2N4-OS-03a-4

# 群れの運動の内在的な切り替え
# Inherent Switching Behavior in Fish School

新里高行[*1] 村上久[*2] 郡司ペギオ幸夫[*2]
Takayuki Niizato Hisashi Murakami Yukio-Pegio Gunji

[*1] 筑波大学システム情報工学研究科
Faculty of Engineering, Information and Systems, Tsukuba University

[*2] 神戸大学理学研究科地球惑星専攻
Department of Earth & Planetary Science, Faculty of Science, Kobe University

## 1. はじめに

我々がふだん生活していてみられるような，鳥の群れや魚の群れは，どのようなダイナミクスに基づいているのだろうか？動物の群れ(ここでは特に，個体の集まりが，外部から見て一つの個体であるかのように運動する現象に限定するが，のちに述べるようにこの種の限定は明確にはなされない)は，これまでモデルや数理的解析において多くの研究がなされているものの，実験に基づいた研究は，まだ最近始まったばかりで，未知な部分が多い．これは，個体識別を始めとした画像解析の技術的な困難さをはじめ，単一条件下におけるデータの析出が困難であることに起因する．

しかし，画像解析から群れのダイナミクスを調べるという流れも，あくまで，これまで主流であった Vicsek(1995)，もしくは Couzin(2002)らなどに代表される Velocity Matching 等の理論の延長線上にあり，彼らの理論を単に補強するものに留まっている．彼らによると，あくまで，Velocity Matching，つまり，各個体の向きは，その近傍内の個体の向きの平均になるように決定し，個体の自由度は自発的に情報伝達速度を最大化するように自発的に進化していくものである，という事だ．Cavagna(2010, 2013)らは，これを自己組織化臨界現象と関連づけている．しかし，この種の議論は，進化によって獲得した最適性と個体のルール(もしくは，個体による評価)というものが分離可能であり，個体のルールを設定した後に，評価を外部から独立に与えることができる，と言った仮定を含んでいる．果たして，そのような事は可能だろうか．

本稿では，私たちは，川魚(鮎)の群れを人工的に作り，その挙動を録画し，画像解析することで，これまで考えられてきたような Velocity Matching とは違う原理がありうることを，実験において示そう．具体的に言えば，鮎の群れは，トーラス構造と直進構造を自発的に切り替えるところに見られる．これは，のちに議論するように，Couzin らのモデルからは，パラメーターを外部から調整しない限り，決して実現し得ない[Couzin et al., 2002]．さらに，群れは激しく揺らぎながらも，全体評価と個体評価を混合することで，一種のベキ則(power law)を示す事を述べる．このベキ則は，通常の Velocity Matching 型の相互作用からは，直接は導出されない事を示したいと考えている．

連絡先：新里高行，筑波大学システム情報工学研究科，住所，電話番号，t_niizato@yahoo.co.jp

## 2. 実験

### 2.1 実験装置

まず，実験装置の概要を述べる．鮎(体長は 8cm から 15cm で)を入れる水槽は，縦横 3m，高さ 8cm の浅い水槽である．鮎は川魚であり，稚魚のときは浅瀬にいることが多い事が予想されるため，それほど不自然な環境ではないと考えられる．このように環境を設定することで，群れの運動はほぼ二次元に限られる．実験を通した総合的な観察として，三体以上の個体が重なり合う事は見られなかった．また，二体重なることがあっても，個体識別は十分可能であり，そのようなことが起こった時は，手作業で分離した．

実験は，鮎の群れを 10 分間自由にしたあと，高さ 2m の所に設置したビデオカメラ（ひまわり GE60W; 時間解像度 120 frame per 1 second）で撮影し，録画した動画の画像解析(Move-Tr/2D)を行なった．水槽中の魚の個体は，グレースケールで録画され，動画を二値化し，その重心を個体の位置と定めた．Figure1 が，Move-Tr/2D にトラッキングの様子である．各個体は明確に識別され，10 秒間に移動した軌跡が表現されている．また，このような実験環境は Couzin らの研究にも見られる[Tunstrom et al., 2013]．なお，水温は 16℃で固定し，淡水である．

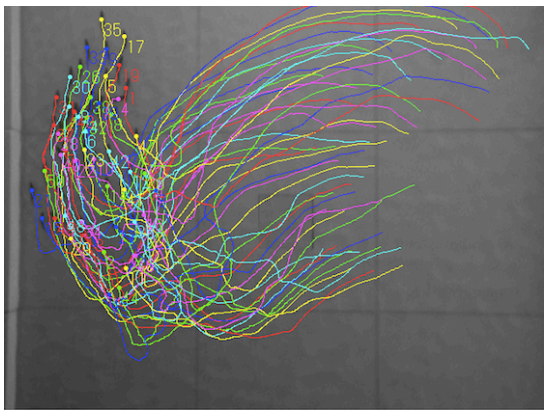

Figure 1. The trajectory of fish school. The number of individuals is 50.

### 2.2 実験結果

まず，実験の環境設定について述べておく．我々は，群れのおかれている環境を，外部刺激ありとなしの場合に分割した．一

般に，自然環境において，外部刺激がある場合とない場合は区別しにくい．そこで，実験室という外部刺激の限りなく少ない環境を設定し，外部刺激としては，人が部屋にいて，水槽の周りを歩き回るものとした．外部刺激ありと外部刺激なしの群れの振る舞いはあきらかに異なる結果を得た．ただし，長時間(数十分)のトラッキングが必要になり，観察結果のみを述べるのみとする．

外部刺激がない場合，群れは自発的にトーラス構造をつくり，さらに自らトーラス構造を解体し，直進構造(群れが一方向に向かって進む)に切り替えた．一定時間後，直進構造は，トーラス構造に回帰した．外部刺激がないとき，このような切り替えをし続けた．ところが，外部刺激があるとき，このような切り替えは一切起こらない．このようなトーラス構造と直進構造の切り替えは，最近他の種の実験においても確認されており [Tunstrom et al., 2013]，かなり普遍的な性質であると考えられる．しかし，これは一方で，Velocity Matching から自然に導出される直進構造は，むしろ，自然な状態ではない事を示唆している．

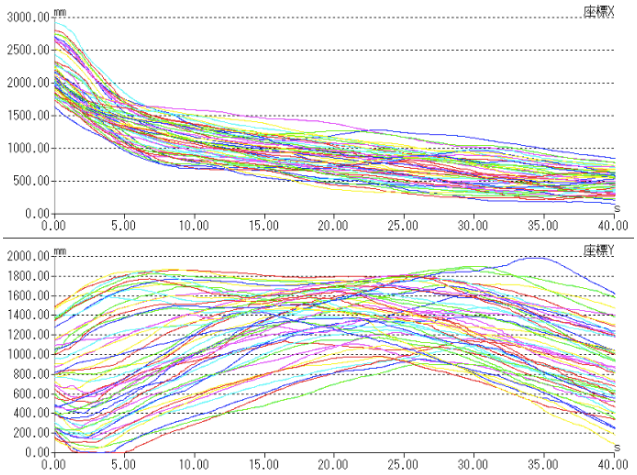


Figure 2. The time series for x axis and y axis in the fish school.

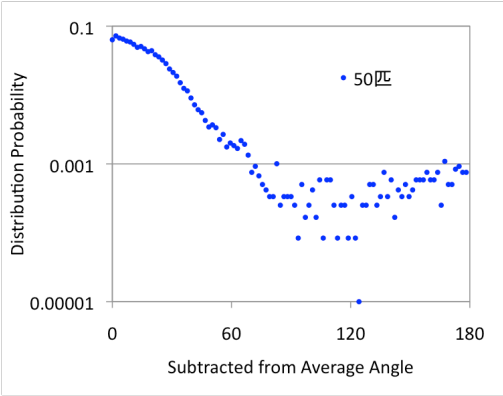


Figure 3. The probability distribution of the angle diferrence from the average velocity vector.

これ以降のデータは，すべて外部刺激ありのときの状態である．Figure2 は，ある群れの軌跡を x 軸と y 軸に分けて，時系列で表したものである(10 秒間; 1200 frame のデータである)．それぞれの軌跡にばらつきが見られるものの，全体の束としてみると，それぞれの軌跡と相関を保ちつつ，移動しているのが見て取れる．

この軌跡から得られる結果だけでも，Velocity Matching のような，向きを単に平均化するだけではすまないことがわかる．もしも，向きを平均化し，さらに何らかの外力があったとしても，その分散はあくまで全体の平均値周辺に留まるはずである．すると，平均値付近の分散の様子は exponential であることが期待される．ところが，Figure 3 に見られるように，平均値付近の分散の様子，ここでは各向きベクトルから，平均の向きベクトルを引いた値の確率頻度分布である．Figure 3 に見られるように，平均値付近からの分散は，exponential としては現れず，むしろ，ヘビーテールであることがわかる．

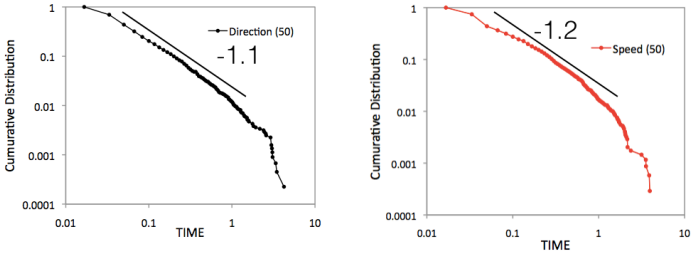


Figure 4. (a) The power law distribution for the direction (black). (b)The power law distribution for the speed (red). The slope is around 1.

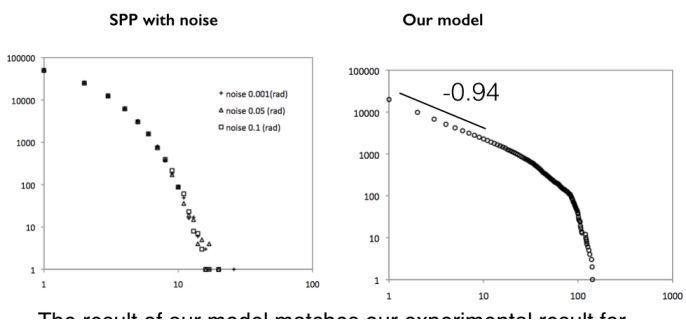


Figure 5. The compare with previous model (left) and MTI model (right). The power law behavior is only observed on the right side. Furthermore, the slope also matches with experimental data.

さらに，興味深いことに，個体の向きと速度が，全体平均の向きと速度に対して，どちら側にあるのか(平均の向き右側か左側か，もしくは平均速度以上か以下か)の頻度分布をとると，かなりきれいなベキ則を示すことがわかった(Figure 4a と 4b)．これは，個体の向きや速度は，つねに全体の向きと速度を参照しながら調整しており，まったく速度調整や向き調整はまったくランダムなものではないことを意味する．このような結果は，匹数や解析の時間インターバルに依存せず，たとえば，インターバルが 0.01 秒のときも，0.1 秒のときも傾きはやや変化するものの，普遍的性質として現れる．

このようなベキ則は，我々が以前に提案した Metric-Topological Interaction(MTI)モデル[Niizato and Gunji, 2012]からも得られることが分かっている(Figure 5a)．MTI モデルは，大域的評価(距離近傍)と局所的評価(トポロジカル近傍)が混合されることによって，自らゆらぎを作り出し，群れ全体として運動するモデルである．一方で，Velocity Matching にノイズを付加したモデルは，exponential を示し，ベキ則を示さない(Figure 5b)．

## 3. まとめ

本稿では，鮎の群れを用いた実験を通して，従来考えられてきたような，Velocity Maching では説明しきれないような現象を扱った．それは以下のようにまとめられるだろう．

まず，最初に，外部刺激なしのときの，トーラス構造と直進構造の自発的切り替えについてコメントしておきたい．一般に，多様な群れの構造を説明するために，Couzin らのような3つの相互作用を前提としたモデルが提案されている [Couzin 2002]．各個体は，誘引，忌避，向きの平均化という3つの相互作用をもち，これらの相互作用を独立に配分する事で，トーラス構造や直進構造やスワーム構造(一カ所に留まりながらもコヒーレントが非常に低い状態)が得られたのであった．一般に，トーラス構造は誘引領域が非常に強いときに出現し，直進構造は向きの平均化する領域が広いときに現れる．つまり，両者はあくまで異質な相互作用の結果現れるものであり，排他的な関係にあるところが，外部刺激がないときの，トーラス構造と直進構造の自発的切り替えは，両者が決して排他的ではなく，共立関係にあることを示唆している．

このような結果は，群れによる探索問題を考える上で重要である．資源探索問題は，一般に搾取と探索の配分によって理解される．群れは，トーラス構造を作ることによって，外敵を警戒しつつ，群れ付近の資源を探索もしくは搾取し続ける．一方で，トーラス構造を自ら解体することで，新しい資源のあるところに集団的に移動することが可能になる．探索問題に対して，群れのつくるトーラス構造と直進構造は自然に接続される．Velocity Matching に変わる相互作用は，このような文脈において構想されるべきであろう．

後半で調べたように，外敵ありの時の向きと速度のベキ分布は，個体のローカルな評価が大域的な評価を混合する事で得られていることを示唆する．これは，ベキ則が，MTI モデルでは得られたのにも関わらず，Velocity Matching では Noise を調整しても得られなかったことからも明らかであろう．今後は，データ数を増やし，さらに細かく調査していく予定である．

群れがなぜ，臨界現象を示すかという事を，進化による最適化として説明する事は，個体の局所的評価と群れの大域的評価を分離できるという態度を起源としている．そこでは，群れの機能は一つにしぼられて，もとより，群れの形成とその機能を分離することは不可能であろう．しかし，だからこそ異質な相互作用同士が共立し得，単なる集団的にコヒーレントの高い運動にすら，群れによる探索という集団的知能すら見出してしまうのである．

## 4. 参考情報.


Cavagna, A., Cimarelli, A., Giardina, I., Parisi, G., Santagati, R., Stefanini, F., & Viale, M. Scale-free correlations in starling flocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010. 107.26. 11865–70.

Cavagna, A., Giardina, I. and Ginelli,F. Boundary information inflow enhances correlation in flocking. Physical Review Letter. 2013. 110 168107.

Couzin, I.D., Krause, J., James, R., Ruxtion, G.D. & Franks, N.R. Collective Memory and Spatial Sorting in Animal Groups. J. theor. Biol. 2002. 218:1-11.

Niizato, T., & Gunji, Y.-P. Fluctuation-driven flocking movement in three dimensions and scale-free correlation. *PLoS ONE*, 2012. *7*(5), e35615.

Tunstrom, K., Katz, Y., Ioannou, C.C., Huepe, C., Lutz, M. & Couzin, I.D. Collective states, multistability and transitional behavior in schooling fish, *PLoS Computational Biology*, 2013. 9(2), e1002915.

Vicsek, T., Czirok, A., Ben-Jacob, E. & Shochet, O. Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles. Physical Review Letters. 1995. 75(6): 1226-1229.