体系として着目されている。中性原子ゆえに、磁場によるローレンツ力を受けないという欠点すらも、光と原子との相互作用を利用した人工的なゲージ場の登場により克服することが可能となり、すでに量子渦の生成やスピンホール効果の観測が報告され、量子ホール系の実現も目前に迫っている。大自由度量子多体系ゆえに、パラメーターの変動に起因して生じる非平衡現象は大変リッチであり、一例として、ボース凝縮した中性原子気体にクエンチをおこすことで、キブル・ズーレック機構を通して量子渦、あるいはスピン渦が生成されることが確認されている。

我々は、冷却原子を主役とした非平衡現象を観測する新たな手法として、近年アルカリ原子を対象として実現された光格子原子顕微鏡に着目をした。光定在波中に原子が補足された状態は、一種の人工結晶とみなすことができる。これまで、ポテンシャルから断熱的、あるいは非断熱的に開放された原子集団が作り出す原子波干渉の様子から、初期の運動量分布に関する情報を抽出するというのが伝統的な解析手法であったが、光格子原子顕微鏡の登場により、各サイトに捕捉された原子の実空間分布の情報を直接取得することが可能となった。我々は光格子原子顕微鏡を、エキゾチックな性質をもつランタノイド系の原子であるイッテルビウム (Yb)、そしてユウロピウム (Eu) に適用し、さらに人口ゲージ場の手法を用いることで、新奇な非平衡現象の観測とその理解を目指すことにした。

実験系は図1のようになっており、光学顕微鏡の分解能を増大させる固浸レンズの直下、 $1\mu\text{m}$ 程度の平面内に量子縮退した Yb 原子を閉じ込め、そこに光格子を刻み、各サイトにトラップされた原子からの蛍光を観測することで、顕微画像を得ている。本研究がスタートした当初は、蛍光画像を2次元フーリエ変換することで、原子が周期的にトラップされていることを辛うじて判断できるという状況であったが、ごく最近になり、図2のように、各サイトを明確に弁別することが可能となった。得られた分解能は 370nm であり、現存する光格子原子顕微鏡の中で、最も高い分解能を実現している。我々が開発した手法は、磁場トラップに頼らず、レーザーのみで固浸レンズへのアプローチを実現しており、さらにまた偏向勾配冷却のような原子種に強く依存した冷却方法も必要としない。そのため Yb、Eu はもとより、多くの原子種に適用可能なスタンダードな手法として浸透していくことが期待される。

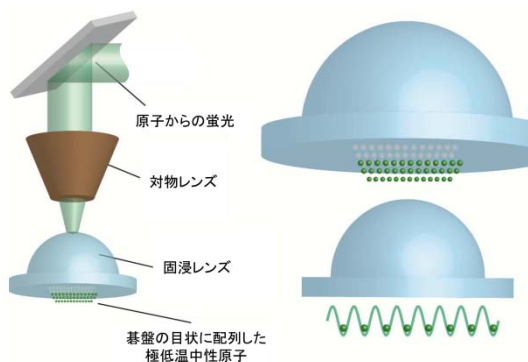


図1 光格子原子顕微鏡の概略図

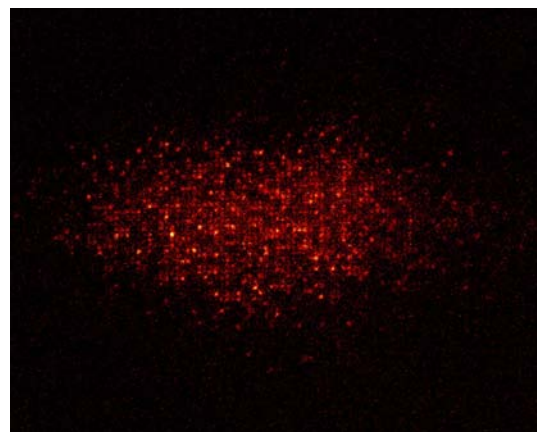


図2 光格子中の Yb 原子の蛍光画像

上妻 幹旺（東京工業大学大学院理工学研究科・教授）
井上 遼太郎（東京工業大学大学院理工学研究科・助教）

非平衡系におけるリズムミクな時空間パターンのダイナミクスと制御

A02 班 中尾裕也

非平衡散逸系の時空間パターンは、化学反応現象や生命現象を主な題材として、活発に研究されてきている。特に、ターゲット波やスパイラル波に代表されるリズムミクな時空間パターンの形成は、振動性や興奮性を持つアクティブな媒体の一般的性質であり、実世界の様々な系に普遍的に観察され、生命現象においてはしばしば重要な機能的意義を持つ。一般に、それらの系は反応拡散方程式や流体方程式に代表される非線形偏微分方程式によってモデル化されることが多く、その解析的な扱いは難しい。しかし、いくつかの限られた状況では、系を低次元の常微分方程式に系統的に近似することができ、そのような手法は一般に縮約理論と呼ばれる。本研究では、リズムミクな時空間パターンに対して一般的に適用

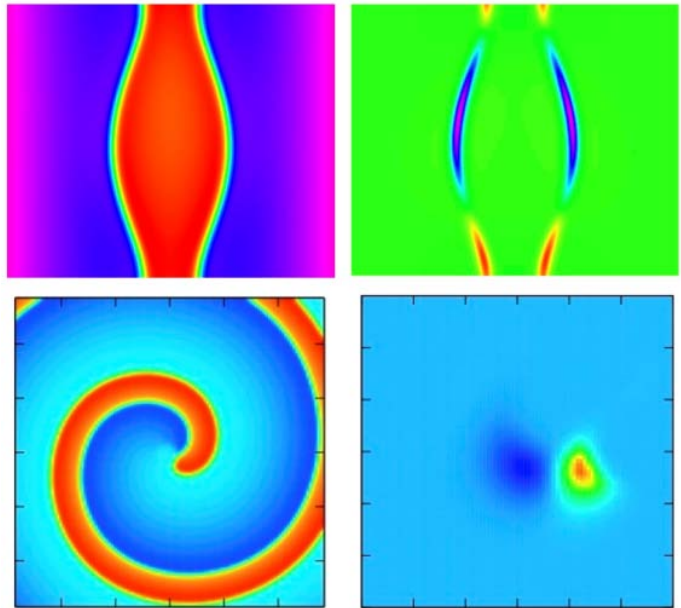


図 1(上): 空間 1 次元の FitzHugh-南雲モデルの示す局在スポット振動解(左)とその位相感受関数(右)を一周期分についてプロット。図 1(下): 空間 2 次元の FitzHugh-南雲モデルのスパイラル解(左)とその中心部付近における位相感受関数(右)のスナップショット。いずれも位相感受関数は空間的に強く局在している。

可能な縮約理論を構築することと、構築した理論を生命現象等に関わる非平衡パターンに適用して、そのダイナミクスと応答特性を明らかにし、効果的な制御法を提案することを目的とする。

一般に、発展方程式の縮約は、系の状態を中立安定な遅いモードに射影することによって行われる。本研究では、非平衡散逸系のリズムミクな時空間パターンを無限次元力学系におけるマクロなリミットサイクルとして捉え、その中立安定な位相モードに系の状態を射影して時空間パターンを低次元の位相方程式で記述する。従来の有限次元のリミットサイクルの位相縮約理論では、位相モードへの射影に用いられる関数は「位相感受関数」と呼ばれ、随伴方程式と呼ばれる常微分方程式に従うことが知られている。筆者らの最近の研究[1,2]では、この理論を反応拡散系や熱対流系に一般化して、様々な時空間パターンの位相感受関数を求めた(図 1)。また、得られた位相感受関数を用いて、相互作用するふたつの時空間パターンの同期ダイナミクス等を明らかにした。得られた低次元の位相方程式を用いれば、例えば周期的な外部刺激によって系の時空間パターンを同期させる際に最適な刺激パターンを求めることなどもできる。今後、化学反応系や流体系とメカニカルな系の結合した状況に解析を拡張する予定であり、現在、流れ場に置いた角柱の生じるカルマン渦列に着目し、これを流体のリミットサイクル振動と見なして、格子ボルツマン法とその随伴方程式を用いた解析を進めている。

[1] Hiroya Nakao, Tatsuo Yanagita, and Yoji Kawamura, Phys. Rev. X **4**, 021032 (2014).

[2] Yoji Kawamura and Hiroya Nakao, Chaos **23**, 043129 (2013).

量子凝縮系およびソフトマターにおける自己組織化現象に対する流れの影響の解明

A02 班 工藤和恵、川口由紀

強磁性薄膜では、スピンによる自己組織化現象として磁区パターンが観察される。同様の磁区パターンは、スピン自由度を持つボース-アインシュタイン凝縮(BEC)の強磁性相においても観察される。これまでの研究で、強磁性 BEC におけるドメインサイズの成長則は、Ising 的な異方性の場合には、古典的な保存系での成長則と一致することが明らかになっている。今後は特に XY 模型的な場合のドメイン成長則の普遍性について研究する。XY 模型は非保存系のベクトル模型であり、ドメイン成長は渦などのトポロジカル欠陥の消滅によって促進される。しかし BEC の場合には、渦を特徴づける量として磁化の巻数だけでなく超流動速度の循環も考慮しなければならない。この巻数と循環の組み合わせによって渦の構造が異なるためである。つまり、BEC では磁化の構造と超流動的な流れが密接に関係しているため、ドメイン成長は強磁性体の場合よりもはるかに複雑になってしまう。Ising 的な場合のように普遍的なドメイン成長則が見いだせるかどうか、普遍法則があるとすればどのような条件下でそれが成り立つのかを明らかにする。

自己組織化現象の中で流れが重要な役割を果たす例は、ソフトマターの系にも多く見られる。例えば高分子溶液である塗料を乾燥させると、塗料の粘性や蒸発率、および基板の形状の影響を受けて不均質な塗膜が形成される場合がある。溶液の内部の流れを遮るような障害物がある場合、溶液の粘性や蒸発率に空間的な不均一性がある場合などは、乾燥するときのパターン形成に対する影響は大きいはずである。本研究では、塗料の粘性や蒸発率だけでなく、基板の形状の影響にも注目して研究を行う。塗料を均質に塗るための条件、および均質でない乾燥パターンの出現するメカニズムとそれに対する流れの影響を解明する。

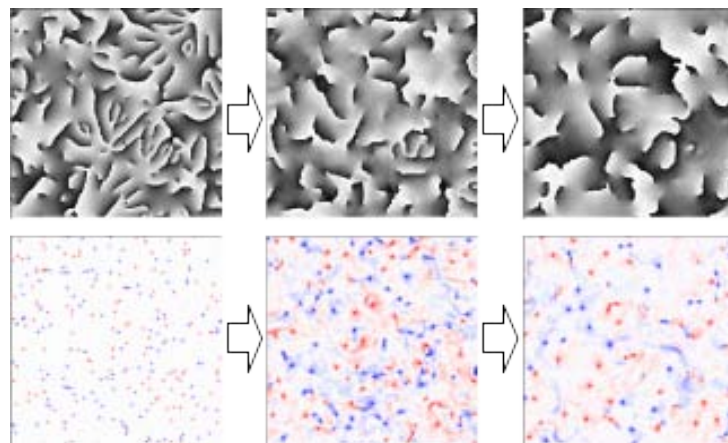


図 1: 強磁性 BEC の磁区パターンの数値シミュレーション。上段は磁化の x,y 成分、下段は z 成分を表す。

工藤和恵（お茶の水女子大学・人間文化創成科学研究科・准教授）

川口由紀（東京大学・工学系研究科・講師）

スピノル・ボース・アインシュタイン凝縮におけるトポロジカル欠陥のダイナミクス

A02 班 小林未知数

冷却原子ボース・アインシュタイン凝縮は超流動ヘリウムと並んで、その性質は量子統計性に強く影響される。特にダイナミクスは非常に興味深く、粘性流体やソフトマターと類似あるいは異なるところ様々であり、「量子流体力学」という一大分野を築くにいたるほどである。量子渦はこの分野の中心的役割を担っているといっても過言ではなく、数多くの量子流体ダイナミクスに現れる。量子渦は凝縮体の複素オーダーパラメーターが、その一価性を満たすことによって現れる（3次元空間では）線状のトポロジカル欠陥である。したがって粘性流体の渦とは異なって、明確にその存在およびダイナミクスを議論することができ、この視点でみると粘性流体の渦よりはむしろ液晶の転傾に近い。しかし渦回りに超流動の回転流を引き起こすという視点においては、やはり渦であり、したがって粘性流体中の渦と液晶の転傾の2つの性質を持っている。

本公募研究のテーマとなるのは、スピン自由度を持った原子のボース・アインシュタイン凝縮中の渦である。このスピノル・ボース・アインシュタイン凝縮は原子を磁場ではなくレーザーで閉じ込めることによって可能となり、現在にいたるまで様々な実験が行われている。スピン自由度が凝縮体の内部自由度として追加されることにより、オーダーパラメーターのトポロジは複雑になり、通常のスカラー凝縮体には見られなかったような多種多様な量子渦が見られる。その興味深い一例として、スカラー凝縮体における量子渦の分数倍の循環を持つ分数渦、単一の循環しか持たない Z_2 渦、ドメイン壁やモノポールなどの別の次元を持つトポロジカル欠陥に連続変形可能な渦、そして循環が非可換な代数で記述される非可換渦である。このようなトポロジカルに非自明な量子渦の協同的なダイナミクスを明らかにしてゆくことが本研究の中心的課題である。

具体的に、多数の量子渦の複雑なダイナミクスによって支配される量子乱流状態を例として考える。スカラー凝縮体の場合、発達した量子乱流の統計性は粘性流体乱流で見られる統計性と類似のものを示すことが分かっている。この事実は量子乱流中で量子渦がトポロジカル欠陥としての性質よりも渦としての性質を強く引き出していることを示唆している。この量子渦を上記の非可換渦に置き換えた状況を考える。非可換渦は循環の非可換性により、通常の渦に見られるようなつなぎかえを起こさず、渦同士が絡まり合うようなダイナミクスが引き起こされる。その結果、乱流中において量子渦が大規模なネットワーク構造を形成し、スカラー凝縮体で見られた、粘性流体と類似の統計性に変更される。つまり、この非可換量子乱流において量子渦は渦としての性質だけではなく、トポロジカル欠陥としての性質を引き出しているのであろうと理解される。

量子乱流のダイナミクスは一例であり、その他にもクエンチダイナミクスや2次元系におけるコストリッツ・サウレス転移に関わる量子渦対ダイナミクスのような渦の協同現象にも、量子渦のトポロジカルな性質は強く現れてくるであろうと期待される。このようなダイナミクスの中から特に興味深いものを選び出して研究していきたい。

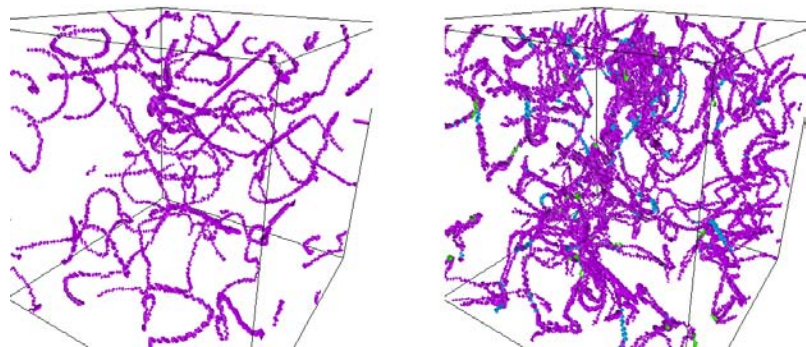


図 1: スカラー凝縮体の渦における量子乱流(左)と非可換渦における量子乱流(右)。両者はほぼ同じエネルギーだが、非可換渦の方は異なる3種類の渦(それぞれ紫、青、緑)が絡み合った大規模なネットワーク構造を形成している。

プローブ顕微鏡による細胞間力学相互作用の時空間揺らぎの研究

A03 班 岡嶋孝治

細胞に働く力学的相互作用は、細胞システムの構造・機能やそれらの安定性に決定的な役割をする。多数の細胞からなる細胞システムに内在する時空間揺らぎを実験的に抽出するためには、細胞システムの物理量をダイレクトに計測する技術が必要になる。本研究では、原子間力顕微鏡（AFM: atomic force microscopy）やイオンコンダクタンス顕微鏡（SICM: scanning ion conductance microscopy）のプローブ顕微鏡技術を用いて、細胞力学量の時間揺らぎを単一細胞の空間分解能で解明することを目的とする。

単一細胞の力学特性は、多くの研究によりその詳細が明らかにされつつあるが、個々の細胞の力学特性の揺らぎ・個性やその統計性には不明な点が多い。本研究代表者等は、マイクロ加工基板技術とAFMを組み合わせた細胞力学計測法を開発し、細胞レオロジーの統計性を定量化することに成功した[1]。本計測法のキーポイントは、マイクロ加工基板上に配列した細胞を計測する点にある。これにより、細胞の形態、細胞の測定位置を制御した計測が可能になり、細胞固有の力学特性の個性を定量化することができる。本研究課題の第一ステップでは、マイクロ加工基板上でその運動性が制限された細胞の力学特性の時間変化を追跡することにより、単一細胞の力学特性の時間揺らぎを明らかにすることを目的とする。過去の細胞内部の揺らぎ計測において、アクチン骨格に結合したマイクロビーズを用いた計測がなされ、“接着点”の動的揺らぎの挙動が明らかにされてきた。本研究では、メゾスコピックなネットワーク構造の力学特性の時間発展を明らかにすることを目指す。

細胞システムに形成される細胞内のネットワーク構造は、細胞-細胞間接着を介し細胞システム全体に形成されている。そのようなネットワーク構造に起因する細胞物性の時間揺らぎを明らかにすることが本研究課題の第2ステップである。AFMは細胞内部の力学特性を高精度で計測できる強力なツールである。そこで、AFMを用いて、細胞システムを構成する細胞集団・組織の内部の力学物性の時間発展を実験的に明らかにする。

また、SICMは、細胞膜のナノスケール構造を非接触で観察することが可能である。SICMは、柔らかい生細胞表面膜の形状を極めて高い分解能で計測できる走査プローブ顕微鏡である。SICMは、電解質溶液が満たされた、先端に微小孔をもつガラスナノピペットをプローブとして用いる。そして、微小孔を流れるイオン電流を測定する。ピペット探針が細胞表面に近づくと、細胞表面の存在による“抵抗”により、微小孔を流れるイオン電流量が減少する。この現象を利用して、非接触で表面位置をナノメートルの精度で検知できる。最近、SICMを用いて細胞膜揺らぎの定量化が可能であることが分かった[2]。そこで、本研究では、SICMを用いて、細胞システムの細胞膜揺らぎとその時間発展を明らかにする。同種細胞からなる細胞システムだけでなく、異種細胞からなる細胞システムを用いて、ヘテロなネットワーク構造と細胞膜揺らぎの時空間発展を明らかにすることを目標とする。

[1] P.G. Cai, Y. Mizutani, M. Tsuchiya, J. M. Maloney, B. Fabry, K. J. Van Vliet, T. Okajima*, Quantifying Cell-to-Cell Variation in Power-Law Rheology, Biophysical Journal 105 (2013) 1093-1102.

[2] Y. Mizutani, M.-H. Choi, S.-J. Cho, T. Okajima*, Nanoscale fluctuations on epithelial cell surfaces investigated by scanning ion conductance microscopy, Applied Physics Letters 102 (2013) 173703 (4pages)

岡嶋孝治（北海道大学・大学院情報科学研究科・教授）

粘性流体中における自己駆動素子の集団運動

A03 班 内田就也

水中に棲息する微生物やアクティブコロイドなどの自己駆動素子は、流体力学相互作用による複雑な集団運動を示します。その一例として本研究では、ゾウリムシの繊毛やボルボックスの鞭毛が示す進行波状の同期パターン（メタクロナル波）を取り上げます。複数の繊毛や鞭毛の運動が流体効果によって同期する可能性は早く 1951 年に Geoffrey Taylor によって指摘されましたが、メタクロナル波の力学的な発生条件は今日なおほとんど理解されていません。我々は繊毛の駆動力の周期的変動を取り入れた剛体回転子モデルにより、繊毛の非線形ダイナミクスを記述する理論を構築しました。これにより、有効打と回復打のパターンおよび繊毛重心が描く軌道の形状によって、一对の繊毛が同期、逆位相同期、位相スリップなどの複数の動的状態を取りうるということが初めて示されました。これは一匹のゾウリムシが多様なメタクロナル波パターンを示すことを理解する上で重要なステップであると考えています。今回の目的の一つは、このモデルをベースに、フィラメントの屈曲性や排除体積効果などを取り入れた、より現実に近いモデルを構築し、メタクロナル波の動的相図を描くことです。また上述の剛体回転子モデルと正確に対応する実験系が光駆動コロイドを用いて構築されています。現在、当該実験を行なっている Pietro Cicuta 氏らのグループ（Cambridge 大学）と協力して、理論の定量的検証に取り組んでいます。

本研究のもう一つのテーマは、ヤヌス粒子の集団運動における流体効果の解明です。ヤヌス粒子はコロイド粒子の各半球が異なる化学的、電気的ないし熱的特性を持つものであり、各種の phoretic effect を利用して、外部からのエネルギー注入なしに流体中を運動することができます。我々の研究計画では、コロイド粒子の流体シミュレーション手法の一つである Smooth Profiled Method (SPH) を応用して、ヤヌス粒子の集団運動の数値シミュレーションを実現します。SPH は粒子を密度場として扱うその特性上、phoretic effect を担う濃度場、電場などの場とカップルした粒子系のシミュレーションに適しています。またヤヌス粒子は多くの場合、薄い表面境界層において大きな流れ速度勾配を作り出します。そのため境界層内の流れと外部の流れをマルチスケール手法で扱うことが有効であると考えられます。従来の SPH を拡張して、境界層表面における流れ場に対して任意の動的な境界条件を課し、境界層内部のダイナミクスと接続させることで、ヤヌス粒子のマルチスケール流体シミュレーションを実現したいと考えます。

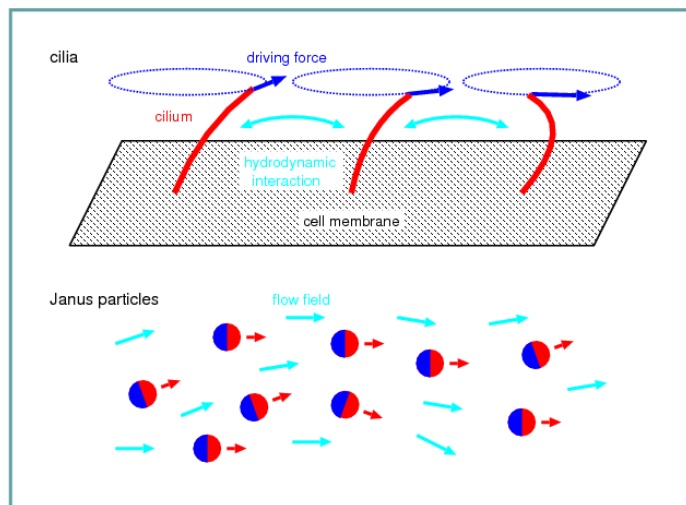


図 1. (上) 繊毛モデルの概念図。アクティブに駆動される弾性フィラメントの回転が流体力学相互作用により同期する。(下)ヤヌス粒子の集団運動の概念図。

アクティブマターの集団運動としての細胞組織の記述

A03 班 義永那津人

細胞の生き生きした様子をどこまで普遍的に理解できるか。細胞が形を変えながら運動していることは「生きている」ことを強く感じるものである。これは、ATP の加水分解によるエネルギーを消費することによって非平衡状態で実現している。当然、細胞の内部構造は非常に複雑であるが、その力学的な性質は、高分子あるいは液晶、膜といったソフトマターの集合体として、特にフィラメントと分子モーターからなる細胞骨格を中心に支えられている。このような、非平衡状態下にあるソフトマターの研究は最近アクティブマターとよばれて盛んに研究が進んでおり、これまでに、特に自発的に運動する粒子の集団運動について様々な議論がなされてきた [1]。

一個体として、エネルギーを消費しながら内部状態を変化させ、その結果変形し運動しているモデル系として、我々は、これまでに化学反応によって自発的に運動する液滴とその周りの濃度場の歪み、そしてその非等方性によって生じる流れ場を解析してきた [2-4]。また、内部に非線形な化学反応によるパターンを封入することによって液滴は様々な運動を実現することを示すことができる [5]。自発運動を生み出すには並進対称性を破って二つの中心を系が持つ必要がある。これまでは比較的シンプルな系について解析を進めてきたが、これからは、細胞のように複雑な内部自由度の中で運動に必要な最低限の要素を整理することを進めていきたい。

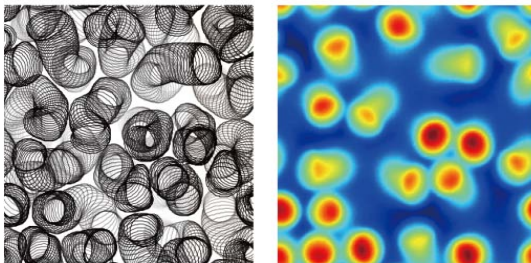


図 2: 自発的に運動する液滴が集団で運動する様子。(左) 個々の液滴の形と位置の変化。(右) 液滴が周りに形成する濃度場。

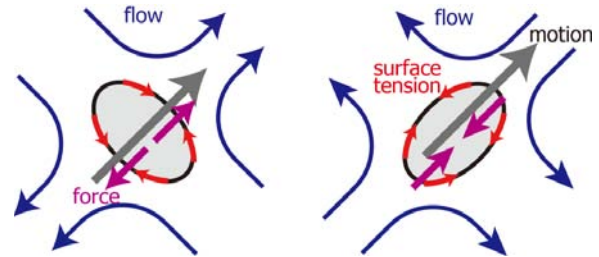


図 1: 自発的に運動する液滴の形と周りの流れ場。(左) pusher と呼ばれる進行方向に対して押し出すような流れ場を形成する運動、(右) puller と呼ばれる、進行方向に対して引き込むような流れ場。

また、さらに上位にある集団としての細胞組織のマクロな性質、特に外部の力学的な刺激に対する応答や細胞の協同的な配置の変化へとつながるのかを明らかにしたい。まず、形を変えながら運動するドメインの集合体として見たときに現れる集団運動の協同性によって、どこまで細胞組織内のダイナミクスが理解できるのか、そして、細胞の構成要素を限りなく減らし、アクティブソフトマターとして細胞運動の数理モデルの構築することによって細胞組織の普遍的な一面が理解できればと思っている。

- [1] M. C. Marchetti, J.-F. Joanny, S. Ramaswamy, T. B. Liverpool, J. Prost, M. Rao, and R. A. Simha, *Rev. Mod. Phys.*, **85**, 1143-1189 (2013).
- [2] N. Yoshinaga, *Phys. Rev. E*, **89**, 012913 (2014).
- [3] S. Yabunaka, T. Ohta, and N. Yoshinaga, *J. Chem. Phys.*, **136**, 074904 (2012).
- [4] N. Yoshinaga, K. H. Nagai, Y. Sumino, and H. Kitahata, *Phys. Rev. E*, **86**, 016108 (2012).
- [5] H. Kitahata, N. Yoshinaga, K. H. Nagai, and Y. Sumino, *Phys. Rev. E*, **84**, 015101(R) (2011).

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

A03 班 車兪澈、Pasquale Stano

GUV (Giant Unilamellar Vesicle)は人工細胞構築のためのモデル細胞膜として重要な研究対象である。GUV は生体分子を内包するソフトマターとして非常に優れているが、より生物らしさを考えた場合、膜の構成因子である脂質分子を内部合成することが大事である。すなわち、GUV 膜の疎水領域を形成する脂肪鎖を合成し、GUV 膜の自立的な成長と自己分裂の機能を持った人工細胞の構築を試みる。その上で、内環境における脂肪鎖の増殖による GUV 膜の形態変化を観察し、その振る舞いを物理化学的な切り口から解析する。

脂質合成は大きく分けて、脂肪鎖供与体である Acyl-CoA までの合成経路と、それ以降のグリセロール 3 リン酸 (G3P) を骨格としたリン脂質合成に分けられる (図 1)。G3P を基質とした LPA 合成と続く PA 合成は、それぞれ GPAT と LPAAT という酵素により触媒される。研究代表者等は、これら 2 種の酵素をベシクル内部で DNA から合成し、LPA または PA を合成することに成功している (Kuruma BBA 2009)。しかしより本質的には疎水的領域を形成する脂肪鎖の合成をおこない、ベシクルの成長・分裂を促す必要がある。これに対し近年、精製酵素による *in vitro* での脂肪鎖合成に成功したという報告があった (Yu PNAS 2011)。この報告は GUV 内環境における脂肪鎖合成の実現可能性を大きく示唆するものである。これに、研究代表者等によるリン脂質合成反応系と GUV 操作技術 (図 2) を組み合わせることで、ベシクル内部でリン脂質を合成することが可能となる。過去に脂肪鎖の feeding によるベシクルの成長や分裂を観察した例はあるが、内部合成された脂肪鎖による GUV の形態変化を観察した例はない。これは細胞内で起こる脂質のダイナミクスを理解する上で重要な研究課題である。

本研究計画は、脂質やタンパク質などの生体高分子から生命現象を再現することで、メソ構造での物理を解析するための実空間モデルを構築することである。ベシクル内で代謝反応を再構築することで、より細胞に近い条件で脂質膜のダイナミクス解析できるのみならず、脂質膜環境中でのダイナミクスを詳細に解析できる新たなベシクル系の創造が期待できる。またこれにより、最小因子から構成される人工細胞、Minimal Cell の構築に大きく寄与するとともに、Origin of Life についての実証研究にもつながることが期待できる。

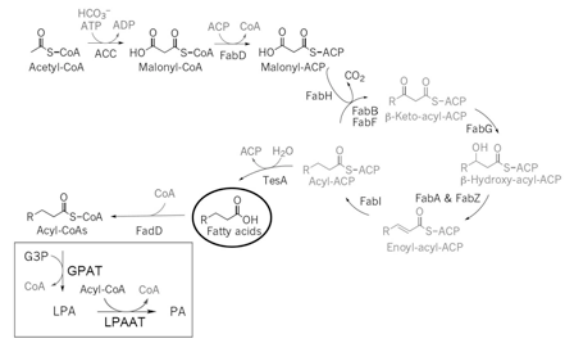


図 1: 脂肪鎖合成代謝経路とリン脂質合成代謝経路。G3P: glycerol-3-phosphate, LPA: lysophosphatidic acid, PA: phosphatidic acid, GPAT: glycerol-3-phosphate acyltransferase, LPAAT: lysophosphatidic acid transferase.

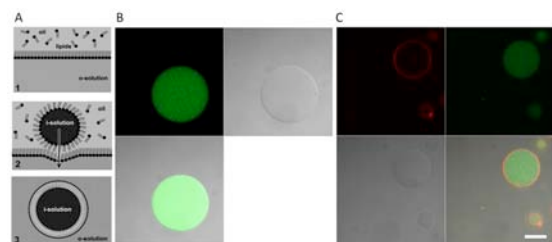


図 2: 最適化型エマルジョン沈降法により調製した GUV. (A) エマルジョン沈降法の原理. (B) Buffer を用いて調製した GUV. 内部にピラニンを添加. (C) 無細胞系を用いて調製した GUV. 内部で GFP を合成. スケールバー: 20 μ m.

車兪澈 (東京工業大学・地球科学研究所・WPI 研究員)
Pasquale Stano (ローマ第 3 大学・生物学専攻・Researcher)

複合化ベシクルによる非平衡細胞モデル系

A03 班 濱田 勉

細胞は、脂質膜から成る器によりユニット構造を維持し、外的・内的な刺激によりダイナミックにその構造を変化させます。すなわち、細胞システムとは、構成分子の反応と器である膜ダイナミクスが有機的に結合した動的構造体です。生命システムの物理学的の本質に迫るには、膜系をベースとした複合ソフトマターの非平衡ダイナミクスを理解することが重要となります。

私たちはこれまでに、膜系の時空間ダイナミクスと機能制御に関する研究を進め、細胞の膜機能メカニズムの定式化・数理モデル化を行ってきました。図1は、膜構成分子と界面活性剤が反応する非平衡過程において見出されたベシクル開閉の自励振動です (Hamada et al., Phys. Rev. E 2009)。振動のオン・オフおよび振動周期が、ベシクルサイズと界面活性剤濃度により記述できます。また、このような膜系の時空間ダイナミクスを制御することにも成功しています。光応答性アゾベンゼン脂質を膜内に導入し、光スイッチによる分子形状の変化を通して、ベシクル膜の孔の開閉が制御可能です (Hamada et al., JACS 2010)。これは、細胞内での物質輸送であるオートファジー小胞機能を人工的に再現したものです。また、膜内の相分離 (Hamada et al., Soft Matter 2011) や曲率変形 (Hamada et al., Langmuir 2005、Ishii, Hamada et al., ChemBioChem 2009) についても、同様に制御することが出来ます。さらに、コロイド粒子 (図2) やペプチド (図3) が相分離膜面に選択的に局在し、膜の複合化ダイナミクスを引き起こすことを見出しています (Hamada et al., JACS 2012, Morita, Hamada et al., Soft Matter 2012; Phys. Chem. Chem. Phys. 2014)。

本研究では、ベシクル膜系の構造設計・機能制御に関するこれまでの知見を基に、DNA やコロイド、細胞骨格タンパク質を含む「複合化ベシクル」を設計し、非平衡環境下での動的な細胞モデルシステムを構築します。細胞サイズ空間で原始的な動態機能が創発される物理原理を解明し、複合ソフトマター系の「非平衡ゆらぎ」と「構造」との普遍法則を探究します。

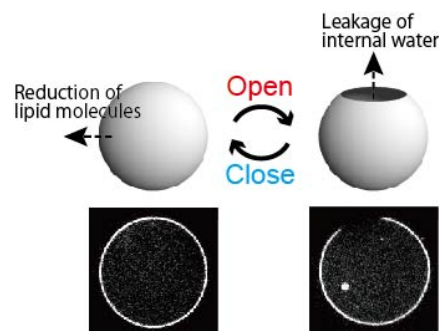


図1: ベシクル開閉の自励振動。(PRE 2009)

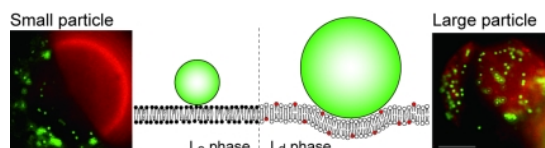


図2: 相分離ベシクルがサイズ依存的にコロイド粒子を分配する。(JACS 2012)

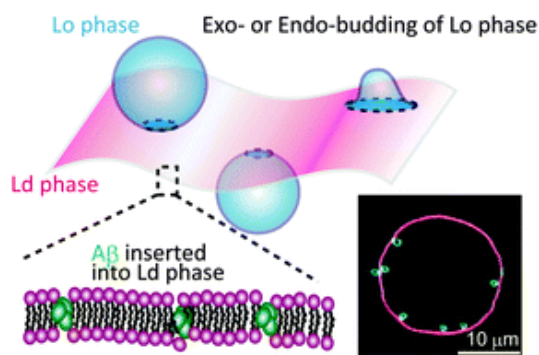


図3: ペプチドと膜の複合化ダイナミクス。(PCCP 2014)

胃癌細胞の非平衡形状揺らぎのもとらす時空間秩序と転移の相関

A03 班 田中求

本研究では、**悪性上皮性腫瘍である胃腺癌の転移**を研究対象として選び、（１）精密にデザインされた細胞膜モデル（２）非侵襲的な細胞接着力計測の新技术（３）細胞形態の動的ゆらぎの統計解析、を有機的に組み合わせて、**癌の転移（機能）と形状揺らぎの相関**を明らかにする。

胃腺癌は胃粘膜内の腺上皮又は癌幹細胞に由来するので、健常な胃上皮細胞株と４種の異なる進行度、およびリンパ節転移性胃癌から確立された胃癌細胞株を用いて比較実験を行う。定量的なリードアウトとしては、細胞膜モデルへの進行度の異なる**癌細胞の接着強度と形状揺らぎの時空間パターン**を（a）**接着分子の密度**と（b）**外部摂動としてのケモカイン濃度**（転移に特有の化学誘導物質）の関数で解析する。

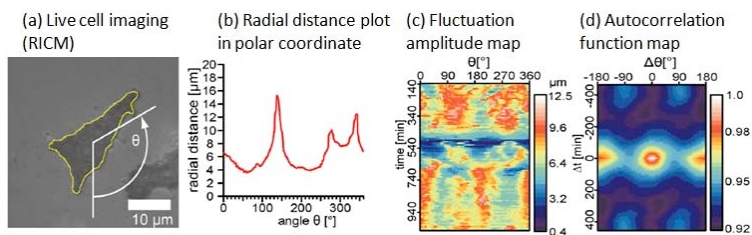


図 1: 反射干渉顕微鏡 (RCM) による生細胞イメージングから得た確率的な動的形状マップから、細胞の時空間パターンを計算した研究の一例。細胞系:マウス胃がん (Kaindl, Tanaka, PLoSOne(2012))

その第一段階として、代表田中の確立した“Supported Membrane”という実験手法を駆使して (Tanaka and Sackmann, *Nature*, 437, 656 (2005) など)、癌の転移において重要な役割を果たす接着分子 (E カドヘリン) で修飾した**精密細胞膜モデル**を構築する。膜内の構成分子の自己組織化を制御することで、nm 精度で膜面上でのカドヘリン分子間距離を制御できる。

E カドヘリンの表面分子間距離を nm 精度で制御した細胞膜モデルと癌細胞との接着の強度、すなわち癌細胞が周辺の組織へ転移する際の摩擦の強さを定量計測する手法としては、当研究室で開発したピコ秒レーザーパルスに誘起された圧力波を用いた新技术 (Yoshikawa, Tanaka, *J. Am. Chem. Soc.* 133, 1367 (2011)) を用いる。

葉状仮足を広げた癌細胞は健常細胞に比べて柔らかく、その形状ダイナミクスを実験的に追跡することは難しい。そこで本研究では、接着面近傍 ($h < 10$ nm) での細胞形態の動的ゆらぎをラベルフリーで追跡する手法として、当研究室の専門技術である反射干渉顕微鏡 (Reflection Interference Contrast Microscopy, RCM) を用いる。長時間にわたって記録された生細胞の time-lapse 画像の統計物理解析によって、確率的な細胞形態の非平衡ダイナミクスに特有の時空間パターンを、表面との摩擦 (接着分子 E カドヘリンの表面密度) の関数として計算する。

揺動散逸理論の枠組みにおける外部摂動に対応するパラメタとして、本研究では後腹膜、胃大網から放出される**胃癌細胞の走化性、転移、生存、癌性を促進するとされる胃癌細胞に発現が認められる CXCL12 に焦点を当てる**。CXCL12 受容体 (CXCR4) を多く発現する胃癌細胞にリンパ行性転移が報告されているので、ここでは**溶液中の CXCL12 濃度が、進行度 (転移度) の異なる癌細胞の形状揺らぎと動き (遊走) の時空間パターンに与える影響**を明らかにする。

ここで提案する「生体膜モデルを用いた腫瘍細胞の非平衡ダイナミクスと転移の相関」というテーマは、計画班メンバーと共通のキーワード (細胞揺らぎ・膜構造・自己駆動・時空間秩序など) をもつ。また医学的側面を強化するために、C 班の鶴山准教授 (京都大学) に研究協力者として助言を受ける。人工生体膜を使って癌細胞の転移のような医学・生物学的に重要な機能に踏み込んだ研究は、人工細胞を扱った本領域内の他の研究テーマと相補的な関係にあり、領域全体の発展にも大きく寄与するものと確信している。

遊走細胞のかたちを決める分子ダイナミクス

A03 班 岩楯好昭、作村諭一

アメーバ運動（遊走）は神経組織の形成から好中球の免疫応答にまで見られる普遍的な細胞機能です。遊走細胞は、溶液に浮遊中、基質と力のやりとりができず（力の閉鎖系）、運動のための前後極性を作ることができません。しかし、ひ

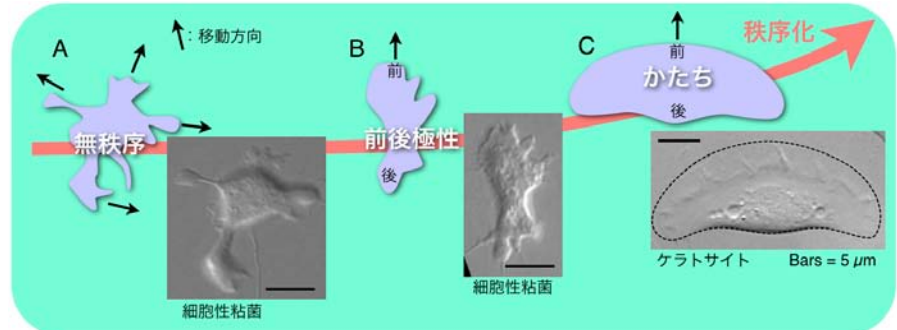


図1：アメーバ運動する細胞は、自律的に前後極性やかたちを生み出す。

とたび基質に接着し、基質と力学的なやりとりが可能な状態（力の開放系、図1 B）になれば前後極性を自律的に創り出し運動します。前後極性の形成には誘引物質等はありません。前後極性は遊走細胞の力の開放系での非平衡定常状態といえるでしょう。私たちはこの事実に気づき（Iwadate et al 2008 *J Cell Sci*）、今日まで細胞性粘菌を使い、細胞が基質と力学的な相互作用を元に前後極性をどのように生み出すか研究を進めてきました。

遊走細胞が創り出す定常状態は前後極性だけではありません。魚類表皮細胞ケラトサイト（keratocytes）は浮遊状態から基質に接着すると、仮足をランダムに伸長させるゆらぎの状態から、やがて必ず三日月形になります（図1 C）。繊維芽細胞や細胞性粘菌は基質上でも通常不定形ですが、たまたま三日月形になるとしばらくそのかたちを保って運動します。三日月形のかたちは、前後極性同様、細胞が基質と力のやりとりを行える開放系での定常状態なのです。

遊走細胞の三日月形のかたちは Graded Radial Extension (GRE) モデルという数理モデルで説明されています（図2、Lee et al 1993 *Nature*）。GRE モデルは、“細胞前端中央の伸長速度が最大で、両側に向かって遅くなっていることで三日月形が維持されている”と幾何学的に説明しています。GRE モデルの登場によって、“三日月形がどうやって形成されるか？という抽象的な疑問”は、“（1）細胞前端中央の位置が決定する分子メカニズムは何か？（2）そこを最大とする細胞伸長の速度勾配が形成・維持される分子メカニズムは何か？という明確な研究課題”に具現化されました。

細胞前端中央の位置の決定とは、細胞の前後極性が決まることにほかなりません。そこで、私たちは遊走細胞のかたち形成が前後極性の決定の上位の自律的な秩序形成現象と位置づけ（図1）、“力”をシグナルとした（1）（2）のメカニズム、すなわち分子ダイナミクスを明らかにし、かたち形成メカニズムの全容解明を目指します。



図2：GRE モデルの概念図。細胞の伸長は、細胞前端で細胞の輪郭線（点線）と垂直方向に起きる。伸長速度（矢印の長さ）に勾配（中央が速く、両側が遅い）をもたせると、細胞はかたちを変えずに前進できる。後端も同様（省略）。

岩楯好昭（山口大学・医学系研究科・准教授）
作村諭一（愛知県立大学・情報科学部・准教授）

1個の接着蛋白質の特性から生み出される巨大スケールのバクテリア渦状運動

A03 班 西坂崇之、中根大介、大岩和弘

昨今の光学顕微鏡技術の発展に伴い、生命科学の研究は、今や1個の分子を対象に議論することが可能になっている。1分子の中で起こる化学反応や構造変化、そしてエネルギー変換の様子がありありとリアルタイムで画像化され、生体分子が精密な“分子機械”であるという考え方は疑いなく受け入れられるようになった。熱揺らぎの中においても、一見すると正確に動作するように見える精密な装置は、数多くの分野において非常に魅力のある研究対象として認識されつつある。

研究代表者の西坂はこれまでに、数々の分子モーター（ミオシン・キネシン・F₁-ATPase・新規のバクテリアモーター）を分子レベルで研究する新しい方法論を展開し、従来の多分子系の測定では分かり得なかった数々の謎を明らかにしてきた（*Nature* 1993 & 1995; *Nature Structural Molecular Biology* 2004 & 2008; *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 2000 & 2014 等／全て筆頭著者もしくは Corresponding author.）。本課題は、これまでに開発した技術をバクテリアの運動に応用し、分子レベルから集団レベルまでのマルチスケールにおいて多面的な研究を展開し、特徴的な渦形成という新しい生命現象の説明を試みようとするものである。

フラボバクテリウム・ジョンソニエ（*Flavobacterium johnsoniae*、以下ジョンソニエ）は、土中に普遍的に存在するバクテリアであり、単離した状況ではその形状に沿って行ったり来たり運動をする。つい最近になって、この特徴的な動きは、細胞表面に突出した接着蛋白質である SprB のらせん上の流れによるものだということが、中根大介博士（現・学習院大学 助教）や中山浩次教授（長崎大学）らによって明らかになった（Nakane *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2013）。接着の対象となる基板上の分子は未だ分かっていないものの、ジョンソニエの細胞表面にはらせん状のレールが用意されており、このレールに沿った接着蛋白質の流れが、バクテリア本体の滑走運動の原動力となるのである。

西坂研究室の小高祥子氏（博士前期課程）は、このバクテリアを高濃度で寒天上にスポットした際の集団運動を詳細に解析した。興味深いことに、栄養や温度の条件を調整することによって、バクテリアは直径が1–3 mmの渦状のパターンを形成するということが見いだされた（第51回日本生物物理学会（2013）、生体運動研究合同班会議（2014）、第87回日本細菌学会総会（2014）で小高氏が報告）。個々のバクテリアは、見かけ不規則な運動を行うにもかかわらず、集団においてはミリスケールの自己組織化を行うのである。

この現象は、1匹の細胞の運動の特性、さらには、1個の接着蛋白質の性質によって実現されている可能性がある。代表者の西坂のグループでは、1細胞をナノスケールの分解能でトラッキングする技術、さらには、タンパク質1個もしくは小数個を人工的なマーカーによって追跡する技術を確立している。特に後者については、通常の光学顕微鏡における2次元平面という制約を超え、3次元での追跡に成功している。これら独自の顕微鏡技術を駆使し、接着因子の非対称な動きから、渦の形成までを定量的に解析することで、自発的な集団運動の説明を試みる。理論の側面から得られる考察やモデルは、結晶成長や材料分子の自己組織化など、実用的な課題に直結する基盤をさまざまな分野の研究者に提供することが期待される。

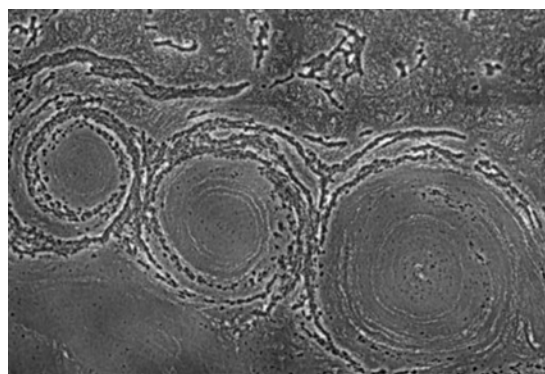


図 1: 西坂研究室の小高祥子氏（博士前期課程）が発見した *F. johnsoniae* の集団の渦状運動。スポットした集団が広がる際に、境界面で左回転の渦を自発的に形成する。

西坂崇之（学習院大学・理学部物理学科・教授）

中根大介（学習院大学・理学部物理学科・助教）

大岩和弘（情報通信研究機構・未来 ICT 研究所・主管研究員）

F1-ATPase によるエネルギー変換と非平衡揺らぎ

A03 班 宗行英朗

F1-ATPase はアデノシン 3 リン酸 (ATP) のアデノシン 2 リン酸 (ADP) と無機リン酸 (Pi) への加水分解反応と分子内部の γ サブユニットの回転を共役させる分子モーターで、ATP 1 分子の加水分解により γ サブユニットが 120° 回転する。この共役は双方向性で、ATP の加水分解反応により得られる自由エネルギーより γ サブユニットにかかる外部トルク $\times 120^\circ$ が大きいときには逆回転が起こって ATP が ADP と Pi から合成される。平均して回転が止まっているストール状態の外部トルク $\times 120^\circ$ は ATP 1 分子の加水分解の自由エネルギーと釣り合っており、加水分解反応と回転運動がタイトにカップルして、化学反応の自由エネルギーと回転運動のエネルギー変換効率がほぼ 100% になっていることを示している。興味深いことに、外部トルク $\times 120^\circ$ が ATP 加水分解の自由エネルギーより小さいときは、加水分解の自由エネルギーと外部トルクに対する正味の仕事の差が Harada-Sasa 等式を用いて算出される回転自由度における非平衡的な揺らぎによる熱と回転に対する摩擦熱によって散逸されることが、かなり広い範囲の実験条件で野生型の F1-ATPase について示されている (図 1)。まさに F1-ATPase は完璧な自由エネルギー変換器のように見える。

しかし、ここで素朴な疑問が生じる。ATP の加水分解の自由エネルギー差は、ATP と ADP, Pi の質量作用比を調節して混合エントロピーを大きくすることにより、原理的にはいくらでも大きくすることができる。そのような場合に Harada-Sasa 等式で算出される熱は加水分解の自由エネルギー差と共にいくらでも大きくなるのだろうか？そもそも自由エネルギーのうちのエントロピー項が仕事になるときに、その起源は熱浴から吸収された熱であるが、外部トルクが大きくなって 120° の回転に要する自由エネルギーがそれほど大きくないときでも加水分解による自由エネルギーの大きさに応じた熱を熱浴から吸収するのだろうか？

アミノ酸変異を導入した F1-ATPase の変異体ではストール状態のエネルギー変換効率が 100% より有意に低く (図 2)、また、予備的な (まだ信じられるかどうか怪しい) 実験結果では場合によっては野生型で Harada-Sasa 等式で算出される熱が ATP 加水分解の自由エネルギーより小さい場合もあるようだ。

実験条件や、変異導入によってエネルギー変換の機構がガラッと変わってしまうとは考えにくいので、変異体などの、ある意味非理想的な挙動も含めて統一的な説明が出来るようになったときに初めてこの分子機械による自由エネルギー変換が理解出来たと言うべきかも知れない。

現在、実験者の技量もふくめ技術的な問題が多くあるが、揺らぐ世界で作動する微小な分子機械による自由エネルギー変換の理解を目指して確実な実験結果を蓄積してゆきたいと考えている。

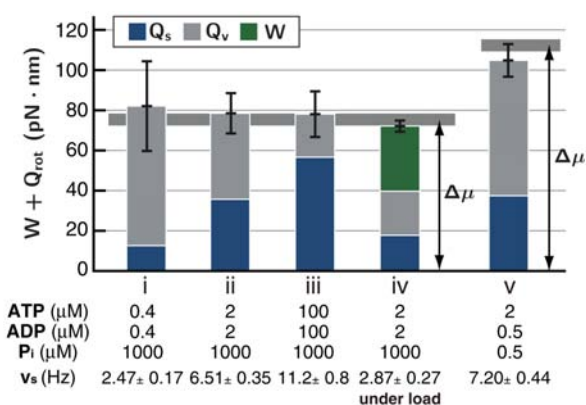


図 1: 野生型 F1-ATPase について、様々な条件下での Harada-Sasa 熱の測定結果 Toyabe et al (2010)

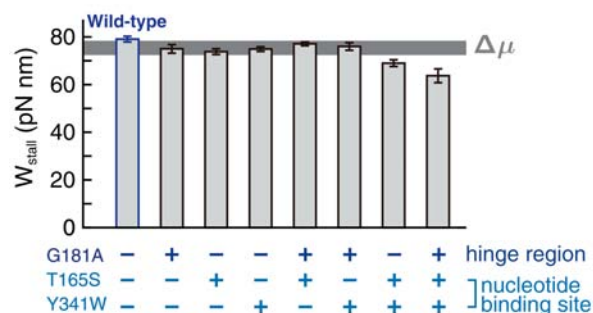


図 2: 野生型と変異 F1-ATPase のストール状態の

「ゆらぎと構造の協奏」第二回領域会議

A02 班 石原秀至

8月29～31日の3日間、北海道大学において「ゆらぎと構造の協奏」の第二回領域会議が行われました。すでに秋めいてきた気候の中で、大変気持ちのよい研究会でした（天気の良いさに外に出ると、他の参加者もあり、話が弾んでしまいました）。前回熱海で行われた会議から、公募班の方々、招待講演の先生方も加わり、様々な刺激的な話が聞けました。

吉川先生の混雑効果による DNA 凝集の話からはじまり、実際の細胞を対象にした岩楯先生の細胞性粘菌の運動、生体運動をモデル化した流体中アクティブマターの解析、プロトセルを目指した膜ダイナミクスの研究、マイクロレオロジーの最近の発展や細胞レオロジーの研究。引き続き小さな量子非平衡系や量子相関を用いた熱力学関係、量子ホール効果や乱流等、盛りだくさんの内容でした。

この領域会議の特色の一つは、上で書いたような多種多様な分野を、横断的につなげようとする試みだと思います。もちろん各分野の細部まで理解する事はなかなか難しいのですが、それぞれの話は「非平衡」や「ゆらぎ」「生命」といった軸によってつながっています。同時に、各々の専門性に根ざした視点や、解析手法を用いた発表を聞いていると、自分とは異なる非平衡観、生命観の発見があり、より深いレベルでの理解があるのではないかという期待が膨らんでいきます。特に前半のソフトマター・アクティブマター、膜変形、マイクロレオロジーの話は、多様でありながらも、生命系研究を指向していると言う点でつながりがわかりやすかったです。この点について、会議最終の蔵本先生のコメントで、生命系研究者にもアピーリングであるような研究領域にするべきだということをおっしゃられていました。自分自身、物理と生物の境界領域の研究をしていて、このような問題意識をしばしば抱きます。この領域で行われている個々の研究をつなげて、物理系から生命系へどうつなげていけばよいのか、それを明らかにすることがこの研究領域の一つの使命なのでしょう。

実際の面からもいろいろと勉強になりました。例えば好村先生の発表「マイクロレオロジーの新展開」では、前半部分でマイクロレオロジーのレビューを話されました。内容的に、その後に話された水野さんの細胞内レオロジー測定の研究にもつながりますし、自分が行っている研究にも参考になりそうです。このような、分野のバックグラウンドを説明した発表があると不慣れな分野の講演も聴きやすくなるので、今後もし取り入れて欲しいと思いました。

もう一つ要望を。ポスター発表も盛況で、各々の研究が進展しており、この領域分野の活発ぶりを感じました。しかしながら、一つ一つ議論をしていると、結局時間が足りなくなって、聞けない発表が多くありました。公募班が参加して人数も増えた事もあり、もっとポスターに時間をとって頂ければありがたいです。

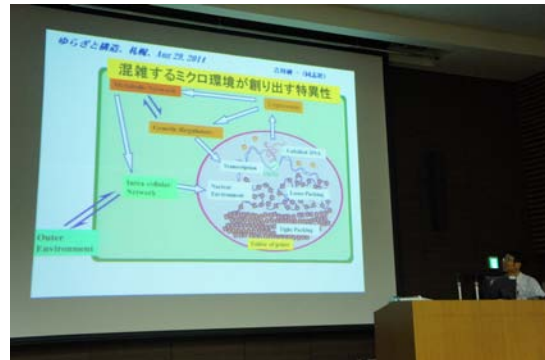


図1:細胞内の混雑効果について発表する吉川研一先生



図2:コメント中の蔵本由紀先生

Workshop on Thermodynamics, Large deviation, and Transportation の報告

A01 班 根本孝裕 (佐々研)

この研究会の一番の特色は、その informal さにあったと思います。ホームページで公開されている研究会の日程は2日間です。各講演者は発表時間45分と質疑応答時間30分を与えられ、計75分間登壇します。一般に、研究会において質疑応答30分というのは長い部類に属すると思います。この研究会では、発表の途中で頻繁に議論が巻き起こり、話が長い間脱線することを想定し、初めから質疑応答時間を多めに取っておくという措置がなされました。その意味で、この研究会は通常のセミナー感覚で行う国際会議であったと言えます。

もちろん、通常のセミナーとは比べものにならないほど、研究会にはとてもボリュームがあり、多岐に渡る専門家がその最先端の研究成果を報告しました。以下が、講演者名と講演タイトルになります: Christian Maes “H-theorems and statistical forces outside equilibrium”, Shin Nakamura “Non-equilibrium Steady States in AdS/CFT”, Robert Jack “Fluctuating hydrodynamics in diffusive systems, the Wasserstein geometry, and hyperuniform active states”, Vivien Lecomte “Finite-size effects in a mean-field kinetically constrained model”, Takahiro Nemoto “Computation of Large Deviation Statistics via Iterative Measurement and Feedback Procedure”, Yariv Kafri “Singular Large Deviation Functionals”, Keiji Saito “Several mysteries in low-dimensional heat transport”, Takahiro Sagawa “Information Thermodynamics on Causal Networks”, Karel Netocny “Geometric and kinetic aspects of nonequilibrium steady states”.

ところで、初めに『ホームページで公開されている研究会の日程』と述べました。実はこれは、研究会の前後に、ホームページに公開されていない informal meeting が行われていたことを暗示していました。この meeting は言い換えれば、informal さが特色の研究会の前後にある informal meeting です。ここではとても活発な議論が行われたことが伺い知れると思います。

研究会の前日には非平衡系における粗視化についての meeting が行われました。登壇者は全員若手で、発表順に、Kyogo Kawaguchi “Stochastic entropy production and coarse-graining”, Kiyoshi Kanazawa “Gaussian VS. non-Gaussian”, Yohei Nakayama “Effective description of externally driven system”, Masato Itami “Microscopic derivation of friction coefficient”となります。研究会後には、(i)熱力学と(ii)ガラス転移の二つのテーマに別れて、独立に二つの meeting が行われました。(i)については、具体的なスケジュールを決めずに、『熱力学の非平衡系への拡張に関する諸問題の整理』をテーマに議論が行われました。(ii)についてはセミナー形式で、以下のような講演者とタイトルで行われました: Hisao Hayakawa “Stress avalanches in jammed solids”, Ryoichi Yamamoto “Direct numerical simulations of swimming particles”, Robert Jack “Connecting structure and dynamics in glass-formers”, Vivien Lecomte “Exclusion Processes and Quantum Phase Transitions in XXZ Spin Chains”, Atsushi Ikeda “Static structure factors at the random close packing”, Kunimasa Miyazaki “Glass Transition and Dynamic Heterogeneities of Gaussian Core Model”。私自身は(ii)の meeting に参加したため、(i)の meeting についての詳細は知ることは出来ませんでした。参加した方からは、とても白熱した議論だったと聞いています。また、(ii)の meeting についても、ガラス転移研究の専門家を交えたとてもレベルの高いセミナーだったと言えます。

この報告書執筆の依頼があったのが研究会終了後であったため、この報告書用の写真を取ることは出来ませんでした。しかしもしも写真を取ることが出来たとすれば、研究会のバンケットの一コマを取ったかも知れません。そこでは、Christian Maes 氏の息子さんと佐々真一氏の愛弟子である伊丹君のチェスバトルが行われました。これは、招待講演者のうち最年長であり、議論を最も活発に行っていた参加者の一人である Christian Maes 氏と、研究会の Chair を勤め、また同様に議論を最も活発に行っていた参加者の一人である佐々真一氏の間接的で informal な勝負であり、informal が特色の研究会なだけに、結果は気になる所です。勝敗の行方は、お近くの若手参加者にお尋ねください。

「冷却原子研究会」が開催されました！

A02 班 高橋 雅裕

A02 時空班で企画した冷却原子研究会が 2014 年 11 月 3 日に行われました。この研究会では、公募班を含めて、冷却原子の分野のゆらぎと構造に関するこれまでの研究成果報告及び今後の研究進展に向けて講演・議論が行われました。

発表の中で出てきた冷却原子における大きなテーマの一つは「量子乱流」だと思います。量子乱流では量子化により渦の定義が明確になっているところが古典乱流に比べ有利な点です。量子乱流でも古典乱流と同様の層流-乱流転移があるのか、ということは興味深いテーマです。また、量子乱流の中でも内部自由度を持つ系における研究は、冷却原子に特有の性質を使った新しい分野の研究であるとともに、一方で古くから研究されているスピン系とのアナロジーもある、双方向からのアプローチが可能なテーマです。これらの理論研究がそれぞれ進んでいる状況を確認し、相互に刺激になったと感じています。一方で、これらの理論研究を先行して行い、実験での観測への提案を行うことが将来的な課題だと感じます。

実験的研究での講演では互いに退け合う 2 成分の冷却原子のダイナミクスの観測、及び実験的なスピンの制御方法について紹介があった他、大きな磁気モーメントを持つ凝縮体の生成に向けた取り組みが紹介されました。前者の実験では界面での不安定性に関する理論研究との比較、後者では長距離の相互作用を含む系での非平衡現象など、今後の発展が期待されます。また、実験的観測への直接の提案として、回折限界を超えた非破壊測定の可能性が提案されました。

冷却原子気体の系は操作できるパラメーターが多いというメリットがある一方、実験的に細かい構造を高い解像度で検出するのは現状では困難なところがあります。実験と理論とのコンビネーションで確かな結果を生み出していけることを期待します。

今回は近い研究領域内での意見交換でしたが、今後、異なる研究領域どうしの交流を行う中で新しいアイデアが生まれることを期待します。



図：参加者の集合写真。学習院大学南 7 号館の前にて。

－ 講演一覧 －

坪田 誠 (大阪市立大学) 「原子気体 BEC における非線形・非平衡現象」

衛藤 雄二郎 (学習院大学) 「2 成分ボース・アインシュタイン凝縮体におけるスピンドメインの安定性」

斎藤 弘樹 (電気通信大学) 「スピノール BEC における構造形成とダイナミクス」

藤本 和也 (大阪市立大学) 「強磁性スピノール BEC の乱流における相関関数の振る舞い」

井上 遼太郎, 上妻 幹旺 (東京工業大学) 「Yb 光格子顕微鏡の開発と Eu 原子のレーザー冷却」

蘆田 祐人, 上田 正仁 (東京大学) 「回折限界を超えた光格子量子撮像方法の提案」

小林 未知数 (京都大学) 「内部自由度のあるボース・アインシュタイン凝縮の Kosterlitz-Thouless 転移」

川口 由紀 (東京大学) 「スピノール BEC におけるゴールドストーンマグノンの不安定性」

工藤 和恵 (お茶の水女子大学) 「強磁性 BEC の磁区パターン形成」

高橋 雅裕 (学習院大学), 小林 未知数 (京都大学), 竹内 一将 (東京大学) 「超流動体の渦糸乱流転移に関する臨界指数」

今後の予定

◎新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」主催

○領域横断研究会「細胞力学と細胞運動の協奏」

2014年12月19日（金）～20日（土）

九州大学

○International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015

2015年8月20日（木）～23日（日）

京都大学芝蘭会館 稲盛ホール

◎新学術領域「ゆらぎと構造の協奏」共催

○第24回「非線形反応と協同現象」研究会

2014年12月6日（土）

東京電機大学 東京千住キャンパス

○Winter School Frontiers of Statistical Mechanics: from Non-equilibrium Fluctuations to Active Matter

2015年2月4日（水）～17日（火）

京都大学基礎物理学研究所パナソニックホール

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（東京大学）kazumasa@daisy.phys.s.u-tokyo.ac.jp

北畑裕之（千葉大学）kitahata@physics.s.chiba-u.ac.jp