

トピックス

# 統合情報理論を用いた鮎の群れの中の因果構造の分類

新里高行 筑波大学工学システム学類システム情報系

## 1. はじめに

本トピックスでは統合情報理論 (Integrated information theory, IIT) を動物の群れに適用した例を紹介する。

動物の群れに情報理論を適用する例は数多く存在する。例えば、移動エントロピーを用いたリーダー推定<sup>1)</sup>などが有名だが、移動エントロピーはシステムそのものを分析するというより、個体同士の間で起こっているイベントを追跡しているに過ぎない。

統合情報理論を考案したTononiらは、統合情報量を「どのようなシステムであるのか (what the system is)」を明らかにするものであり、これまでの理論のような「システムで何が起きているのか (what the system does)」とは区別されるものだと主張する<sup>2),3)</sup>。

この理屈を簡単に見てみよう。情報理論を用いてシステムを分析したい時、これまで、刺激と反応の相互情報量  $I(S; R)$  という形で理解してきた。この場合、入力=刺激 ( $S$ ) と出力=反応 ( $R$ ) の相関関係を見ている。つまり、外的な刺激に対してどのように振舞うのか、ということがここでの関心事となる。一方、統合情報理論とはといえばシステム自体の変化に関心を持つ。例えば、時刻  $t$  におけるシステムの状態を  $X(t)$  とすると、それ以前の時刻  $t-\tau$  における過去の状態  $X(t-\tau)$  との相互情報量  $I(X(t-\tau); X(t))$  を調べるということである。Tononiらが、統合情報理論はシステムを内的な視点から分析すると主張している理由は、端的にこの事実由来する。

もちろん、上の議論は非常に単純化したものであり、 $I(X(t-\tau); X(t))$  が直ちに統合情報量  $\Phi$  というわけではない。具体的には、さらにあらゆる方法でシステムを分割したものを比較する必要がある。しかし、IITが内的な因果を扱うと述べる時、上の議論を念頭に置いている。一般に、統合情報量の計算には多大な時間を要するため、いくつかの近似方法や類似概念が

提案されている。本稿ではIIT3.0を用いるがIITを理解する上でいくつか重要な概念について触れておく。

統合情報量  $\Phi$ : IIT 3.0 ではシステムを2つに分割した時に失われてしまう最小の情報量を指す。つまり、どのような分割をしてもどうしても失われてしまう情報量であり、それがいわゆる統合度 (部分への還元不可能性) を意味する。本項では、 $\Phi$  をグループ全体としての統合度と解釈する。これは  $\Phi$  が大きい値ならば、最小情報量分割 (MIP) によって分割されたサブグループの間に強いフィードバック構造を有することに由来する。つまり、グループ全体の統合度とは、サブグループ間のフィードバック構造の強度を意味する。

最小情報量分割 (Minimum Information Partition, MIP):  $\Phi$  を計算する時に使われるシステムの切断面を意味する。IIT3.0では一方方向の最も弱い情報の流れを切断する。このため、必然的に逆方向の情報の流れはより強いということになる。この定義から必然的に、 $\Phi$  が高ければ分割した2つのシステム同士はフィードバック構造を有しているといえ、 $\Phi$  がゼロに近ければフィードフォワードのネットワークを形成しているといえる<sup>2),3)</sup>。つまり、システムの統合度  $\Phi$  とは、どれだけ強いフィードバック構造を保持しているのかということになる。

以上の2つの概念が理解できていれば、本稿を理解するには十分である。IIT3.0はその他にも様々な豊富な概念が存在する (Main complex, 因果パトリリーなど) が細かい概念については、それぞれ自ら参照されたい<sup>2),3)</sup>。

## 2. 群れに統合情報理論を適用する

以上の議論を念頭に置いた上で、実際に動物の群れに適用した例を見ていこう。本稿では、鮎の群れへの適用を試みることにする。鮎は「友釣り」などで知られ、縄張り意識の高い種であるが、稚魚や体が小さい

場合はよく群れることで知られている。我々は、縦横 3 m で深さ 15 cm の浅い広い水槽を用意し、そこで 2 匹から 5 匹までの鮎を群れとして自由に泳がせた。それを動画として記録したあと、その軌跡に専用ソフトウェア (Pyphi) を用いて IIT3.0 の基本量を計算した。

IIT3.0 では各個体の状態は ON か OFF の 2 状態しか存在しないため、各個体の状態を二値化する必要がある。ここでは鮎の遊泳方向の角度に着目し、個体同士が接触して、ある閾値以上の角度変化をした時、何らかの相互作用が起こったと判断し、個体の状態を ON:1 (それ以外は OFF:0) と定義した。この定義は、BOID と呼ばれる群れのモデルでよく見られるものをベースにして定義したものである<sup>4)</sup>。

では、具体的に  $\Phi$  が高い時 (つまり、グループとしての統合度が高い時) の相互作用領域の因果構造を分析してみよう。我々が得た最初の結果は、4 匹以上になるとリーダーシップが得られるというものである。鮎が 4 匹のグループを作る時、**図 1** のような因果構造をとる。この時、個体の相互作用の範囲はちょうど後ろに死角が来ていることが見て取れる。

**図 1** の内容を要約すると、 $\Phi$  の値のみを比べた時、全てが ON 状態である時の  $\Phi$  の値は OFF が 1 つだけある状態より高い値を示す。これは何を意味するのだろうか？まず、全てが ON 状態にある時、群れは相対的に堅固なフィードバック構造を示すということである。このことは、全ての個体が相互作用している状態にあるのだから、我々の直観とも一致する。

一方、群れの中に OFF 状態が 1 つだけ紛れ込むと、 $\Phi$  の値は急激に落ち込む。これは、この状態にある時、相対的にフィードフォワード構造を持っていることを意味する。さらに、**図** より、OFF 状態の 1 匹の

個体と ON 状態の 3 匹の個体でちょうど MIP による分割が入っていることが見て取れる。MIP の定義より、フィードフォワードが起こっている場所は、ちょうど位置的なリーダーシップを示す個体と残りの個体群の関係をそのまま反映させたものとなる。これもまた、我々のリーダーシップの定義と直観的に一致する (より細かい議論は Niizato *et al.* (2020)<sup>5)</sup> を参照)。

我々の結果は、一般に用いられる移動エントロピーのリーダー推定とは異なることに注意されたい。移動エントロピーの場合は、あくまで二個体間の情報の流れを見ているため、ある程度群れている生物であれば、群れのサイズに関係なく見出される関係である。ところが、IIT3.0 による分析では、情報量の流れは 2 つに分割されたグループ間の関係 (1 匹と 3 匹) である上に、MIP の分割線が必ずしも見かけ状のリーダーとフォロワーたちの間に入るとは限らない (事実、3 匹の群れの場合、MIP は {ON, OFF}, {OFF} のような分割をする)。IIT3.0 が明らかにしたリーダーシップは、自律システムとしてのリーダーシップとして、これまでの概念とは明確に区別されるべきものなのである。事実、移動エントロピーで同じような計算を行ったところ、同様の結果を得ることはできなかった。

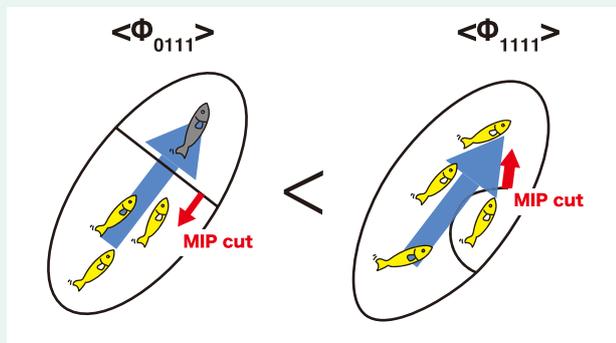
また、さらに興味深いことに、我々は簡単な BOID モデルで鮎の群れを再現したが、この人工的なモデルには 4 匹以上になった時に現れるリーダーシップは観測されなかった。それどころか  $\Phi$  が大きくなる時のパラメーター領域にも根本的な差異が観察された。これらの結果は、我々が発見した群れとしてのリーダーシップの発現は、実際に「生きた」群れの中のみで確認できるものであることを示唆している。

### 3. | グループ・サイズによる群れの性質の変化

我々はこの分析をさらに詳細に調べることでより細かな差異がグループ・サイズによって変化してくるということを明らかにした。細かい議論は紙面上全てを扱うことは困難であるため、ここでは結果とその意味について簡潔に記したい (**図 2**)。

まず、2 匹の時に現れる「追いかけ」という構造は、「リーダーシップ」という構造に酷似しているが、 $\Phi$  に高い値を与えるパラメーターの組み合わせは大幅に異なり、非常に狭い相互作用範囲でしか起こらない。しかし、4 匹で高い  $\Phi$  が得られたパラメーター付近では、2 匹の  $\Phi$  の値は低く、非対称な関係が観察された。以上より、これらは厳密に区別されるべき概念であると考えられる。

3 匹の場合、2 匹の時に見られた「追いかけ」構造



**図 1** それぞれの状態に対応する平均の  $\Phi$  の比較。  $\Phi$  は MIP cut により消失する情報量だが、状態が 0111 のような時は、ちょうど 0 と 111 の間に入る。さらに、状態 0111 の時の  $\Phi$  の値は状態 1111 の  $\Phi$  の値より相対的に小さく、フィードフォワード形を持っていることがわかる。

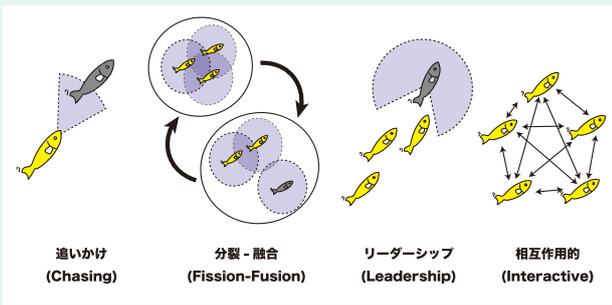


図 2 群れのサイズに応じた異なる因果構造。

はもはや見られない。さらに、4匹の時に見られた「リーダーシップ」の構造も見られない。さらに、MIPで分割される場所にもON群とOFF群を明確に分けるような規則性も得られなかった。それゆえ、3匹の個体はまさに離散と集合を繰り返しているとしか述べることはできない。「分裂-融合」という名前はそこに由来する。

5匹の場合は新たに別の評価を持ち込むことで、4匹との差異が明らかになる。我々は、個体群の状態を群れ全体の平均からの逸脱によって評価することで $\Phi$ 値を得た。詳細については、Niizato *et al.* (2020)<sup>6)</sup>を参照してもらいたい。直観的にいえば、群れ全体に平均場近似のようなものを統合情報量として評価したと考えれば良い。つまり、「相互作用が均一である」と仮定した時に得られる統合情報量である。この値と上で得られた(不均質な)相互作用から生成された統合情報量を比較したところ、5匹の時のみ、相互作用を均一にするという近似を同条件下で比較すると $\Phi$ の値を低く見積もってしまうことがわかった。おそらく多数匹集まった時の複雑な動きは実はこの均一相互作用への還元し得なさが原因となっていると思われる。

これらの分析を通じて、魚の群れはただ同じ個体を足し合わされるのではなく、足し合わすたびに自身の因果構造を変化させるような自律的なシステムであるということができらるだろう。

#### 4. | 今後の展望

本稿では、魬の群れに統合情報理論(IIT 3.0)を適用し、その内部の因果構造を調べた結果を記している。その結果、群れのサイズが4匹以上になった時にリーダーシップが出現するだけでなく、それぞれの個

体数がそれぞれの個性のようなものを持っていることが明らかになった。これは非常に興味深い結果である。通常、個体数の差は程度の差に過ぎないと考えられているが、内的な因果構造の観点から見ると、それぞれ明確な差異を見出すことができた(2匹と3匹の群れとしての差異についてはKatz *et al.* (2011)<sup>7)</sup>を参照)。これらの結果は、相互情報量や移動エントロピーといった情報量では捉えきることができないことから、IITは今までの情報量では得られなかった何らかの特徴を抽出していることが示唆される。

統合情報理論は内的な因果関係を記述するため、システムの振る舞いそのものよりもシステムとしての内部構造に注目する。しかし、統合情報量の計算量は莫大であるためなかなか実際のシステムへの適用が現実的に難しい。本稿では、2匹から5匹という極めて小さな群れの分析を行ったが、様々ある概念のなかの一部を使ったに過ぎない。それらの概念は様々な実践において、今後その意味が明らかになってくると思われる。

#### 文 献

- 1) Wang, X. R. *et al.* (2012) PLoS ONE 7, e40084. DOI: 10.1371/journal.pone.0040084.
- 2) Oizumi, M. *et al.* (2014) PLoS Comput. Biol. 10, e1003588. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1003588.
- 3) Albantakis, L., Tononi, G. (2015) Entropy 17, 5472-5502. DOI: 10.3390/e17085472.
- 4) Couzin, I. D. *et al.* (2002) J. Theor. Biol. 218, 1-11. DOI: 10.1006/jtbi.2002.3065.
- 5) Niizato, T. *et al.* (2020) PLoS ONE 15, e0229573. DOI: 10.1371/journal.pone.0229573.
- 6) Niizato, T. *et al.* (2020) Entropy 22, 726. DOI: 10.3390/e22070726.
- 7) Katz, Y. *et al.* (2011) Proc. Natl. Acad. Sci. USA 108, 18720-18725. DOI: 10.1073/pnas.1107583108.



新里高行

**新里高行 (にいざと たかゆき)**  
 筑波大学工学システム学類システム情報系助教  
 2012年神戸大学大学院理学研究科博士課程後期修了後、日本学術振興会特別研究員(PD)を経て、現職。  
 研究内容:動物の群れなどの研究を通じて、生命システムにおける部分と全体の関係の研究をしている。  
 連絡先:〒386-8567 茨城県つくば市天王台 1-1-1  
 E-mail: t\_niizato@yahoo.co.jp  
 URL: https://www.takayukiniizato.com