

魚群の素早い反応の観測とゆらぎ

寺山 慧, 阪上雅昭

京都大学 人間・環境学研究科

概要

水族館の底面に設置したカメラで撮影した動画の解析から、魚群の素早い反応について議論する。魚群の速度場を自動的に計測するため Optical flow による動画解析の手法を開発した。本研究では捕食者に襲われたときなどに魚群が見せる俊敏な反応についての観測結果を報告する。短時間しか継続しないが通常の遊泳速度の 10 倍程度で泳ぐ burst, さらに burst のトリガーすなわち加速や方向転換が通常の遊泳速度の 100 倍で伝搬する agitation という群れの中での速い波を計測することができる。また agitation よりも伝搬速度は遅いが頻繁に観測される weak agitation の存在を示唆する観測結果についても紹介する。

Swift response and fluctuation of fish schools

Kei Terayama, Masa-aki Sakagami

Graduate School of Human and Environmental Science Kyoto University

Abstract

We investigate mechanism of swift response in fish schools by analyzing the moving images filmed from the bottom of a tank of an aquarium. Through using velocity vector data measured by a method with optical flow, we review reliability of the analysis based on averaging over “cakecut” regions around a torus center. We show that agitation and burst, both of which have the significant role for swift reaction of fish schools, can be quantitatively detected by observing propagations of wave over neighboring cakecuts regions. Existence and importance of weak agitation, which is modest type of agitation, are suggested.

1 はじめに

近年、生物や人の集団、細胞、生体高分子などの自己駆動粒子系の研究が盛んに行われている。これらは各個体を自己駆動力を有する粒子 (自己駆動粒子) と捉えそれらの集団現象を解明するアプローチで、非平衡ゆらぎ、波の伝搬、そして同期現象などに関心もたれている [1]。鳥や魚の群れいわゆる生物集団もその代表例である。鳥の群れでは、Ballerini たちはムクドリなどの群れのステレオ動画を解析し、個体間の相互作用の性質を議論している [2]。GPS を背負わせた伝書鳩の群れの行動解析から、群れの中の序列の存在を指摘している研究もある [3]。また、

golden shinner という魚の群れでは、ある個体が餌に気づいたときその情報は視覚により群れの中を伝搬することが実験により示されている [4]。

生物集団の中でも、魚群、とくにマイワシ群れの魅力は、絶え間ない大きなゆらぎとロバストな安定性、そして外敵などの攻撃に対してその形を変える俊敏な反応と、そのダイナミクスが豊かな内容をもっていることにある。図 1 は九十九島水族館において水槽の底にカメラを設置し撮影したマイワシの群れの写真である。群れのサイズは魚の体長 (BL) を単位として表すことが多い。このトーラスの場合半径はおおよそ 15 BL である。群れの形状としてはこれ以外に、個々の魚は動いているが群れの重心は止まっ

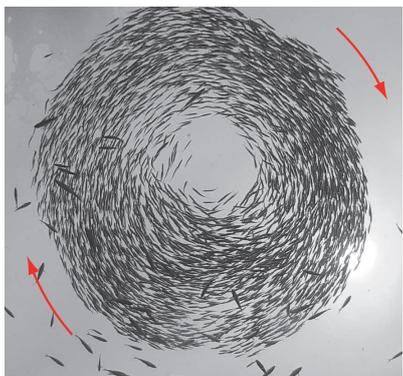


図1: 九十九島水族館において水槽底から撮影したマイワシの群れのトーラス形状 (赤い矢印がトーラスの回転方向): 2013年3月

ているスウォーム形状, 群れ全体が並進運動するパラレル形状などが知られているが, 本稿が対象とする九十九島水族館のマイワシ群れは日中はトーラス形状をなすことが多い. これは, 水槽の形状や捕食圧によると推測しているが, 群れのモデルから説明することには成功していない.

ここで, 魚の遊泳速度についての実験観察結果について簡単にまとめておく. 文献 [5] で説明されているように魚の遊泳には3つのレベルがあると考えられている. 最初は何時間でも持続可能な遊泳でその速度を定常遊泳速度とよぶことにする. 体長 (BL) l と遊泳速度 U のあいだには比例関係があることが知られているので, 体長 (BL) を単位とすると, 定常遊泳速度は, $1 \sim 2 \text{ BL/s}$ のオーダーである. 次にただかたか 10 s 程度しか持続できない最高速度での遊泳で外敵に襲われたときの回避行動の際に現れる. この

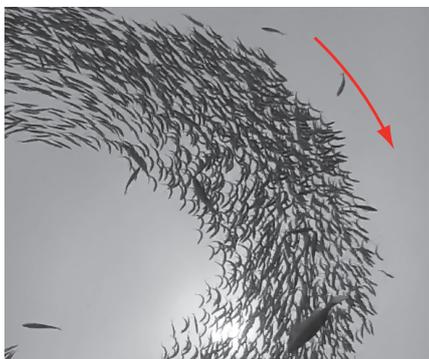


図2: マイワシ群れの agitation. (赤い矢印がトーラスの回転方向)

最高速度での遊泳を burst, そのときの速度を burst 速度 V_{burst} とよぶことにする. $V_{\text{burst}} \approx 10 \text{ BL/s}$ である. この定常遊泳と burst の中間の速さでは, 短時間尾びれを打って加速しそのあとは身体をまっすぐにし抵抗を小さくして滑走する kick and gliding という泳ぎ方が現れる.

2 群れの速度場の計測

2.1 Optical flow による速度場計測

図1のような数密度の高い群れで個体識別を行うのは大変難しい. そこで私たちは, 個体識別によらない速度場の計測方法として, Optical flow を用いた手法を開発した. ここではその基本的なアイデアを説明するにとどめる. 詳細は参考文献 [6] を参照して欲しい. この手法では動画のあるフレームでの画像中のパターンが次のフレームでどこに移動したか推定する. そのときのフレーム間でのパターンの移動量を Optical flow という. 実際のイワシの群れの動画解析では, イワシの群れの手前を横切るアジやサバなどの他の個体が障害になる. これらイワシ以外の魚による速度場は, イワシより速くまたトーラスの速度場とは方向が異なるので, flow の方向や大きさに条件を課すことで除去している.

2.2 群れの速い反応: agitation

第1章では外敵の襲撃に対する回避行動の際に短時間ではあるが高速で遊泳する burst という状態があることを述べた. しかし魚群の俊敏な反応は burst だけで実現されている訳ではない. じつは, 回避行動をとるために多くの個体はまず身体を屈曲させ方向転換を行う. この屈曲 (方向転換) は 100 BL/s のオーダーで伝搬することが, Radakov [7] により報告されており, この非常に速い伝搬が群れの俊敏な反応に重要な役割を果たしている.

九十九島水族館のイワシ群れでも agitation が観測されている. 図2はその一例である. 今回解析した約21分間の動画 (2013年3月26日に撮影. 30fps) 中の $t = 1248.43 \text{ s}$ (37453 frame) のスナップショットである. スナップショット1枚だけなので伝搬のようすはわからないが, 多くのマイワシが身体を屈曲させているのが見えるだろう. 屈曲が見やすいように群れ全体の $1/4$ を切り取っている. この付近での群れの速度場の時間発展を解析するため, 図3のようにトーラスを中心回りで24の領域に分割する.

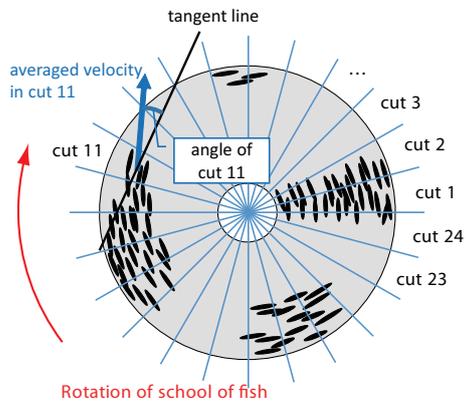


図 3: トーラスの 24 個の cakecut 領域への分割

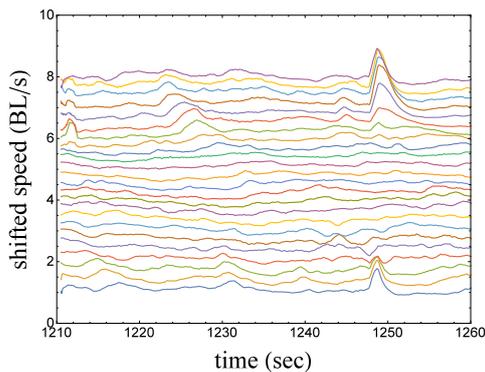


図 4: $t=1248s$ 付近での agitation の伝搬

これらの領域を cakecut 領域とよぶことにする。本当は agitation はいろいろな方向に伝搬するが、ここでは角度方向 (cakecut 領域間) の伝搬にだけ注目する。具体的には Optical flow により計算された速度場を各 cakecut で平均する。この平均操作によりノイズを低減し観測精度を上げることができる。

各 cakecut での速度場の変化を見やすいように表したのが図 4 である。図の下から順に cut1 から cut24 の速さを並べて表示している。ただしグラフが重ならないように cut1 の速さ以外は、それぞれ 0.3 BL/s ずつ上にずらしている。この shifted speed のグラフを描くことで cakecut すなわち角度方向の波 (速さ) の伝搬を観測することが容易になる。時刻 $t = 1248s$ にある顕著なピークが図 2 で起こっている agitation の伝搬である。伝搬のようすを詳しく見るため、ピーク付近を拡大してみよう。図 5 は $t = 1248s$ 近傍の 3 秒間の shifted speed の時間発展である。並べる順番を下から cut18~cut24, cut1~cut3 に変更している。Radakov [7] によれば

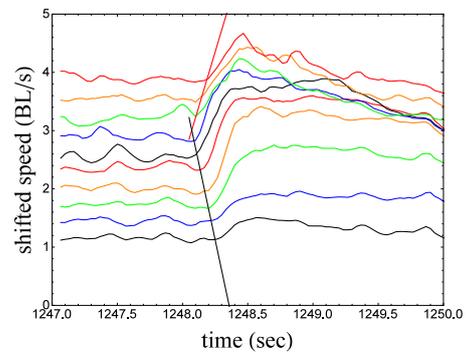


図 5: $t=1248s$ 付近での短い時間での agitation の伝搬。下から順に cut18 ~ cut24, cut1~cut3 での速さである。cut18 の速さはそのまま、残りは 0.3 BL/s ずつ上にシフトしている。

agitation は、捕食者の襲撃などの刺激を回避するための屈曲と方向転換の伝搬であった。しかし遊泳方向に回避する場合は、屈曲や方向転換を必ずしも伴わない。本論文では agitation を、通常の遊泳からの加速あるいは方向転換とより広い意味で定義する。図 5 の 2 つの直線は加速の開始すなわち agitation をフィッティングしたものである。黒い直線はトーラスの回転方向 (図 3 で時計回り) の agitation の伝搬で、直線の傾きから隣の cakecut に伝搬するのに $1/35s$ 要していることがわかる。トーラスの内径と外径の平均である 10 BL/s 付近で波の伝搬が生じたとすると伝搬速度はおよそ 92 BL/s となる。赤の直線はトーラスの回転と逆方向の agitation の伝搬でこちらの速さはおよそ 65 BL/s であった。

3 遍在する weak agitation: 魚群のゆらぎの起源の理解に向けて

図 6 は、 $t = 90s$ から $170s$ の shifted speed の時間発展である。 $t = 135, 140, 160s$ 付近の水色の矩形領域で鋭い速度変化が見られる。これはカメラのすぐ前をサメなどが横切りマイワシ群れがほとんど隠されたことによる見かけ上の変化である。また、点線付近の速度変化はマイワシ群れの近傍をサバ、アジ、サメなどが通過したことによるものである。楕円で囲んだ場所での波の伝搬に注目して欲しい。これらのイベントはマイワシ群れの速度場の変化であることは動画を見て確認している。例えば $t = 115s$ 付近の伝搬速度は 13 BL/s であった。他の楕円の部分の伝搬速度も同じオーダーで図 5 での agitation に比べると約 $1/10$ とかなり遅い。私たちはこれを agitation とは異なるマイワシ群の反応と考え weak

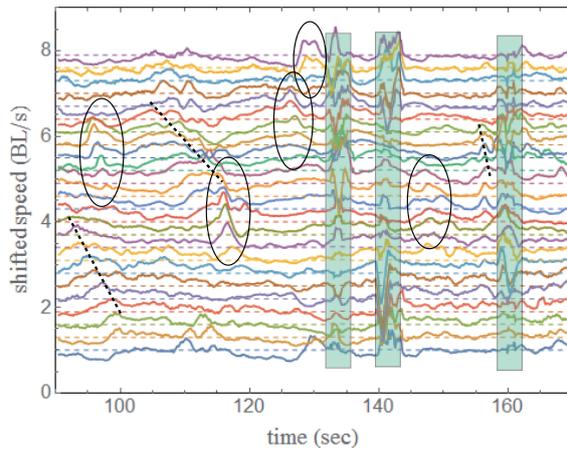


図 6: $t=90s$ から $170s$ での shifted speed の時間発展

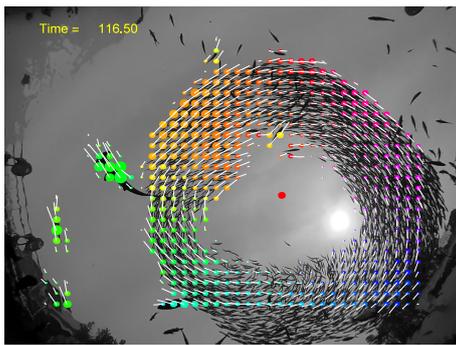


図 7: $t=116s$ 付近の snapshot

agitation とよぶことにする。

次のような理由から weak agitation という agitation と異なるカテゴリーの過程が存在すると考える。じつは agitation とそれに続く burst で各個体はずっと速い速度を維持しようとしているわけではない。速い速度での遊泳は水による抵抗が増しエネルギー消費が大きいので、回避のための加速は最小限に留めている。図 5 を見ると burst 速度に至る加速時間は約 0.5 秒である。尾びれ振動数は通常の遊泳で 2 ~ 3Hz, 加速時は多少速くなるとしてもせいぜい数回尾びれを打つことで加速を終了している。そのあとは身体をまっすぐにし抵抗を小さくして滑走する。これはまさに第 1 章で説明した kick and gliding である。図 7 は $t = 115s$ 付近での weak agitation イベントの際の群れの速度場である。1BL×1BL の正方領域で平均した速度場の大きさをドットの直径、向きを色で表している。weak agitation の生じている cut8 から cut11 あたりで加速の後の gliding のときに各個体の向きが揃ったコヒーレントなドメイン

構造 (オレンジ色の部分) が観測される。魚群のモデルでは各個体間には整列相互作用がはたらいっていると考える。トリガー (kick) によるエネルギー注入が整列相互作用より大きくトラスなどの群れの形状が破壊的に変化するのが agitation, 一方エネルギー注入がそれほどでもないため gliding のときに群れの該当する部分がコヒーレントに運動を変化させるのが weak agitation であると考えている。また, agitation の場合, 捕食者の襲撃など群れの激しい反応の原因が分かっていることが多い。これに対して, weak agitation の場合は何らかの外部からの刺激によるものなのか必ずしも分からない。緊張状態にある群れの中で, ある個体が自発的に引き起こしている可能性もあると考えている。

図 6 では約 1 分間に 5 回の weak agitation が出現している。このように頻繁に出現することがこの過程の大きな特徴である。伝搬速度は agitation の 1/10 程度であるが魚群の時間発展の過程に遍在している weak agitation が, 魚群の絶え間ない大きなゆらぎや非平衡進化に密接に関係していると予想している。

参考文献

- [1] T.Vicsek and A. Zafeiris, *Physic Reports*, **517** (2012) pp. 71–140.
- [2] M.Ballerini, N. Cabibbo, R.Candelier, et al., *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**, (2008) pp. 1232-1237.
- [3] M. Nagy, Z. Ákos, D. Biro, and T. Vicsek, *Nature*, **464** (2010) pp. 890-893.
- [4] A. Strandburg-Peshkin, C. R. Twomey, N. W. Bode, et al. , *Current Biology*, **23** (2013) pp. R709–R711.
- [5] T.Y.Wu, Introduction to the scaling of aquatic animal locomotion in *Scale Effects in Animal Locomotion*, eds. J.T.Pedley, (1977) Academic Press, pp. 203–232
- [6] K. Terayama, H. Hioki and M. Sakagami, *International Journal of Semantic Computing*, **9** (2015) pp.143-168.
- [7] D.V.Radakov, *Schooling in the Ecology of Fish*, (Wiely, New York), 1973.