

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540449

研究課題名(和文)自己推進系の非線形ダイナミクス

研究課題名(英文)Nonlinear dynamics of self-propelled systems

研究代表者

太田 隆夫(Ohta, Takao)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：50127990

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：自己推進系として「非線形散逸伝搬波」と「変形する自己駆動粒子」を対象とした理論研究を行った。前者に対しては外場やフィードバック相互作用による制御と安定性を調べた。自己推進粒子の個別運動では、並進運動だけではなくスピン運動も起こす場合のモデル化とその性質を2次元と3次元で詳細に研究した。また、並進、変形、スピンおよび、外場、流れ場の非線形結合により、多彩なダイナミクスが現れることを示した。自己推進粒子集団のダイナミクスについては伝搬するバンド構造が出現し、そのバンドは正面衝突によって壊れず、あたかもソリトンのように振る舞うことを発見した。

研究成果の概要(英文)：We have studied theoretically traveling waves and self-propelled soft particles in nonlinear dissipative systems. As a former problem, we investigated the dynamics of Turing patterns under feedback control and derived non-equilibrium phase diagram. In the dynamics of individual self-propelled particles, we have considered not only translational motion but also spinning motion and clarified the properties both in two and three dimensions. It has been revealed that fascinating dynamics emerge due to the couplings among translation, deformation, spinning and external forces. In the dynamics of interacting self-propelled particles, we have shown that traveling bands appear in our system and those bands exhibit soliton-like behavior upon head-on collisions.

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：非線形ダイナミクス 散逸伝搬波 自己推進粒子 フィードバック ソリトンの振る舞い

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 非線形非平衡系の振動現象は実験・理論両面から多くの研究がある。特に、反応拡散系では濃度が空間的に一様に振動している状態に空間不均一が生じたときにできる位相波と、興奮性の系に局所的に刺激を与えたときに発生するトリガー波については、位相縮約や特異摂動法でほぼ理解されたと言ってよいであろう。しかし、時間空間的に周期的な散逸伝搬波については、非線形ダイナミクスの重要な現象であるにもかかわらず、研究が十分進んでいないのが現状である。また、この空間周期伝搬波は次に述べる自己推進粒子の集団運動とも関係する普遍性がある。

(2) 自己駆動粒子集団の研究は T. Vicsekら (1995) や Toner-Tu(1995) 以来、S. Ramaswamy や H. Chate のグループなどで精力的に研究されている。しかし、それらはすべて大きさのない点粒子が変形しない剛体粒子を仮定している。「泳ぐ」バクテリアや「這う」生体細胞などから明らかのように、変形と並進のカップリングは重要である。私たちは 2009 年に変形する自己推進粒子のモデルを導入しその非線形ダイナミクスを研究してきた。

## 2. 研究の目的

(1) 自己推進系として「非線形散逸伝搬波」と「変形する自己駆動粒子集団」を対象として、前者に対しては外場やフィードバック相互作用による制御と安定性を、後者に対しては外場と粒子間相互作用による多彩な運動形態と安定性を研究する。一見無関係にみえる「非線形散逸伝搬波」と「変形する自己駆動粒子集団」の二つの系に対して、ある場合にはどちらも位相ダイナミクスの方法が有効である。自己推進系の動的数理構造を統一的立場から解明することは非線形ダイナミクスの発展に大きく寄与すると同時に、ナノ、メゾスケールでのドメインパターンダイナ

ミクスや生体細胞ダイナミクスなどに対する貢献も期待できる。

(2) 私たちは、非線形散逸伝搬波の簡単ではあるが本質を損なわない発展方程式を導入し、数値的、解析的の両面から研究を行ってきた。本研究ではチューリングパターンを示す反応拡散方程式に外場と時間フィードバックをかけたときのパターンダイナミクスを解明する。

(3) 柔らかな自己推進粒子の非線形ダイナミクスは、変形、並進、回転の非線形結合のため、1 個の粒子の場合でも単純ではない。これらの非線形効果による新たな動的構造を探る。反応拡散系だけでなく流体相互作用も取り入れるように理論を拡張する。さらに、変形する自己推進粒子集団の大規模数値シミュレーションを行い、非線形系の動的状態転移と新たな動的秩序を明らかにする。

## 3. 研究の方法

「非線形散逸伝搬波」では主として空間 1 次元で外力やフィードバックのあるモデル方程式の数値シミュレーションを行い可能な動的状態と状態間転移を明らかにする。振幅方程式と位相縮約の方法によってモデルの詳細によらない普遍性を明らかにする。

「変形する自己駆動粒子」では、まず 1 粒子に対して外場とスピン、および、流動場とスピンの結合による多彩な運動形態と安定性を研究する。数値シミュレーションによって可能な運動と分岐の探求を行う。集団運動では、非平衡系特有の性質と考えられる「不均一な動的秩序」の計算機シミュレーションを行い、その理論構築をめざす。自己推進粒子が隊列を組んで移動する集団運動は非線形散逸伝搬波と共通するものがあり、それらの基本運動モードの解析を行う。

## 4. 研究成果

(1) 非線形散逸波の外場による引き込み現象では、非線形振動子と同様のサドル・ノー

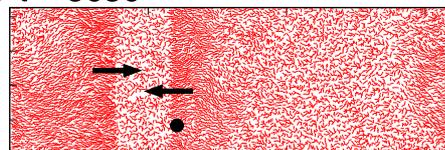
ド分岐だけでなくホップ分岐も現れることを数値シミュレーションで確認した。このダイナミクスを正しく表現するには、少なくとも2種類の位相が必要であることを指摘した。さらに、チューリングパターンを示す興奮性反応拡散方程式に遅延フィードバックをかけ、その強度と遅延の大きさを変化させたときの振る舞いを計算機シミュレーションと理論解析で調べた。動かない空間周期間が伝搬を起こしたり、空間周期構造が不安定化し一様な時間振動に変化するなどの結果を得た。これらの成果は非平衡パターンの制御への応用の可能性を開くと同時に、非線形ダイナミクスの新たな理論展開を起こすものとして意義がある。

(2) 変形する自己推進粒子系の研究ではまず、重力や電場に置かれた変形する自己推進粒子の運動と分岐に関して計算機シミュレーションと理論解析を行った。次に、3次元空間内での変形する自己推進粒子の発展方程式を反応拡散系から導出した。さらに、並進運動だけではなく回転(スピン)運動も起こす場合のモデル化とその性質を2次元と3次元で詳細に研究した。また、並進、変形、スピンおよび、流れ場の非線形結合により、多彩なダイナミクスが現れることを予言した。自己推進粒子集団のダイナミクスについても空間2次元で大規模な数値シミュレーションを行った。粒子密度を増加させると秩序だった運動が現れるが、さらに密度を上げると秩序状態が崩壊することを見いだした。さらに、この秩序崩壊の近傍では一様伝搬秩序状態は不安定化し、無秩序状態のバンド構造が発現することを発見した。粒子の推進速度が周りの粒子密度の増加関数であるようにモデルを拡張すると、上のバンドとは逆の構造、すなわち、伝搬する秩序状態のバンド構造が容易に出現することも確認した。

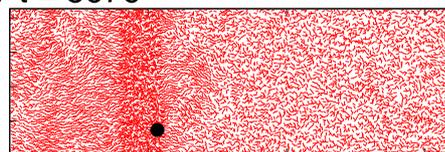
(3) 本研究遂行において私たちが予想しなかった結果として、伝搬する秩序状態のバン

ドは正面衝突によって壊れず、あたかもソリトンのように振る舞うことを発見した(図1)。私たちの理論研究とは独立に、H. KuwayamaとS. Ishidaによって、走化性をもたない細胞性粘菌変異株を飢餓状態におくと細胞密度波が自発的に発生し、それが対衝突によって壊れないことを観察した実験研究が報告された。これら理論と実験を比較検討し、共通する性質と理論では説明できない実験事実を明確にした。これらの成果は非平衡での集団ダイナミクスの転移に対して新たな知見を加えるものであり、今後、さらに集中的体系的に研究をすすめるべきテーマである。

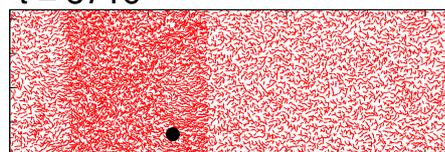
(a)  $t = 5636$



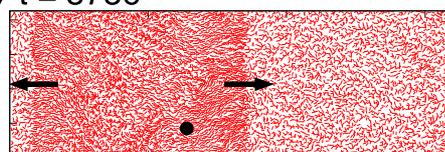
(b)  $t = 5676$



(c)  $t = 5716$



(d)  $t = 5756$



0 200 x 400 600

図1. 2次元空間での自己推進粒子集団に生じた伝搬するバンド。色の濃い部分が密度が高く秩序化している。薄い部分は粒子の密度が低く、それぞれがランダムな運動をしている。矢印はバンドの伝搬方向を表わす。黒い点は目印を付けた粒子の位置。時間の経過とともにバンドが正面衝突し、こわれず互いに離れさっていくことがわかる。(T. Ohta and S. Yamanaka, EPJST in press.)

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19件)(すべて査読有)

(1) M. Tarama, Y. Itino, A. Menzel and T. Ohta, Individual and collective dynamics of self-propelled soft particles, Euro. Phys. J. Special Topic, 223, 121-139 (2014).

DOI:10.1140/epjst/e2014-02088-y

(2) S. Yamanaka and T. Ohta, Formation and collision of traveling bands in interacting deformable self-propelled particles, Phys. Rev. E 89 012918(1-7) (2014)

DOI:10.1103/PhysRevE.89.012918

(3) R. Iri, Y. Tonosaki, K. Shitara and T. Ohta, Dynamics of Turing pattern under time-delayed feedback, J. Phys. Soc. Jpn., 83 024001(1-5) (2014).

DOI:10.7566/JPSJ.83.024001

(4) T. Ohta and S. Yamanaka, Soliton-like behavior of traveling bands in self-propelled soft particles, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 011J01(1-7) (2014)

DOI:10.1093/ptep/ptt111

(5) A. Menzel, T. Ohta and H. Loewen, Active crystals and their stability, Phys. Rev. E 89 022301(1-14), (2014).

DOI:10.1103/PhysRevE.89.022301

(6) M. Tarama and T. Ohta, Dynamics of a deformable self-propelled particle with internal rotational force, Prog. Theor. Exp. Phys. 013A01(25-43) (2013)

DOI:10.1093/ptep/pts051

(7) S. Yabunaka and T. Ohta, Molecular orientation dynamics on the structural rheology in diblock copolymers, Soft Matter 9, 7479-7488 (2013).

DOI:10.1039/c3sm00040k

(8) M. Tarama and T. Ohta, Oscillatory motions of an active deformable particle, Phys. Rev. E 87, 062912(1-8) (2013).

DOI:10.1103/PhysRevE.87.062912

(9) M. Tarama, Andreas M. Menzel, Borge ten Hagen, Raphael Wittkowski, T. Ohta and H. Loewen, Deformable active particle under shear flow, J. Chem. Phys. 139, 104906(1-13) (2013).

DOI:10.1063/1.4820416

(10) T. Sakaue and T. Ohta, Maxwell stress in fluid mixtures, Phys. Rev. Lett. 108, 078301(1-5) (2012)

DOI:10.1103/PhysRevLett.108.078301

(11) S. Yabunaka, T. Ohta and N. Yoshinaga, Self-propelled motion of a fluid droplet under chemical reaction, J. Chem. Phys. 136, 074904 (1-8) (2012)

DOI:10.1063/1.3685805

(12) M. Tarama and T. Ohta, Spinning motion of a deformable self-propelled particle, J. Phys. Cond. Matter 24 464129(1-10) (2012)

DOI:10.1088/0953-8984/24/46/464129

(13) A. Menzel and T. Ohta, Soft deformable self-propelled particles, Europhys. Letters 99 (2012) 58001(1-6)

DOI:10.1209/0295-5075/99/58001

(14) Y. Itino and T. Ohta, Dynamics of deformable self-propelled particles, J. Phys. Soc. Jpn 81 (2012) 104007(1-10).

DOI:10.1143/JPSJ.81.104007

(15) M. Ueda and T. Ohta, Cross response in non-equilibrium systems, J. Stat. Mech. (2012) P09005(1-21).

DOI:10.1088/1742-5468/2012/09/P09005

(16) M. Tarama and T. Ohta, Dynamics of a deformable self-propelled particle under external forcing, European Physical Journal B83, 391-400, (2011).

DOI:10.1140/epjb/e2011-20307-7

(17) K. Shitara, T. Hiraiwa and T. Ohta, Deformable self-propelled domain in an excitable reaction-diffusion system in three dimensions, Phys. Rev E 83, 066208(1-12) (2011).

DOI:10.1103/PhysRevE.83.066208

(18) Y. Kawamura, H. Nakao, and Y. Kuramoto, Collective phase description of globally coupled excitable elements, Phys. Rev. E 84, 046211 (1-12) (2011)

DOI:10.1103/PhysRevE.84.046211

(19) S. Hata, K. Arai, R. F. Galan, and H. Nakao, Optimal phase response curves for stochastic synchronization of limit-cycle oscillators by common Poisson noise, Phys. Rev. E 84, 016229 (1-10) (2011).

DOI:10.1103/PhysRevE.84.046211

〔学会発表〕(計2件)

(1) 多羅間充輔, A.M. Menzel, B. ten Hagen, R. Wittkowski, 太田隆夫, H. Loewen  
「流れの中のアクティブソフトマターのモデリングと線形剪断流中でのダイナミクス」  
日本物理学会第68回年次大会, 東海大学(神奈川県), 2014年3月30日

(2) 山中真人, 太田隆夫  
「やわらかな自己推進粒子系における孤立密度波の衝突と安定性」  
第3回ソフトマター研究会, 2013年12月14日, 首都大学東京(東京都)

(3) T. Ohta, "Collective dynamics of self-propelled soft particles", German Science days in Kyoto "Research for Sustainable development", Oct. 25-26, 2013 Kyoto, Japan (招待講演)

(4) T. Ohta, Collective Dynamics of Deformable Self-Propelled Particles, Self-organization and emergent dynamics in active soft matter, Feb. 20-22, 2013, Kyoto, Japan (招待講演)

(5) M. Tarama and T. Ohta, "Oscillatory motions of an active deformable particle" Workshop on "Engineering of Chemical Complexity", Rostock-Warnemuende, Germany, 10 Jun., 2013

(6) 多羅間充輔, 太田隆夫  
「やわらかな自己推進粒子の自転運動」  
日本物理学会第68回年次大会, 広島大学(広島県), 2013年3月27日.

(7) 入亮介, 設楽恭平, 外崎陽介, 太田隆夫,  
「遅延フィードバック制御によるチューリング・パターンのダイナミクス」  
日本物理学会第68回年次大会, 広島大学(広島県), 2013年3月27日

(8) T. Ohta, "Collective motion and individual motion of self-propelled deformable particles", Workshop on "Active Dynamics on Microscales", Leiden, Holland, 16-22 Sept. 2012 (招待講演)

(9) T. Ohta, "Collective dynamics of deformable self-propelled particles" 17th Fall seminar on nonlinear dynamics, Bayreuth, Germany, 7-10 October, 2012 (招待講演)

(10) 設楽恭平, 太田隆夫 "遅延フィードバックを用いた興奮性反応拡散系における孤立ドメインの制御" 2012年日本物理学会秋季大会 21aAE-4 横浜国立大学(神奈川県) 2012年9月21日

(11) K. Shitara and T. Ohta, "Dynamics of a localized domain in an excitable reaction-diffusion system", The Gordon Research Conference on Oscillations & Dynamic Instabilities in Chemical Systems, Colby College, USA, July 18-19, 2012

(12) K. Shitara and T. Ohta, "Controlling the motion of a solitary domain in an excitable reaction-diffusion system by delayed feedback", Dynamic Days Asia Pacific 7, Academia Sinica, Taipei, Taiwan,

August 7, 2012

(13) T. Ohta, Self-propelled soft particle under external fields, the CODEF III "Colloidal Dispersions in External Fields", 20-23 March 2012, Bonn, Germany (招待講演)

(14) M. Tarama and T. Ohta, "Spinning motion of a deformable self-propelled particle in a two-dimensional space", Symposium on "Phase Transition Dynamics in Soft Matter : Bridging Microscale and Mesoscale", Kyoto, Japan, 21 Feb., 2012

(15) 藪中俊介, 太田隆夫, 義永那津人 「化学反応する流体中での液滴の自発運動」日本物理学会 第67回年次大会、関西学院大学(兵庫県) 2012年3月27日

(16) T. Ohta, Self-propelled dynamics of deformable domain in excitable reaction diffusion systems, The 4th MSJ-SI Nonlinear Dynamics in Partial Differential Equations, 12-18 Sept. 2011, Fukuoka, Japan (招待講演)

(17) S. Hata and H. Nakao, "Optimal phase response curves for stochastic synchronization and desynchronization of limit-cycle oscillators", International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Kobe, Japan, Sept. 4-7, 2011

(18) K. Shitara and T. Ohta, "Behavior of a deformable self-propelled domain in an excitable reaction-diffusion system", International Symposium on Complex Systems 2011, Tokyo, Japan, December 2

(19) M. Tarama and T. Ohta "Dynamics of a deformable self-propelled particle under external forcing" Workshop on "Engineering of Chemical Complexity", Berlin, Germany, 4-8 July, 2011

(20) Y. Tonosaki and T. Ohta

"Phase description of nonlinear dissipative waves under space-time-dependent external forcing" Workshop on "Engineering of Chemical Complexity", Berlin, Germany, 4-8 July, 2011

(21) Y. Itino and T. Ohta, "Order-disorder transition in the deformable self-propelled particle system"

International Symposium on Complex Systems 2011, 2 December, Tokyo, Japan

(22) 多羅間充輔, 太田隆夫

「変形を伴う自己推進粒子の外力下でのダイナミクス」日本物理学会 2011年秋季大会, 富山大学(富山県), 2011年9月23日

[図書](計 1件)

S. Komura and T. Ohta (edited)  
Non-equilibrium soft matter physics,  
World Scientific, 2012, 420page

[その他]

ホームページ等

[www.ton.scphys.kyoto-u.ac.jp/nonlinear-old2/](http://www.ton.scphys.kyoto-u.ac.jp/nonlinear-old2/)

[www.toyotariken.jp/fellow/info/kyakuin.html](http://www.toyotariken.jp/fellow/info/kyakuin.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 隆夫 (OHTA, Takao)

京都大学・大学院理学研究科・教授

(平成23年度-24年度)

東京大学・大学院理学系研究科・客員共同研究員 (平成25年度)

研究者番号 : 50127990

(2) 研究分担者

中尾 裕也 (NAKAO, Hiroya)

東京工業大学大学院情報理工学研究科・准教授 (平成23年度)

研究者番号 : 40344048