

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月14日現在

機関番号：56101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560409

研究課題名（和文）カオス・フラクタルに基づく魚類行動解析を用いた定置網  
のクラゲ被害防止技術の開発

研究課題名（英文）Development of Technologies for Prevention of Damage Caused  
by Jellyfish in Set-Net Using Fish Behavior Analysis Based on Chaos and Fractal

研究代表者

森住 昇（MORIZUMI NOBORU）

阿南工業高等専門学校・制御情報工学科・嘱託教授

研究者番号：70038016

研究成果の概要（和文）：クラゲ被害を防止する定置網システムの開発を目指してシステム工学と水産学を融合させた総合的な研究を展開した。クラゲが抜けて魚は入網する漁網の最適なメッシュサイズを決定するために、魚の複雑な適応行動にカオス・フラクタル理論を適用した。様々なメッシュサイズを持つ定置網に対する魚行動解析を実施し、複雑な魚行動を分析するための画像処理システムとカオス・フラクタル指標の開発に成功した。さらに、魚行動モデルをコンピュータシミュレーションすることで最適な漁網を決定する手法を確立した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a comprehensive research about combined fisheries and systems science building up the set net fishing system to prevent jellyfish damages. The chaos and fractal theories have been applied to the fish's complex behavior in which the optimal mesh size will be decided to pass jellyfish but to catch fish. We have succeed at development of image processing system and chaos-fractal characteristics for analysis of its behaviors through the many experiments with the various mesh sizes of net. And, we establish a method to decide the optimal net using computer simulation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成22年度	900,000	270,000	1,170,000
平成23年度	1,200,000	360,000	1,560,000
平成24年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・システム工学

キーワード：カオス，フラクタル，魚行動モデル，生物行動，定置網漁，クラゲ被害防止

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 現在、日本の定置網漁ではクラゲの入網による漁獲被害が深刻であり解決が求められている。徳島県では、小型クラゲが大量発生し定置網漁における漁具の破損、漁獲物の鮮度低下、選別作業の効率低下などの被害が出ている。そこで、県水産研究所では道網の

途中にクラゲを除去するためメッシュサイズの大きい漁網を設置する「クラゲ抜きシステム JENON」を開発、漁業上の効果を調査し（図1参照）、以下の研究成果を得た。

- ① 小型クラゲはメッシュサイズ約 30cm で抜けることを水槽実験で確認
- ② 漁獲対象の魚はメッシュサイズ約 30cm で網から逃げないことを水槽実験で確認

- ③ メッシュサイズ 30cm の JENON を実際の定置網に導入し、小型クラゲと魚の行動を水中固定ビデオカメラと水中ロボット ROV で観察し、漁労上の効果を確認

その後の回流水槽による実験で直径  $R$  のクラゲがスムーズに通過するメッシュサイズ(目合)  $W_{jsh}$  は、以下の不等式を満足するように設計すればよいことが判明した。

$$W_{jsh} > R\pi / 4.3 \quad (1)$$

ここでの問題は、クラゲと魚の入網分離が目視による動向観察であり、簡単な計数調査に終わっていることである。実用に耐えうる数値データにするためには、式(1)を満足する  $W_{jsh}$  よりも大きい目合の道網で「魚は回避し、大半のクラゲは通過する」最適な漁網のメッシュサイズ  $W_{swt}$  を科学的分析に基づいて決定されることが求められる。

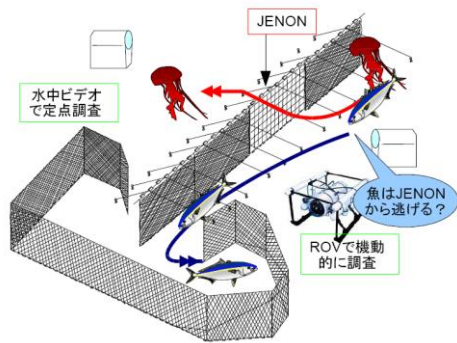


図1 小型クラゲ被害防止システムの概要

(2) 研究代表者の研究グループは、特定の環境下における魚の複雑な適応行動ルールの抽出手法とその工学的応用についてシステム工学の立場で研究してきた。特に、魚類のエッジ領域(遊泳領域が構造物で拘束される水域)における遊泳行動について VTR 画像から時系列データを抽出する画像処理技術を構築、魚類の行動パターンを分析するカオス・フラクタル理論を用いた解析手法により、以下の研究成果を得た。

- ① 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
- ② 行動パターンの違いが、カオスやフラクタル指数の違いとなることを確認
- ③ 魚行動を再現する計算機シミュレーションにより魚類行動の精密解析が可能

## 2. 研究の目的

(1) 研究代表者が所属する阿南高専の研究グループ、研究分担者が所属する徳島県水産研究所の研究グループと研究協力者が所属す

る漁協が産官学の連携チームを組織し、以下の研究を推進することにした。

- ① 魚の漁網に対する遊泳行動の解析  
クラゲは遊泳力が弱いので漁網のメッシュサイズが大きいと潮流により定置網から抜けてしまう。魚は遊泳力が強く、比較的高い知能で自立的な行動を取ることができる。そこで、メッシュサイズがどの位の大きさを壁と認識して入網するかを、最初に個体数を「1」として水槽実験で行動データを取得し、我々がこれまで開発してきたカオス・フラクタル理論をベースとする解析プログラムを用いて、魚の漁網近傍における遊泳行動を定量的かつ精密に分析する。ここで、この目合の大きい漁網に対する回避行動を「漁網壁認識行動」と呼称する。
- ② 漁網に対する魚の群行動の解析  
実際の定置網漁において魚は群行動をとるので、多数匹の魚群(最低でも数十個体以上)を用いて水槽実験を実施する。得られたデータから魚類の群行動モデルをシステム工学的アプローチで構築し、様々な漁網のメッシュサイズに対する魚の群行動を解析する。その際には、式(1)に示したクラゲ通過サイズ  $W_{jsh}$  を上回るサイズの  $W_{swt}$  をちゃんとした科学的分析の上で決定する。
- ③ 実際の定置網漁に関する実証研究  
①と②の分析結果をもとに、クラゲ被害防止システム「JENON」を組み込んだ定置網を実際の定置網漁に適用し、その効果を調べてシステムの不具合や改良点を洗い出す。これらの結果を研究にフィードバックして実際の漁業に効果的な利用技術を確認する。

(2) 徳島県の定置網漁において試験的にクラゲ被害防止システムが導入され水産学研究が開始されているが、様々な海中の条件下でどのような漁網メッシュサイズの JENON を使用すると効果的であるかなど数値的・分析データが存在していない。そこで、以下の項目を本研究の目的として科学技術上の研究成果を上げることになる。

- ① 漁網メッシュサイズがクラゲと魚の遊泳行動に与える影響をカオス・フラクタル理論により定量的に分析し、クラゲ被害防止システムの効果を科学的に検証
- ② クラゲや魚などの魚類の遊泳行動をシステム工学的にモデリングし、日本近海の定置網漁に対してより効果的なクラゲ被害防止システム技術の利用法を開発

以上により、日本における定置網漁業に貢献するクラゲ被害防止システム利用技術を確認することが本研究の最終目標となる。

### 3. 研究の方法

(1) 阿南高専、徳島県水産研究所、徳島県漁業協同組合の3者が緊密に連携しながら、以下のシナリオを従い研究を進展させた。

フェーズ1：漁網のメッシュサイズと「魚の漁網壁認識行動」との関連についてカオス・フラクタル理論を用いて解析

フェーズ2：様々なメッシュサイズの漁網に対する魚の群行動についてシステム工学的アプローチを用いてモデリングを実施

フェーズ3：フェーズ1、2の結果を基に最適なメッシュサイズの決定法を確立

フェーズ4：新しく確立したクラゲ被害防止システムを実際の定置網漁で検証

平成22～24年度の研究期間において実施した方法の概要を年度毎に以下に示す。

#### (1) 平成22年度

- ① 魚遊泳行動をVTR画像から解析する計測システムを用いてエッジ領域から環境刺激を受けた魚の行動軌跡のカオス・フラクタル指数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より大規模な水槽実験ができるようにした。具体的には様々な供試魚を様々な環境刺激下で行動観察実験が可能とするため水産研にある大型水槽にも使用可能な魚群行動撮像システムの開発に着手した。
- ② カオス・フラクタル理論による時系列データを求めるプログラムを開発しており、これを用いてマアジの魚行動の特徴量を抽出し、魚の漁網壁認識行動を解析する手法を開発した。

#### (2) 平成23年度

- ① 様々なメッシュサイズの漁網に対する魚の群行動を水槽実験し、その行動モデリングをシステム工学的アプローチにより行うため、目合い3.75cm、7.5cm、15cm、30cmのクラゲ被害防止漁網モデルを実験水槽のサイズに合わせて開発した。
- ② 一匹のマアジが様々な目合いを持つ漁網モデルに対する実験が完了したので、供試魚を50匹まで増やして漁網に対する魚群行動実験を開始した。実験規模が大規模になってきたことから同時に50匹程度の供試魚の遊泳行動をさせる数十匹の魚群行動を解析できる画像解析アルゴリズムの開発に着手した。

#### (3) 平成24年度

- ① 実際の定置網漁でフィールド実験を予定していたが、水中撮像システムと画像処理システムの改良が必要であったためそちらに努力を傾注した結果、高精度の水

中撮像と20個体の遊泳行動がトラッキングできる画像処理ソフトが完成した。

- ② 魚遊泳行動の時間フラクタルをさらに精密に調べるため、これまでのカオス・フラクタル指数に加えて、Higuchiの方法に基づくフラクタル指数解析プログラムを開発して解析した。
- ③ これまでの定置網に対するシステム工学的分析に基づいた魚群行動シミュレータを開発し、計算機シミュレーションにより、クラゲ防止ネットに対する魚行動を事前に見積もることができるシミュレーション技術を確立した。

### 4. 研究成果

先行研究で小型の水槽実験装置とその撮像システムは完成していたが、本研究では供試魚としてマアジを供試魚としたため、徳島県水産研究所にある大型水槽の実験装置とその撮像システムを開発することが最初の取組みとなった。

平成22～24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。

ここで、徳島県水産研究所において本研究に関する勉強会を開催し、今後の計画について協議するとともに、年度毎に本研究の成果報告を研究所所長に対して実施したことを付記しておく。

#### (1) 平成22年度

- ① これまでの先行研究で金魚を供試魚とした場合の水槽実験装置とその撮像システムを日本の近海漁業で有用魚とされるマアジを供試魚は完成していたが内の前年度はマアジを試験魚とし1個体とした場合の行動解析(図2参照)であったが、本年度はマアジ50匹を供試魚とした魚の群れが、定置網の道網部に設置するクラゲ防止システムの日合(漁網メッシュ幅)に対してどのような行動をとるかを水槽実験し、統計解析により分析した。

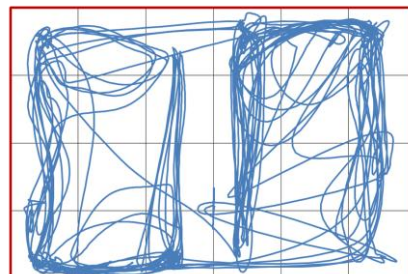


図2 画像解析により得られた単独個体の漁網に対する遊泳軌跡

- ② マアジ50匹による魚群行動の水槽実験より取得した魚群サイズと魚群の空間的運

動の時系列分析により、定置網に用いるメッシュ幅は体長の2倍程度以下であるなら「壁に対するのと同じ群れ行動：漁網を抜けることなく並進する」ことが判明した。

- ③ 魚行動のモデリングに関しては個体数が「1」の場合に、精度の高い行動シミュレーションが可能であることを水槽実験とコンピュータシミュレーションのデータをカオス・フラクタル解析することで比較し、明らかにした。具体的には、様々な形状の水槽で試験魚を遊泳させた場合に、そのエッジ領域の環境刺激に応じた壁並進性とコーナー脱出アルゴリズムに魚の泳速について主方向をガウス分布、泳速ノルムをアーラン分布でモデル化することで実現することができた。

(2) 平成 23 年度

- ① 前年度はマアジを試験魚とし1個体とした場合の行動解析であったが、本年度はマアジ50匹を供試魚とした魚の群れが定置網の道網部に設置するクラゲ防止システムの目合（漁網メッシュ幅）に対してどのような行動をとるかを水槽実験し、統計解析により分析した（図3、4参照）。

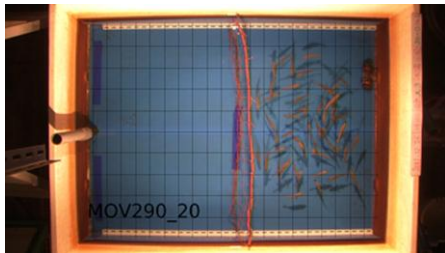


図3 漁網モデル（目合 7.5 cm）に対する魚群行動（50匹）

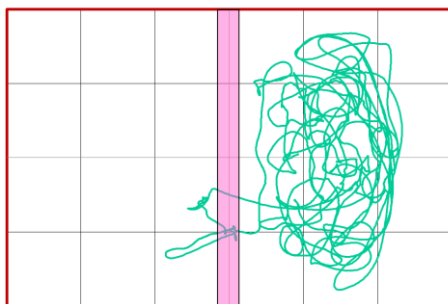


図4 画像解析により得られた魚群（50匹）中の1個体が示す漁網に対する遊泳軌跡

- ② マアジ50匹による魚群行動の水槽実験より取得した魚群サイズと魚群の空間的運動の時系列分析により、定置網に用いるメッシュ幅は体長程度以下であるなら「壁に対するのと同じ行動：漁網を抜けることなく並進する」ことが判明した。

- ③ 魚行動のモデリングに関しては個体数が「1」の場合に、精度の高い行動シミュレーションが可能であることを水槽実験とコンピュータシミュレーションのデータをカオス・フラクタル解析することで比較し明らかにした（図5参照）。具体的には、様々な環境刺激を想定した水槽で魚を遊泳させた場合、そのエッジ領域の環境刺激に応じた壁並進性とコーナー脱出アルゴリズムに泳速について主方向をガウス分布、泳速ノルムをアーラン分布でモデル化することで実現することができた。

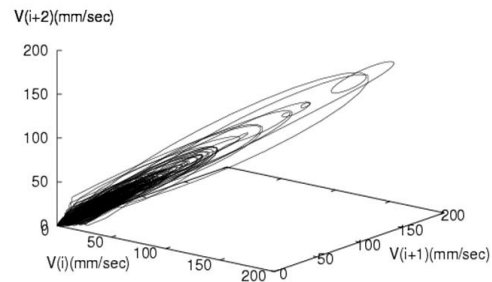


図5 魚群（50匹）中の1個体が示す複雑なカオスアトラクタ

以上により、研究計画の「フェーズ2：様々なメッシュサイズの漁網に対する魚の群れ行動についてシステム工学的アプローチを用いてモデリングを実施」が達成できた

(3) 平成 24 年度

- ① 前年度は漁網に対する魚群行動の統計解析であったが、本年度は魚群行動のカオス・フラクタル解析により定置網の道網部に設置するクラゲ防止システムの漁網メッシュ幅に対してどのような行動をとるかを分析するため、3,6,12,24匹と魚群サイズを変えて水槽実験を実施した。
- ② 水槽実験より取得した魚群行動の泳速に関する時系列データと遊泳軌跡の幾何学データのカオス・フラクタル解析により定置網に用いるメッシュ幅は体長の2倍以下で「壁に対するのと同じ魚群行動：漁網を抜けることなく並進する」ことを数値的に明らかにした。
- ③ 魚行動のモデリングに関して、魚群行動を計算機シミュレーションが可能であることを水槽実験とコンピュータシミュレーションのデータをカオス・フラクタル解析することで明らかにした（図6参照）。

具体的には、魚群の遊泳水域におけるエッジ領域の誘引・忌避的の刺激に応じた行動フィールドのポテンシャルを定義することで漁網に対する魚群行動モデルを実現し、コンピュータによる数値シミュレーションを実際の水槽実験と比較することで、様々な環境条件

を持つ場合の漁網に対する魚群行動の定性的な見積りが可能となった。

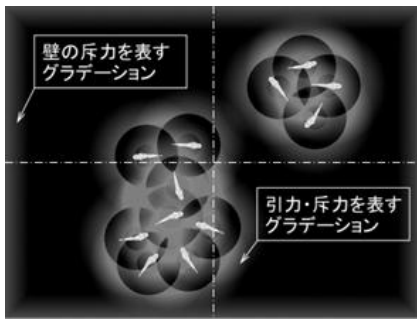


図6 環境属性をポテンシャル化したフィールド中で魚群行動をとる複数個体のシミュレーション

ここで、本研究により得られたクラゲ被害防止漁網システムに対する水槽実験とコンピュータシミュレーションに得られた結果をまとめる。

まず、泳速のカオス性（魚行動のゆらぎの性質）であるが、泳速のリアプノフ指数を分析することにより、単独個体の指数は魚群のそれより大きくなることから、群行動により行動のカオス的ゆらぎの低下することがわかった。さらに、図7に示すように、漁網のメッシュサイズが大きくなると魚の「漁網壁認識行動」に関するゆらぎ（壁とみるか通り抜け可能な網と判断するかのゆらぎ）が大きくなることがわかった。

次に遊泳軌跡の自己アフィン指数（魚行動の幾何学的性質を示す）であるが、単独の指数は魚群のそれより大きくなることから、群行動により個体行動が拘束され、漁網近傍の行動ゆらぎが低下することから、水平方向と垂直方向の自己アフィン性が異なるという「行動のマルチフラクタル性の顕著化」が見られることがわかった。

以上は、図8に示す統計解析による魚群サイズの変動（魚群が大きくなるとより大きなメッシュサイズでも網抜けしにくくなる）を支持するものであり、群行動による個々の個体行動を拘束することにより目合がより大きいものでも魚の「漁網壁認識行動」が強くなると予測できる。

これらにより、体長サイズと漁網メッシュの関係は目合の最適クラゲ抜きサイズ  $W_{swt}$  は最低のサイズでも、ターゲットとする魚類の体長サイズ程度になることが判明した。実際の海洋では、水流による環境刺激が強くなるので体長の2倍程度まではメッシュサイズを大きくでき、よりクラゲ防止の効果が大きくなると考えられる。ただ、これを支持するためには、他のスケールによる水槽実験や実際の漁場におけるフィールド実験が必要であろう。

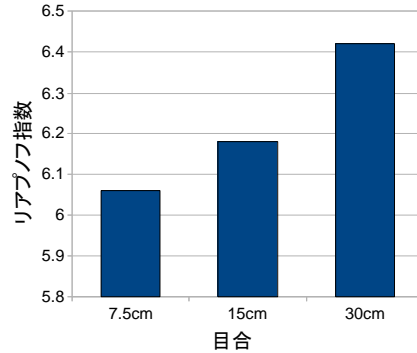


図7 漁網モデルのメッシュサイズによる行動ゆらぎの大きさの違い

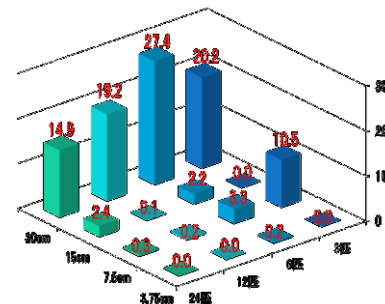


図8 魚群サイズの違いによる漁網すり抜けの強度

以上により、計画の「フェーズ3：魚の漁網壁認識行動とその群行動のシステム工学的考察を基にクラゲは抜けるが魚は抜けない最適なメッシュサイズの決定法を確立」は達成できた。本研究の成果は、徳島県水産研究所所長と外部者（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、魚群サイズの違いによる漁網に対する魚行動パターンの精密な分析と実際の定置網における効果検証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

〔雑誌論文〕（計7件）

- ① 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 森住昇, Realization of Fish Behavior in Edge Region Using a Mobile Robot and Its Chaos Analysis, Proceedings of the 2010 IEEE, 査読有, Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, 2010, pp.1063-1068
- ② 杉野隆三郎, 福田耕治, 小林美緒, 森住昇, Development of Fish-like Boid Simulator Based on Biological Code of Behavior, Proceedings of SICE Annual Conference 2011, 査読有, 計測自動制御学会, 2011, pp.2899-2902

- ③ 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 森住昇, Analysis of Mobile Robot Implemented Fish Behavior Rules Using Fractal and Information Content, Proceedings of SICE Annual Conference 2011, 査読有, 計測自動制御学会, 2011, pp.1172-1177
- ④ 吉田貴一, 杉野隆三郎, 平山基, 森住昇, Development of SPH Approach for Hydro dynamics of Around Fish Body, Proceedings of SICE Annual Conference 2013, 査読有, 計測自動制御学会, 2013, 掲載予定
- ⑤ 石原葵, 杉野隆三郎, 福田耕治, 森住昇, Numerical Accuracy of Extraction Shape from Point Cloud Using CIP-LSM, Proc. of SICE Annual Conference 2013, 査読有, 計測自動制御学会, 2013, 掲載予定
- ⑥ 榎田佳那, 福田耕治, 杉野隆三郎, 森住昇, Computational Algorithm for Fish Schooling using Bitmap Image, Proc. of SICE Annual Conference 2013, 査読有, 計測自動制御学会, 2013, 掲載予定
- ⑦ 森本眞樹, 杉野隆三郎, 福田耕治, 伊丹伸, 森住昇, Development of Measurement System and Complexity Analysis for Three-Dimensional Fish Swimming Behavior, Proceedings of SICE Annual Conference 2013, 査読有, 計測自動制御学会, 2013, 掲載予定

[学会発表] (計 12 件)

- ① 福田耕治, 杉野隆三郎, 武蔵美緒, 森住昇, 魚行動のカオス・フラクタル解析と移動ロボットへの適用, 生体情報処理と高度情報処理シンポジウム 2011, 長岡技術科学大学, 2011
- ② 杉野隆三郎, 福田耕治, 武蔵美緒, 森住昇, 鎌田信一郎, 漁網に対する魚行動のカオス・フラクタル解析, 平成 23 年度日本水産学会春季大会, 日本水産学会, 2011
- ③ 福田耕治, 杉野隆三郎, 武蔵美緒, 森住昇, 鎌田信一郎, 漁網に対する魚行動の情報量による解析, 平成 23 年度日本水産学会春季大会, 日本水産学会, 2011
- ④ 杉野隆三郎, 福田耕治, 武蔵美緒, 森住昇, 鎌田信一郎, 漁網付近に見られる魚行動のカオス性, 平成 23 年度日本水産学会秋季大会, 日本水産学会, 2011
- ⑤ 福田耕治, 杉野隆三郎, 武蔵美緒, 森住昇, 鎌田信一郎, 漁網に対する魚行動の情報エントロピー, 平成 23 年度日本水産学会秋季大会, 日本水産学会, 2011
- ⑥ 野村彰純, 杉野隆三郎, 福田耕治, 武蔵美緒, 森住昇, 魚行動のカオス・フラクタル解析, 平成 23 年電気関係学会四国支部連合大会, 電子情報通信学会, 2011
- ⑦ 杉野隆三郎, 福田耕治, 小林美緒, 森住昇, 鎌田信一郎, 漁網に対する魚群行動実験についての一考察, 平成 24 年度日本水産学会春季大会, 2012
- ⑧ 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 森住昇, 鎌田信一郎, 漁網近傍における魚行動のカオス・フラクタル解析, 平成 24 年度日本水産学会春季大会, 2012
- ⑨ 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 森住昇, 守岡佐保, 鎌田信一郎, カオス・フラクタルによる魚群行動解析手法の開発, 平成 24 年度日本水産学会秋季大会, 2012
- ⑩ 杉野隆三郎, 福田耕治, 小林美緒, 森住昇, 守岡佐保, 鎌田信一郎, 漁網近傍における魚群のカオス・フラクタル性について, 平成 24 年度日本水産学会秋季大会, 2012
- ⑪ 榎田佳那, 杉野隆三郎, 福田耕治, 森住昇, 守岡佐保, 鎌田信一郎, 魚群における魚行動シミュレーションと解析, 平成 25 年度日本水産学会秋季大会, 2013
- ⑫ 野村彰純, 杉野隆三郎, 福田耕治, 小林美緒, 森住昇, 守岡佐保, 鎌田信一郎, クラゲ防止ネットに対する魚群行動の解析, 平成 25 年度日本水産学会秋季大会, 2013

[その他]

阿南工業高等専門学校公式ホームページに阿南高専・バイオミメティクス応用研究会のホームページがあり, 本研究に関する情報を掲載している。URLは以下である。

<http://www01.anan-nct.ac.jp/bita/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

森住 昇 (MORIZUMI NOBORU)  
阿南高専・制御情報工学科・嘱託教授  
研究者番号: 70038016

### (2) 研究分担者

杉野 隆三郎 (SUGINO RYUZABURO)  
阿南高専・制御情報工学科・教授  
研究者番号: 10259822

### (3) 研究分担者

小林 (旧姓: 武蔵) 美緒 (KOBAYASHI MIO)  
阿南高専・制御情報工学科・助教  
研究者番号: 30462146

### (4) 研究協力者

鎌田 信一郎 (KAMADA SHINICHIRO)  
徳島県水産研究所・研究員

### (5) 研究協力者

真崎 登志雄 (MAZAKI TOSHIO)  
徳島県牟岐東漁協・職員