

領域略称名：ゆらぎと構造 領域番号：2502

平成27年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「(研究領域名) ゆらぎと構造の協奏：非平衡系における
普遍法則の確立」

(領域設定期間)

平成25年度～平成29年度

平成27年6月

領域代表者 (東京大学・大学院理学系研究科・教授・佐野 雅己)

目 次

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	6
2. 研究の進展状況	8
3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況	12
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	14
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	17
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	23
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	26
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	27
9. 総括班評価者による評価	28
10. 今後の研究領域の推進方策	30

研究組織

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00	25103001 総括班	平成 25 年度 ～ 平成 29 年度	佐野 雅己	東京大学・大学院理学系研究科・教授	13
A01 計	25103002 非平衡ゆらぎの熱力学的体系	平成 25 年度 ～ 平成 29 年度	佐々 真一	京都大学・大学院理学研究科・教授	2
A01 計	25103003 非平衡量子系の輸送ダイナミクス	平成 25 年度 ～ 平成 29 年度	小林 研介	大阪大学・大学院理学研究科・教授	3
A01 計	25103004 非平衡ゆらぎが生み出す構造と運動の普遍性	平成 25 年度 ～ 平成 29 年度	佐野 雅己	東京大学・大学院理学系研究科・教授	3
A01 計	25103005 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	平成 25 年度 ～ 平成 29 年度	宮崎 州正	名古屋大学・大学院理学研究科・教授	2
A02 計	25103006 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	平成 25 年度 ～ 平成 29 年度	折原 宏	北海道大学・大学院工学研究院・教授	4
A02 計	25103007 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	平成 25 年度 ～ 平成 29 年度	平野 琢也	学習院大学・理学部・教授	4
A02 計	25103008 小さな反応拡散系における秩序形成から生物の機能へ	平成 25 年度 ～ 平成 29 年度	櫻井 建成	千葉大学・大学院理学研究科・准教授	4
A03 計	25103009 ソフトマターから人工細胞への物理的アプローチ	平成 25 年度 ～ 平成 29 年度	今井 正幸	東北大学・大学院理学研究科・教授	4
A03 計	25103010 生体膜におけるメソ構造の非平衡ダイナミクス	平成 25 年度 ～ 平成 29 年度	好村 滋行	首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授	3
A03 計	25103011 非熱的に駆動されたバイオマターの非平衡動力学	平成 25 年度 ～ 平成 29 年度	木村 康之	九州大学・大学院理学研究院・教授	2
A03 計	25103012 時空間秩序の生成とその生命現象への展開	平成 25 年度 ～ 平成 29 年度	吉川 研一	同志社大学・生命医科学部・教授	3

計画研究 計 12 件

A01 公	26103505 運動方向への有色ノイズによって起こるアクティブマターの群れ運動	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	永井 健	北陸先端科学技術大学院大学・ マテリアルサイエンス研究科・ 助教	2
A01 公	26103506 地震および破壊の統計における新しい定量的関係式	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	波多野 恭弘	東京大学・地震研究所・准教授	2
A01 公	26103508 量子ホール接合系における分数電荷準粒子の生成・消滅過程の研究	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	橋坂 昌幸	東京工業大学・大学院理工学研究科・ 助教	1
A01 公	26103515 移動する原子供給源による特異なステップパターン	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	佐藤 正英	金沢大学・総合メディア基盤センター・教授	3
A01 公	26103517 ゲージ・重力対応を用いた非平衡定常系の基本法則の探求	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	中村 真	中央大学・理工学部・教授	1
A01 公	26103529 ソレー係数測定による温度勾配を外場とするソフトマテリアルの非平衡物性解析	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	喜多 理王	東海大学・理学部・教授	1
A02 公	26103504 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	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	齋藤 一弥	筑波大学・数理物質系・教授	3
A02 公	26103509 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	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	上妻 幹旺	東京工業大学・大学院理工学研究科・ 教授	2
A02 公	26103510 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	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	中尾 裕也	東京工業大学・大学院情報理工学研究科・准教授	1
A02 公	26103514 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	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	工藤 和恵	お茶の水女子大学・大学院人間文化 創成科学研究科・准教授	2

A02 公	26103519 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	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	小林 未知数	京都大学・大学院理学研究科・助教	1
A03 公	26103501 プローブ顕微鏡による細胞間力学的相互作用の時空間揺らぎの研究	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	岡嶋 孝治	北海道大学・大学院情報科学研究科・教授	2
A03 公	26103502 低レイノルズ数における自己駆動素子の流体効果による集団運動	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	内田 就也	東北大学・大学院理学研究科・助教	1
A03 公	26103503 アクティブマターの集団運動としての細胞組織の記述	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	義永 那津人	東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・助教	1
A03 公	26103511 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	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	車 兪徹	東京工業大学・地球生命研究所・研究員	1
A03 公	26103516 複合化ベシクルによる非平衡細胞モデル系	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	濱田 勉	北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・准教授	1
A03 公	26103521 胃癌細胞の非平衡形状ゆらぎのもたらす時空間秩序と転移の相関	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	田中 求	京都大学・物質－細胞統合システム拠点・教授	2
A03 公	26103524 遊走細胞のかたちを決める分子ダイナミクス	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	岩楯 好昭	山口大学・大学院医学系研究科・准教授	2
A03 公	26103527 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	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	西坂 崇之	学習院大学・理学部・教授	3
A03 公	26103528 F1-ATPase によるエネルギー変換と非平衡揺らぎ	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	宗行 英朗	中央大学・理工学部・教授	1
A04 公	26103507 ガラス化における揺らぎの相関構造の発現メカニズムとその輸送異常に果たす役割の解明	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	古川 亮	東京大学・生産技術研究所・助教	1

A04 公	26103513 電荷揺らぎ分光イメージング法の創出:固体中揺らぎ空間分布構造の探求	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	河野 行雄	東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス研究センター・准教授	1
A04 公	26103522 直接数値計算を用いたモデル微生物の動的性質に関する理学的研究	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	山本 量一	京都大学・大学院工学研究科・教授	3
A04 公	26103525 負の相関に起因する異常拡散現象とその周辺	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	坂上 貴洋	九州大学・大学院理学研究院・助教	3
A04 公	26103526 ゆらぎと構造の協奏」から見た量子乱流	平成 26 年度 ～ 平成 27 年度	坪田 誠	大阪市立大学・大学院理学研究科・教授	1
公募研究 計 25 件					

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要（2ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

① 非平衡科学の重要性と本領域の目的

物質の平衡状態の研究は熱統計力学という確立した方法論に立脚しているのに対して、非平衡状態を扱う科学は、まだ発展段階にある。非平衡系を記述する一般的な法則を見だし、それをもとに、自然現象を理解・制御することは現代科学の大きな未解決課題である。

本領域の目的は、これまで独立に進められてきた「非平衡ゆらぎ」と「時空間構造」という非平衡科学の二つの大きな流れを、それぞれメソスケールの領域にまで押し進めて発展させ、両者を統合する新しい研究の潮流を生み出すことである。実際、近年興った「非平衡ゆらぎ」の普遍法則の発見や、メソスケール系での実験技術の進展により「ゆらぎ」と「構造」を統一的に扱うための環境は整っており、統合による非平衡科学の飛躍的発展の機は熟している。本領域では、量子凝縮系、固体物理、ソフトマター、非平衡統計力学などの分野の実験家と理論家の密接な連携により、個々の対象を越えた普遍的で応用性に富む知見を切り拓くことを目指す。

非平衡科学には、早い段階から、物性物理を指向する動きと生命を指向する動きがあった。ゆらぎと輸送現象の理解は物性物理の基本的問題である。一方で、生命現象の本質を理解するには、物質の集まりが生命となるプロセスを、物質基盤と情報基盤が関わりあう非平衡系の問題として正面から捉える必要がある。その背景の下、70年代後半以降の非平衡科学の研究は、大きく「非平衡ゆらぎ」と「時空間構造」を追求する二つの潮流に分かれて発展してきた。「ゆらぎ」の研究は理論主導で、ミクロなゆらぎの性質に基づきマクロな性質を記述することを目指してきた。しかし、そこでは系のもつ豊かな大規模構造や非平衡ダイナミクスなどの動的秩序は、二次的に扱われていた。一方、「構造」の研究では、マクロな系を直接の対象とし、非平衡ダイナミクスを普遍的に記述することに成功したが、ゆらぎの非自明な効果は取り入れられていなかった。以下に見るように、メソスケール領域の系を対象とすることで、二つの流れは自然に交差し、ミクロとマクロをつなぐ非平衡法則の探求が可能となる。

② 本領域の研究指針と具体的な課題

以下では、本領域の目的を達成するための、3つの基本指針と具体的な課題について述べる。

(1) 「非平衡ゆらぎ」の普遍的な法則の探求

90年代半ばからのメソスケール系での「非平衡ゆらぎ」に関する一連の研究の中で、揺動散逸関係を包含する「ゆらぎの定理」や、平衡と非平衡をつなぐ「Jarzynski 等式」などの新たな普遍的な関係が発見され、非平衡科学を巡る状況は歴史的転回を遂げた。分子レベルの力学とマクロなダイナミクスの中間領域で「ゆらぎ」の普遍性が見出されたことの意義は大きい。

これらの展開は始まったばかりで、実験的検証は主として単一コロイド粒子系などに限られているが、非平衡ゆらぎの普遍法則は広範な物質と多くの非平衡現象について成り立つと期待される。本領域では、量子ゆらぎ、熱ゆらぎ、非熱的ゆらぎなどの非平衡状態における性質を、多粒子系や量子多体系、液晶など多くの物質系について実験的に精査し、理論的には、熱流やせん断流などの外場によって構造変化を伴う状況、情報と制御が関与する場合などに拡張し、非平衡法則をさらに有用な形式へと整備することを目指す。そのためのメソスケール系の革新的な技術として、(a) ゆらぎを計測、制御できる1分子計測や量子測定技術、(b) 構造変化や相互作用を制御する実験技術、(c) シミュレーション技術などが進展しており、これらの研究を展開するための準備は整っている。本領域の第一の課題は、これらの革新的な技術と新規の理論を収斂させ、非平衡ゆらぎの普遍性を手掛かりとして、ミクロとマクロをつなぐ非平衡系の普遍法則の確立を目指すことである。そのため、非平衡ゆらぎの普遍法則が広範な物質について成り立つことを実証する。具体的には、分子の配向秩序の熱ゆらぎが観測可能な液晶やエマルションなどの実験系（折原）、電流ゆらぎが問題となる半導体メソ構造系（小林）、非熱的ゆらぎが測定可能な細胞骨格（木村）などの実験系において、非平衡ゆらぎの特性を精密に測定し、理論との整合性を検証するとともに新奇現象を探索する。また、自律系のゆらぎが従う法則や、情報とフィードバック操作を含む系の非平衡関係式の探求（佐々、沙

川、佐野)とその量子系への展開などの研究(齊藤、沙川)を進める。

(2) ゆらぎと構造が交差する現象の探求と解明

メソスケールの領域では、「ゆらぎ」と「構造」は不可分となり、自然に絡み合ってくる。メソスケール構造の変化は、ミクロなゆらぎと輸送の変化として現われ、輸送係数の変化は、時空間秩序の発生条件に関わるため、マクロなゆらぎにも大きな変化をもたらす。このように、マクロな変動とメソ構造の間にフィードバックがある場合には、機能の発現に繋がる多彩な振る舞いが可能となるため、ゆらぎと構造に強い相関がある場合に非平衡理論を発展させることは、重要な課題である。以上の背景の下、**マクロとメソ構造の間にフィードバック相互作用があり、「ゆらぎと構造が協奏的に発展する系」の理論と実験を推進することが、本領域の第二の課題である。**そのためには、物質のメソ構造、ゆらぎ、非平衡構造が強く相関して現われる実験系が鍵となる。具体的には、外場下でのソフトマターの秩序構造のゆらぎ(折原)、ゆらぎが顕著となるメソスケールでの反応拡散系(櫻井)などの実験系が対象となる。これらの系において、物質のメソ構造と動的秩序の相関、動的秩序構造とゆらぎの非自明な結合効果、界面やトポロジカル欠陥・渦構造のダイナミクスと場のゆらぎの相関などを明らかにする。理論的には、非平衡ゆらぎの普遍法則の空間構造がある場合への拡張(佐々)などが期待される。フィードバックのある系に関しては、情報熱力学が立ち上がりつつあり(沙川)、今後これを展開する。

(3) ゆらぎと構造の協奏が生み出す自律的機能の探求

上述のメソスケールにおけるゆらぎと構造の協奏を手がかりに我々は、非平衡科学のもう一つの流れである、生命現象の物理的な理解に挑む。単なる物質の集合が自己生産、自己駆動、遺伝情報の伝播など生命の基本特性を発現するための物理機構を解明することは、生命という動的な非平衡系を理解する上で重要な一歩となるだろう。自己生産や遺伝情報の伝搬には、細胞のような区画化された系と、それを持続させる非平衡開放状態が不可欠であり、対称性の破れを伴う自律的ゆらぎの役割を理解することが重要である。**本領域の第三の課題は、物質科学を基盤として、メソスケールのモデル非平衡系を実現し、時空間構造やゆらぎが自己複製や自己駆動などの機能に転化するメカニズムを、実験と理論の両面から明らかにすることである。**そのため、人工生体膜などのソフトマターや細胞モデルを対象に研究を進め、膜のメソスケール構造の変化、膜系に内包される化学反応のダイナミクス、動的秩序としての変形・運動・分裂のそれぞれの機構を明らかにする。また、それらのメソ構造と動的秩序が相関して現われる現象として、自己複製や自己駆動などの物理を物質科学と非平衡理論に基づいて明らかにする。最近、本領域のメンバーが発見した、DNAを内包したモデル膜系でベシクルとDNAの全体が自己増殖する現象や、実際の細胞において、反応拡散波のゆらぎが細胞運動を制御している事実は、有力な道しるべとなるだろう。具体的な研究課題としては、時空間秩序形成とその生命現象の展開(吉川)、ベシクル系による人工細胞系の構築と構造変化の解明(今井、好村)、微小空間における反応拡散場と細胞機能との関連(櫻井)、細胞やモデル非平衡物質の応答と非平衡ゆらぎの計測(木村、水野)などを推進し、生命の基本特性を発現するための物理機構の解明に繋げる。

③ どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか

近年、日本発の科学論文のシェアが相対的に低下していると言われる。その大きな原因の一つとして、既存分野には比較的強いが、融合分野などの新規分野への進出が遅れていることが言われている。本領域は、異なる学問分野(統計力学、量子凝縮系、ソフトマター物理、物性物理など)の研究者を非平衡法則の探究という目的の下に結集させ、その相互作用により非平衡科学の新境地を開拓するとともに、多彩な先端技術をもつ実験家と理論家が連携して多角的に研究を進める点で、融合研究を強く推進している。また、統計力学は歴史的に日本の貢献が大きい分野でもあり、統計力学の一層の深化と新分野への進出を促し、日本の存在感を高めることが可能になると考えられる。現在、多くの分野で非平衡系に対する関心が深まっており、今ほど非平衡系に関する指導原理が求められている時はない。本研究領域の発展により、次のように多くの分野への波及効果が期待できる。(1)非平衡法則の発見と深化は、物質科学における非平衡現象の本質的理解につながり、諸分野の基盤的知識と成り得る。(2)フィードバック操作や情報の概念を取り入れた非平衡統計力学の発展は、メソ系やナノシステムの制御と関連が深く、新たな革新的技術の開発につながる可能性がある。(3)人工細胞やモデル非平衡物質の実現は、生物物理や化学工学の発展に寄与するものと期待される。

2. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する〕（3ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

これまでの領域全体としての研究の進展状況は以下の通りである。異分野に属するメンバーが、同一の領域で活動を行うことによりシナジー効果が現れ、多くの成果が得られている。

A01 基礎班は4つの計画研究から成り、「非平衡ゆらぎ」の普遍法則の探求を行っている。理論的には、ゆらぎの性質を利用して、微視的力学系から巨視的方程式を導出する新しい理論手法や、非平衡ゆらぎの理論を拡張し、微小系の熱効率の上限や細胞内シグナル伝達のロバストさの上限を与えることに成功した。また実験的には、固体量子系において、スピン流ゆらぎの測定に成功するとともに、量子流体と古典流体における層流・乱流転移が同じ非平衡相転移の普遍性を持つことを明らかにした。

A02 時空班は3つの計画研究から成り、ソフトマターや量子凝縮体、拡散反応系においてゆらぎと構造が強く相関する現象を探索している。これまでに、せん断流下でのコロイド粒子を3次元観察可能な顕微鏡を開発し、時間反転対称性の破れを観測した、さらには、冷却原子気体において、異方的長距離力を制御することでスピンの新規な空間構造形成の観測に成功した。

A03 機能班は4つの計画研究から成り、ゆらぎと構造の協奏が生み出す自律的機能の探求を行っている。これまでに、持続可能な循環型人工細胞のモデルとして回帰的に増殖するベシクル系の開発や、化学刺激により走化性を示す自己駆動系の開発に成功した。さらには、ゆらぎの大きい細胞やバイオマターにおける力学物性測定を可能にする3次元多重フィードバックによるマイクロレオロジー法を開発した。理論的には、多成分ベシクルや化学反応を考慮した2成分系における様々の膜形態の変化を再現することに成功している。

また、**各班を有機的に連携させるため**、非平衡ゆらぎの法則(A01)、反応拡散系(A02)、機能創成(A03)をつなぐ目的で設定された計画研究では、細胞の走化性という機能発現において、濃度勾配発生装置を開発し、外部の場のゆらぎ、細胞内の化学反応、膜歪みとF-アクチン波の関係が測定可能な実験系を確立することに成功した。この例に象徴されるように、残りの期間で各班の連携がさらに大きく進むものと期待している。

以下では、各班ごとの研究の進展状況についてさらに詳しく述べる。

A01（基礎）班の研究の進展状況：

A01-001「非平衡ゆらぎの熱力学的体系」は領域の理論面を担当し、平衡ゆらぎとは定性的に異なるゆらぎが巨視的現象を支配する例を積極的に探し出すとともに、微視的物理法則からの理解を目指している。具体的には、微視的記述と巨視的記述の関係を再考し、熱力学体系の非平衡系への拡張を検討し、まれなゆらぎの統計的性質を特徴づける大偏差関数の物理的性質を見いだすこと、現象論的には、問題の本質を単純に表現する例題と新奇な非平衡相転移を示す例題を明らかにすることを目標に掲げていた。これまでに、標準的な流体方程式を微視的力学系から導出する新しい方法を見出し、その方法を集団同期現象にあてはめ集団ダイナミクスを導出した。その方法の汎用性と関係性は期待を遥かに超えており、今後ますます展開するだろう。大偏差関数に関しては、実験室でも実装できる可能性がある新しい計算方法を開発した。現象論の問題では、3次元系における準長距離秩序という新しい相が非平衡系で実現できることを示したのが大きな進展である。

A01-002「非平衡量子系の輸送ダイナミクス」では、微細加工技術によって作製される極小の固体素子における非平衡ダイナミクス、特に、電子・熱・情報の流れを取り扱う方法論の創出を目指している。このような系は、平衡状態から非平衡状態までを連続的に制御できるため、非平衡量子系を定量的に取り扱える理想的な舞台になっているからである。これまでに、電流ゆらぎの精密測定によって、多体量子液体の非平衡における振る舞いを定量的に明らかにすることや、スピン流のゆらぎの検出に成功している。また、単一電子箱を用いて、フィードバック制御により情報を仕事に変換する情報熱機関を実験的に実現し、相互情報量を含んだ形の一般化 Jarzynski 等式を検証した。さらに、電流と熱流が絡み合った典型的な現象である熱電効果・ネルンスト効果に着目し、微小系における熱効率の上限を明らかにした。このような研

究と並行して、情報熱力学を細胞内シグナル伝達現象に適用し、シグナル伝達のノイズに対するロバストさの上限を明らかにした。以上のような取り組みとその成果は、当初の目的である量子状態をも含めた微小系における非平衡系の振る舞いの定量的解明に向けた着実な前進である。

A01-003「非平衡ゆらぎが生み出す構造と運動の普遍性」では、(1) 界面ゆらぎを記述するKPZ 普遍法則に関して、系の対称性や初期条件の違いによる普遍法則の変化やそれらの厳密解を明らかにする研究、(2) 古典流体や量子流体における層流・乱流転移が普遍的な非平衡相転移の法則に従っていることを示す研究、(3) 自己駆動する粒子系において非平衡系に特有の集団運動やゆらぎを見いだす研究を行っている。(1)では、KPZ 普遍性が見られると期待される新たなモデルをいくつか構成し、その性質について調べた。また初期条件を自在に制御できる液晶実験系を構築し、対応する数値計算では異なる普遍法則の移り変わりが起こることを見いだした。(2)では、超流動ヘリウムや冷却原子気体中の量子乱流の発生がDP と呼ばれる普遍的相転移を示す可能性に着目し、数値計算により臨界指数がDP に一致する結果を得た。また、古典流体のチャンネル流における層流・乱流転移がDP 転移である可能性に着目して実験を行い、3つの臨界指数がDP クラスと一致することを見いだした。これらは、長年の歴史的難問を解決に導く結果である。(3)では、変形しながら自己駆動する系のメカニズムの解明のため、水面に浮かべた油滴を垂直加振することで、様々のタイプの並進運動を見だし、それらの相図を得るとともに現象論的理論と比較を行った。

A01-004「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」では、(1) ガラス・ジャミング系に隠れている複数の特徴的な長さの探索、(2) 降伏応力の発生機構の解明、(3) ガラス・ジャミング系の非線形レオロジーの解析を目標に掲げていた。(1)については、真の(熱力学的な)ガラス転移点を、不純物系ガラスの数値計算により発見した。外挿もフィッティングもなしに、エントロピーが消えた状態を実現したのは世界で初めてである。今後の課題は、真のガラス状態に隠れている相関長の探索である。この系はガラスの古典理論すら揺るがせるような興味深い物理が隠れていると期待している。(2)については、無限大次元剛体球系の剛性率・降伏応力など力学物性の研究を行なった。連続的なレプリカ対称性破れ(RSB)の発見という大きな展開を受けて、新しいスケール則を剛性率に見出した。現在、3次元系の数値計算で、その予想と整合する結果を得つつある。今後は、有限次元で連続RSBを見つけることが大きな目標になる。特に(3)の剛性率や非線形レオロジーを、スピングラスでの蓄積をヒントにしながら探っている。現実のガラス・ジャミング系におけるゆらぎの特性と連続RSBの関連を知ることは、ガラス研究では喫緊の課題である。

A02 (時空) 班の研究の進展状況 :

A02-001「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」では、液晶、コロイド等において流れの関係する非平衡ゆらぎの測定法を開発し、ソフトマターにおける非平衡ゆらぎの個別性と普遍性の解明を目指している。液晶系では、定常せん断流下において応力の線形応答に異常な振る舞いを実験的に見いだすとともに、理論的に非平衡系の特徴である非保存力が重要な役割を演じていることを明らかにした。さらに、液晶に電場を印加したときに形成される対流においては、対流中のコロイド粒子の特異な運動を見いだすとともに、対流発生直前での液晶分子の配向ゆらぎを観測する手法を開発し、これを用いてゆらぎから対流形成への発展過程を調べている。また、せん断流下で水中に分散したコロイド粒子のブラウン運動の研究に関しては、3次元観察のできるステレオ顕微鏡を製作し、この系で初めて異なる方向への運動の相互相関の出現、時間反転対称性の破れを検証した。現在この研究は粒子密度の高い系および非ニュートン流体を用いた系へと展開しており、今後必要となってくるシミュレーションおよび理論的解析について他班と連携する準備も行なっている。

A02-002「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」で扱う、多成分ボース・アインシュタイン凝縮体は、制御性の高い可視化可能なメソスケールの量子系であり、さらに、多くの実験結果を数値シミュレーションにより再現可能であるという特徴を有している。量子系における非平衡構造とゆらぎを探求し、普遍的な現象を解明することを目的とし、領域横断の研究会や、班内の定期的な打ち合わせにより、理論と実験の密接な協力体制のもと研究を進めた。非平衡ダイナミクスの制御技術の高度化については、冷却原子自身を磁場のプローブに用いる手法を開発し、精密な磁場制御を実現した。そして、原子間の磁気双極子により形成されるスピントクスチャ構造の観測やスピンドメイン構造とスピン流の相互作用の解明などの成果を得ることができた。さらに、量子渦が磁性の異なる界面を通過するときのダ

イナミクス、量子渦生成におけるヒステリシスの存在などを理論的に示したほか、量子流体の層流 - 乱流転移の独立した臨界指数3つを数値的にもとめ、それらが3次元の異方的浸透現象クラスに一致することを見出した。

A02-003「小さな反応拡散系における秩序形成から生物の機能へ」では、反応拡散波と界面変形を伴ったアクティブマターの相互依存性から生み出される動的秩序とゆらぎに由来する機能の普遍的性質の解明を目的としている。生物機能にはしばしば運動に伴う秩序形成過程が存在し、それらの理解のためには新たな実験系の開発と物理的アプローチを必要としていた。特に、ゆらぎの普遍法則 (A01 班) および機能創成 (A03 班) を繋ぐための新しい実験系の確立は必須であった。本研究では、走化性応答における細胞内の極性形成と外場揺らぎとの関係を解析するための濃度勾配発生装置を開発し、これを青色蛍光で識別、定量するための実験系を確立した。これにより、細胞外の場の揺らぎと、細胞内の反応が測定可能となり、時間的変動への追従性の実験が可能となった。また、反射干渉と全反射蛍光顕微鏡を用い、膜歪みのゆらぎ増幅と細胞内 F-actin 波の関係を初めて示した。以上、この2年間で生物を用いたゆらぎを含む分子レベルの反応と機能創成に対する実験系を確立した。また細胞運動のアクティブマターとしての理解を目指し、領域内合同研究集会 (九大、東北大) で議論するなど、他班との共同研究への発展を行っている。

A03 (機能) 班の研究の進展状況:

A03-001「ソフトマターから人工細胞への物理的アプローチ」では、細胞を形作るベシクルと遺伝情報分子が連携しながら増殖する分子集合体系 (ベシクル型人工細胞)、化学反応を利用して自己駆動するベシクルなど、生命系に特徴的な機能を基本的な分子群を用いて再現し、その物理的な機構を解明することを目的としている。ベシクル型人工細胞の創成では、DNA を複製しながら増殖するベシクルの研究を進展させ、DNA が膜分子と複合体を作ることにより触媒的な作用を獲得し、ベシクルの分裂のキネティクスが DNA のタイプに依存する遺伝型と発現型の関係が見られることを見出した。また、持続可能な循環型人工細胞として DNA の原料を輸送する運搬ベシクルを導入して捕食・増幅・成熟・分裂の4つの相を経て回帰的に増殖するベシクル系の開発にも成功した。一方、自己増殖の物理機構を解明するためにベシクルの自己生産過程の3次元計測法を開発し、それによりベシクル分裂やその再帰性をもたらす分子の幾何学的特徴を定量的に解明した。また、生命系におけるもう一つの特徴である、自己駆動に関しても、化学刺激に応じて走化性を示すベシクルや、界面活性剤の刺激により、リン脂質分子集合体が、その一部を尻尾状に噴出し、それを鞭毛のように波状運動させながら自己駆動する系の開発に成功し、その駆動力の物理的な起源を明らかにした。

A03-002「生体膜におけるメソ構造の非平衡ダイナミクス」では、生体膜の特徴的な振る舞いを物理モデルを基盤にした理論とシミュレーション手法により理解することを目指している。理論からは、多成分ベシクルのドメイン成長、脂質二重膜上での拡散、二成分膜系での緩和現象の記述に成功しつつある。シミュレーションでは、特に化学反応により引き起こされる界面活性剤分子集合体の様々な形態変化を説明するために、親水成分と油成分が結合反応して2重膜を形成するモデル系を用いて、実験で得られた形態変化の特徴の再現に成功し、その原因が油成分による曲げ弾性率の低下にあることを明らかにした。また、このような膜系の μm スケールでの高次構造形成の再現を目的とした大規模シミュレーションを行い、実験結果をよく説明することに成功した。これらの理論、シミュレーションの成功は A03 班の様々な生体系での実験を理解するための基礎となっており、多くの連携研究のネットワークの要となっている。

A03-003「非熱的に駆動されたバイオマターの非平衡動力学」では、非平衡状態におけるバイオマターのダイナミクスの研究を通して生命現象を解明することを目指して、ミクロスケールでの力学物性測定法の開発およびそれを用いたバイオマター・細胞およびそのモデル系でのダイナミクスの実験的研究を行ってきた。非平衡媒質中のメソスケール自由度の力学特性と揺動散逸の同時観測により、系を駆動するエネルギーの周波数モードへの分配から、生き物や細胞の力学的振る舞いに現れる法則性を見いだす。そのためには、生体系に特有な大きな非平衡ゆらぎ存在下での計測を可能にする必要があり、この問題を克服するために3次元“多重”フィードバックによる active/passive マイクロレオロジー法を開発した。現在、混み合いガラス状態としての細胞原形質、モータータンパク質により駆動される細胞 (骨格)、そして、それらのモデル系としての遊走微生物懸濁液、剛体球コロイドガラスにおいて、非平衡系での非熱的な揺ら

ぎと応答の関係の計測に成功しており、細胞の動力学の解明につなげる研究を推進する予定である。

A03-004「時空間秩序の生成とその生命現象への展開」では、「生物らしさ」の特質を明らかにするため、1) 分子（ゲノム DNA）、2) 細胞サイズ、3) マクロサイズ（多細胞～個体）の各階層で、モデル実験系を構築し、非線形・非平衡物理学の立場から「生物らしさ」の原理に迫る。1) DNA に代表されるようならせん形の高分子は、巻きつき形の構造変化をするとき、一方のキラル構造の選択を一般的に行うことを、理論的に示し、核内に存在する DNA の高次構造と機能発現の一端を明らかにした。2) 細胞レベルにおいては、生体高分子を内包した膜小胞の自発的な発生に関して、DNA などの生体高分子の存在が生成の駆動力となる事を明らかにした。これを応用し、小胞系の新しい作成手法を開発した。3) 多細胞系では、組織形成におけるモデル実験系として、液滴系で一次元の pearling 不安定性による秩序形成から始まり、2次元の格子形成へと至る動的現象を構築することに成功した。また、液滴の熱マランゴニ流による自発運動に関して、その推進力の強さに応じて運動モードが分岐する事を示した。これは、微生物などの「生物らしさ」の顕れの一つである自発的な運動変化様式のもっともシンプルなモデルとなるものである。

3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況（2ページ程度）

審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

審査結果の所見において、「量子凝縮系、ソフトマター、バイオマターといった多彩な物質群での非平衡現象を追求することで、その普遍性を探索する計画となっており、その研究目的も明確である。非平衡統計力学の進展により先進的な技術開発や細胞モデルの構築などへの波及効果も考えられ、多分野を含む本研究領域は、新学術領域研究としてふさわしい。計画研究は、研究項目 A01「基礎班」、A02「時空班」、A03「機能班」の3つからなり、参画する多くの研究者を有機的にまとめ上げる工夫や研究テーマ間の連携を強化する対応策が図られているなど、研究計画は十分に練られている。」と高い評価を頂いたが、「一方で、多分野にわたる本研究領域の特性を反映して、同じ物理を様々な系で繰り返し確認するのみで終わってしまうのではないかといった懸念や、多分野をつなぐ概念的な牽引力を持続させるための工夫が必要になるのではないかといった意見もあり、領域代表者がこれらの点をいかに方向付けするかが今後の重要な鍵になると思われる。」というコメントも寄せられた。以下では、これらの指摘に対する対応策とその効果について述べる。

本領域が、様々の系を対象にして、非平衡系における普遍法則を探求することを目的としたことで、採択に至るまで、同様の指摘は常に存在した。総花的になりすぎないことや、全体をまとめることの困難さを指摘するコメントも以前からあった。それに対して、我々は3つの班の特徴を明確にするとともに、3つの班が遊離しないよう、各班を有機的につなぎ、連携を積極的に進めるために、特に、任意の2つの班間をつなぐ研究テーマを担うグループを配置した。具体的には、A01とA02をつなぐ研究として、液晶場の非平衡ゆらぎの精密測定（折原）、A02とA03を結びつけるものとして、小さな反応拡散系における秩序形成から細胞機能へつなげる研究（櫻井、澤井）、A03とA01をつなぐものとして、細胞骨格の自発ゆらぎと揺動散逸関係の破れ（木村、水野）などのテーマである。これらの対応は、実際に功を奏していると考えられる。具体的には、上記の構想に沿った形で、下記の3つの領域横断型研究会を開催し、計画研究、公募研究を含めて班をまたがった研究交流と情報交換を行った。(i)領域横断研究会「細胞力学と細胞運動の協奏」(2014/12/19-20、九州大学)、(ii)「アクティブマター研究会」(2015/3/14-15、東北大学)、(iii)「冷却原子研究会」(2014/11/3、学習院大学)。特に(i)では、ソフトマターや複雑流体を研究するグループと細胞内のレオロジーやアクティブなゆらぎを研究するグループが、マイクロレオロジーという共通の観点から問題に取り組むための準備会となった。また、水野等が開発している細胞運動などのドリフトに追従しながら計測を行う、3次元フィードバック型のマイクロレオロジー装置の見学と説明会を行い、新しい実験技術を領域内に広める役割も果たした。

「同じ物理を様々な系で繰り返し確認するのみで終わるのでは」というコメントに対しては、明確に反証することが可能である。例えば、領域発足時にはおぼろげにしか見えていなかった、非平衡系の普遍法則が、非平衡相転移という点に関しては、今、急速な進展を見せている。高橋、小林、竹内の班とグループをまたいだ共同研究による量子乱流における有向パーコレーション(DP)普遍性の発見、佐野、玉井による古典乱流（チャンネル流）における層流・乱流転移がDP普遍性クラスと同じ臨界指数を持つことの発見は、非平衡系の相転移にも普遍性が存在することを数値実験と実験で明らかにした点で、その意義は大きい。非平衡相転移の明確な例が、本領域発足までは低レイノルズ数の液晶系でしか知られていなかったことを考えると、全く異なる系でも確認されたことは、まさに非平衡系における普遍法則が確立しつつあると言えるだろう。特に後者は、レイノルズ以来130年間の未解決問題を解決に導く結果として、領域研究を超えて非平衡統計力学や流体力学分野に波及効果のある結果と考える。一方、「ゆらぎの定理」の検証に関しては、単なる繰返しでは新規性がないことは明白であり、その点に関しても対応は行われている。このことは、早い段階でチュートリアル：「ゆらぎの定理：過去」(2014/3/4、東京大学)、若手研究会：「ゆらぎの定理：現在と未来」(2014/3/14、東京大学)を開催して確認し、新たな展開を視野に入れて研究活動を開始した。それらのことも関連して、4.に述べる成果につながったと考えている。具体的には、保存量でなく、ゆらぎ法則が全く未知であるスピンゆらぎの計測実験の成功や、ゆらぎの定理を用いたミクロからの流体力学方程式の導出などの新規の理論展開、さらには、より複雑なネットワーク構造を持つ系への情報熱力学の拡張や、生体内シグナル伝達系への情報熱力学の応用などの成果につながっている。

る。一方、空間的に広がりを持つ系におけるゆらぎの法則に関しては、依然として未解明の点が多く、今後の課題として残っていることは忘れてはならない。この点は、ゆらぎ法則の生物系へ向けた展開という面でも今後積極的に取り組んでいく予定である。

A03 吉川研一が代表者の計画研究 「時空間秩序の生成とその生命現象への展開」への審査所見により受けた指摘への対応状況：

「なお、研究項目 A03 吉川研一氏の研究計画調書については、研究計画と研究方法の具体性が欠けており、研究分担者との相互関係も明確に述べられていないため、計画研究として不適格ではないかとの議論がなされた。本計画研究の実施にあたっては、計画をより具体化し、確実に遂行することが求められる」。この指摘を真摯に受け止め、3グループで緊密な連携を行い、研究計画の具体化とグループ間の連携を強化しながら、研究を推進してきた。吉川のグループが中核になる研究課題として、①ゲノムサイズ DNA の折り畳み相転移のダイナミクスを位置づけて、国内外での共同研究を展開した。その結果、負に荷電した高分子やナノ粒子で混雑した環境で、DNA 分子は折り畳み転移を引き起こすことを、世界で初めて明らかにした。中性や陽電荷の高分子では、NaCl などの一価のイオンは転移の促進効果を示すが、負荷電の高分子の混雑環境による折り畳みでは、転移の阻害効果もあることも実験的に見出し、そのメカニズムについての理論化にも成功している。未解明の課題としては、このような折り畳み転移が、DNA の転写やタンパク発現などの、細胞内の DNA の機能との関連を明らかにすることが挙げられる。すでに、折り畳み転移により、一般的に転写や発現が完全に阻害されることは実験で確認してきている。今後、分担者の鶴山の協力により、癌化などの病変に伴うクロマチン構造の特異的な変化との相関を明らかにするようなデータも得られつつあり、今後、基礎研究に留まらず、臨床医学への応用展開も視野に入れた研究として発展することが期待されている。さらに、②細胞の特質に対しての非平衡物理学からのアプローチについては、鶴山・吉川両グループの癌細胞・組織を物理的な立場から解明する研究は着実に前進してきている。肺癌形態と遺伝子変異の関係、間質性肺炎の定量評価、超急性心筋梗塞の診断マーカーSORBS2 の発見、皮膚自己免疫疾患の乾癬の病態を血液細胞（リンパ球）の分布、活性化による形態の変化、遺伝子発現と相関の解明など、多くの成果が得られてきている。臓器を構成する個々の細胞レベルでのタンパク質発現のゆらぎについて、質量分析をもちいて検出することを試みている。その結果、予想された以上にがん細胞の発現レベルでのゆらぎが大きいことが検出された。本実験手法の基礎的な手法は確立してきており、本プロジェクトの中で、生体試料内でのタンパク質発現ゆらぎに有用な情報を提供することが期待できる。実際に臓器を構成している個々の細胞がどの程度遺伝子発現、タンパク質の発現においてゆらいでいるのかを、直接細胞に YAG レーザを照射し、ペプチドをイオン化させて、細胞ごとの発現量を計測するといった共同研究が進行中である。現在、解像度が個々の細胞レベルに近い $10\mu\text{m}$ に達し、組織細胞の場所ごとに発現のゆらぎを計測することが可能となっている。また、③非平衡開放系における自律運動の課題についても市川・吉川両グループの連携でもって、定常電場や定常的なレーザー照射下での、規則的な運動の誘起や、そのモード分岐についての研究も着実に成果が得られてきている。等温条件下、化学エネルギーから規則的な運動を引き起こすといった試みについては、当初の2年間ほどは、実験条件の探索に時間がかかり良好な結果が得られなかった。ごく最近になって、ethanol などの基質を白金触媒存在下、空気中の酸素で酸化することにより、マイクロな物体の並進や回転運動を引き起こすことに成功している。以上のように、指摘のあった研究項目に関しても、多くの成果が得られていることは、発表論文の多さから考えても、十分な対応がなされた結果であると考えられる。

4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）〔研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する〕 （3 ページ程度）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

以下では、紙数も限られているため、領域内の研究ですでに公表されたものの中から、特に顕著な研究成果数編だけを選び、その内容を具体的に説明することとする。これ以外にも多くの成果が上げられているが、199 編の国際誌学術論文（うち Phys. Rev. Lett. 誌 12 本等）が出版されていることを明記しておきたい。

A01-001 計画研究（A01-002, 003 との共同研究）

分子モーターの理論モデル [K. Kawaguchi, S.-i. Sasa, and T. Sagawa, *Biophys. J.* **106**, 2450-2457 (2014).] 川口 (A01-003)、佐々 (A01-001)、沙川 (A01-002) は、可逆分子モーターである F1-ATPase に関する公募研究の宗行らの実験結果を定量的に説明するモデルとして、詳細釣り合いを満たしながら非対称な遷移を行うアロステリック機構のモデルを理論的に提案した。

A01-002 計画研究

スピン流に伴う電流ゆらぎの検出 [T. Arakawa *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **114**, 016601 (2015)]

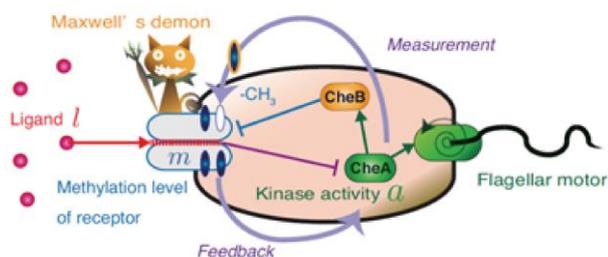
1918 年、ショットキーは真空管を流れる電流に注目し、そのゆらぎが素電荷と電流の平均値に比例するという普遍的な性質を持つと指摘した。このゆらぎは真空管の陰極からランダムに放出される電子の分配過程と電荷の離散性に起因した現象で、ショット雑音と呼ばれる。ところで、電子は電荷だけでなくスピンという自由度も持つため、スピンの離散性も電流のゆらぎに影響を与えるのではないかと考えるのは自然である。しかし、スピンに起因するスピンショット雑音については理論的な提案があったものの、実験的な検証は行われてこなかった。

小林らのグループは、トンネル接合にスピン流を印加し、それに伴うショット雑音の検出に成功した。強磁性半導体(Ga,Mn)As と非磁性半導体 GaAs からなるトンネル接合にスピン流を印加し、電流ゆらぎ測定を行った。トンネル接合に流れるスピン流と電流を独立に制御することで、ショット雑音に含まれる電流とスピン流の寄与を分離して評価した。その結果、スピン流の絶対値が求まると同時に、ショット雑音とスピン流の比例関係が実証された。この結果はトンネル過程において電荷とスピンが一体となってトンネルしていることの直接的な帰結である。今後、本検出手法がスピン流の研究を発展させていくと期待される。本研究成果は *Physical Review Letters* の Editors' Suggestion に選ばれた。

ゆらぎの情報熱力学の生体シグナル伝達系解析への拡張 [S. Ito and T. Sagawa, *Nature Comm.* in press.]

近年、情報理論と熱力学を融合させた「情報熱力学」が理論と実験の両面から注目を集めている。本研究で沙川らは、情報熱力学を生体内のシグナル伝達の解析に応用した。とくにフィードバックループがあるシグナル伝達の例として、大腸菌の走化性の適応モデルを解析した。このモデルにおいては、リガンドからの信号をいったんメチル化レベルに記憶し、キナーゼの活性にフィードバックを行うことで適応ダイナミクスを実現している。とくにフィードバックが、リガンドに加わる環境からのノイズをフィルターする役割を果たしている。これはいわゆる「マクスウェルのデーモン」の役割と類似している。沙川らはこの点に着目し、フィードバックの果たす役割を定量的に解析するために、情報熱力学の第二法則をこのモデルに応用した。このモデルにおいて測定とフィードバックは時間的に連続であるため、沙川らの以前の研究で得られたネットワーク上に拡張された情報熱力学に第二法則を応用する必要があった。その結果、大腸菌の適応の外界からのノイズに対する頑健性と、フィードバックループ内を流れる情報流の間の定量的な関係を発見した。とくに、

transfer entropy と呼ばれる情報量が、適応度の



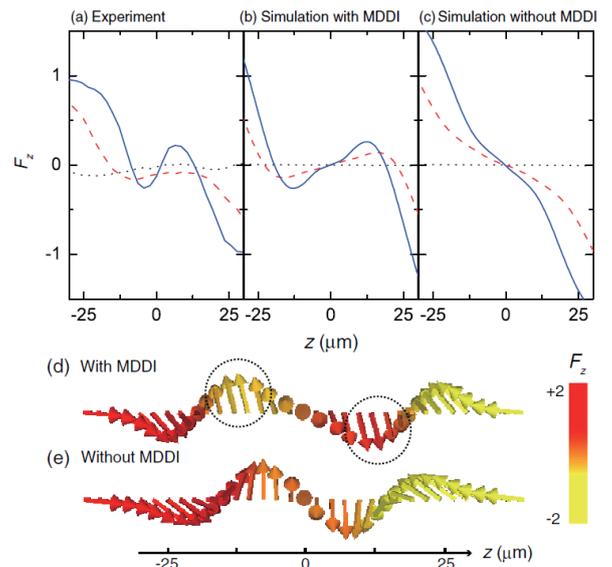
大腸菌のシグナル伝達の模式図

頑健性の上限を与えることが明らかになった。すなわち、フィードバックループ内を流れる transfer entropy が大きければ大きいほど、適応ダイナミクスがリガンドのノイズに対して頑健になることが明らかになった。また、大腸菌の適応ダイナミクスは、通常の熱機関としては非効率（散逸的）だが、情報熱機関としては効率的であることが明らかになった。以上の結果は、生体内の情報処理を情報熱力学の観点から解析する第一歩になると考えられる。

A02-002 計画研究

異方的長距離力によるスピンの空間構造形成 [Y. Eto, H. Saito, and T. Hirano, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 185301 (2014)]

中性原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体を光双極子力を用いてトラップすることにより、スピン自由度を持つ量子凝縮体（スピノール BEC）を実現することができる。このスピン自由度は、非混和なスピン成分間の不安定界面の形成、スピン間相互作用による量子ゆらぎの増減など様々な非平衡現象を引き起こす。スピン間の磁気双極子相互作用(MDDI)は、異方的な長距離的力であることから、さらに多彩な現象が期待される。しかし、希薄なアルカリ原子気体においては、微弱な MDDI は極端な低磁場でのみ重要であると従来は思われていた。本研究では、磁場を精密に制御することで、らせん状のスピン配置を持つスピノール BEC を用意し、時間発展を観測したところ、MDDI によりスピんに空間構造が形成されることを見出した。右図(b-e)は数値シミュレーションにより求めたスピンの位置依存性であり、(c)と(e)に示す MDDI を計算に含めないときは磁化の z 成分 (F_z) が単調に減少しているのに対し、(b)と(d)の MDDI を含めたときは反転が見られる。(a)の実験結果は MDDI のある計算と一致しており、スピノール BEC においては、比較的強磁場下でも、磁気双極子相互作用がスピンの空間構造に大きな影響を与えることを明確に示すことができた。本研究成果は *Physical Review Letters* の Editors' Suggestion に選ばれた。



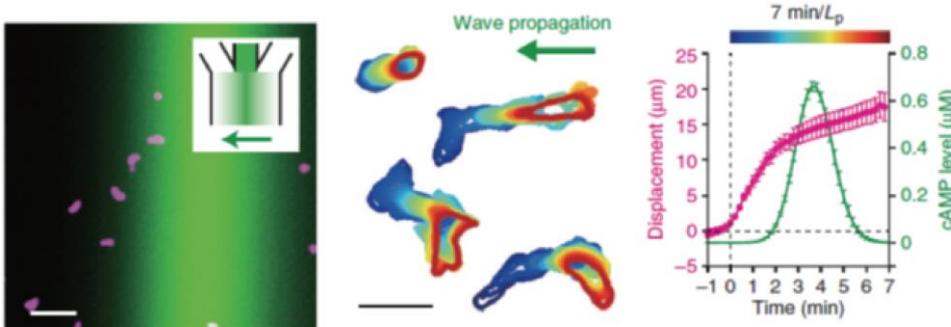
微弱な磁気双極子相互作用による原子気体 BEC のスピンの空間構造形成 [PRL, 112, 1835301 (2014); Editors' Suggestion]

A02-003 計画研究

変動環境の下での細胞の方向センシング機構の解明 [A. Nakajima et al., *Nature Comm.* **5**, 5367 (2014).]

真核細胞の走化性運動における方向決定では、細胞の先端端を特徴づけるシグナル因子が反応拡散パターンを形成していると考えられている。細胞性粘菌の走化性を例にとり、人工的に形成した誘引物質の動的勾配について、さまざまな時定数と、時間変化、空間変化の符号の組み合わせを実現し、細胞先端の形成を促す物質である Ras タンパク質（低分子量 GTP 結合タンパク質）の活性化パターンを、蛍光タンパク質を用いて測定し、データを理論モデルと比較、解析した。その結果、局所的な活性化反応と拡散による大域的な抑制反応を構成するフィードフォワード型の反応ネットワークから実験データ無矛盾に理解できること、また強い抑制がかかった状態では cAMP 濃度が時間的に上昇する場合にのみスイッチ的なパターン形成を示すことを明

解した。その結果、局所的な活性化反応と拡散による大域的な抑制反応を構成するフィードフォワード型の反応ネットワークから実験データ無矛盾に理解できること、また強い抑制がかかった状態では cAMP 濃度が時間的に上昇する場合にのみスイッチ的なパターン形成を示すことを明



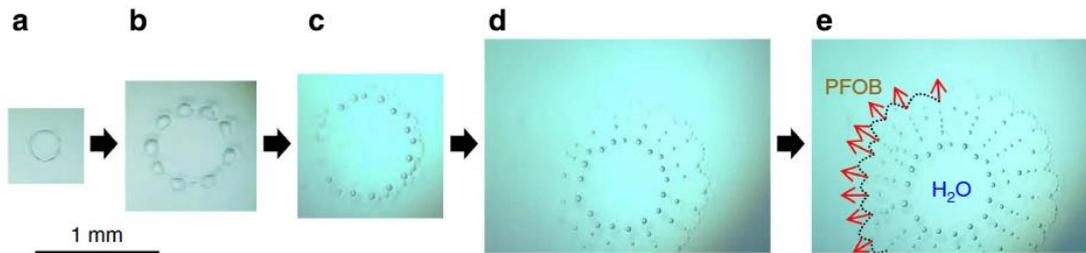
細胞の走化性機能測定のための実験系（濃度分布、細胞内タンパク質、膜変形、応答が測定可能）

らかにした。この性質は粘菌細胞が誘引物質の進行波刺激の前面でのみ移動し、背面の勾配を読みとらない特性を与えることから、一方向的な運動機構の根幹を担っていると考えられる。

A03-004 計画研究

高速で水面上を広がる油滴がつくる非平衡構造 [D. Yamamoto, C. Nakajima, A. Shioi, M.-P. Krafft, and K. Yoshikawa, *Nature Comm.* **6**, 7189 (2015).]

フッ素系の油は、普通の油とは相分離するなど、化学的に特異な性質を示す物質として注目されている。本論文は、フッ素系の有機化合物の合成を含め化学的な研究を進めて来ている **Strasbourg** 大学の **Krafft** 教授と、新規なフッ素系油の物性について意見交換をするなかで進められた共同研究である。弱揮発性の **perfluorooctyl bromide (PFOB)** を水面上に滴下すると、水面上で薄膜を形成し、水面に対して **PFOB** が濡れた状態になる。徐々に **PFOB** が蒸発すると、突然薄膜上に空孔が現れ、その周りに液滴が自発的に配列する。空孔の成長に伴い、次の段階では、放射状に小滴群が 1 次元配列パターンを形成する。その後、この小滴群は全体として膨張・収縮を繰り返し、2 次元のハチの巣構造を形成するといった、興味深い時間発展が起こる。このように、時間の経過とともに、自発的な液滴の周期構造が生成し、しかも秩序構造の間で分岐現象が生じることを、実験から明らかにした。このような、自発的な秩序と液滴の集団運動に関して、理論的な考察を行い、濡れ転移の非線形性を考慮することにより、規則構造の現れる機構を説明した。ここで、濡れ転移が、基本的には双安定性を示す現象であり、その速度過程は薄膜の厚みの 3 次の非線形項で表されることが、理論モデルの骨格となっている。今回見出された現象は、生物の集団運動など、自然界にみられる非平衡開放条件に起因する時空間の自己秩序形成のメカニズムを理解するためのよいモデル系になると期待される。



PFOB 薄膜から形成される液滴の配列秩序構造の時間発展

A03 公募研究 無細胞系 PURE system を用いた膜タンパク質合成法 [Y. Kuruma and T. Ueda, *Nature Protocols*, in press.]

無細胞タンパク質合成系（無細胞系）は、試験管内で任意のタンパク質を合成できるバイオテクノロジーツールである。合成反応中に脂質膜小胞を共存させることで、SecYEG トランスロコンや ATP 合成酵素のような巨大分子複合体を形成する膜タンパク質の合成も可能である。再構築型の無細胞系 PURE system を用いた無細胞膜タンパク質合成は合成後、i) 合成産物の定量、ii) 膜局在効率の解析、iii) 膜内配向性の解析、iv) 膜内複合体形成の解析を迅速に行うことが可能である。さらに今回、膜タンパク質複合体の一例として、無細胞合成された F 型 ATP 合成酵素の活性測定の結果を示した。本手法は生細胞を利用した方法と比較して、膜タンパク質精製の困難さを解消し、脂質膜へ再構する際の築凝集体形成のリスクを軽減することができるという利点を持つ。本研究は人工細胞への膜タンパク質の導入、合成に向けての重要なステップになると考えられる。

5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ程度）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。また、別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。

主な論文(全て査読有り):

A01:計画研究

1. “Collective dynamics from stochastic thermodynamics”,
*S.-i. Sasa, *New J. Phys.* 17, 045024/1-14 (2015).
2. “Nonequilibrium Statistical Mechanics for Adiabatic Piston Problem”,
M. Itami and S.-i. Sasa, *J. Stat. Phys.* 158, 37-56 (2015).
3. ◎“Maxwell's demon in biochemical signal transduction with feedback loop”,
*S. Ito and T. Sagawa, *Nature Comm.* in press.
4. “Thermodynamics of information”,
*J. M. R. Parrondo, J. M. Horowitz, and T. Sagawa, *Nature Phys.* 11, 131-139 (2015).
5. “Role of measurement-feedback separation in autonomous Maxwell's demons”,
*N. Shiraishi, S. Ito, K. Kawaguchi, and T. Sagawa, *New J. Phys.* 17, 045012/1-11 (2015).
6. “A KPZ Cocktail: Shaken, not stirred... -Toasting 30 years of kinetically roughened surfaces”,
*T. Halpin-Healy and K. A. Takeuchi, *J. Stat. Phys.* in press.
7. “Combinatorics of the asymmetric exclusion process on a semi-infinite lattice”,
T. Sasamoto, and L. Williams, *J. Comb.* in press (2015).
8. “Equilibrium phase diagram of a randomly pinned glass-former”,
M. Ozawa, *W. Kob, A. Ikeda, and K. Miyazaki, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 112, 6914-6919 (2015).
9. “Finite size effects in a mean-field kinetically constrained model: dynamical glassiness and quantum criticality”,
T. Nemoto, V. Lecomte, S.-i. Sasa, and *F. van Wijland, *J. Stat. Mech.* P10001/1-38 (2014).
10. “Universal expression for adiabatic pumping in terms of nonequilibrium steady states”,
*N. Nakagawa, *Phys. Rev. E* 90, 022108/1-6 (2014).
11. ◎ “Nonequilibrium dissipation-free transport in F1-ATPase and the thermodynamic role of asymmetric allostereism”,
*K. Kawaguchi, S.-i. Sasa, and T. Sagawa, *Biophys. J.* 106, 2450-2457 (2014).
12. “Jamming transition in kinetically constrained models with the parity symmetry”,
*H. Ohta and S.-i. Sasa, *J. Stat. Phys.* 155, 827-842 (2014).
13. “Macroscopically measurable force induced by temperature discontinuities at solid-gas interfaces”,
M. Itami and S.-i. Sasa, *Phys. Rev. E* 89, 052106/1-6 (2014).
14. “Shot noise induced by nonequilibrium spin accumulation”,
*T. Arakawa, J. Shiogai, M. Ciorga, M. Utz, D. Schuh, M. Kohda, J. Nitta, D. Bougeard, D. Weiss, T. Ono, and K. Kobayashi, *Phys. Rev. Lett.* 114, 016601/1-5 (2015). [Editors' suggestion に選出]
15. “Leak current estimated from the shot noise in magnetic tunneling junctions”,
*T. Tanaka, T. Arakawa, M. Maeda, K. Kobayashi, Y. Nishihara, T. Ono, T. Nozaki, A. Fukushima, and S. Yuasa, *Appl. Phys. Lett.* 105, 042405/1-4 (2014).
16. “Avalanche electron bunching in a Corbino disk in the quantum Hall effect breakdown regime”,
*K. Chida, T. Hata, T. Arakawa, S. Matsuo, Y. Nishihara, T. Tanaka, T. Ono, and K. Kobayashi, *Phys. Rev. B* 89, 235318/1-4 (2014).
17. “Real-time observation of Snell's law for spin waves in a thin ferromagnetic film”,
*K. Tanabe, R. Matsumoto, J.-i. Ohe, S. Murakami, T. Moriyama, D. Chiba, K. Kobayashi, and T. Ono, *Appl. Phys. Express* 7, 053001/1-4 (2014). [日本磁気学会のハイライトに選出]
18. “Experimental observation of the role of mutual information in the nonequilibrium dynamics of a

Maxwell demon”,

*J. V. Koski, V. F. Maisi, T. Sagawa, and J. P. Pekola, *Phys. Rev. Lett.* 113, 030601/1-5 (2014).

19. “Swimming droplets driven by a surface wave”,
*H. Ebata and M. Sano, *Sci. Rep.* 5, 8546/1-7 (2015).
20. “Three-dimensional analysis of thermo-mechanically rotating cholesteric liquid crystal droplets under a temperature gradient”,
*T. Yamamoto, M. Kuroda, and M. Sano, *EPL* 109, 46001/1-6 (2015).
21. “Interface fluctuations for deposition on enlarging flat substrates”,
I. S. S. Carrasco, K. A. Takeuchi, S. C. Ferreira, and *T. J. Oliveira, *New J. Phys.* 16, 123057/1-20 (2014).
22. “Following the evolution of glassy states under external perturbations: compression and shear-strain”,
C. Rainone, P. Urbani, H. Yoshino, and *F. Zamponi, *Phys. Rev. Lett.* 114, 015701/1-5 (2015).
23. “Critical dynamical heterogeneities close to continuous second-order glass transitions”,
S. K. Nandi, *G. Biroli, J.-P. Bouchaud, K. Miyazaki, and D. R. Reichman, *Phys. Rev. Lett.* 113, 245701/1-5 (2014).
24. “The shear modulus of glasses: results from the full replica symmetry breaking solution”,
H. Yoshino and F. Zamponi, *Phys. Rev. E* 90, 022302/1-14 (2014).
25. “Derivation of hydrodynamics from the Hamiltonian description of particle systems”,
*S.-i. Sasa, *Phys. Rev. Lett.* 112, 100602/1-5 (2014).
26. “Computation of large deviation statistics via iterative measurement-and-feedback procedure”,
*T. Nemoto and S.-i. Sasa, *Phys. Rev. Lett.* 112, 090602/1-5 (2014).
27. “Calculation of 1RSB transition temperature of spin glass models on regular random graphs under the replica symmetric ansatz”,
*M. Ueda and S.-i. Sasa, *J. Stat. Mech.* P02005/1-21 (2014).
28. “Possible extended forms of thermodynamic entropy”,
*S.-i. Sasa, *J. Stat. Mech.* P01004/1-16 (2014).
29. “Characterization of the low-temperature properties of a simplified protein model”,
J. G. Hagmann, N. Nakagawa, and *M. Peyrard, *Phys. Rev. E* 89, 012705/1-13 (2014).
30. “Kondo signature in heat transfer via a local two-state system”,
*K. Saito and T. Kato, *Phys. Rev. Lett.* 111, 214301/1-4 (2013).
31. “Cryogenic amplifier for shot noise measurement at 20 mK”,
*T. Arakawa, Y. Nishihara, M. Maeda, S. Norimoto, and K. Kobayashi, *Appl. Phys. Lett.* 103, 172104/1-4 (2013).
32. ©“A simple force-motion relation for migrating cells revealed by multipole analysis of traction stress”, *H. Tanimoto and M. Sano, *Biophys. J.* 106, 16-25 (2014).
33. “Brownian motion with multiplicative noises revisited”,
T. Kuroiwa and *K. Miyazaki, *J. Phys. A* 47, 012001/1-8 (2014).

A01 公募研究

34. “Collective motion of self-propelled particles with memory”,
K. H. Nagai, Y. Sumino, R. Montagne, I. S. Aranson, and *H. Chaté, *Phys. Rev. Lett.* 114, 168001/1-6 (2015). [表紙及び Editors' suggestion に選出]
35. “Shot-noise evidence of fractional quasiparticle creation in a local fractional quantum Hall state”,
*M. Hashisaka, T. Ota, K. Muraki, and T. Fujisawa, *Phys. Rev. Lett.* 114, 056802/1-5 (2015).
36. “Period of a combl-like pattern controlled by atom supply and noise”,
M. Kawaguchi, H. Miura, K. Kishi, M. Sato, and *M. Uwaha, *Phys. Rev. E* 91, 012409/1-9 (2015).
37. “Crystallization of Brownian particles in a pyramidal pit by a uniform external force”,
Y. Kanatsu and *M. Sato, *J. Phys. Soc. Jpn.* 84, 044601/1-6 (2015).
38. “Effective temperature of nonequilibrium dense matter in holography”,
*H. Hoshino and S. Nakamura, *Phys. Rev. D* 91, 026009/1-10 (2015).

39. ©“How does thermodiffusion of aqueous solutions depend on concentration and hydrophobicity?”,
K. Maeda, N. Shinyashiki, S. Yagihara, S. Wiegand, and *R. Kita, *Eur. Phys. J. E* 37, 94/1-6 (2014).
- A02 計画研究
40. “Electric-field-induced flow-aligning state in a nematic liquid crystal”,
J. F. Fatriansyah and *H. Orihara, *Phys. Rev. E* 91, 042508/1-7 (2015).
41. “Energy shift of magnons in a ferromagnetic spinor-dipolar Bose-Einstein condensate”,
*H. Saito and M. Kunimi, *Phys. Rev. A* 91, 041603(R)/1-4 (2015).
42. “Direct visualization of spatiotemporal structure of self-assembled colloidal particles in electrohydrodynamic flow of a nematic liquid crystal”,
*Y. Sasaki, H. Hoshikawa, T. Seto, F. Kobayashi, V. S. R. Jampani, S. Herminghaus, C. Bahr, and H. Orihara, *Langmuir* 31, 3815-3819 (2015).
43. “Electrically induced deformation in chiral smectic elastomers with different domain structures”,
*Y. H. Na, Y. Aburaya, H. Orihara, K. Hiraoka, and Y. Han, *Phys. Rev. E* 90, 062507/1-6 (2014).
44. ©“Colloidal caterpillars for cargo transportation”,
Y. Sasaki, Y. Takikawa, V. S. R. Jampani, H. Hoshikawa, T. Seto, C. Bahr, S. Herminghaus, Y. Hidaka, and *H. Orihara, *Soft Matter* 10, 8813–8820 (2014). [表紙に選出]
45. “Nonequilibrium steady-state response of a nematic liquid crystal under simple shear flow and electric fields”,
J. F. Fatriansyah, Y. Sasaki, and *H. Orihara, *Phys. Rev. E* 90, 032504/1-8 (2014).
46. ©“Attempts to retreat from a dead-ended long capillary by backward swimming in *Paramecium*”,
*I. Kunita, S. Kuroda, K. Ooki, T. Nakagaki, *Front. Microbiol.* 5, 270/1-8 (2014).
47. “Dynamics of a vortex dipole across a magnetic phase boundary in a spinor Bose-Einstein condensate”,
T. Kaneda and H. Saito, *Phys. Rev. A* 90, 053632/1-7 (2014).
48. “Control of spin current in a Bose gas by periodic application of π pulses”,
*Y. Eto, M. Sadgrove, S. Hasegawa, H. Saito, and T. Hirano, *Phys. Rev. A* 90, 013626/1-6 (2014).
49. “Observation of dipole-induced spin texture in an ^{87}Rb spin-2 Bose-Einstein condensate”,
*Y. Eto, H. Saito, and T. Hirano, *Phys. Rev. Lett.* 112, 185301/1-5 (2014).
[Editors’ suggestion に選出]
50. ©“Rectified directional sensing in long-range cell migration”,
A. Nakajima, S. Ishihara, D. Imoto, and *S. Sawai, *Nature Comm.* 5, 5367/1-14 (2014).
51. “Quantitative estimation of the parameters for self-motion driven by difference in surface tension”,
*N. J. Suematsu, T. Sasaki, S. Nakata, and H. Kitahata, *Langmuir* 30, 8101-8108 (2014).
52. “Persistence of Brownian motion in shear flow”,
Y. Takikawa and *H. Orihara, *Phys. Rev. E* 88, 062111/1-5 (2013).
53. “Many-body dynamics of a Bose-Einstein condensate collapsing by quantum tunneling”,
*H. Saito, *Phys. Rev. A* 89, 023610/1-6 (2014).
54. “Spin-echo-based magnetometry with spinor Bose-Einstein condensates”,
*Y. Eto, H. Ikeda, H. Suzuki, S. Hasegawa, Y. Tomiyama, S. Sekine, M. Sadgrove, and T. Hirano,
Phys. Rev. A 88, 031602(R)/1-4 (2013).
55. ©“Delayed response of interfacial tension in propagating chemical waves of the Belousov-Zhabotinsky reaction without stirring”,
R. Tanaka, T. Nomoto, T. Toyota, H. Kitahata, and *M. Fujinami, *J. Phys. Chem. B* 117, 13893–13898 (2013).

A02 公募研究

56. “Ultraslow oscillation of nematic disclination after abrupt switching of DC voltage”,
T. Yanagimachi, M. Hishida, Y. Yamamura, and K. Saito, *J. Phys. Soc. Jpn.* 84, 033601/1-4 (2015).
57. ©“Design and control of noise-induced synchronization patterns”,
*W. Kurebayashi, T. Ishii, M. Hasegawa, and H. Nakao, *EPL* 107, 10009/1-6 (2014).
58. “Phase-Reduction Approach to Synchronization of Spatiotemporal Rhythms in Reaction-Diffusion

Systems”,

*H. Nakao, T. Yanagita, and Y. Kawamura, *Phys. Rev. X* 4, 021032/1-23 (2014).

59. “Coarsening dynamics driven by vortex-antivortex annihilation in ferromagnetic Bose-Einstein condensates”,

*K. Kudo and Y. Kawaguchi, *Phys. Rev. A* 91, 053609/1-8 (2015).

A03 計画研究

60. “Formation of monodisperse hierarchical lipid particles utilizing microfluidic droplets in a non-equilibrium state”,

M. Mizuno, T. Toyota, M. Konishi, Y. Kageyama, *M. Yamada, and M. Seki, *Langmuir* 31, 2334-2341 (2015).

61. “The evolution of spatial ordering of oil drops fast spreading on a water surface”,

*D. Yamamoto, C. Nakajima, A. Shioi, M. P. Krafft, and K. Yoshikawa, *Nature Comm.* 6, 7189/1-6 (2015).

62. “Mode bifurcation of a bouncing dumbbell with chirality”,

Y. Kubo, *S. Inagaki, *M. Ichikawa, and K. Yoshikawa, *Phys. Rev. E* 91, 052905/1-9 (2015).

63. “Shape transformations of toroidal vesicles”,

*H. Noguchi, A. Sakashita and M. Imai, *Soft Matter* 11, 193-201 (2015).

64. “Morphological changes of amphiphilic molecular assemblies induced by chemical reactions”,

K. M. Nakagawa and *H. Noguchi, *Soft Matter* 11, 1403-1411 (2015).

65. “Budding of domains in mixed bilayer membranes”,

J. Wolff, *S. Komura, and D. Andelman, *Phys. Rev. E* 91, 012708/1-10 (2015).

66. “Charge-induced phase separation in lipid membranes”,

H. Himeno, N. Shimokawa, S. Komura, D. Andelman, *T. Hamada, and M. Takagi, *Soft Matter* 10, 7959-7967 (2014).

67. “Structural rheology of the smectic phase”,

*S. Fujii, S. Komura, and C.-Y. D. Lu, *Materials* 7, 5146-5168 (2014).

68. “Physical aspects of heterogeneities in multi-component lipid membranes”,

*S. Komura and D. Andelman, *Adv. Colloid Interface Sci.* 208, 34-46 (2014).

69. “Dynamics of colloidal particles in electrohydrodynamic convection of nematic liquid crystal”,

K. Takahashi and Y. Kimura, *Phys. Rev. E* 90, 012502/1-5 (2014).

70. “Melting process of a single finite-sized two-dimensional colloidal crystal”,

S. Tanaka, Y. Oki, and *Y. Kimura, *Phys. Rev. E* 89, 052305/1-9 (2014).

71. ©“High-frequency affine mechanics and nonaffine relaxation in a model cytoskeleton”,

D. A. Head, E. Ikebe, A. Nakamasu, P. Zhang, L. G. Villaruz, S. Kinoshita, S. Ando, and *D. Mizuno, *Phys. Rev. E* 89, 042711/1-5 (2014).

72. ©“Compaction of Double-Stranded DNA by Negatively Charged Proteins and Colloids”,

A. A. Zinchenko and *K. Yoshikawa, *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 20, 60-65 (2015).

73. “A toy model for nucleus-sized crowding confinement”,

*C.-Y. Shew and K. Yoshikawa, *J. Phys.: Condens. Matter* 27, 064118/1-7 (2015).

74. “Steadily oscillating axial bands of binary granules in a nearly filled coaxial cylinder”,

*S. Inagaki, H. Ebata, and K. Yoshikawa, *Phys. Rev. E* 91, 010201(R)/1-5 (2015).

75. “Dynamics of microdroplets over the surface of hot water”,

T. Umeki, M. Ohata, *H. Nakanishi, and M. Ichikawa, *Sci. Rep.* 5, 8046/1-6 (2015).

76. ©“Emergence of DNA-Encapsulating Liposomes from a DNA-Lipid Blend Film”,

*S. F. Shimobayashi and *M. Ichikawa, *J. Phys. Chem. B* 118, 10688-10694 (2014).

77. “Communication: Mode bifurcation of droplet motion under stationary laser irradiation”,

F. Takabatake, K. Yoshikawa, and *M. Ichikawa, *J. Chem. Phys.* 141, 051103/1-4 (2014).

78. “Chiral symmetry breaking of a double-stranded helical chain through bend-writhe coupling”,

T. Yano and *K. Yoshikawa, *Phys. Rev. E* 89, 062713/1-16 (2014).

79. “Tubular membrane formation of binary giant unilamellar vesicles composed of cylinder and

inverse-cone-shaped lipids",

*Y. Sakuma, T. Taniguchi, T. Kawakatsu, and M. Imai, *Biophys. J.* 105, 2074-2081 (2013).

80. ©“Macroscopic motion of supramolecular assemblies actuated by photoisomerization of Azobenzene derivatives”,
*Y. Kageyama, N. Tanigake, Y. Kurokome, S. Iwaki, *S. Takeda, K. Suzuki, and *T. Sugawara, *Chem. Comm.* 49, 9386-9388 (2013). [背表紙に選出]
81. “Diffusion coefficients in leaflets of bilayer membranes”,
*K. Seki, S. Mogre, and S. Komura, *Phys. Rev. E* 89, 022713/1-12 (2014).
82. “Spatiotemporal heterogeneity of local free volumes in highly supercooled liquid”,
*H. Shiba and T. Kawasaki, *J. Chem. Phys.* 139, 184502/1-8 (2013).
83. ©“Crowding by Anionic Nanoparticles Causes DNA Double-Strand Instability and Compaction”,
*A. A. Zinchenko, K. Tsumoto, S. Murata, and K. Yoshikawa, *J. Phys. Chem. B* 118, 1256-1262 (2014).
84. ©“Rigidity of a spherical capsule switches the localization of encapsulated particles between inner and peripheral regions under crowding condition: Simple model on cellular architecture”,
*C.-Y. Shew, K. Kondo, and K. Yoshikawa, *J. Chem. Phys.* 140, 024907/1-9 (2014).
85. ©“Self-organized patterning through the dynamic segregation of DNA and silicananoparticles”,
R. Joksimovic, S. Watanabe, S. Riemer, M. Gradzielski, and *K. Yoshikawa, *Sci. Rep.* 4, 3660/1-7 (2014).
86. “Back-and-forth micromotion of aqueous droplets in a dc electric field”,
T. Kurimura, *M. Ichikawa, M. Takinoue, and *K. Yoshikawa, *Phys. Rev. E* 88, 042918/1-5 (2013).

A03 公募研究

87. “The PURE system for the cell-free synthesis of membrane proteins”,
*Y. Kuruma and T. Ueda, *Nature Protocols* in press.
88. ©“Cytoadhesion of *P. falciparum*-infected erythrocytes to chondroitin-4-sulfate is cooperative and shear-enhanced”,
H. Rieger, H. Y. Yoshikawa, K. Quadt, M. A. Nielsen, C. P. Sanchez, A. Salanti, *M. Tanaka and M. Lanzer, *Blood* 125, 383-391 (2014).
89. ©“Unitary step of gliding machinery in *Mycoplasma mobile*”,
Y. Kinoshita, D. Nakane, M. Sugawa, T. Masaike, K. Mizutani, M. Miyata, and *T. Nishizaka, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 111, 8601-8606 (2014). [産経新聞に解説記事掲載]
90. ©“Single molecule thermodynamics of ATP synthesis by F1-ATPase”,
S. Toyabe and E. Muneyuki, *New J. Phys.* 17, 015008/1-7 (2015).

A04 公募研究

91. “Bogoliubov-wave turbulence in Bose-Einstein condensates”,
*K. Fujimoto and M. Tsubota, *Phys. Rev. A* 91, 053620/1-12 (2015).
92. “Counterflow quantum turbulence of He-II in a square channel: numerical analysis with nonuniform flows of the normal fluid”,
*S. Yui and M. Tsubota, *Phys. Rev. B* 91, 184504/1-12 (2015).
93. ©“Carbon Nanotube Terahertz Detector”,
X. He, N. Fujimura, J. M. Lloyd, K. J. Erickson, A. A. Talin, Q. Zhang, W. Gao, Q. Jiang, Y. Kawano, R. H. Hauge, *F. Léonard and *J. Kono, *Nano Lett.* 14, 3953-3958 (2014).
94. “Mutual information reveals multiple structural relaxation mechanisms in a model glassformer”,
A. J. Dunleavy, K. Wiesner, R. Yamamoto, and *C. P. Royall, *Nature Comm.* 6, 6089/1-8 (2015).
95. ©“Dynamic Compression of Single Nanochannel Confined DNA via a Nanodozer Assay”,
A. Khorshid, P. Zimny, D. T.-L. Roche, G. Massarelli, *T. Sakaue, and *W. Reisner, *Phys. Rev. Lett.* 113, 268104/1-5 (2014). [Editors' suggestion に選出]
96. “Multiple patterns of polymer gels in microspheres due to the interplay among phase separation, wetting, and gelation”,
*M. Yanagisawa, S. Nigorikawa, T. Sakaue, K. Fujiwara, and M. Tokita,

Proc. Natl. Acad. Sci. USA 111, 15894-15899 (2014). [日経産業新聞、科学新聞に解説記事掲載]

97. “Spin-superflow turbulence in spin-1 ferromagnetic spinor Bose-Einstein condensates”,
*K. Fujimoto and M. Tsubota, *Phys. Rev. A* 90, 013629/1-7 (2014).

他、国際誌(査読有)102本 計199本、国内誌 24本

書籍:

1. 「三次元ティッシュエンジニアリング～細胞の培養・操作・組織化から品質管理、脱細胞化まで～」(編)
「原子間力顕微鏡を用いた細胞レオロジー特性の計測(第1章・第3節)」岡嶋孝治, NTS(2015).
2. 「Open Questions on the Origin of Life (OQOL)—Introduction to the Special Issue」Yutetsu Kuruma
and P. L. Luisi(編) *Origins of Life and Evolution of Biospheres*(2015).
3. 「生体膜の分子機構リピッドワールドが先導する生命科学」梅田真郷(編) “リピッドワールドの物理—脂質ベシ
クルの形態とダイナミクス” 佐久間由香、今井正幸, 化学同人(2014), 117-152.
4. 「粘菌 偉大なる単細胞が世界を救う」(編) 中垣俊之, 文春新書(2014).
5. 「Artificial Life 14」(編) “In Vitro Reconstruction of Functional Membrane” Yutetsu Kuruma,
Hideaki Matsubayashi, and Takuya Ueda, MIT Press(2014), 963-964.
6. 「物理学ガイド」日本評論編集部(編) “生命現象の物理学—生物行動の運動方程式をめざして—” 黒
田茂、中垣俊之, 日本評論社(2014), 189-216.
7. 「キリンの斑論争と寺田寅彦」松下貢(編) “割れ目” 佐野雅己, 岩波書店(2014), 63-79.
8. 「現象数理学入門」三村昌泰(編) “生命情報処理の現象数理学—粘菌の迷路解き—” 中垣俊之, 東京大学
出版会(2013), 27-46.
9. 「科学の指針シリーズ 超分子の化学」菅原正, 木村榮一(編) “まえがき、第一章 超分子化学とは、第二章
水素結合による超分子構築(共著)、第三章 ファンデルワールス相互作用による超分子構築(共著)、第四章
電荷移動相互作用による超分子構築、第六章 生体内で機能する超分子” 菅原正, 村田滋, 堀頭子
裳華房(2013), 1-133. 173-211.

特許:

1. 吉川研一「個体物体を運動させる方法及び装置、及び、送液ポンプ」 PCT/JP2015/61985(外国)
2. 吉川研一「上皮間葉転換阻害剤及び癌転移治療剤」 2015-053282(特願・日本)
3. 吉川研一「レーザーを用いた細胞の配列方法」 2014-184193(特願・日本)
4. 濱田 勉、水野 志野、執行 航希「ナノ物資の凝集をコントロールする方法およびナノリスク評価方法」
2014-167052(特願・日本)
5. 岡嶋 孝治、高橋 亮輔「細胞の複素弾性率の計測方法および計測システム」 2014-136721(特願・日本)

公開シンポジウム、研究会、若手勉強会 : 主催 13 件、共催 12 件

ホームページ : <http://sfs-dynamics.jp>

アウトリーチ活動 :

<第1回公開シンポジウム 非平衡物理学の挑戦 —物理から生命への架け橋—>

日時:2014年2月15日(土)13:00-16:30 場所:東京大学小柴ホール

参加者:大学生 59名、高校生 5名、一般 38名、計 102名

日本学術振興会「ひらめき☆ときめきサイエンス」4件、高校への出張講義 26件など、計 62件

A02-001 長屋智之が「ひらめき☆ときめきサイエンス推進賞」受賞

メディア報道 35件

6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

研究組織と各研究項目と連携状況は以下の通りである。

A01 班

1. 分子モーターの理論モデル：川口 (A01-003)、佐々 (A01-001)、沙川 (A01-002)

可逆分子モーターである F1-ATPase の内部散逸について、公募研究の宗行らの実験結果を説明するアロステリック機構を理論的に提案した。この結果は論文として出版された。Kawaguchi, Sasa, and Sagawa, Biophys. J. 106, 2450 (2014). 今後、宗行 (A04 公募) らは、この提案が予言する新たな結果について実験的検証を行ない、提案する機構が成り立つかどうかをはっきりさせる予定である。

2. 量子伝導ゆらぎ：小林 (研) (A01-002) と橋坂 (A01 公募)

量子伝導体における非弾性散乱を非平衡電流ゆらぎ測定によって検出する新規手法について議論しており、量子効果のエレクトロニクス応用へ向けた素子・システム提案を目指している。また、非平衡定常状態における非線形伝導や電子系の有効温度について、公募研究の中村が AdS/CFT 対応を用い計算する。その実験的検証の可能性について、小林や河野が議論をすすめる、標準的な非平衡統計力学の立場から、齊藤 (圭) や佐々が具体的な計算を行おうとしている。

3. シア流の下での粒子懸濁液のレオロジーと可逆・不可逆転移：佐野 (A01-003)、山本 (A04 公募)

シア流の下での粒子懸濁液のレオロジーおよび可逆・非可逆転移に関して、山本、芝と共同研究を行ない、可逆・非可逆転移に伴い弾性が発生するメカニズムとそれに関わる流体力学効果を明らかにした。

3. 非平衡環境における微粒子のゆらぎと輸送：佐々 (A01-001)、佐野 (A01-003)、喜多 (A01 公募)

温度勾配下で物質が輸送される現象であるソーレ効果に関して、高分子とコロイドの共存下で生じる特異な振る舞いに関して、佐野と公募研究の喜多が共同研究を行っている。その次の展開として、喜多と公募研究の岡嶋は温度勾配下の細胞・組織の流動性を実験的に研究する計画を検討中である。一方、理論的には、宮崎と佐々はソーレ効果を非平衡統計力学の立場から再検討し、主要な効果による現象の分類を試みようとしている。さらに、その問題に関連して、化学反応で駆動されるアクティブな環境やガラス的な環境における微粒子の運動にも焦点があてられつつある。実験的には既に水野がいくつかの結果を提示しており、佐々、中川、宮崎、吉野が理論的に研究する準備をしている。

4. アクティブマターの集団運動：佐野 (A01-003)、永井 (A01 公募)、西坂 (A03 公募)、濱田 (A03 公募)

公募研究の永井と佐野は大腸菌の長さを制御することで粒子のアスペクト比の変化による集団運動の転移挙動解明を目指している。さらに、永井、佐野、および、公募研究の西坂は、ガラス面状に固定されたキネシンに駆動される微小管運動を解析している。関連して、球面上で起こる自走粒子の集団運動の実現を目指し、永井と公募研究の濱田は水中油滴の上に固定されたキネシンに駆動される微小管の運動を観察している。

5. 非平衡普遍性クラスの探索：佐々 (A01-001)、竹内 (A01-003)

時空カオスを示す代表的な系である Kuramoto-Sivashinsky (KS) 方程式のゆらぎが長波長極限では Kardar-Parisi-Zhang 普遍クラスに従うのではないかとする予想 (Yakhot 予想) の正否を解決するため、竹内と佐々は数値実験と非平衡恒等式によるアプローチで研究を行う予定である。この問題は、1次元異常熱輸送現象における Kardar-Parisi-Zhang の界面成長ダイナミクスの役割を明らかにすることを目指した齊藤と笹本の研究とも密接に関係する。

A02 班

7. せん断流下における非ニュートン流体中の異常拡散 (A02 折原-A03 好村)：せん断流下ではニュートン流体中に分散した粒子は流れの方向に拡散を増大させることは良く知られているが、最近折原は非ニュートン流体中では流れに垂直な方向にも拡散が増大することを見出した。本研究では、好村と協力してこの現象の理論的な解明を行う予定である。

8. 量子流体の層流-乱流転移に関する研究 (A02 高橋、小林 (未) -A01 竹内)：乱流状態は代表的な非平衡現象であり、量子流体の系では外部揺動の下、渦糸乱流が実現する。しかし、層流-乱流転移といった非平衡臨界現象については未解明であった。本研究では、量子流体の層流-乱流転移の普遍性を明らかに

にすることを目的に研究を実施中である。平成26年度は、量子流体の実験結果を定量的にもよく表現する Gross-Pitaevskii 方程式を数値的に解くことによって、すべての独立な臨界指数を測定し、それが、3次元の異方的浸透現象(directed percolation: DP)クラスに一致することを見いだした。

9. パターン形成に伴う表面張力変化のその場観測に関する研究 (A02 北畑-A03 豊田): 化学振動反応である Belousov-Zhabotinsky 反応溶液において、化学波が伝播するときの界面張力の変化をレーザー準弾性散乱により測定した。その結果、気液界面ではほぼ化学波の進行に伴う色の変化と一致して、界面張力が変化することがわかった。一方、油水界面における測定においては、化学波の進行よりも遅れて界面張力が変化することが明らかとなった。この現象について、界面活性をもつ鉄触媒の界面への吸着脱離の時定数を考えることにより議論した。

10. 油滴の自発運動と変形の相関に関する研究 (A02 北畑-A03 豊田、A03(公募)義永): 界面で反応することにより、界面での界面張力を変えて運動する油滴系が知られている。これまで、油滴が変形することなくほぼ球形を保ったまま運動することが知られていたが、今回、その油滴系で運動とともに変形する系が観察された。そこで、運動と変形のメカニズムの相関について実験画像から解析し、そのメカニズムを流体系をベースとして議論することを試みている。

11. 2次元軸対称な系でのアクティブマターの運動に関する研究 (A02 北畑-A03 (公募) 義永): 円形領域に閉じ込めた場合や中心力ポテンシャルが存在する場合など、2次元軸対称な系で動き回る自己駆動粒子は回転運動または振動運動をすることが様々な実験系で報告されている。それらの系ではどのようにして回転運動または振動運動が選ばれるか興味深い。そこで、2次元軸対称な空間内の自己駆動粒子の運動を記述する一般的なモデル力学系を構築し解析することで、回転解と振動解の存在とその安定性条件を得た。

12. マランゴニ効果による輸送現象に関する研究 (A02 北畑-A03 (公募) 義永): 樟脳粒など界面活性を持つ粒子を水面に浮かべると樟脳分子が溶けだし、マランゴニ対流が発生する。そのため、バルク中の拡散と比べて、水面で分子は非常に速く広がる。そこで、樟脳の濃度勾配によるマランゴニ効果を拡散係数に組み込めないかと考えた。また、樟脳粒の運動のモデルとの関係についても議論する。

13. 脂質反応場の再構成系に関する研究 (A02 澤井-A03 豊田): 「脂質反応場の再構成系に関する」研究で、リポソームならびに平面膜上に脂質シグナルの自己組織化パターン形成を試みる。

A03 班

14. 非平衡環境下における微小粒子のゆらぎと抵抗に関する研究: A03 木村・水野グループは外場による非平衡駆動下におけるコロイドやバイオマターのマイクロレオロジー研究(実験)を進めている。巨大な揺らぎや流動の存在下で、これらの物質が示す特異な性質・非平衡挙動を理解するためには、非平衡統計理論の発展が不可欠であるが、実験と比較可能な形式でのものは殆ど皆無であり、A01 佐々グループとの共同研究を計画している。

15. 真性粘菌最小構成体における原形質流動下のマイクロレオロジー: A03 木村・水野グループは外場による非平衡駆動下における細胞内環境におけるマイクロレオロジー研究(実験)を進めている。A02 折原・中垣グループでは基礎的な生命活動に不可欠な原形質流動を発現する粘菌最小体を開発しており、それを利用して原形質流動下における粘菌のメカニクス実験を行い、原形質流動の発現メカニズムや運動・形態との関連性を調べている。

16. DNA の膜局在化が誘起する人工細胞の変形モード多様性: A03 菅原グループで見出した DNA 複製とベシクル自己生産の連携には、増幅した DNA がベシクル膜内でカチオン性触媒分子と形成する複合体が重要な役割を担っている。A03 豊田グループとの共同研究で見出した、DNA 複製後に添加する膜分子前駆体のタイミングにより生ずる、ベシクルの変形モードの多様化の要因を、A03 今井グループの3次元共焦点顕微鏡観察を通じて明らかにしている。

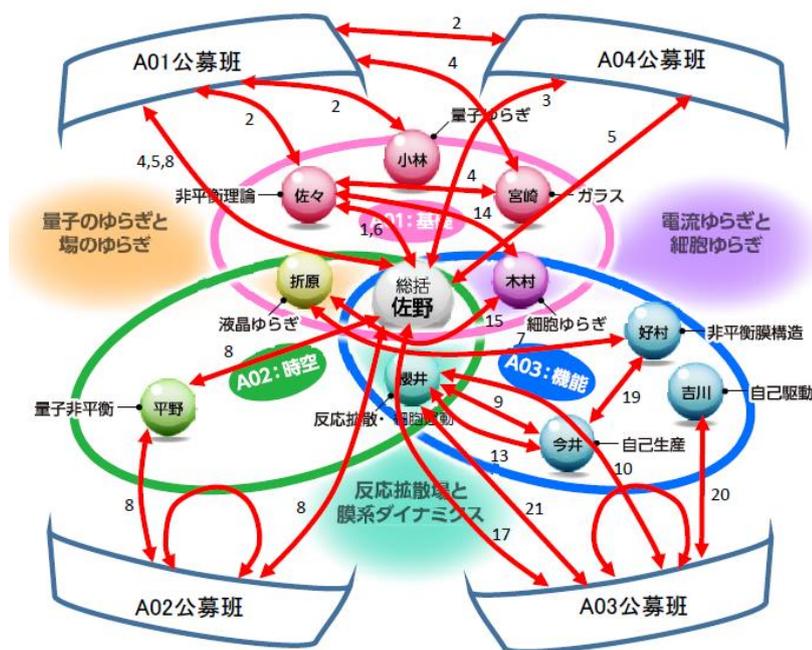
17. ヒト造血幹細胞の骨髄内での形状ゆらぎと遊走に関する研究: A03 (公募) 田中グループが行っている、ヒト造血幹細胞の骨髄ニッチモデルへの接着力計測の研究を展開し、接着細胞の形状ゆらぎと運動のモードを外場(ケモアトラクタントである SDF1 や臨床薬剤)のある系・ない系について、A01 佐野グループが現在研究している理論モデルを用いて計算しており、実験の論文一報が Sci. Rep. 5, 9370 (2015) に掲載。

18. 両親媒性分子の分子集合体の形態変化に関する実験とシミュレーションによる研究: A03 野口グループが開発している動的三角格子膜模型・散逸動力学法によるシミュレーション手法を駆使して、様々な条件下でのベシクルの形態の光学顕微鏡観察（今井）、化学反応下での界面活性剤集合体の形態変化の実験（A03 菅原・豊田）を再現し、その物理的な機構を明らかにする研究を進めている。

19. 繊毛・鞭毛運動の観察と理論モデルによる定量的理解: A03（公募）内田グループでは、生体系が示す様々な繊毛・鞭毛運動の定量的な理論モデルの構築を行っており、これらの運動の実験的研究を進めているグループとの連携研究が進んでいる。A03（公募）西坂グループとは、単離したマウス気管繊毛のビーティング運動・アーキアのべん毛の回転を用いた遊泳運動の測定を行い、理論モデルの予測と比較することにより定量的記述を進めている。また、A03（公募）岩楯グループとは、ゾウリムシ繊毛を用いて、繊毛の長さが集団運動（メタクロナル波）に与える影響を調べている。

20. ヒト新生児・成人の赤血球の形状ゆらぎと敗血症に関する研究: A03 吉川・市川グループと A03（公募）田中グループは共同で微小流路と細胞形状ゆらぎのモード解析を組み合わせて、毒素ストレスに晒されたヒト赤血球の力学特性（曲げ弾性、表面圧、細胞骨格とのカップリング係数）の変化を定量化している。特に、敗血症が生命の危機につながりやすい新生児の赤血球（ハイデルベルク大学医学部新生児科との共同研究）と成人のそれを較べることで、新薬候補の機能の評価につなげる。

21. アクチン波と細胞膜揺らぎに関する研究: 細胞力学が専門の A03（公募）岡嶋グループは、細胞内での化学反応波と細胞運動の関係を研究する A02 澤井グループと共同で、細胞に普遍的に存在するアクチン波と細胞膜揺らぎとの関係に着目し、アクチン波と細胞膜揺らぎの同時測定により両者の時空間相関を解明している。



本新学術領域の組織図と連携研究のネットワーク図

(ここに記載した 21 の連携以外にも合計 39 件の共同研究が進行中または計画中である。)

7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ程度）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

本領域では、若手育成のために以下のような取組みを行っており、着実な効果が得られている。

1) 若手育成のための勉強会の開催

若手育成のために、中堅研究者をメンターとし、若手が中心になって企画、運営する勉強会を開催している。講師は、シニアから中堅研究者に加え、最新の研究を行っている大学院生が務める場合もある。これまでに、若手勉強会「非平衡統計力学の基礎理論」（2014/8/6-8、慶應大学、参加人数 109 名）、チュートリアル：「ゆらぎの定理：過去」（2014/3/4、東京大学、参加人数約 70 名）、若手研究会：「ゆらぎの定理：現在と未来」（2014/3/14、東京大学、参加人数約 80 名）が開催された。これらの勉強会は、大学院生達が研究の最前線の問題に触れて研究に役立っていると同時に、若手自身が企画、講演することで成長し、力をつけるのに役立っている。また、共催で非平衡ゆらぎとアクティブマターに関する国際冬の学校（2015/2/4-17、京都大学基礎物理学研究所、参加人数 69 名、うち海外からの参加 34 名）を開催した。今後はソフトマターの最前線に関する若手勉強会を企画しており、領域内の若手の融合研究を促進することをねらっている。

2) 若手中心の企画による国際会議開催

若手中心の企画による国際会議「Interface fluctuations and KPZ universality class - unifying mathematical, theoretical, and experimental approaches」（2014/8/20-23、京都大学基礎物理学研究所、参加人数約 75 名、うち海外 25 名）を開催した。この国際会議は、成長する界面ゆらぎに関する数学・理論・実験の研究者が一堂に会した世界初の会議であり、各分野の参加者から高い評価を得た。

3) 若手の他研究室への派遣プログラム

主として大学院生を対象に、領域内で関連する研究テーマを実施している他大学の研究室へ派遣し、その旅費・滞在費を総括班が援助する制度を実施している。これまでに、5 件（4 名延べ 85 日）の派遣を支援し、その結果は共著論文発表などの研究成果にもつながっている（Kubo et al. *Phys. Rev. E* **91**, 052905 (2015)）。

以上の取組みの成果は、若手の受賞やアカデミックポストへの就職の増加にも現れている。

・研究グループ内の学生の受賞（ポスター賞は除く）：12 件

根本孝裕(佐々研) Springer Thesis Prize、伊藤創祐(佐野研) Springer Thesis Prize、東京大学理学系研究科研究奨励賞、川口喬吾(佐野研) 東京大学理学系研究科研究奨励賞、尾澤 岬(宮崎研) 筑波大学数理学部物理科学科研究科研究科長賞、藤森大平(澤井研) 東京大学広域科学専攻奨励賞など、他 6 件

・若手スタッフによる受賞：13 件

笹本智弘(A01-003) 久保亮五記念賞、小林研介(A01-002) 日本学術振興会賞、田中求(A03 公募) シーボルト賞、佐久間由香(A03-001) 東北大学理学部物理系同窓会泉菘会奨励賞など、他 9 件

・学生・ポスドクの就職状況

研究グループに属する大学院生やポスドクで、助教・特任助教などアカデミックポストに就いた者：8 名
松尾貞茂(小林研 PD) → 東京大学物理工学専攻助教、瀧川佳紀(折原研博士課程修了) → 立命館大学理工学部物理科学科助教、中山洋平(佐野研博士課程修了) → 中央大学理工学部助教、他 5 件

・若手スタッフの昇進または異動：8 件

竹内一将(A01-003) 東京大学大学院理学系研究科助教 → 東京工業大学大学院理工学研究科准教授、石原秀至(A02-003) 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、沙川貴大(A01-002) 東京大学大学院総合文化研究科准教授 → 同工学系研究科准教授、他 5 件

8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

本領域では、総括班で実験設備や装置を購入することはしていないが、以下に、本領域研究実行中に購入された装置で単価が1千万円以上の装置を列举し、その利用・運用状況と効果的活用の可能性について述べる。

1. 電子線描画装置（A01-002 小林研介、大阪大学）

日本電子・JSM-7100F：3990万円

電子線をパターンに合わせて走査することにより、微小な固体素子を作製するために用いられる装置であり、公募班の橋坂グループとの共同研究にも使用し、研究費の効果的な利用に努めている。

2. 流動下観察ステレオ顕微鏡（A02-001 折原宏、北海道大学）

ステレオ顕微鏡（900万円）+レオメーター（900万円）（単体でなく組み合わせたもの）

流動下での微粒子の3次元位置測定とレオロジー測定が同時にできる装置であり、シア下でのコロイド粒子のゆらぎ測定に用いている。領域内の共同研究の希望により測定試料を持ち込んで利用可能である。

3. 原子力間顕微鏡（A02-003 澤井哲、東京大学）

NanoWizard3（JPK InstrumentsAG・NW3-T08）14,523,600円

倒立顕微鏡ステージ上に設置し、原子間顕微鏡像の取得による細胞膜形状のゆらぎの測定と、微細加工により作成したチャンバーの表面形状の評価のために使用している。

4. ハイスピードカメラ（A03-003 木村康之、九州大学）

vision research・Phantom v1211M 12,538,800円

A03班の研究課題「非熱的に駆動されたバイオマターの非平衡動力学」において、多粒子の同時高速追跡のために使用している。

5. 領域内若手研究者派遣プログラムを設けているが、これは若手研究者の支援とともに、領域以内の設備の有効利用にも寄与している。

例えば、市川研の学生の今井研への20日間の派遣において、今井研で開発したベシクルの立体形状測定装置を用いて実験を行った。今井らは共焦点顕微鏡を用いた3D測定から、立体形状の膜面を定量的に解析する手法を開発してきている。一般に、膜の3次元形状の数値化は立体物のそれより難易度が高く、それ自体が独自の解析手法となっている。吉川グループの市川は脂質膜小胞の経時的な変形挙動の研究を行っており、今井研の装置を用いることで、定量的な解析が可能となった。

9. 総括班評価者による評価（2 ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

総括班評価者①蔵本由紀氏（京都大学名誉教授）からのコメント

領域代表者の広い視野と高い見識に加え、各分野の最前線で活躍する強力なメンバーを揃えた本領域研究は、当初の目標を着実に達成しつつあるように思われる。領域研究会等に参加してとりわけ印象深かったのは、新しい分野の開拓にけるメンバーの熱意、メンバー相互の敬意、研究者として公正で開かれた態度である。ともすれば成果主義、競争主義に明け暮れがちな我が国の昨今の科学研究環境の中にあってこれはまことに清々しく、基礎科学分野にこのような文化がしっかりと根付いていることは我が国の科学技術研究の将来に大きな希望を感じさせるものである。

本研究領域の採択に至るまでのさまざまな試行錯誤の末に、「非平衡ゆらぎ」と「構造」という中心軸を共有しつつも、「非平衡ゆらぎの基礎理論とそれに関連する精密実験」「ゆらぎと構造との交錯」「機能発現、特に生命現象におけるそれへの関わり」をそれぞれ主テーマとする3班構成に全体を組織し、班間のさまざまな連携を可能にする仕組みを導入することを通じて、きわめて広い分野を含む本領域研究にメリハリと統一感を持たせることに成功していると思われる。公募研究の募集方法や各種勉強会の開催等を通じて若手研究者の活動と育成と支援に十分な配慮がなされていることも評価できる。

本研究領域の大多数のメンバーは統計物理学分野に属する。本研究は、いわゆる「モノ離れ」による先鋭化が切り開いた非線形科学や複雑系科学の諸成果を取り入れつつも、非平衡ゆらぎの理論的ブレークスルーによるゆらぎの新しい見方を取り入れ、ソフトマターをはじめとする現実の物質的基盤から遊離しない姿勢を堅持することで物理学の本流に回帰し、非平衡統計物理学の新しい黄金時代を切り開きつつあるように思われる。

一評価委員として生命科学への今後の関わりに特に関心がある。いうまでもなく生命現象の科学的理解にはさまざまな側面がある。その中で、本領域研究のようなアプローチは「新しい生物物理学」と呼びうるようなアプローチではないだろうか。物理学は普遍法則の発見が命である。多様性に関わる場合でもそれは多様性の中に普遍的構造を確認しようとするからである。そのように性格づけられた物理学は、生命現象の理解においてどのような役割が果たすことができ、どのような限界をもつであろうか。領域内外の研究者との議論を通じて今後この点が明らかにされることを望んでいる。

総括班評価者②太田隆夫氏（京都大学名誉教授）からのコメント

私は、第1回領域研究会（2013年12月）の他に、冷却原子研究会（2014年11月）、「細胞力学と細胞運動の協奏」研究会（2014年12月）、研究会「アクティブ・マター研究の過去・現在・未来」（2015年3月）、および、第2回公開シンポジウム（2015年5月）に出席し、研究の進捗状況と研究連携の現状を把握した。興味深い研究発表が多く、また、自然な形でレベルの高い共同研究が進行しており、楽しく拝聴した。

非平衡系研究の目的は非平衡揺らぎの基本原理を確立し、その効率的制御と非平衡構造形成の仕組みを明らかにすることによって、長期的には社会に貢献しようとするのであろう。普遍的基礎法則を探るため、広く生命系から量子系までを対象とするのは必然であり、そこに本新学術領域の意義がある。

これまでの活動において、特に若手実験研究者によって世界的にみても第一級の研究が行われていることは高く評価したい。また、実験と理論の連携において理論家が実験側に重心をおいて共同研究を実施しているのも好感がもてる。

「ゆらぎと構造の協奏」は理論の立場からは「非平衡ゆらぎ」と「非線形ダイナミクス」の協奏の側面をもっている。これをメソスケールでつなげようとする観点でみると、生体細胞実験と非平衡ゆらぎ理論グループ間に少し距離があるように感じられる。生命を理解する鍵は非平衡ゆらぎにあるとのお考えを領域代表者はお持ちのようであるが、それが学生を含む関係者・メンバーにさらに浸透し、そこから新たな発展があることを期待する。

総括班評価者③鹿兒島誠一氏（明治大学理工学部特任教授、東京大学名誉教授）からのコメント

この領域研究は、広範な個別分野にまたがるものであるが、各研究グループの成果は着実に挙げられている。しかし、個々の成果の集合だけではなく、領域の趣旨に沿った発展が求められる。このために、班にまたがるテーマ設定と、具体的な連携研究の仕組みが工夫されており、現在までのところ、いくつかの目立った成果を上げつつあると思われる。領域代表と総括班では、今後さらに、新領域そのものを体現する成果を生み出す努力を続けられたい。領域の運営や広報活動は着実に進められていると見受けられる。今後、基本的にこの方向で領域研究を推進すればよいと思われる。

以下では、今後のさらなる成果に向けて、いくつかの提言を記す。

(1) この領域の趣旨を踏まえた、相互理解の深化

研究会などにおいて、それぞれの研究の背景と研究の趣旨を初歩的な段階から解き示したうえで、具体的な成果を発表することが重要と思われる。今までもなされてきたことであるが、このことの重要性はやはり指摘しておきたい。

(2) 領域の趣旨をよく体現する研究成果の明示

成果の公表において、論文誌と一般報道での公表に加えて、領域の趣旨を周知することを目的として、さまざまな科学誌への投稿・寄稿の努力が求められる。また、領域内でそのような研究成果に対して、たとえば「領域賞」を設けるなど、研究班員が目指すべき方向性が明示されることが望ましい。

(3) 生命科学との関係の深化

よく言われることであるが、生物学・医学の分野と、生物物理の分野との距離は、なお相当に遠い。これを縮めるには具体的な研究成果を挙げるしかないが、そのためには、たとえば生物学・医学の研究者と交えて、領域内の主要分野の研究者が揃ったパネル討論などの機会が設けられるとよいのではないかと考える。

総括班評価者④宝谷紘一氏（名古屋大学・大学院理学研究科・名誉教授）からのコメント

この領域が取り扱う学問内容は大変に広い。したがって、領域代表者は広汎な学術領域を俯瞰する能力と度量が必要になる。筆者は、外部評価委員に任命された故に佐野雅己代表を初めて知ったのであるが、何度か領域の会議に出席して、彼はこの領域にはぴったりの人材であると認識した。

非平衡系における普遍法則を見つけ出すという難解な課題に挑戦するためには、理論だけでは不可能であり、実験データの積み重ねを通じて突破口を見つけることが肝要である。この領域の構成メンバーは、3つの班ともに理論家から実験家まで広く連続的に分布しており、研究推進には適切であると考えられる。

例えば、大腸菌走化性のシグナル伝達の解析に、情報熱力学の新しい成果を応用し、シグナル伝達のノイズに対するロバストさ（頑健さ）の上限を明らかにしたり、その情報・熱効率を数値的に示すことが出来たのは、多様な人材の交流成果であると考えられる。筆者の専門に近い A03 機能班についても、リポソーム（脂質膜小胞）の形態ゆらぎの計測と理論的解析が共同して、成果を生み出す予感がある。

古来、いかなる組織もその運命を握るのは組織のトップである。この領域の成果報告会でのポスターセッションはいつも時間いっぱい議論が盛り上がっている。そのメンバーの多くが、助教や院生クラスの若手が主体である。彼らに混じって自分でポスターを貼り、説明している佐野代表の態度は新鮮である。トップの態度を見ていると、若手が遠慮なく自由に意見を言っているのが納得出来る。若手教育の見本であると思う。

10. 今後の研究領域の推進方策（2ページ程度）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

領域発足から2年が経過し、3年目の研究がスタートしている現時点（2015年6月）で見ると、総括班の立場からは概ね着実に研究が進んでいると考えている。これらの成果の一部はある意味、これまでの研究成果の上に積み重ね、築き上げてきた結果であり、発足当時からある程度見込んでいたものでもある。一方で、発足当時からは予想もしていなかった新たな発見や、今後の展開が大いに期待できる成果も多く出てきている。多体量子液体系におけるスピン流ゆらぎの検出、量子流体と古典流体における非平衡相転移の発見、人工ベシクル系で様々の化学反応や応答を引き起こすことが可能となったこと、ゆらぎと切り離すことのできない複雑な生命現象の中でも、物理的・定量的に測定し、理論との比較が可能な部分が明確になりつつあることなどは、当初の予想を超えた嬉しい展開であった。

これらを踏まえ、3年目以降の領域研究の推進方策としては、次の事柄に注意して運営を行っていきたいと考えている。

(1) 理論と実験の連携の強化により、現在産み出されつつある成果をさらに発展、深化させること。

物理学、特に統計力学や物性基礎論に近い分野で出つつある研究成果は、数理的・理論的にもしっかりしており、世界的にもトップクラスの成果が出つつあるので、これをさらに進めることは当然である。一方、海外などと比べてこの分野の実験家が極端に少ないのも日本の特徴であり、今後は、実験との連携を深めることで一層の発展を促すとともに、若手の実験家の育成にも努めていきたい。またこのことは、実験を良く理解する理論家の育成にも繋がると考えている。

(2) 生命現象におけるゆらぎの役割を実験的、理論的に明らかにすること

本領域の中でも、定式化し物理にすることが最も難しい課題を抱えているのが、生命現象に関連した研究項目である。もとより、生命現象全てが物理学や統計力学の手法で解き明かせると考えるのは誇大妄想に近く、5年間という領域研究の期間でできることの限界は当然存在する。従って本領域では、生命現象を扱うことを決めるにあたり、次の2つに焦点を絞って申請を行った。その第一は、ソフトマター科学を基盤として、物質の集まりが生命としての機能を持つに至る機序を人工細胞（プロトセル）を構成することで理解することであった。そこには当然、代謝などの非平衡条件が含まれている。第二は、細胞内の自発ゆらぎや細胞の自発運動、走化性などの外部情報に基づく運動などの物理特性、またそれらの結果としての集団運動を実験と統計物理学から明らかにすることである。前者は、細胞を人工的に創ろうとする合成生物学の世界動向と、後者は何らかのエネルギー変換を行いながら運動する素子集団を統一的に扱おうとするアクティブマター研究の世界動向とも関連している。総括班や各計画研究の立場からは、これらの動向も注視しながら、これまでも各種の国際会議の共催や、冬の学校の開催などでこの分野への注力と研究者育成を同時に行ってきた。今後もこれらの研究会や研究者育成は続けてゆく必要がある。一方、本領域研究から、世界初の成果を発信し続けていくためには、領域内において一層の熱意を傾けた議論と努力が必要であると考えている。A03班は生命機能が発現する物理を明らかにすることを目的としているが、その鍵は生命現象における非平衡ゆらぎの役割を理解し、それを実験で定量化し、理論化することにあると考える。この点で、これまで複雑すぎて物理の対象とすることが敬遠されてきた、細胞内の走化性反応やシグナル伝達の実態とメカニズムが、本領域研究内で行われた、良く制御された実験により定量的に解明され始めたことは特筆すべき進展と考える。これらの実験とシグナル伝達に関する情報熱力学の理論や、アクティブマターの理論グループと実験グループの議論を活発化することで、今後更なる発展が期待できると考える。これまでも、2週間にわたり滞在型の非平衡ゆらぎとアクティブマターに関する国際冬の学校を開催（京都大学基礎物理学研究所との共催、参加人数69名、うち海外からの参加34名）するなどの活動を行ってきたが、今後も海外の招待講演者も含めた研究会やワークショップを開催することや、ブレイクストーミングなどを行うことを計画している。

(3) 公募班と計画研究の連携を強化すること

公募班の中でも、すでに注目すべき成果を上げている研究課題が多く存在する。一方、まだ加わって1

年しか経っていないため、計画研究メンバーとの共同研究が具体的な成果となるには、今少し時間を要するものと思われる。そのため、班を超えたテーマで公募班も含めて複数回の研究会を開催し、議論を深める努力を行ってきた。その成果もあり、すでに公募班と計画班の間で複数の共同研究がスタートしている。特に、計画研究だけでは人材も資源も不足しているテーマとして、固体量子系の実験、冷却原子系の理論、アクティブマターなどの生物と物理の問題をつなぐ理論研究、物理学者だけではできない生物や医学とつながる生物実験の研究などが公募で選ばれたことは幸いであった。今後は、これらの公募研究と計画研究の連携を一層強化するとともに、公募メンバーに本領域の意義と最新成果を浸透させてゆく必要がある。

以上の方策を実現するため、今後は以下の活動を行っていく予定である。

- 国際会議” International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015 (SFS2015)” 2015年8月20日(木)～23日(日) 京都大学芝蘭会館
23件の講演、129件のポスター発表を予定している。招待講演者も含めて海外から31名の参加登録。
- 国際ワークショップ “International Workshop on Challenge to Synthesizing Life”
2015年8月25日(火)～26日(水) 箱根
- 新学術領域「ゆらぎと構造」＋「分子ロボティクス」合同研究会
2015年6月27日(土) 東京大学
- 物性領域合同研究会
2015年、2016年、2017年秋頃
- 第2回若手勉強会
2016年3月上旬 東京
- 第3回領域研究会
2016年6月頃 九州大学
- 第2回国際会議 2017年
- 第3回公開シンポジウム 2017年

これ以外にもテーマ別の研究会等、逐次企画していく予定である。特に領域内の共同研究につながるテーマを絞った研究会、勉強会を開催する。また、若手研究者の育成と領域内の共同研究推進のために領域内若手研究者派遣プログラムを引き続き継続する。これらの活動を通して、領域をまとめ、領域内の連携を推進する。

研究成果は領域HPで逐次、日本語と英語で公開するとともに、公開シンポジウム、ニュースレター、毎年度作成する成果報告書によって、発信する。