

## 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 4 月 27 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22580214

研究課題名（和文）

生物行動特性を考慮したクロマグロ沖合型養殖施設の最適デザイン

研究課題名（英文）

Optimum design for an offshore aquaculture facility for Pacific bluefin tuna on the basis of its behavioral aspects

研究代表者

高木 力（TAKAGI TSUTOMU）

近畿大学・農学部・教授

研究者番号：80319657

研究成果の概要（和文）：

本研究はクロマグロ用沖合型養殖施設を力学的なだけでなく、養成魚の行動特性も考慮して最適設計するための知見を得ようとするものである。施設の力学的解析を行うために施設形状と作用荷重を推定する数値シミュレーション手法を開発した。これにより、1ktの潮流により生簀内容積がおよそ50%減少することがわかった。また、強い潮流により生簀網が吹け上がり養成魚と接触する危険性が高まることが行動観測により示唆されたほか、これに伴う冷水塊の進入が養成魚の行動に強い制限を加えることがわかった。

研究成果の概要（英文）：

In the present study, we tried to create the basis for an optimum design for an offshore aquaculture facility for Pacific bluefin tuna (PBT) from not only mechanical aspects but also biological ones after considering the behavior of PBT. We used a numerical simulation system of the netting geometry developed by us to evaluate net deformation and the loads to the facility. The simulation results showed that the net cage was deformed and reduced to 50% of the original volume by current flow when the speed was 1 kt. The observation data obtained using a bio-telemetry system showed that the strong current blew up the net cage and caused a collision between the netting and the cultured tuna. In addition, the cold water mass acted as a strong constraint factor on the vertical swimming of PBT.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	800,000	240,000	1040,000
2011年度	2,000,000	600,000	2600,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：増養殖、クロマグロ、バイオテレメトリー、養殖生簀

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 産業的背景

ICCATなどの資源管理委員会によるクロマグロの漁獲規制が年々強化されるなかで、本

種の最大消費国である日本は安定したクロマグロの供給を確保する必要がある。そのため本種の安定的養殖生産が求められているが、清澄な推進環境と広い養成空間を必要と

する本種養殖では海象条件の厳しい海域に対応した沖合設置可能な大型養殖施設の開発実用化が課題となっている。一方高い遊泳能力を持つ本種の養成では、施設への接触や衝突による斃死が日常的に確認されるため、本種の生物・行動的側面からみた最適な施設設計が強く望まれている。

## (2)学術的背景

著者らは10年以上前から、漁具の形状や作用荷重を、コンピュータを用いて力学解析できるシステムの開発に取り組んできた。これは様々な流動条件における水中での網漁具の形状と作用荷重を数値シミュレーションによって推定するもので、産業界から高い評価を得るまでにいたっており、様々な漁具漁法への応用が期待されている。

## 2. 研究の目的

そこで、本研究では、行動特性を把握するバイオテレメトリー技術を用いて、環境要因が養成中のクロマグロの行動に与える影響を評価する手法を確立し、本種の生物・行動特性を考慮した施設空間形状がどうあるべきか提示する。そして、申請者らが研究開発してきた網地形形状シミュレーション解析システムを利用して、流動環境が厳しい海域でも生物行動特性を考慮し、併せて力学的にも耐候性の優れた沖合型養殖施設の基盤技術開発のための知見を得ることを目指す。

## 3. 研究の方法

### (1)養殖施設形状と作用荷重の算定

網地の構造を図1に示すように質点とバネで構成するようにモデル化し、網脚と質点に作用する重力、浮力および流体力と質点間に作用する張力を見積もることにより次式に示す運動方程式を構築する。

$$\frac{1}{2} \sum_{j \in L(i)} (\mathbf{m}_{ij} + \mathbf{C}_{ij} \cdot \Delta \mathbf{m}_{ij} \cdot \mathbf{C}_{ij}^T) \ddot{\mathbf{x}}_i = \sum_{j \in L(i)} \left[ \mathbf{T}_{ij}^g + \frac{1}{2} (\mathbf{C}_{ij} \cdot \mathbf{F}_{ij}^f + \mathbf{W}_{ij}^g + \mathbf{B}_{ij}^g) \right]$$

ここで、 $\mathbf{C}$ は座標変換マトリックス、 $\mathbf{m}$ は質量、 $\Delta \mathbf{m}$ は負荷質量、 $\mathbf{F}$ は流体力、 $\mathbf{W}$ は重力、 $\mathbf{B}$ は浮力を表している。図に示すとおり脚に作用する流体力は局所座標系上で表現されるため脚の接線方向と法線方向のみを考慮すれば良いようになっており、絶対座標系への変換は式中の座標変換マトリックスによって質点の流体力と統合されるようになっていることが特徴となっている。これにより、ローブや網地など大変形する柔軟な構造物の形状や作用荷重推定を一般化できるようになる。

解析対象としたクロマグロ用養殖施設は直径50mの高密度ポリエチレン製円形筏浮体から生簀網を垂下して係留するタイプのものである。係留系ローブ、筏浮体および生簀網

に対して前述の計算モデルを適用し、潮流下での施設形状変形と作用荷重特性を評価した。

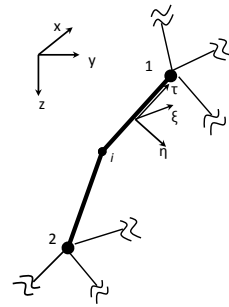


図1.計算モデルの模式図

### (2)養殖クロマグロの行動計測

養殖クロマグロの生簀内の行動特性を把握するため、生簀から採捕されたクロマグロに超音波発信器を装着した後、再放流した。実験は、高知県地崎沖に設置された試験用クロマグロ生簀で実施された。1歳魚(尾叉長約70cm)5個体を2010年8月に30mの生簀に放流し、また、2012年3月に当歳魚(尾叉長約54cm)5個体を50m生簀に放流して、遊泳時の深度を計測した。同時に養成時の環境水温と生簀網の動態を計測するため、生簀網の鉛直断面外周に沿わず様に深度・水温ローガーを6器設置した。

### (3)養殖生簀内のクロマグロ遊泳行動の三次元計測

生簀内の個体行動を詳細に把握するために方位センサ、深度ローガーおよび速度センサーを用いた他項目計測アーカイバルタグを個体に装着し、生簀内の三次元遊泳軌跡を推定すること(dead-reckoning手法)を試みた。速度センサーで得られた速度は遊泳時の対水速度の絶対値が示されるので、深度センサーで得られた鉛直速度を絶対速度から差し引き、得られた水平面内の速度のノルムと方位センサーで得られたベクトル方向の情報から、個体の移動経路の三次元移動ベクトルを割り出すことができる。この技術により生簀内の個体遊泳行動軌跡を推定することができる。

ステレオカメラ計測により個体の生簀内行動を非接触で測定し、個体の遊泳速度などの行動情報を把握することを試みた。視差を持たせた二台のカメラを生簀内に垂下し、DLT(Direct Linear Transformation Method)法を用いて撮影画像内の物標を三次元座標に落とし込んだ。

## 4. 研究成果

### (1)養殖施設形状と作用荷重の算定

3.(1)で示した計算モデルを用いて直径

30m の生簀網の形状推定を行い、定常流に対する内容積の変化特性を求めた(図 2)。無流速時には 9000m<sup>3</sup>であったものが、潮流流速の増加に伴い、直線的でない容積は減少し、50cms<sup>-1</sup>(1kt)の流速でほぼ半減することがわかった。

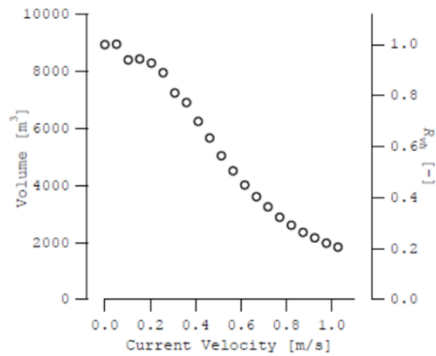


図 2.潮流流速と直径 30m の生簀内容積の変化

図 3 は流速 40cms<sup>-1</sup>時に養殖施設単体を設置したときの施設形状と作用荷重特性を前述の数値シミュレーションシステムで算定示したものである。図に示すように生簀筏浮体を支持する側張りロープに強い荷重が作用していることがわかる。40cms<sup>-1</sup>の流速では底網のカテナリー形状が失われている。

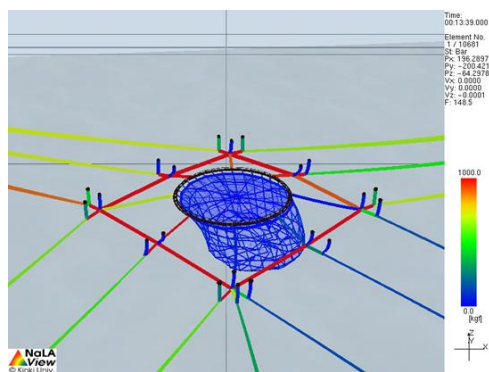


図 3. 流速 40cms<sup>-1</sup>における直径 30m 生簀網の形状と作用荷重

実海域に設置された養殖施設の流速と生簀網の潮流による吹け上がりを調査した結果、30cms<sup>-1</sup>以上の潮流が発生し、このとき生簀の底網は 5m 以上吹け上がることがしばしば観測された。

養殖生簀は複数の生簀を接続して設置される場合がほとんどである。そこで、大型養殖施設を複数器設置した場合の係留系に作用する荷重を数値シミュレーションにより評価した。直径 50m 生簀を 2 器と 30m 生簀を 1 器設置した場合は、潮流が発生した場合上流側の係留索に作用する荷重は流速 40cms<sup>-1</sup>の場合ではおよそ 700kgw であった。生簀筏浮体を直接支持する側張りロープへ

の作用荷重はさらに大きいものとなり流速 40cms<sup>-1</sup>で最大で約 1900kgw となった。沖合養殖施設では高波浪域に設置されるため、生簀自体に浮沈機能を設けることが検討されている。そこで、筏浮体に海水を充填させて沈下させた状態を数値シミュレーションで再現し、このときの係留系に作用する荷重を算定した。上流側の係留索への作用荷重は沈下時で 40cms<sup>-1</sup>の流速下でおよそ 1000kgw となり、浮上時に比べて 30%増加した。また、側張りロープでは沈下時は 3000kgw を超えることとなり、浮上時に比べ 50%以上荷重が増大した。生簀を沈下することにより、筏浮体の損壊の危険性を低減できるが、係留系への負荷は増大することになるため、沈下時における荷重付加に注意を必要とすることがわかった。

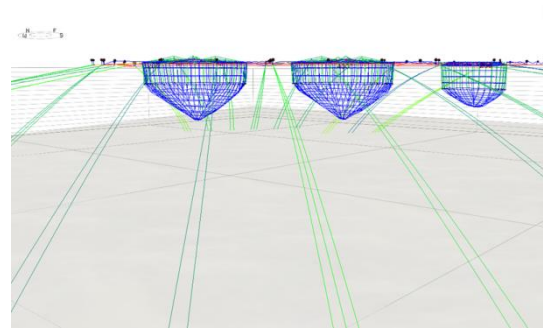


図 4. 大型生簀を 3 器設置した場合のシミュレーション結果

本節で述べた養殖施設の力学解析結果のうち、著者らが開発した数値シミュレーションシステムを適用して算定されたものは、国内では初めてのものである。国外では単体の生簀網について試行的に研究レベルで行われたものがあるが、ここに示したように精緻なモデリングでしかも複数設置されたものや生簀の沈降状態を解析したものは例がない。当該解析技術は国内外から産業的なニーズは以前から高いものがあり、本研究での研究結果は研究開発レベルの優位性を含めて十分アピールのできるものといえる。

## (2) 養殖クロマグロの行動計測

2010年8月に30mの生簀に発信器を装着して放流したクロマグロの内、1個体の行動記録の取得に成功した。図5は生簀網の深度とクロマグロの鉛直行動変化を時系列的に表したものである。また、生簀に装着した温度センサーの記録から各時刻における水温も同時にカラースケールを用いて示した。8月は温度成層が著しく発達し水面近傍は30℃を越す時もしばしば観測されているが、潮汐に同調するように15m以深で24℃以下の冷水塊の進入が確認された。観察個体の鉛直行動は冷水塊の進入以外では5m~20mの生簀内を偏りなく自由遊泳する状態が確認できたが、

冷水塊の侵入に伴い、水温の低い24°C以下の深度を避けるような鉛直行動を示した。これに伴い冷水塊進入時にはおよそ10m以浅を遊泳する状況となり、養成魚の過密状態が誘発されることが示唆された。

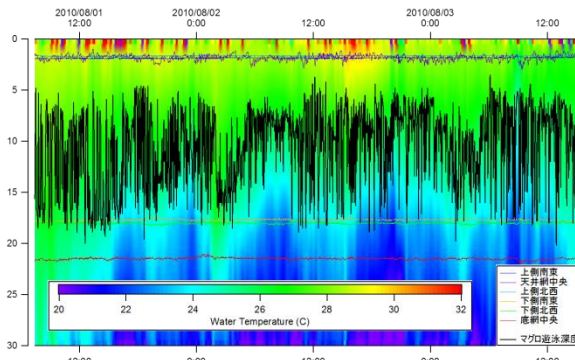


図5. 養殖クロマグロの鉛直行動と生簀網深度および環境水温の時系列データ

網地との衝突や、接触による上皮擦過損傷箇所からの感染症により斃死に至る場合も予想され、生簀形状の急激な変化はできるだけ避ける必要があると考えられている。そこで強い潮流により生簀網地が吹かれ上がる時の生簀内の養成魚の状態を観測した。図6は、2012年に実施した潮流により生簀底網が吹かれ上がる時の、個体行動の状態を表したものである。図中の底部に見える白線は底網の深度を表しており、5m程度深度が浅くなっていることがわかる。夜間から潮流により底網が吹かれ上がりだしてから、個体の遊泳深度も浅くなり出したが、底網が急激に上昇した時刻に1個体が底網に異常接近していたことが確認できる。

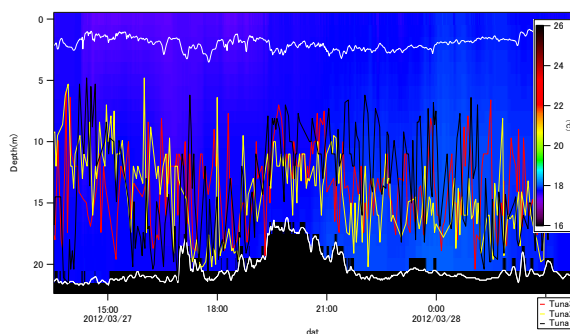


図6. 個体の遊泳深度と底網の深度の時系列データ

養成環境が生簀内のクロマグロの行動に与える影響をこのような形で明らかにしたのは初めてであり、今後の養魚管理技術に役立つ結果を提供できるものと考えられる。

また、著者らは個体に装着した記録計で取得したデータから行動の特異性を抽出する

ことを目指し、遊泳深度や遊泳速度時系列データに情報量理論で利用される相対エントロピー（カルバックライブラー情報量）の概念を適用することを試みた。相対エントロピーは次式で定義される。

$$D(P|Q) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \cdot \log\left(\frac{P(x)}{Q(x)}\right)$$

ここで、 $P(x)$ 、 $Q(x)$ はそれぞれ確率密度関数を表し、前者は観測期間全体について、後者は一定の時間間隔で区切った観測期間中のデータに関しての確率密度関数を表している。相対エントロピー量が大きい値を取る場合は観測期間全体で観測された平均的な行動に対して相対的に特異性のある行動を示していることを表している。この指標を用いて解析した結果、特に摂餌に伴う行動を相対エントロピーを用いて抽出できることがわかった。また、網地の吹け上がりなど養成空間の変化に対しては相対エントロピーの著しい増大は認められなかったことから、空間形状の変化は行動の著しい変調をもたらすものでないことが示唆された。この解析法の構築により、生簀内だけでなく様々な魚類行動情報を解析する技術として発展的応用が期待できる。

### (3) 養殖生簀内のクロマグロ遊泳行動の三次元計測

生簀内の個体行動の三次元軌跡をdead-reckoning手法を用いて推定した(図7)。養殖生簀は図に示すように鉛直断面が懸垂線様の形状を示すようになる。推定された三次元軌跡を各水深層で分割すると14m~20mの中央深度より深いところで遊泳することが多く確認され生簀網周辺を遊泳する傾向があった。また、底部付近に達する深度の深い遊泳は少なく、生簀底部へ接触する機会は少ないものと思われた。

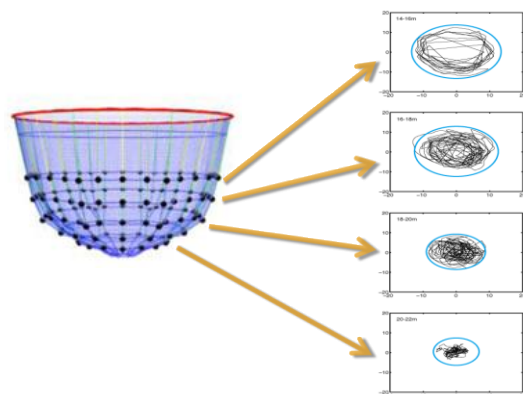


図7. 生簀内クロマグロの三次元遊泳軌跡

ステレオカメラを用いて生簀内養魚を非接触で動画計測し、遊泳速度を計測した。その結果、生簀深度により遊泳速度は異なり、表層付近では2.5(BLs<sup>-1</sup>: 体長倍速度)、6m深度付近では1.7BLs<sup>-1</sup>と遊泳深度が深くなるに



したがって遅くなることが明らかとなった。  
個体行動を測定する技術として、Dead-reckoning 手法は詳細な三次元行動軌跡を再現することができ、その結果、生簀内での遊泳状態を時間的空間的に捉えることが可能となった。これにより、生簀内ではクロマグロは空間を最大限に利用して遊泳しており、水平的な周回行動をとるというよりも立体的な周回行動を取ることにも明らかになった。

#### (4)まとめ

直径 30m 以上の生簀で、養成することは十分に可能であることが今回の研究でわかった。しかし、流動環境による急激な生簀形状変化は養成個体の行動を制限することにつながるため、できるだけ形状変化の少ない工夫が求められる。シミュレーションスタディーにより、錘をつけた場合でも 1kt の潮流流速では施設内容積が半減することが推算された。より施設形状の変形を低減させるためには、生簀網に錘を垂下させる量を増加することによって予防できるが、過大な錘の垂下は波浪動揺時において施設に過剰な負荷を重力方向にかけることになり、破網の原因となる。そのためには、施設の卓越流方向に対する投影面積を減少させるなど、非軸対象形状の生簀形にするなど、生簀網形状自体が今後検討されるべきではないかと考えられた。養成魚の行動の適応性は高い。このことを考え合わせると施設形状の自由度を今までよりも拡大して考えも良いと思われた。

#### 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 6 件)

① Komeyama K., Kadota M., Torisawa S., and Takagi T., Three-dimensional trajectories of cultivated Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* in an aquaculture net cage. *Aquaculture Environment Interactions* 4, 81-90, 2013(査読制 有).

② Torisawa, S., Kadota, M., Komeyama K., and Takagi, T., 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(査読制 有).

③ Torisawa, S., Kadota, M., Komeyama, K., Suzuki, K. and Takagi, T. 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, 107-112, 2011(査読制 有).

④ Komeyama, K., Kadota, M., Torisawa, S., Suzuki, K., Tsuda, Y. and Takagi, T. Measuring the swimming behaviour of a reared Pacific bluefin tuna in a submerged aquaculture net cage. *Aquatic Living Resources* 24, 99-105, 2011(査読制 有).

⑤ Kadota, M., White, E. J., Torisawa, S., Komeyama, K. and Takagi, T. Employing Relative Entropy Techniques for Assessing Modifications in Animal Behavior. *PLoS ONE* 6, e28241(査読制 有).

⑥ Minoru Kadota, Shinsuke Torisawa, Takagi Tsutomu, Kazuyoshi Komeyama. Analysis of juvenile tuna movements as correlated random walk, *Fisheries Science*, 77, 993-998, 2011(査読制 有).

[学会発表] (計 2 件)

① 門田 実・鳥澤真介・米山和良・高木 力 確率解析を用いた新しい行動モデルの提案, 日本水産学会春季大会 平成 23 年 3 月 29 日, 東京海洋大学.

② T. Takagi, K. Suzuki, S. Torisawa, K. Komeyama, M. Kadota, S. Asaumi, Application of NaLA: From study to practical use. International Work Shop of DEMAT '11, 2011 年 10 月 28 日, スプリト, クロアチア.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://nara-kindai.univ.jp/02gakka/inter-view-staff/ivs02-08.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 力 (TAKAGI TSUTOMU)

近畿大学・農学部・教授

研究者番号: 80319657

(2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

米山 和良 (KOMEYAMA KAZUYOSHI)

鹿児島大学・水産学部・助教

鳥澤 眞介 (TORISAWA SHINSUKE)

近畿大学・農学部・研究員

研究者番号：80399097

研究者番号：30550420

鈴木勝也 (SUZUKI KATSUYA)

近畿大学・農学部・研究員

研究者番号：30550420

河邊 玲 (KAWABE RYO)

長崎大学・環東シナ海海洋県境資源研究センター・准教授

研究者番号：80380830

(4)研究協力者

門田 実 (KADOTA MINORU)

近畿大学・農学部・研究員