

科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年5月28日現在

機関番号：14301
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2010～2011
課題番号：22654045
研究課題名（和文） 群れの科学の創造する

研究課題名（英文） Creation of Science of Fish School

研究代表者

阪上 雅昭 (SAKAGAMI MASAOKI)
京都大学・大学院・人間・環境学研究科・教授
研究者番号：70202083

研究成果の概要（和文）：

魚群の示す俊敏な反応性を明らかにするため、身体の屈曲が通常の遊泳速度の100倍で伝搬する agitation mode という最も速い情報伝達機構について研究した。魚群のハイスピード動画を撮影するとともに、個体識別をせずに、身体の屈曲の伝搬速度を計測する手法を発見した。また、数値シミュレーションにより群れの合体成長と形状の進化を調べ、群れのサイズ分布、出現頻度についての統計的性質を調べた。

研究成果の概要（英文）：

In order to clarify an origin of quick response of fish schools, we investigated most rapid information transfer mechanism, which is realized by propagation of bending of fish bodies. And we performed numerical simulations to investigate several statistical properties of fish schools.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	0	2,300,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	150,000	2,950,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数理物理・物性基礎

キーワード：生物集団、画像解析、情報伝達、数値シミュレーション、power spectrum、自己推進粒子、合体成長方程式、ハイスピード撮影、水中カメラ、回転曲線

1. 研究開始当初の背景

生物集団の研究は、これまで主に生物学、農学の分野で行われてきた。例えば、魚群については1970年代から80年代にモデル方程式の提案や水槽での観察実験などいくつかの先駆的な研究が行われている。かなり大がかりな観察実験も行われているが、残念ながら観察結果をモデルと定量的に比較し、群れの

のダイナミクスを詳細に議論したものではなかった。

その後、物理（生物物理）においても生物集団の研究が進められ Tu-Toner model や Boid のように、生物を自己推進力を有する粒子（SPP）と捉えたモデルが提案された。このモデルでは各個体の速度、特に運動の向きの自由度をスピンと見なしている。このス

ピンが近傍の個体との強磁性的相互作用で向きをそろえることで群れを形成する。つまり生物集団を移動し構造をつくるスピン系としてモデル化している。このモデルで適当なパラメタを選択すれば群れが形成されることは数値シミュレーションにより示されている。しかし、群れの俊敏な反応性・運動性を説明することには成功していない。

2. 研究の目的

生物を SPP と見なすモデル化は群れの形成を定性的に説明することには成功している。ところで図 1, 図 2 は外敵に襲われたときの魚群の反応である。このとき魚は短時間であるが通常の遊泳速度の約 10 倍の速度で泳いでいる (burst mode)。また、各個体の身体が高速で伝搬し群れ全体が敏速に方向転換する機構 (agitation mode: 図 3) の存在も示唆されている。本申請では、魚群を主な対象とし、これらの速い情報伝達を考慮して、現実的な群れの物理モデルの構築を行う。詳しくは研究計画で説明するが、次の 2 つを研究目的とする。



図 1



図 2

(1) ハイスピード動画の解析による魚群の情報伝達機構の定量的研究

水族館の魚群のハイスピード動画を撮影し、power spectrum 等の画像解析を行い、burst mode, agitation mode という速い情報伝達機構の存在を示す。従来から知られていた、音波 mode も含め魚群に存在する 3 つの波動の性質を定量的に研究する。さらに魚群の多様な状態と 3 つの modes の分布・統計的性質の関連を明らかにする。

(2) 現実的なモデルの構築と準定常状態の分類

速い情報伝達機構を含むように Tu-Toner model を拡張し、研究 1 での画像解析の結果から model の妥当性を検証する。さらに、魚群の連続体 model を構築する。2 つのモデルに存在する準定常状態を系統的に調べ、群れの多様な形態との関連を研究する。

3. 研究の方法

水族館で魚群のハイスピード動画を撮影し、power spectrum などの方法で画像解析を行い、burst mode, agitation mode という速い情報伝達機構の存在とその性質を定

量的に研究する。さらに従来の魚群のモデルを、これらの modes を含むように拡張する。これらのモデルの準定常状態を系統的に分類し、魚群の多様な形態を説明することを試みる。

[研究 1] ハイスピード動画の解析による魚群の情報伝達機構の定量的研究

Tu-Toner model などにより魚群の定性的なモデル化には成功している。例えば、空間 2 次元の一樣な群れの状態では、そのゆらぎの power spectrum により解析から、魚群の中を速さが魚の遊泳速度 (1BL/s) 程度で伝わる音波の存在が示されている

では、この音波 mode を用いて魚は情報伝達を行い、群れの俊敏な反応性を実現しているのだろうか。結論から言えば、音速は速くないので、この目的には適していない。研究目的の図 2 に示されているように、外敵に襲われたとき短時間であるが、通常の遊泳速度よりも速い速度で泳いで敵を攻撃を回避する。本研究では、これを burst mode と呼ぶ。この mode の速度は 10 BL/s 程度と言われている。

次に、図 3 は申請者が名古屋港水族館のイワシの群れを撮影したものである。このとき群れは、下方にほぼ 90 度の急激な方向転換を行っている。個々のイワシが大きくその身体を曲げ



図 1

ていることが判る。実は、このような変形による方向転換が魚群のなかでオーダー 100 BL/s と非常に高速で伝搬する agitation mode が存在するという説もある。申請者の知る限り、この mode の測定は過去に 1 例あるだけである。

図 2 と図 3 は、いずれも通常の 30 fps (frame/s) での動画の snapshot である。この frame 数では伝搬速度の速い burst mode, agitation mode を定量的に計測することは難しい。そこで、本研究では、魚群のハイスピード撮影を実施し、その画像解析から、この 2 つの速い mode を定量的に観測することを計画している。

画像解析で個々の魚を個体識別しその軌道を追跡することは非常に難しいので画像の各ピクセルの輝度をそのまま表面密度をみなして表面密度分布を求め power spectrum を計算する。本研究では研究費の大部分を費やして水族館の魚群のハイスピード動画をできるだけ多く撮影し、魚群の音波 mode と burst mode, agitation mode の性質を定量的に調べる。

[研究2] 現実的なモデルの構築と準定常状態の分類

まず, Tu-Toner model を agitation mode, burst mode を含む, より現実的な魚群のモデルに拡張する(拡張された Tu-Toner model). 例えば burst mode については, 魚の遊泳速度は一定ではなく, 2つの状態(normal, burst)が存在すると考える. そして捕食者または burst mode にいる仲間(魚)が反発領域に侵入してくることで一定時間 burst mode に叩き上げられる, というモデルを検討している. このようなモデルの妥当性は研究1で得た定量的な知見から検証できると考えている.

また, 海洋での漁業で捕獲された魚群について, その個体数 N と群れのサイズ R の間に $R \propto N^\alpha$, $\alpha \approx 0.5$ という関係が成り立つことが知られている. 指数 $\alpha = 1/3$ のときが数密度一定であるから, この事実は魚群がフラクタル的であることを示唆している. 本研究では, 拡張された Tu-Toner model の数値シミュレーションを系統的に行い, この魚群のフラクタル性がどのような場合に現れるか研究する. 特に, 近傍スケール R や魚の相互作用のパラメタと群れのフラクタル性の関連に注目したい.

ところで, Tu-Toner model に対しては連続体(流体) model も議論されている. 詳細は省略するが, 簡単に言えば, 魚群の速度場に対する移流拡散方程式に自己推進力と水の抵抗を加えたものである. 自己推進力と抵抗のバランスで遊泳速度が決まるようになっている. 彼らは, 一様密度, 速度一定で流れている背景場に対する摂動を調べ, 密度の相関関数や音波の分散関係を得ている. さらに, これと離散的な Tu-Toner model の数値シミュレーションの結果を比較し, 連続体 model のパラメタを決定している.

本研究では同様の比較を拡張された Tu-Toner model で行い, 速い情報伝達モードを含む拡張された連続体 model の構築を試みる. このモデルを数値的あるいは可能であれば解析的に調べ, 群れのさまざまな準定常状態を求めることで, 群れの多様な形態を説明することを計画している. さらに, 準安定状態の摂動, 特に捕食者による擾乱を系統的に研究する. これにより水族館で観測される群れのさまざまな反応から群れの状態を推測できるようになると期待している.

4. 研究成果

上で述べた研究1, 2に対して以下のような研究成果を得ることができた.

[研究1] ハイスピード動画の解析による魚群の情報伝達機構の定量的研究

Tu-Toner model の数値シミュレーションの結果に対して power spectrum を用いた解析で波の伝搬を捉えることができています. 本研究では, この手法を昨年度水族館で撮影したハイビジョン・ハイスピード動画に適用し, burst mode という速い情報伝達機構の性質を定量的に研究した. 一方, agitation mode は魚の曲がりの情報が必要なので, 個体識別



図 2

しなければならぬと考えていた. さて図4は, 佐世保の九十九島水族館で撮影したイワシ群れのハイスピード動画のスナップショットである. 外敵(サメ)に驚いた群れが爆発するように激しく反応し大きく形を変えようとしている. 群れの中央上部あたりのイワシが屈曲しているのがよくわかる. 同時に, 屈曲したイワシが上からの外光を反射し光っていることに気づくだろう. このように外光の条件の良いときには, agitation mode の伝搬が反射光の伝搬として捉えられることを発見した. そのため, クローズアップ画像での画像解析による各個体の屈曲の定量化をしなくても, agitation mode の伝達速度の計測が可能であることを示した. 現在, 撮影した数多くのショットの中から agitation mode の解析に適した動画を選び出す作業を行っています. また, 系統的で効率的な画像処理, power spectrum や分散関係の計算のための解析システムを作成中である

[研究2] 現実的なモデルの構築と準定常状態の分類

魚群の準定常状態の形状とその進化を理解するため, 代表的な形状であるトーラスに注目し動画撮影を行った(2-1). また, 群れの形状やサイズ分布の進化を調べるため, 数値シミュレーションと合体成長方程式による解析を行った(2-2).

(2-1) 水中カメラ動画による群れの回転曲線と形状の変化の研究

魚群は多様な形状を示すが, その中でもトーラスは代表的な形状である. トーラス中の

各個体の速度分布や密度分布は、群れのモデ



図 3

ルを構築する上で重要な情報を与えてくれる。そこで研究1のハイスピード動画撮影と平行して、水中カメラを水族館の底に設置し、真下からのトーラス状のイワシ群れの撮影を行った(図5)。画角が十分に広くなかったので、残念ながら群れ(トーラス)全体を撮影できていない。しかし、トーラスの中心はきれいに撮影できている。このデータから、各個体の群れの中心に対する回転速度を中心からの距離の関数(回転曲線)として求めることを試みている。回転速度のプロフィールという群れの定量的な観測事実を用いて現実的な群れのモデルの構築ができると期待している。

(2-2) 群れのサイズ分布の統計的性質

捕獲された魚群について知られている、個体数 N と群れのサイズ R の間の関係 $R \propto N^\alpha$, $\alpha \approx 0.5$ について Tu-Toner model

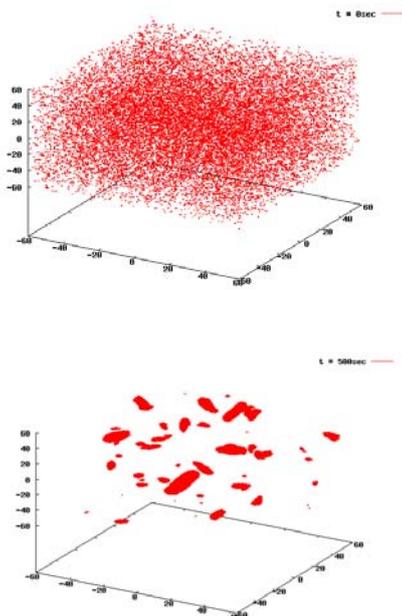


図 4

の数値シミュレーションにより研究した。図6のように一様で群れでない状態から出発すると小さい群れが発生し、それらが合体して成長していく。群れの個体数が 1000 を

超えたあたりで群れが細長くなり、球対称性を仮定して定義した N と R の関係 $R \propto N^\alpha$, $\alpha \approx 0.5$ が実現されることがわかった。

外洋ではさまざまな大きさの魚群が存在する。例えば、熱帯マグロについては群れのサイズ分布が観測により調べられている。群れのサイズを個体数 N で表したとき、そのような群れが捕獲される頻度が N の $-3/2$ 乗であることが知られている。本研究では、この魚群の統計的性質について Toner-Tu モデルという魚群のモデルによる数値シミュレーション、および合体成長方程式を用いた解析を行った。

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2件)

(1) S. Okuzumi, H. Tanaka, H. Takeuchi, and M. Sakagami, Electrostatic Barrier Againstst Dust Growth in Protoplanetary Disks. I. 査読有, *Astrophysical Journal*, 731 (2011) 95 (20pp)

(2) S. Okuzumi, H. Tanaka, H. Takeuchi, and M. Sakagami, Electrostatic Barrier Againstst Dust Growth in Protoplanetary Disks. II. 査読有, *Astrophysical Journal*, 731 (2011) 96 (20pp)

〔学会発表〕(計3件)

(1) 阪上雅昭, 魚群の統計的性質, 日本物理学会第66回年次大会, 2011.3.26, 新潟大学

(2) 阪上雅昭, Description of non-equilibrium evolution of long-range interacting systems based on generalized entropy, International workshop on Anomalous Statistics, Generalized Entropies, and Information Geometry (招待講演), 2012.3.6, 奈良女子大学

(3) 金山太一, 阪上雅昭, ポリトロープ状態による1次元HMFモデルの非平衡進化の解析, 日本物理学会第67回年次大会, 2012.3.27, 関西学院大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阪上 雅昭 (SAKAGAMI MASAOKI)

京都大学・大学院人間・環境学研究科・

教授

研究者番号：70202083