

## 鮎の群れは役割分担による「柔らかいシステム」で最適な意思決定を行う

10匹の鮎の群れについて、情報理論を用いて、臨界状態（環境に対して柔軟に対応できる「柔らかいシステム」）の様子を調べたところ、周りの刺激に過剰に反応する個体群と、反応の鈍い個体群の役割分担が、理論的な予測よりも容易に、群れ全体としての臨界状態をもたらしていることが分かりました。

理論生物学では、協調的な行動を行う鳥や魚の群れにおいて、柔軟で素早い意思決定を行うためには、臨界状態（環境に対して柔軟に対応できる「柔らかいシステム」）にあることが重要であるとされています。しかし、このような臨界性が動物の群れで比較的容易に達成される理由はよく分かっていませんでした。

本研究では、10匹の鮎の群れについて、情報理論を用いて、臨界状態がどのように成立しているのかを詳細に調べました。臨界の程度を数値化し、全ての部分集合にその数値を割り当てたところ、臨界の程度の分布は群れの中で不均一であることが分かりました。一方、この分布を平均的に見ると、群れ全体としての臨界状態が確認されました。これは、群れの意思決定を行う「柔らかいシステム」は、周りの刺激に過剰に反応する個体群と、反応の鈍い個体群の役割分担から成り立っていることを示唆しており、このことが、理論的な予測よりもずっと容易に群れ全体の臨界状態をもたらしていると考えられます。このような情報構造は、理論的に構築した複数のモデルでは観察されませんでした。

さらに、反応が鈍い個体群が、群れ全体の情報伝達におけるハブとして機能していることも発見しました。これにより、群れ全体の選択肢がある程度絞られ、過剰に反応する個体群の意思決定がスムーズに統合されます。

本研究結果は、動物の群れにおける臨界状態は不均一な構造から成り立っており、全体の意思決定を最適化するためには個体間の役割分担が重要であることを示しています。

### 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

集団で行う最適な意思決定には、文脈を考慮した迅速かつ柔軟な情報伝達システムが不可欠です。柔軟な意思決定を行うには、既存のルールに従いつつ、例外的な処理も同時に行わなければなりません。このような直観は、鳥や魚が形成する動物の群れでも成り立ちます。理論生物学では、環境に対して柔軟に対応できるシステムを「臨界状態」と呼び、これまでの研究では、群れが臨界状態にあることが柔軟で素早い意思決定に重要であるとされています。群れの構成員すべてがルールを柔軟に運用することで、ガチガチでもバラバラでもない「柔らかいシステム」（臨界状態をもたらすシステム）が実現されるのです。しかし、このような柔軟なシステムは、理論的に、成立する条件が非常に厳しく、なぜ動物の群れがこのような臨界性を比較的容易に達成しているのか、よく分かっていませんでした。

そこで本研究では、統合情報理論<sup>注1)</sup>という近年脳科学で注目されている理論を用いて、魚の群れにおける臨界現象の詳細なダイナミクスを分析することを試みました。統合情報理論はもともと、多点で測られる脳波のどこがどれくらい「一体」になっているかを見積もることで、意識の度合いや状態を数理的に評価するために提唱されたもので、時間発展するシステム一般への応用が可能です。本研究グループは、これまでに、この理論が身体錯覚の尺度やストレス尺度として有用であることを示しています (Niizato et al., 2022, 2024)。

## 研究内容と成果

まず、群れを模す代表的な2つのモデルである、自己駆動粒子モデル (SPP)<sup>注2)</sup> と Boid モデル<sup>注3)</sup> に、統合情報理論を適用しました。SPP モデルは一般に、システムの臨界性を調べるときに利用され、Boid モデルは、さまざまな群れの形態を再現するために使われるものです。これらのモデルに対して、統合情報理論を適用したところ、統合情報量が臨界現象の程度（臨界度： $\Phi$ ）を表すことや、群れの形態に応じて、強い臨界性を示すサブグループが変化することが確認されました。

以上の結果をもとに、10匹の鮎の群れを分析してみました。鮎の群れは幅3m、長さ3mで深さ8cmほどの水槽で8分から10分ほど自由に泳がせると、分離することなく一つの群れになって行動します。この鮎の群れに対して統合情報理論を適用すると、鮎の群れ全体における臨界度が、SPP モデルの臨界状態時よりも有意に大きいことを確認しました。また、興味深いことに、群れ内部のサブグループについても同様の計算を行ったところ、群れ全体としての値よりも高い値が多く含まれていることが明らかになりました。つまり、鮎の群れは、大域的（群れ全体）には、これまで確認されていた臨界状態が確認された一方で、局所的（サブグループ）には複数の強い臨界度を持つグループが共存していることが話ありました。このような、臨界度の強いサブグループとの共存は、従来のモデルでは観測されない、動物の群れ独特のものであることが分かりました。

さらに、この臨界度の強いサブグループに属しやすい個体と属しにくい個体で、どのような振る舞いの差があるかを調べました。その結果、頻繁に強い臨界状態に属している個体ほど、外部や内部刺激（例えば、光や音のゆらぎなどの刺激やグループ内の相互作用におけるシグナル）に対してあまり反応していませんでした。逆に、臨界状態にあまり属さない個体群は、外部や内部刺激に対して非常に敏感でした。このことから、鮎の群れの内部では、刺激に過剰に反応する個体群に対して、あまり反応しない個体群が一種の情報のハブとして機能することで、柔軟な意思決定を可能にする臨界状態が実現されていることを解明されました（参考図）。

## 今後の展開

今回、群れとは、均一な集団の集まりではなくて、むしろ多様な性質を持つ生き物の集合体であり、さまざまな反応基準を持った個体が共存することで、柔軟な意思決定を可能にする臨界状態を達成していることが明らかになりました。これは、群れの多様さこそが、生き生きとした集団行動を実現していることを示唆しています。

本研究の成果は、これまで考えられてきた古典的な臨界現象に対して新しい視点を与えるものです。さまざまな反応を示す個体群の共存は、近年、遺伝子発現における因果関係の相互作用を表す遺伝子ネットワークでも確認されつつあり、普遍的な生物システムの性質といえるかもしれません。

## 参考図

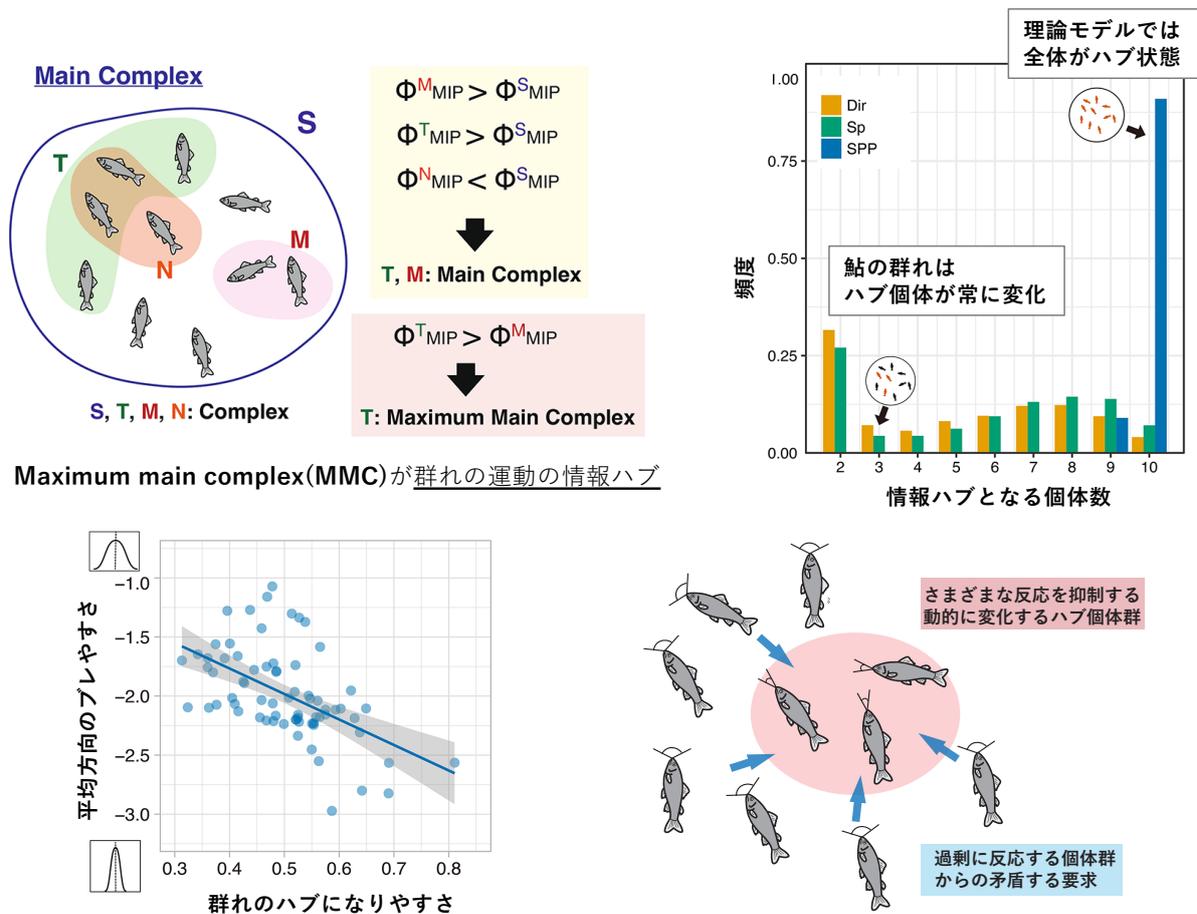


図 本研究の主な結果

左上図：鮎の群れの中の臨界度 $\Phi$ の高い個体群（Main complex）の定義。各部分集合に対してそれぞれ $\Phi$ を計算し、その中で極大のものを Main Complex、最大のを Maximum main complex（MMC）と名付けた。MMC に属する個体が情報のハブとしての役割を果たす。

右上図：SPP モデル、および鮎の群れ（方向：Dir、速度：Sp）における $\Phi$ の高い個体群（情報ハブ）の群れのサイズ。鮎の群れは、理論モデルとは異なる挙動を示す。

左下図：鮎の群れにおける個体（合計 70 匹）のうち、情報ハブ（MMC）になりにくい個体ほど、外部刺激の影響（方向のブレ）を多く受ける。

右下図：本研究全体の要約。情報のハブになる個体群は外部刺激に過剰に反応しないことで、周囲にいる過敏な個体群からの刺激を調停する。

## 用語解説

### 注1) 統合情報理論

2001年にイタリアの脳科学者トノーニが提唱した理論です。もともとは脳の発火ネットワークから人間の意識の状態を測定するものとして使われてたが、近年ではさまざまな脳と直接の関係を持たない分野にも応用されつつある。

### 注2) 自己駆動粒子モデル (Self-Propelled Particle: SPP)

1995年にVicsekらが発表した、群れの相転移を明らかにしたモデル。各個体は近傍内の個体の向きに自らの向きを揃えると同時に、一定程度のノイズを加える。このノイズの強度が臨界点に達した時に、臨界状態になることが知られている。

### 注3) Boidモデル

1989年にRaynoldsらが発表した、最も古い群れのモデル。SPPでは向きを揃えるだけだが、Boidモデルでは、他個体に近づくアトラクションや、近づき過ぎた個体から離れるという回避行動もプログラムされている。

## 研究資金

本研究は科研費 基盤研究B、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】 Information structure of heterogeneous criticality in a fish school  
(魚の群れにおける不均質な臨界性の情報構造)

【著者名】 Takayuki Niizato, Kotaro Sakamoto, Yoh-ichi Mototake, Hisashi Murakami, Takenori Tomaru

【掲載誌】 Scientific Reports

【掲載日】 2024年11月30日

【DOI】 10.1038/s41598-024-79232-2

## 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](mailto:kohositu@un.tsukuba.ac.jp)