

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：56101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420424

研究課題名(和文) LED光の発光波長および発光パターンに対する海水魚の誘引・忌避行動解析

研究課題名(英文) Attraction and Avoidance Behavior Analysis of Sea Fish to Emission Wavelength and Emission Pattern of LED Light

研究代表者

伊丹 伸 (ITAMI, SHIN)

阿南工業高等専門学校・創造技術工学科機械コース・講師

研究者番号：60212982

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、実験供試魚にマアジを使用して、暗所状態でLEDによる光刺激を与えたときのマアジの群れの遊泳行動をCCDカメラで撮像する計測システムを開発した。また、遊泳軌跡を抽出する画像処理システムおよびその遊泳軌跡からカオス・フラクタルな特徴量の抽出にも成功した。この研究成果は、魚類における光に対する遊泳行動の定量化・行動のモデル化に繋がるのではないかと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed the measurement system to image the swimming behavior of fish schooling jack mackerel when given LED light stimulation under a dark place with a CCD camera. We succeeded in extraction of swimming loci and chaos-fractal characteristics from the moving image. These results will lead to quantification and modeling of swimming behavior of fish to light.

研究分野：工学

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

1. 研究開始当初の背景

生物多様性に富む日本の沿岸域における漁業は我が国の水産業において重要な産業分野である。徳島県においても釣、延縄、小型底びき網を用いた沿岸漁業が水産業の基幹となっている。近年、徳島県の漁業では小型の LED 集魚灯が使用されてきている。しかし、漁業者はどのような条件下で何色（波長）の LED が効果的なのかを経験に頼った使用をしているのが実情である。

そこで、徳島県内の漁協と徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課の共同研究「LED の発光条件（発光波長）と環境条件が漁獲（量、サイズ）に与える影響を漁場での調査と水槽実験で検討」し、以下の研究成果を得た。

環境条件によってばらつきはあるものの漁獲が増大する傾向が確認

大型の魚種がよく漁獲される傾向がみられ、特に魚群に対して効果的

夜明け前に顕著に漁獲が増大する傾向があり、特定の波長で特別な効果を持つ可能性

水槽試験で、LED 集魚灯の光にタチウオの群れが反応することを確認

ここでの問題は、これらのデータが統計的に不足のある漁獲数調査、目視や音響カメラによる動向観察に終始し、科学的な分析が十分でない上に定量的評価の蓄積がないことである。

我々阿南高専の研究グループは魚類行動に注目し、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。特に、「キンギョのエッジ領域（遊泳水域が構造物により拘束されている領域）における遊泳行動」について撮影した動画像から遊泳軌跡の時系列データを抽出する技術を開発するとともに、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ソフトウェアを開発」し、水槽実験により検討した。以上により、次の研究成果を得ていた。

エッジ領域における遊泳行動パターンは、周回行動と探索行動の2種類に分類可能行動パターンの違いが、遊泳速度のカオス・フラクタル指数の違いとなることを確認

赤外線 LED 投光器を用いた暗所状態下における魚類行動計測システムの構築

また、徳島県の地場産業である LED 利用技術に関し、阿南高専は教育・研究上の多くの蓄積があった。

2. 研究の目的

研究代表者が所属する阿南高専の研究グループおよび徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課が連携チームを組織し、以下の研究を推進することにした。

魚類の LED 光に対する誘引・忌避行動の解析

沿岸漁業において重要なマアジを始めとして、ハマチやタチウオなどの数種の魚種にしばり、それらの海水魚が LED 光に対してどのような誘引・忌避行動をとるのかを実験によりデータを取得する。そして、自作のデータ解析ソフトウェアをさらに高精度化かつ汎用化することで、魚類の複雑な遊泳行動について、複雑系理論（カオス・フラクタル理論）を用いて誘引・忌避行動の精密な定量分析を行う。

漁業における混獲を最小化する新しい LED 利用技術の開発

LED 光の点灯において特に発光波長および発光パターンに注目し、LED 光の発光波長および発光パターンを変えると魚類がどのような誘引・忌避行動をとるかを調べる。その結果を基に LED 光による魚行動制御を用いた漁法に有効な知能型 LED 集魚灯（魚種によって LED の発光波長や発光パターンを変えられる集魚灯）の試作を行う。

以上により、LED 光刺激に対する魚類の行動特性をカオス・フラクタル解析により明らかにし、知能型 LED 集魚灯の開発に向けた基礎的データを得ることが本研究の最終目標となる。

3. 研究の方法

阿南高専と徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課が緊密に連携しながら、以下の手順に従い研究を進展させた。

フェーズ1：複雑系理論による魚類行動計測システムの構築

試験魚として徳島県沿岸で捕獲した魚類（マアジ、ハマチ、タチウオなど）を実験に使用し、LED 光（発光波長や発光パターン）に対する誘引・忌避行動パターンを、複雑系理論を用いて定量化するシステムを構築

フェーズ2：LED 光刺激に対する魚類の行動解析

フェーズ1で構築したシステムを用いて魚類行動（マアジ、ハマチ、タチウオなど）を解析し、LED 光の発光波長や発光パターンによる行動応答モデルを構築

フェーズ3：知能化 LED 集魚灯の試作

フェーズ2で得られた行動応答モデルに基づき、知能型 LED 集魚灯（魚種によって LED の発光波長や発光パターンを変えられる集魚灯）を試作

平成 25～27 年度の研究期間において実施した方法の概要を年度ごとに以下に示す。

(1) 平成 25 年度

キンギョの遊泳行動を VTR 画像から解析する計測システムを用いて LED 光刺激を受

けたキンギョの遊泳行動のカオス・フラクタル量の抽出に成功していたので、このシステムに改良を加えて海水魚実験用の円形水槽（上部直径 1480mm × 高さ 800mm）で実験ができるようにした。また、得られた動画像から、マアジの遊泳軌跡を抽出するための画像処理プログラムの開発にも着手した。

(2) 平成 26 年度

フルカラーLED を用いた LED 光刺激発生装置の製作に着手した。完成後、海水魚用遊泳行動撮像システムの水槽中央部に配置し、水槽実験を行った。実験供試魚としてマアジ（魚群構成尾数：1 尾あるいは 5 尾）を用い、水深は 30cm に設定した。LED 光刺激は点灯色（波長）が赤色（波長 635nm）・緑色（波長 525nm）・青色（波長 470nm）・白色（三色混合）の 4 条件と消灯時における 1 条件の全部で 5 条件を与えた。また、LED 光刺激発生装置の発光部の位置は水面下 2cm と 15cm の 2 種類で行った。この全 9 条件で各 3 回ずつ実験を実施した。図 1 に完成した魚類遊泳行動撮像システムの機器構成を示す。なお、このシステムは全体を遮光シートロールで覆い、暗状態にすることが可能となっている。

得られた動画像データより、遊泳軌跡を抽出し、その遊泳軌跡より時系列データとして遊泳速度（0.1 秒ごとのマアジの遊泳速度の変化）と対 LED 間距離（0.1 秒ごとの LED とマアジとの距離）の 2 つを算出し、それぞれカオス・フラクタル解析（3 次元リターンマップ、リアプノフ指数、フラクタル次元）を行い、定量化を試みた。

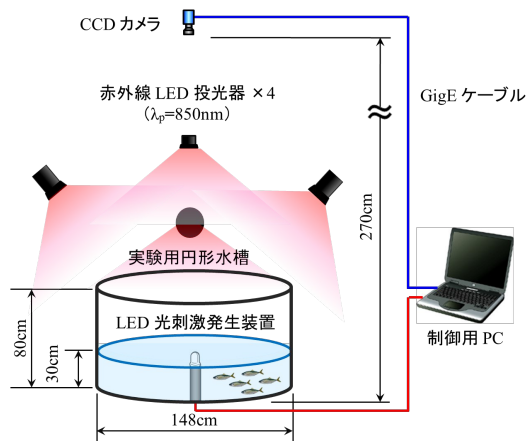


図 1 魚類遊泳行動撮像システム機器構成

(3) 平成 27 年度

LED 発光部を実験用水槽中心部より 25cm 偏心させて設置（高さは水面より 15cm）し、前年度と同様の遊泳行動実験を行った。実験で得られた遊泳軌跡から時系列データとして遊泳速度、速度ベクトルの時間的変化角（0.1 秒ごとのマアジの速度ベクトルを求め、時間的に隣接する速度ベクトル間のなす角度の変化）対 LED 間距離、対 LED 角度（0.1 秒ごと LED とマアジのなす角度の変化）の 4

つを算出し、それぞれカオス・フラクタル解析（リアプノフ指数、フラクタル次元）を行い、定量化を試みた。

4. 研究成果

先行研究でキンギョの遊泳行動撮像システムは完成していたので、本研究ではそのノウハウを基に実験供試魚であるマアジ用の遊泳行動撮像システムを開発することが最初の取り組みとなった。なお、実験は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（平成 25～26 年度）と鳴門庁舎（平成 27 年度）で実施した。また、マアジの好む水温が 23.1 ± 3.7 であり、水温変化によるマアジの遊泳行動への影響を最小にするため、実験時の海水温がこの範囲に入る 6 月上旬～11 月中旬までを実験実施期間とした。

平成 25～27 年度の研究期間において得られた成果の概要を年度毎に以下に示す。

(1) 平成 25 年度

アルミフレームおよび遮光シートロールを用いて円形実験水槽用の簡易暗室を自作し、その内部にカラー CCD カメラと超広角近赤外線 LED 投光器を 4 器取り付け、海水魚用遊泳行動撮像システムが完成した。また、得られた動画像から、マアジ 1 個体の遊泳軌跡を抽出するための画像処理プログラムの開発にも成功した。

このシステムおよびプログラムの有用性を確認するために、実験供試魚としてマアジ 1 尾を用いて実験を行った。その結果、暗所状態下で遊泳するマアジの遊泳軌跡の抽出に成功した。

(2) 平成 26 年度

図 2 と図 3 に実験で得られた遊泳軌跡の一例を示す。消灯時と LED 点灯時では異なる遊泳をしていることが確認できた。この理由は、消灯時は側線感覚を主として遊泳し、点灯時は視覚を主として遊泳している違いによるものと考えられる。

図 4 と図 5 にそれぞれ各実験条件において得られたリアプノフ指数（時系列データとして遊泳速度を使用）の平均値およびフラクタル次元（時系列データとして対 LED 間距離を使用）の平均値の分布図を示す。ここで、図中の横軸の D、R、G、B、W は LED の点灯色（D は消灯、R は赤、G は緑、B は青、W は白）、その横の数字が魚群構成尾数、括弧内の数値は LED 発光部の水面からの位置（cm）を表している。図 4 の最大リアプノフ指数からは系統だった特徴を見つけることはできなかった。図 5 フラクタル次元からは単独遊泳の方が群れでの遊泳の時よりも値が大きくなる傾向が見られた。一方、点灯波長や LED 発光部の水深位置による違いはみられなかった。

これらの原因として、外的因子（実験用円形水槽のサイズやマアジの個体差など）や実験の試行回数の少なさが一因にあると考えられる。

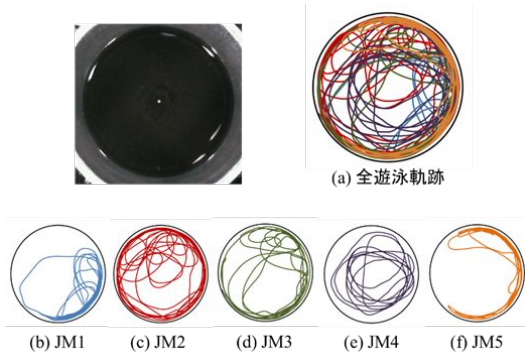


図2 マアジの群れの遊泳軌跡（消灯時）

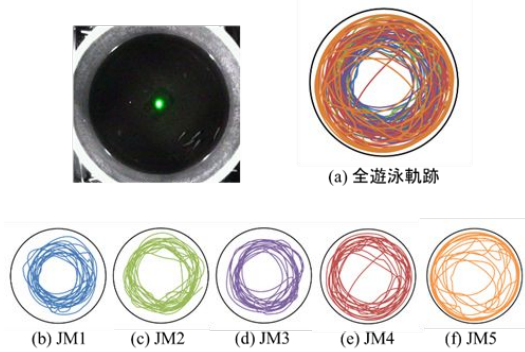


図3 マアジの群れの遊泳軌跡（緑点灯時）

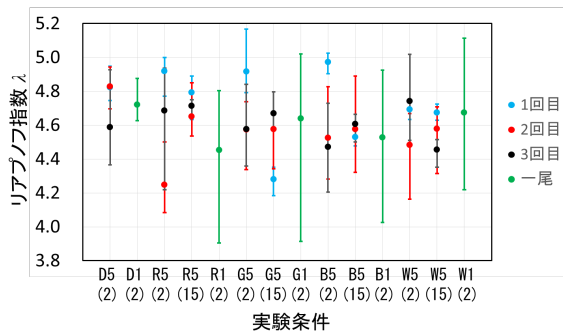


図4 各実験条件でのリアプノフ指数

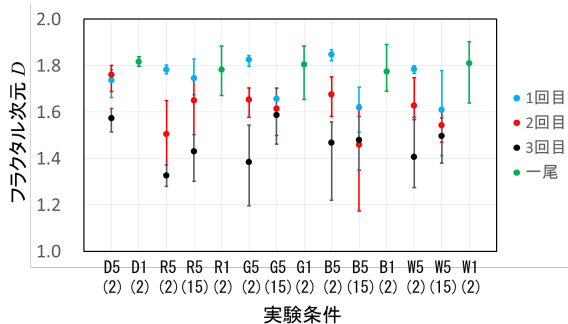


図5 各実験条件でのフラクタル次元

(3) 平成 27 年度

図6は遊泳速度の平均値、図7と図8はそれぞれ遊泳速度に対するリアプノフ指数およびフラクタル次元の平均値の分布図である。図6をみると、赤点灯時は他の点灯色に比べて遊泳速度にばら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わかる。一方、青や緑点灯時ではばらつきが大きく比較的遊泳速度が速くなっている。白点灯時では、青や緑と比べてばらつきが小さく速度も遅いという結果となった。図7からは緑点灯時が他の点灯色に比べて、リアプノフ指数が相対的に大きくなっている。つまり、0.1秒ごとの遊泳速度の加減速の大きさが他の点灯色より激しくなっているということである。一方、他の3つの点灯色では違いがみられず、同じような値になった。図8のフラクタル次元の値は、どの点灯色もばらつき具合および値の大きさも似ており、明確な違いを読み取ることはできなかった。

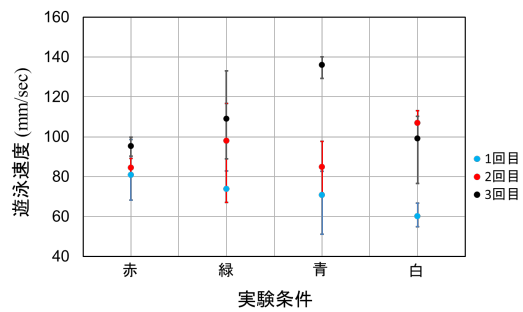


図6 遊泳速度の平均値

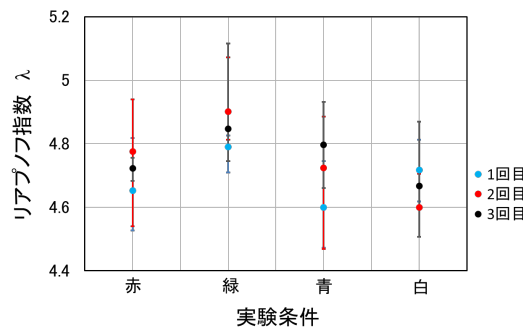


図7 遊泳速度のリアプノフ指数

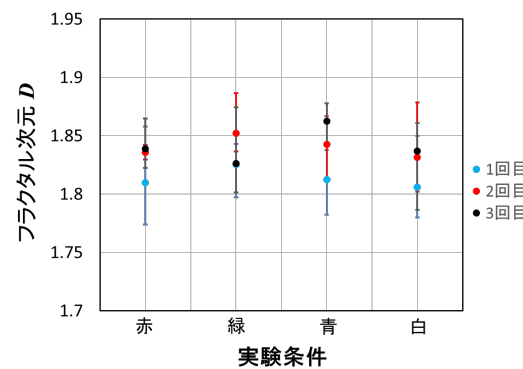


図8 遊泳速度のフラクタル次元

図9は対LED間距離の平均値、図10と図11はそれぞれ対LED間距離に対するリアプノフ指数およびフラクタル次元の平均値の分布図である。これらのグラフを見ると、実験ごとのばらつきが大きいことが分かった。これはマアジの個体差が結果に影響しているためだと考えられる。図11からは、フラクタル次元の値にお

いては、緑点灯時が他の色での点灯時に比べて最もばらつきが小さく、やや大きくなる傾向がある。これは、緑点灯時は遊泳速度の加減速が大きい分、対 LED 間距離にも周期性はなく、マアジの遊泳行動のランダム性が強くなっているためだと考えられる。

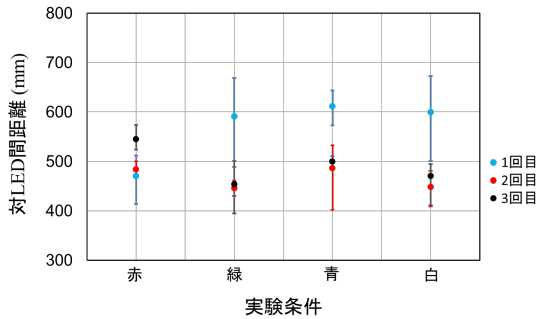


図 9 対 LED 間距離の平均値

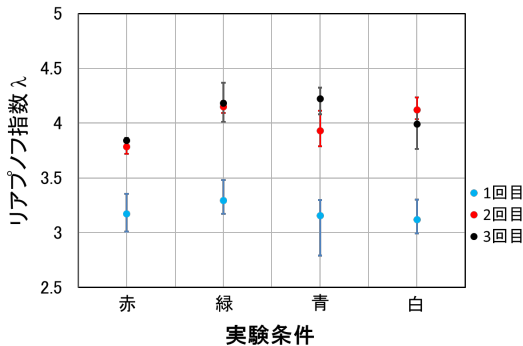


図 10 対 LED 間距離のリアプノフ指数

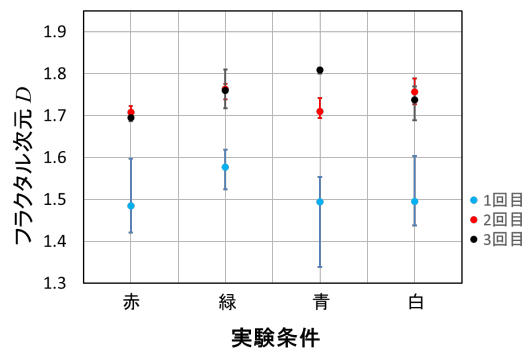


図 11 対 LED 間距離のフラクタル次元

図 12 は対 LED 角度の平均値、図 13 と図 14 はそれぞれ対 LED 角度に対するリアプノフ指数およびフラクタル次元の平均値の分布図である。図 12 をみると、赤点灯時では角度がほとんど変わらず、大きく動いてないことが分かる。また、白点灯時はばらつきが大きく、他の点灯色と比べてマアジが大きく動いているといえる。

図 13 をみると、対 LED 角度のばらつきが小さかった赤点灯時でのリアプノフ指数が比較的小さい値をとっている。一方、ばらつきの大きかった白点灯時ではリアプノフ指数がやや大きくなっていることがわかる。青や緑点灯時においては、狭い範囲でランダムな泳ぎ方をしていたためにリアプノフ指数

が大きくなったのではないかと考えられる。

図 14 のフラクタル次元のグラフからは明確な差を読み取ることができなかった。

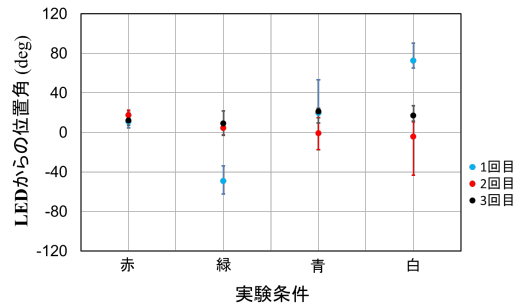


図 12 対 LED 角度の平均値

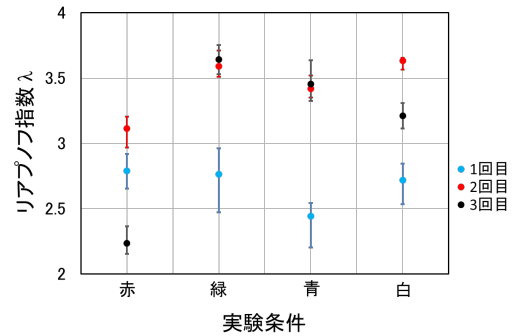


図 13 対 LED 角度のリアプノフ指数

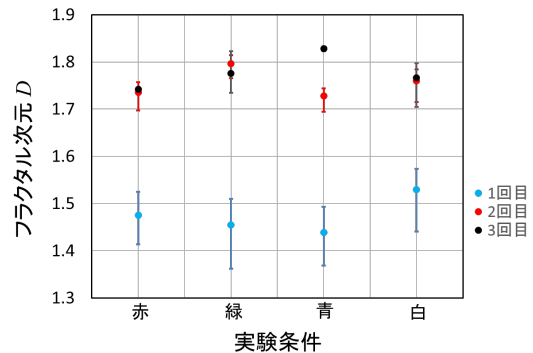


図 14 対 LED 角度のフラクタル次元

以上により、計画の「フェーズ 2 : LED 灯火システムに対する魚類の行動解析」の遊泳行動の定量化までは達成できたが、行動モデルの構築までは至らなかった。また、知能化 LED 集魚灯の試作にも取り組めなかった。本研究の成果は、徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課次長と外部者（大学水産学教授）に評価してもらい全体的に良い評価を得た。

しかしながら、実験試行回数の不足、マアジ以外の魚種の実験、適正な実験用水槽サイズに対する考察については今後の課題となったので、今後も継続して研究を実施する予定である。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 11 件)

伊丹伸、福田耕治、杉野隆三郎、小林美緒、枝川大二郎、上田幸男、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、平成 28 年 3 月 29 日、東京海洋大学品川キャンパス(東京都港区)堀内悠暉、福田耕治、伊丹伸、杉野隆三郎、魚遊泳軌跡を得るためのマルチトラッキングプログラム、2015 年度計測自動制御学会四国支部学術講演会、平成 27 年 11 月 28 日、高知工科大学香美キャンパス(高知県香美市)

沖野悠太、伊丹伸、福田耕治、小林美緒、枝川大二郎、杉野隆三郎、LED光に対する魚行動のカオス・フラクタル、平成 27 年度電気関係学会四国支部連合大会、平成 27 年 9 月 26 日、高知工科大学香美キャンパス(高知県香美市)

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、平成 27 年 3 月 30 日、東京海洋大学品川キャンパス(東京都港区)

伊丹伸、福田耕治、小林美緒、杉野隆三郎、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、生体・感性及び高度情報処理シンポジウム 2015、平成 27 年 1 月 28 日、長岡技術科学大学(新潟県長岡市)

藤川明広、伊丹伸、福田耕治、杉野隆三郎、小林美緒、守岡佐保、枝川大二郎、LED光刺激に対するマアジの遊泳行動解析、平成 26 年度日本水産学会秋季大会、平成 26 年 9 月 21 日、九州大学箱崎キャンパス(福岡県福岡市)

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、平成 26 年 3 月 29 日、北海道大学函館キャンパス(北海道函館市)

伊丹伸、福田耕治、杉野隆三郎、小林美緒、守岡佐保、LED光刺激に対する海水魚の遊泳行動解析システムの構築、平成 26 年度日本水産学会春季大会、平成 26 年 3 月 28 日、北海道大学函館キャンパス(北海道函館市)

杉野隆三郎、伊丹伸、福田耕治、小林美緒、守岡佐保、魚遊泳行動の 3 次元撮像システムの開発、平成 25 年度日本水産学会秋季大会、平成 25 年 9 月 20 日、三重大学(三重県津市)

田村元帥、伊丹伸、杉野隆三郎、福田耕治、小林美緒、守岡佐保、LED光刺激に対する魚類の遊泳行動の解析、平成 25 年度日本水産学会秋季大会、平成 25 年 9 月 21 日、三重大学(三重県津市)

Morimoto Maki, Sugino Ryuzaburo, Fukuda Koji, Itami Shin, and Morizumi Noboru, Development of Measurement System and Complexity Analysis for Three-Dimensional Fish Swimming Behavior, SICE ANNUAL CONFERENCE 2013、平成 25 年 9 月 17 日、名古屋大学(愛知県名古屋市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊丹 伸 (ITAMI, Shin)
阿南高専・創造技術工学科・講師
研究者番号：60212982

(2) 研究分担者

杉野 隆三郎 (SUGINO, Ryuzaburo)
阿南高専・創造技術工学科・教授
研究者番号：10259822

小林 美緒 (KOBAYASHI, Mio)
阿南高専・創造技術工学科・講師
研究者番号：30462146

守岡 佐保 (MORIOKA, Saho)
徳島県立農林水産総合技術支援センター・水産研究課・研究員
研究者番号：40502240
(平成 25 年度のみ)

(4) 研究協力者

枝川 大二郎 (EDAGAWA, Daijirou)
徳島県立農林水産総合技術支援センター・水産研究課・研究員
(平成 26 年度～27 年度)