

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23580269

研究課題名(和文)クロマグロ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) A mathematical model for induced behaviour in response to the environmental stimulation in Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis*

研究代表者

鳥澤 眞介 (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) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：高速遊泳や高深度への潜水が可能となるよう特化したクロマグロは、太平洋を横断回遊するといった高い適応能力を持つ一方で、狭い空間内では生残・飼育が困難であるという適応特化の極端な両面を併せ持っている。このクロマグロは近年その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浮沈式大型生簀による飼育に至るまでの完全養殖技術の確立が望まれている。そこで、本研究ではクロマグロの刺激受容特性を生理学的、反応行動を行動学的に調べ、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、数理行動モデルによる統合解析を実施した。

研究成果の概要(英文)： In order to make quantitative statements regarding behavior patterns in animals, it is important to establish whether new observations are statistically consistent with the animal's equilibrium behavior. From the perspective of information theory such a bias can be interpreted as the amount of information gained from a new measurement, relative to an existing equilibrium distribution.

We demonstrate the utility of the relative entropy by analyzing observed speed distributions of Pacific bluefin tuna. We show that the tuna's behavior is modified by traumatic stress, and that the resulting modification is dominated by the difference in central tendencies of the two distributions.

We find that the tuna's behavior is significantly altered for ca. 5 hours after release. Our analysis reveals a periodic fluctuation in speed corresponding to the moment just before sunrise on each day, a phenomenon related to the tuna's daily diving pattern that occurs in response to changes in ambient light

研究分野：農学

科研費の分科・細目：水産学・水産学一般

キーワード：行動生理 クロマグロ 養殖 行動モデル

## 1. 研究開始当初の背景

高速遊泳や水深数百メートルに及ぶ潜水が可能となるよう特化したクロマグロは、太平洋を横断回遊するといった高い適応能力を持つ一方で、狭い空間内では生残・飼育が困難であるという適応特化の極端な両面を併せ持っている。このクロマグロは近年その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完全養殖技術の確立が望まれている。これらの実現には、特化の著しい本種の行動特性の把握に留まらず、環境刺激によって本種が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。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おして、本種の資源の維持・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本種においては、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、本種の行動が、何によって、どのように発現するのか、その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非常に重要な要素となる。

これまでは、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、本種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い。

本研究の対象であるクロマグロ(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ないままであった。

## 2. 研究の目的

我々はこれらの独立した研究の統合化を目指して、刺激の受容と反応行動の定量的な数理解析に取り組んでいる。その結果、これまでに本種幼魚の行動が視覚に大きく依存し、視覚特性が行動を決定付ける主な要因だということを示した。

これらの行動学・生理学的見地からの異なる性質の研究成果は、近年発展が目覚ましい数値シミュレーションを用いた魚群行動のメカニズムを探る数理的手法を適用して、魚類の行動を外力の線形結合で表す数理モデルを構築することによって、統合解析が可能となると考えられる(Sannomiya & Matuda, 1987;

Takagi et al., 1993; Suzuki et al., 2003)。

そこで、本研究では刺激受容特性と行動特性の統合解析を魚群行動の数理モデルを用いて実施し、環境変化に伴う外部刺激に対する反応行動に内在している行動創発メカニズムを明らかにすることを試みた。

### 3. 研究の方法

本研究課題においては、クロマグロの変態直後の幼魚25日齢から性成熟する親魚までを成長段階をおって実験を実施し、環境変化による外的刺激に対する反応行動の誘発メカニズムを成長段階別に明らかにした。

1) まず光環境に注目して、外的刺激の受容特性として、光の知覚能力を明暗順応能力と視力から求め、成長に伴うその発達過程を明らかにした。

2) 刺激反応行動の特性は、照度別の行動特性を定量的に評価し、成長による特性変化を明らかにした。

3) 次に重要な要因となる沖合養殖での水深の変化との関係を求める。この水深の変化は海水の光の透過率の低さにより、光環境にも影響するため、深度別に上記の光強度別の視覚・行動特性を明らかにした。

4) 同時に、水温、流速および空間サイズも実験環境の変数として解析を実施した。

5) これらの結果を統合して、外的刺激に対する反応行動の数理モデルを構築し、刺激に対する反応行動に内在する行動誘発のメカニズムを明らかにする。これらから、成長に伴う刺激受容特性と知覚能力および行動生態・行動生理における発達・特化・獲得の過程を明らかにした。

6) さらに、種苗生産・養殖現場で望まれる環境変化により、本種はどのような行動を誘発するのかを明らかにし、天然海域と同様な行動（養成時に問題となっている突発的高速遊泳などを起こさない）本種にとって望まし

い環境とはどのようなものなのかの提案を試みた。

### 4. 研究成果

本研究ではクロマグロ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。本年度は沖合養殖生簀で養成されている全長30cmから150cmにおよぶ孵化後数ヶ月から3年の養成クロマグロ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、生簀内の様々な環境に遭遇したときのクロマグロの行動を記録した。

これらから、当該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・同調性を求めた。同時に生簀の環境モニタリングにより、照度・水温・溶存酸素量・流速および生簀網地の吹かれを測定した。さらに、引き続き実施しているクロマグロ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て、これらの結果から統合解析を実施して、数理行動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 11 件)

- 1) Tsutomu Takagi, Syunsuke Miyata, Ippei Fusejima, Tatsuki Oshima, Takayoshi Uehara, Katsuya Suzuki, Yoshinori Nomura, Masamichi Kanechiku and Shinsuke Torisawa: Effect of mesh size on sinking

- characteristics of purse seine net: a parametric study by numerical simulation. Fisheries Engineering (印刷中), 査読有
- 2) Kazuyoshi Komeyama, Minoru Kadota, Shinsuke Torisawa and Tsutomu Takagi: Three-dimensional trajectories of cultivated Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* in an aquaculture net cage. *Aquaculture Environment Interactions*, Vol. **4**, 81-90, (2013). 査読有, doi: 10.3354/aei00075
  - 3) Tsutomu Takagi, Shizuka Ito, Shinsuke Torisawa, Yoshinobu Inada: Energy Saving Effect of Fish Schooling in the Japanese Mackerel, *Scomber japonicus*. *Mathematical and Physical Fisheries Science*, Vol. **10**, 2-13 (2013). 査読有
  - 4) Shinsuke Torisawa, Minoru Kadota, Kazuyoshi Komeyama and Tsutomu Takagi: A method of three-dimensional monitoring of free-swimming Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis*, cultured in a net cage using a digital stereo-video camera system. *Fisheries Engineering* **49** (1), 13-20, (2012). 査読有
  - 5) Minoru Kadota\*, Shinsuke Torisawa\*, Takeshi Yamane and Tsutomu Takagi: Constructing a mathematical model of fishery system, and estimating ideal aquaculture and catch-fishery products. *Fisheries Engineering* **48** (3), 197-203 (2012) (\*equally contributed). 査読有
  - 6) Shinsuke TORISAWA, Hiromu FUKUDA, Katsuya SUZUKI and Tsutomu TAKAGI: Schooling behaviour of juvenile Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* depends on their vision development. *Journal of Fish Biology* **79** (5), 1291-1303 (2011). 査読有, doi:10.1111/j.1095-8649.2011.03113.x
  - 7) Minoru Kadota, Eric Jastin White, Shinsuke Torisawa, Kazuyoshi Komeyama, and Tsutomu Takagi: Employing Relative Entropy Techniques for Accessing Modifications in Animal behavior. *PLoS ONE* **6** (12), e28241, 1-6 (2011). 査読有, doi:10.1371/journal.pone.0028241
  - 8) Minoru Kadota, Shinsuke Torisawa, Hiromu Fukuda, Tsutomu Takagi and Kazuyoshi Komeyama: Analysis of juvenile tuna movements as correlated random walk. *Fisheries Science* **77** (6), 993-998 (2011). 査読有, DOI: 10.1007/s12562-011-0415-y
  - 9) Hiromu Fukuda, Shinsuke Torisawa, Takeshi Yamane and Tsutomu Takagi: Concernment of rheotactic reaction and schooling behaviour traits of the dwarf sweetfish, *Plecoglossus altivelis* on a capture process of the set-net "eri". *Fisheries Engineering* **48** (2), 117-124 (2011). 査読有
  - 10) Kazuyoshi Komeyama, Minoru Kadota, Shinsuke Torisawa, Katsuya Suzuki, Yuichi Tsuda and Tsutomu Takagi: Measuring the swimming behaviour of a reared Pacific bluefintuna in a submerged aquaculture net cage. *Aquatic Living Resources* **24** (2), 99-105 (2011). 査読有, DOI: 10.1051/alr/2011112
  - 11) Shinsuke TORISAWA, Minoru KADOTA, Kazuyoshi KOMEYAMA, Katsuya SUZUKI, and Tsutomu TAKAGI: A digital stereo-video camera system for three-dimensional monitoring of free-swimming Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis*, cultured in a net cage. *Aquatic Living Resources* **24** (2), 107-112 (2011). 査読有, DOI: 10.1051/alr/2011133

〔学会発表〕(計 27 件)

- 1) 鳥澤眞介・伊藤静香・松田友博・堀井陵平・高木 力・稲田喜信：マサバ魚群の遊泳時の総移動コストと群内情報伝播，平成 26 年度日本水産学会春季大会，北海道大学水産学部部，函館，平成 26 年 3 月 30 日(2014)
- 2) 高木力・伊藤静香・鳥澤眞介・稲田喜信：魚群遊泳の流体力学的機能性，平成 26 年度日本水産学会春季大会，北海道大学水産学部部，函館，平成 26 年 3 月 30 日(2014)
- 3) 伊奈佳晃・高木 力・宮下 盛・澤田好史・倉田道雄・福田漢生・鳥澤眞介：クロマグロ仔魚の 3 次元遊泳行動解析 沈降死発生メカニズム解明に向けた取り組み，平成 26 年度日本水産学会春季大会，北海道大学水産学部部，函館，平成 26 年 3 月 30 日(2014)
- 4) 伊藤静香・高木力・鳥澤眞介・稲田喜信：遊泳時エネルギーからみたマサバ幼魚の群行動の機能性，2013 年度 数理水産科学学術講演会，近畿大学農学部，奈良，平成 25 年 11 月 1 日(2013)
- 5) 宮田俊輔・高木力・金築正道・鳥澤眞介・伏島一平・大島達樹・上原崇敬・鈴木勝也・野村芳徳：目合の大きさが旋網漁具の沈降深度および速度に与える影響：漁具形状シミュレーションによる評価，2013 年度 数理水産科学学術講演会，近大農学部，奈良，平成 25 年 11 月 1 日(2013)
- 6) S. TORISAWA, M. MORIMOTO, K. KOMEYAMA, T. TAKAGI and T. YAMANE: Three-dimensional monitoring of Pacific bluefin tuna cultured in an off shore net cage using a digital stereo camera system. The 15<sup>th</sup> French-Japanese Oceanography Symposium 2013, Marseille, France, Oct. 21-22, (2013) (Poster Presentation)
- 7) Poisson F., Mitsunaga Y., Kojima T., Seret B., Demarcq, Torisawa S., Banegue A. Groul J.M.: Satellite tagging of blue sharks (*Prionace glauca*) in the Gulf of Lions: depth behaviour, temperature experience and movements: Preliminary results. The 15<sup>th</sup> French-Japanese Oceanography Symposium 2013, Marseille, France, Oct. 21-22, (2013) (Poster Presentation)
- 8) Tsutomu Takagi<sup>1</sup>, Syunsuke Miyata<sup>1</sup>, Ippei Fusejima<sup>2</sup>, Tatsuki Oshima<sup>2</sup>, Takayoshi Uehara<sup>2</sup>, Katsuya Suzuki<sup>3</sup>, Yoshinori Nomura<sup>3</sup> Masamichi Kanechiku<sup>1</sup> and Shisuke Torisawa<sup>1</sup>: Potential of computer simulation for buoy-line type of purse seine fishing. 11<sup>th</sup> International Workshop Methods for Development and Evaluation of Maritime Technologies DEMaT'13, Rostock, Germany, October 16-18 (2013)
- 9) 田中一成・米山和良・高木 力・鳥澤眞介・森本真人・安樂和彦：生簀内における養殖クロマグロの巡回行動の分析，日本水産増殖学会第 12 回大会，鹿児島大学，鹿児島，平成 25 年 10 月 14 日(2013) (ポスター発表)
- 10) 森本真人・米山和良・門田 実・鳥澤眞介・高木 力・浅海 茂：生簀内における養殖クロマグロの行動解析，平成 25 年度日本水産学会秋季大会，三重大学，三重，平成 25 年 9 月 20 日(2013)(ポスター発表)
- 11) 宮田俊輔・高木 力・金築正道・鳥澤眞介 (近大農)・伏島一平・大島達樹・上原崇敬 (水研セ開発セ)・鈴木勝也・野村芳徳 (日東製網)：網地シミュレーター "NaLA" のまき網への応用，平成 25 年度日本水産学会秋季大会，三重大学，三

- 重,平成 25 年 9 月 21 日(2013)(ポスター発表)
- 12) Tsutomu Takagi, Shizuka Ito, Takuo Takami, Shinsuke Torisawa, Yoshinobu Inada: Function of fish schooling from the perspective of saving kinetic energy, Society of Experimental Biology annual meeting 2013, Valencia Conference Centre, Valencia, Spain, July 3-6 (2013) (Oral presentation).
- 13) 鳥澤真介・高木 力・門田 実・森本真人・米山和良・浅海 茂・小林次彦: クロマグロ沖合養殖施設の研究開発'12- - ステレオカメラによるクロマグロのモニタリング - , 平成 25 年度日本水産学会春季大会, 東京海洋大学, 東京, 平成 25 年 3 月 27 日(2013)
- 14) 鳥澤真介・門田 実・米山和良・浅海 茂・小林次彦・高木 力: クロマグロ沖合養殖施設の研究開発'11-IV ステレオカメラによるクロマグロの体長組成推定 , 平成 24 年度日本水産学会大会, 東京海洋大学, 東京, 平成 24 年 3 月 27 日(2012)
- 15) S. TORISAWA, M. KADOTA, K. KOMEYAMA, T. TAKAGI and T. YAMANE: There-Dimensional Monitoring of Pacific Bluefin Tuna cultured in an Off Shore Net Cage using a Digital Stereo Camera System. 10<sup>th</sup> International Workshop Methods for Development and Evaluation of Maritime Technologies DEMaT'11, Split, Croatia, Oct 26-28 (2011)(Oral presentation)
- 16) T. TAKAGI, K. SUZUKI, S. TORISAWA, K. KOMEYAMA, M. KADOTA and S. ASAUMI: Application of NaLA: From Study to Practical Use. 10<sup>th</sup> International Workshop Methods for Development and Evaluation of Maritime Technologies DEMaT'11, Split, Croatia, October 27(2011)

- 17) 鳥澤真介・門田 実・米山和良・浅海 茂・小林次彦・高木 力: クロマグロ沖合型養殖施設の開発 - 光学式ステレオ撮影による魚体サイズ測定 - 平成 23 年度シーフードショー2011, , 東京ビッグサイト, 東京, 平成 23 年 7 月 27-29 日(2011) (招待講演)

その他 学会発表 10 件

〔図書〕(計 0 件)

〔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

門田 実 (KADOTA Minoru)  
近畿大学・農学部・研究員  
研究者番号: 00596231  
(現在は Temple 大学所属のため資格なし)