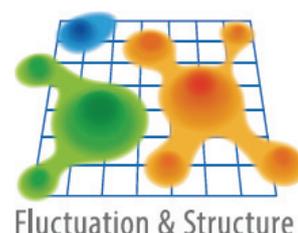


ゆらぎと構造の協奏

～非平衡系における普遍法則の確立～

News Letter Vol.1 拡大号

2013.12.25 発行



緒言：非平衡科学の新しいパラダイムを目指して

領域代表 佐野雅己

ほぼ3年の長きわたる産みの苦しみをへて、我々の新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏：非平衡系における普遍法則の確立」(H.25～H29)がスタートしました。採択に至るまでの準備の期間、様々な場面でご協力いただいた多くの皆様に感謝するとともに、これからが本番となる領域研究の将来に寄せて、その概要と今後の期待を述べたいと思います。

平衡系には、しっかりと確立した法則や手法があるにもかかわらず、非平衡系の法則や手法は、いまだ部分的にしか理解されていません。そのことは、逆に非平衡系を研究することに限りない可能性があることを意味していると考えます。ボルツマンやアインシュタインから始まる長い歴史を持つ非平衡系の研究ですが、揺動散逸などの線形領域のゆらぎの理論が完成するのに約50年、自己組織化やカオスなどのマクロな非平衡系の研究が開花するには、約80年の時間が必要でした。今、再び、非平衡系に対する関心が分野を超えて広がりつつあるように思います。非線形領域でも使えるゆらぎの定理の発見や微小な系に関する測定技術や操作技術が大きく進歩したことが、非平衡系の研究に新たな局面をもたらしていると言うことが出来ると思います。本学術領域では、これらの新しい動向を捉えて、非平衡物理の再構築を行うことを目指して、次の3つを柱とした研究計画を推進します。

A01: 非平衡ゆらぎが従う法則の探求と拡張、A02: ゆらぎと構造が強く相関する非平衡現象の解明、A03: 非平衡構造や非平衡ダイナミクスと生命機能をつなぐ展開研究。これらは、いずれも今後大きな発展が予想される課題であると考えています。そのため、各項目にそれぞれ、基礎班、時空班、機能班の3つの計画研究班を対応させてグループ化しています。A01では、微小な量子系や古典系の非平衡状態における熱ゆらぎの性質を明らかにしますが、非平衡系では、熱ゆらぎに限らず、マクロなゆらぎも顔を出し、マクロなゆらぎも普遍的な振る舞いを見せる場合があります。基礎班は、それらの非平衡系のゆらぎを真正面から扱うグループです。A02では、時空間構造を持つ系のゆらぎに焦点をあてます。平衡構造や非平衡構造がゆらぎと強く相関する現象を詳しく調べることで、従来の理論では見逃されてきた現象に迫ることができると期待しています。A03では、非平衡現象の研究が生命現象へとつながる接点を明らかにしていきます。実験の進歩が生命現象に関わる非平衡ダイナミクスを次々と明らかにしつつあります。非平衡科学と生命科学の交流は、今後ますます重要となるテーマであると考えます。単なる物質の集まりがなぜ生命という存在を生み出すことができるのか、そこに非平衡性はどうかに関わるのか、プロトセルを合成する挑戦もA03グループの重要な課題です。この新学術領域では、上記の目的の下に、関連する多くの分野からメンバーに参画いただくことができました。固体物理とソフトマター物理、生物物理などの異なる分野の研究者が、非平衡という観点から同じ土俵の上で議論できる場が実現できたことは、この新学術の特色の一つでもあります。この新学術を通して、研究者どうしの出会いがスパークを生じさせ、個々の研究者の成果を越えて、本当の意味でのシナジー（協奏）効果を生み出すことができれば、新学術領域の目的は達成されると考えます。このニュースレター第一号では、各計画研究代表者から、今後4年半の研究に対する抱負や期待を込めて原稿を寄せていただきました。本学術領域のキックオフとしての紹介を兼ねて、ご覧頂ければ幸いです。

非平衡ゆらぎの熱力学体系

A01 基礎班 佐々真一、中川尚子

平衡状態、および、線形非平衡領域のゆらぎの性質は、系統的に簡潔にそして普遍的に記述される。例えば、熱力学量のゆらぎについては、その分布関数の主要な部分は熱力学関数で決定される。熱力学関数はゆらぎとは関係のない熱容量と状態方程式から測定によって決められるので、この事実は驚くべきことである。また、線形非平衡領域における輸送係数が平衡条件下の流れの時間相関関数で決定されるという事実も非自明な法則である。

ところが、線形非平衡領域を超えた途端、非平衡ゆらぎの性質は個性をアピールしてくる。ゆらぎと応答の関係は複雑になり、ゆらぎを決める原理は分からなくなり、熱力学的構造の存在もはっきりしなくなる。普遍的なのは、平衡状態にはなかった「長距離相関」が特別な系を除いて一般的に存在するという病的な様相だけである。もちろん、豊かな散逸構造の記述の成功例から分かるように、マクロ極限を先にとることでゆらぎを切り離して議論できる非平衡系も多い。しかしながら、生体系の機能発現のように、様々な部品がヘテロに組み合わせられて全体に作動している系では、そもそもマクロ極限の考え方が適切かどうか分からない。地道にミクロな世界とマクロな世界の橋渡しを考えるならば、マクロ極限の記述が簡単な系においても、ミクロな世界からの理解を得るべきであろう。

すぐに誰でも問える問題がある。「熱力学関数は非平衡状態に健全に拡張できますか?」「もし、拡張できるなら、それはゆらぎの性質と関係しますか?」随分と長い時間この問いと戦ってきた。これはいいかも、という進展が数年に1回あるので、ついここまで考え続けてしまった。そろそろ引き際のようにも感じるが、この新学術領域が発足したことを機会に、新規一転、この問題をゼロから検討し、もう一度正面から挑戦したい。アイデアはある。

ただ、形式的な問題だけを考える時期ではないだろう。現象と向かうことを意識したい。ただ、できるだけ単純な現象をとりあげ、その定量的説明にこだわりたい。例えば、運動する物体があるなら、そこに働く力を分解していく。そのうち既知事項から分かるもの（熱力学力、流体効果による力、線形応答による力）を同定し、「それ以外の力（純正非平衡力?）」の起源を問いたい。アイデアはある。

液晶のように構造をもった分子の集まりの振る舞いの理解はそれとも関係している。例えば、ひとつの分子が空間反転や回転に対する対称性がない場合、流れなどの非平衡ダイナミクスが多様な振る舞いを見せている。例えば、分子レベルの非対称性のマクロスケールへの伝搬の記述について、これまでに確立しているオーダーパラメータ記述で十分かどうかを検討したい。アイデアはある。

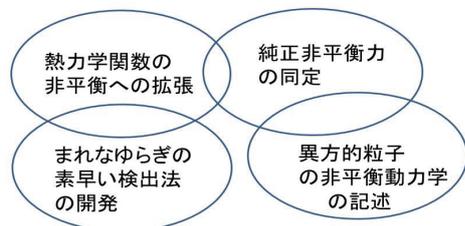


図 1: 研究課題の相関図

平衡から離れれば離れるほど、よりまれなゆらぎの関係が大事になってくる、という不思議な事実がある。ゆらぎ定理がその典型である。ところで、ゆらぎの頻度が小さいからといって重要でないわけではない。例えば、生物の進化を考えると、滅多に起こらないゆらぎが大きな影響を及ぼす事象こそが進化の鍵になっている。地震もそうである。そういう例でなくても、例えば、ゆらぎ定理の真の意義を明らかにするためにも、まれなゆらぎの性質を素早く検出する技術が開発したい。アイデアはある。

佐々 真一（京都大学・理学研究科・教授）

中川 尚子（茨城大学・理学部・准教授）

ゆらぎと構造の協奏:「非平衡量子系の輸送ダイナミクス」

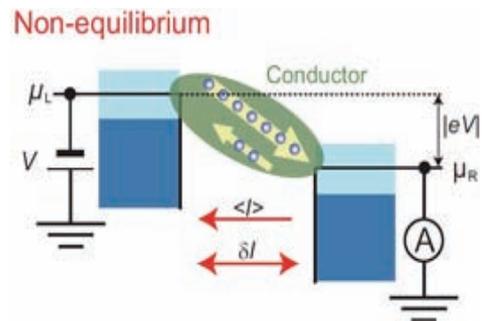
A01 基礎班 小林 研介、齊藤 圭司、沙川 貴大

近年、微細加工技術が大きく発展したおかげで、私たちは、量子的な電気伝導が支配的であるような極小の固体量子素子を作ることができるようになりました。このような素子においては、素子に印加する電圧によって、平衡状態(電圧0)から極端な非平衡状態(大電圧印加)までを、自由に連続的に制御することができます(右図)。したがって、このような固体量子素子は、非平衡量子系を定量的に取り扱うことのできる理想的な舞台の一つということができるでしょう。

本研究は、固体量子素子を舞台として、非平衡ダイナミクスを定量的に取り扱う方法論を作りだそうとするものです。私たちが開発してきた高精度の電流ゆらぎ測定手法を、様々な固体量子素子に適用し、量子系におけるゆらぎの定理の精密な検証を行います。また、新たな測定手法を開発し、量子フィードバック制御された素子の研究を行いながら、非平衡等式の一般化の実験的検証方法を探索します。

現在、強相関量子科学や、スピントロニクスなどの研究分野では、多体量子効果を積極的に利用した固体素子の研究が活発に進められています。一般に、トランジスタのような能動素子を実現するには、系の平衡状態だけでなく、非平衡状態に対する定量的な理解が欠かせません。しかし、現在注目されている素子の母体となる多体量子系において、その非平衡状態を定量的に理解することは、極めて難しい問題です。本研究は、そのような要請に真正面から向き合うものといえます。

学術的には、本研究の特色は、線形応答理論の枠組みを超えて、非平衡多体系の定量化を目指す点にあります。1950年代以降、平衡状態付近を定量的に記述できる線形応答理論は成功を収めてきました。本研究によって、非平衡状態においても同様の取り扱いを可能にし、広大な未踏研究領域の開拓を行いたいと考えています。量子系を舞台とするこのような研究は、未だ理解が十分ではない、非平衡量子系をより定量的に取り扱うことを可能にするばかりではなく、量子測定理論と統計物理の融合につながる可能性も持っています。



非平衡状態にある固体素子の概念図。二つの電子溜の間に電位差があり、その間に挟まれた素子を電子が伝導する。たとえ、電圧が印加された状態であっても、電子は、一方向だけに伝導するのではなく、必ず、ある確率で逆行する。電流ゆらぎを精密に測定することによって、この現象を実験的に観測することができる。ゆらぎの定理は、このような非平衡のダイナミクスの定量的な取り扱いを可能にする。

小林 研介 (大阪大学・大学院理学研究科・教授)

齊藤 圭司 (慶応義塾大学・理工学部・准教授)

沙川 貴大 (東京大学・大学院総合文化研究科・准教授)

非平衡ゆらぎが生み出す構造と運動の普遍性

— ミクロ・マクロのゆらぎと非平衡構造 —

A01 基礎班 佐野雅己、笹本智弘、竹内一将

今年度ようやく新学術領域研究「ゆらぎと構造の協奏」がスタートしました。まずは、その前途を祝すとともに、私たちの計画研究の目指すところを紹介したいと思います。

我々の属する基礎班では、主として非平衡ゆらぎが従う法則を探求することを目指しています。ゆらぎが従う法則とは、近年発見された、熱浴に接した小さな系に外部から操作を施した場合に成立つ法則である、ゆらぎの定理などを指していますが、本計画研究ではそこにとどまらず、平衡から遠く離れた状態における非平衡ゆらぎや構造についても探求を進め、より広い範囲で成立つ非平衡系の普遍法則や多様性を明らかにすることを目指しています。非平衡系のゆらぎの研究には長い歴史があり、マクロなゆらぎである乱流ゆらぎの問題は、大きな未解決問題の一つです。また、本課題でも計画している、成長するランダム界面のゆらぎは、80年代にそのモデルが提案されましたが、ごく最近、厳密解や精密実験などの突破口が開かれ、大きく進展しています。これらの平衡から遠く離れた散逸系のゆらぎと前者のゆらぎの定理などの関係ははまだ明らかになっていません。本課題では、平衡に近い状態でのゆらぎと平衡から遠く離れた状態でのゆらぎの両方の問題を扱うとともに、それらをつなぐことも目指しています。そのため、平衡に近い小さなゆらぐ系と平衡から遠く離れた系を連続的に結ぶ実験系を詳しく研究します。その一つがアクティブマターの実験系です。より具体的には、何らかの非対称性を持ったコロイド粒子に外部から一様な電場などを印可すると、電場の方向とは独立に、粒子固有の向きを持って運動する現象があります。外場とは独立に、いわば自己駆動で推進するコロイド粒子系は、アクティブコロイドとも呼ばれ、我々の研究も含めて世界的に関心が高まっています。この系の利点は、エネルギーの供給源である外場の強さをゼロから徐々に上げてゆくことで、平衡から非平衡までを連続的に調べることが可能なことです。平衡状態では、揺動応答関係が成り立ち、平衡からやや離れたところでは、それが破れますが、ゆらぎの定理が成立する領域があると考えられます。そして、さらに平衡から離れるとゆらぎの定理からのずれも生じてくることが想像できます。この過程を詳細に調べる事により、現在の理論の検証にとどまらず、その限界や新たな理論の可能性も見えてくることが期待されます。さらには、アクティブな粒子の集団挙動を調べることで、内部に駆動力を持った粒子集団が示す新しい相挙動、その連続極限としてのアクティブ流体の振る舞いなど、これまでの非平衡系にはなかった多彩で豊かな現象が発見されることが期待できます。それらが、従来から研究されてきたマクロな乱流現象やゆらぐ界面現象などと、どう異なり、どこが共通なのか、それらはこの4年間で明らかになると確信しています。そして、それがいずれは、細胞運動や細胞集団などの動力学の理解につながることを期待して、今後の研究を進めてゆきたいと考えています。

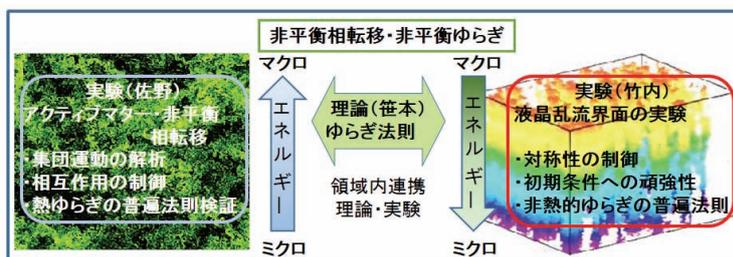


図 1: 計画研究 A01-001 の全体像と各メンバーのテーマの関連性

佐野雅己 (東京大学・理学系研究科・教授)
 笹本智弘 (千葉大学・理学研究科・准教授)
 竹内一将 (東京大学・理学系研究科・助教)

ガラスにおける遅いゆらぎのダイナミクスと隠れた秩序

A01 基礎班 宮崎州正、吉野元

私たちの研究のテーマは、ガラス転移とジャミング転移です。ガラス転移とは、液体やコロイド分散系のような熱揺らぎが支配的な系で、温度を急に下げたり、圧力を急に上げたときに、分子運動が突然アモルファス状（ランダム）に凍結する現象です。一方、ジャミング転移とは、砂や泡、エマルジョンのような熱揺らぎが無視できるくらい大きな粒子が、突然アモルファス状に凍結する現象です。ガラスとジャミングの二つの転移はともに、普段の生活で毎日のように目にするありふれた現象です。ではこの二つの転移の違いは为什么呢。素朴に考えればガラス転移の温度ゼロの極限がジャミング転移である、となりそうですが実際はそれほど単純ではありません。この二つの現象を統一的に理解することは、現代の物性物理学の最も大きな目標のひとつであり、多くの研究者を悩ませている最も難しい問題の一つなのです。そもそも、物質は高密度や低温になるとなぜ流れなくなるのでしょうか。自由に流れる状態と、流れなくなった状態を分け隔てる決定的な違いは何でしょうか。普通の結晶であれば答えは簡単です。結晶秩序、即ち規則性の有無です。ランダムであれば流れるし、規則正しく並んでいけば流れないのです。では、ガラスやジャミングの場合はどうでしょう。固まっている状態なのに、粒子配置はランダムで、液体状態とまったく区別が付きません。しかし、それはあくまでも我々人類の目が節穴だからかもしれません。本当は、ガラスやジャミング状態をよくよく見れば、「ランダムな秩序」ともいべき人類が未だ知らない規則性が隠れているのかもしれない。だとすると、マイクロなランダムさがどのようにマクロな固体らしさ（あるいは液体らしさ）に結びつくのでしょうか。ひょっとすると、ガラス・ジャミングに秩序の発達など本当は存在せず、我々が見ているのは「転移」ではなく、単に運動が徐々に遅くなっている様子にすぎない、という可能性だって排除できません。我々は、この素朴な疑問に答えるために、マイクロとマクロの中間のメソスケールの揺らぎが示す階層構造に注目し、シミュレーションや理論解析を用いて研究をしていきます。分子や粒子一つ一つのマイクロな個性が、流れる（あるいは流れない）というマクロな現象にたどりつくには、マイクロからマクロへと昇る段階の途中で何が起きているのかを理解することが非常に重要です。そこで我々が目にするのは、まるでロシアの人形マトリョーシカのように、階段をひとつ上がるごとに、ひとつの物理法則がまた別の物理法則へと姿を変えている世界です。この階層性こそ、ガラス・ジャミング転移の理解に本質的な役割を果たしているに違いないのです。

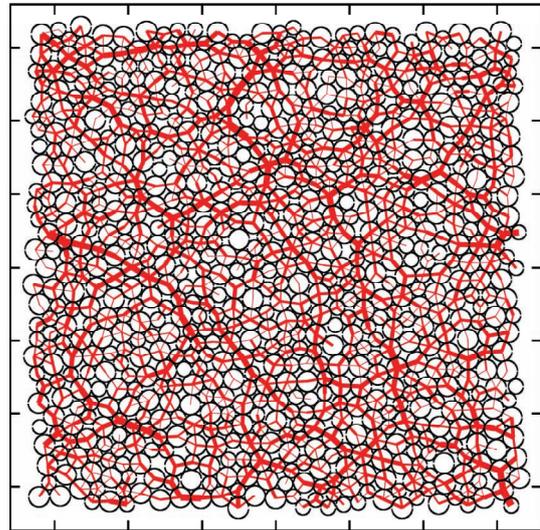


図 1: エマルジョンのジャミング状態における粒子配置と応力パターン(数値シミュレーション): 赤線の太さは粒子間に働く力の大きさを表わしている。

宮崎州正 (名古屋大学・大学院理学研究科・教授)

吉野元 (大阪大学・大学院理学研究科・助教)

非平衡定常状態におけるソフトマターのゆらぎとレオロジー

A02 時空班 折原宏、長屋智之、中垣俊之、日高芳樹

多自由度および連続系における非平衡ゆらぎと構造形成を研究対象とする。具体的には、コロイドの多粒子系に加えて、一様な流体ではあるが、異方性を持ち、ダイレクターが揺らぐ液晶、さらにはアクチン溶液を始めとする生体物質などのソフトマターをターゲットとする。これらに主に定常せん断を印加することにより非平衡定常状態を実現する。ソフトマターは文字通り柔らかく、ゆらぎおよび外力に対する応答を測定するには格好の材料であり、その結果はレオロジー特性を理解するのに有用である。しかし、非平衡ソフトマターの測定には既存の装置で対応できないことが多い。そこで、本研究では、非平衡定常系におけるソフトマターのゆらぎおよび応答関数の測定手法を開発し、それを用いて非平衡定常ゆらぎの個別性と普遍性を解明する。

定常せん断流下でネマチック液晶に交流電場を印加し、応力の線形応答を測定すると、図1に示すような平衡系とは異なる応答関数が観測されることが見出され、それがせん断流から生じる非保存力を起源とすることが明らかになっている¹⁾。応答関数は平衡系においては、揺動散逸定理によりゆらぎ（今の場合、液晶分子の配向ゆらぎ）と関係づけられるが、非平衡定常系においては修正が必要となる。本研究課題ではせん断流下の動的光散乱測定等により液晶の配向ゆらぎの相関関数を求め、応答関数との関係を調べる。

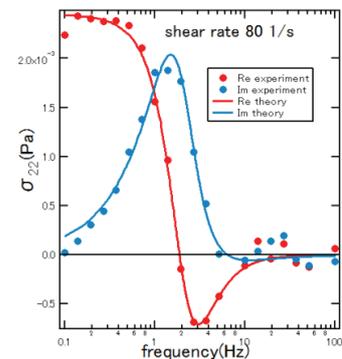


図1：液晶の応力応答。

液晶は電場を印加するだけでも電気対流と呼ばれる散逸構造を示す。液晶電気対流の研究は古くから行われているが、レオロジーとの関係に注目するとともに、ゆらぎの定理を検証するためのモデル系と位置づけ、新しい切り口での研究を展開する。

流体に微粒子を分散させ、その運動を観測することにより、流体の粘弾性を調べるマイクロレオロジーが近年使われるようになったが、この手法はほとんどが静止流体に限定される。ここでは定常せん断流下でシアシニングを起こすような非ニュートン流体にマイクロレオロジーを適用し、非平衡ゆらぎと応力応答の関係を調べる。予備的な実験によれば、シアシニングするキサントガムでは、せん断を印加すると過度ベクトル方向の拡散定数が増大することが分かっており、多粒子系のせん断流下の自己拡散との類似性が示唆されている。

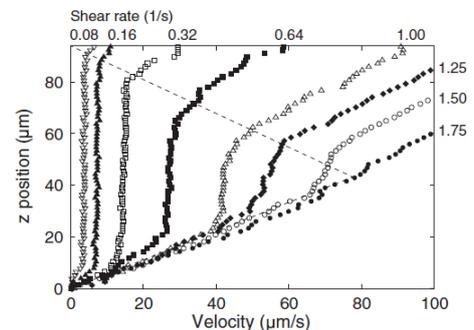


図2：速度勾配方向 z への流速の依存性。せん断流下で相分離が起こり、せん断速度が高くなると低せん断領域が縮小する。

最近、我々はネットワーク構造を持つアクチン水溶液にせん断を印加すると、図2に示すような相分離（シアバンディングと呼ばれる）を起こすことを生体物質で初めて見出した²⁾。この相分離は $1s^{-1}$ 以下の小さなせん断速度により誘起される。アメーバの仮足の運動により生じるせん断速度もこの程度であるから、この結果はせん断誘起相分離が生物機能と強く関係することを示唆している。本課題では、この相分離の機構を非平衡物理学に基づいて解明することを目的とする。

(参考文献)

- 1) H. Orihara, F. Yang, Y. Takigami, Y. Takikawa, and Y. H. Na, Phys. Rev. E **86**, 041701 (2012).
- 2) I. Kunita, K. Sato, Y. Tanaka, Y. Takikwa, H. Orihara, T. Nakagaki, Phys. Rev. Lett. **109**, 248303 (2012).

折原 宏（北海道大学・工学研究院・教授）

長屋 智之（大分大学・工学部・教授）

中垣 俊之（北海道大学・電子科学研究所・教授）

日高 芳樹（九州大学・工学研究院・助教）

多成分ボース・アインシュタイン凝縮体の非平衡ダイナミクス

A02 時空班 平野琢也、斎藤弘樹、高橋雅裕、衛藤雄二郎

中性原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)は、 10^6 個程度というアボガドロ数に比べると圧倒的に少ない数の原子を $10^4 \mu\text{m}^3$ 程度の比較的マクロな体積中に閉じ込め、100 nK程度という極低温に冷却したメソスケールの量子系である。この系の特徴は温度や外力そして原子間相互作用さえも高精度かつダイナミックに制御できるという点であり、さらにそのダイナミクスを光学的なイメージングにより実時間観測することができる。また、グロス・ピタエフスキー方程式によって予言される理論を、実験と定量的に比較することによって、量子渦のようなトポロジカル欠陥と非平衡構造の関わりについての詳細な知見を得ることが期待される。

本研究の目的は、多成分量子凝縮体を非平衡系として捉え、そこに現れる非平衡構造（密度分布、スピントクスチャー）の時間発展とゆらぎを実時間で観測し、秩序形成についての物理的理解を深めることである。理論と実験の密接な協力体制で研究を進め、領域内の他の研究班とも連携することで普遍的な現象の解明を目指す。

多成分 BEC に現れる非平衡構造として我々が以前から注目しているものに、2成分 BEC の不安定な界面のダイナミクスがある。図1に、超微細単位の異なる2成分 BEC が相分離した様子を観測した結果を示す(Phys. Rev. A **82**, 033609 (2010).)。図の上側は全角運動量 $F=2$ の原子の空間分布、下側は $F=1$ の原子の空間分布であり、 $F=2$ の原子が中心部に分布し、 $F=1$ の原子が外側に分布しており、2成分が相分離していることが分かる。この図は磁場が 10.05 ガウスの時の実験結果であり、磁場をフェッシュバッハ共鳴をおこす 9.1 ガウス近辺で変化させると、相分離の様子は大きく変化した。このことは、フェッシュバッハ共鳴により2成分間の相互作用をコントロールすることにより、界面の非平衡構造が制御可能であることを示している。

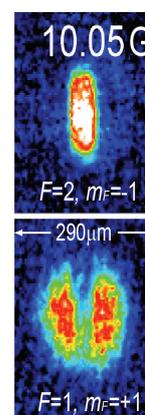


図1:2成分 BEC の相分離

研究分担者の斎藤らは、相分離した2成分 BEC 界面の非平衡ダイナミクスをグロス・ピタエフスキー方程式に基づく数値シミュレーションによって明らかにしてきた。図2は平坦な界面の状態から不安定性によって生じたパターンを可視化したものであり、界面ゆらぎが増幅されて構造が形成されたことを示している。さらに最近、非平衡超流動体において散逸構造が形成されることが明らかになっており(Phys. Rev. Lett. **110**, 026401 (2013).)、BEC における非平衡物理を開拓する機が熟してきたと言える。

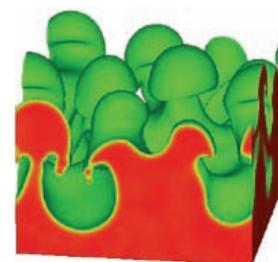


図2:2成分 BEC の界面パターン

冷却原子系を非平衡科学の研究対象として捉えたとき、冷却原子系は制御性が良く、周りの環境や不純物の影響の少ない理想的な量子系であること、空間的な構造を可視化して直接観測することが容易であり、さらに非破壊的な観測を行うことで同一のサンプルの時間発展を追うことも可能であるなど多くの利点を有しており、非平衡科学の新しい展開が期待される。

一方で、量子縮退した原子集団を対象とした非平衡科学は従来殆ど行われていないため、一般的な非平衡法則を見出すために量子縮退原子をどのように制御し、どのような観測量に着目すれば良いのかについて、十分な知見が得られているとは言えない。本領域が発足したことにより、今後は領域内の研究者との情報交換や議論を行い、制御性の良い量子系における非平衡科学の創造に貢献できるよう努めていきたい。

平野 琢也 (学習院大学・理学部・教授)

斎藤 弘樹 (電気通信大学・情報理工学研究所・准教授)

高橋 雅裕 (学習院大学・理学部・助教)

衛藤 雄二郎 (学習院大学・理学部・助教)

小さな反応拡散系における秩序形成から生物の機能へ

A02 時空班 櫻井建成、北畑裕之、澤井哲、石原秀至

平衡から非常に遠い系では、反応と拡散が結合することで駆動される時空間ダイナミクスが最も顕著となって現れる（例えば、図1左に示すBelousov-Zhabotinsky (BZ) 反応のラセン状パターン）。元来の研究は、マクロで一様な系についての現象論的な理解に限定されていた。一方、空間サイズが小さい系や、アクティブマターと結合した系は、ミクロな熱・分子ゆらぎの影響を受けやすく、このような系の理解はほとんど未開拓である。また、膜変形や移動をとまなう細胞運動等の生命現象（例えば、図1右に

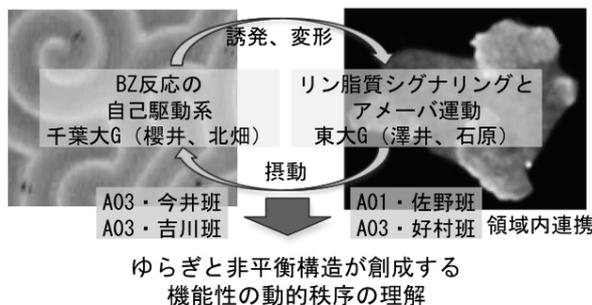


図1: 反応拡散場とアクティブマターの結合系

示す細胞性粘菌の運動)の物理学的理解にとっても必要不可欠な視点である。本研究班では、変形を伴う微小空間における反応拡散系の秩序形成を対象に、ミクロとマクロの接点に特徴的に現れる振る舞いを理解し、動的な生命現象の物理的解明につながる基礎分野の創成を目的とする。

さて本研究班では、図1に示すように千葉大学Gと東京大学Gの4名が密接に連携し、反応拡散系とアクティブマターの結合系という新しい枠組みとその普遍的な性質について、生体と非生体物質の両方から迫る試みを行う。実験系を巧みにデザインし、細胞ダイナミクスの背後にある物理的な対応を常に意識しつつ理論を発展させることを基本とする。ここでは、反応拡散波によって駆動されているアメーバ細胞を模した化学反応系として、BZ反応液滴をベースとする新奇の実験系を構築する(櫻井、北畑)。具体的には、光フィードバックシステムを用いて制御しやすい単純化した実験系をデザインし、BZ液滴運動の制御を行う。更には光照射を利用した外部摂動による液滴の挙動を明らかにする。並行して、アメーバ細胞のリン脂質シグナリングのin vitro再構成系を構築し(澤井)、実際のアメーバ内の非自明動態との比較検証と理論的考察(石原)を行い、変形しながら運動する系の普遍的な性質を明らかにする。具体的には、粘菌の細胞膜から抽出した脂質でガラス基板上に二重膜を形成し、この上に細胞抽出液を加えることで再構成系の構築を試みる。また、アメーバ細胞内で観察されている非自明動態として、チューリングパターン様の定在波や、波の分裂パターンなどにも注目する。更に、系の振る舞いを抽象化し、本質を抜き出した少数自由度モデル(縮約方程式)を構築する。特に、化学反応波の役割として、細胞の方向対称性を破る(極性を作る)ことが本質的であることから、抽象的に「極性子」を導入し、対称性を考慮した方程式をたてる。微小空間BZ反応における変形や運動、細胞の多様な運動形態を、理論的な立場から予測・分類することを目指す。上記実現には、研究代表者と研究分担者らとの共同研究体制が不可欠であり、また理論班を含めた他班との密接な協調関係による強固な連携体制を確立するとともに、海外を含めた共同研究の体制も確立していく予定である。

櫻井 建成 (千葉大学・大学院理学研究科・准教授)
 北畑 裕之 (千葉大学・大学院理学研究科・准教授)
 澤井 哲 (東京大学・大学院総合文化研究科・准教授)
 石原 秀至 (東京大学・大学院総合文化研究科・助教)

ソフトマターから人工細胞への物理的アプローチ

A03 機能班 今井正幸、菅原正、豊田太郎、佐久間由香

物質から生命がどのように生まれたのかを解明することは、物性物理の最も根源的な挑戦の一つである。この問題に対して、基本的な分子群を用いて生命として最低限の機能を有する細胞を人工的に合成し、それを通じて生命の本質に迫ろうというアプローチがある。本研究では、細胞の持つ生命機能の中でも、1) 外部から原料を取り込み、自らの構成単位を合成する代謝経路、2) 自らを形作る膜状構造体の自己生産、3) 代謝や自己生産の情報を次世代に伝える情報分子、4) 自らの生存に適した環境へと移動する自己駆動、を最も基本的な特性として捉え、これら機能の人工的な再現とその機構の解明を目指して研究を進める。

既に、我々のグループでは菅原らにより、遺伝情報分子モデルとしてのDNAが自己複製しながら、それを取り囲む細胞膜モデルとしての球殻状の膜構造体（ベシクル）の自己生産する系の創成に成功している[K. Kurihara et al., *Nature Chemistry* (2011)]（下図）。この系の最大の特徴は、ベシクルの自己生産と遺伝情報分子の自己複製が独立な事象ではなく、遺伝情報分子の存在により自己生産速度が飛躍的に増大するなど、両者が密接に連携している点である。そこで、本研究では遺伝情報分子が膜構造と連携して酵素的な作用をすることにより、多様な自己生産ダイナミクスを発現させる機構を解明する。この目的のために、膜分子と情報分子の相互作用を立体的に変調させ、それによる新たに発現する自己生産ダイナミクスを系統的に調べることにより、多様性と淘汰性をもつ進化する分子集合体の創成を目指す。一方で、このような代謝系と連動した自己生産過程の物理を明らかにするために、膜形状変化過程の3次元計測を行い、膜弾性エネルギーモデルによりその自由エネルギーランドスケープ中でのパスウェイを明らかにし、情報分子と膜分子の協同現象がもたらす自己生産機構を解明する。

また、そのような分子集合体が環境に適応して生存するためには、外部からの化学刺激に応じて、自らを駆動させる特性も重要である。本研究では、外部からの化学刺激に応じて分子集合体が形態を変化させ波状変形運動・自己解離しながら自己駆動する現象を通して、生命系が獲得した自己駆動系の糸口とその物理機構の解明を進める。

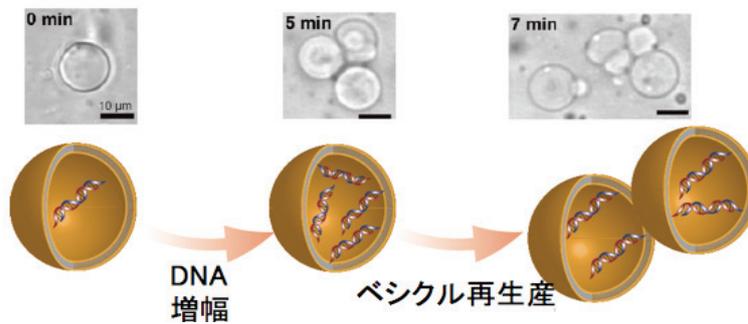


図1：DNAを自己複製しながら増殖するベシクルのスナップショットとその概念図

今井 正幸（東北大学・理学研究科・教授）

菅原 正（神奈川大学・理学部・教授）

豊田 太郎（東京大学・総合文化研究科・准教授）

佐久間 由香（東北大学・理学研究科・助教）

生体膜におけるメソ構造の非平衡ダイナミクス

A03 機能班 好村滋行、野口博司、芝隼人

一つ一つの細胞は生体膜に包まれることによって細胞としての独立性を確保し、さらに多数の細胞が機能的に集合して生命体を構築しています。したがって、生体膜の構造と機能を科学的に解明することは、生命現象の理解にとって不可欠な要素の一つです。典型的な生体膜の主な構成成分は脂質であり、水環境下で二重膜を構成しています。1972年にSingerとNicolsonが「流動モザイクモデル」を提唱して以来、タンパク質は脂質二重膜の「海」の中を浮遊し、ブラウン運動によって移動していると考えられてきました。

近年、伝統的な生体膜の描像が大きく変わりつつあります。一般に、生体膜は数十種類の脂質で構成されており、多数のステロールなども含まれています。1997年にSimonsとIkonenによって提唱された「ラフト仮説」によると、多くの成分は生体膜内で均一には分布しておらず、特定の脂質が集まった動的ドメインが特定のタンパク質を取り込み、シグナル伝達などの役割を果たしています。このような生体膜の新しい描像に触発されて、飽和脂質／不飽和脂質／コレステロールの三成分からなる人工膜の物理化学的な研究が、2000年以降に世界中で爆発的に進展しました。人工膜の温度を下げると、脂質の炭化水素鎖の秩序度が高い秩序液体相と、その秩序度が低い無秩序液体相に相分離することが確認され、その結果生じるドメイン構造がラフト仮説の動的ドメインと関連しているのではないかと考えられました。このような研究の流れを背景にして、生体膜におけるドメインの生成機構や動力学、さらにドメイン形成と生体膜の形態の関連性を解明することは、ラフト仮説の最重要課題となっています。特に非平衡状態にある生体膜では、ゆらぎによって駆動される内部自由度と外部自由度の動的な連動性が本質的な役割を担っています。我々は理論とシミュレーションを駆使して、多成分生体膜の相分離現象やゆらぎを媒介とした非平衡ダイナミクスを探求し、最終的にはそのメソ構造形成を制御することを目的としています。特に生体膜が多成分系であることに着目して、相分離や流体力学的効果、ブラウン運動という純粋に物理的な現象のみで、どれだけ実在する生体膜に肉迫できるかを理論的に見極めようとしています。具体的には以下に述べる三つの課題に取り組む予定です。

第一の目的は、流体力学的相互作用が働く多成分生体膜系のダイナミクスを厳密に探索することです。我々は生体膜やバルク溶媒の粘弾性効果、脂質二重膜間の結合効果、生体膜の曲率効果などの問題を考察して、多成分生体膜における構造形成や不均一性のダイナミクスに関する研究を行う予定です。第二の目的は、相分離を起こす生体膜や非平衡条件下のベシクルの様々な形態転移のダイナミクスを、計算機シミュレーションによって解明することです。例えば、流動場における多成分の脂質分子の自己集合、構造形成のシミュレーションを行いません。また、化学反応と相分離が連動する多成分ベシクルのシミュレーションも行い、化学反応にともなう動的な膜物性の変化が本質的な役割を果たす非平衡構造の形成機構の解明を目指します。第三の目的は、タンパク質の存在や外場などの非平衡条件下にあるアクティブな生体膜における、ブラウン運動や異常拡散の問題を理解することです。生体膜は周囲の溶媒と結合しているため、生体膜に埋め込まれた物体の二次元的な運動を観察することによって、三次元溶媒の粘弾性の情報を得ることも可能であり、新しいマイクロレオロジーの手法の提案につながることを期待されます。

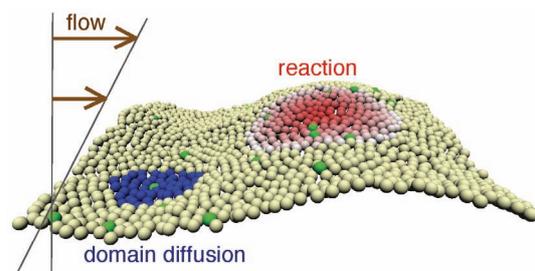


図 1: 流動や化学反応などの非平衡現象をともなう多成分生体膜。

好村 滋行 (首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授)

野口 博司 (東京大学・物性研究所・准教授)

芝 隼人 (東京大学・物性研究所・助教)

非熱的に駆動されたバイオマターの非平衡動力学

A03 機能班 木村康之、水野大介

生き物の最小単位である細胞の自律運動やその他の機能は熱的・非熱的に駆動された柔らかいバイオマター（生体物質）が担っており、このために生命現象は非線形・非平衡な力学過程を伴う。その動作原理を支配する普遍的な法則を究明することにより、生命現象の本質的理解を深めることは現代科学の重要な使命の一つである。例えば、細胞の力学的性質にしても、従来考えられてきたような単純に細胞骨格の平衡物性から直接推測することは困難であり、非平衡環境下におけるゆらぎと構造の協奏が細胞の機能発現に本質的な役割を果たしていると考えられる。

A03-003 班ではバイオマターの複合体が織りなす非線形・非平衡系の動力学を究明するための有効な手段として、メソスケールのゆらぎと力学応答を同時に観測する技法である active/passive（能動的/受動的）マイクロレオロジー（MR）法の開発を進めている。当該技法は、例えば「揺動散逸定理の破れ」として試料の非平衡度を定量検出することが可能な点など、非平衡系における力学物性を研究する上で、他にない特徴を有している。本研究課題では新しい active/passive MR 法の開発、ならびに active/passive MR を様々な非熱的場（例えば、細胞内で自発的に生成される力場など）により駆動されたバイオマターに適用して、メソスケールでの揺らぎと力学的性質に関する実験的研究を行うことを計画している。ことにバイオマターの複合体である細胞の力学的物性に焦点を当てつつ、細胞モデルと培養細胞の両者を用いて研究を遂行する。具体的には、多体相互作用が存在する非平衡系での揺らぎのダイナミクス、および非熱的に駆動されたガラス状物質としての細胞内部環境の非平衡ダイナミクスの実験的研究を行い、これを記述する非平衡物理を確立するための知見を与えることを目指す。

木村は、光ピンセット等で発生させた局所力学場や局所熱場のもとで非平衡物質系のメソスケールでの応答とゆらぎの実験的研究を行う。細胞内物質輸送の理解を目指し、流体力学相互作用などの多体相互作用が存在する系および乱流などの非平衡場中でのダイナミクス測定を進める。この際、多粒子をプローブとした active MR、passive MR 測定システムを新たに構築することで、空間的なダイナミクスの相関や物質移動、メソスケールでの空間構造の同時観測を実現する。

水野は、非熱的に駆動されたガラス状物質としての細胞内部環境の理解を目指す。この際、コロイドガラスや細胞骨格からなる複合試料を自発的な力生成体（モーターたんぱく質、微生物）で駆動することで、非平衡な細胞内部環境のモデルシステムを調整する。この細胞モデルの非平衡度（揺らぎ）と力学的性質は、光ピンセットやレオメータを用いて印加した力学外場に強く依存して変化する。これを系統的に観測することで、細胞内部環境の力学を支配する非平衡・非線形なメカニズムの理解を深める。

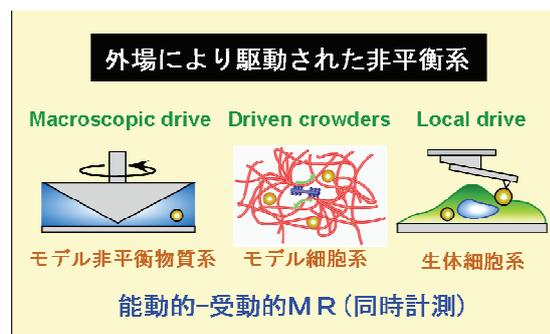


図 1: 外場により駆動された非平衡バイオマター。

木村 康之（九州大学・大学院理学研究院・教授）

水野 大介（九州大学・大学院理学研究院・准教授）

時空間秩序の生成とその生命現象への展開

A03 機能班 吉川研一、市川正敏、鶴山竜昭

我々のチームは、生命を散逸系における動的現象として捉える事を通じて、生命システム的设计原理の究明を目指しています。特に、実空間上に単純な実験モデルを構築し、それを通じて生命現象が示す時空間の自己組織化の本質に迫るとい研究スタイルをとります。非平衡物理学や非線形科学の近年の発展に立脚し、縮約した数理モデルを取り上げ、実際の生命現象や実空間のモデルと対比しながら、研究を统一的に進め、生命体の時空間自己組織化の根源を捉えてゆきます。

生命現象本質を現実に即して捉えるために、「分子レベル、細胞レベル、マクロスケール」の3つの特徴的な階層に着目し、階層間の連関を実験・理論・計算機シミュレーションを統合した方法論で追究します。これらの方法論を貫く物理学的な思想として、ゆらぎと構造に対応した開放系でのゆらぎの不安定化とモード分岐、対称性の破れがひきおこす時空間秩序、などを特徴とした研究を行っています。

ここで、本領域における我々の一つ目の成果を紹介したいと思います。図1は、対面電極針の間に位置するマイクロ水滴の運動の実験です。電極は直流電圧が掛けられており、電極接触時の荷電反転により、反対側の電極へと飛ばされるという往復運動を見せます。我々はこれまで、この往復運動の発見 [PRE 74, 046301 (2006)] から、2次元的に電極を配置した際の回転運動 [APL 96, 104105 (2010)] を報告してきましたが、今回、系をより微小にして電圧を下げた実験系を作る事に成功しました [PRE 88, 042918 (2013)]。

ここまでですと単なる微細化ですが、我々はここで面白い発見をしました。系を微細化しても電圧を応じて下げれば、電場の効果は同様に設定することが可能です、しかし、誘電の寄与は相対的に大きくなってきます。静電と誘電の両方の効果を考慮する事で、この水滴運動の系がリミットサイクルと呼べる系である事が明らかになりました。低次の対称性を考慮した水滴の運動方程式を立て、安定状態から振動状態への分岐を線形安定性解析すると、ホップ分岐の線が $V \sim L^{2/3}$ という、非自明なスケール則を取る事が導けます (V電圧、L電極間距離)。このスケール則を実験と比較すると、過去の結果も含めて良好な対応があることが分かりました。

さらに、この系にホワイトノイズを入れた実験結果が図1右下の時空間プロットです。閾値電圧以下の条件にもかかわらず、電圧にホワイトノイズ(1Vpp)を印加すると、非常に安定な振動が開始・維持されました。まさに、本領域名称に示されているような、「ゆらぎ」によって時空間の「構造」が誘起されているとも言えます。この現象を調べてみると、確率共鳴の仲間として **coherent resonance** と呼ばれている現象に相当する様です。現時点では数十 μm スケールですが、サブ μm までの微細化に原理的な困難は無いと思えます。そこまでゆくと、電圧ノイズとは別に、熱揺らぎの効果が顕著になります。熱揺らぎの下で、スムーズな運動をすることのできるマイクロモーターとして働く可能性が高いと考えています。実際の生物の分子モーターと比較するには、まだ初歩的ではありますが、今後の研究の発展が大いに期待されます。

この様に、シンプルな物質系にも関わらず、その本質が生命現象へとつながるような実験系、我々が呼ぶところの実空間モデル、を駆使して、本領域の研究を推進していきたいと考えています。

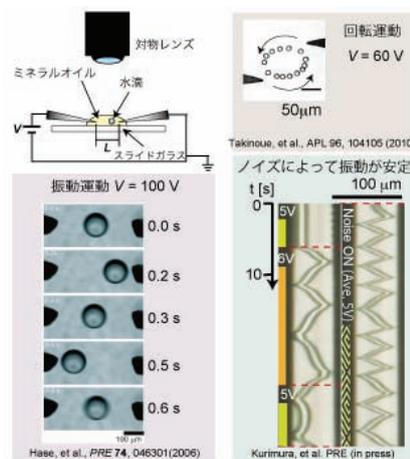


図1: 電極針間の油中水滴の往復運動。

吉川 研一 (同志社大学・生命医科学部・教授)

鶴山 竜昭 (京都大学・医学研究科・准教授)

市川 正敏 (京都大学・理学研究科・講師)

キックオフミーティングが開催されました！

ニュースレター編集委員 竹内一将

5年間に渡る本新学術領域の前途を期して、9月12日に東京大学にてキックオフミーティングが開催されました。会場となったのは、赤門のほど近くに昨年オープンしたばかりの伊藤国際学術研究センターというレンガ調の建物で、新たな学問領域を切り拓くべく発足した本新学術領域にとって象徴的な場所であったように思います。会には領域メンバーを中心に27名が参加されました。

キックオフミーティングは、佐野領域代表の領域趣旨説明から始まり、その後は各計画研究班による研究内容紹介が行われました。各班の講演内容は、それぞれの研究背景から今後の展望まで、最新の成果を交えて行われたものも多く、学問的に大変刺激的な内容となりました。また、全ての計画研究班の講演がなされたことで、本領域の特長である研究テーマの幅広さ、そして、それらを縦横に繋ぐ「非平衡ゆらぎ」や「自己組織構造」の理解の重要性が再認識されたことも印象的でした。こうした盛り上がりは、各講演後の活発な質疑応答と、休み時間にも散見した熱心な議論の様子からも感じられ、本新学術領域の今後の発展を予感させるものであったと言えるでしょう。

キックオフミーティング・各計画研究紹介プログラム

- A01-001：佐々グループ 中川尚子 「非平衡ゆらぎの熱力学体系」
- A01-002：小林グループ 小林研介 「非平衡量子系の輸送ダイナミクス」
- A01-003：佐野グループ 竹内一将 「非平衡ゆらぎが生み出す構造と運動の普遍性」
- A01-004：宮崎グループ 宮崎州正 「ガラスの非線形レオロジーと隠れた秩序構造」
- A02-001：折原グループ 折原宏 「非平衡定常状態におけるソフトマターのゆらぎとレオロジー」
- A02-002：平野グループ 平野琢也 「多成分ボース・アインシュタイン凝縮体の非平衡ダイナミクス」
- A02-003：櫻井グループ 櫻井建成 「小さな反応拡散系における秩序形成から生物の機能へ」
- A03-001：今井グループ 今井正幸 「ソフトマターから人工細胞への物理的アプローチ」
- A03-002：好村グループ 野口博司 「生体膜におけるメソ構造の非平衡ダイナミクス」
- A03-003：木村グループ 水野大介 「非熱的に駆動されたバイオマターの非平衡動力学」
- A03-004：吉川グループ 吉川研一 「時空間秩序の生成とその生命現象への展開」



キックオフミーティングの様子（9月12日、伊藤国際学術研究センター、3階特別会議室にて）

第7回 物性科学領域横断研究会 (領域合同研究会)が開催されました！

A03 機能班 芝 隼人

物性科学に関連した6つの新学術領域研究「ゆらぎと構造」、「分子アーキテクトニクス」、「トポロジカル量子現象」、「超低速ミュオン」、「原子層科学」、「コンピューティクス」が合同で研究会を開催しました。本研究会は、ミドルスケールの科学という共通点を持った物性分野の複数の新学術領域研究が合同で討論を行うものであり、我々の「ゆらぎと構造」は今年度からの参加となりました。口頭講演は各新学術領域から3名ずつ行っており、「ゆらぎと構造」からは佐野雅己、小林研介、水野大介が講演しました。ポスター発表も70件あり、広く学際的なテーマの講演が行われていました。

また毎年、顕著な功績のあった若手を顕彰するために創設された「凝縮系科学賞」の授与式も行われております。本年は実験部門でスピンゼーバック効果とスピンの熱流の研究をされている内田健一氏、理論部門でディラック電子系の量子輸送現象を研究されている伏屋雄紀氏が授賞、記念講演が行われました。来年度以降も開催される予定ですが、領域のアクティビティのアピールのためにも、本領域からも一層の参加をお願い申し上げます。



第7回物性科学領域横断研究会の様子。(12月1日、2日、東京大学武田先端知ビルにて)

今後の予定

2013年12月25日(水)～27日(金) 第1回領域研究会 (KKR 熱海ホテル)

2014年2月15日(土) 第1回公開シンポジウム

「非平衡物理学への挑戦 ―物理から生命への架け橋―

(東京大学本郷キャンパス 小柴ホール)

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