

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25年 6月 3日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540391

研究課題名（和文）ゆらぎと多様性を含む集団のダイナミクスと機能

研究課題名（英文）Dynamics and Functions of Diverse Multi-Element Systems Accompanied by Fluctuation

研究代表者

西森 拓 (NISHIMORI HIRAKU)

広島大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50237749

研究成果の概要（和文）：

ゆらぎや多様性を含む様々な集団のダイナミクスの本質を、実験・理論の両面から探索した。特に、ミドリムシやアリ、樟脳船などの生物・無生物の集団運動の特徴や、集団としての機能発現を実験・データ解析・数理モデリングの組み合わせにより特徴づけ、その背後にある共通の機構を、外界のゆらぎや構成要素の多様性に注目しつつ明確化した。

研究成果の概要（英文）：

Complex dynamics of various self-propelled multi-element systems has been studied through combinations of experiments, data-analysis and mathematical modeling. In particular, the roles of fluctuation and the diversity in individual systems have carefully been investigated, and some basic mechanisms shared by different systems have been uncovered.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、数理物理・物性基礎

キーワード：アリの集団採餌・樟脳舟の集団運動・生物対流・砂丘のダイナミクス・確率共鳴・非一様ノイズ

1. 研究開始当初の背景

多数の要素からなる系の非線形非平衡動力学は物理学の中でも重要な研究分野である。ただし、従来の研究では、各要素の運動が単純な力学の枠内で記述される系が主な研究の対象であった。（もちろん、重力多体系や粉体の動力学で知られるように、単純な力学に支配される要素の集積が多体系全体のダ

イナミクスの単純さを保証するものではない。）

近年、各要素自体に複雑な内部自由度のある集団のダイナミクス、具体的には、細胞性粘菌、昆虫、アメーバ、魚、さらに、ヒト、車など、についての集団運動の動力学が関心を集めつつある。これらは、物理学において従来大きな関心が持たれてこなかった研究

対象であった。その大きな要因として、再現性や定量性のある測定の高難さ、あるいは個々の対象の性質を越えた普遍性の抽出の高難さ、いかえれば、定量科学としての物理学における取り扱いの高難さがあげられる。

最近になって、ダイナミクスを記録するための撮影機器や画像解析ソフトの性能の飛躍的進歩が見られ、運動の定量的データの採取や解析が可能になってきた。例として細胞性粘菌の複雑な運動が、画像解析を通して数値データ化されつつある。これらの定量的データの蓄積は、複雑な要素集団の運動の定量的理解への道筋を開きつつある。さらに、非線形動力学を扱う理論研究者と生命系・化学系の実験研究者が共同しようという機運も高まり、両者の方法論や視点を融合させることで、生命をはじめとする複雑な集団運動の理解について、ブレークスルーが開かれる期待感が醸成されつつある。このような状況をふまえ、本研究では、生き物の集団をはじめとした自律的に駆動する複雑な要素からなる集団の動力学の特徴付けを行うことにした。

2. 研究の目的

本研究では、次の事項を目的として、高い内部自由度を持つ複雑な要素からなる集団の動力学を取り扱った。

- (1)構成要素に対する外的・内的ゆらぎが集団の運動の特徴や機能に与える影響の解析
- (2)構成要素の多様性が、集団としての機能や集団の特徴的運動に与える影響の解明
- (3)集団自身が構成要素の多様性やゆらぎを自律的に制御し機能を安定に発現させる機構の解明

具体的対象として、アリ集団、神経結合系、ミドリムシ、樟脳舟集団、砂丘の集団などを念頭におき、実験・データ解析・数理模型の組み合わせによる実証的かつ定量的な解析を実行し、そこから帰結される共通論理の発見や展開、応用の探索を通じて、「ゆらぎと多様性の集団動力学」を構築していくようにした。

3. 研究の方法

今回の研究課題については、数理模型による解析と、実験・観察に基づく解析の共同が重要となる。研究開始当初、いずれにおいても一般的手法は確立していなかった。そこで、

- (1)定量的議論の妥当性を確保するための理論的・実験的な手法の開拓・構築

- (2)複雑な要素集団における構成要素の多様性やゆらぎと機能の関係に関する考察

を、まず、個別のシステム(アリ集団、連結神経系、樟脳舟集団、他)に対して並行に進め、その後、システムの個別性に依存しない、ゆらぎと多様性の集団動力学の論理と方法論を構築した。

4. 研究成果

上記の目的に沿って、まず、次の個別のシステムについて研究を行い一定の成果を得た。

(1)アリの集団のダイナミクス

①採餌アリの集団行動様式について：

アリの集団採餌行動に関して実験系を構築した。これによって、特徴的な採餌行動のデータを得た。とくに、フェロモンの濃度分布=化学情報と、太陽の偏光角や景色=光情報という、2種類の位置情報が提示された場合のアリの行動を定量的に分析するため、長時間ビデオ撮影と画像解析の組み合わせによるデータ採取・記録・分析方法の開発をすすめた。その結果、2種類の位置情報間の不一致度に応じて、優先的に選択される情報が入れ替わることがわかった。すなわち、不一致度が大きいときは主に視覚情報に依存、不一致度が小さいときには主に化学情報に依存することがわかった。これらの結果は査読付きの会議録や、生物物理学会で招待講演として発表された。

②集団中の役割の切り替え様式について：

アミメアリでは主に糖蜜源に対する動員行動に、餌場の安全度合(各コロニーにおける占有度合)が影響する可能性が示唆された。つまり、自巣が独占情況にあるような餌源と別巣との競合関係にあるような餌源を比較すると、前者の場合のほうが、一斥候アリによる動員数が多くなる傾向がわずかに認められた。このことは、動員個体が外部餌場での採餌における安全性に関して情報を巣仲間へ伝達している可能性を示唆する。観察例を増やして検討している段階である。

トビイロシワアリでは、動態を予測する必要があるような餌源に対して動員する場合、現地で被動員蟻の周囲への分散と探索を促すような形で動員を行っていることが示唆された。また、斥候蟻による動員効率(一度の動員で狩り出される被動員蟻数)は、予想に反して餌質や量の影響をあまり受けておらず、もたらされた情報に対して一度に対応する被動員蟻数はほぼ一定の値をしめした。寧ろ、動員を実施する斥候蟻巣が増えることによって、餌に応じた被動

員蟻数を確保している傾向が認められた。糖質餌とタンパク餌を比較すると、後者のほうが巣内の蟻が動員を受ける現場に到着するまでの時間が短縮される傾向にあり、餌質に関する情報が伝えられていること、それに対して各蟻個体もたらされた情報を評価して、それに応じた行動を発現していることがわかった。

(2) 樟脳船およびその他の集団運動

微小な樟脳片をプラスチック片の方面にとりつけた”樟脳舟”は、樟脳片側を下にして水に浮かべることにより、(樟脳の一部が水に溶け出し)水面に表面張力の勾配を誘起し、自律的に駆動することが知られている。本研究では、樟脳舟の少数の運動に関する先行研究に基づき、自律的に運動する多数粒子系の集団運動の研究をすすめ、円環状の経路では樟脳舟密度に依存して従来の交通流の研究で知られる渋滞-非渋滞転移が発生することを見いだした。また、2次元の樟脳舟系では、樟脳舟の密度増加に応じて、各舟が、連続運動から間欠運動への転移すること、さらに、相互引き込みを起こして、集団的間欠運動を始めるなど、非常に多様な集団運動を呈することを実験と理論の双方から示した。

(3) 微小生物の集団運動

個々のミドリムシは、正と負の走光性を示し最適な強度の光の下に移動することで、効率的に光合成を行う。また、集団のミドリムシを適当なサイズの容器の中に封入し、下方から最適な強度を上回る光を照射すると、いわゆる「生物対流」が発生する。今回の研究では、ミドリムシによる生物対流が、すでに詳しく研究されている(ゾウリムシなど)他の微生物の生物対流に対して際立った特徴、すなわち「対流の局在性」を持つことを、実験に示し、また、局在化には葉緑体が必要であることが亜種を用いた実験から示された。さらに、局対流の発生機構を可能な限り単純な理論で説明するための数理モデルの提案を行った。

生き物の集団(群)では多様な機能や時空間的秩序の発現が多く認められる。その様な生物集団に現れる秩序の発現機構については、単純化した物理モデルによる理論的な解析が進められてきている。本研究では、運動規則が比較的単純な微生物を用いて、集団に現れる秩序の実験的発見と形成機構の解明を目指した。

(4) 非一様ノイズの下での効果的確率共鳴現象

素子毎に独立の振幅のノイズを付加した場合の2素子系の確率共鳴現象について調べた。本具体的には、興奮場のモデルであるFitzhugh-Nagumo素子を2つ結合した場合を数値的に考察し、結合強度が一定の範囲内にあり、かつ、一素子に強いノイズ、多素子に非常に弱いノイズを付加することで、共鳴度の高い確率共鳴現象が発生することを見いだした。また、簡単な解析でその機構を説明した。

(5) 砂丘の多様な形状形成のダイナミクス

砂丘は、上空を吹く風の強さや方向のゆらぎ各砂漠地帯の砂層の厚みによって、形状が異なってくることが知られている。ただし、これらをシステムティックに記述する解析的な手法は限られている。今回は、一方向の風が吹くもとの砂丘の形状を記述する新しい数理モデルを提案し、砂量などに応じて、砂丘が直線的なものから屈曲するものに変化する機構を解析的に描くことに成功した。

以上、ゆらぎと多様性を含む集団のダイナミクスに関して、実験・理論の両面から研究を推進した。特に、ミドリムシやアリなどの生物の集団運動を実験・データ解析・数理モデリングにより特徴づけ、さらに、その背後にある機構を、外界の変動や構成要素の多様性に注目しつつ明確化した。同時に、水面に浮かべた樟脳船群のダイナミクスなど、無生物系の自己駆動集団運動についても実験的研究と理論的研究を並行して押し進め、生物集団と無生物集団の運動の比較を行った。その過程で、複雑で非定常な運動をとまなう実験から、再現性・定量性のあるデータを採取し分析する手法や、数理モデルと実験・観察データとの連携の方法論も開発した。成果の多くは、学術論文や内外の学会で発表した。

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 26 件)

(以下全て査読あり)

1. M. Fujii, H. Nishimori, A. Awazu:
Influences of Excluded Volume of Molecules on Signaling Processes on Biomembrane, *PLoS ONE* Vol. 8, e622180-1-8 (2013)

2. 荻原悠佑, 秋野順治, 西森拓:
'アリの集団採餌における方位情報の選択と切り替え' 計測と制御 Vol. 53, 201-207(2013)

3. L. Guignier, H. Niiya, H. Nishimori,

- D. Lague and A. Valance: Sand dunes as migrating strings, *Physical Review E*, Vol. 87, 052206-1-6 (2013)
4. H. Niiya, A. Awazu, and H. Nishimori: Stability of transverse dunes against perturbations; a theoretical study using dune skeleton model, *Aeolian Research*, 9, 63-68 (2013)
DOI:10.1016/j.aeolia.2012.08.008
5. E. Heisler, N. J. Suematsu, A. Awazu, and H. Nishimori: Collective motion and phase transitions of symmetric camphor boats, *Journal of the Physical Society of Japan*. 81 (2012) 074605
6. E. Heisler, N. J. Suematsu, A. Awazu, and H. Nishimori: Swarming of self-propelled camphor boats *Physical Review E* 85, (2012) 055201(R) 1-4
7. M. Fujii, A. Awazu, and H. Nishimori: Segregation pattern reorientation of granular mixture on horizontally oscillating tray *Physical Review E* 85, (2012) 041304 1-4
8. T. Niiya, A. Awazu, H. Nishimori: Bifurcation Analysis of the Transition of Dune Shapes Under a Unidirectional Wind *Physical Review Lett.* 108, (2012) 158001 1-4
9. Yui Matsuda, Nobuhiko J. Suematsu, and Satoshi Nakata "Photo-sensitive self-motion of a BQ disk" *Phys. Chem. Chem. Phys.* 14, 5988-5991 (2012).
10. Yumihiko S. Ikura, Ryoichi Tenno, Hiroyuki Kitahata, Nobuhiko J. Suematsu, and Satoshi Nakata, "Suppression and regeneration of camphor-driven Marangoni flow with the addition of sodium dodecyl sulfate" *J. Phys. Chem. B* 116, 992-996 (2012).
11. S. Nakata, Y. Matsuda, Y. S. Ikura, A. Takeda, S. Izumi, "Mode change in the self-motion of a benzoquinone disk coupled with a NADPH system", *Chem. Phys. Chem*, (2012), Vol.13, 520-524.
12. R. Kawai, A. Awazu, and H. Nishimori: Effective stochastic resonance of coupled excitable elements under noise of unequal amplitude *Physical Review E* 84 (2011) 021135-1-5
13. N. J. Suematsu, A. Awazu, S. Izumi, S. Nakata, H. Nishimori: Localized bioconvection of Euglena caused by phototaxis in the lateral direction *Journal of the Physical Society of Japan*. 80 (2011) 064003-1-8
14. Satoshi Nakata, Mariko Matsushita, Taisuke Sato, Nobuhiko J. Suematsu, Hiroyuki Kitahata, Takashi Amemiya, and Yoshihito Mori "Photoexcited Chemical Wave in the Ruthenium-Catalyzed Belousov-Zhabotinsky Reaction" *J. Phys. Chem. A* 115, 7406-7412 (2011).
15. K. Katsuki., M. Kikuchi, H. Nishimori, N. Endo, and K. Taniguchi: Cellular model for sand dunes with saltation, avalanche and strong erosion: collisional simulation of barhans, *Earth Surface Processes and Landforms*, 36 (2011) 373
16. Nobuhiko J. Suematsu, Taisuke Sato, Ikuko N. Motoike, Kenji Kasima, and Satoshi Nakata "Density Wave Propagation of a Wave Train in a Closed Excitable Medium" *Phys. Rev. E* 84, 046203 (2011).
17. S. Nakata, R. Tenno, Y. S. Ikura, "Mode-selection and mode-switching of an autonomous motor composed of a camphor rotor and a mobile loop", *Chemical Physics Letters*, (2011), Vol.514, 159-163.
18. 勝木厚成, 西森拓, 遠藤徳孝, 谷口圭輔: '数値実験と水槽実験で解くバルハン集団のダイナミクス', 地質学雑誌(日本地質学会誌) Vol.117, 155-162 (2011)
19. 荻原悠佑, 前田一樹, 泉俊輔, 秋野順治, 栗津暁紀, 西森拓 '化学情報と視覚情報を組み合わせたトビロケアリの採餌行動の定量的解析', 第17回交通流のシミュレーションシンポジウム 論文集, 21-24(2011)
20. 藤井雅史, 栗津暁紀, 西森拓: '細胞膜上の分子混み合いを考慮したシグナル伝達系モデル', 第17回交通流のシミュレーションシンポジウム 論文集, 25-28(2011)

21. 新屋啓文, 粟津暁紀, 西森拓 : ' 流体力学的相互作用を組み込んだ粒子法による粉体なだれのパターン形成'
第17回交通流のシミュレーションシンポジウム 論文集, 73-76(2011)

22. R. Kawai, S. Torigoe, K. Yoshida, A. Awazu, and H. Nishimori: Effective stochastic resonance under noise of heterogeneous amplitude *Physical Review E* 82 (2010) 051122

23. M. Fujii, A. Awazu, and H. Nishimori: Saddle-Node Bifurcation to Jammed State for Quasi-One-Dimensional Counter Chemotactic Flow *Physical Review E* 82 (2010) 015102(R)

24. H. Niiya, A. Awazu, H. Nishimori: Three-Dimensional Dune Skeleton Model as a Coupled Dynamical System of Two-Dimensional Cross Sections *Journal of the Physical Society of Japan*. (2010) 063002

25. N. J. Suematsu, S. Nakata, A. Awazu, and H. Nishimori: Collective behavior of inanimate boats, *Physical Review E* 81 (2010) 056210

26. 勝木厚成, 西森拓, 砂丘のダイナミクス 日本物理学会誌 Vol. 65, 953-960(2010)

[学会発表] (計 18 件)

1. 西森拓 “アリの採餌行動における決断とゆらぎ”, 第25回自律分散システム・シンポジウム東北大学, 仙台(2013. 1. 25) (特別講演)

2. 末松 J. 信彦 “化学振動反応に駆動される微小液滴の自律運動” 日本化学会 第93春季年会 (立命館大学) (2013. 03. 22-25)

3. 秋野順治, “アリを制する化学情報戦 —攪乱と隠蔽のための化学戦術—” ネイチャーインダストリアワード (大阪科学技術センター) 2012. 11. 20

4. Hiraku Nishimori, :
“Dynamics of Dunes: in What situations do minimal models work?”
International Conference on Modeling, Analysis and Simulation, Tokyo, Japan(2012/11/8) (招待講演)

5. Nobuhiko J. Suematsu, “Localized Bioconvection of Photosynthetic Microorganisms” Gordon Research Conference (Cobey Univ., USA) (2012. 07. 15-20)

6. Hiraku Nishimori, Hirofumi Niiya, Akinori Awazu:
“A Model for the Crestline Dynamics of Dunes”, 8th European Solid Mechanics Conference, Graz, Austria, (2012. 7. 9)

7. 原田 恭子・秋野 順治・山岡 亮平 “餌質はトビイロシワアリの動員に影響するのか?” 日本応用動物昆虫学会 (近畿大学) (2012. 3. 28-29)

8. 安台梨乃・秋野順治, “アミメアリの採餌戦略 —防御物質として機能する情報化学物質—” 日本応用動物昆虫学会 (近畿大学) (2012. 3. 28)

9. 末松 J. 信彦 “一次元水路における樟脳船の相互作用” 日本化学会第92春季年会(近畿大学) (2012. 03. 25)

10. 西森 拓, 荻原 悠佑, 粟津 暁紀, 秋野 順治: “アリの集団採餌における判断と行動”, 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 京都大学 (2011. 12. 23) (招待講演)

11. Hiraku Nishimori: “Quantitative analysis of behavior of ants: Decision-making under conflicting information”. International Symposium on Complex Systems 2011 Tokyo(2011. 12. 2) (招待講演)

12. Yusuke Ogihara, Kazuki Maeda, Katsunori Naka, Shunsuke Izumi, Toshiharu Akino, Akinori Awazu, Hiraku Nishimori: “Quantitative analysis of foraging of the *Lasius Japonicus* using chemical cues and visual cues”, International Symposium on Complex Systems 2011, Tokyo(2011. 12. 2)

13. Hiraku Nishimori: “Morphodynamics of dunes described by the migration of crest-lines”, Minerva Gentner Symposium on Aeolian Processes, Ben-Gurion University of the Negev, Eilat Campus, Israel (2011. 10. 25)

14. Hirofumi Niiya and Hiraku Nishimori:
“A Theoretical Study of Morphodynamics of
Dunes Using Dune Skelton Model”,
Minerva Gentner Symposium on Aeolian
Processes, Ben-Gurion University of the
Negev, Eilat Campus, Israel (2011.10.25)

15. Nobuhiko J. Suematsu: “Collective
behavior of camphor boats on a annular
water channel”, Collective Dynamics and
Pattern Formation in Active Matter Systems
(Dresden, Germany), (2011.09.12)

16. 安台梨乃・秋野順治・山岡亮平, “アミ
メアリの採餌戦略 - 異種アリとの相互作用
-” 日本応用動物昆虫学会 (九州大学)
(2011.3.28)

17. 末松 J. 信彦 “表面張力差で駆動され
る樟脳船の集団運動” 第47回 自律分散シス
テム部研究会 (早稲田大学サテライトキャン
パス) (2010.12.04)

18. Nobuhiko J. Suematsu, “Localized
Bioconvection Generated by Schooling
Behavior of Phototactic Micro-organisms”
Gordon Research Conference 2010:
Oscillations & Dynamic Instabilities in
Chemical Systems (Il Choco, Italy)
(2010.07.4-9)

[図書] (計3件)

総説・解説

1. 西森拓; ‘現代に息づくチューリング
の自己組織化--アリとチューリング---’
数学セミナー(日本評論社), 7月号
(2012)30-35

2. 西森拓; ‘砂丘の動きを記述する単純な方
程式’, パリティ(丸善出版)3月号
(2012)40-45

3. 末松 J. 信彦、中田 聡; 「化学反応と物質
拡散が生み出すアメンボのような運動」、化
学と教育 ヘッドライン-化学非平衡なら
ではの動きもの, 化学と教育 vol. 59, pp.
8-11, 2011.

[その他]

報道関係

1. 日本経済新聞, 2010/6/28 砂丘の形状示
す連立方程式発見 広島大 (西森拓ほか)

2. 科学新聞 (一面トップ) 2010/7/2 複雑
な砂丘の動き単純な連立方程式で表現 (西
森拓ほか)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西森 拓 (HIRAKU NISHIMORI)
広島大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 50237749

(2) 研究分担者

中田 聡 (SATOSHI NAKATA)
広島大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 50217741

粟津 暁紀 (AKINORI AWAZU)
広島大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 00448234

末松 信彦 (SUEMATSU NOBUHIKO)
明治大学・先端数理科学研究科・講師
研究者番号: 80542274

秋野 順治 (AKINO TOSHIHARU)
京都工芸繊維大学・
大学院工芸科学研究科・准教授
研究者番号: 40414875

(3) 連携研究者

()

研究者番号: