

領域略称名：ゆらぎと構造
領域番号：2502

平成30年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「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30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

| | |
|--|----|
| 1. 研究領域の目的及び概要 | 9 |
| 2. 研究領域の設定目的の達成度 | 11 |
| 3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況 | 14 |
| 4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況 | 15 |
| 5. 主な研究成果（発明及び特許を含む） | 17 |
| 6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等） | 20 |
| 7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況 | 25 |
| 8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む） | 27 |
| 9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度 | 31 |
| 10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況 | 32 |
| 11. 総括班評価者による評価 | 33 |

研究組織 (総：総括班, 支：国際活動支援班, 計：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究, 公：公募研究)

| 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 総 | 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 |
| Y00 支 | 15K21724 国際活動支援班 | 平成 27 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 | 5 |
| 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 | 4 |
| 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 | 5 |
| 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 | 5 |
| 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 | 山口芸術短期大学・芸術表現学科・ 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 | 4 |

| | | | | | |
|-------------------|--|-----------------------|--------|------------------------------------|---|
| 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 |
| 統括・支援・計画研究 計 13 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 |
| A01 公 | 16H00810 ゲージ・重力対応を用い た非平衡物理学への新 アプローチ | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 中村 真 | 中央大学・理工学部・教授 | 1 |

| | | | | | |
|----------|--|-------------------|--------|---------------------------------|---|
| A01 公 | 16H00813 壁乱流亜臨界遷移の間 欠乱流パターン形成の 大規模DNS解析 | 平成28年度～ 平成29年度 | 塚原 隆裕 | 東京理科大学・理工学部・准教授 | 1 |
| A01 公 | 16H00817 高速量子プローブを用 いた微小系の電子輸送 ゆらぎの研究 | 平成28年度～ 平成29年度 | 大塚 朋廣 | 理化学研究所・創発物性科学研究セン ター・客員研究員 | 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 ミックな時空間パター 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 |
| A02 公 | 16H00794 球形分子会合体からな る液体の構造とガラス 転移 | 平成28年度～ 平成29年度 | 齋藤 一弥 | 筑波大学・数理物質系・教授 | 3 |
| A02 公 | 16H00801 冷却原子を用いた非平 衡孤立量子系の制御と 前期熱化の研究 | 平成28年度～ 平成29年度 | 高須 洋介 | 京都大学・大学院理学研究科・助教 | 2 |

| | | | | | |
|----------|--|-----------------------|--------|---------------------------------|---|
| A02 公 | 16H00804 非平衡状態を舞台とした異常拡散現象の探究 | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 坂上 貴洋 | 九州大学・大学院理学研究院・助教 | 3 |
| 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 兪澈 | 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 |

| | | | | | |
|----------|--|-----------------------|--------|-----------------------|---|
| A03 公 | 16H00791 揺らぐ非平衡構造によるフィードバック制御：べん毛モーターのトルク発生機構の解明 | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 鳥谷部 祥一 | 東北大学・大学院工学研究科・准教授 | 1 |
| A03 公 | 16H00792 アクティブフィラメントの運動の多階層モデリング | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 内田 就也 | 東北大学・大学院理学研究科・准教授 | 1 |
| A03 公 | 16H00793 細胞組織の動力学的理解へ向けた自己駆動粒子の集団運動の解析 | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 義永 那津人 | 東北大学・材料科学高等研究所・准教授 | 1 |
| A03 公 | 16H00796 高分子溶液を内包したベシクルの外部揺動に伴う内部粘弾性と形の揺らぎ | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 柳澤 実穂 | 東京農工大学・大学院工学研究院・特任准教授 | 1 |
| A03 公 | 16H00797 自己成長するプロトセルの形態変化観察と物理学的解析 | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 車 兪澈 | 東京工業大学・地球生命研究所・特任准教授 | 1 |
| A03 公 | 16H00799 ミトコンドリア分裂過程におけるナノスケール力学機械特性の時空間ダイナミクスの検出 | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 渡邊 信嗣 | 金沢大学・ナノ生命科学研究所・助教 | 1 |
| A03 公 | 16H00802 進行度の異なる胃癌細胞の非平衡形状ゆらぎのエネルギー散逸と対称性の破れ | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 田中 求 | 京都大学・高等研究院・客員教授 | 3 |
| A03 公 | 16H00803 ゆらぎを伴う細胞内情報伝達機構の統合的理解 | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 石島 秋彦 | 大阪大学・大学院生命機能研究科・教授 | 1 |
| A03 公 | 16H00805 バクテリア集団運動にみるアクティブ液晶の秩序形成と制御 | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 前多 裕介 | 九州大学・大学院理学研究院・准教授 | 1 |

| | | | | | |
|----------|--|-----------------------|-------|-------------------------------|---|
| A03 公 | 16H00808 バクテリア巨大渦状運動の極性形成メカニズム | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 西坂 崇之 | 学習院大学・理学部・教授 | 3 |
| A03 公 | 16H00809 細胞スケール閉鎖空間内における反応拡散波の物理 | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 藤原 慶 | 慶応義塾大学・理工学部・専任講師 | 1 |
| A03 公 | 16H00811 F1-ATPase によるエネルギー変換と非平衡揺らぎ | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 宗行 英朗 | 中央大学 理工学部 教授 | 1 |
| A03 公 | 16H00816 細胞質流動から迫る細胞質におけるゆらぎから構造が生じるメカニズム | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 木村 暁 | 国立遺伝学研究所・構造遺伝学研究センター・教授 | 2 |
| 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・准教授 | 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 |

| | | | | | |
|-------------|--|-----------------------|-------|----------------------|---|
| A04 公 | 16H00795 超伝導磁束量子系をモデルに用いた界面摩擦現象における非平衡ゆらぎの役割の解明 | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 前田 京剛 | 東京大学・大学院総合文化研究科・教授 | 3 |
| A04 公 | 16H00798 固体素子の非平衡揺らぎ・非線形光応答：ナノ光計測による揺らぎ分光イメージング | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 河野 行雄 | 東京工業大学・未来産業技術研究所・准教授 | 1 |
| A04 公 | 16H00807 量子流体力学における「ゆらぎと構造の協奏」 | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 坪田 誠 | 大阪市立大学・大学院理学研究科・教授 | 1 |
| A04 公 | 16H00815 光の射す方へ：微生物の動線をつくる流体力学 | 平成 28 年度～ 平成 29 年度 | 和田 浩史 | 立命館大学・理工学部・教授 | 4 |
| 公募研究 計 48 件 | | | | | |

1. 研究領域の目的及び概要（2ページ以内）

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、物質と情報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。そのための革新的な実験技術として、(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、マイ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播には、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. 研究領域の設定目的の達成度（3ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、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の達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

【全体としての達成度】

本領域では、統計力学を核としつつ、量子凝縮系、固体物理、ソフトマター、非線形科学などの異分野の実験家と理論家を結集し、「非平衡系の普遍法則」を強く意識した研究を展開した。その意味で、世界的にも例を見ない、幅広い分野と研究対象を包含した研究領域であった。その結果として、凝縮系から生命現象まで、微小なゆらぎと構造を調べるための種々の新しい実験技術の開発が行われ、理論的にも非平衡系の普遍法則に対する理解は格段に深まった。具体的には、①量子系を含む微小な系の非平衡熱力学やゆらぎに関する新規の理論、②情報を含んだ熱力学の拡張と生物学への適用などに関して大きな理論的進展があった。実験では、理論との緊密な連携により、③量子液体のゆらぎと非平衡ダイナミクスの精密定量化、④液晶系における負の粘性の発見、スケールによらない普遍性として、⑤成長界面の形状とゆらぎの普遍性や⑥非平衡相転移としての層流・乱流転移の解明などがなされた。これらの結果から、全体として、当初掲げた目的は、ほぼ達成されたと考える。また、人工物から生物まで、自己駆動粒子の集団を統一的に扱うアクティブマターの研究分野、複製と自己生産、運動の機能を持つベンチクル型人工細胞の研究分野では当初の予想を大きく超えた成果をあげ、これら融合領域の日本における創設の役割を果たした。以下では、運営面および具体的な研究内容に即して、具体的に検証してゆく。

【運営面での目標と達成度】

本領域の主題は「ゆらぎと構造の協奏」であり、従来は別々に進められてきた2つの研究領域、すなわち、“ゆらぎ”に基礎をおき、ミクロからの積み上げにより非平衡系の法則を打ち立てようとする統計力学の世界的な学問動向と、多数要素から構成され、マクロで複雑な非平衡系における自己組織化（“構造”）の学理を、メソスケールまで推し進めることで統合し、凝縮系から生命系に至るまでの非平衡現象に関する豊かで普遍的な科学を発展させることを意図したものである。したがって、サブテーマである「非平衡系における普遍法則の確立」を達成するためには、(i)メソスケールのゆらぎや構造を測定し、制御するための種々のテクノロジーと(ii)非平衡系を一般的に扱うための理論の2つを発展させる必要があった。また、このアプローチの有効性と普遍性を明らかにするためには、(iii)様々な分野に散在している現象たちと研究者群を一つの旗印のもとに結集させ、共通した意識の下で研究する有機的ネットワークを形成することが不可欠であった。その意味で、本領域が採択され、各分野の精鋭を集めてチームを結成した時点で、(iii)の目的は、半ば達成されていたと言えるが、総括班が個々の研究者の自主性を尊重しつつ、様々の研究会や若手支援などの企画と場を提供する事で(iii)の目論見は順調に発展を遂げた。さらに、実験家は、最新の技術を駆使することで(i)の目的を次々と達成した。その成果は、以下の項目(0)で述べるとおりである。また、理論家は存分に想像力を働かせ、新しい理論手法を開発し、情報を熱力学に持ち込み、さらにそれを生物に適用し、あるいは量子力学に基づいて第二法則を証明するなど、まさに獅子奮迅の活躍を見せた（項目(1)参照）。つまり、(ii)の目的も達成された。あとは生まれてくる研究成果を領域全体にフィードバックすることで、その結果に刺激を受けさらに新たな結果が次々と生まれてくるという好循環が形成されたと考えている。それらの相乗効果により、融合的な研究が展開され、広い適用範囲を持つ情報熱力学や非平衡相転移の理解が進み、生物や人工物を含むアクティブマターの研究が進展し、生命機能や人工細胞の研究にまで非平衡系の学理が浸透し始めた点で、目的は十分達成されたと考える（項目(2)、(3)参照、各成果の意義等については5で詳述する）。

【各研究項目の目標と達成度】

(0) ゆらぎと構造を調べるための新規の実験技術の開発：

大きな進展はしばしば新しい実験技術の開発を伴うことが多い。その意味で、本領域の研究テーマに関連して生み出された新しい実験技術について触れて置く事は重要であると考えている。以下に、その例を列挙する。

- ・単電子デバイス、人工原子、ナノチューブなど微量量子デバイスの微小なゆらぎを計測する技術の開発と成熟（小林、橋坂、大塚、河野）
- ・液晶中のトポロジカル欠陥や界面の形成制御（竹内、折原）
- ・自己駆動ヤヌス粒子の遠隔フィードバック制御（佐野）
- ・層流・乱流転移における時空間パターンの大域可視化と同時計測装置（佐野）
- ・液晶の外場応答、レオロジー特性と可視化が同時に可能な実験系の開発（折原、長屋）
- ・冷却原子系におけるスピン自由度と空間構造を制御可能な実験系（平野）
- ・細胞への走化性刺激を自在に制御できるマイクロ流路デバイスの開発（澤井）

- ・オプトジェネティクスによる細胞間の極性の強さのリアルタイム制御（澤井）
 - ・運動する細胞のレオロジー計測が可能な多重フィードバック・マイクロレオロジーシステムの開発（水野）
 - ・回転光ピンセットを利用したコロイド粒子の流体相互作用の計測（木村）
 - ・DNA 増幅と繰り返し自己増殖が可能なベシクル型人工細胞の開発（菅原、鈴木、今井）
 - ・PURE system を用いた膜タンパク質合成法と人工細胞への応用（車）
 - ・ベシクルおよび油滴内での MinE, MinD 反応拡散系によるパターン形成の実現（藤原、柳澤、義永）
 - ・細胞運動、繊毛運動などの外場による応答を計測するための様々のシステム開発（岩楯）
 - ・バクテリアの pill (線毛) の光応答を可視化する実験技術、アーキアの分子モーターの観測（西坂）
 - ・ヘアピン状 DNA のヒステリシスと局所加熱によるマイクロ構造体の制御技術（鳥谷部）
- これらの新たに開発された技術を用いて多くの研究が展開された。

(1) 「非平衡ゆらぎ」の普遍的な法則の探求

申請書では、この第一のテーマの下、要約すると以下のような具体的課題をあげていた。

「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。

具体的には、液晶やエマルションなどの実験系、電流ゆらぎが問題となる半導体メソ構造系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、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とその量子系への展開などの研究を進める。」

これらの熱力学第二法則に関連した非平衡ゆらぎの理論や微小な熱機関の理論に関しては、下記のように様々の新たな成果が得られた。

- ・ベイジアンネットワークで表される系の情報熱力学関係式とその理論の生物への適用（沙川、伊藤）
- ・自律的なマックスウェルの悪魔の情報熱力学形式の定式化（沙川、白石）
- ・孤立した量子多体系における熱力学第二法則の証明（沙川）
- ・量子孤立系における振動外場による熱化現象、Floquet Prethermalization の提唱（齊藤）
- ・熱機関における熱効率と仕事率に関する一般的不等式の証明（齊藤、白石）
- ・熱伝導現象や電流における熱力学的不確定性関係の分類と証明（齊藤）
- ・ゆらぎの性質を利用した流体方程式、蔵本モデルの新たな導出方法の開発（佐々）
- ・ネーター原理によるエントロピーの導出（佐々）
- ・熱力学の拡張による熱伝導系の気液転移の解析（中川、佐々）

総合すると、5年間の研究成果としては予想を上回る成果が得られたと評価したい。ただし、これらの理論は開発されてまだ日も浅いため、その実験的検証については、今後の課題として残されている。

その他、ガラスに関しては以下の成果が得られた。

- ・ランダムピンング液体の理想ガラス転移の発見（宮崎）
- ・ガードナー転移に伴う階層的なシア応答の理論（吉野）

なお、界面ゆらぎと非平衡相転移に関する成果については、5で詳述する。

(2) ゆらぎと構造が交差する現象の探求と解明

申請書では、この第二のテーマの下、要約すると以下のような具体的課題をあげていた。

「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。

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、ゆらぎが顕著となるメソスケールでの反応拡散系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。」

上記の課題に対して、具体的には以下のような成果が得られた。

- ・せん断流下におけるネマチック液晶の非平衡ゆらぎと応答の理論（折原）
- ・シアバンディング時の F-アクチン溶液における配向分布の直接観測（中垣、折原）
- ・液晶電気対流により誘起された負の粘性と履歴曲線の発見（長屋、折原）
- ・スピン遷移を利用した 2 成分のボース・アインシュタイン凝縮体のパターンダイナミクス（平野）
- ・2 種のスピンからなる混合スピノール BEC 系を生成し、スピン間相互作用による誘起される歳差運動の dephasing 及び rephasing の観測に成功（平野）

- ・多成分 BEC のトポロジカルな励起である Skymion の非平衡ダイナミクスの理論計算 (齊藤)
- ・超流動体の層流-渦糸乱流転における Directed-Percolation (DP) 転移の発見 (高橋、小林、竹内)
- ・マイクロ流路を用いて細胞の走化性運動の走化性パラドクスを解決、理論でも解明 (澤井、石原)
- ・細胞の運動と形態変形の関係をフェーズフィールドモデルと光生物学技術で解明 (澤井、石原)
- ・細胞分裂、変形、アポトーシスなどを含んだ細胞シートの連続体理論を開発 (石原)
- ・表面張力効果と拡散場、流体効果等を考慮した自己駆動粒子の理論開発 (北畑)
- ・アクティブなタンパク質を含む膜の流体力学的集団効果を理論的に解析 (小谷野、北畑)

このように、当初掲げた課題に比べて、予想以上の成果を上げることが出来た。中でも、液晶対流系における負の粘性の発見と、細胞運動の非線形ダイナミクスの分子レベルからの理解については、特筆すべき成果が得られたと考えており、5 の研究成果でも詳述する。

(3) ゆらぎと構造の協奏が生み出す自律的機能の探求

申請書では、この第三のテーマの下、要約すると以下のような具体的課題をあげていた。

「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。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。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、ベシクル系による人工細胞系の構築と構造変化の解明、微小空間における反応拡散場と細胞機能との関連、細胞やモデル非平衡物質の応答と非平衡ゆらぎの計測などを推進し、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。」

上記の課題に対して、具体的には以下のような成果が得られた。

- ・走化性を示すベシクルの実現と解析 (今井、佐久間、菅原、豊田)
- ・DNA 増幅と繰り返し自己増殖が可能なベシクル型人工細胞の実現 (菅原、鈴木)
- ・PURE system を用いた膜タンパク質合成法と人工細胞への応用 (車)
- ・粘弾性体中のアクティブな力双極子による異常拡散の理論 (好村)
- ・三つ玉スイマーなど、粘弾性体中のマイクロマシンの遊泳に関する一般理論の構築 (好村)
- ・BAR タンパク質による膜チューブ形成機構の解明 (野口)
- ・化学反応による二重膜の構造変化機構の解明 (野口)
- ・核膜形状に関する計算モデルの構築 (野口)
- ・回転光ピンセットを利用したコロイド粒子の流体相互作用の計測 (木村)
- ・運動する細胞の計測が可能な多重フィードバック・マイクロレオロジーシステムの開発 (水野)
- ・フォースダイポールの集団が作る非ガウス、非レヴィ分布を示す非平衡ゆらぎの理論 (水野)
- ・DNA の折り畳み相転移と遺伝子発現の強い相関を検証 (吉川)
- ・微小な系における化学→運動のエネルギー変換による自己駆動系の実現とその解明 (吉川、市川)
- ・DNA を封入したリポソームの新規作成手法の開発と初期過程の放射光 X 線回折解析 (市川)
- ・アクトミオシン溶液を封入した膜系で自発的に変形する細胞モデルを実現した (市川)

以上のように、第三のテーマに関しても、当初考えていたよりも多彩な現象の発見とその理解に関して多くの成果が得られている。

一方、申請書の時点では、それほど大きく取り上げていなかったが、その後急激に研究が盛んになり、公募研究でも多くの応募と採択があった分野に **アクティブマター** と呼ばれる分野がある。これは、エネルギー変換と散逸を伴いながら自己駆動するコロイド粒子や液滴、細胞集団などの実験系を統一的に扱おうとする学問動向であるが、本領域からも次のような特筆すべき成果が上げられた。

- ・神経幹細胞の集団におけるトポロジカル欠陥が細胞集積や逃避を制御する現象の発見 (川口、佐野)
- ・分子モーター (ダイニン) と微小管の濃厚再構成系における渦構造とその理論的相図の計算 (永井)
- ・変形、反応、拡散、流体等を含むスイマーの理論解析 (義永、北畑、多羅間)
- ・バクテリア集団を用いたネマチック長距離秩序の形成と異常密度ゆらぎの発見 (西口、佐野)
- ・アーキア分子モーターの初観測とその計算シミュレーション (西坂、内田)

以上述べた中でも、非平衡熱力学や情報熱力学、ゆらぎの理論などの多くは、普遍的に成り立つ理論である。また、5 で詳述する成長界面のゆらぎや複数の実験系で確認された非平衡相転移 (DP 転移) はスケールに関係なく成り立つ普遍的な法則である。

3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

研究推進時に特に問題は生じていない。そのための対応策等も特に講じていない。

強いてあげるとすれば、総括班や研究会などの運営と構成員の研究時間確保の両立の問題、領域外の研究者との連携の努力などについて、一定の配慮を行ったので、その点について触れたい。

研究会については、班を横断するテーマで、小さな研究会を比較的頻繁に行い、共通の課題に取り組む研究者間の情報交換や共同研究の足掛かりとなるように努めた。また、各研究者が自主的に提案して、開催するミニ研究会は数多くあり、それらを領域と共催の形にし、開催費や旅費の援助の他、領域内外の研究者が交流できるようなサポートを行った。

新学術領域研究は、ともすれば採択された研究者間のみで閉じた研究会を多く行うだけで、公募研究等に採択されなかったか、あるいは関連分野にありながら事情により、もともと参画メンバーでない研究者に対しては、閉じてしまう形となり、情報が公平に行き渡らないとの批判があることも事実である。そのような弊害があるとすれば、積極的に対応策を講じる必要があると考えられるが、上記のような開かれた研究会との共催で多くの研究会を開催したことは、分野にとってもまた、周辺分野にとってもプラスの効果を生んだと考えている。5年間で主催したシンポジウム、研究会が27件、共催した国際会議や研究会が25件という数字がそのことを物語っていると考えられる。

新学術領域研究は、領域全体が統一的なテーマに取り組むことを強調するあまり、ともすると、全体を統括する立場にある総括班に運営上過剰なタスクと過密なスケジュールを課してしまう恐れがあり、実質的な研究時間の確保との両立は常に大きな問題となる。本領域では、この問題を解決するため、総括班の合意が必要な会議は殆ど、短時間のTV会議で行う事とし、多くの判断や実務は、領域代表と事務責任者がリーダーシップを持って行った。一方、事務的作業や国内外の連絡、会議運営や業績のとりまとめについては秘書業務に、業績のデータ登録と収集等は、Webを経由した外部委託により行うことで、実務作業の分担化を図った。これにより、主要な研究者の研究時間の確保は十分なされたと考えている。また、若手研究者には極力、雑務や業務を割り当てないよう配慮したつもりである。

研究期間中の組織変更は行っていない。あえて述べるとすれば、計画開始直後から世界的にも研究が盛んとなってきたアクティブマターに関する研究テーマに関しては、既存の計画研究では十分に対応するだけの人員と予算も不足したため、公募研究に関連するテーマを設けて公募を行った。その結果、生物物理系を含む他分野も含めて大変多くの応募があり、公平な審査によってアクティブマターに関連する多くのテーマが加わることとなった。班間を繋ぐテーマとしてのアクティブマター研究会は、領域外の参加者も含む共催型を多数回開催した。これは、日本が比較的強い分子モーターや運動系の生物物理学の研究者と非平衡統計力学やソフトマター物理学の研究者、さらには細胞生物学の研究者など、分野を超えた新たなネットワークの形成に役立ったと言える。また、これらの効果により、日本におけるこの分野の研究を活発化するとともに、世界にもその情報を発信することが出来たと考えている。

4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価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指摘を受けた事項への対応状況＞

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。非平衡系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、これらの指摘に対してとった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は当初からあった。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て対応した。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とつなげる研究（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、実際に功を奏したと考える。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」(2015/3/14-1、東北大学を始めとして複数回開催)、(iii)「冷却原子研究会」(2014/1/3、学習院大学、2017/3/16、大阪市立大)。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随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。

採択時に 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：

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、転移の阻害効果が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。また、5年間の計画研究の中では、一研究室で最も多数の論文を出版し、特許

出願数も最多となるなど、最終的に多くの研究成果を生み出した。

＜中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況＞

中間評価結果：【A】判定。総合所見として、

本研究領域は、「非平衡ゆらぎ」と「時空間構造」の別々の側面から行われていた非平衡科学を統合する、新しい研究の潮流を生み出すことを目指したもので、非常に広範な分野をカバーした挑戦的な領域である。個々の研究成果としては、十分上げられており、順調に進んでいる。計画研究の役割の明確化を行い、これらを有機的につなぐ研究テーマをそれぞれ設定し、それを担う研究者を特定するなど、研究領域内の有機的連携へ向けた取組み姿勢は評価でき、いくつかの目立った成果も上げ始めている。半導体量子メソ構造、ソフトマター、DNA から冷却原子系までの極めて広い分野の研究をまとめて非平衡系の普遍法則を打ち立てるために、本研究領域の更なる推進を期待する。

との高い評価をいただいた。

また、「評価に当たっての着目点ごとの所見」でも、次のような良い評価をいただいた。

(a) 研究の進展状況

本研究領域は、非平衡ゆらぎの基礎理論と関連精密実験、ゆらぎと構造の交差、機能発現と生命現象における関わりと、3つの研究項目よりなるが、それぞれが着実に研究成果を上げているとともに、各研究項目をつなぐ連携テーマを設定し、研究項目を横断する研究会を開催するなど連携研究を遂行する仕組みが工夫され、研究項目を横断した多くの成果が次々と生み出されている。

(b) 研究成果

199 編の質の高い論文が出版されており、かなり活発な研究活動が行われている。世界的にも興味を持たれる研究成果が得られており、国際的にも関連分野の研究水準を高めることに大いに貢献したと思われる。高校への出張講義、公開シンポジウム等のアウトリーチ活動も行われている。今後も、本研究領域が関係している学協会におけるシンポジウム等の開催や交流を通じて、普遍法則の学理を普及、深化させる取組みを期待したい。（中略）

(e) 今後の研究領域の推進方策

領域代表者の努力が実り、異なる計画研究間の共同研究を大いに活発化させることに成功している。計画研究では対応できない課題を公募研究で取り入れ、本研究領域の意義を浸透させて連携強化を図ることで研究の幅を広げることは重要であり、残された研究期間も引き続き持続することが望まれる。また、本研究領域に関連する学問分野の実験系の人的リソースは極端に少ないと言われている。若手実験研究者を増やす工夫を行い、非平衡物理学としての普遍的な学理の確立という目的に近づくよう、残る期間、研究を推進していくことを期待する。

最後の「関連する学問分野の実験系の人的リソースが日本では極端に少ないため、若手実験研究者を増やす工夫を行うべきである」と指摘された点に関しては、本領域の活動が功を奏した面もあり、項目10で述べるように、幸いにして複数の新しい研究室が立ち上がりつつあるため、さらに今後を期待したい。

5. 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 ページ以内）

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。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

5年間で得られた研究成果について、以下に研究項目ごとに述べる。

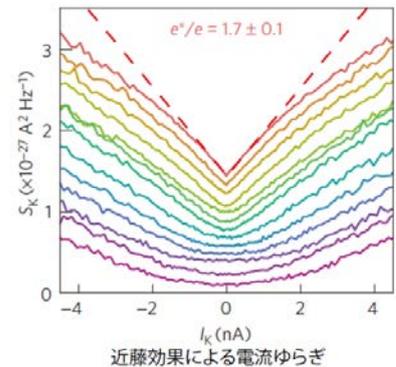
A01 基礎班：

A01-001 非平衡ゆらぎの熱力学的体系（佐々、中川）

佐々らは、非平衡ゆらぎの様々な問題と「熱力学的体系」との関わりについて研究を展開した。非平衡ゆらぎを明示的に扱うことにより、ミクロな記述から流体方程式を導出する方法を提案した。この手法は、振動子集団の引き込み現象を記述する蔵本模型を導出することも可能であり、非平衡ゆらぎと巨視的現象論をつなぐ新しい見方を与えるものである。また、熱力学ゆらぎの統計的性質が熱力学変分原理によって決められるように、時間平均応力のゆらぎの統計的性質を決める変分原理を定式化した。

A01-002 非平衡量子系の輸送ダイナミクス（小林、齊藤、沙川）

量子液体の非平衡ダイナミクスの定量化：小林らは、カーボンナノチューブに作製した量子ドットにおける近藤効果を研究した。その結果、近藤状態においては、一粒子の伝導過程だけではなく、二個の粒子が関与する伝導過程もあり、電流ゆらぎが通常値よりも増大することが分かった。この電流ゆらぎから、量子液体を特徴づける量（ウィルソン比）を求めることができ、量子ドットが極めて強い量子多体状態にあることを実証した。さらに、これまでに知られていなかった非平衡スケール則を実験的に確立した。この成果は、非平衡量子多体系の精密な定量化に成功したものであり、今後の理論・実験の発展を促すものと期待される。



熱機関における熱効率と仕事率の関係：齊藤らは、マルコフ過程の範囲内で熱効率と仕事率の間に成立する普遍的なトレードオフ関係式を導いた。それにより熱効率がカルノー効率に近づく際の仕事率のふるまいなどが定量的に議論できるようになった。また、広範囲のダイナミクスについて、熱伝導現象や、電流における熱力学的不確定性関係を議論し、磁場のある系や量子系では、マルコフ過程において議論されていた結果を変更しなければならないことを明らかにした。

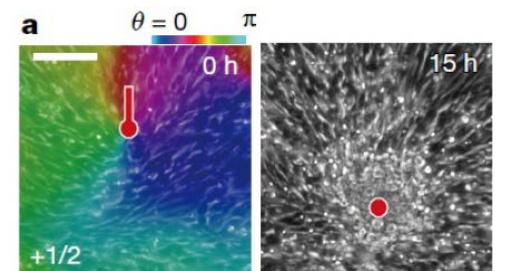
自律的な情報熱機関の研究：沙川らは、自律的な情報処理の熱力学の一般的な理論を構築し、それを生体情報処理へと応用した。さらに、一般化第二法則によって化学走性のノイズに対する頑健性を定量化できることを示した。孤立量子多体系におけるゆらぎの定理の証明：量子力学から熱力学が如何に創発するかは、19世紀以来議論されてきた統計力学の基礎として重要なだけでなく、非平衡量子系のダイナミクスを理解する上でも重要な問題である。沙川らは、統計力学の概念であるカノニカル分布を仮定せずに、量子力学だけに基づいて熱力学第二法則とゆらぎの定理を証明した。

A01-003 非平衡ゆらぎが生み出す構造と運動の普遍性（佐野、笹本、竹内）

成長界面の形状とゆらぎに関する普遍性：ランダムな界面成長は、Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 方程式で記述され、近年は笹本らにより厳密解が見つかるとともに、竹内らによる実験的証拠が得られ注目を集めている。竹内らは、液晶乱流の成長過程に伴う界面ゆらぎを計測し、KPZ クラスの普遍ゆらぎの諸性質を測定した。1次元KPZクラスは、分布や空間相関は厳密解が既知であるが、時間相関は未解決問題となっていた。液晶乱流実験と様々な成長界面モデルのシミュレーションにより、円形界面と平面界面では時間相関が質的に異なること、「エルゴード性の弱い破れ」という異常拡散と関連した性質を見出した。

層流・乱流遷移におけるゆらぎと時空間欠性の普遍法則：マクロなゆらぎの起源は多くの場合、決定論的方程式のカオスや乱流に行きつくが、シア流における層流・乱流遷移は未解明であった。佐野らは、準2次元のチャンネル流で境界条件を乱流とし、下流でその乱流状態が減衰するか、あるいはパーコレートするかを界面臨界現象の手法を用いて測定し、4つの臨界指数が(2+1)次元DPの理論値と実験の誤差範囲で一致し、普遍的スケール関数も存在することを見出した。

アクティブマターにおけるゆらぎと構造：各要素が自由エネルギーを変換し散逸を伴って自己駆動運動を行い、相互作用するアクティブマター系は、分子モーターや細胞集団、動物の群れなどミクロからマクロまで広く存在する大自由度非平衡系の大



アクティブネマチック状態とトポロジカル欠陥

きな普遍的クラスを形成している。佐野らは、神経幹細胞の培養系では、運動し続ける細胞群がネマチック秩序状態を形成し、 $+1/2$ の指数を持つトポロジカル欠陥には細胞が集積し、 $-1/2$ の指数のトポロジカル欠陥では細胞密度が減少することを発見し、その振る舞いをアクティブマターを記述する方程式で再現することに成功した。

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（宮崎、吉野）

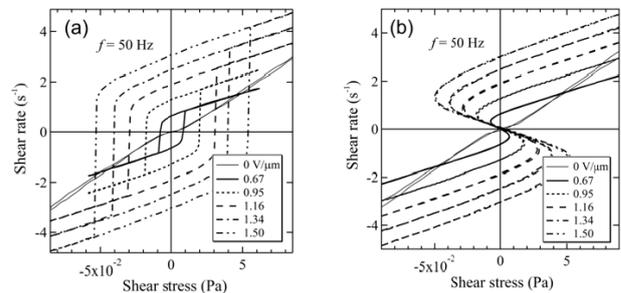
ガードナー転移に伴う階層的なシア応答：ジャミング転移点付近の高密度コロイド粒子系が、観測する時間スケールによって、硬くも柔らかくも振る舞うという奇妙な性質を示す。そのメカニズムが、ガードナー転移と呼ばれるガラス-ガラス転移にあることを、レプリカ理論、および大規模数値シミュレーションによって明らかにすることに成功した。

A02 時空班：

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（折原、長屋、中垣、佐藤、日高）

非平衡定常状態におけるソフトマターの構造およびゆらぎの測定手法を開発し、それを用いて特にせん断流と関係した非平衡構造およびゆらぎの性質を調べた。

液晶電気対流により誘起された負の粘性と履歴曲線：ネマチック液晶に電圧を印加すると対流が発生するが、この状態におけるレオロジー測定がこれまで長屋らによって行われ、負の誘電率異方性（ダイレクターに平行方向より垂直方向の誘電率が小さい）を持つ液晶では電圧を上げていくとせん断応力が減少することが報告されていたが、高電圧側を測定したところせん断応力が負となることがわかった。また、応力ゼロの状態ではレオメータの平行平板間に挟んだネマチック液晶に電場を印加し、液晶電気対流を発生させると、円盤が自発的に回転する現象が観測され、これらの結果から実効的に負の粘性が生じていることを発見した。さらに、せん断応力制御によりせん断速度との関係を負の領域を含めて測定したところ、これらの量の間に強磁性体や強誘電体などで見られる履歴曲線が観測された。また、せん断速度制御により測定を行なうと S 字曲線が観測され、粘度が原点付近で負になっていることが分かった。



液晶電気対流における負の粘性と S 字曲線

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（平野、斎藤、高橋、衛藤、柴田）

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の時間発展とゆらぎ、秩序形成について、理論と実験の密接な協力体制で研究を進めた。また、領域内の他の研究班とも連携し、多成分ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)に現れる普遍的な現象の解明を目指した。

実験と理論の密接な共同研究により実現した成果の一つは、磁気双極子相互作用による空間構造形成に関する研究である。87Rb 原子の BEC を光トラップにより保持すると、全てのスピン状態の原子を保持することができ、スピン自由度を持ったスピノール BEC を実現することができた。BEC のスピン自由度と高い空間相干性を巧みに利用し、BEC のスピンの空間構造形成を観測することに成功した。また、Rb 原子の豊富な内部自由度を利用して様々な大きさの混和性を持つ多成分 BEC を生成し、磁場勾配パルスを用いて多成分 BEC を衝突させ、その後のダイナミクスを観測した。その結果、混ざり合う BEC 間の反発やドメイン形成、混和性に敏感な混ざり合わない BEC 間の通過など、一見直観に反する多様なダイナミクスの観測に成功した。

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（櫻井、北畑、澤井、石原）

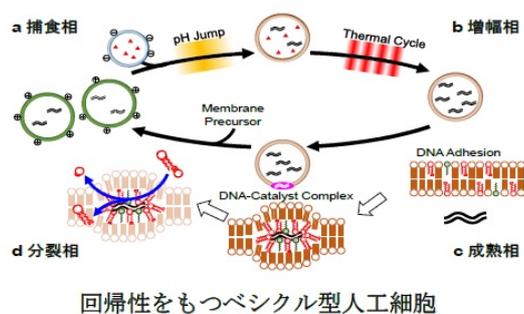
本研究では、反応拡散波と界面変形を伴うアクティブマターが生み出す動的秩序とそれに由来する機能の普遍的性質の解明を目的とした。特に生物の多様な運動形態の理解へ向け、生物と非生物の両方から迫る試みを行った。澤井と石原は、細胞性粘菌アメーバに着目し、その極性が走化性誘引分子の時間変動成分によって誘起されることを実験的に示し、適応応答する反応拡散系の秩序形成として理解できることを数理的に示した。こうした細胞の形状変化について、アクチンとそれに付随する膜上の極性決定分子による二変数興奮系とフェイズフィールドの結合系の振る舞いの詳細を調べ、細胞の変形ダイナミクスを明らかにした。北畑らは、円対称ではない形状の樟脳粒の運動に関して、数理モデルから中心多様体縮約によって位置と特徴的な角度の時間発展に関する常微分方程式を導いた。また、そのような樟脳粒 2 つが相互作用する系の時間発展に関する式も導いた。

A03 機能班：

A03-001 ソフトマターから人工細胞への物理的アプローチ（今井、菅原、豊田、佐久間）

ベシクル型人工細胞の創成：カチオン性膜分子からなるジャイアントベシクル(GV)に DNA を内封させることにより DNA の複製とベシクルの自己生産が連携した人工細胞系の創成に成功した。この系を基に以下の研究を進めた。**繰り返し自己複製する人工細胞の実現：**自己増殖により生成した娘ベシクルに、基質を満たした運搬ベシクルを、一定のタイミングで選択的に吸着・融合させ、枯渇した基質を補充することで、

「繰り返し自己増殖する GV 型モデル原始細胞」を構築した。人工細胞における情報伝達と自然淘汰：進化する原始細胞モデルへの展開として、鎖長の異なる DNA を内封した GV 型人工細胞が膜分子前駆体添加により誘導される形態変化を比較検討した。その結果、増殖率は内包した DNA の鎖長に強く依存することが明らかとなった。この結果はフラスコ内で、自然淘汰が起こり得ることを意味しており、進化する人工細胞に向けた大きな成果といえる。加えて、今井、佐久間、豊田らは自己駆動や走化性を持つベシクル型人工細胞を実現し、その理論的解明を行った。



A03-002 生体膜におけるメソ構造の非平衡ダイナミクス (好村、野口、芝、多羅間)

粘弾性体中のマイクロマシンの遊泳：好村らは、ソフトマターのような粘弾性体中を遊泳するマイクロマシンの動作機構について理論的に考察した。アクティブ・マイクロレオロジーの基本式を三つ玉スイマーに適用することで、スイマーの遊泳速度とソフトマターの複素粘性率を結びつける関係式を導出した。その結果、三つ玉スイマーがソフトマター中を遊泳するには二通りの可能性があり、一方は形状変形の時間反転対称性を破ることであり、他方はスイマーの構造対称性を破ることである。この原理を「スイマー・マイクロレオロジー」と命名した。

BAR タンパク質による膜チューブ形成：近年、生体膜に吸着し膜を曲げるバナナ状の BAR ドメインを持つタンパク質が多く見つかっている。このバナナ状タンパク質による膜変形機構を明らかにするため、野口らは、メッシュレス膜模型を用いたシミュレーションを行った。タンパク質の自発曲率を上げていくと膜を介した相互作用で、ドメインに垂直と水平方向の2段階に分かれて自己集合が起こることを明らかにした。また、ネットワーク状の中間構造の形成によってチューブ形成速度が下がることも分かった。

A03-003 非熱的に駆動されたバイオマターの非平衡動力学 (木村、水野)

本研究では、様々な非熱的場により駆動されたバイオマターおよびそのモデル系のメソスケールのゆらぎと力学応答に関する実験的研究を行ない、次のような成果を得た。

流体相互作用する駆動多粒子系が形成するクラスター構造の解明：木村らは、流体相互作用しつつ運動する微粒子系のモデルとして、同一円周上を一定の駆動力を与えられて運動する多粒子系をリング光渦により実験的に実現し、さまざまな集団運動を実験および数値シミュレーションを用いて明らかにした。

多重フィードバック下のマイクロレオロジーによる細胞のガラス的挙動の観測：水野等は、流れや揺らぎに対して多重のフィードバックで追従しながら細胞内部や細胞抽出液のマイクロレオロジー計測を行うシステムを開発した。その結果、細胞質は混みあいによりガラス化するが、細胞内部は代謝活性により流動化することが分かった。生きている細胞内部環境がアレニウスの粘性上昇する strong glass former であるのに対して、代謝のない細胞抽出液は、fragility の大きなガラス形成挙動を示すことを見出した。

A03-004 時空間秩序の生成とその生命現象への展開 (吉川、鶴山、市川)

人工的な実験系を構築し、実際の生命体の構造や機能と対比することにより、生命現象における基本原理に迫ることを目的として研究を進めた。

マイクロ・ナノシステムにおける化学→運動のエネルギー変換系の実現：吉川らは、等温条件下化学反応により、並進や回転運動を引き起こす実験系の構築や、液滴の2次元的な進展運動により、非平衡状態で、六方格子上の規則的なパターンを生成する現象とその理論解析を行った。また、sub mm スケールで、一定の直流電場の下での、振動や回転（公転や自転）を引き起こさせることに成功した。市川らは、特に人工細胞やモデル細胞に関連する成果を得た。また、動く人工細胞として、駆動するアクチン溶液を封入する事で、膜表面を自発的に変形させる細胞サイズの液滴の作成に成功した。同様に、アクチンで裏打ちされた、膜面が自己収縮するマイクロ液滴を創り出すと共に、両者の関係を明らかにした。

公募研究：

アーキアのべん毛を用いた遊泳：西坂、内田らは、アーキア (*H. salinarum*) のべん毛運動の3次元計測を初めて行い、その流体力学的モデルを開発した。

MinE, MiD タンパク質のベシクル内振動現象：義永と藤原は共同で、大腸菌の Min たんぱく質が膜面上で示す振動現象についての実験と理論的研究を行った。膜面の MinD および MinE の濃度場と内部の濃度の双方を考慮したモデルを解析することによって、実験で見られる回転波、極の間を行き来する定在波を再現した。また、細胞の形状依存性について明らかにした。

無細胞系 PURE system を用いた膜タンパク質合成法：車は、再構築型の無細胞系 PURE system を用いて、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。

6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ以内）

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。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 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。
- 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。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したものについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 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。

論文:国際誌(査読有)628件(うち謝辞あり439件、総説解説25件)、国際誌(査読無)7件、国内誌98件

主な論文(全て査読有り): 全業績はHPに掲載、<http://sfs-dynamics.jp/gyoseki/wp/>

A01:計画研究

- ▲“Liquid-gas transitions in steady heat conduction”, N. Nakagawa, *S.-i. Sasa, *Phys. Rev. Lett.* 119, 260602/1-6 (2017).
- ▲“Thermodynamic entropy as a Noether invariant”, S.-i. Sasa, Y. Yokokura, *Phys. Rev. Lett.* 116, 140601/1-6 (2016).
- ▲“Derivation of hydrodynamics from the Hamiltonian description of particle systems”, *S.-i. Sasa, *Phys. Rev. Lett.* 112, 100602/1-5 (2014).
- ▲“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).
- ◎▲“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).
- ◎▲“Thermodynamic Bounds on Precision in Ballistic Multi-Terminal Transport”, K. Brandner, T. Hanazato, *K. Saito, *Phys. Rev. Lett.* 120, 090601/1-5 (2018).
- ◎▲“Heat Transport via Low-Dimensional Systems with Broken Time-Reversal Symmetry”, S. Tamaki, M. Sasada, and *K. Saito, *Phys. Rev. Lett.* 119, 110602. (2017).
- ▲“Quantum fluctuations along symmetry crossover in a Kondo-correlated quantum dot”, *M. Ferrier, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, R. Delagrang, R. Deblock, Y. Teratani, R. Sakano, A. Oguri, and *K. Kobayashi, *Phys. Rev. Lett.* 118, 196803/1-5 (2017).
- ◎▲“Fluctuation Theorem for Many-Body Pure Quantum States”, E. Iyoda, K. Kaneko, T. Sagawa, *Phys. Rev. Lett.* 119, 100601/1-6 (2017).
- ◎▲“Universal trade-off relation between power and efficiency for heat engines”, N. Shiraishi, K. Saito and H. Tasaki, *Phys. Rev. Lett.* 117, 190601/1-5 (2016).
- ▲“Rigorous bound on energy absorption and generic relaxation in periodically driven quantum systems”, T. Mori, T. Kuwahara, K. Saito, *Phys. Rev. Lett.* 116, 120401/1-5 (2016).
- ◎▲“Measurement-feedback formalism meets information reservoirs”, N. Shiraishi, T. Matsumoto, and T. Sagawa, *New J. Phys.* 18, 013044/1-8 (2016).
- ▲“Universality of non-equilibrium fluctuations in strongly correlated quantum liquids”, *M. Ferrier, T. Arakawa, T. Hata, R. Fujiwara, R. Delagrang, R. Weil, R. Deblock, R. Sakano, A. Oguri, and *K. Kobayashi, *Nature Phys.* 12, 230–235 (2015).
- ▲“Edge mixing dynamics in graphene p–n junctions in the quantum Hall regime”, *S. Matsuo, S. Takeshita, T. Tanaka, S. Nakaharai, K. Tsukagoshi, T. Moriyama, T. Ono, K. Kobayashi, *Nature Comm.* 6, 8066/1-6 (2015).
- ◎▲“Maxwell's demon in biochemical signal transduction with feedback loop”, *S. Ito and T. Sagawa, *Nature Comm.* 6, 7498 (2015).
- ▲“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]
- ▲“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]
- ◎▲“Distribution of entropy production in a single-electron box”, *J. V. Koski, T. Sagawa, O.-P. Saira, Y. Yoon, A. Kutvonen, P. Solinas, M. Möttönen, T. Ala-Nissila, and J. P. Pekola, *Nature Phys.* 9, 644-

648(2013).

19. ◎▲“Kondo signature in heat transfer via a local two-state system”, *K. Saito and T. Kato, *Phys. Rev. Lett.* 111, 214301/1-4 (2013).
20. ◎▲“Flagellar dynamics of chains of active Janus particles fueled by an AC electric field”, D. Nishiguchi, J. Iwasawa, H.-R. Jiang and M. Sano, *New J. Phys.* 20, 051002/1-14(2018).
21. ▲“Kardar-Parisi-Zhang Interfaces with Inward Growth”, *Y. T. Fukai and K. A. Takeuchi, *Phys. Rev. Lett.* 119, 030602/1-5 (2017).
22. ◎▲“Topological defects control collective dynamics in neural progenitor cell cultures”, *K. Kawaguchi, R. Kageyama and *M. Sano, *Nature*, 545, 327-332 (2017).
23. ◎▲“Long-range nematic order and anomalous fluctuations in suspensions of swimming filamentous bacteria”, *D. Nishiguchi, K. H. Nagai, H. Chate, and M. Sano, *Phys. Rev. E* 95, 020601(R)/1-6 (2017).
24. ◎▲“Optimal run-and-tumble based transportation of a Janus particle with active steering”, T. Mano, *J.-B. Delfau, J. Iwasawa, and M. Sano, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 114, E2580–E2589 (2017).
25. ▲“A Universal Transition to Turbulence in Channel Flow”, *M. Sano and K. Tamai, *Nature Phys.*, 12, 249-253 (2016).
26. ▲“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).
27. ▲“Combinatorics of the asymmetric exclusion process on a semi-infinite lattice”, T. Sasamoto and L. Williams, *J. Combinatorics* 5, 419-434 (2014).
28. ◎▲“Exploring the complex free energy landscape of the simplest glass by rheology”, *Y. Jin and H. Yoshino, *Nature Comm.*, 8, 14935 (2017).
29. ◎▲“Cluster Glass Transition of Ultrasoft-Potential Fluids at High Density”, R. Miyazaki, T. Kawasaki, and *K. Miyazaki, *Phys. Rev. Lett.* 117, 165701/1-5 (2016).
30. ◎▲“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).
31. ◎▲“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).

A01 公募研究

32. ◎▲“Turbulent bifurcations in intermittent shear flows: from puffs to oblique stripes”, T. Ishida, Y. Duguet, *T. Tsukahara, *Phys. Rev. Fluids*, 2, 073902/1-18 (2017).
33. ▲“Waveform measurement of charge- and spin-density wavepackets in a chiral Tomonaga–Luttinger liquid”, *M. Hashisaka, N. Hiyama, T. Akiho, K. Muraki, *T. Fujisawa, *Nature Phys.*, 13, 559 (2017).
34. ▲“Higher-order spin and charge dynamics in a quantum dot-lead hybrid system”, *T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, S. Amaha, J. Yoneda, K. Takeda, G. Allison, P. Stano, A. Noiri, T. Ito, D. Loss, A. Ludwig, A. D. Wieck, and *S. Tarucha, *Sci. Rep.* 7, 12201/1-7 (2017).
35. ▲“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]
36. ▲“Effective temperature of nonequilibrium dense matter in holography”, *H. Hoshino and S. Nakamura, *Phys. Rev. D* 91, 026009 /1-10 (2015).
37. ▲“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).
38. ▲“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

39. ▲“Polymer-stabilized micropixelated liquid crystals with tunable optical properties fabricated by double templating”, *Y. Sasaki, M. Ueda, K. V. Le, R. Amano, S. Sakane, S. Fujii, F. Araoka, and H. Orihara, *Advanced Materials* 29, 1703054/1-7 (2017).
40. ▲“Large-scale self-organization of reconfigurable topological defect networks in nematic liquid crystals”, Y. Sasaki, *V.S.R. Jampani, C. Tanaka, N. Sakurai, S. Sakane, K. V. Le, *F. Araoka, and *H. Orihara, *Nature Comm.* 7, 13238 (2016).
41. ▲“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).
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. ▲“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]
 44. ▲“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).
 45. ◎▲“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).
 46. ▲“Fingering instabilities and pattern formation in a two-component dipolar Bose-Einstein condensate”, *K.-T. Xi, T. Byrnes, and H. Saito, *Phys. Rev. A* 97, 023625/1-9 (2018).
 47. ▲“Spinor dynamics in a mixture of spin-1 and spin-2 Bose-Einstein condensates”, Y. Eto, H. Shibayama, H. Saito, and T. Hirano, *Phys. Rev. A* 97, 021602(R)/1-5 (2018).
 48. ▲“Topological defect formation in rotating binary dipolar Bose-Einstein condensate”, *X.-F. Zhang, W. Han, H.-F. Jiang, W.-M. Liu, H. Saito, and S.-G. Zhang, *Annals Phys.* 375, 368-377 (2016).
 49. ▲“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).
 50. ▲“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).
 51. ▲“Observation of dipole-induced spin texture in an ⁸⁷Rb 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]
 52. ▲“Many-body dynamics of a Bose-Einstein condensate collapsing by quantum tunneling”, *H. Saito, *Phys. Rev. A* 89, 023610/1-6 (2014).
 53. ▲“Effective diffusion coefficient including the Marangoni effect”, *H. Kitahata, N. Yoshinaga, *J. Chem. Phys.* 148, 134906/1-8 (2018).
 54. ▲“From cells to tissue: A continuum model of epithelial mechanics”, *S. Ishihara, P. Marcq, K. Sugimura, *Phys. Rev. E* 96, 022418 (2017).
 55. ◎▲“Fold-change detection and scale-invariance of cell-cell signaling in social amoeba”, *K. Kamino, Y. Kondo, A. Nakajima, M. Honda-Kitahara, K. Kaneko, *S. Sawai, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 114(21), E4149-E4157 (2017).
 56. ▲“General criteria for determining rotation or oscillation in a two-dimensional axisymmetric system”, Y. Koyano, N. Yoshinaga, and *H. Kitahata, *J. Chem. Phys.*, 143, 014117/1-6 (2015).
 57. ◎▲“Rectified directional sensing in long-range cell migration”, A. Nakajima, S. Ishihara, D. Imoto, and *S. Sawai, *Nature Comm.* 5, 5367/1-14 (2014).

A02 公募研究

58. ▲“Observation of the Mott insulator to superfluid crossover of a driven-dissipative Bose-Hubbard system”, *T. Tomita, S. Nakajima, I. Danshita, Y. Takasu and Y. Takahashi, *Sci. Adv.* 3, e1701513 (2017)/1-8.
59. ▲“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).
60. ▲“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).
61. ▲“Design and control of noise-induced synchronization patterns”, *W. Kurebayashi, T. Ishii, M. Hasegawa, and H. Nakao, *EPL* 107, 10009/1-6 (2014).
62. ▲“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).

A03 計画研究

63. ◎▲“Self-propelled motion of monodisperse underwater oil droplets formed by a microfluidic device”, N. Ueno, T. Banno, A. Asami, Y. Kazayama, Y. Morimoto, T. Osaki, S. Takeuchi, H. Kitahata, *T. Toyota, *Langmuir*, 33, 5393-5397 (2017).
64. ◎▲“Migration of Phospholipid Vesicles Can Be Selectively Driven by Concentration Gradients of Metal Chloride Solutions”, A. Kodama, Y. Sakuma, *M. Imai, T. Kawakatsu, N. Puff, and M. I. Angelova, *Langmuir*, 33, 10698-10706 (2017).
65. ◎▲“A recursive vesicle-based model protocell with a primitive model cell cycle”, K. Kurihara, Y. Okura, M. Matsuo, T. Toyota, K. Suzuki, and *T. Sugawara, *Nature Comm.* 6, 8352 (2015).
66. ◎▲“Bilayer sheet protrusions and budding from bilayer membranes induced by hydrolysis and condensation reactions”, K. M. Nakagawa and *H. Noguchi, *Soft Matter*, 14, 1397-1407 (2018).
67. ◎▲“Anomalous diffusion in viscoelastic media with active force dipoles”, K. Yasuda, R. Okamoto,

- and *S. Komura, *Phys. Rev. E* 95, 032417/1-14 (2017).
68. ▲“Elastic three-sphere microswimmer in a viscous fluid”, K. Yasuda, Y. Hosaka, M. Kuroda, R. Okamoto, and *S. Komura, *J. Phys. Soc. Jpn.* 86, 093801/1-4 (2017).
 69. ▲“Budding of domains in mixed bilayer membranes”, J. Wolff, *S. Komura, and D. Andelman, *Phys. Rev. E* 91, 012708/1-10 (2015).
 70. ◎▲“Shape transformations of toroidal vesicles”, *H. Noguchi, A. Sakashita and M. Imai, *Soft Matter* 11, 193-201 (2015).
 71. ▲“Physical aspects of heterogeneities in multi-component lipid membranes”, *S. Komura and D. Andelman, *Adv. Colloid Interface Sci.* 208, 34-46 (2014).
 72. ▲“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).
 73. ◎▲“Two-dimensional assemblies of nematic colloids in homeotropic cells and their response to electric fields”, Y. Tamura and *Y. Kimura, *Soft Matter* 12, 6817-6826 (2016).
 74. ◎▲“Analytical Limit Distributions from Random Power-Law Interactions”, I. Zaid and *D. Mizuno, *Phys. Rev. Lett.* 117, 030602 (2016).
 75. ▲“Dynamic clustering of driven colloidal particles on a circular path”, S. Okubo, S. Shibata, Y. S. Kawamura, M. Ichikawa and *Y. Kimura, *Phys. Rev. E* 92, 032303 (2015).
 76. ◎▲“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).
 77. ▲“Simple mechanosense and response of cilia motion reveal the intrinsic habits of ciliates”, T. Ohmura, Y. Nishigami, A. Taniguchi, S. Nonaka, J. Manabe, T. Ishikawa, and M. Ichikawa, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 115, 3231-3236(2018).
 78. ◎▲“Periodic Motions of Solid particles with Various Morphology under a DC Electrostatic Field”, D. Yamamoto, R. Yamamoto, T. Kozaki, A. Shioi, S. Fujii and *K. Yoshikawa *Chem. Lett.* 46, 1470-1472 (2017).
 79. ◎▲“A single-molecule assessment of the protective effect of DMSO against DNA double-strand breaks induced by photo- and γ-ray-irradiation, and freezing”, M. Noda, Y. Ma, Y. Yoshikawa, T. Imanaka, T. Mori, M. Furuta, T. Tsuruyama and *K. Yoshikawa, *Sci. Rep.* 7, 8557/1-8 (2017).
 80. ◎▲“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).
 81. ▲“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).
 82. ◎▲“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).
 83. ▲“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).
 84. ◎▲“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).
 85. ◎▲“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).
 86. ◎▲“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).

A03 公募研究

87. ◎▲“Endoplasmic reticulum-mediated microtubule alignment governs cytoplasmic streaming”, K. Kimura, A. Mamane, T. Sasaki, K. Sato, J. Takagi, R. Niwayama, L. Hufnagel, Y. Shimamoto, J.-F. Joanny, S. Uchida, and *A. Kimura, *Nature Cell Biol.* 19, 399-406 (2017).
88. ◎▲“DNA cytoskeleton for stabilizing artificial cells”, C. Kurokawa, K. Fujiwara, M. Morita, I. Kawamata, Y. Kawagishi, A. Sakai, Y. Murayama, S.-i. M. Nomura, S. Murata, *M. Takinoue, and *M. Yanagisawa, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 114, 7228-7233 (2017).
89. ◎▲“Single molecule thermodynamics of ATP synthesis by F1-ATPase”, S. Toyabe and *E. Muneyuki, *New J. Phys.* 17, 015008/1-7 (2015).
90. ▲“The PURE system for the cell-free synthesis of membrane proteins”, *Y. Kuruma and T. Ueda, *Nature Protocols*, 10, 1328-1344 (2015).
91. ◎▲“Quantifying Adhesion Mechanisms and Dynamics of Human Hematopoietic Stem and Progenitor Cells”, A. S. Burk, C. Monzel, H. Y. Yoshikawa, P. Wuchter, R. Saffrich, V. Eckstein, *M.

Tanaka and *A. D. Ho, *Sci Rep.* 5, 9370 (2015).

92. ▲“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]

A04 公募研究

93. ▲“Rheological evaluation of colloidal dispersions using the smoothed profile method: formulation and applications”, *J. J. Molina, K. Otomura, H. Shiba, H. Kobayashi, M. Sano, and R. Yamamoto, *J. Fluid Mech.* 792, 590-619 (2016).
94. ▲“Bogoliubov-wave turbulence in Bose-Einstein condensates”, *K. Fujimoto and M. Tsubota, *Phys. Rev. A* 91, 053620/1-12 (2015).
95. ▲“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).
96. ◎▲“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).
97. ◎▲“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]
98. ◎▲“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]
99. ▲“Spin-superflow turbulence in spin-1 ferromagnetic spinor Bose-Einstein condensates”, *K. Fujimoto and M. Tsubota, *Phys. Rev. A* 90, 013629/1-7 (2014).

書籍: 計 37 件

1. Special Topics: Recent Progress in Active Matter, edited by H. Kitahata, H. Noguchi, and M. Sano, *Journal of the Physical Society of Japan* 86, No. 10 (2017).
2. 「量子測定と量子制御」沙川貴大、上田正仁、サイエンス社(2016).
3. 「量子流体力学」(編) 坪田誠、笠松健一、小林未知数、竹内宏光、丸善出版(2018).
4. 「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).
5. 「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.
6. 「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).
7. 「人工細胞の創製とその応用」“無細胞タンパク質合成系とベシクルによる人工細胞の構築” 車兪澈、CMC 出版(2017).
8. 「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).
9. 「高校生のための東大授業ライブ 学問からの挑戦」東京大学教養学部編(編) “いきいきとした状態の科学—細胞性粘菌でさぐる自己組織化のメカニズム” 澤井哲、東京大学出版会(2015), 131-149.
10. 「科学の指針シリーズ 超分子の化学」菅原正、木村榮一(編)、裳華房(2013).

特許: 計 17 件

1. 澤井哲「流体流制御装置及び流体流制御方法」2016-087745PCT/JP2017/015594 (特願・日本)
2. 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)
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. 田中求「培地用高分子ゲル、培地、細胞の培養方法及びキット」2016-148725(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 27 件、共催 25 件

国際会議発表: 計 988 件 うち基調講演 19 件 招待講演 423 件 口頭講演 162 件 ポスター発表 384 件

ホームページ: <http://sfs-dynamics.jp> 論文・招待講演など全て掲載: アクセス数 105,306 (H30.5.31 現在)

アウトリーチ活動: 計 171 件

<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—>、2014年2月15日、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

2014年度日本物理学会科学セミナー「非平衡の世界—凝縮系から地震、経済、生命まで」、東大駒場日本物理学会共催シンポジウム「非平衡系におけるゆらぎと構造」、2018年3月22日、東京理科大学日本学術振興会「ひらめき☆ときめきサイエンス」8件、高校への出張講義 27件など

メディア報道: 朝日新聞「細胞の誕生」再現に成功、2016年9月30日など、計 134 件

7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

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、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、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。

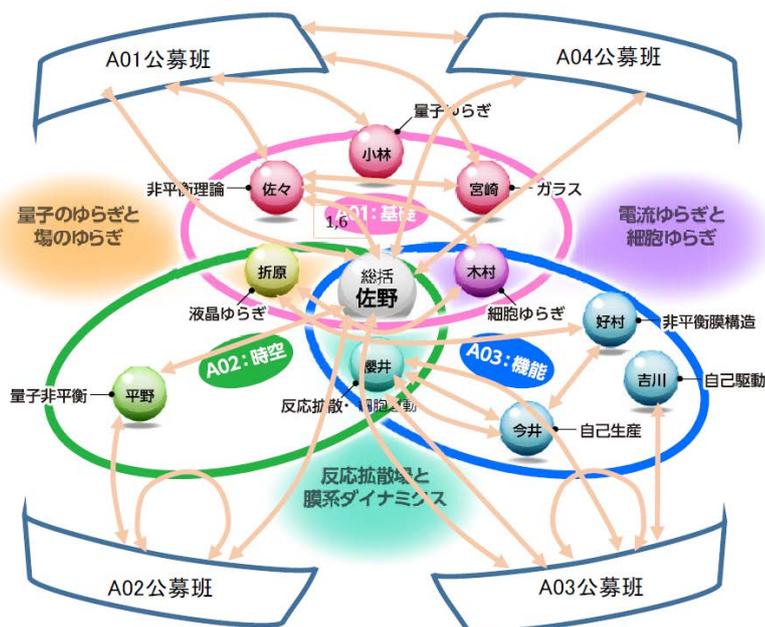
本領域では、「ゆらぎと構造の協奏」の統一テーマの下、(1)基礎班、(2)時空班、(3)機能班の3つの班に合計11の計画研究を配置し、広範な分野から集結した研究者が非平衡系の普遍法則を志向しながら研究を行ってきた。研究開始当初から、計画研究のキックオフミーティング、公募研究のキックオフミーティング、ゆらぎに関する若手勉強会などを行い、「ゆらぎと構造」解明の重要性を浸透させるとともに、各計画研究と公募研究間の情報交換や連携を深めるため、全体会議としては表1に示すような領域会議、国際シンポジウム、公開シンポジウムを行ってきた。

表1：全体会議および国際・公開シンポジウム

| 会議名 | 開催日 | 場所 | 人数 |
|--|--------------|----|-----|
| 第1回領域研究会 | H25/12/25-27 | 熱海 | 73 |
| 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」 | H26/2/15 | 東京 | 102 |
| 第2回領域研究会 | H26/8/29-31 | 札幌 | 103 |
| 第2回公開シンポジウム | H27/5/1 | 東京 | 134 |
| International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015 (SFS2015) | H27/8/20-23 | 京都 | 202 |
| 第3回領域研究会 | H28/6/17-19 | 福岡 | 124 |
| 第4回領域研究会 | H29/6/23 | 東京 | 138 |
| International Symposium on Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2017 (SFS2017) | H29/11/20-23 | 仙台 | 217 |
| 日本物理学会第73回年会共催シンポジウム | H30/3/23 | 野田 | 150 |

研究組織と各研究項目と連携関係は以下の図で示すとおりである。（各矢印は、公募班メンバーと共同研究が計画または行われたことを示す。）

図1：研究組織（公募研究を含む）と各研究項目との連携関係



【各計画研究と公募研究の連携を図るために実施した方策】

以上の体制の下、基礎班では、非平衡統計力学と普遍法則の探求、時空班では、ソフトマターや量子流体、細胞などにおける時空間構造の探求、機能班では、ベシクルやバイオソフトマターにおけるゆらぎや構造の探求を通して、非平衡過程が生命機能に転化するメカニズムを探求した。

基礎となる非平衡統計力学における「ゆらぎの定理」を始めとして、ソフトマターの学理を領域のメンバーに浸透させるため、研究開始当初から、若手を中心に**若手勉強会を複数回開催**し、「ゆらぎと構造」をキーワードに、非平衡系の普遍法則を意識したその後の研究活動の展開と若手の育成に役立てた。また、普遍法則には、ゆらぎの定理などマイクロ法則の対称性に起因するものや、非平衡相転移やスケール不変性など系の臨界現象的な性質に起因するもの、メソからマクロに至るスケールでの場の対称性に基づく、非平衡構造の統一した記述方法（例えばアクティブマターの記述方法）に関するものなど様々な側面があることが研究を進めるにつれて明確となった。これらの普遍性は、3つの班にまたがるものも多いため、**当初から複数の班にまたがるテーマを設定し、各班の連携を深めるための研究会や共同研究を積極的に推進した**。それ以外にも、(1)非平衡相転移に関する竹内や佐野(基礎班)と高橋(時空班)、小林(公募)の研究、(2)細胞内における反応拡散系ダイナミクスに関する澤井・石原(時空班)と義永・藤原(公募)等の研究などが班間を跨り研究が展開された。中でも、(3)非平衡状態のソフトマターや細胞集団など自己駆動素子の集団運動を記述する新しい枠組みとしてのアクティブマターの研究が2回目の公募研究以降、質、量ともに急激に進展し、3つの班と多くの公募研究を巻き込み、有機的に連携研究が展開されたことは特筆すべきであろう。

以上のように多岐にわたるテーマに応じて、**班を超えたテーマ別研究会を組織して開催した**。テーマ別研究会の主なものとしては、冷却原子系に関する研究会、膜や脂質、複雑流体に関する研究会、ガラス転移に関する国際会議(共催)、定期化されたアクティブマター研究会(共催)などがあげられる。これらのリストを以下に示す。合計で主催した研究会は27回、共催した研究会は25回となったが、これらは並列的に行われたため、研究者の準備の負担などは低く保ちつつ、研究時間の確保にも努めた。

表2：テーマ別研究会・若手勉強会(主催)

| 会議名 | 開催日 | 場所 | 人数 |
|---|--------------|----|-----|
| チュートリアル：「ゆらぎの定理：過去」 | H26/3/4 | 東京 | 70 |
| 若手研究会：「ゆらぎの定理：現在と未来」 | H26/3/14 | 東京 | 60 |
| 第1回若手勉強会「非平衡統計力学の基礎理論」 | H26/8/6-8 | 東京 | 110 |
| 第2回若手勉強会「ソフトマター若手勉強会」 | H28/3/10-11 | 千葉 | 61 |
| 第1回冷却原子研究会 | H26/11/3 | 東京 | 27 |
| 領域横断研究会「細胞力学と細胞運動の協奏」 | H26/12/19-20 | 福岡 | 32 |
| Workshop on Non-Equilibrium Complex Fluids | H26/3/6 | 東京 | 18 |
| Workshop on Non-Equilibrium Surfactant Solution | H26/3/7-8 | 東京 | 13 |
| International Workshop on Challenge to Synthesizing Life | H27/8/25-26 | 箱根 | 17 |
| Current and Future Perspectives in Active Matter | H28/10/28-29 | 東京 | 48 |
| International Symposium on Hydrodynamic Flows in/of Cells | H28/11/24-25 | 東京 | 27 |
| 第2回冷却原子研究会 | H29/3/16 | 大阪 | 40 |
| 研究会「アクティブマターの概念で繋ぐ生命機能の階層性」 | H29/9/11-12 | 函館 | 31 |
| 若手研究会「統計物理学とその周辺」 | H30/3/1-2 | 東京 | 61 |

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

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記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

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（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た。

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。

・研究費の使用状況 ((1), (2), (3) を合わせて3ページ以内)

(1) 主要な物品明細(計画研究において購入した主要な物品(設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。)について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。)

| 年度 | 品名 | 仕様・性能等 | 数量 | 単価(円) | 金額(円) | 設置(使用)研究機関 |
|----|------------------------------|---|----|------------|---------------------------|------------------------|
| 25 | 電子線描画装置 | 日本電子・JSM-7100F、SM-78170DCWC | 1 | 39,900,000 | 39,900,000 | 大阪大学(小林) |
| | JPK Instruments AG 製 原子間力顕微鏡 | NanoWizard3 NW3-T08 | 1 | 14,523,600 | 14,523,600 | 東京大学(澤井) |
| | 島津生体飼料ナノ構造観察装置 | 株式会社島津製作所・SPM-9700 | 1 | 7,000,000 | 7,000,000 | 同志社大学(吉川) |
| | 電動顕微鏡システム | ニコン・Ti-EA-DEF-Ph | 1 | 6,720,000 | 6,720,000 | 九州大学(木村) |
| | デジタルカメラ | 浜松ホトニクス社製 NIT0886 | 2 | 2,835,000 | 5,670,000 | 北海道大学(折原) |
| | 走査型プローブ顕微鏡システムグレードアップ | アジレントテクノロジー・N9700A | 1 | 5,614,350 | 5,614,350 | 九州大学(水野) |
| | 大型チャンネル乱流装置 | 6m x 1m x 5mm | 1 | 4,494,000 | 4,494,000 | 東京大学(佐野) |
| | モジュラー型ユニバーサルレオメーター | サーモフィッシャーサイエンティフィック(株)製 HAAKE Rheostress 6000 | 1 | 4,488,540 | 4,488,540 | 大分大学(長屋) |
| 26 | デジタルマイクロスコープ | VHX-2000 | 1 | 4,130,070 | 4,130,070 | 東京大学(澤井) |
| | ハイスピードカメラ | Vison Research・Phantom v1211M | 1 | 12,538,800 | 12,538,800 | 九州大学(木村) |
| | モジュラーコンパクトレオメータ | アントンパール MCR302 | 1 | 8,999,640 | 8,999,640 | 北海道大学(折原) |
| | 電動倒立型顕微鏡 | Leica 製 DMi-8 | 1 | 4,999,320 | 4,999,320 | 東京大学(27年度より東京工業大学)(竹内) |
| 27 | 粘弾性測定装置(合算使用の例外) | アントンパール・MCR302WSP | 1 | 12,400,000 | 12,400,000 (7,700,000) | 九州大学(木村) |
| | データ解析制御 PC Invitrogen | Doc.No. 11-SFH-0608-6 | 1 | 3,682,800 | 3,682,800 | 同志社大学(吉川) |

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

【平成25年度】

- ・旅費
佐野：LMU 大学（ドイツ）にて研究打合わせ、及び国際会議「Hot Nanostructures」（オランダ）における当研究についての招待講演のため 586,589 円
中垣：国際会議 Parallel computing based on designed networks explored by self-propelled, biological agents（スウェーデン）に参加、研究成果発表のため 584,580 円
- ・人件費・謝金
研究補助員雇用 1 名：633,984 円（東北大学）
博士研究員雇用 1 名：531,025 円（神奈川大学）
- ・その他
希釈冷凍機修理及びアップグレード：809,025 円
フローサイトメーターALTRA 移設に伴う組立点検調整作業：620,445 円
PC ソフト（AVS/Express Viz）：575,040 円

【平成26年度】

- ・旅費
Abhishek Dhar 氏（インド）招へい：非平衡統計力学に関する共同研究のため 593,497 円
Meydi Ferrier 氏（フランス）：icps2014（米国）に参加、研究発表や情報収集のため 546,360 円
佐々：イスラエル、南アフリカでの国際会議において当該研究に関する議論・研究打合わせ 506,280 円
齋藤：シュツットガルト大学（ドイツ）での Udo Seifert 教授と研究連絡のため 467,230 円
今井：スロベニア、デンマーク、フランスでの共同研究のため 429,040 円
- ・人件費・謝金
博士研究員雇用 4 名：4,662,855 円（電気通信大学）、4,414,922 円（首都大学東京）、3,909,360 円（神奈川大学）、3,520,149 円（九州大学）
研究補助者雇用 2 名：5,016,959 円（東京大学）、1,483,533 円（東京大学）
実験技術協力謝礼：600,000 円
- ・その他

【平成27年度】

- ・旅費
北畑：Dynamic Days Europe 2015（イギリス）に参加、研究発表、情報収集のため 508,734 円
P. L. Luisi 氏（イタリア）招へい：計画研究班主催国際ワークショップ International Workshop on Challenge to Synthesizing Life での講演のため 329,677 円
- ・人件費・謝金
博士研究員雇用 5 名：5,012,332 円（電気通信大学）、4,603,685 円（九州大学）4,427,069 円（首都大学東京）、3,937,974 円（神奈川大学）、2,067,025 円（京都大学）
研究補助者雇用 2 名：5,015,566 円（東京大学）、1,789,237 円（東京大学）
事務補佐員雇用 3 名：事務補助のため 1,053,851 円（東北大学）678,719 円（京都大学）408,110 円（東京大学）
実験技術協力謝礼：720,000 円（同志社大学）
- ・その他
論文オープンアクセス出版掲載料：714,420 円×3 件（同志社大学 1、大阪大学 2）

【平成28年度】

- ・旅費
好村：国際会議 ISMC2016（フランス）、Biosoft Frontiers（イスラエル）に参加、研究発表のため 424,349 円
小林：国際会議 Jaszowiec2016（ポーランド）に参加、研究発表、情報収集のため 418,090 円
佐野：ドイツにて当研究に関するセミナー開催、フランスにて共同研究打合わせのため 416,810 円
Abhishek Dhar 氏（インド）招へい：非平衡統計物理学に関する共同研究のため 403,180 円
Eli Barkai 氏（イスラエル）招へい：齋藤圭司と研究分野の知識提供のため 387,243 円
折原：国際会議 ILCC2016（米国）参加、成果発表、情報収集のため 355,500 円

- ・人件費・謝金
 博士研究員雇用 6 名：4,817,287 円（学習院大学）、4,695,115 円（九州大学）、4,434,498 円（首都大学東京）、3,962,117 円（神奈川大学）、3,926,499 円（大阪大学）3,891,968 円（京都大学）
 研究補助者雇用 2 名：5,105,566 円（東京大学）、1,125,962 円（東北大学）
 実験技術協力謝礼：720,000 円（同志社大学）
 事務補佐員雇用 1 名：事務補助のため 627,472 円（東京大学）

- ・その他
 電子ビーム露光装置利用料：1,268,800 円
 低温センター利用負担金：1,000,000 円
 論文オープンアクセス出版掲載料：714,420 円（北海道大学）
 論文投稿料：327,268 円

【平成 29 年度】

- ・旅費
 今井：スイス、ドイツにて研究打合わせ、実験構築のため 551,347 円
 佐野：国際会議 ICBP2017 (9th IUPAP International Conference on Biological Physics 2017) にて（ブラジル）招待講演、及び Physical Approaches to Biological Active Matter Workshop on Physical Approaches to Biological Active Matter（ブラジル）にて招待講演のため 550,233 円
 木村：Slovenia で開催された Liquids 2017 (10th Liquid Matter Conference) で大学院生 2 名が研究成果発表を行った。470,000 円
 David Andelman 氏（イスラエル）招へい：生体膜非平衡ダイナミクスに関する研究打合わせのため 409,995 円
 齋藤：国際会議 ICIS（インド）に参加、研究発表、Abhishek Dhar 氏と研究打合わせのため 406,730 円
 小林：国際会議 FQMT17（チェコ）に参加、研究発表、情報収集のため 396,414 円

- ・人件費・謝金
 博士研究員雇用 6 名：4,830,869 円（学習院大学）、4,673,628 円（九州大学）、2,582,752 円（京都大学）、4,399,057 円（大阪大学）3,316,899 円（千葉大学）、1,315,964 円（首都大学東京）
 研究補助者雇用 2 名：5,105,566 円（東京大学）、1,125,962 円（東北大学）
 事務補佐員雇用 2 名：事務補助のため 890,018 円（京都大学）、697,359 円（東京大学）

- ・その他
 MODULE ASSEMBLY, NI PXIe-5186 修理：825,120 円
 論文オープンアクセス出版掲載料：714,420 円（東京大学、豊田）
 論文投稿料：374,741 円（同志社大学）、PRL カラー料金：323,138 円（京都大学）

（3）最終年度（平成 29 年度）の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

計画研究 A03-004 代表者 吉川（同志社大学）

平成 29 年 9 月、高分子混雑条件下、自発的に生成するマイクロ液滴内に、選択的に運動性の生体高分子（微小管、ダイニン）が選択的に取り込まれることを発見した。そこで、研究方式を見直し、微小管とダイニンをを用いた実験を 29 年 10 月から開始し、30 年 3 月よりは液液マイクロ相分離系での微小管の運動を追究する。それまでの、化学→運動エネルギーマイクロ変換系での実験結果と比較検討し、30 年 12 月には全体の研究成果を取りとめることとした。

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

本領域の成果が当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果は、次の3つにまとめられる。

【非平衡統計力学、数理物理、流体力学分野への波及効果】

情報熱力学や非平衡ゆらぎの理論に関する卓越した研究成果は、当該分野の研究者の多くの受賞（久保亮五賞：笹本、齊藤、トムソン・ロイター、リサーチフロンティアワード：沙川）などにも表れており、世界的にも日本の統計力学分野の存在感を高めた。その他、メンバーが主催した国際会 Interface fluctuations and KPZ universality class - unifying mathematical, theoretical, and experimental approaches（2014年8月、京大基研）は、実験も含めた界面ゆらぎに関する世界初の国際会議となった他、非平衡相転移の研究成果は、数学分野にも興味を喚起し、「数理物理 Summer School 2017：乱流とパーコレーション」やニールス・ボーア研 Workshop: Transition to Turbulence (Oct. 2017)、フィールズ研究所研究集会 (Jan. 2016)、京大数理研 RIMS 共同研究(公開型)、「乱流と遷移：構造、多重スケール、モデル」(2018年7月)など国内外にも広がる波及効果をもたらしている。

【アクティブマター研究領域の創設と活性化】

領域立ち上げと前後して、世界的にアクティブマターと呼ばれる研究領域が活発化してきた。本領域でもソフトマターや細胞集団などメソスケールからマクロスケールに至る動的で非平衡な現象を統一的に捉えようとする研究活動の中で、早い時期から国際的な Winter School を開催したり、領域外の研究者とも連携して、国内の定例の研究会を立ち上げるなど、日本におけるこの分野の創設にかかわってきた。その結果、生命現象を含む複数の研究対象において、先端的な成果を上げることができた、以下に我々が主催または共催した主なアクティブマター研究会のリストをあげる。

| | | | |
|--|--------------|----|----|
| Winter School : Frontiers of Statistical Mechanics: from Non-equilibrium Fluctuations to Active Matter | H27/2/4-17 | 京都 | 主催 |
| International Workshop on Spatiotemporal Pattern Formation in Biological and Active Matters | H26/3/2 | 東京 | 主催 |
| Current and Future Perspectives in Active Matter | H28/10/28-29 | 東京 | 主催 |
| 研究会「アクティブマターの概念で繋ぐ生命機能の階層性」 | H29/9/11-12 | 函館 | 主催 |
| アクティブマター研究会 2016 | H28/1/22-23 | 福岡 | 共催 |
| アクティブマター研究会 2017 | H29/1/20-21 | 福岡 | 共催 |
| アクティブマター研究会 2018 | H30/1/19-20 | 京都 | 共催 |

また、成果の一端を示すため、Journal of the Physical Society of Japan の特集号 SPECIAL TOPICS: Recent Progress in Active Matter, ed. by H. Kitahata, H. Noguchi, M. Sano, Vol. 86, Issue 10 (2017)を編集、出版した。

【生命の起源やプロトセル、合成生物学分野への波及効果】

機能班を中心として、ベシクル型の人工細胞系や生命の起源に関する研究会および国際会議を他の新学術領域とも連携して開催し、国内における当該分野の研究成果を世界に発信することができた。以下に、本領域が主催または共催した主な国際会議のリストをあげる。

| | | | |
|---|-------------|-------|----|
| International Workshop "From Soft Matter to Protocell" | H25/9/18-20 | 仙台 | 協賛 |
| Open Questions on the Origin of Life (OQOL2014) | H26/7/12-13 | 国際高等研 | 共催 |
| International Workshop on Challenge to Synthesizing Life | H27/8/25-26 | 箱根 | 主催 |
| The Origin of Life -Synergy among the RNA, Protein, and Lipid Worlds- | H29/5/29-30 | 東京 | 共催 |

以上のように、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）を非平衡物理学として俯瞰することにより、複数の融合領域研究を前進させることができた。

10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

本領域では、若手育成のために以下のような取組を行うことで若手の自律的な研究を支援した。

1) 若手育成のための勉強会の開催、2) 若手中心の企画による国際会議と研究会の開催、3) 若手の他研究室への派遣プログラム、4) 領域において特に秀でた研究業績をあげた研究者に領域賞(SFS Research Award)を授与。

この取組みの成果は、以下のように若手の常勤ポストへの就職・昇進や受賞の増加にも現れている。

- ・大学院生のポスドクや助教などアカデミックポストへの就職：19名
- ・ポスドク等から助教への昇進：11名
- ・非常勤:助教から常勤准教授等への昇進（39歳以下）：10件

表3：39歳以下のアカデミックポストの異動（内訳）

| 若手研究者(39歳以下)の異動または昇進 | 人数 |
|-----------------------|----|
| 博士課程学生 → 非常勤:PD等 | 15 |
| 博士課程学生 → 非常勤:助教等 | 4 |
| 非常勤:PD等 → 非常勤:PD等 | 4 |
| 非常勤:PD等 → 非常勤:助教等(昇進) | 11 |
| 非常勤:助教等 → 非常勤:助教等 | 5 |
| 非常勤:助教等 → 常勤:准教授等(昇進) | 10 |
| 常勤:准教授等 → 常勤:准教授等 | 1 |
| 常勤:准教授等 → 常勤:教授(昇進) | 0 |
| 計(のべ) | 50 |

- ・その他、39歳以上のメンバーの常勤准教授、教授への昇進：13件
- ・領域内若手研究者による受賞：49件

笹本智弘(A01-003)第18回久保亮五記念賞、日本数学会2016年度解析学賞、齊藤圭司(A01-002)第20回久保亮五記念賞、沙川貴大(A01-002)第30回西宮湯川記念賞、トムソン・ロイター第4回リサーチフロント賞、小林研介(A01-002)日本学術振興会賞、大阪大学栄誉教授、日本学術振興会賞、田中求(A03公募)シーボルト賞、齋藤一弥(A02公募)2016年日本液晶学会業績賞、竹内一将(A1-003):大塚朋廣(A01公募):橋坂昌幸(A01公募)の3名が平成30年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞、折原宏(A02-001)2017年日本レオロジー学会学会賞、佐久間由香(A03-001)東北大学理学部物理系同窓会泉萩会奨励賞、永井健(A01公募)日本物理学会第12回若手奨励賞(領域11)、日本生物物理学会第12回若手奨励賞、芝隼人(A03-002)日本物理学会第12回若手奨励賞(領域12)、衛藤雄二郎(A02-002)日本物理学会第12回若手奨励賞(領域1)、大塚朋廣(A01公募)日本物理学会第11回若手奨励賞(領域4)、橋坂昌幸(A01公募)日本物理学会第10回若手奨励賞(領域4)、中島昭彦(澤井研日本生物物理学会第12回若手奨励賞など。

- ・研究グループ内の学生またはポスドクの受賞（ポスター賞は除く）：39件

根本孝裕(佐々研)日本物理学会第9回若手奨励賞、Springer Thesis Prize、伊藤創祐(佐野研)日本物理学会第11回若手奨励賞(領域11)、Springer Thesis Prize、川口喬吾(佐野研)日本物理学会第10回若手奨励賞(領域11)、木下佳昭(西坂研)第7回日本学術振興会育志賞、岡本隆一(好村研PD)日本物理学会第11回若手奨励賞(領域12)、垣本由布(鶴山研)ロレアル-ユネスコ女性科学者日本奨励賞、白石直人(齊藤圭研PD)日本物理学会第12回若手奨励賞(領域11)など。

11. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

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。

総括班評価者として、関連分野で多大な業績をあげられた以下の方々に評価をお願いした。

- ・ 太田隆夫氏（京都大学名誉教授、お茶の水大学名誉教授）
- ・ 鹿児島誠一氏（東京大学名誉教授）
- ・ 蔵本由紀氏（京都大学名誉教授）
- ・ 宝谷紘一氏（名古屋大学名誉教授）

これら評価委員には、領域全体会議、公開シンポジウム、2回の国際シンポジウムなどに参加して頂くとともに、ニュースレターや成果報告書を送付し、適宜アドバイスを頂き、さらに最終評価コメントを依頼した。

【評価者1のコメント】非平衡系研究は生命科学から材料科学、量子系からマクロ流体系までを包括するため、本研究領域は必然的に通常の研究活動では交流が少ない諸分野の研究者で構成され、全体をまとめ得る概念「ゆらぎと構造の協奏」を主題としている。そのため、研究集会等では構成メンバーが主テーマをどのように位置付けてご自分の研究を遂行しているかに注目した。この点については、特に、若い研究者諸君が非平衡系の「ゆらぎと構造」解明の重要性を認識した上で、自分の問題意識に基づき、のびのびと研究を行っていることを実感した。

本研究領域メンバーによる世界をリードする特筆すべき研究として、液晶乱流系の界面の運動と普遍法則の解明、同じく液晶乱流系における負の粘性の発見、マクロ層流・乱流転移での有向パーコレーション機構の同定、情報を取り入れた非平衡ゆらぎの理論提唱とその生体系への適用を挙げる。また、鮮やかな実験方法による固体量子系での非平衡ゆらぎの精密計測、ソフトマターや生体細胞のアクティブな運動の解析、および、人工細胞につながる自己生成ベシクルの実現も独自性の高い先端研究である。

物理学は理論と実験の分業が進んでいる分野であるが、本研究領域の特色の一つは、独創的な実験をデザインする研究者（とそのグループ）がその実験結果を理解するための適切かつ高等な理論を自ら構築していることである。多面的能力をもった研究者の少なからぬ存在は非平衡系研究を推し進めるのに有効であるだけでなく、広い視野をもった次世代研究者の育成にも大いに貢献していると思われる。

このように本研究領域は共同的つながりで多くの優れた研究成果を出しており、新しい研究領域を創成しつつある。終了後、それをとぎれさせることなく、何らかの形でさらに発展させる方策をメンバー諸氏は考えるべきである。

【評価者2のコメント】この領域の研究目的は、非平衡系を記述する一般法則を見出し、それに立脚して自然現象の理解と制御を目指すことである。特に、非平衡揺らぎと時空間構造にまとを定め、ミクロとマクロをつなぐメソスケール領域での理解に重点を置く。この領域の特徴は、非平衡統計熱力学理論とさまざまな非平衡系でのマクロな時空間構造という、それぞれ実績のある二つの研究分野の連携・融合を目指すことである。まず、得られた研究成果について、掲げた目標は十分に達成され、当初の期待を超える成果もいくつか生まれた。ミクロとマクロをつなぐために必須の、多数の新実験技術が創成され、現実の系を念頭に置いた非平衡揺らぎの法則の深化と展開に結びついた。具体的な研究成果の例として、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、量子系における揺らぎ、負の粘性の発見、細胞運動と形態変化の関係の追究、自己駆動のメカニズムの理論と実験などがあげられる。また、特記すべきことは、アクティブマターの研究を公募でひろく取り上げたことである。アクティブマターの研究は本領域発足後に急激に活発になったものだが、本領域の計画班が公募班との共同研究を積極的に進めて、いくつもの特筆すべき成果が上げられた。

領域の運営について求められたことは、非平衡統計熱力学の理論と、その対象となる多彩な系における実験との、①相互理解、②連携、融合を通じて、③共通の理解をもつ研究者集団を作り出すことであった。最初の1～2年でメンバーの意識が変化したことが感じられ、①が達成できたことが分かった。2～4年目には②が実現された、4～5年目には③に到達したと見受けられる。また、他分野、他領域との相互理解と連携の推進、および若手研究者の育成についても、想定を超える成果があげられた。

【評価者3のコメント】「ゆらぎと構造の協奏」は根本的に大変挑戦的な研究課題である。この点で「新学術領域研究」にはピッタリな課題と言える。つまり、通常では離れた学問分野であるが故に交流の無い人々を集めて来て、未知の分野を開拓する試みである。数学、物理、化学、生物等のプロの研究者に「非平衡系における普遍法則の確立」という課題を与えて、共同研究をさせようとするのである。至難のわざである。代表者には、よほどのカリスマ性と極めて広い知識と人間的柔軟性が要求される。広い学問分野をまとめる工夫が「ゆらぎと構造の協奏」というマジックワードである。特に「構造」がユニークである。この領域がスタートした頃の発表会では、応用数理学会での発表と生物学会の発表が混ざっている感じで、聞く方にも広範な知識が要求されて大変辛い発表会であった。しかし会を重ねるにしたがって、お互いの用語や発想法に慣れて来て、休憩時間帯にも討論がつづいていた。出席者も圧倒的に20代の人が多く、元気がよかった。懇親会はもちろんであるが、更に佐野代表を囲んでの2次会にも若い人の割合が増加するのには驚きであった。最近の風潮として、若者は年寄りを避けるものですが、必然的に成果は尻上がりに増えて来ましたが、例えば筆者の専門分野である、ソフトマターに関連していえば、DNAを繰り返して自己増殖する人工細胞系や走化性を示す膜小胞の作成は画期的でした。一般的に、プロジェクトが成功する最大の要因は、ヘッドの能力と人柄です。その点で、とらえようの無いほど、茫漠としたテーマと人間をまとめられた佐野雅己氏の努力を大とします。

【評価者4のコメント】以下は、物理学のバックグラウンドの下、非線形科学に長年携わった外部評価委員による本研究の歴史的意義に関するコメントである。

基礎科学としての物理学が自然現象の理解を目指すとき、それは2つの基本的スタンスに貫かれている。第一は、万物の基本をなすミクロな実体とその支配法則に立脚して、堅固な建築物のごとく世界を再構成するという基本路線の採用である。第二は、多様性に内在する“大規模な”普遍法則（ないし自然に潜在する大規模な不変構造）の発見に至上の価値を見出すという価値観である。非線形科学の展開においては物理学からの寄与がとりわけ大きい、それは物理学が上記の第一のくびきを自ら振りほどいて、第二の可能性をマクロ世界の複雑な諸現象に賭けた結果であろう。事実、マクロな複雑世界に潜在する大規模な不変構造の発見を通して、この世界が優に基礎科学の対象となりうることを非線形科学は実証したのである。したがって、このような研究対象においては、現象の骨格をなす時空「構造」にもっぱら関心が向けられ、「ゆらぎ」はほとんど問題にされなかった。むしろ、この決定論的態度こそがこの分野を豊かにし、たとえばマクロレベルの「ゆらぎ」（カオス）の発見という逆説をも生んだのである。

しかし、物理学における生命現象への関心の高まりや、凝縮系物理学におけるテクノロジーの進歩等の結果として、構造とゆらぎが不可分なメゾスケールの非平衡系における非線形現象の解明が必須となるのは必然である。その結果、従来の物理学から遁走して新たな領域を形成したかに思われた非線形科学は再び物理学と地続きになり、それによって物理学が諸科学により開かれた学問となり、内実においても格段に豊かさと深まりを増しつつあるのではなかろうか。

本研究は、まさにこのような学問の大きな流れに沿い、時代の要請に応える歴史的意義をもつプロジェクトであり、あれこれの成果を云々する以前にその基本的存在価値が認められるべきものであろう。

また、2回の国際シンポジウムでは、関連分野の国際的な著名研究者である **Jukka Pekola (Academy Professor, Low Temperature Laboratory, Aalto University School of Science)** と **Clemens Bechinger (Professor, Universität Stuttgart, Germany)** 等に評価コメントをお願いし、各々以下の高い評価を頂いた。

“The International Symposium, SFS2015, was very successful. All of talks and posters were high level presentations. It was almost like one of the Gordon Conferences. Statistical mechanics in Japan is keep producing important ground breaking results.”

“The statistical physics community in Japan is exceptionally strong. It is lead and mentored by several worldwide known top scientists within the community. What made a particularly positive impression on me was the active and wide participation of brilliant young Japanese scientists within this field. I want to congratulate you for having such an enthusiastic community to work with. This is a solid and long-lasting basis for a broad research consortium within the area of non-equilibrium statistical physics.”