

# 魚群の速度構造と平均トーラスの存在

阪上雅昭, 寺山 慧

京都大学 人間・環境学研究科

## 概要

九十九島水族館の大水槽の底に設置したカメラにより撮影したイワシの群れのトーラス形状の時間変化について報告する。Optical flow という動画解析の手法を用いてトーラス形状の速度場を自動的に計測する手法を開発した。得られた速度場データを中心からの半径  $r$  とそこでの速さ  $v(r)$  の関係、すなわち回転曲線という概念を用いて解析する。その結果、数秒の短い時間スケールではトーラスの速度構造は絶え間なく非定常に変化するが、60 秒という時間スケールで平均した回転曲線は普遍的な性質を示すことがわかった。この時間は各個体がトーラスを 1 周するいわゆる動的な時間スケールに対応している。イワシの群れの速度構造は、動的時間スケールで存在する“平均トーラス”とその周囲の非定常ゆらぎとして理解できる。

## Velocity Structures of Fish Schools and Existence of Averaged Tori

Masa-aki Sakagami, Kei Terayama

Graduate School of Human and Environmental Science Kyoto University

### Abstract

We investigate time development of the solid torus shape of fish schools by analyzing the movies taken from the bottom of a tank of an aquarium. Using automatic measurement of velocities in fish schools by means of method called optical flow, we review the effectiveness of the analysis based on rotation curve, namely the relation between rotation velocities of fishes and their distances from the center of the torus. Collective motion of fish changes non-stationarily and continuously within a times scale of several seconds. If we average the rotation curves by a dynamical time in torus, universal structure of rotation curve appears.

## 1 はじめに

近年、車や細菌など自らの駆動力で運動する物体いわゆる自己駆動粒子 (Self-Propelled Particle: SPP) の集団の研究が盛んに行われている [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、Bellerini たちはムクドリの群れの 3D 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]。また魚群においても、Golden Shinner とい

う淡水魚を浅い水槽に入れた実験で、群れの中の情報伝達において視覚が重要な役割を果たしていることが示されている [4]。

これらさまざまな群れが研究対象になっているが、本稿ではイワシの群れの集団運動の解析について報告する。図 1 は九十九島水族館において水槽底にカメラを設置して撮影した約 3000 匹のマイワシの群れの写真である。美しいトーラス形状をしている。群れの形状としてはこれ以外に、群れているが個々の魚は動いていないスウォーム形状、群れ全体が並

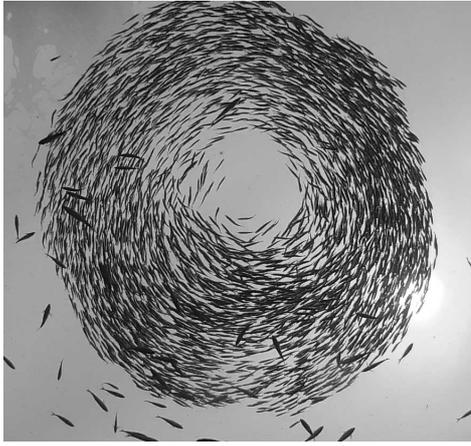


図1: 九十九島水族館において水槽底から撮影したマイワシの群れのトーラス形状: 2013年3月

進運動する平行形状などが知られている。本稿では、魚群のさまざまな形状の中でトーラス形状に焦点をあて、この形状がもつ速度構造とその進化について議論する。

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、 $1 \sim 2$  (BL/s) のオーダーである。次が疲労を招くが  $1 \sim 2$  時間程度まで持続可能な遊泳である。最後がただか  $10$  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。 $V_{burst} \approx 10$  (BL/s) である。

## 2 Optical flow によるイワシの群れの速度場の計測

### 2.1 Optical flow による速度場の計測

イワシの群れの速度分布やその変化を定量的に計測し、群れのダイナミクスを特徴づける物理量を明らかにすることで、魚群の信頼できるモデルを構築することができる。速度分布を得るためには、各個体を識別・追跡し位置データの変化から速度を計測するのが常套手段である。しかし図1のイワシの群れを見ると密度が高く各個体の重なりも多いので継続的に追跡するのは困難である。

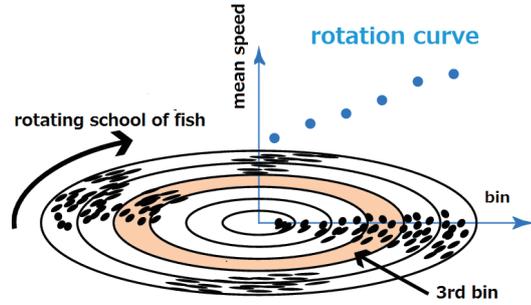


図2: 群れのトーラス形状の回転曲線の概念図

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, 7] 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。個体を識別し追跡することで速度を計測する手法はラグランジュ的手法とすることができる。これに対して Optical flow による手法は画像上の各点での移動量の推定であり、オイラー的な速度場の計測といえる。パターンがどこに移動したか推定するために目的に応じていくつかのアルゴリズムが開発されているが、ここでは Farneback 法 [8] を採用する。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が、得られた Optical flow に中で flow が回転方向である、大きさが適当な範囲である、などの条件を課すことで、イワシの群れの速度場の情報を抜き出している。

### 2.2 トーラス形状の回転曲線

さまざまなイワシの群れの形状の中で、本研究ではトーラス形状に注目する。水槽底から撮影したイワシの群れの動画の中で、トーラス形状を抜き出し Optical flow による速度場の計測を実施した。ここでは図2のような回転曲線を用いてトーラス形状の速度場を特徴付ける。回転曲線とは、中心からの距離  $r$  とそこでの速さ  $v(r)$  の関係である。そのためには、まずトーラス形状の中心を決めなければならない。トーラス形状の中のさまざまな位置  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots$  で Optical flow により速度場が得られている。これを規格化した各位置での flow の方向を  $(u_{xi}, u_{yi})$  とする。ここでトーラスの中心座標を  $(x, y)$  とすると、各 flow からの垂線と中心との距離は  $|u_{xi}(x - x_i) +$

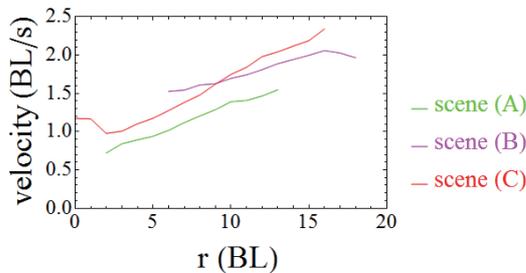


図 3: イワシの群れのトーラス形状の回転曲線

$u_{yi}(y - y_i)$  となる。この距離の 2 乗和

$$E = \sum_i (u_{xi}(x - x_i) + u_{yi}(y - y_i))^2 \quad (1)$$

を極小にするという条件でトーラスの中心座標を推定する [7].

このようにして決めたトーラスの中心のまわりに、図 2 のように半径  $r$  の bin を考え速度場の平均を計算する。図 3 がイワシの群れのトーラス形状の代表的な回転曲線である。ここで scene(A) が図 1 に対応するトーラス形状の回転曲線である。図 3 では、異なる 3 つの時期のトーラス形状についての回転曲線を図示している。傾きや半径などが異なるが、右上がりの直線という普遍的な構造を有している点が興味深い。このような回転曲線の形の起源については現在検討中である。

### 3 イワシの群れの速度構造

#### 3.1 トーラス形状の速度場の進化

これまでイワシの群れのトーラス形状に対する回転曲線の計測結果について述べてきた。図 3 で示唆されているように、右上がりの直線という普遍的な性質を持つ可能性がある。しかし、図 3 はイワシの群れが図 1 のような対称性の高いトーラス形状を示す数秒程度の短い期間に対して得られた結果であることに注意しなければならない。実際のイワシの群れでは、ときどき起こる捕食者の攻撃などで群れはその形を劇的に変化させる。また、そのような激しい変化がなくトーラス形状を保持している時間帯であっても、数秒程度の時間スケールで絶えずその形を変え、いわゆる“歪んだトーラス”になっていることが多い。このように形状や速度分布が非定常に変化するので、短い時間で描いた図 3 だけを見て、回転曲線の普遍的性質を議論することはできない。

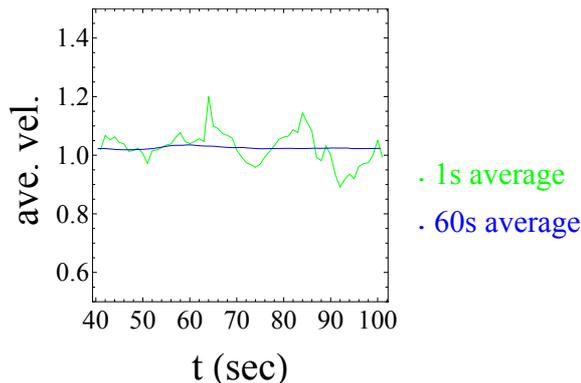


図 4:  $r = 9$  BL の平均速度の時間変化

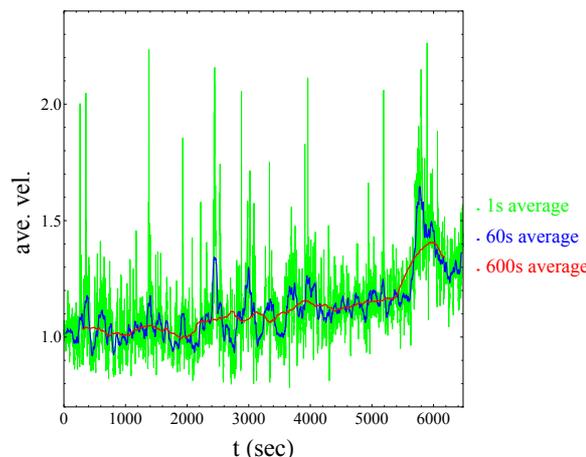


図 5:  $r = 9$  BL の平均速度の長時間変化

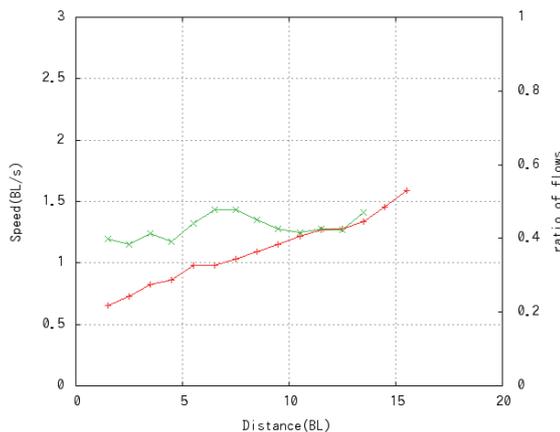


図 6: 平均トーラス:(緑) $t = 5322(\text{sec})$  での回転曲線 (1s 平均) , (赤) 同時刻での回転曲線の 60s 平均.

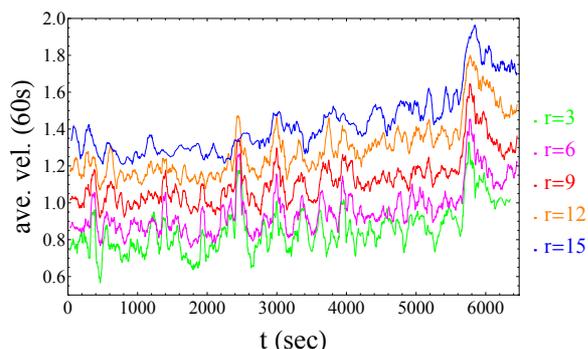


図7: さまざまな半径での60秒平均速度の長時間変化

図4はトーラスのほぼ中央部分に対応する半径  $r = 9$  BL 付近の平均速度 (1秒平均) の1分間の変化である。数秒から10秒程度の時間スケールで絶えず変化している。図5は同じ位置での長時間の平均速度の変化である。1秒平均のもつ大きなスパイクは捕食者の攻撃による群れの激しい変化に起因している。また60秒平均を見ても、平均速度がかなり大きく変化している。また非常に長い時間スケールで次第に速度が大きくなっていくいわゆるトレンドも存在している。

### 3.2 平均トーラスの存在

図4,5で示されているようにトーラスの速度場は数秒程度の短い時間スケールで絶えず変化している。そのゆらぎが回転曲線に与える影響を調べよう。図6の緑の実線が、ある時刻 ( $t = 5322$  sec) での回転曲線 (1秒平均) である。図3で示唆された“右上がりの直線”とは大きく異なっている。数秒スケールでのゆらぎのため期待されていた普遍性はもはや成り立たない。60秒平均を取るとこの早い変動は押さえられていることが図4,5などから示唆されるので、回転曲線についても  $t = 5322$  sec のまわりで60秒平均を取ったのが図6の赤線である。“右上がりの直線”という普遍的性質が見えている。時間平均をとることで図1のような対称性の高いトーラスと同じ速度構造が回復するのである。この60秒という時間が、各個体がトーラスを1周するいわゆる動的時間スケールに対応していることは興味深い。本稿では、動的時間スケールで時間平均したトーラスを“平均トーラス”とよぶことにする。

次の図7はトーラスの内側から外側までのさまざまな半径での60秒平均速度の進化である。最外側は

若干鈍感であるが全体が連動して変化 (振動) していることが判るだろう。捕食者の攻撃と思われる部分を除けば、ほぼ間隔を保って全体が変化している。これは全体の速度は変化するが、回転曲線の傾きは保たれていることを意味している。実際にさまざまな時刻で60秒平均した回転曲線を描くと図6の赤線のような“右上がりの直線”が得られる。

イワシの群れは、1秒から数秒の短い時間スケールでトーラスの形状を変化させ、その速度構造は非定常にゆらいでいるが、60秒程度の動的時間スケールで眺めると普遍的な“平均トーラス”という構造をもつ。さらにその平均トーラスが1時間あるいはそれより長い時間スケールでゆっくり進化している、というふうにイワシの群の進化を理解することができる。

### 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, R. Sumiya, and M. Sakagami, *IPJS SIG Technical Report*, 2014-CVIM-190, No. 17, (2014) pp. 1–8
- [7] K. Terayama, H. Hioki and M. Sakagami, to appear in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Multimedia (ISM 2014)*
- [8] G. Farnebäck, *Proceedings of the 13th Scandinavian Conference on Image Analysis*. Springer-Verlag, (2003) pp. 363–370