

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740287

研究課題名(和文) 自走液滴及びその集団系を用いた非平衡揺らぎの特性評価

研究課題名(英文) Evaluation of nonequilibrium fluctuation focused on self-propelled droplets and their collective motion

研究代表者

住野 豊 (Sumino, Yutaka)

東京理科大学・理学部・講師

研究者番号：00518384

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では平衡より遠く離れた系で観察される揺らぎの特性を解析し、特にその普遍的側面を見出すことを目標として研究を行った。具体的には、自発的に運動する界面、自ら動く自発駆動粒、および自発駆動粒子集団に関し階層横断的に揺らぎの性質を解析した。

自発運動する界面に関しては濡れの不均一性やマランゴニ効果、会合体の生成の影響による界面揺らぎの特性を主に実験主導の研究を行った。また、自発駆動粒子に関する研究はマランゴニ効果により運動する液滴系の研究を主として理論的側面から行った。最後に自発駆動する粒子が集団化した際に示す、集団運動に関しては理論・数値実験を主体として非平衡系に見られる相挙動を解明した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we aimed to unveil the characteristics of fluctuation and noise in far-from-equilibrium conditions; especially focused on the self-propelled droplets and their collective motion. For this purpose, spontaneous interfacial agitation, self-propelled object, and the collective behavior of self-propelled objects are investigated.

As for the researches on interfacial agitation, we investigated the effect of wettability imbalance, Marangoni effect, and aggregate formation. For these researches, experimental aspect showed progress. Notably, we developed mathematical model for the interfacial fluctuation due to aggregate formation. As for the research on self-propelled objects, we studied theoretical aspect of a self-propelled droplet driven by Marangoni effect. As for the collective behavior of self-propelled particles, we numerically and theoretically studied nonequilibrium phase, which appeared as a result of memory effect.

研究分野：非平衡ソフトマター物理学

キーワード：非平衡物理 界面揺らぎ 自発運動 集団運動 ソフトマター 散逸構造

1. 研究開始当初の背景

熱平衡系及びその近傍での熱揺らぎに関しては、実験的な検証を伴った理論的研究がさかんに進められている。一方、系にエネルギー流が存在するような平衡より遠く離れた条件下では系が自発的に時空間での秩序ある構造を生み出すとともに、熱揺らぎがエネルギー流により強調されることで強い揺らぎが生じる。このような揺らぎはスケール間で相互作用しながらマクロな揺らぎを生み出している。しかしながら、平衡近傍の場合と異なり平衡より遠く離れた条件での揺らぎの性質、特にスケール間の相互作用を系統的に扱った研究はなされていない。

平衡より離れた条件を課した系で特に揺らぎのスケール間の相互作用が重要となりうる系として、エネルギー流の存在により駆動される自発運動系が考えられる。国内では末松らのマランゴニ流で自発運動する樟脳粒子の集団系の渋滞現象の研究や、国外でのSohらによる樟脳粒子集団系の研究、Thutupalliらによる液滴の集団運動に関する研究が存在したものの、自発運動体の揺らぎや揺らぎの集積化に関するスケール横断的な研究は、国内外を問わず現時点においてなされていない状況にあった。そこで本研究では自発運動系を用い、平衡より遠くはなれた条件での揺らぎに関して、スケール横断的な実験・理論的研究を遂行した。

2. 研究の目的

界面での非平衡条件を用いて運動する**(1)界面自発運動**、界面自発運動を用いて運動する**(2)自発駆動体**、および自発駆動体の**(3)集団系**に関して揺らぎに着目してスケール横断的な揺らぎの相互作用を見出す研究を行った。界面揺らぎは集積することにより、液滴運動をもたらすことが出来る。また液滴運動を集積させることで、集団運動を実現することも可能といえる。本研究ではこれら個別のスケールに対して時間・空間的な揺らぎを観察してその特性を明らかにした。

実験的な研究では、油・水・界面活性剤系を主として対象とした。界面揺らぎが生じる機構に関して、光学顕微鏡・小角中性子散乱法・小角X線散乱法などを用いて実験的に観察した。また、化学系を用いることで、化学種の仕込み濃度や外部注入速度、外部からの応力などにより外部から容易に摂動を与えることが出来た。この際生じる揺らぎの応答に関して定量的に観察した。また定量的な観察を再現する数理モデルも適宜構築し、数値計算による再現も目指した。

一方で、自発運動体が集合した集団運動のスケールに関しては、単純化した数理モデルが計算速度の観点からも有効である。将来的に、自発運動体自体の内部状態を取り込むことを視野に入れ、単純化された内部自由度がある自発運動体の数理モデルを構築し、その

集団挙動に関して数値計算をベースとして研究を進めた。

3. 研究の方法

実験は物理化学系で自発運動を示すことの知られている系、マランゴニ効果や濡れの不均一性、会合体の生成により自発駆動する液滴系及びその集団系を用いた。

また、関連して発見・解析した実験系として、より単純な会合体生成系に関する研究を行った。界面近傍で弾性体が生成する系において、一様外力を加えるだけで界面形状が不安定化する系である。この系に関しては、界面の自発的な形状揺らぎを主として解析を行った。

以上の実験系を用い個々の駆動体の運動様相や変形様相の揺らぎを観察・解析した。この際、実験系への化学種の仕込み濃度や外部からの注入速度をパラメータとして用いた。これにより摂動を与え、系の応答として揺らぎの特性を時間・空間的に解析した。

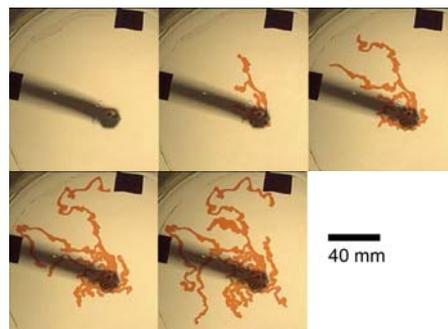
集団化による揺らぎの集積挙動に関しては、実験的に自発駆動する液滴集団や樟脳集団、ヤヌス粒子の集団に関し解析を行うとともに、単純化数理モデルを用いて数値計算主導の研究も行った。

4. 研究成果

本研究計画では、**(1)界面自発運動**、**(2)界面現象で自発的に運動する液滴・粒子**、**(3)自発駆動する粒子集団**のそれぞれに対して実験・理論的な研究を行った。以下に具体的な成果に関して列挙する。

(1)界面自発運動に見られる揺らぎ

平衡より遠く離れた系の揺らぎとして、化学種が界面を通過する化学流が存在する状態で界面形状が揺らぐ系に関して実験を行った。界面形状が自発的に揺らぐ機構としては、自由界面上でのマランゴニ効果、基板の濡れの不均一性(雑誌論文⑤)、会合体の生成(雑誌論文①, ③, ④, ⑫)が挙げられる。ここでは特に進展の見られた会合体の生成により生じる界面の不安定性に関する研究を示す。



(図1) 枝型界面不安定性の成長様相 (1 s 毎のスナップショット)

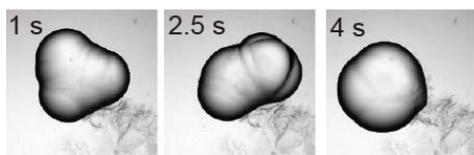
(a) 界面の固化が由来となって生じる枝型パターン形成

固化と流動の結合は、アクトミオシゲルのゲル化と運動が結合する細胞内部の原形質流動や、冷却により固化が生じる噴火口周辺での溶岩の流動など様々な局面で生じる。ここでは、簡便な系により固化と流動の結合する条件を構築し、その際に生じる界面の揺らぎに関して研究を行った。

系としては、水ガラスと金属塩水溶液を用いた系に着目した。酸化ナトリウムと二酸化ケイ素の混合物である水ガラスは粘性液体の性質を示す。しかしながら、酸性水溶液や金属塩水溶液と接触すると固化する性質を持つ。このような水ガラスによりヘレショウセルと呼ばれる薄いセルを満たした後、セル内部に金属塩水溶液を注入すると、金属塩水溶液のフロントが固化するとともに、フロントが枝型形状をとることを見出した(図1)。また、このような枝型のパターンは枝数などを注入速度により制御可能なことも実験により見出した。

我々は、本実験系に対して、界面上の固化した会合体が界面運動を阻害すること、会合体の密度が保存することを考慮に入れ、界面運動の数理モデルを現象論的に構築した。この数理モデルに関して数理的に解析すると、進行する界面には前進するのに最適な曲率が存在することを見出した。これは最適な曲率をもつ界面は最小の圧力で前進できることを示している。また注入時の注入速度を一定とした数値計算を行うことで枝型パターンの成長ダイナミクスを再現することにも成功した。本研究内容は現在投稿論文として投稿準備中である。

(b) 界面上で生成した会合体の転移が起因となり生じる界面上で blebbing 不安定性



(図2) 会合体の構造転移で生じる界面 blebbing 不安定性 (スケールバー: 0.5 mm)

細胞内に見られるアクトミオシゲルは単なる弾性体としての性質を持つことに加え、能動的に収縮し応力を生み出す性質を持つ。このことから、アクトミオシンのようなゲルのことを能動ゲルと呼ぶ。本研究では、このような能動ゲルを化学系により構築することを目指した。

実験系としては、水相に陽イオン性界面活性剤(塩化ステアリルトリメチルアンモニウム:STAC)を混合した水溶液を用いた。また、油相として長鎖の脂肪酸(パルミチン酸:PA)を混合したテトラデカン溶液を用いた。水相中に STAC と PA を混合すると、 α ゲルと呼ば

れる会合体が生成し高い粘性と弾性を示す。またこの会合体は、数 10 nm 程度の繰り返し距離を有する L_{β} 型のラメラ構造をもつ。本系のように、 α ゲルの構成要素である PA を油相中に導入することで、油水界面で特異的に弾性を持つ α ゲルが生成する系を構築した。

我々はこの系で、図2に示すような bleb 運動と呼ばれる界面不安定性が生じることを本研究プロジェクトスタート前より見出していた。また、油水界面近傍で、 α ゲルに相当するラメラ構造由来の散乱が観察できることも *in situ* の小角 X 線散乱で見出していた。このことから、我々は生成する α ゲルが受動的な弾性体であることを仮定して、界面不安定性が生じうることを示す数理モデルも構築していた。

このような状況であったが、本プロジェクトが進展するにつれ、界面不安定性が生成した会合体が受動的な弾性であるとするのが不可能であることを見出した。これは数理モデルの予測に対して、 α ゲルの物性値を当てはめると、弾性体が生成しうる応力は変形を生じるに足りないことが明らかとなったからである。このことより、界面運動の機構を明らかにする上で会合体の生成ダイナミクスを明らかにする必要があると考えた。そこで、小角中性子散乱法を用いて会合体の生成ダイナミクスを詳細に観察した。また、対比対象として水相中の STAC の濃度を高くしたものも用いた。これは STAC 濃度が高い水溶液条件では、界面が bleb 運動を示さず静止するのからである。つまり、この条件でも生成したばかりの会合体の特性を観察することで、界面運動特有の会合体挙動を観察した。

過去の研究と同様界面から 1-2 mm 程度はなれた領域で生成した会合体を観察すると、界面が bleb 運動を示す際および示さない際ともに 30-40 nm 程度のラメラ型の会合体が生成していることを確認した。またこの際生成する会合体の繰り返し距離もこれまでの小角 X 線散乱で観察されたものと一致していた。一方で、界面直上にあたる領域で散乱を観察すると、bleb 運動を示す際のみ 70 nm 程度の繰り返し距離を持つラメラ構造が観察された。これは、以前に観察されていたラメラの繰り返し距離の倍程度の距離となっている。

以上の結果より、界面が bleb 型運動を示す際には、70 nm 程度の繰り返し距離を持つラ



(図3) 界面 bleb 運動のモデル

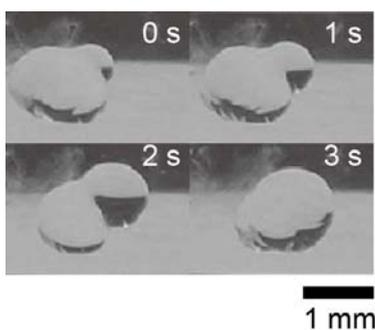
メラ構造が界面近傍で生成し、界面から離れると即座に、30 nm 程度の繰り返し距離を持つメラ構造に転移することを見出した。このことを踏まえ、弾性を持つ会合体の転移が生じることに起因して、bleb 型運動が生じるモデルを提唱している (図 3)。

本研究成果は、 α ゲルの生成系は能動的に応力を生成する能動ゲルの一候補であることを示している。本研究成果を発展・応用させることで、純粋に化学系で構成された能動ゲル系が構築できると考えられる。これにより理論研究が先行している能動ゲルに関して実験より定量性あるフィードバックを与えることが可能と思われる。

(2) 自発的に運動する液滴・粒子

自発的に運動する系としては、自由界面のマランゴニ効果に由来して運動を示す系(雑誌論文⑦, ⑧, ⑨, ⑩, 図書①), 弾性を持つ会合体生成に由来する系(雑誌論文①, ③, ④)に関して研究を行った。

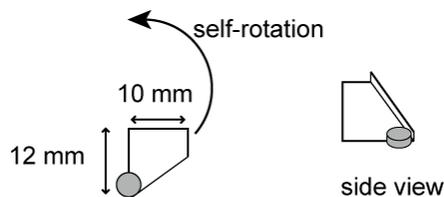
理論的な研究として、自由界面のマランゴニ効果による液滴運動に関して研究を行った。ここでは、流体力学を考慮した液滴運動モデルを構築した。液滴運動を考える上で流体力学が重要になるが、ここでは低レイノルズ極限を考えた。低レイノルズ極限で、更に流体場の緩和が早いとすると液滴の境界条件が定まることで液滴周辺の流体場が計算でき、液滴の運動速度等が導出できる。本プロジェクトでは液滴内部より界面活性剤が界面に吸着し外部相へ流出する系や界面に界面活性剤の源があり界面回転運動を誘起する系、更には液滴内部での化学反応がパターンを生じそれに結合して液滴が運動する系などに関してそれぞれ数理モデルや数値計算により研究を行った。



(図 4) 水相中で容器底面を歩く油滴

前述した弾性を持つ会合体を生成することで界面が bleb 運動を示す系においても、bleb 運動により液滴が運動を示す。図 4 には油相に比重の大きい油を混合することで、水相中で容器底面を歩く油滴を示している。このように運動する bleb 界面運動に起因した油滴の運動に関し、油滴の重心を追跡しその揺らぎの様子を観察すると mm 程度にもかかわらず油滴重心の運動は拡散的に運動を示すことを確認した。しかしながら、外場によ

る油滴運動の制御や応答の変化は再現性のよい実験系の構築に課題があり成功していない。今後の反転として、油滴内部に強磁性体のコロイドを封入し磁場による摂動を実現することが考えられる。



(図 5) 自発回転する樟脳船

実験的な研究としては、当初の目的液滴にくらべ簡便な系として樟脳粒子の自発運動を用いた実験も行った。樟脳は昇華性を有する固体であり、水面に展開すると界面活性を示す。このため水面上に樟脳を静置すると樟脳膜が展開し、樟脳より遠方では樟脳密度が低下する。これにより樟脳周辺に界面張力の勾配が生まれてマランゴニ流が生じる。PET フィルムを成型し樟脳粒を付着させると自発的に回転運動する樟脳船を構築できる (図 5)。このような回転運動する樟脳船を構築すると、回転運動に加えて回転中心が移動する分岐が存在していることを見出した。本研究に関しては現在数理モデルによる解析を進行中である。

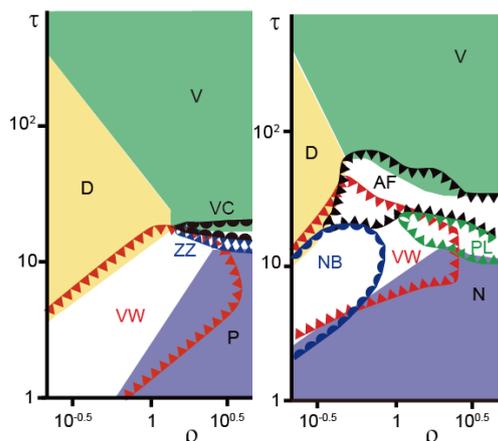
以上のように、駆動体単体の揺らぎ解析に関しては現在進行中であり、実験・理論双方とも集団挙動へのつながりを見出すことが今後の課題であるといえる。

(3) 自発駆動する粒子集団の集団挙動

自発駆動する粒子集団の集団挙動としては、主として数理モデルに基づいた数値解析による研究を行った(雑誌論文②)。これは、今回の主とした系である界面不安定性により自発駆動する液滴・粒子を集団化させることが困難であったからである。

本研究では単純である一方、将来的に内部自由度の影響を取り込むことの出来る数理モデルを構築した。具体的には、Vicsek モデルに対して記憶の効果を取り入れる拡張を行った。Vicsek モデルとは、単体の自発駆動粒子に関して、速度が一定とし運動方向の自由度のみを認めたモデルである。運動方向には白色ガウスノイズを導入する。これにより長時間的には単一粒子は拡散的な挙動を見せる。相互作用としては、近傍粒子とのみ向きを介した相互作用を考慮する。このような Vicsek モデルは粒子密度を上昇させることで、乱雑な運動から全粒子の運動方向がそろった運動への転移や、バンドなど密度分離したパターンの生成をすることが知られていた。本研究ではミクロな自由度を運動方向の揺らぎに関する記憶の効果として取り込んだ。また相互作用としては、向きを同

じ向き揃える polar なモデルに加え、同じ向きは真反対に揃える nematic なモデルについても研究を行った。



(図 6) 運動方向の揺らぎに記憶の効果を入れた粒子集団の集団挙動の相図((左)polarモデル, (右)nematicモデル)

このような数理モデルに対して、揺らぎの時間相関を示す時定数 τ と粒子密度 ρ を変化させ運動様相の相図を作成した。ここで図6に関して(左:polar)D:無秩序相, P:polar相, VW:ソリトン相 (右:nematic) D:無秩序相, N:nematic相, NB: バンド相に関しては、これまでの記憶を考慮しないモデルでも現れていた相である。このような相に加え, V: 渦格子相が polar/nematic モデル双方に共通して見られるほか, 渦構造が不安定化した(左:polar)VC: 渦カオス相, (右:nematic) AF: 能動泡や一様秩序相が不安定化した(左:polar) ZZ: ジグザグ相, (右:nematic) PL: レーン相が見られた。これらは内部自由度を記憶の影響として単純な形式で導入したことを考えると, 生成する相の多様さは特筆すべき点である。また, 右:nematic モデルにおいて, 本来は polar モデルに固有の VW : soliton 相が生じている点も興味深い。

本研究により, 内部自由度を記憶の形式で取り込んだ Vicsek モデルは多様な相を示すことが明らかとなった。翻ると多様な集団挙動が現れていて, 単一粒子としては比較的単純なダイナミクスで記述できる可能性を示した仕事とも言える。また, 単純な内部自由度でも外部コントロールすることで集団としての挙動が劇的に変化することから, ミクロスケールのロボットなどプログラムが困難な系に対しても, 集団挙動としてプログラム可能なことが示唆された。

以上の数理的に成功を収めた集団挙動に関する研究であるが, 実験的な研究を将来的に行うことが課題であるといえる。本プロジェクト中には, 将来的に集団挙動を観察可能な実験系としてコロイド粒子に非対称に表面コートを施したもの(ヤヌス粒子)に関して実験系を構築し, 集団化にも取り組んだ。本系に関しては将来的な発展が望まれる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① 住野豊, "油・水・界面活性剤を用いた能動液滴の作成" Colloid and Interface Communication, 査読なし, 40 No.2, 2015, 15-17.
- ② K. H. Nagai, Y. Sumino, R. Montagne, I. S. Aranson, and H. Chaté, "Collective Motion of Self-Propelled Particles with Memory", 査読あり, Phys. Rev. Lett. 114, 2015, 168001. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.168001>
- ③ 住野豊 北畑裕之 山田悟史 長尾道弘 篠原佑也 瀬戸秀紀 "界面活性剤会合体に誘起される自発運動-会合体生成の SAXS・SANS によるその場観察-"波紋, 査読あり, 24, 2014, 244-249.
- ④ Y. Sumino and K. Yoshikawa, "Amoeba-like motion of an oil droplet", Euro. Phys. J. ST, 査読あり, 223, 2014, 1345-1352. <http://dx.doi.org/10.1140/epjst/e2014-02194-x>
- ⑤ Y. Takenaka, Y. Sumino and T. Ozono "Dewetting of a droplet induced by the adsorption of surfactants on a glass substrate", Soft Matter, 査読あり, 10, 2014, 5597-5602. <http://dx.doi.org/10.1039/C4SM00798K>
- ⑥ 永井健, 住野豊, 大岩和弘, "ダイニンに駆動された微小管の集団運動" 総説 生物物理, 査読あり, 53 No.3, 2013, 149-152.
- ⑦ K. H. Nagai, F. Takabatake, Y. Sumino, H. Kitahata, M. Ichikawa and N. Yoshinaga, "Rotational motion of a droplet induced by interfacial tension", Phys. Rev. E, 査読あり, 87, 2013, 013009. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.87.013009>
- ⑧ 北畑裕之, 義永那津人, 永井健, 住野豊, "パターン形成と結合した液滴の自発運動" 最近の研究から、日本物理学会誌, 査読なし, 第 67 巻 No.6, 2012, 385-389.
- ⑨ H. Kitahata, N. Yoshinaga, K. H. Nagai and Y. Sumino, "Spontaneous motion of a Belousov-Zhabotinsky reaction droplet coupled with a spiral wave", Chem. Lett., 査読あり, 41, 2012, 1052-1054. <http://dx.doi.org/10.1246/cl.2012.1052>
- ⑩ N. Yoshinaga, K. H. Nagai, Y. Sumino and H. Kitahata, "Drift instability in the motion of a fluid droplet with a

chemically reactive surface driven by Marangoni flow", Phys. Rev. E, 査読あり, 86, 2012, 016108.

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.86.016108>

- ⑪ T. Yamaguchi, H. Muroo, Y. Sumino, and M. Doi, "Asymmetry-symmetry transition of double-sided adhesive tapes", Phys. Rev. E, 査読あり, 2012, 85, 061802.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.85.061802>
- ⑫ Y. Sumino, H. Shibayama, T. Yamaguchi, T. Kajiyama and M. Doi, "Failure of film formation of viscoelastic fluid: Dynamics of viscoelastic fluid in a partially filled horizontally rotating cylinder", Phys. Rev. E, 査読あり, 85, 2012, 046307.
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.85.046307>
- [学会発表] (計 30 件)
- ① 日本物理学会第 70 回年次大会(2015)(早稲田大学早稲田キャンパス・2015 年 3 月 21 日-24 日), 住野豊 "非平衡ソフトマター系における自発運動の実験・理論的研究"(招待講演(24AA-3))
- ② Focus Meeting of the Kyoto Winter School for Statistical Mechanics (京都大学吉田キャンパス・2015 年 2 月 16 日-17 日), Yutaka Sumino "Numerical study on the collective behavior of self-propelled particle with finite memory"(招待講演)
- ③ 第 52 回生物物理学会年 (札幌コンベンションセンター・2014 年 9 月 25 日-27 日), 住野豊 "Amoeba like motion of the oil-water interface induced by generation of surfactant aggregate."(口頭発表) "セッション:あたかも生物のように動く非線形化学物理系" (オーガナイザー: 高木清二, 住野豊, 北畑裕之)
- ④ CSRC workshop on active matter, (Computational Science Research Center, Beijing・2014 年 6 月 24 日-25 日), Yutaka Sumino, "Collective behavior of self-propelled microtubule and its numerical modeling." (口頭発表・招待講演)
- ⑤ 第 64 回コロイドおよび界面化学討論会 (名古屋工業大学・2013 年 9 月 19 日) 住野豊, 北畑裕之, 瀬戸秀紀, 界面での会合体形成による液滴のアメーバ状自発運動 (依頼講演・口頭発表)2A05
- ⑥ 第 23 回「非線形反応と協同現象」研究会 (北海道大学札幌キャンパス・2013 年 12 月 7 日) 住野豊, 非生命系を用いた自発運動と集団運動(口頭発表)
- ⑦ 第 36 回日本分子生物学会年会(神戸国際会議場・2013 年 12 月 6 日) 住野豊, 非平

衡ソフトマターでの自発運動が見せる階層構造(口頭発表)4AW5-2

- ⑧ Statphys25, (Seoul National University, Seoul, Korea, 2013 年 7 月 22 日), Yutaka Sumino, Ken H. Nagai, Hugues Chaté, Swarming behavior of self-propelled rods with internal memory(Oral)162
- ⑨ Satellite meeting of Statphys25 "Patterns & waves in populations of cells and active particles"(Hana Square, Korea University, Seoul, Korea, 2013 年 7 月 20 日) Yutaka Sumino, Vortex lattice formation of self-propelled microtubules induced by local nematic interaction(Invited: Oral)
- ⑩ Wetting and Capillarity in Complex Systems (WCCS13) (Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Dresden, 2013 年 2 月 18-22 日) Yutaka Sumino, Emergence of droplet motion induced by a chemical flux of surfactant (Invited: Oral)
- ⑪ 第 35 回分子生物学会 (福岡国際会議場/マリンメッセ福岡・2012 年 12 月 13 日) 住野豊, 自発運動する微小管が局所整列相互作用により生成する巨大な渦格子: 能動的な運動が巨大な秩序構造を作る (Invited: 口頭発表)4W7I-7
- ⑫ Instabilities and Control of Excitable Networks: From macro- to nano-systems(ICENet2012) (Dolgoprudny, Moscow Area, Russia, 2012 年 5 月 25-30 日) Yutaka Sumino, Ken H. Nagai, K. Yoshikawa, H. Chate, and K. Oiwa, Large scale vortex lattice of self-propelled microtubules induced by local interaction(Invited: Oral presentiaion)26th-4

[図書] (計 1 件)

- ① H. Kitahata, N. Yoshinaga, K. H. Nagai and Y. Sumino (ed.) Shuichi Kinoshita "Pattern Formations and Oscillatory Phenomena" Elsevier, Chapter 3 "Dynamics of Droplets" Elsevier(2013)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

http://www.rs.tus.ac.jp/sumino_lab/

<https://sites.google.com/site/ysumino/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

住野豊 (SUMINO YUTAKA)

東京理科大学理学部応用物理学学科講師

研究者番号: 00518384