

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610114

研究課題名(和文)群れの科学を創る

研究課題名(英文)Foundation of Science of Animal groups

研究代表者

阪上 雅昭 (Sakagami, Masaaki)

京都大学・人間・環境学研究科(研究院)・教授

研究者番号：70202083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：群の科学の基礎として、水族館の底面から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注目する。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の存在を示された。

研究成果の概要(英文)：For the foundation of science of animal groups, 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.

研究分野：物理学, 群の科学

キーワード：群 動画解析 Optical flow agitation クラスタ形成

## 1. 研究開始当初の背景

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。それらの中で、交通流は最も成功した分野の一つである。ドライバーが前方の車だけを見て自分の速度を調節するという作用反作用の法則を破るモデルを提案し、自己駆動力によるエネルギー注入と散逸とのバランスで形成される散逸構造として交通渋滞を捉え渋滞の形成条件や伝搬を説明することに成功している。このように自己駆動粒子は、通常の物質的粒子と違い、外力ではなく燃料などで自ら運動し、他者との関係で自ら運動を制御する。エネルギー・運動量は保存せず、作用反作用の法則をみたまないため、その集団はある種の非平衡散逸系を形成することが知られていた。

本研究では、自己駆動粒子系の中で特にマクロな生物集団に注目した。この分野でも既にさまざまな研究が成果を上げている。鳥の群については、ステレオ動画撮影により各個体の位置の計測が可能になっている。ムクドリ等の群れは、群れのサイズに比例する相関長をもつ、すなわちスケールフリー性を示すことが分かってきた。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。このようにマクロな生物集団についてもさまざまな研究が進んでいる中で、本研究では九十九島水族館のマイワシ群れを対象にし、速度場の計測やゆらぎの観測など群れ科学の基礎付けとなる研究を行った。

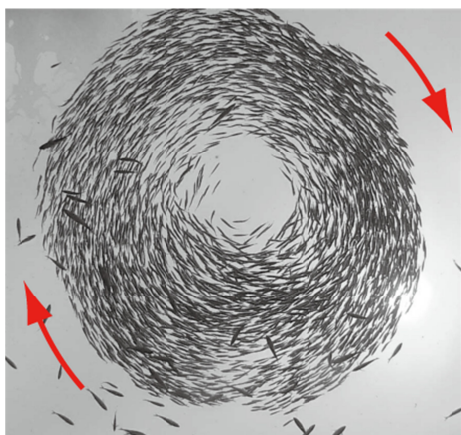


図 1 九十九島水族館の水槽底から撮影したマイワシ群れのトーラス形状。赤い矢印が回転方向

## 2. 研究の目的

魚群の魅力は、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、群れているが個々の魚は動いていないスウォーム形状、群れ全体が並進運動するパラレル形状などが知られているが、本研究が対象とした九十九島水族館のマイワシ群れはトーラス形状をすることが多い。

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。魚の遊泳には 3 つのレベルがあると考えられている。最初は長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)と遊泳速度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 ~ 2 BL/s のオーダーである。次がたかだか 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。 $V_{burst} \approx 10BL/s$  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。

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 100BL/s のオーダーで伝搬することが、Radakov により報告されておりこれを agitation とよぶ。

本研究では、魚群のもつさまざまな速度を計測する手法を開発し、長時間にわたる魚群の速度構造を計測し、ゆらぎの性質などを非平衡散逸系の特徴を調べることを目的とした。

## 3. 研究の方法

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。詳細は論文[1]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．

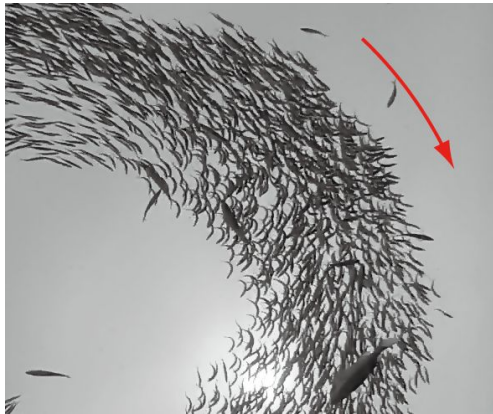


図 2 マイワシ群の agitation. 赤い矢印がトラスの回転方向

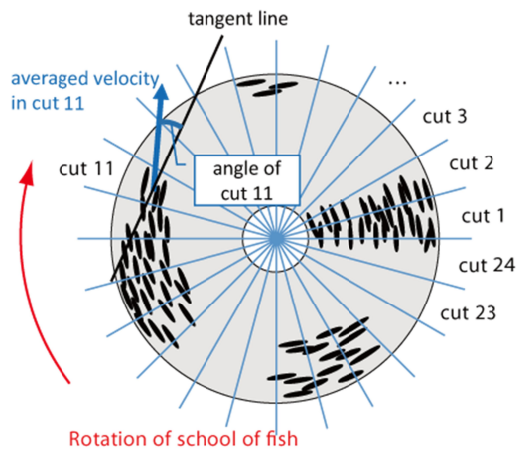


図 3 トラスの 24 個の cakecut 領域への分割

#### 4. 研究成果

##### (1) 群れの速い反応: agitation

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 100BL/s のオーダーで伝搬することが，Radakov 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)の中の  $t = 1248.43 \text{ s}$  (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 のようにトラスを中心回りで 24 の領域に分割する．

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

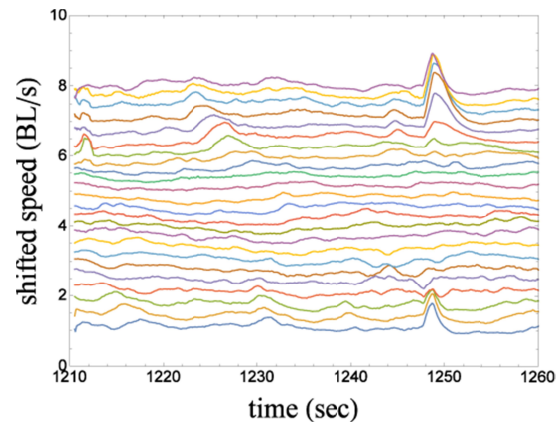


図 4  $t = 1284 \text{ s}$  付近での agitation の伝搬

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  $t = 1248 \text{ s}$  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  $t = 1248 \text{ s}$  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 によれば 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．本研究では 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 10BL/s 付近で波の伝搬が生じ

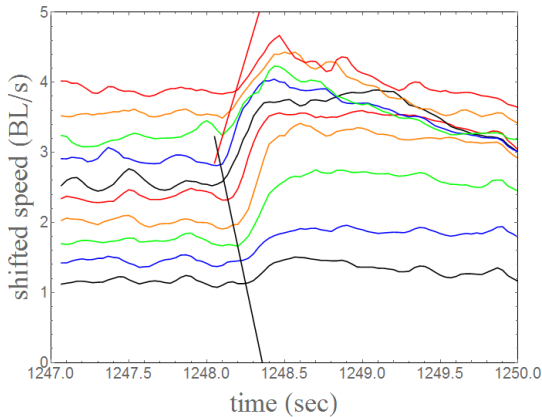


図 5 t = 1248s 付近での短い時間での agitation の伝搬

たとすると伝搬速度はおおよそ 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およそ 65 BL/s であった。この研究により、agitation という魚群で最も速い速度の計測手法が確立された。

(2) 遷在する 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

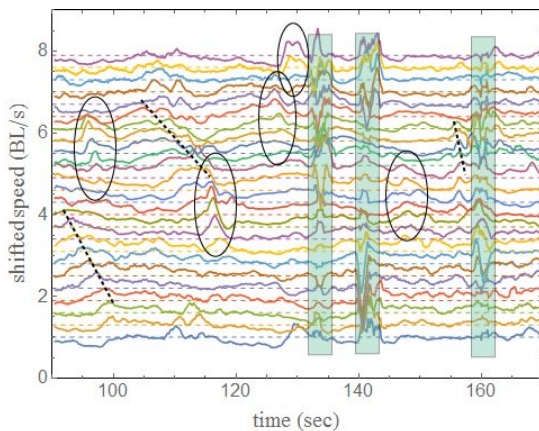


図 6 t = 90s から 170s での shifted speed の時間発展

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 13BL/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 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思われる。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 x 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ていると考えている。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ー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。

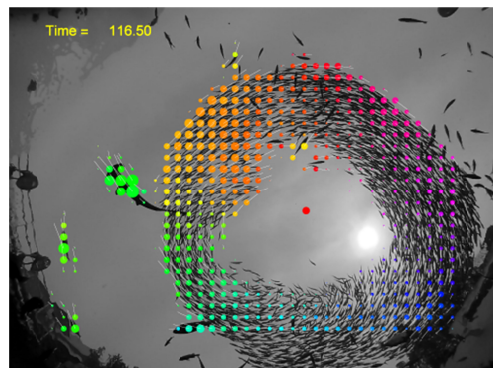


図 7 t = 116s 付近の snapshot

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。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

K. Terayama, H. Hioki, M. Sakagami, A measurement method for speed distribution of collective motion with optical flow and its applications to school of fish, International Journal of Semantic Computing, 査読有, Vol.9, 2015, 143-168

E. Konishi, M. Sakagami, Double Lynden-Bell Structure of Low energy Quasistationary Distributions in the Hamiltonian Meanfield Model, Physica Review E, 査読有, Vol.91, 2015, 32144

寺山慧, 阪上雅昭, 回転運動するマイワシの群れに対する回転曲線の計測と解析, 京都大学数理解析研究所講究録, 査読無, Vol.1940, 2015,16-23

寺山慧, 阪上雅昭, 魚群の素早い反応の観測とゆらぎ, 第 21 回交通流シンポジウム論文集, 査読有, Vol.21, 2015, 91-94

K. Terayama, H. Hioki, K. Shimatani, M. Sakagami, A Measurement Method for Speed Distribution of Collective Motion with Optical Flow and its Application to Estimation of Rotation Curve, Proceedings of the IEEE 16th International Symposium on Multimedia, 査読有, 2014, 32-39

K. Terayama, D. Tadokoro, K. Shimatani, M. Sakagami, Estimation of Rotation Curves for Schools of fish with Optical Flow, IPSJ SIG Technical Report, 査読有, 2014-CVIM-190, 2014, 1-8

M. Sakagami and K. Terayama, Velocity Structure of Fish Schools and Existence of Averaged Tori, 第 20 回交通流シンポジウム論文集, 査読有, Vol.20, 2014, 27-30

[学会発表](計 5 件)

M. Sakagami, Dynamics of fish schools: rapid and slow time scales,

明治大学先端数理科学インスティテュート研究集会”生物の動的集団の形成と制御”(招待講演)(国際学会)2015年10月14日~10月16日, 明治大学

M. Sakagami, Information transfer in fish schools, 数理生物学会(日中韓合同大会)(招待講演)(国際学会), 2015年08月26日  
同志社大学

M. Sakagami, Kinetic properties and information transfer of fish schools, 数理生物学会(日米合同大会)(招待講演)2014年07月28日~08月01日  
大阪国際会議場

阪上雅昭, "魚群のダイナミクスと情報伝達, 国際高等研プロジェクト「総合コミュニケーション学」第1回研究会(招待講演), 2014年06月07日~06月08日

阪上雅昭, 魚群の速度構造と平均トーラスの存在, 第20回交通流のシミュレーションシンポジウム, 2014年12月04日~12月05日, 名古屋大学

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阪上 雅昭(SAKAGAMI, Masaaki)  
京都大学・大学院人間・環境学研究所・教授  
研究者番号 70202083

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者