

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：32702

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06671

研究課題名（和文）内部ゆらぎによって促進される群れの情報伝達に関する研究

研究課題名（英文）Information transfer promoted by internal noise in a swarm

研究代表者

村上 久（Murakami, Hisashi）

神奈川大学・工学部・助教

研究者番号：20755467

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000 円

研究成果の概要（和文）：一つとなって運動する群れにとって、群れ内部における情報伝達は、根本的な群れ形成・維持および、環境の情報を全体に共有する上で重要である。この観点から群れ内部の運動のシミュレーションが実施され、従来仮説における静的な相互作用ネットワークや、他の運動パターンではなく、アユの群れで確認されたレヴィ歩行が最も多様な他個体との相互作用を可能とすることを示した。従って適切な個体運動は、群れの情報伝達を促進し、群れを壊すのではなくむしろ頑健にしていることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：Information transfer through the entire group is quite important to achieve and maintain collective behavior. We simulated internal movements of individuals within the group, and found that Levy walk pattern as observed in school of ayu fish is optimal for interacting with various neighbors, rather than the other movement patterns. This suggests that individuals' movements on the inside of the group, which appear to collapse the global order, can promote information transfer through the group and thereby enable robust collective behavior.

研究分野：複雑系化学

キーワード：群れ 内部ゆらぎ 探索

### 1. 研究開始当初の背景

バラバラな個体からリーダーを持つことなく一個の全体性を明示的に示す群れは、自己組織化的システムの基本原理解明へダイレクトに挑むことを可能とする。群れでは、相互作用を通じた絶えざる情報伝達によって、多様な外部環境（外敵や障害物の有無）に対して、まとまりや大域的な整列を頑強に維持できると考えられる。従来群れモデルでは、個体が近接他個体と向きを平均化して揃える規則が群れ形成の主要因と考えられており、この規則によって局所的な整列が全体に伝わり大域的に整列した群れが実現する。ここでは個体の相互作用ネットワークは結晶構造のように静的となることが知られる（Saber, 2006, IEEE Trans. AC）。しかし申請者らは、典型的な群れ行動をとるアユの稚魚の運動解析を行ったところ、現実の動物の群れでは、瞬間的には整列して運動しているように見える群れにおいてさえ、時間的な推移を見ると群れ内部で個体間の距離・位置関係が激しく変動していることを明らかにした。この研究ではアユの群れの実験プール内における自由な運動を解析した。ここでは群れ内部で個体がどのように動いているかを調べるために、重心基準系と呼ばれる群れの重心に対する相対的な個体座標を調べた。もし従来モデルのように個体間の相互作用ネットワークが静的ならば、この重心に対する個体の運動はほとんど静止したものとなる。しかし実際のアユの群れではそうではなく、この群れ内部の個体の運動がレヴィ歩行と言う特殊な構造を持つことがわかった。レヴィ歩行とは、運動軌跡におけるステップ幅（個体が方向転換を行う点間の距離）の分布がベキ則に従う運動パターンである。

### 2. 研究の目的

内部ゆらぎ（＝方向性をもって移動する群れの内部における個体運動）はいかに群れの頑健性に貢献するか。本研究目的の焦点はここにあった。上述のように申請者は、実際のアユの群れでは個体間の相互作用ネットワークは静的ではなく、動的かつレヴィ歩行として構造化されていることを示した。レヴィ歩行は、動物の探索行動に見られる運動パターンで、近くのえさ場の入念で局所的な探索（ブラウン歩行と言う）と、遠くのえさ場への大域的な探索（弾道軌道と言う）をバランスよく組み合わせた行動様式である。自然環境において多くの動物がレヴィ歩行を行うことによって採餌効率を最適化していることがわかっている（Viswanathan, 1999, Nature）。しかし群れの内部にエサはない。それでは何がリソースなのか。これは、他個体とのコミュニケーションがリソースであると考えられるのではないか。つまり群れにおいて、受動的に向きを揃えるといった近接相互作用を行うだけでなく、自分から積極的な運動をレヴィ歩行によって行うことで、多

様な他個体と近接相互作用し情報を得ているのではないか。またそれによって近接相互作用で共有される向き等の情報を絶えず群れ全体に伝搬して、局所での極端に強い向きの相関から引き起こされる群れの分裂を回避し、群れを頑強に維持しているものと考えられる。そこでまず本研究では群れ内の向き等の情報伝播が近接相互作用で行われると仮定して群れの内部で個体がレヴィ歩行を行うことで実際に伝達効率が最大化されることを確かめることを目的とした。さらに研究を進めて行く上で、ミナミコメツキガニの群れにおける内部ゆらぎと群れ全体としての運動戦略の関係、また申請者らが提案している内部ゆらぎが群れ形成に積極的に貢献する計算機モデルにおいて、近年魚の群れで新たな発見され従来モデルでは再現困難なソーシャルフォースマップ(Katz et al., 2011, PNAS)の形成が可能か確かめられた。

### 3. 研究の方法

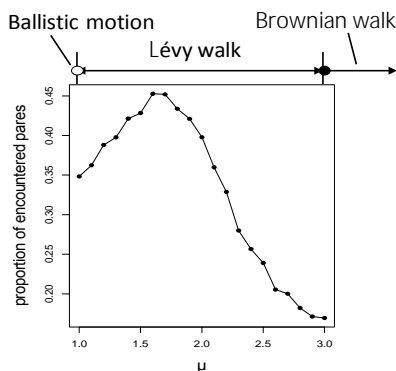
従来モデルの文脈からは、群れの中での個体の運動は群れの維持を阻害するように思える。が、適度な運動は多くの他個体との相互作用を可能とし、より自己組織的で頑強な群れ形成の助けとなりえることが考えられる。だが運動が弾道軌道のように動き過ぎていた場合、まさに群れを壊すことになるだろう。一方で運動がブラウン歩行のように局所に留まるものなら、情報交換相互作用に貢献するまでは行かないだろう。結果として、これら二つの中間に位置するレヴィ歩行を群れ内で個体が行うことは、群れを壊さない限りで多様な個体同士の相互作用を可能とし、群れ全体を通じた滑らかな情報伝達・頑強な群れ形成を行っていると考えられる。そこで、群れ内の個体が他の運動パターンではなくまさにレヴィ歩行によって、群れの情報伝達を最適化しているかがシミュレーションによって調べられた。この他、研究を進めて行く上で新たに行われた研究（上述）を進めるため、ミナミコメツキガニの集団を円形装置に入れ頭上から撮影し、長時間の個体識別座標を得る実験を行った。また従来群れ形成に必須と考えられていた向きの平均化規則が現実の魚の群れでは存在しないとする近年報告を、申請者らが提唱している相互予期を非同期に実現する計算機モデルにおいて検証した。

### 4. 研究成果

簡単なセッティングにおいて、群れ内部の個体運動のシミュレーションが行われた。ここでは群れ内の個体が他の運動戦略ではなく、まさにレヴィ歩行を行うことによって、群れの情報伝達を最適化しているのかを調べるためのシミュレーションを行った。我々は群れの内部空間を仮想的に設定し、その中でエージェントが取る運動戦略を変えながら情報伝達効率を複数の指標から評価した。運動

戦略が弾道軌道のように動き過ぎていた場合、正に群れとしてのまとまりを阻害することが明らかになった。一方で運動がブラウン歩行のように局所に留まるとき、十分な情報伝達効率に至らない。結果として両者の中間に位置するレヴィ歩行を群れ内で個体が行うことは、群れを壊さない限りで多様な個体同士の相互作用を可能とし、最適な情報伝達効率を得られることが示された(図1)。

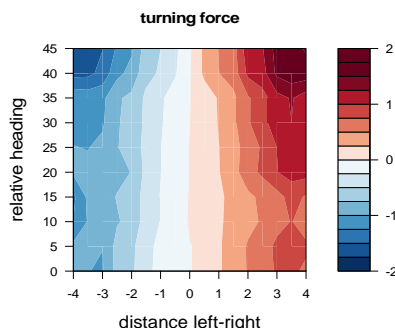
図1



以上の他、さらに、以前から構築していた上記のような個体の群れ内部の運動を生み出す相互作用である予期に基づく群れの計算機モデルを、発展させた。従来モデルにおいては向きの平均化が必須規則だと考えられる。向きの平均化規則に基づく群れモデルでは現実の群れで見られる内部運動を説明するのは難しい。一方我々のモデルは、向きの平均化を用いること無く、予期の相互作用によって、内部運動を伴う様々な種の群れを再現できることが明らかになった。また、我々のモデルは近年現実の群れで発見され従来の向きの平均化を用いるモデルでは再現が困難なソーシャルフォールマップを再現できることがわかった(図2)。この図は、二個体から成る群れにおいて一方から他方がどれだけ左右に離れているか(横軸)及び両者の進行角度の相対的な差(縦軸)に対する回転フォース(赤い[青い]ほど左[右]に向かう力が強いことを示す)が示されている。従来モデルのように平均化に従って入れば位置関係に依らず、相対角度が大きくなればなるほど回転フォースが強まるはずだ。しかし平均化を用いない我々のモデルでは、確かに相対角度に対しても弱く相関があるが、位置関係が左から右へ横断しておいて初めて回転フォースの向きも変わりそれ故より強く相関があることがわかった。これは先行実験が示す現実の群れの結果とモデルで示した初めての結果である。先行研究では向きの平均化でなく接近と反発の作用により定向性が創発することが示唆されたが具体的なモデルはなかった。相互予期のメカニズムと非同期性により接近と反発を両義的に定義される我々のモデルによりこの点の確認されたと言える。

またこのような内部運動は群れとしての運動において、方向転換の切り替えにおいても

図2



重要な役割をもつことが予想され我々は、大規模な群れを展開するミナミコメツキガニの実験室内での運動を解析し、群れが一つとしてもレヴィ歩行を行うことを明らかにした。

## 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6件)

H. Murakami, T Niizato, YP Gunji “Emergence of a coherent and cohesive swarm based on mutual anticipation.” Scientific Reports, 7, 46447. 2017 (doi: 10.1038/srep46447) (査読有)

T Tomaru, H. Murakami, T Niizato, Y Nishiyama, K Sonoda, T Moriyama, YP Gunji “Information transfer in a swarm of soldier crabs”, Artificial Life and Robotics, 21, 2, pp. 177-180. 2016 (査読有)

K Sonoda, H. Murakami, T Niizato, YP Gunji “Field of Safe Travel in Swarm”, Artificial Life and Robotics. 21, 37, pp.379-383. 2016 (doi: 10.1007/s10015-016-0272-y) (査読有)

新里高行・村上久・三具和希・都丸武宣・西山雄大・園田耕平・郡司ペギオ幸夫「少数個体の鮎(Plecoglossus altivelis)が形成する群れとその個体数による振る舞いの変化」, 計測自動制御学会論文集, 52, 5, pp. 257-263. 2016 (doi: 10.9746/sicetr.52.257) (査読有)

H. Murakami, T Niizato, T Tomaru, Y Nishiyama, YP Gunji “Inherent noise appears as a Lévy walk in fish schools”, Scientific Reports, 5, 10605. 2015 (doi:10.1038/srep10605) (査読有)

H. Murakami, T Tomaru, T Niizato, Y Nishiyama, T Moriyama, YP Gunji. “Collective behavior of soldier crab swarm in both ring- and round-shaped arenas”, Artificial Life and Robotics, 20, 4, pp. 315-319. 2015 (doi: 10.1007/s10015-015-0232-y) (査読有)

[学会発表](計17件)

H Murakami, T Niizato, T Tomaru, Y Nishiyama, YP Gunji “Internal noisy movements contribute to information transfer in collective group: a simulating study” Proceedings of 22rd International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp. 727-730. Beppu (Japan), Jan 18-20, 2017 (Oral)

H Murakami, T Niizato, YP Gunji “Diversity of individual moves and robustness in collective animal groups” Conference on Complex Systems 2016 (Organized Session on Swarming Systems), Amsterdam (Nederland), Sep 19-22, 2016 (Oral)

Y Nishiyama, T Tomaru, H Murakami “The effects of ambulating with visuo-tactile discrepancy” *Association for the scientific Study of Consciousness*, Buenos Aires (Argentina), Jun 14-19, 2016 (Poster)

H Murakami, YP Gunji “Autonomous Change of Behavior for Environmental Context: An Intermittent Search Model with Misunderstanding Search Pattern”, AIP conference Proceedings: The 2nd International Symposium on Artificial, Biological and Bio-Inspired Intelligence, Rhodes (Greece), Sep 19-25, 2016 (accepted) (Poster)

Y Nishiyama, S Okuda, M Migita, H Murakami, T Tomaru, “The effects of contrary individuals against the collective behaviors” AIP conference Proceedings: The 2nd International Symposium on Artificial, Biological and Bio-Inspired Intelligence, Rhodes (Greece), Sep 19-25, 2016 (accepted) (Poster)

T Niizato T, H Murakami, K Sangu, T Tomaru, K Sonoda, Y Nishiyama, YP Gunji, “Local Perspectives of *Plecoglossus altivelis* Determine Searching Strategy” AIP conference Proceedings: The 2nd International Symposium on Artificial, Biological and Bio-Inspired Intelligence, Rhodes (Greece), Sep 19-25, 2016 (accepted) (Poster)

H Murakami, T Niizato, T Tomaru, Y Nishiyama, YP Gunji “Schooling fish change internal movement strategy due to their density”, Proceedings of SWARM 2015: The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics. pp.62-65, Kyoto (Japan), Oct 28-30, 2015 (Oral)

T Niizato T, H Murakami, K Sangu, T Tomaru, Y Nishiyama, K Sonoda, YP Gunji, “Difference in the searching strategy of *Plecoglossus altivelis* between single individuals and groups” Proceedings of

SWARM 2015: The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics. Kyoto (Japan), Oct 28-30, 2015 (Oral)

YP Gunji, T Tomaru, H Murakami, T Niizato, “Following the Shadow beyond Pursuit and Escape Mechanism in the Swarm of Soldier Crabs” Proceedings of SWARM 2015: The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics. Kyoto (Japan), Oct 28-30, 2015 (Oral)

村上久「他者が分かち自発と反射」第11回内部観測研究会/第28回 SICE-SI 共創システム部門研究会, 早稲田大学西早稲田キャンパス(東京都新宿区) 2017年2月25-26日(口頭)

村上久・都丸武宜「反射に介入する自発性: シオマネキのパスインテグレーション実験」第17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(OS14『共創システム』), 1L2-5, 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市), 2016年12月15-17日(口頭)

村上久・都丸武宜・望月優磨・郡司ペギオ幸夫「オキナワハクセンシオマネキにおける自発的行為と反射行為の不定性」第35回日本動物行動学会, P1-54, 新潟大学(新潟県新潟市), 2016年11月11-13日(ポスター)

村上久・園田耕平・都丸武宜・郡司ペギオ幸夫「群れ形成過程において規則を探索するカニ」LIFE2016(OS14『共創するファシリテーション』), 2A1-D03, 東北大学(宮城県仙台市), 2016年9月4-6日(口頭)

村上久「群れの居心地」第10回内部観測研究会/第27回 SICE-SI 共創システム部門研究会, 東北大学(宮城県仙台市), 2016年2月27-28日(口頭)

村上久・都丸武宜・新里高行・西山雄大・郡司ペギオ幸夫「内的ゆらぎの群れ内情報伝達への貢献」第16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(OS29『共創システム』), 2P1-5, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市), 2015年12月14-16日(口頭)

村上久・都丸武宜・郡司ペギオ幸夫「群れの凝集・離散過程における臨界的振る舞い」計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会(SS05『人工知能, 生物学的知能, 及び生物に着想を得た知的システム』), SS5-10, 北海道, 2015年12月(口頭・ポスター)

村上久・新里高行・都丸武宜・西山雄大・郡司ペギオ幸夫「群れ内部における個体の臨界的振る舞い」第34回日本動物行動学会, P130, 東京海洋大学(東京都品川区), 2015年11月20-22日(ポスター)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

村上 久 (MURAKAMI, Hisashi)

神奈川大学・工学部・特別助教

研究者番号: 20755467