

様 式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書



平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K07563

研究課題名 (和文) マグロ類の環境刺激に対する反応行動発現モデルの構築

研究課題名 (英文) Mathematical models for induced behaviour in response to the environmental stimulation in tuna species

研究代表者

鳥澤 真介 (Torisawa, Shinsuke)

近畿大学・農学部・講師

研究者番号：80399097

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,900,000 円

研究成果の概要 (和文) : 近年、クロマグロをはじめとするマグロ類は資源量の減少が世界的に重大な問題となっており、資源の回復と維持のための方策の実施が急務である。そのため、種苗生産から沖合域での大型生簀による飼育に至る本格的な完全養殖技術の早急な確立が望まれている。これらを実施するためには、特化の著しいマグロ類の行動特性の把握に留まらず、環境刺激 (光強度、空間サイズ、水温、流れ等) により、どのような行動を発現するのかを明らかにしなければならない。そこで、本研究では申請者らがすでに明らかにした主に視覚に依存した行動をするクロマグロおよびマグロ類が環境変化という外的刺激を受けた時に創発する反応行動の数理モデルの構築を試みた。

研究成果の概要 (英文) : The stocks of tuna species such as Pacific bluefin tuna, bigeye tuna and yellowfin tuna are recently decreasing. In order to maintain the abundance of tuna species, it is required to reveal the behaviour of tuna species. Therefore, we monitored the three-dimensional swimming behaviour of tuna species in the net cages and the purse seine nets using a stereo-video camera system and bio-logging technics. The environmental stimulations (light intensity, net shape, ambient depth, ambient temperature and water current) were also observed. Furthermore, we histologically determined the visual capabilities, which is predominant in tuna species. Based on these results, the integrated mathematical models for induced behaviour in response to the environmental stimulation in tuna species were established.

研究分野：水産学・漁業学

キーワード：水産学 マグロ養殖 行動生理 魚群行動モデル ステレオカメラ

## 1. 研究開始当初の背景

クロマグロは世界的に重要な水産資源であり、近年その資源量の減少が懸念され、本種の資源量の回復や維持が世界的に望まれている状況にある。そのため、近畿大学水産研究所ではクロマグロの養殖に取り組み、完全養殖に成功している。今後は、この種苗生産技術を用いて、飽和状態となっている沿岸域での養殖に留まらず、沖合域の生簀での飼育や天然海域への種苗放流をととして、マグロ類の資源の維持・管理の実施が現実のものとなるかもしれない。

しかし、水深数百メートルにおよぶ潜水、太平洋の横断回遊や高速での遊泳が可能である一方、泳ぎ続けなければ呼吸できず、狭い空間に簡単には適応できないという特化の著しいマグロ類においては、人の管理の下で安定して飼育・繁殖させることは非常に困難である。そのため、マグロ類の行動が、何によって、どのように発現するのか、行動発現機構を解明することが、その安定化を計るうえで重要な要素となる。

これまででは、行動発現メカニズムに関する研究例は非常に少なく、知見が乏しかったため、マグロ類の種苗生産技術の本格的な確立に向けて大きな障害となってきた。既存の研究では、魚類の行動に関する研究と刺激受容器の特性に関する研究はそれぞれの結果が比較されて議論されているものの、独立して実施されている。行動の発現機構を明らかにするためには、このような性質の異なる結果の統合化を、これまでとは異なるアプローチで解析する必要があるが、統合研究が十分に実施された例はほとんど見当たらなかった。

本研究の対象であるマグロ類でも生理学・行動学的な研究は着実に実施されている。視覚特性は明暗順応の順応変化に要する時間が Masuma et al.(2001)により組織学的に求められ、薄暮時の太陽光の照度上昇との比較から、行動に与える視覚の影響が示唆されている。また、Fritsches et al. (2003)によりマグロ類の視覚の感度特性が生理学的に求められ、行動生態に与える影響が議論されている。さらに、マグロ類の行動生態は Kitagawa et al. (2003)によって天然環境での行動が記録され、照度変化が行動に影響を与え、成長によりその特性が変化すると考察されている。しかし、現在までにこれらの知見の統合化は実現されていない。

## 2. 研究の目的

近年、クロマグロをはじめとするマグロ類は資源量の減少が世界的に重大な問題となっており、資源の回復と維持のための方策の実施が急務となっている。そのため、種苗生産から沖合域での浮沈式大型生簀による飼育に至るまでの本格的な完全養殖技術の早急な確立が望まれている。これらを実施するには、特化の著しいマグロ類の行動特性の把握に留まらず、環境刺激（光の強度、空間サ

イズ、深度、水温、流れ）を受けることによって、どのような行動を発現するのかを明らかにしなければならない。

そこで、本研究では申請者らがすでに明らかにした主に視覚に依存した行動をするクロマグロおよびマグロ類が環境変化という外的刺激を受けたときに創発する反応行動の数理モデルの構築を試みた。

## 3. 研究の方法

マグロ類（クロマグロ・キハダ・メバチ）の環境変化による外的刺激の受容特性、反応行動特性を求め、刺激に対する行動の数理モデルを構築することにより統合解析を実施し、反応行動発現機構の解明を試みた。

マグロ類の外的刺激受容は感覚器の受容特性（特に視覚）を生理学的に求め、外的刺激は環境モニタリング用記録器で計測し、その刺激に対する反応行動特性は行動学的手法により水中ステレオ・カメラと生物装着式記録計を用いて、3次元の生物行動情報の解明を試みた。

これらの統合解析には、工学的アプローチである刺激反応行動の数理モデル（個体ベースモデル）を構築することで、外的刺激と反応行動の関係の本質を明らかにし、構築した反応行動の数理モデルから、対象魚が外的刺激を受けることによって、どのような反応行動を創発するのか明らかにすることを試みた。

1) マグロ類の幼魚の行動実験には、生簀内の養成魚および旋網で作業時に網に囲われた対象魚を用い、魚群の遊泳行動をステレオ・ビデオカメラにより撮影・記録し、個体の3次元位置座標を抽出することで、3次元の運動解析を行った。この時の環境刺激として照度、空間サイズ、流れの変化も記録した。2) 得られた各個体の時系列の3次元位置座標から、遊泳速度や個体間距離、遊泳の同調性といった群行動指標を求めたうえで、刺激反応を表す数理モデルを構築し、行動に内在する個体間相互および空間や刺激に対する誘因・斥力といった行動と刺激受容の関係を表すモデル式の未知パラメータの導出を試みた。

3) 行動モニタリングを行った異なる体サイズの供試魚は、実験終了後直ちにブアン氏液により固定し、網膜の鉛直断面の切片標本作製して行動実験時の各照度下での明暗順応状態（網膜運動反応）を組織学的に調べた。これは視細胞層における色素上皮層の厚みと錐体細胞の外節の位置を計測することで求めることができる。明順応状態では色素上皮層は厚くなり錐体細胞の外節は外境界膜の近くに位置するのに対し、暗順応では色素上皮層は薄く錐体細胞の外節も外境界膜から遠くに位置するようになることからそれぞれの視細胞層に対する相対長さから定量的に算出した。

4) クロマグロ・キハダ・メバチの生理学的

な知見である感覚器の受容特性から外的刺激の受容、および行動学的な知見である外的刺激に対する反応行動特性の質の異なる両方の知見を工学的アプローチである数理モデル（個体ベースモデル）を適用して、統合解析を試みた。行動を要素別の力の線形結合で表している行動の数理モデルを用い、刺激受容特性のパラメータを取り入れることで、行動学と生理学を統合した解析を実施可能にする行動の数理モデルの構築を試みた。また、構築されたモデルから、反応行動の誘発メカニズムが明らかとなり、外的刺激を受けることにより、対象魚がどのような反応行動を創発するのかを明らかにすることが可能なため、さらに、通常時と異なる突発的な高速遊泳が発現する原因の解明、この行動が誘発されるメカニズムを探った。

#### 4. 研究成果

本研究ではクロマグロ、キハダ、メバチの刺激受容特性を生理学的、反応行動を行動学的に調べ、刺激反応行動の数理モデルを構築することで統合化し、外的刺激により対象魚がどのような反応行動を創発するのか、その行動誘発機構の解明を目的として研究を実施した。

生簀で養成されているクロマグロおよび旋網操業中に網地に囲われた空間で遊泳しているキハダ、メバチを対象として実験を行った。行動モニタリングでは、ステレオカメラを用いた光学的手法による各個体の3次元位置座標の時系列モニタリングを中心として、バイオテレメトリー手法を用いた計測を併せて実施し、限定された空間内で様々な環境に遭遇したときの対象魚の行動を記録した。

これらから、対象魚の行動特性として3次元的な空間の利用特性および複数個体間の行動の相互作用・同調性が明らかになった。同時に環境モニタリングとして、照度・水温・深度・流速および網地の変形を測定した。さらに、引き続き実施しているマグロ類の視認能力および刺激受容の特性に関する研究の結果を併せ、これらの結果から統合解析として、個体ベースの反応行動の数理モデルの構築を行った。

#### 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 7 件）

- 1) 坂本 誠・米山 和良・田丸 修・鳥澤 眞介・高木 力：ステレオビジョンによるマサバの3次元遊泳行動計測：パーティクルフィルタを用いた自動計測，日本水産学会誌，2018（印刷中）査読あり

- 2) Kazuyoshi Komeyama, Tatsuya Tanaka, Takeharu Yamaguchi, Shigeru Asaumi, Shinsuke Torisawa, and Tsutomu Takagi: Body Measurement of Reared Red Sea Bream Using Stereo Vision. Journal of Robotics and Mechatronics. Vol. 30, No.2, 2018. (Rb30-2-8905, 2018) 査読あり
- 3) 高木 力・米山 和良・阿部 悟・鳥澤 眞介・竹原 幸生・山口 武治・浅海 茂：画像解析を用いた非接触型養殖魚計測システムの開発，水産工学，第54巻，第3号，209-213，2018 査読あり
- 4) Satoru Abe, Tsutomu Takagi, Kohsei Takehara, Nobuo Kimura, Tomonori Hiraishi, Kazuyoshi Komeyama, Shinsuke Torisawa: How many fish in a tank? Constructing an automated fish counting system by using PTV analysis. *Selected papers from the 31<sup>st</sup> International Congress on High-Speed Imaging and Photonics. SPIE*. Vol. 10328, 56-59, 2017 査読あり
- 5) Tsutomu Takagi, Shizuka Ito, Shinsuke Torisawa, Yoshinobu Inada: Energy-Saving in Schooling Japanese Mackerel *Scomber japonicus* and the effect of induced velocity of wake vortices. Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms JABMECH, Vol. 4, No.1, 78-82, 2015 査読あり
- 6) Kazuyoshi KOMEYAMA, Shinsuke TORISAWA, Tsutomu TAKAGI: USING BEHAVIOURAL MEASUREMENTS AND A STATE-SPACE MODEL TO MONITOR THE CAPTURE PROCESS OF FISH BY FISHING GEAR. *Contributions on the 8<sup>th</sup> international workshop on methods for the development and evaluation of maritime technologies*, Vol. 9, 297-305, 2015 査読なし

- 7) Tsutomu TAKAGI, Shunsuke SUZUKI, Yasuhiro Yoshimura, Shinsuke Torisawa, Kazuyoshi Komeyama, Ippei Fusejima, Tatsuki Ohshima, Seiko Wada, Akitaka Hikosa, Takuto Kimura, Kousuke Yokota, Mitsunori Susuki, Yoshinori Nomura, Katsuya Suzuki, Shigeru Asaumi and Takashi Shimizu: Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems. *Contributions on the 8<sup>th</sup> international workshop on methods for the development and evaluation of maritime technologies*, Vol. 9, 131-140, 2015 査読なし

[学会発表] (計 25 件)

- 1) 米山和良・田中達也 (北大院水)・高橋勇樹 (水産機構水工研)・鳥澤真介 (近大農)・高木 力 (北大院水)・田丸 修 (水産機構水工研): 深層学習を応用した画像処理による半透明魚体の検出, 平成 30 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 品川, 平成 29 年 3 月 28 日 (2018)
- 2) 田中達也・米山和良・高木 力 (北大院水)・鳥澤真介 (近大農)・森田竜作・霍川幹史 (ダイニチ)・山口武治・浅海 茂 (古野電気): ステレオカメラによる非接触での養殖マダイの成長過程の追跡, 平成 30 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 品川, 平成 29 年 3 月 28 日 (2018)
- 3) 青木勇樹 (近大院農)・伊奈佳晃 (水産機構西海水研)・鳥澤真介 (近大農)・河邊玲・Gregory N. Nishihara (長大海セ)・高志利宜・玄 浩一郎 (水産機構西海水研): クロマグロの成長に伴う遊泳特性の変化, 平成 30 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 品川, 平成 29 年 3 月 29 日 (2018)
- 4) Norio Tanada, Shintaro Gomi, Tsutomu Takagi, Kazuyoshi Komeyama, Shinsuke Torisawa, Katsuya Suzuki, Rika Shiraki, Yoshihiro Nishiyama, Shigeru Asaumi: Development and evaluation of real-time simulation system of purse seine gear dynamics. 13th International workshop Methods for the Development and Evaluation of Maritime Technologies (DEMaT' 17), Sapporo, Japan, October 2-4 (2017)
- 5) Satoru Abe, Tsutomu Takagi, Kohsei Takehara, Nobuo Kimura, Tomonori Hiraishi, Kazuyoshi Komeyama, Shinsuke Torisawa, Takeharu Yamaguchi and Shigeru Asaumi: PTV-based Automatic Counting System for a Shoal of Fish Swimming in a Closed space. 13th International workshop Methods for the Development and Evaluation of Maritime Technologies (DEMaT' 17), Sapporo, Japan, October 2-4 (2017)
- 6) 米山和良・阿部 悟・高木 力 (北大院水)・鳥澤真介 (近大農)・森田竜作・霍川幹史 (ダイニチ)・山口武治・浅海 茂 (古野電気): 養魚管理を目的とした非接触計測によるマダイの体重推定, 平成 29 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 品川, 平成 29 年 3 月 28 日 (2017)
- 7) 阿部 悟・高木 力 (北大院水)・竹原幸生 (近大理工)・木村暢夫・平石智徳・米山和良 (北大院水)・鳥澤真介 (近大農)・山口武治・浅海 茂 (古野電気): 遊泳する魚群の個体数計測システムの開発 ― 個体画像抽出手法の違いが計数制度に与える影響 ―, 平成 29 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 品川, 平成 29 年 3 月 28 日 (2017)
- 8) 五味伸太郎・高木 力・棚田法男・米山和良 (北大院水)・鳥澤真介 (近大農)・鈴木勝也 (日東製網)・白木里香・西山義浩・浅海 茂 (古野電気): EKF を用いた網漁具の水中形状制御技術に関する基礎的研究 意図した水中形状を実現する漁具仕様を事前に推定できるか?, 平成 29 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 品川, 平成 29 年 3 月 27 日 (2017)
- 9) 棚田法男・五味伸太郎・高木 力・米山和良 (北大院水)・鳥澤真介 (近大農)・鈴木勝也 (日東製網)・白木里香・西山義浩・浅海 茂 (古野電気): 異なる操業環境下での旋網漁具の動態特性と EKF を用いた網地動態推定精度の向上, 平成 29 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 品川, 平成 29 年 3 月 27 日 (2017)
- 10) Satoru Abe, Tsutomu Takagi, Kohsei Takehara, Nobuo Kimura, Tomonori Hiraishi, Kazuyoshi Komeyama, Shinsuke Torisawa, Takeharu Yamaguchi and Shigeru Asaumi: How many fish in a tank? Constructing an automated fish counting system by using PTV analysis. The 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics (ICHSIP 31), Osaka, Japan, November (2016)
- 11) 米山和良 (鹿大水)・鳥澤真介 (近大農): ICT の水産業への導入: 最前線と今後の課題 3. 養魚管理技術への ICT 導入: 養魚モニタリング技術の開発, 平成 28 年度日本水産学会秋季大会, 近畿大学農学部, 奈良, 平成 28 年 9 月 11 日 (2016)
- 12) 阿部 悟・高木 力 (北大院水)・竹原幸生 (近大理工)・木村暢夫・平石智徳 (北

- 大院水)・米山和良(鹿大水)・鳥澤真介(近大農)・浅海 茂(古野電気):遊泳する魚群の個体数計測システムの開発-PTV 解析技術を用いた新たな試み-, 平成 28 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 品川, 平成 28 年 3 月 28 日(2016)
- 13) 棚田法男・高木 力・鈴木駿介(北大院水)・鳥澤真介(近大農)・鈴木勝也(日東製網)・西山義浩・白木里香・浅海 茂(古野電気):旋網漁具の水中動態のリアルタイムシミュレーションシステムの開発とその性能評価, 平成 28 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 品川, 平成 28 年 3 月 28 日(2016)
- 14) 高木 力・芳村泰裕・鈴木駿介(北大院水)・米山和良(鹿大水)・鳥澤真介(近大農)・伏島一平・大島達樹・和田聖子・彦坂明孝(水研セ開発セ):推測航法技術と超音波発信器を用いたハイブリッド法による個体の 3 次元遊泳軌跡推定技術の開発, 平成 28 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 品川, 平成 28 年 3 月 28 日(2016)
- 15) 坂本 誠・米山和良(鹿大水)・鳥澤真介(近大農)・高木 力(北大院水):ステレオカメラ画像計測によるパーティクルフィルタを用いた魚類の自動追跡, 平成 28 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 品川, 平成 28 年 3 月 28 日(2016)
- 16) 鈴木駿介・高木力・芳村泰裕・棚田法男(北大院水)・鳥澤真介(近大農)・米山和良(鹿大水)・伏島一平・大島達樹・和田聖子(水研セ開発セ)・鈴木也(日東製網)・浅海茂・清水孝士(古野電気):数値シミュレーションを用いたまき網漁具の動態解析:漁具形状は漁獲量に影響を与える, 平成 27 年度数理水産科学会, 北海道大学 水産学部, 函館, 平成 27 年 11 月 1 日(2015)
- 17) Kazuyoshi KOMEYAMA, Shinsuke TORISAWA, Tsutomu TAKAGI: USING BEHAVIOURAL MEASUREMENTS AND A STATE-SPACE MODEL TO MONITOR THE CAPTURE PROCESS OF FISH BY FISHING GEAR, 12th International Workshop Methods for Development and Evaluation of Maritime Technologies DEMat' 15, Aberdeen, Scotland, October 24-28 (2015)
- 18) 米山和良(鹿大水)・鳥澤真介(近大農)・高木力(北大院水):映像記録による状態空間モデルを用いた魚の行動計測, 平成 27 年度日本水産学会秋季大会, 東北大学 川内北キャンパス, 仙台, 平成 27 年 9 月 24 日(2015)
- 19) 片岡寛敬・光永靖・鳥澤真介・河内香織(近大農):ダムから流出したヘドロが魚類の酸素消費速度に与える影響, 応用生態工学会 第 19 回郡山大会, 日本大学工学部キャンパス 70 号館, 郡山(福島県), 平成 27 年 9 月 10 日(2015)
- 20) 鳥澤真介(近大農)・高木 力・鈴木駿介・芳村泰裕(北大院水)・米山和良(鹿大水)・伏島一平・大島達樹・和田聖子・彦坂明孝・薄 光憲(水研セ開発セ)・鈴木勝也(日東製網)・清水孝士(古野電気):まき網漁具の漁獲過程の解明-IV:漁具と魚群の行動の光学式 3 次元モニタリング技術の開発, 平成 27 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 東京, 2015
- 21) 鈴木俊介・高木 力・芳村泰裕(北大院水)・鳥澤真介(近大農)・米山和良(鹿大水)・伏島一平・大島達樹・和田聖子・彦坂明孝・木村拓人・横田耕介(水研セ開発セ)・野村芳徳・鈴木勝也(日東製網)・浅海 茂・清水孝士(古野電気):まき網漁具の漁獲過程の解明-I:操業のダイナミクスと行動評価技術の統合によるアプローチ, 平成 27 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 東京, 2015
- 22) 高木 力・鈴木駿介・芳村泰裕(北大院水)・鳥澤真介(近大農)・米山和良(鹿大水)・伏島一平・大島達樹・和田聖子・彦坂明孝・木村拓人・横田耕介(水研セ開発セ)・野村芳徳・鈴木勝也(日東製網)・浅海 茂・清水孝士(古野電気):まき網漁具の漁獲過程の解明-II:流動環境が漁具形状に与える影響, 平成 27 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 東京, 2015
- 23) 米山和良(鹿大水)・高木 力・鈴木駿介・芳村泰裕(北大院水)・鳥澤真介(近大農)・伏島一平・大島達樹・和田聖子・彦坂明孝・木村拓人・横田耕介(水研セ開発セ)・野村芳徳・鈴木勝也(日東製網)・浅海 茂・清水孝士(古野電気):まき網漁具の漁獲過程の解明-III:操業中の魚類行動計測技術の開発, 平成 27 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 東京, 2015
- 24) 神村裕之・鳥澤真介・光永 靖(近大院農):情報理論を用いたビワマスの行動の定量解析, 平成 27 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 東京, 2015
- 25) 伊奈佳晃(近大院農)・高木 力(北大院水)・奥田文人(近大農)・宮下 盛・倉田道雄・本領智記・澤田好史・滝井健二(近大水研)・福田漠生(水研セ国際水研)・鳥澤真介(近大農):遊泳時エネルギーがクロマグロ仔魚の沈降死発生に与える影響, 平成 27 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 東京, 2015

〔図書〕(計 1 件)

- 1) S. Torisawa, H. Fukuda, T. Takagi: Visual Physiology, Biology and Ecology of Bluefin Tuna, Chapter 14 (Edited by T. Kitagawa & S. Kimura), CRC Press, New York, pp 292-308 (2015)

〔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

鳥澤 真介 (TORISAWA Shinsuke)  
近畿大学・農学部・講師  
研究者番号：80399097

### (2) 研究分担者

( )  
研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )  
研究者番号：

### (4) 研究協力者

( )