

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2009

課題番号：18540409

研究課題名（和文） 生物集団の運動の統一的模型と相転移としての群れ形成

研究課題名（英文） Unified model of collective bio-motion and group formation as phase transition

研究代表者

中山 章宏（NAKAYAMA AKIHIRO）

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：60212106

研究成果の概要（和文）：車の流れでは、ある密度を境に突然状態が変わるという相転移の考え方をを用いて、交通渋滞の性質を理解することができることが良く知られている。人の流れでも、密度が大きいに狭い通路などで流れが詰まってしまう現象も、同様の考え方で理解できる。この研究は、車や人と同じ模型を用いて、生物の群れで起きる現象も統一的に説明しようとしたもので、その結果、生物の長い群れの隊列で発生する蛇行現象が同じ機構で説明できることがわかった。

研究成果の概要（英文）：It is well-known that the traffic jam is understood by the idea of physics. Phase transition can explain why a state of traffic flow changes suddenly at a certain density. In pedestrian flow, so-called blocking occurs in a narrow corridor at high density. It can be understood in the same way as the traffic jam. In this work, we investigate phenomena in collective bio-motion by the same model as traffic and pedestrian flow. As a result, a meander which appears in a long group of organisms can be explained in a similar way.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	3,100,000	600,000	3,700,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・生物物理・化学物理

キーワード：最適速度模型・生物集団・集団運動・群れ形成・蛇行・相転移

## 1. 研究開始当初の背景

交通流の研究では、物理学的観点から最適速度模型が提案され、渋滞の発生メカニズムが解明された。この模型により、渋滞発生と

は、密度が大きくなると自由流に不安定性が発生して渋滞流に移行するという、一種の相転移現象であることがわかっている。

歩行者流の研究では、歩行者が2次元的な

運動を行なっているため、拡張された2次元最適速度模型が提案された。これにより、レーン形成からブロッキング状態への転移が、交通流の渋滞-非渋滞相転移と同様の理解ができることがわかっている。

生物の集団運動にも興味深い振舞があり、魚や鳥などの群れ形成について、多くの模型が提案されている。しかし、何が決定的な要素であるかはまだ確定しておらず、また、物理的な統一描像を構成するという観点ではあまり研究されていない。

生物はそれぞれが何らかのルールに従って前方へ進むという点では、人や自動車と同じとみなすことができる。即ち、相互作用しつつ一定方向へ進む粒子「自己駆動粒子系のダイナミクス」という観点から、統一的な模型を構築することが可能であると考えられた。そこで、これら見かけの異なる現象を統一的に記述できるような模型を構成すること、その振舞に対して相転移的な理解ができるかどうかを明らかにすることは、集団運動の理解という点から非常に面白い問題であると思われた。

## 2. 研究の目的

2次元最適速度模型の振舞を理論的及び数値解析的に調べることが研究の主目的である。本研究では1次元から拡張して構築された2次元模型を考えているため、1次元模型の性質をベースにした議論を行なうことができる。このため、1次元と2次元の運動の両方が同じ相転移としての枠組みの中で、統一的に理解できるかどうか、より明確に解明できると考えられる。

現在の群れの生成模型では、対象に応じていろいろな模型が提案され、それぞれ一定の成果をあげている。しかし、群れにもいろいろな形態があり、それらをすべて再現できるような模型はまだ知られていない。このような模型構築において問題となるのは、指導原理がないことである。

本研究では最適速度模型の枠内で、模型に含まれる相互作用に修正を施しながら、数理的および数値的な解析を行なう。数理的な解析では、相互作用の必要条件が得られ、数値シミュレーションでは非線形効果まで含めた現象を見ることができ、このような手法をとることで、この模型の中に包含される動力学を調べ、生物集団の運動を包括的に説明できる統一模型を構築できると考えている。

## 3. 研究の方法

まず、統一模型の原型と想定している2次元最適速度模型のうち、歩行者流に対応する模型の線形解析を終了させる。歩行者に適用する2次元模型には、歩行者は特定の方向に

向かって進む、歩行者間には斥力が働く、という性質が取り入れられている。この条件下での相構造を解明する

次に、特定の方向へ進むという条件のついている歩行者模型において、引力相互作用のある場合の線形解析を行なう。解析の方法は基本的には上記のものと同様であるが、各モードに対する細かい場合分けが必要など、必ずしも自明な計算ではない。数値シミュレーションも併用する。

次に、生物の集団形成の模型構築とその解析に充てる。生物の集団ができること自体は相互作用を引力に取ればある意味自明なことであり、形成される集団の性質がどのようなものか、ということの方が重要な問題である。解析の第一歩では、集団形成の力学模型をなるべく簡単な、物理的に意味のある形で構成する必要がある。

模型を構成する上で、集団の振舞をより詳しく調べた資料が必要である。生物の運動についての観測は豊富にあるが、特定の生物に特化したものであり、物理的な力学模型の構築・検証に使用できるようなものがあるかどうかは不明である。同時進行的にこれらの資料収集も行なう。

模型構築のために、引力型相互作用を持つ生物集団模型の線形解析を行なう必要がある。この場合は歩行者模型とは異なり、特定の方向がないため、解析は複雑になるが、原理的にはできるはずの問題である。その結果、相互作用のどの要素が集団形成の決め手となるかが明らかになるであろう。

最適速度模型は模型の形が制限されているため、他の模型に比較して、修正できる自由度が少なく、模型の可能性のほとんどを尽くすことができると考えられる。ただし、線形解析で得られるのはわかっている解の安定性だけであり、実際に何が実現するかは、数値シミュレーションで調べる。

## 4. 研究成果

2次元最適速度模型において、一様な歩行者流の安定性の解析を行なった。歩行者は特定の方向に向かって進む、相互作用は斥力のみである、という性質のため、全体の相構造は比較的単純である(図1)。

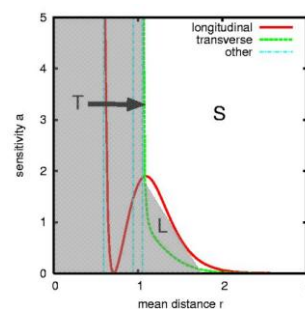


図1 斥力の場合の相図

図中の赤線が1次元の不安定性に対応するが、1次元では高密度、低密度両側で安定であった。2次元では高密度領域がすべての感応度に対して不安定となり（網掛けの領域）、低密度側（Sと書かれている領域）のみ安定である[論文8]。

次に、2次元最適速度模型において、引力がある場合に拡張して解析を行なった。その結果、斥力みの場合には見えなかった楕円運動モードが引力のある場合は不安定化し、たとえ微量でも引力が存在すれば、低密度領域（E）はすべての感応度に対して不安定となることがわかった。安定な領域は最適速度関数の勾配の大きい領域（S）のみに限られる。図2の網掛けの領域はすべて不安定である[論文4, 6]。

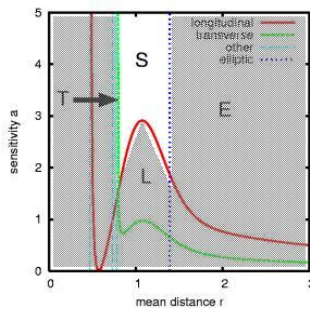


図2 引力もある場合の相図

数値シミュレーションを行なうと、各相の振舞を見ることができ、例えば、図2のLでは1次元交通流模型と対応をつけることができる密度波（図3左）、図2のEでは楕円運動モード（図3右）が発生する。

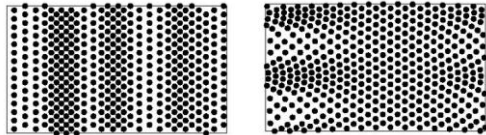


図3 密度波と楕円運動

引力のある2次元最適速度模型において、運動の方向を指定する条件を外すと、生物の運動模型になる。この模型において、低密度な状態から数値シミュレーションを行なうと、粒子がいくつかのグループを形成し、各グループ間にはほとんど相互作用がない状態が最終状態として得られる（図3）。

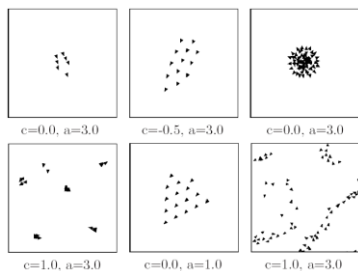


図3 低密度での終状態の例

この状態が生物の群れ形成と見なせるかど

うかについては明確ではないが、一つの模型としては成り立つ。逆に高密度にした場合は、結晶に似た構造も現われ、物性系との関連の存在が期待できることがわかった（図4[論文7]）。

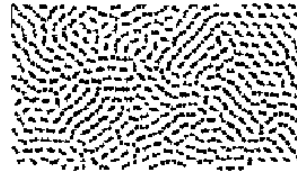


図4 高密度での終状態の一つ

方向性のない最適速度模型における安定性の線形解析については、有意義な結果は得られず、向きのない場合や3次元への拡張の困難が明らかとなった。また、数値シミュレーションによる研究によっても肯定的な結果は得られず、生物集団の運動では追加条件の設定もしくは模型の修正が必要であることが認識された。

条件を変更する案の一つとして、2次元最適速度模型において、特定の方向へ進むという条件は残し、集団のサイズを有限にするという設定の下での安定性の解析を行なった。これまでの一様流の解析では、集団は空間全体を一樣に埋め尽くすという条件の下で行なわれていたが、生物集団においては集団の大きさが空間内の有限の領域にのみ存在するのが普通であるためである。その結果、これまでの一様流の状態では安定であったパラメタ領域、即ち、図2の領域Sも不安定となり、安定な一様流は存在しない。この不安定性の結果生じる運動は蛇行運動である。各相の振舞を数値シミュレーションで見ると、図2のLでは図5の密度波ができ、1次元交

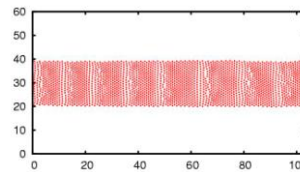


図5 密度波

通流との対応がつく。一方、図2のSでは蛇行モードのみが不安定であり、図6のような運動になる。

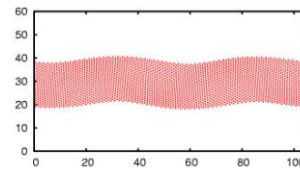


図6 蛇行運動

これは、魚などの群れが進行方向に長くなったときに現れる現象の力学的機構となる可能性がある。

蛇行の不安定性はすべてのパラメタ領域で発生するため、安定な一様流状態は存在し

ない。即ち、2次元最適速度模型の範囲内でこれ以上条件をゆるめても、不安定性は2重になり、運動の特徴付けが難しい。したがって、この立場での議論としては本研究が最終的なものになると考えられる。現在、この結果をまとめた論文を投稿し、2010年の国際会議でも発表する予定である。

一方、生物模型の元となっている1次元最適速度模型についても、基礎付けという観点から研究を継続している。共同研究として、実験的研究の詳細な解析の論文を執筆したほか[論文1, 3]、共同実験も行なった。

この他に、最適速度模型そのものの拡張としてどのようなものが可能であるか、どのような拡張なら生物の集団運動へ応用することができるかといった観点から、最適速度模型を経済現象へ応用するという研究も行なった[論文5]。

また、この生物の集団運動については、物理学的な研究に利用できるようなデータが少なく、各研究者が自分で用意している現状がある。公開することを目指して、同期発光を行なう蛍の動画を撮影し、データ化を準備中である。

本研究の成果をまとめると、1次元交通流における一様流の不安定性による渋滞機構、2次元歩行者流における詰まり現象などの力学的機構、2次元での生物集団の蛇行運動の3つが、一様流の不安定性という枠組みの中で統一的に理解できることになった。また、最適速度模型の枠組み内での不安定性による機構は以上の3つのパターンがすべてであり、この模型を最も単純な形で生物の運動に適用するという研究は、以上で完結した。生物の集団運動に現れる、これ以外の現象の性質を調べるためには、模型の修正が必要であり、今後は相互作用の変更などを行なう方向の研究を進めなければならないということになる。

## 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 14 件)

- [1] A. Nakayama, M. Fukui, M. Kikuchi, K. Hasebe, K. Nishinari, Y. Sugiyama, S. Tadaki and S. Yukawa, Metastability in the formation of an experimental traffic jam, New Journal of Physics 11, 083025 (2009), 査読有
- [2] A. Nakayama, M. Fukui, K. Hasebe, M. Kikuchi, K. Nishinari, Y. Sugiyama, S. Tadaki, S. Yukawa, Detailed data of traffic jam experiment, Traffic

and Granular Flow '07, ed. C. Appert-Rolland, F. Chevoir, P. Gondret, S. Lassarre, J.-P. Lebacque, M. Schreckenberg, pp. 389-394, (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009), 査読無

- [3] Y. Sugiyama, M. Fukui, M. Kikuchi, K. Hasebe, A. Nakayama, K. Nishinari, S. Tadaki and S. Yukawa, Traffic jams without bottlenecks - experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam, New Journal of Physics 10, 033001 (2008), 査読有
- [4] A. Nakayama, K. Hasebe and Y. Sugiyama, Effect of attractive interaction on instability of pedestrian flow in two dimensional optimal velocity model, Physical Review E77, 016105 (2008), 査読有
- [5] M. Taniguchi, M. Bando, and A. Nakayama, Economic Fluctuations Based on Optimal Diffusion Index Model, J. Phys. Soc. Jpn. 76, 124003 (2007), 査読有
- [6] A. Nakayama, K. Hasebe and Y. Sugiyama, Instability of pedestrian flow in 2D optimal velocity model with attractive interaction, Computer Physics Communications 177, 162-163 (2007), 査読有
- [7] Y. Sugiyama, A. Nakayama and E. Yamada, Phase Diagram of Group Formation in 2-d Optimal Velocity Model, Traffic and Granular Flow '05, ed. A. Schadschneider, T. Poeschel, R. Kuehne, M. Schreckenberg, D. E. Wolf, pp. 277-282, (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007), 査読無
- [8] A. Nakayama, Y. Sugiyama and K. Hasebe, Instability of pedestrian flow in two-dimensional optimal velocity model, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005, ed. N. Waldau, P. Gattermann, H. Knoflacher, M. Schreckenberg, pp. 321-332, (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007), 査読無
- [9] S. Tadaki, M. Kikuchi, A. Nakayama, K. Nishinari, A. Shibata, Y. Sugiyama, S. Yukawa, Power-Law Fluctuation in Expressway Traffic Flow: Detrended Fluctuation Analysis, J. Phys. Soc. Jpn. 75, 034002-1-5 (2006), 査読有

〔学会発表〕（計 10 件）

- [1] Y.Sugiyama, A.Nakayama, Dynamical pattern formations of self-driven particles and group formation, Conference on Computational Physics 2007 (Sep.5-8 2007 Brussels, Belgium)
- [2] M.Bando, A.Nakayama, M.Taniguchi, Business Cycle based on Optical DI Model, The 10th Asia Pacific Physics Conference (Aug. 21-24, 2007 Pohang, Republic of Korea)
- [3] A.Nakayama, M.Fukui, K.Hasebe, M.Kikuchi, K.Nishinari, Y.Sugiyama, S.Tadaki, S.Yukawa, Detailed Data of Traffic Jam Experiment, Traffic and Granular Flow '07 (Jun. 20-22 2007 Orsay, France)
- [4] A.Nakayama, K.Hasebe, Y.Sugiyama, Instability of pedestrian flow in 2D optimal velocity model with attractive interaction, Conference on Computational Physics 2006 (Aug.29-Sep.1 2006 Gyeongju, Republic of Korea)

他 6 件

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中山 章宏 (NAKAYAMA AKIHIRO)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：60212106

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：