

## 特集 数理情報

## 原著論文

# カオス・フラクタル解析による 光刺激に対する魚群行動の定量化への試み

伊丹 伸\*・福田 耕治\*・杉野 隆三郎\*・三宅 修平\*\*

生物の複雑な行動を定量化する手法の確立は、数理情報学の産業応用上重要な課題である。本研究では、カオス・フラクタル解析を用いて、光刺激に対する魚群の遊泳行動の定量化を試みる。試験魚は水産学上有益性の高いマアジとし、LEDによる光刺激は赤色・緑色・青色・白色と4種類の波長を与え、異なる光刺激に対する魚群行動パターンの相異をみるために実験を行った。水槽実験から取得した動画データより、個々のマアジの遊泳軌跡を抽出して時系列データに変換、その群行動パターンの特徴量として最大リアプノフ指数とHiguchi法によるフラクタル次元を算出した。その結果、魚群行動の定量化に成功し、特に赤色時の遊泳行動にカオス・フラクタルによる特徴量の大きさの違いが確認できたことを報告する。

キーワード：カオス，フラクタル，リアプノフ指数，フラクタル次元，魚類の遊泳行動

## Approach for Quantification of Fish Schooling Behavior under Light Stimulation using Chaos and Fractal Analysis

Shin ITAMI\*, Koji FUKUDA\*, Ryuzaburo SUGINO\* and Shuhei MIYAKE\*\*

Establishment of the technique to quantify the complicated behaviors of creatures is an important subject for industrial applications of the mathematics and information science. In this study, we tried to quantify of fish schooling behavior under light stimulation using chaos and fractal analysis. The experimental fish was the Japanese Jack Mackerel that has the high benefit in fishery science, and the light stimulation by LED was experimented giving light source such as red, green, blue and white one. We extracted a swimming trajectory from motion image data and calculated the maximum Lyapunov exponent and the fractal dimension by the Higuchi method. We used these chaos and fractal exponents as amount of characteristics to make a decision of the fish schooling behavior patterns. In our obtained results, we can show the effectiveness of chaos and fractal analysis for the quantification of fish schooling in which we can recognize the big amount of difference of red lighting among the other light source regarding the complicated swimming behavior in a water tank.

Keywords: Chaos, Fractal, Lyapunov exponent, Fractal dimension, Fish swimming behavior

\*阿南工業高等専門学校 創造技術工学科

Department of Creative Technology Engineering, National Institute of Technology, Anan College

\*\*東京情報大学 総合情報学部

Faculty of Informatics, Tokyo University of Information Sciences

2017年5月15日受付

2017年8月21日受理

## 1. はじめに

魚類の正の走光性（光に集まる習性）を利用した集魚灯による漁業は古くから行われてきた（井上 1972；有元 1988；有元 1988）[1]～[3]。近年，全国各地でLED集魚灯を用いた試験操業や実操業が行われるようになってきている。しかし，その着目点は重油燃料の削減や漁獲量の増加を主としており，集魚灯に対する魚群の遊泳行動のメカニズムまでを解明し，選択的漁法や漁業の効率化を目指している実証実験や研究は非常に少ない（稲田ら 2006；後藤 2010；稲田ら 2010）[4]～[6]。また，水産現場の漁業者はどのような条件下でLEDをどのように使用するのが効果的なのか等を経験に頼っているのが実情である。

魚類に対して点滅光や点滅周期が魚類の行動に影響を与えることは既に研究されている（Haddingh 1982；Patrick et al. 1982；Koike & Matsuike 1987；安永・有元 1994；松本ら 2005）[7]～[11]。また，魚類が色覚をもっていることも知られている（川村 2010）[12]。ところがこれらの研究は光に対する魚類の行動についての定量的な解析やメカニズムの解明が十分にはなされているとは言い難い。

我々研究グループでは，これまでに魚類行動に潜んでいるメカニズムや行動ルールについて着目し，魚類の複雑な適応行動ルールの抽出手法とその利用技術についてシステム工学の立場で研究してきた（杉野 2006；井出ら 2007；杉野・田中 2009；伊丹ら 2013；Morimoto et al. 2013；杉野ら 2014；伊丹ら 2015；伊丹ら 2016）[13]～[20]。特に魚類のエッジ領域，漁網の網目の大きさ，LED光刺激に対する遊泳行動についてカメラの動画像からキングヨ（和金）やマアジの遊泳軌跡の時系列データを抽出する技術を開発（杉野 2006；井出ら 2007；杉野・田中 2009；伊丹ら 2013；Morimoto et al. 2013；杉野ら 2014）[13]～[18]するとともに，様々な環境における魚類の行動パターンをカオス・フラクタル理論で解析するアルゴリズムを開発し，徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課美波庁舎および鳴門庁舎において水槽実験により検証した。以上により，①暗所状態で魚類の遊泳行動を撮像できる魚類遊泳行動撮像システムを構築，②行動パターンの違い（各個体遊泳速度ベクトルの動的パター

ン）が，カオス・フラクタル指数の差となって表れること，などの研究成果を得た（杉野ら 2014；伊丹ら 2015；伊丹ら 2016）[18]～[20]。

マアジを用いたこれまでの研究では，円形水槽の中心位置にLED発光部をセットし，実験を行ってきた。その結果，LED発光部を中心に水槽壁面に沿ってマアジが周回遊泳するパターンが多くみられた。この遊泳行動が水槽の形状や大きさ，LED発光波長あるいはマアジの習性に起因するものかを判別することが困難であった。

そこで本研究では，LED発光部を円形水槽中心部から25cm偏心させて設置し，実験を行った。そして，これまでの研究と同様にLED光刺激に対するマアジの群れの遊泳行動について，カオス・フラクタル解析を用いて特徴量を抽出し，その遊泳行動の数値化および定量化を試みた。その結果，LED発光色による遊泳行動の違いが確認できた。しかしながら，現段階では実験回数が不足しており，LED発光部を偏心させたことによる影響を含めた解析など，さらなる実験・解析が必要である。

## 2. 魚類行動観察用実験システム

我々研究グループが構築した魚類遊泳行動撮像装置の特徴は，暗所状態で水深30cmまでの魚を撮像できることにある。このような装置の報告例はほとんどなく，本装置は暗所状態で魚影を撮像できる世界的にも希少な水槽実験装置である。この魚類遊泳行動撮像装置の機器構成および外観写真を図1に示す。実験供試魚としてマアジ（尾叉長約12～18cm）を使用した。マアジの魚群構成尾数は，黒ポリエチレン製の実験用円形水槽（上部外径約148cm，高さ約80cm）の大きさとマアジの大きさなどを考慮した結果，5尾とした。図1に示されているように，装置全体は自作の組立式暗室（アルミフレームと完全遮光シートで構成）で覆われているため，実験用水槽をほぼ完全な暗所状態下にすることが可能となっている。マアジの群れの遊泳行動は，水槽底部より約270cmの高さに設置されたカラー CCD カメラ（The IMAGING SOURCE 社製；DFK23G445, 1/3" Sony CCD）で撮像した。このCCDカメラのセンサ部は赤外線分光感度特性を有している。撮像用照明として超広角近赤外線LED投光器（ワイケー無線社製YIR-CS88；ピーク発光波長 $\lambda_p$ =850nm,

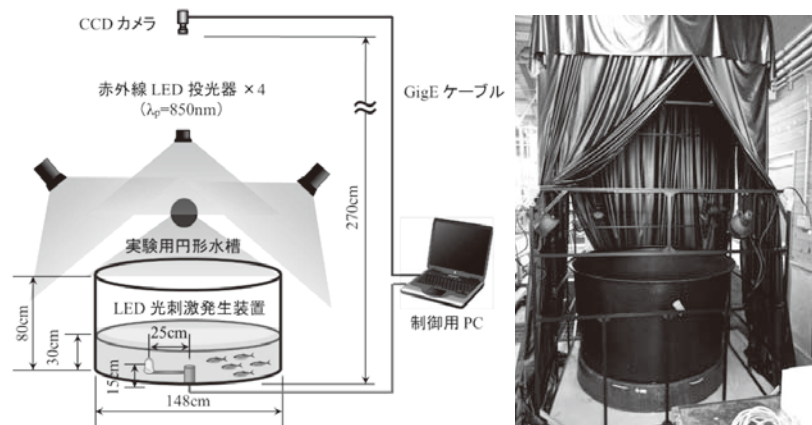


図1 魚類遊泳行動撮像装置の機器構成および外観写真

照射角度 $120^\circ$ )を4器配置し、水面への照射ムラや陰影ができないように方向および取り付け位置の微調整をした後、海水面に向けて照射した。照明用赤外光の波長850nmは、マアジの比視感度(鹿児島大学の水田氏の報告によると、マアジは波長約620nm以上は認識できない)、赤外光の海水に対する透過率およびCCDカメラの感度を考慮して決定した。水深は、あらかじめ魚影撮像予備実験を実施し、画像処理において魚影として識別可能な限界水深が約30cmであったこと、水深方向へのマアジの遊泳制限などを考慮した結果、30cmにセットすることにした。

フルカラーLED光刺激発生装置の発光部は、『はじめに』でも触れているように、マアジが水槽壁面に沿って遊泳するという習性の影響をなくすために、水槽の中心部から半径方向に25cm偏心させたところに設置した。水深方向の高さは水槽底部より15cmとした。なお、LEDは砲弾型であるが、光拡散キャップを装着させることで刺激光ができるだけ四方に散乱するようにしている。

魚類遊泳行動実験の手順としては、まず飼育用水槽からマアジの状態をよく観察しながらランダムに5尾を選び、実験用水槽に移す。暗所状態下にして30分間静置し、暗順応および馴致させる。直後から撮像を開始し、2分後に光刺激を与え、その後10分間のマアジの群れの遊泳行動を撮像する。これを実験1試行(12分間)とすると、同じマアジの群れで4～5試行の実験を行う。続けて実験を行う場合は、水槽内の海水とマアジの個体を入れ換えて行った。なお、光刺激は赤色(波長635nm)・緑色(波長525nm)・青色(波長470nm)・白色(三色混合)の4条件を与えたが、同じ光刺激の条件で実験を続

けて実施しないようにした。これはマアジの光刺激に対する慣れによる遊泳行動への影響をなくするためである。実験は4条件で各3回ずつ実施した。

マアジの遊泳行動は、周りの環境変化に影響を受けやすい。特に海水温には敏感である。マアジの好む海水温が $23.1 \pm 3.7^\circ\text{C}$ (長谷川 2014)[21]であるため、実験時の海水温がこの範囲に入っていた平成27年10月中旬～11月中旬に、徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課鳴門庁舎生物飼育棟でこれらの実験を行った。なお、本実験のすべてにおいて、実験後1時間以内に死亡した個体(実験供試魚)は確認されなかった。

### 3. LED灯下における魚群行動パターン

マアジの群れの遊泳軌跡の抽出は、CCDカメラで撮像された12分間の動画ファイルを0.1s間隔で、およそ7,200枚の静止画像に変換した後、LED光刺激を与えて3分経過後から5分間分(静止画像3,000枚分)を手作業により各マアジの座標をピックアップし、2次元遊泳軌跡を求めた。図2に静止画像の一例(緑点灯時)を示す。水中に白く浮かんで見えているのがマアジの魚影である。図3に得られた遊泳軌跡を示す。図3より遊泳軌跡2と3は水槽壁面に沿って周回遊泳している。特に赤色点灯時ではその行動顕著である。この理由はマアジが赤色を視覚で認識できないため、側線感覚による遊泳をしているからだと考えられる。青・緑・白色点灯時は水槽内を満遍なく遊泳している。この理由は、マアジが実験水槽内において視覚を主として遊泳しているためであると考えられる。一方、遊泳軌跡1は他の二つの遊泳軌跡とは異なる遊泳(水槽内全体を遊泳す



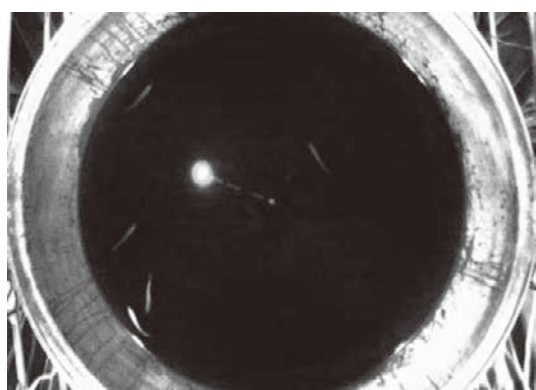


図2 静止画像例（緑点灯時）

る）をしている．このように同じ光刺激を与えても実験日より遊泳軌跡にバラツキがあることが分かった．マアジの個体差による影響のためであると考えられる．

#### 4. 魚群行動のカオス・フラクタル解析手法

一般に魚類の遊泳行動は非常に複雑で不規則であり，目視や一般的な統計処理では行動特性の定量化が困難である．そこで，本研究では複雑な生物の行動特性を集約・統合して定量化させるときに有効な手法であるカオス・フラクタル解析に注目した．もし，魚類の遊泳行動にカオス的要素が含まれているならば簡単な数式で複雑な遊泳行動を表せる可能性がある．

カオス・フラクタル解析を行うためにはアトラクタと見なせるカオス時系列データが必要である．本研究では，遊泳軌跡より得られた遊泳速度の速度ノルム，速度ベクトルの時間的変化角，対LED－各個体間距離，対LED－各個体角度の4つの時系列データをカオス時系列データと見なし使用した．ここで，速度ノルムとは0.1sごとのマアジの遊泳速度の変化を求めたもので，遊泳速度の動的変動のゆらぎがターケンス挙動（埋め込み定理を用いて $n$ 次元空間に埋め込まれた時系列データが，アトラクタ形状を持っている場合）を持てばカオス性が強く，相似性を持ったパターンがあればフラクタル性があると判断できる．速度ベクトルの時間的変化角とは図4 (a)にあるように，マアジの速度ベクトルの大きさを0.1sごとに求め，時間的に隣接する速度ベクトル間のなす角を求めることで，マアジがどのタイミングでどのように方向転換をしているかを判断できると考えた．角度の正負は右回りのときを正，左回

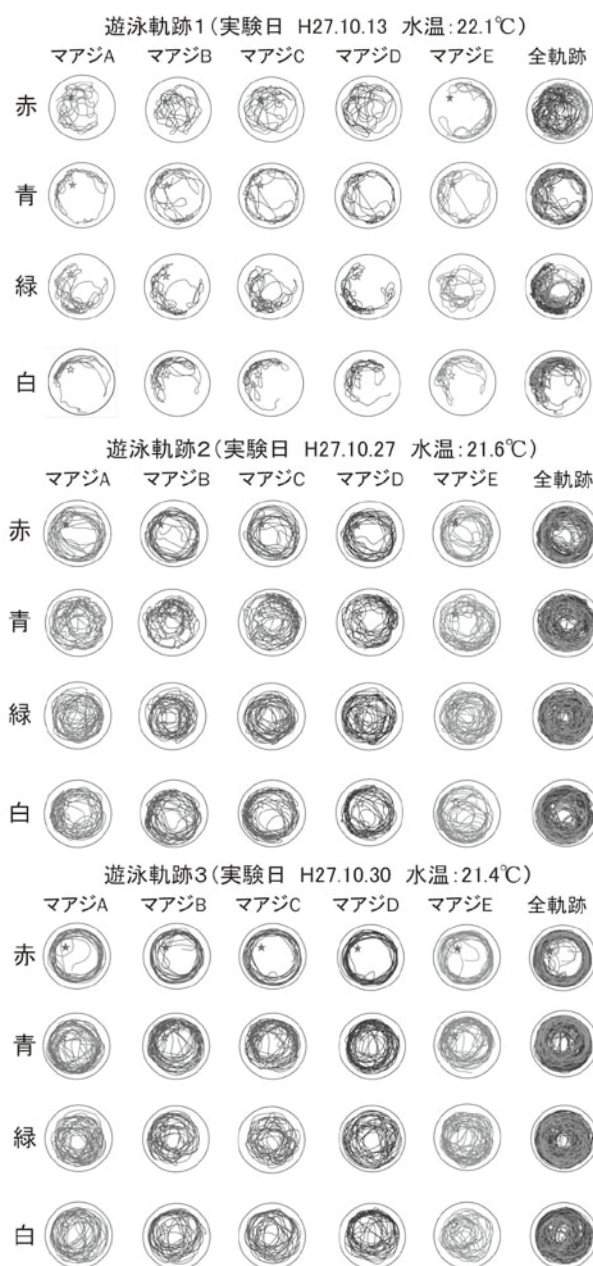


図3 マアジの群れの遊泳軌跡

りのときを負とした．対LED－各個体間距離とは図4 (b)にあるように0.1sごとのLEDとマアジとの距離を求め，マアジがLEDの近くを遊泳していれば誘引，離れていれば忌避していると判断することができる．対LED－各個体角度とは図4 (c)にあるようにLEDを原点としたときのマアジの角度を求め，マアジがLEDからみてどの位置を泳いでいるのかを見ることができる．角度の正負は，マアジの位置座標をみたとき $y$ 座標の値が0より大きければ正とし， $y$ 座標の値が0より小さければ負とした．図4にそれぞれの時系列データの意味を図に示す．

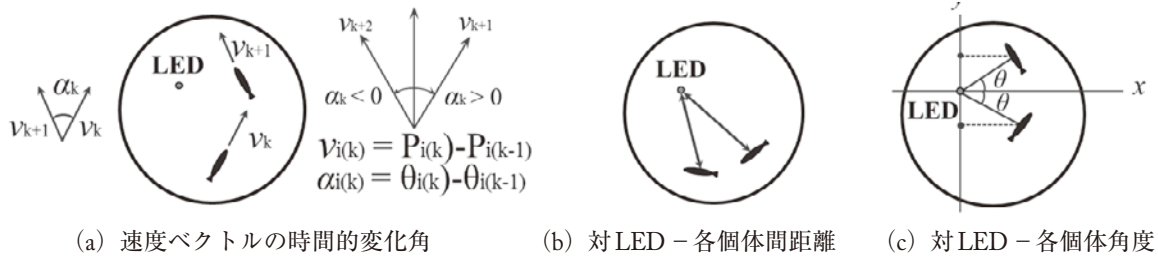


図4 解析に用いた時系列データ

本研究では遊泳軌跡より抽出した4種類の時系列データ（速度ノルム、速度ベクトルの時間的変化角、対LED - 各個体間距離、対LED - 各個体角度）を用いて、その時刻歴、最大リアプノフ指数、およびフラクタル次元を求めた。各評価項目の詳細および算出方法について以下に示す。なお、解析に使用した総離散点数 $N$ は、3,000点であった。

リアプノフ指数は、初期値が変化したときにその後の挙動がいかに変化するかを示す指標で、カオスであるかどうかを判断するための一つの指標として使われる（高安 1987）[22]。連続的な関数 $f(x)$ についてのリアプノフ指数 $\lambda$ は総離散点数 $N$ を用いて次式で定義される（合原 1997；合原ら 2000；中川 2010）[23]～[25]。

$$\lambda = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log \left| \frac{d}{dx} f(x_i) \right| \quad (1)$$

関数の変化率平均の対数がリアプノフ指数であることから、 $\lambda < 0$ のとき軌道は安定し、 $\lambda > 0$ のとき軌道は不安定となってシステムはカオス的な挙動を示すことになる。このとき $\lambda$ の値が大きいほど強いカオス性をもつことになる。実験より得られる時系列データは離散データであり、観測量 $x(t)$ とその離散時間 $\Delta t$ （本研究では0.1sに設定）で1ステップ進んだ量 $x(t+\Delta t)$ の微分を（2）式のように差分化して近似値を求めている。

$$\lambda = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log \left| \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \right| \quad (i: x \text{ の昇順ソート番号}) \quad (2)$$

ここで、 $f(x(t))$ は（3）式に示すように、一時刻後の観測量 $x(t+\Delta t)$ としている。

$$f(x(t)) \equiv x(t+\Delta t) \quad (3)$$

本研究では、（2）式を用いて最大リアプノフ指数を求め、マアジの群れの遊泳行動パターンのカオス性を判断するための一つの指標とした。

一方、4種類の時系列データに時間的なフラクタル構造を有するか否かを判断するために、フラクタル次元を算出する。フラクタル次元が非整数であれば、フラクタル構造を有することを意味する。逆にフラクタル次元が整数になれば、挙動がカオスでないことになる。フラクタル次元を算出する方法としては様々なものがあるが、本研究では（4）式で表されるHiguchi法を用いてフラクタル次元を求めた（樋口 1989；松下 1992；高橋・長坂 1996；新地ら 2001）[26]～[29]。（4）式において、 $t$ は時刻、 $k$ は時間間隔であり離散的な粗視度、 $L_t(k)$ は粗視度 $k$ における時刻 $t$ から次の時刻までの観測点間距離を表している。Higuchi法によるフラクタル次元は、時系列データを1次元の幾何構造とみなしたときの形状的な複雑さの程度を示すことになる。ここで、 $L_t(k)$ の全観測時間における平均を $L(k)$ とすると、 $(\log k, \log L(k))$ の点が一直線上にのる時、つまり（5）式が成立する場合、時系列データはフラクタル性を持ち、フラクタル次元（その直線の傾きの絶対値） $D$ として定量化される。 $D$ の値は $1 \leq D \leq 2$ となるが、正弦波のような完全な周期変動の場合は1、ホワイトノイズのような確率的な変動の場合は2となる。カオスであれば1と2の間の値になる。

$$L_t(k) = \left\{ \left( \sum_{i=1}^{\left[ \frac{N-t}{k} \right]} |X(t+ik) - X(t+(i-1) \cdot k)| \right) \frac{N-1}{\left[ \frac{N-t}{k} \right] \cdot k} \right\} / k \quad (4)$$

$$L(k) \propto k^{-D} \quad (5)$$

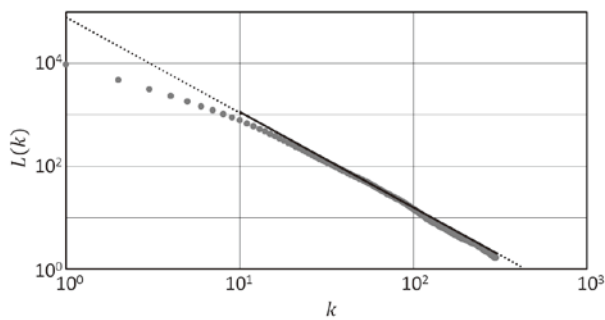


図5 フラクタル次元計算結果一例

図5にフラクタル次元の計算結果の一例（赤点灯時で時系列データとして速度ノルムを使用）を示す。この例では、 $D=1.887$ となった。

## 5. 波長を変えた光刺激に対する魚群行動の定量化

図6は速度ノルム、図7は速度ベクトルの時間的变化角、図8は対LED－各個体間距離、図9は対LED－各個体角度の時刻歴の一例（赤点灯時）と各波長に対する平均値の分布を表したものである。なお、図6から図9に示されている平均値の分布の

グラフは、実験3回ごとのマアジ5尾分に対する最大値、最小値、平均値を表示している。

図6の時刻歴から繰り返し波形が確認できる。平均値の分布からは、赤点灯時は遊泳速度にバラつきが少なく全体的に遊泳速度が遅くなっていることが読み取れる。青と緑点灯時ではバラつきが大きく比較的遊泳速度も速くなっている。これは、視覚を主として遊泳しているのか、側線感覚を主として遊泳しているかの違いによるものと考えられる。特に赤点灯時はマアジが暗がりを守る恐る恐る遊泳しているためであると推察できる。

図7の時刻歴からは繰り返し波形が確認できるが、平均値の分布のグラフからは0.1sという短い時間間隔では大きな角度の変化はしていないといえる、また、今回の実験結果からマアジは時計回りの（水槽を上からみて右回り）遊泳をしたことが多かったといえる。

図8の時刻歴からも繰り返し波形が確認できる。平均値の分布のグラフからは、赤点灯時のバラツキが小さい。

図9の時刻歴も他と同様に繰り返し波形が確認で

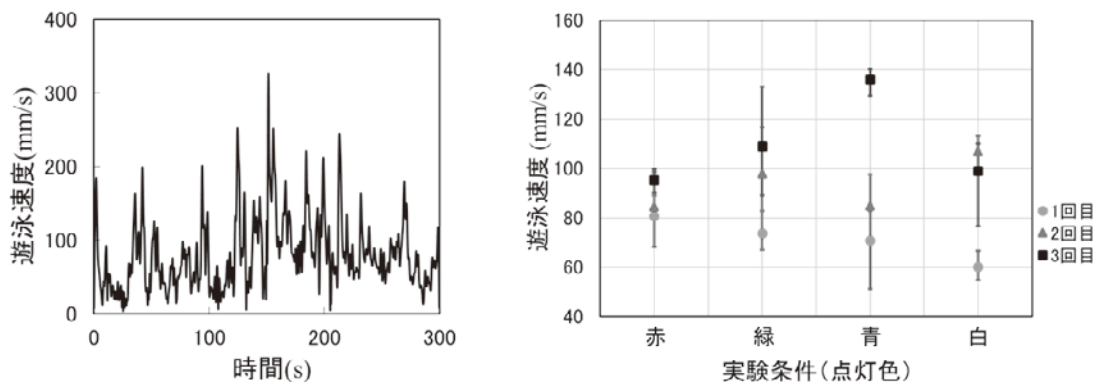


図6 速度ノルムの時刻歴と平均値の分布

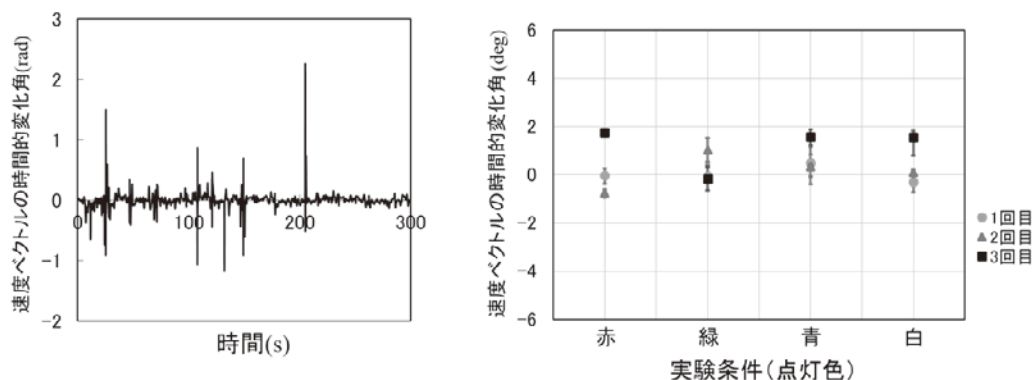


図7 速度ベクトルの時間的变化角の時刻歴と平均値の分布



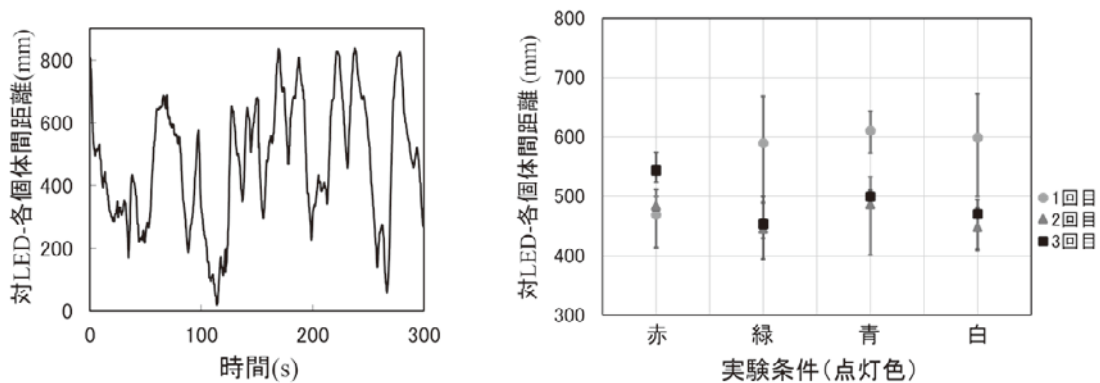


図8 対LED－各個体間距離の時刻歴と平均値の分布

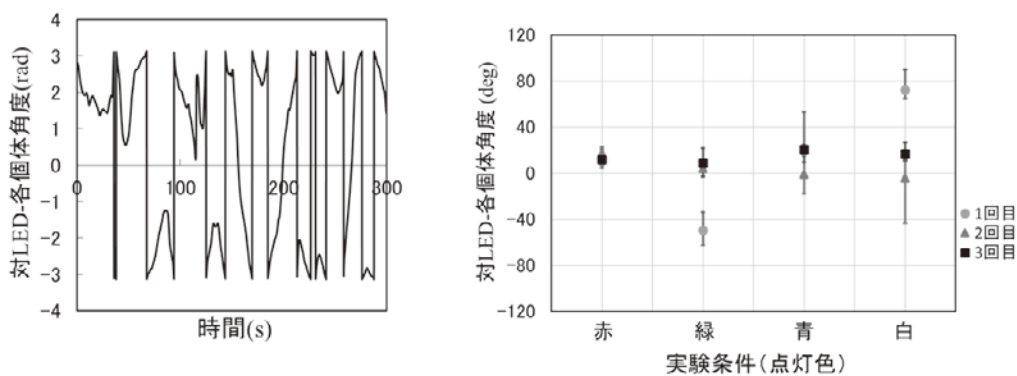


図9 対LED－各個体角度の時刻歴と平均値の分布

きる。平均値の分布のグラフからは全体的に値が0に近くなっているが、これは周回遊泳をしていた影響であると考えられる。もし偏在的な遊泳をしているのであれば対LED－各個体角度はある一定の大きさを持つはずである。

図10から図13に解析結果を示す。図10は速度ノルム、図11は速度ベクトルの時間的変化角、図12は対LED－各個体間距離、図13は対LED－各個体角度に対する最大リアプノフ指数とフラクタル次元を算出したものである。それぞれのグラフは3回の実験

ごとのマアジ5尾分の最大値、最小値、平均値を表示している。

図10のグラフからは、緑色に点灯させたときの最大リアプノフ指数が他の点灯色と比べて大きくなっている。つまり、0.1sごとの速度ノルムの動的変化が他の色より激しくなっているためであると推察される。また、他の3つの点灯色では大きな違いはみられなかった。フラクタル次元では、赤点灯時にフラクタル次元がやや小さくなる傾向がみられた。この結果より赤点灯時は、遊泳速度の動的パターンに

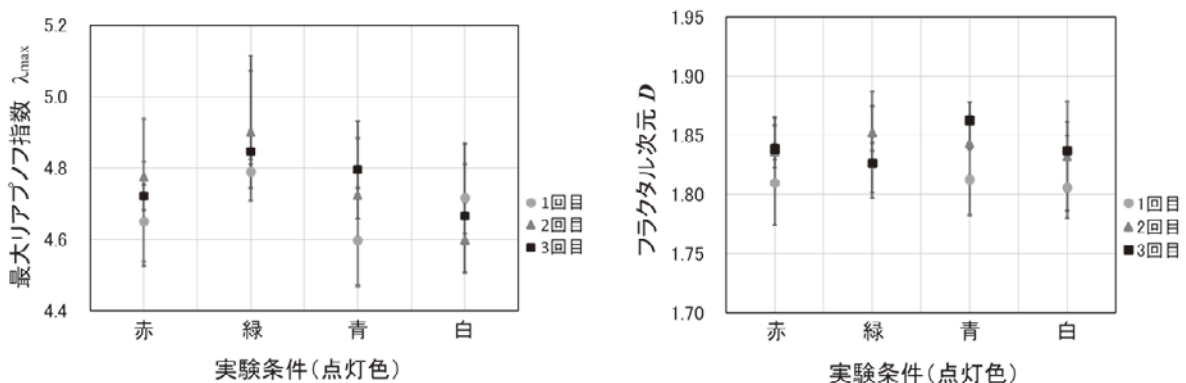


図10 速度ノルムに対する最大リアプノフ指数とフラクタル次元の分布

比較的相似性があることが考えられる。他の3つの点灯色ではほとんど違いがみられなかった。すなわち、マアジは視覚があるとよりカオス的な行動をとり、視覚がないとカオス性が減るような遊泳をしていることがわかる。

図11から赤点灯時の最大リアプノフ指数のバラツキが大きいことがわかる。これは遊泳速度が遅いため、泳ぐ向きを変化させ易い状況であったためと考えられる。

図12をみると、実験日の違いによるデータのバラ

つきが大きいことが分かった。これは実験日の水温やマアジの個体差などによる影響であると考えられる。点灯色ごとにみていくと、緑色に点灯させたときのフラクタル次元のバラつきが小さくなっている。

図13をみると、赤点灯時の最大リアプノフ指数の値が比較的小さくなっている。また、他の3つの点灯色では大きな違いはみられなかった。これはマアジの比視感度が赤色にほとんどないためではないかと考えられる。すなわち赤色はマアジにはほとんど

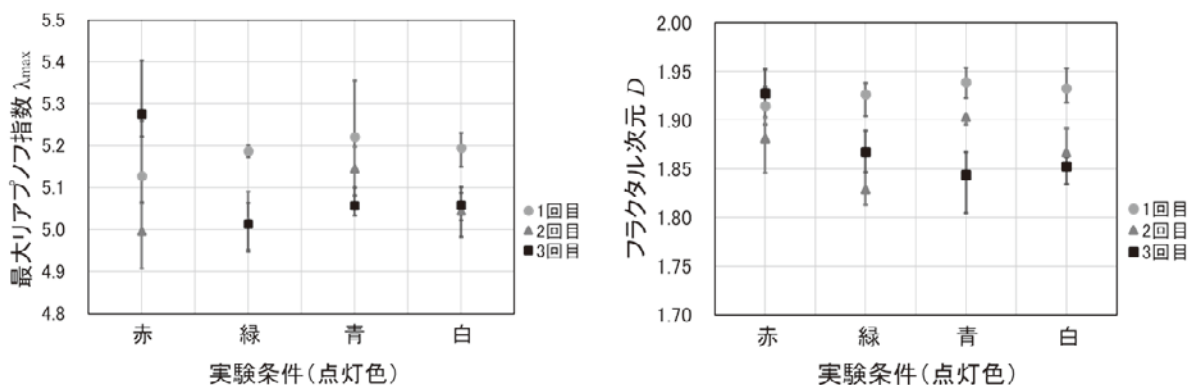


図11 速度ベクトルの時間的变化角に対する最大リアプノフ指数とフラクタル次元の分布

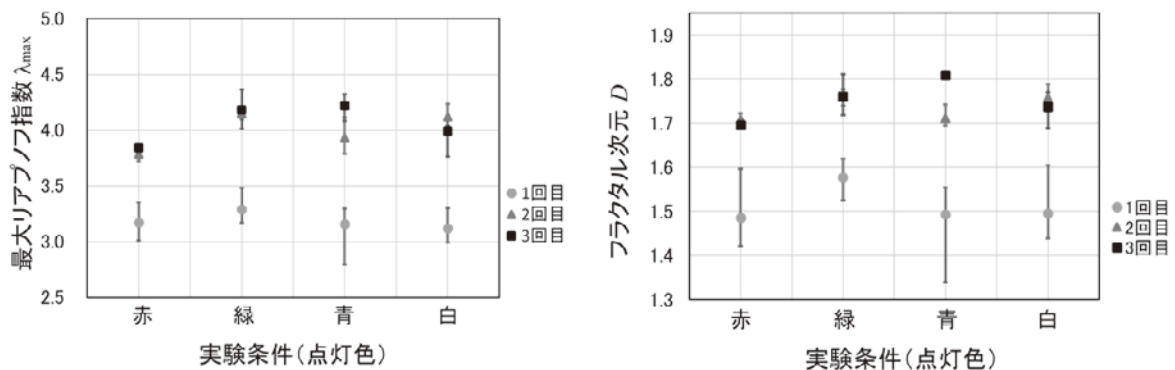


図12 対LED－各個体間距離に対する最大リアプノフ指数とフラクタル次元の分布

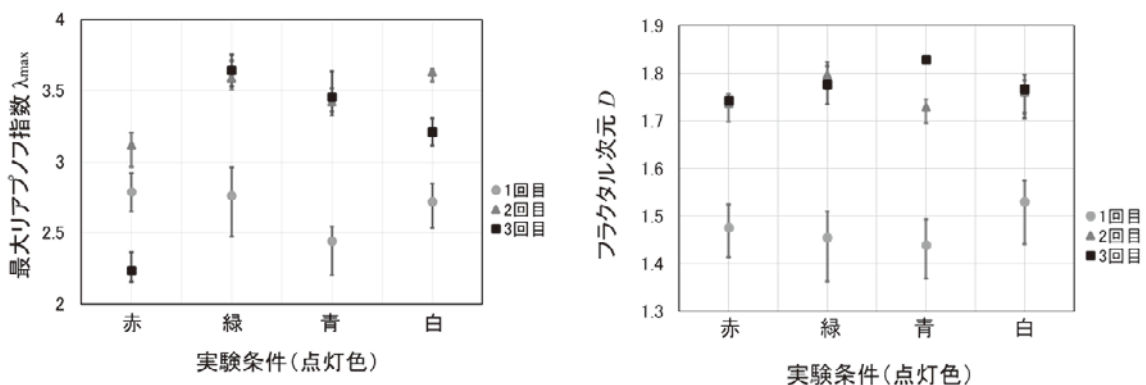


図13 対LED－各個体角度に対する最大リアプノフ指数とフラクタル次元の分布



認識できないため、暗所状態下に近い状態で遊泳（マアジが視覚を使えず、側線感覚で遊泳している状態）しているためであると推察される。フラクタル次元についても赤点灯時がやや値が小さくなる傾向がみられた。理由は、最大リアプノフ指数と同様のことが影響しているためと考えられる。

以上のことからマアジの各波長に対する遊泳行動パターンの違い、例えば速度ノルムであれば魚が減速や加速をする判断、変化角であれば魚の方向転換に対する判断など、を最大リアプノフ指数やフラクタル次元という特徴量の定量的な数値として表すことで、その遊泳行動の差を分類できる可能性があることが分かった。

## 6. まとめ

我々研究グループが独自に構築した魚類遊泳行動撮像装置を用いて、LED光に対するマアジの群れの遊泳行動の解析を、カオス・フラクタル解析という手法を用いて試みた。その結果、複雑な魚類の群れ行動を最大リアプノフ指数とフラクタル次元という特徴量を用いて定量化することができた。このように光環境や海水温などの実験条件をコントロールして、魚類行動のカオス・フラクタル解析を行った研究例はほとんどなく、新規性の高い取り組みだといえる。

また、本実験結果から赤色と緑色点灯時に特徴的な遊泳行動が確認できた。これはマアジの比視感度が赤色にはほとんどないことに関係していると思われる。すなわち赤色はマアジにとってほとんど視認できないので、暗がり泳いでいるのと同じ状態になっていると考えられる。一方、緑色はマアジの比視感度は高いので、良く視認できているためと考えられる。ただし、研究としては実験回数が少ないことから、同一条件での実験を継続し、精査していく予定である。さらに、現時点では解析時にマアジ各個体でみているが、群れサイズとして扱うことを検討している。また、水槽サイズが遊泳行動に影響を与えている可能性があるため、より大きなサイズの実験水槽を用いての実験も考えている。将来的には、今後の実験により得られた行動ルールを用いて、魚群の遊泳行動のコンピュータシミュレーションを行いたい。

なお、本研究はJSPS科研費16K1428802, 25420424, 256310181, 24656249, 2256040901の助成を受けたものである。

## 【引用文献】

- [1] 井上実, 「魚類の対光行動とその生理－魚類の対光行動－」, 日本水産学会誌, 38(8), pp.907-912, (1972)
- [2] 有元貴文, 「魚類の生態からみた漁法の検討－魚はどうして光に集まるのか（上）－」, 水産の研究, 7(6), pp.33-36, (1988)
- [3] 有元貴文, 「魚類の生態からみた漁法の検討－魚はどうして光に集まるのか（下）－」, 水産の研究, 8(1), pp.39-42, (1989)
- [4] 稲田博史, 本多二郎, 川村軍蔵, 江村薫, 内田浩二, 河本康太郎, 後藤英司, 田澤信二, 平間淳司, 室谷裕志, 渡邊博之, 『時代を先取りする先端技術LEDの農林水産分野への応用』, 農業電化協会, (2006)
- [5] 後藤英司, 『人工光源の農林水産分野への応用』, 農業電化協会, (2010)
- [6] 稲田博史, 有元貴文, 長島徳雄, 飯田浩二, 『漁灯を活かす技術・制度への再構築へ』, 恒星社厚生閣, (2010)
- [7] Hadderingh, R. H., "Experimental reduction of fish impingement by artificial illumination at Bergum power station", Int. Rev. Ges. Hydrobiol, 67, pp.887-900, (1982)
- [8] Patrick, P. H., Sheehan, R. W. and Sim B., "Effectiveness of a strobe light eel exclusion scheme", Hydrobiol. Jap. Soc. Fish, 94, pp.269-277, (1982)
- [9] Koike, T., Matsuike, K., "Response of fish school to different blinking frequencies and intensity ratios of Intermittent light", Bull. Jap. Soc. Fish, 53(6), pp.925-932, (1987)
- [10] 安永一, 有元貴文, 「ストロボ光に対するマアジの回避行動」, 日水誌, 60(5), pp.713-718, (1994)
- [11] 松本太朗, 川村軍蔵, 西隆昭, 高田吉雄, 杉村暢昭, 山下佑介, 栗原梢, 「LED点滅光によるマダイの侵入抑制効果」, 日水誌, 71(2), pp.188-197, (2005)
- [12] 川村軍蔵, 『魚との知恵比べ－魚の感覚と行動の科学－（3訂版）』, 成山堂書店, (2010)
- [13] 杉野隆三郎, 「ボイド法による捕食行動アルゴリズムの開発」, 情報処理学会, 数理モデル化と応用研究報告, MPS-59, pp.49-52, (2006)
- [14] 井出美奈子, 武蔵美緒, 森住昇, 杉野隆三郎, 「カオス・フラクタル理論を用いた魚行動解析手法の開発」, 平成19年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, p.10, (2007)
- [15] 杉野隆三郎, 田中広志, 「生物の行動を探る道具としてのカオス・フラクタル理論－魚行動のカオス解析－」, 日本数学教育学会高専・大学部会論文誌,

- 16(1), pp.39-51, (2009)
- [16] 伊丹伸, 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 森住昇, 鎌田信一郎, 「LED点滅光に対する魚類の誘引・忌避行動解析」, 平成25年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.12, (2013)
  - [17] Morimoto, M., Sugino, R., Fukuda, K., Itami, S. and Morizumi, N., "Development of measurement system and complexity analysis for three-dimensional fish swimming behavior", SICE Annu. Conf. 2013, Conf. Proc., pp. 2245-2248, (2013)
  - [18] 杉野隆三郎, 伊丹伸, 福田耕治, 小林美緒, 守岡佐保, 「魚群サイズの定置網モデルに対するカオス・フラクタル性」, 平成26年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.10, (2014)
  - [19] 伊丹伸, 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 枝川大二郎, 「LED光刺激に対するマアジの群れ行動の定量的評価」, 平成27年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.29, (2015)
  - [20] 伊丹伸, 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 枝川大二郎, 「LED光刺激に対するマアジの群れ行動のカオス・フラクタル解析」, 平成28年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p.23, (2016)
  - [21] 長谷川英一, 『魚の動きを探る－わたしの魚群行動研究の歩み－』, 五曜書房, (2014)
  - [22] 高安秀樹, 『フラクタル科学』, 朝倉書店, (1987)
  - [23] 合原一幸, 『カオスの数理と技術』, 放送大学教育振興会, (1997)
  - [24] 合原一幸編, 池口徹, 山田泰司, 小室元政著, 「カオス時系列解析の基礎と応用」, 産業図書, (2000)
  - [25] 中川匡弘, 『カオス・フラクタル感性情報工学』, 日刊工業新聞社, (2010)
  - [26] 樋口知之, 「時系列のフラクタル解析」, 統計数理, 37(2), pp.209-233, (1989)
  - [27] 松下貢編, 『医学・生物学におけるフラクタル』, 朝倉書店, (1992)
  - [28] 高橋朋一, 長坂建二, 「時系列データにおけるフラクタル次元の解析」, 信学技報, IT95-49, pp. 25-30, (1996)
  - [29] 新地辰朗, 西村治彦, 北添徹郎, 「魚行動モデルによる群行動パターンのフラクタル性評価」, 情報処理学会論文誌, 42(6), pp.1592-1600, (2001)

#### 【参照】

1. (公財) 北九州産業学術推進機構半導体技術センター, ひびきのLEDアプリケーション創出協議会について, <http://archive.fo/6c3vu/>, (2017.4.30)
2. 株式会社TAOS研究所, 用語集, <http://www.taos.tokyo/rdinfo/49.html/>, (2017.4.30)