

二国間交流事業 共同研究報告書

令和5年4月14日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]
国立大学法人千葉大学・大学院理学研究院
[職・氏名]
教授・北畑 裕之
[課題番号]
JPJSBP 120204602

1. 事業名 相手国: ポーランド (振興会対応機関: PAN) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 相互作用する自己駆動粒子が創発する時空間パターン

(英文) Complex spatio-temporal structures emerging from interacting self-propelled particles3. 共同研究実施期間 2020年4月1日 ~ 2023年3月31日 (3年0ヶ月)【延長前】 2020年4月1日 ~ 2022年3月31日 (2年0ヶ月)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

Polish Academy of Sciences ・ Professor ・ Jerzy Gorecki

5. 委託費総額(返還額を除く)

本事業により執行した委託費総額		4,750,000 円
内訳	1年度目執行経費	2,375,000 円
	2年度目執行経費	2,375,000 円
	3年度目執行経費	- 円

6. 共同研究実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

日本側参加者等	33名
相手国側参加者等	10名

* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

7. 派遣・受入実績

	派遣		受入
	相手国	第三国	
1年度目	0	0	0 (0)
2年度目	0	0	0 (0)
3年度目	4	0	0 (0)

* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣: 委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。

受入: 相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は委託費で滞在費等を負担した内数。

8. 研究交流の概要・成果等

(1)研究交流概要(全期間を通じた研究交流の目的・実施状況)

非平衡条件下で自由エネルギーを消費しつつ運動する系が生み出す時空間構造はアクティブマターとして近年盛んに研究されてきている。特に、個々の素子の対称性を元に議論する研究が多く、例えば、個々の素子が特徴的な向きを持ち、向きに依存した相互作用を考える Viscek モデルや、素子が揺らぎを受けながら特徴的な向きに運動するアクティブブラウニアンモデルなどが提案され、それらのモデルを基礎として多くの研究がなされている。これらのモデルにおいては、自ら動き回る素子の重心運動とその向きを考慮した相互作用を考えるのが一般的であるが、微生物の運動との対応を考えると、微生物は周囲の環境に化学物質を放出しその化学物質を介した相互作用をすることも多い。実際、大腸菌培養系における増殖パターン形成は、化学物質に対する走化性が重要な役割を担うことが報告されている。また、微生物は自ら動き回ることで周囲の流体運動を引き起こすため、その流体による化学物質の輸送も重要となる。

そこで、われわれは、非平衡系で自由エネルギーを消費しつつ運動する系を考察するにあたり、重心位置と向きや方向だけの自由度だけで考えるのではなく、周囲の環境を介した相互作用、特に放出する化学物質を通じた相互作用に着目して研究を行ってきた。これまでに単純な系からボトムアップ的に研究を進めるため、単独の自己駆動粒子の運動、および相互作用する少数個の粒子の運動を調べてきた。具体的には、樟脳のように表面張力を下げる物質を放出する粒子が単独で存在する場合の周囲の濃度場、流体場の様子を明らかにした。本研究においては、その発展として場を介して相互作用する多数の粒子が生み出す時空間構造を実験と理論の両面から明らかにすることを目的とした。特に、自己駆動粒子が場に物質を放出し、場を通して拡散的、および、流体的な相互作用する場合に着目し、実験、数値計算、理論解析により多面的に研究を進めた。それぞれの系について具体的な知見を積み、それらを総合して、拡散・流体場を通して相互作用する自己駆動粒子系の挙動について、主に対称性の立場から理解することを目指した。

以上の目的を達成するため、次の4つのテーマを中心に研究を進めた。

- (i)界面活性を持つ物質を放出する粒子の間欠運動に見られる同期現象
- (ii)自己駆動粒子と受動粒子の集団系の挙動
- (iii)非等形状の粒子を用いた自転運動およびその集団運動
- (iv)変形しつつ運動する液滴の挙動および集団運動

これらのテーマにおいて、ポーランドの Gorecki 教授らの持つ理論的知識と、日本側グループが持つ実験的技術を組み合わせ、相互作用する自己駆動粒子が創発する時空間パターンのそれぞれの例についての知見を深めてきた。

令和2年度、3年度および令和4年度の前半は Covid-19 感染拡大のため、双方の研究者の渡航が困難であった。そのため、Zoom 等のオンラインツールを用いて打合せを行い、研究を遂行してきた。また、令和3年10月、令和4年11月には、当初、対面で開催する予定であったミニ国際シンポジウムをオンラインで開催した。令和4年度後半に入り、渡航が可能になったため、令和5年3月に日本側研究者4名がポーランド・ワルシャワ Polish Academy of Sciences を訪問し、研究内容の紹介および共同研究打合せを行った。

(2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

上記のように日本側、ポーランド側の研究交流を行いつつ、上記研究テーマに沿って研究を進めた結果、それぞれのテーマについて以下の結果が得られた。

- (i)界面活性を持つ物質を放出する粒子の間欠運動に見られる同期現象

界面活性剤を放出する物質をプレートの下に固着し、水面に浮かべるとそのプレートのサイズに応じて等速運動や間欠運動することが報告されている。今回、このようなプレートの下面に界面活性を持つ樟脳の粒

を取り付け、プレートを自由に回転できる腕の先に取り付けて回転運動する系を構築した。樟脳粒を取り付ける位置を変えることで、回転角速度が一定の状態、振動する状態、間欠的に運動する状態に遷移することを明らかにした。更には数理モデルを用いてこの転移現象を再現することに成功した。この成果は *Phys. Chem. Chem. Phys.* 誌に掲載されている。複数の系を準備した際に濃度場を通して間欠運動のタイミング同期が起こることが予備実験で得られており、今後の研究の発展が望まれる。

(ii) 自己駆動粒子と受動粒子の集団系の挙動

樟脳粒のように周囲に表面張力を下げる物質を拡散させることで運動する自己駆動粒子系が盛んに研究されている。このような粒子が複数存在すると濃度場を介して相互作用する。本研究では、自己駆動する粒子(能動粒子)と単に濃度場により駆動される粒子(受動粒子)から構成させる系を考察した。これらの能動粒子と受動粒子の間に引力相互作用が働くと仮定すると、受動粒子と能動粒子がペアとなって運動し、また溶液の粘性や界面活性物質の供給率によって直進運動から回転(公転)運動への転移が見られた。樟脳粒と金属ワッシャーによる実験系でこの転移を観察した。また、濃度場の発展方程式と粒子の運動方程式を組み合わせたモデルを構築し数値計算で再現するとともに線形安定性解析も行った。この成果は *Phys. Rev. E* 誌において公開されている。今後、多数の受動・能動粒子を含む系を考えることで、より興味深い時空間構造が得られることが期待される。

(iii) 非等形状の粒子を用いた自転運動およびその集団運動

樟脳を濾紙にしみこませたものをプロペラ型にカットし中心に軸を通すことによってプロペラ型の自己駆動回転子を作製し、水面での回転子の回転方向と回転速度を実験的に調べた。その結果プロペラ形状がカイラルな非対称性がある場合でも両方向に回転すること、そして、その回転角速度が回転の向きによって異なることを見出した。一方、カイラルな非対称性を持たない場合にはどちら向きの回転でも同じ角速度で回転した。これは、不完全分岐が起こっていることが示唆される。樟脳分子の溶け出しとそれによる表面張力の低下を考慮した数理モデルを考え、非対称分岐が起こるための条件について考察した。この内容は *Phys. Rev. E* 誌に公開された。また、様々な形状の界面活性を持つ粒子の運動方向と対称性の関係性に関する研究も行い、それらは *Front. Phys.* 誌、*J. Phys. Soc. Jpn.* 誌、*Phys. Chem. Chem. Phys.* 誌に掲載されている。また、界面活性を持つ粒子をある軸回りで回転できるブレードの先に固定した回転子を考え、その相互作用を考慮することで同期現象を議論した。本内容は論文としてまとめ、投稿中である。今後より多くの回転子の相互作用系への発展が望まれる。

(iv) 変形しつつ運動する液滴の挙動および集団運動

上記の3件は固体粒子の運動を主題としていたが、粒子の代わりに界面活性を持つ物質を外部に放出する液滴を用いることで変形の自由度を系に導入することができる。このような変形の自由度のある自己駆動液滴の挙動は対称性の観点からも非常に興味深い。このような液滴の運動のメカニズムを解析するため、形状がどのように変化するかを対称性を考慮して実験し、さらには理論解析も行った。これらの研究は現在、論文準備中である。また、界面活性剤を放出する液滴とその界面活性剤を吸収する液滴を水面に浮かべた際、それら2つの液滴が相互作用しながら運動する現象が観察され、そのメカニズムの考察を行った。この内容に関しては、*Soft Matter* 誌に掲載されている。今後、濃度場で相互作用する液滴の変形のダイナミクスに関しより普遍的モデルが確立されることを期待している。

上記のように、それぞれのテーマについて、学術的な成果が上がっている。本研究の目的である相互作用する自己駆動粒子系に関して、単独および少数の粒子系についての知見はほぼ確立できたと考える。今後の発展として、本研究プロジェクトで得られた成果を多体系へと拡張し、より普遍的な概念を求めていきたい。

(3)相手国との交流(両国の研究者が協力して学術交流することによって得られた成果)

実験系構築、解析や理論解析に精通した日本側グループと、情報科学、数理科学に精通した相手国(ポーランド)側グループが継続的に意見交換することによって、それぞれの手法を取り入れた議論を進めることができた。日本側研究者とポーランド側研究者との共著論文として、本研究プロジェクトが遂行された3年間に、Phys. Chem. Chem. Phys.誌に2報(2022年、2023年)、Soft Matter誌に1報(2022年)、計3報の査読付き原著論文が国際誌に採択された。さらに、本研究成果をまとめた2報の共著論文を執筆中である。

(4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

Covid-19感染拡大のため、頻繁な両国間の研究者の頻繁な行き来はできなかったが、2023年3月に日本側研究者がワルシャワ・Polish Academy of Sciencesを訪問でき、オンラインミーティングだけでは得られない国際交流の経験を得ることができたと考えている。特に、1週間程度、現地の研究所、大学に滞在し、研究者、学生同士で交流することにより、国・地域による文化、考え方の共通点、相違点を身をもって認識することができた。また、オンラインでのミーティングも継続的に行い、その際、海外情勢についての時事に関する話題についての歓談等もおこなったため、学問だけではなく文化・社会一般に対する理解も深まったと考えている。

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取組、成果)

本事業では若手研究者養成のため、若手研究者および学生を積極的に海外に派遣すること、そして、若手研究者および学生に国際研究集会において英語の口頭講演の機会を与えることを推進してきた。メンバーに、博士取得後5年程度以内の若手研究者を4名加え、共同研究に中心的に関わりやすいようにした。2022年度には、助教1名(神戸大)、博士後期課程学生2名(広島大1名、東京理科大1名)、博士前期課程学生1名(千葉大)をワルシャワ・Polish Academy of SciencesのGorecki教授の研究室に派遣した。そして、助教は現地の研究所で開催されたセミナーで英語の口頭発表をし、また、学生は、現地での博士課程学生と合同の成果報告会において英語で口頭発表を行った。さらには、個別にポーランド側研究者に研究内容を紹介し、かつ今後の共同研究の方針に関する議論を行った。これらにより、若手研究者、学生が国際共同研究の重要性、および、そのために必要な語学力、知識力を体験できたのではないかと考えている。

また、Covid-19感染拡大により頻繁に渡航、招聘が困難であったため、2021年10月および2022年11月にそれぞれ2日間にわたって、オンライン国際ミニシンポジウムを開催した。そこでは、主に博士後期学生・博士前期課程学生に発表機会を与え、英語での口頭発表の経験を積ませることができた。

(6)将来発展可能性(本事業を実施したことにより、今後どのような発展の可能性が認められるか)

本共同研究事業で得られた成果および、その中で議論した内容をもとに、2022年夏にJSPS二国間共同事業に応募し、2023年度、2024年度の2年間にわたる計画「変形を伴う自己駆動液滴集団の自己組織化ダイナミクス」が採択された。以前からの事業と連続で7年間事業を実行できることで、この3年間で行ってきた「相互作用する自己駆動粒子が創発する時空間パターン」に関する研究をさらに発展させられると期待している。また、日本側とポーランド側の研究者ネットワークも拡大しているので、今後ますます共同研究による成果が得られることが期待される。

(7)その他(上記(2)~(6)以外に得られた成果があれば記載してください)

特になし