

群れの形態と揺らぎが大規模な方向転換を引き起こす ～数理モデルで理解する群れの行動～

魚や鳥などの動物の群れは、リーダー不在でありながら、群れ全体が方向転換をするなどの大規模な意思決定を随時行なっています。群れには数千から数万個体もが含まれ、伝言ゲームのようなローカルな情報伝達では、全体の意思決定までに膨大な時間がかかってしまいます。

これまで、群れが臨界状態（秩序と無秩序の境界、揺らぎ）にあることが、素早い意思決定に重要である、つまり、群れの中で臨界状態を制御することで、情報伝達を効率化し、行動の選択肢に幅を持たせている、と考えられてきました。しかし、「情報の共有・伝達を素早く行うこと」と「共有された情報に基づいて行動すること」の間には依然としてギャップがあります。

本研究では、動物の群れの行動を表す新しい数理モデルの構築を試み、群れの中で個体間の相互作用が曖昧な領域を作ることによって「なんとなく行きたい場所」を揃えるというモデルを提案しました。それぞれが向かう方向を曖昧に決めるため、全体としておおよそまとまることができる一方で、群れは決して一つの状態に収束せず、さまざまな形態を創出することが確認できました。

さらに、群れ全体が大規模な方向転換をするには、群れの中の臨界状態の他に、その状態を変換するような群れの形態も必要であることが分かりました。これは、群れの内部の臨界状態と群れの形態との組み合わせにより、リーダー不在の素早い方向転換ができることを意味しています。

本研究結果は、集団における意思決定の最適化には、それをうまく活かす構造や配置が必要であることを示唆しています。

研究代表者

筑波大学システム情報系

新里 高行 助教

研究の背景

夕方、空にたくさんのムクドリたちが飛び回っているのを見かけることがあります。その規模は何千羽にも及ぶにもかかわらず、全体として秩序を持って動いているように見えるだけではなく、一つの生き物のように動き回っているようにも見えます。生き物の群れは、なぜ、特定のリーダーを持つことなく、このような組織的な行動ができるのでしょうか？この疑問に対してはさまざまな説が考案されてきましたが、その中でも最も有力な説の一つが臨界現象^{注1}（秩序と無秩序の境界、揺らぎ）にあるとき、情報の伝達や共有を最大限に効率化できることが示唆されており、この素早い情報共有・伝達こそが、動物の群れの素早い意思決定の基盤になっているのではないかと考えられます。しかし、群れ内での情報の共有や伝達の存在が、直ちに群れ全体の意思決定につながるとは、論理的には言い切れません。従って、このように共有されている情報が、どのように群れというシステムの中で「実際に活用されているのか」は分かっていませんでした。

研究内容と成果

本研究では、これまでに提案されてきた、群れの行動を表す数理モデル（SPP や Boid モデルなど^{注2}）を拡張した、新しいモデルを構築しました。このモデルでは、これまでとは大きく異なり、それぞれの個体が次に向かう場所が、ある確定的な点ではなく、曖昧な領域として与えられるものとしています。つまり、群れの中の各個体は「みんながなんとなく曖昧に行きたい場所」をそれぞれ作り出しており、それゆえに全体としてまとまることができる一方、その曖昧さ（臨界状態）によって、集団の行動が完全には一致せず、かなりの自由度を持って振る舞うことができるということです。本研究グループは、過去に、このモデルを二次元空間で実装し、鮎の群れの振る舞いがうまく説明できることを示しています（Niizato et al., 2018）。

今回、このモデルを三次元空間に適用したモデルを提案し、群れの中の臨界状態と群れ全体の運動の関係について、さらに詳細に分析を行いました。群れ内部で起こっている情報ダイナミクス（どこからどこへどのような情報が伝わっているのか）を数学的に分析しました。これにより、以下の2つのことが分かりました。一つは、ミクロレベルの臨界状態とマクロレベルの臨界状態が共立しうることであり、もう一つは、群れの大規模な方向転換には、臨界状態をうまく活用するような群れの形態が必要になるということです。つまり、群れは臨界状態にあることで、情報伝達や情報共有を効率的に行えるようになりますが、それだけでは、群れの大規模な方向転換を引き起こすには不十分だということです。群れの中の臨界状態は、最大限に活用できる適切な群れの形態と組み合わせられて初めて、共有された情報が、実際の群れの振る舞い、つまり、急激な方向転換へと変換されるということを意味しています（参考図）。

以上の結果は、群れの中の曖昧な相互作用が、異なる階層の臨界状態をつなぐことを明らかにするとともに、群れのダイナミックな運動の背後には、群れの形態というこれまであまり着目されてこなかった要素の重要性を指摘するものです。

今後の展開

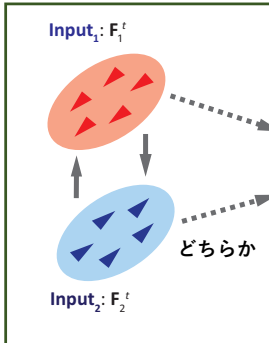
本研究は、群れの運動を引き起こすのは、内部の臨界状態だけではなく、群れの形態も重要な役割を担っていることを初めて示しました。動物の群れには、さまざまな形態が確認できますが、それぞれの形態に異なる機能的な役割が対応しているのかもしれませんが。

参考図

群れ全体の運動メカニズム

一つの群れを二つのサブグループ（赤・青）に分割し
ゆらぎと速度の方向転換に果たす役割の違いを説明

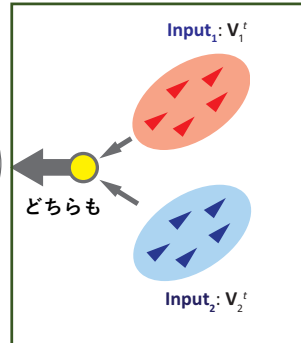
ゆらぎベクトルの分布



冗長な情報プロセス

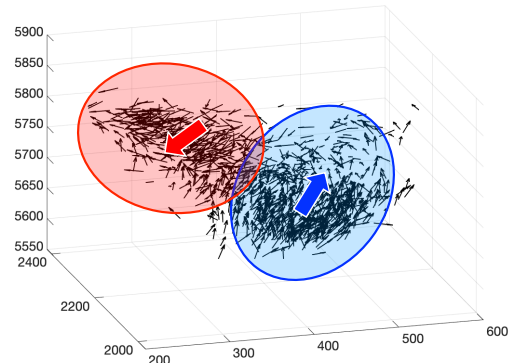
どちらか一方が方向変化に寄与

速度ベクトルの分布



協同な情報プロセス

群れの形態（両方も寄与）



群れが「ねじれ」の形態を作って
大規模な方向転換をする様子

図 本研究が明らかにした群れの方向転換のメカニズム（左）と、数理モデルによるシミュレーション結果（右）

群れが急激な方向転換をしているときの情報の流れを「ゆらぎ」と「速度」の2つの側面から分析した。その結果、ゆらぎベクトルには冗長な情報プロセス（2つのうちどちらか一方は余分となるような情報の流れ）が、速度ベクトルは協同的な情報プロセス（2つがそろって初めて意味を持つような情報の流れ）が観察された。その一例となるのが、群れの持つねじれ形態で、群れは大きく2つの部分（赤・青部分）に分けることができ、このねじれた形態が方向転換を引き起こしている可能性が示された。

用語解説

注1) 臨界状態

臨界状態は、秩序と無秩序の中間状態とされる。例えば水では、温度を上げていくと、固体（氷）から液体（水）へと状態が変化するが、 0°C ちょうどのときは、個体と液体が共存した臨界状態になる。臨界状態にある群れでは、各個体が自由と秩序を両立させて動いていると言える。

注2) SPP、Boid

SPP (self-propelled particle : 自己駆動粒子) モデルのことで、Viceck (1995) によって提唱された。各個体は一定の近傍領域を持ち、その近傍内部の個体とのみ相互作用することができる。相互作用の内容は、近傍内の個体の向きを揃えることで、群全体を一定の方向に向くようになっている。Boid は、この相互作用に加えて、相対的に遠い近傍個体に近づく引力と近い近傍個体からは離れる斥力からなる。現在に至るまで、多くの群れのモデルはこれらのモデルに基づいている。

研究資金

本研究は科研費 学術変革領域研究(A)による支援を受けて実施されました。

掲載論文

- 【題 名】 Functional duality in group criticality via ambiguous interactions
(曖昧な相互作用が作る集団臨界状態における双対的機能)
- 【著者名】 Takayuki Niizato, Hisashi Murakami, Takuya Musha
- 【掲載誌】 Plos Computational Biology
- 【掲載日】 2023年2月15日
- 【DOI】 10.1371/journal.pcbi.1010869

問い合わせ先

【研究に関すること】

新里 高行 (にいざと たかゆき)

筑波大学 システム情報系 助教

URL: <https://www.takayukiniizato.com>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp