

非対称相互作用が迷路を解くカギ！？ ～ 環境に応じた群れの形とその安定性 ～

この度、名古屋大学大学院情報学研究科の石渡 龍輔 協力研究員、衣川 亮太 大学院生（当時）、杉山 雄規 教授らの研究グループは、非対称相互作用をもつ集団が迷路状の空間内で作る安定した群れのかたちを発見し、群れの安定性を評価する方法の提案をおこないました。

非対称相互作用とは、群れをつくる生き物に見られる作用反作用の法則を満たさないことです。たとえば、鳥や魚や昆虫、微生物もこの力を持ちます。さらに生き物だけでなく、自動車の交通渋滞形成も、非対称相互作用を含むモデルにより再現することができます。

本研究では、非対称相互作用する生き物を再現するモデルをもちいて、非対称相互作用と群れの関係を調べました。迷路状の通路を設定し、その中を運動させたところ、群れはひも状のかたちを長時間維持しつづけました。

また、本研究グループは、群れの安定性を評価する新しい手法を提案し、シミュレーションで得られた群れ全体の形の安定性を評価しました。その結果、各個体が周囲からの影響を強く受けるほど、群れ全体の形が安定するということがわかりました。

本研究を発展させることにより、これまでになかった非対称相互作用の物理を構築し、生き物の集団運動についての理解を深めることができると考えられます。さらに、提案した安定性の評価法は、様々な生き物の運動にも適用可能な手法で、安定した群れの発生過程の解明やその制御に応用することも期待できます。

この研究成果は、平成 30 年 4 月 23 日付（日本時間 18 時）英国科学雑誌「Scientific Reports」オンライン版に掲載されました。

なお、この研究成果は、日本学術振興会科学研究費助成事業 [15K13535](#) の助成を受けたものです。

【ポイント】

- 非対称相互作用によって運動が制御される自己駆動粒子^{注1)}の集団は、迷路状の空間で準安定^{注2)}な巨視的形態^{注3)}を形成する
- 巨視的形態の安定性は、個々の粒子の応答時間によって制御されている
- Wasserstein 距離^{注4)}をベースにした巨視的構造の安定性の評価方法を提案した

【研究背景と内容】

魚群や鳥の群れなどの非対称相互作用を含む自己駆動粒子の集団運動は、集団全体として多数の準安定な巨視的形態を形成します。自己駆動粒子のモデルのひとつとして、2次元最適速度モデル^{注5)}があります。このモデルの粒子は、相互作用が引力だけの場合、自己駆動粒子は集団でひも状の巨視的形態をつくり、形成されたひも状形態はゆっくりと形を変えながらも長時間維持されます。

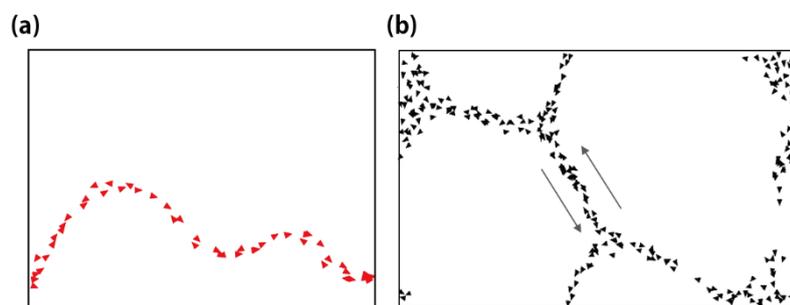


図 1 粒子集団がつくる巨視的形態 (a) ひも状形態。 (b) ネットワーク状構造。
矢印は粒子の双方向の移動を表している。

運動させる粒子の数を増やし各個体のパラメーターを変更すると、粒子集団はネットワーク状の構造 (図 1(b)) をつくります。つくられたネットワーク構造は、真性粘菌^{注6)}の集団がつくるネットワーク構造に類似したものでした。

ネットワーク状の形態つくる真性粘菌を代表とする様々な生物は、与えられた環境に応じて適切な集団運動をすることが知られています。私たちは、非対称性相互作用が環境への運動の適応に中心的な役割をはたしているのではないかという仮説をたてました。もし、仮説が正しいのであれば、2次元最適速度モデルの自己駆動粒子も環境適応的になんらかの安定的な巨視的形態を形成する可能性があります。そこで私たちは、迷路状の空間を設定し、空間内の自己駆動粒子の集団運動を調べました。その結果、自己駆動粒子は、粒子数が多すぎたり少なすぎたりしないかぎり、図 2(a)もしくは図 2(b)に表されたひも状構造を形成し長時間その状態を維持しつづけました。

次に、私たちは、ひも状構造が維持される度合い (安定性) を客観的に表す方法を模索しました。安定であるということは、変化の度合いが小さいと言い換えられます。そこで、私たちは、巨視的構造の変化の度合いを評価することを考えました。集団の構造は粒子が運動している空間に分布している様子 (空間分布)、粒子の位置の空間分布の類似度を評価する Wasserstein 距離を用いることで巨視的構造の変化の度合いを量りました。

求めた構造変化の度合いから、巨視的構造の時間変化を平面内での軌跡として表しました (図 2(c))。図 2(c)では、巨視的構造が点として表されており、破線の中に集中している点が図 2(a)もしくは図 2(b)のひも状構造に対応しています。

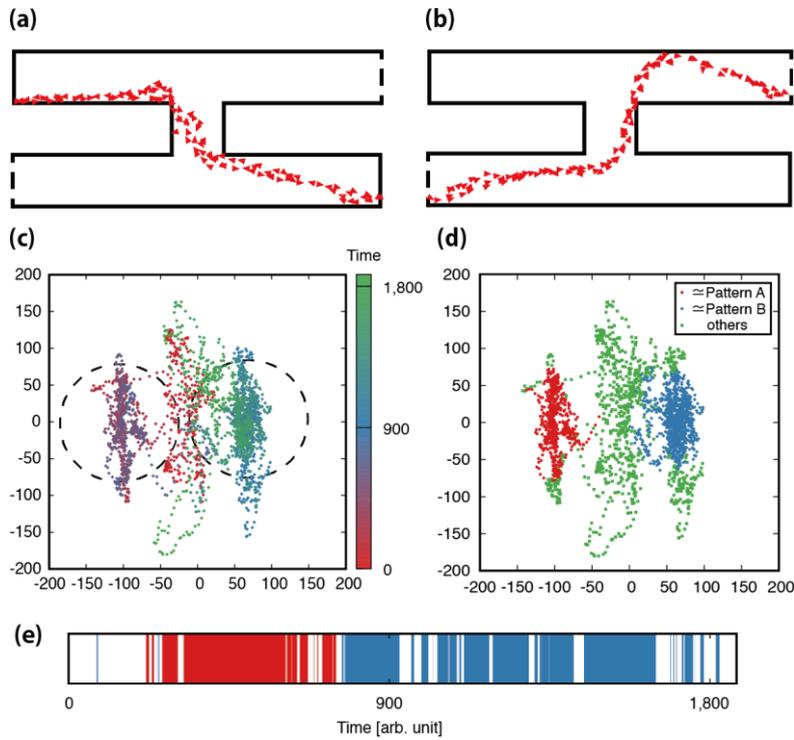


図 2 ひも状形態と形態の時間変化。(a)(b) 安定なひも状形態。(c) 平面に図示された各時刻の集団運動。色は時刻を表している (d) 各時刻の巨視的構造を(a)の形態, (b)の形態, それ以外の形態で色分けしたもの。(e)集団運動をひも状形態(a), (b), それ以外で分類し、形態の持続時間を図に示したもの。

2次元最適速度モデルでは、1つの粒子が周囲の粒子から受ける影響の大きさをパラメータでの値でコントロール^{注7)}でき、パラメータの大小で形成される巨視的形態も変化することが知られていました。そこで、私たちは、ひも状形態の安定性もこのパラメータとなんらかの関係があるのではないかと考え、その関係性を調査しました。

パラメータの値を変えた場合でも、安定的に維持される巨視的構造は、ひも状構造 (図 2(a)もしくは図 2(b)) だけでした。パラメータの値ごとにひも状構造の形成を調べ、構造の発生を図 3 に図示しました。図から見て取れるように、周囲から受ける影響を大きくすると、ひも状構造がより安定になることがわかりました。

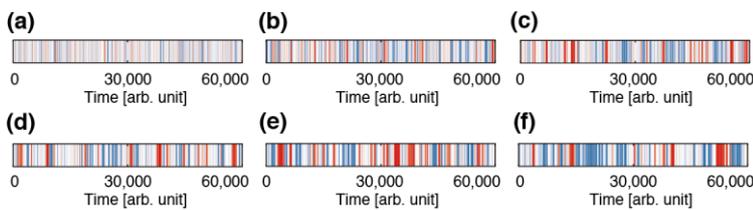


図 3 各時間にひも状形態をとっていれば赤 (図 2(a)に対応) もしくは青 (図 2(b)に対応) をぬったグラフ。(a)から(f)になるにつれて周囲の影響を強くうけるようにパラメータが設定されている。

【成果の意義】

非対称相互作用は自己駆動粒子の運動をつかさどります。魚や鳥、様々な昆虫、微生物、自動車や歩行者などの運動は、自己駆動粒子によって再現することができます。自己駆動粒子の運動の性質を理解することは、具体的な対象となる生物や物体の集団運動の制御などに役立つはずですが、今回の私たちの研究は、非対称相互作用をもつ自己駆動粒子が環境に適応した巨視的形態をもつことを明らかにしました。そして、各個体ではなく集団全体を類似度という観点から比較して運動の安定性を評価できることも明らかとしました。

非対称相互作用をもつ自己駆動粒子の集団運動は、環境に応じた巨視的形態をとります。そして巨視的形態は、時間とともにゆっくりと変形できる連続的な変形自由度を持ちます。既存の物質科学では、このような性質はエネルギーと結びついていると考えられています。このことから、非対称相互作用する自己駆動粒子の運動もなんらかのエネルギーに類似した「物理的な量」と関係づいていることが予想されます。

【用語説明】

- 注1) 自己駆動粒子：作用反作用をみだす外力ではなく燃料などで自ら運動し、他者との関係で自らを制御する粒子。
- 注2) 準安定：大きな乱れが発生しないかぎり安定なさま。
- 注3) 巨視的形態：群れ全体としての形。(個体のスケールを微視的と捉えた)
- 注4) Wasserstein 距離 (Wasserstein metric)：数学的に定義された距離のことであり、空間の類似度を示している。計算機科学においては、earth mover's distance (EMD) として知られている。
- 注5) 2次元最適速度モデル：2次元空間内を運動する最適速度モデル。最適速度モデルは、自動車の交通流をよく再現するモデルで、渋滞現象の発生とその性質を解明するために提案された。
- 注6) 真性粘菌：変形粘菌(変形菌)としても知られている菌類のことで、移動する変形体の状態では大型の細胞の中に複数の核が存在する状態になっている。
- 注7) 影響の大きさのコントロール：2次元最適速度モデルでは、感応度というパラメータの大小で相互作用の強さをコントロールしている。

【論文情報】

雑誌名：Scientific Reports

論文タイトル：Analysis of dynamically stable patterns in a maze-like corridor using the Wasserstein metric

著者名：Ryosuke Ishiwata, Ryota Kinukawa, Yuki Sugiyama

DOI: [10.1038/s41598-018-24777-2](https://doi.org/10.1038/s41598-018-24777-2)