

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24380104

研究課題名(和文) 行動計測・数理モデル・耳石化学分析によるクロマグロの分集団構造の解明

研究課題名(英文) Investigations of the stock structure of Pacific bluefin tuna using biologging, mathematical modeling and otolith chemical analysis

研究代表者

北川 貴士 (Kitagawa, Takashi)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：50431804

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：クロマグロの分集団構造の把握のため、記録計から得られたデータの解析を行った。西部から東部太平洋への渡洋回遊を行う契機は、越冬海域に依存していることが示された。耳石酸素安定同位体比・微量元素、筋肉の窒素・炭素安定同位体比の生息環境履歴の無負荷型記録計としての有効性が示された。拡張型キネシスモデルは探索範囲・回数が主な制御要因であり、環境探索行動がモデル構築のキー・パラメータであることが示された。

研究成果の概要(英文)：To investigate the stock structure of Pacific bluefin tuna in the Pacific Ocean, analysis of archival tag data was conducted. Analyses of chemical components of fish tissues such as otoliths and muscles as proxies of the environments they experience and mathematical modeling were also conducted. Archival tags have revealed the timing of trans-Pacific migrations from the transition region to the Eastern Pacific that appear to depend on their specific wintering areas in the Western Pacific. Our results also demonstrate that otolith oxygen stable isotope values and muscle nitrogen and carbon stable isotope values can provide precise and accurate estimates of their environments. The mathematical model (extended kinesis model) indicates that fish searching behavior for seeking favorable environments was an important parameter to construct the model.

研究分野：水産海洋学

キーワード：クロマグロ 回遊 数理モデル 安定同位体 耳石 微量元素 小型記録計 分集団

1. 研究開始当初の背景

クロマグロ (*Thunnus orientalis*) はその優れた肉質や経済性により、国際的に重要な水産資源のひとつとなっているが、乱獲の影響で資源量低下が懸念されている。本種は太平洋で単一魚群を形成するが、南西諸島付近の西部太平洋と日本海で産卵し、若齢期に東部太平洋 (カリフォルニア海流域) まで回遊を行い数年留まる (渡洋回遊) という生態特性を持つ (Kitagawa 他, 2009)。しかし、両産卵海域での産卵規模の割合・混合率、渡洋個体の割合を把握できないことが本種の資源管理を困難にしている大きな要因となっていた。そのため本種の回遊状況を把握し、分集団構造を明確にすることが、適正な国際的資源管理・評価を行う上での喫緊の課題となっていた。

漁獲情報や標識放流、漁場環境との関連論に基づき大雑把に推定されていた本種の移動・分布状況は、小型記録計の導入により、質・量ともに膨大な時系列データの詳細な解析により、漁場間の細かな時空間スケールでの環境変化に伴った個体の行動変化が捉えられるようになった (Kitagawa 他, 2000)。

また、近年、魚類の耳石は、そこに含まれる酸素安定同位体比 (以下 ^{18}O) が生息環境を反映するため、無負荷型記録計として期待されている (Shiao 他, 2010)。この手法の確立により多個体の回遊履歴を同時に調査でき、遺伝子分析では困難な個体群内の分集団構造の定量的解析が可能になる。

一方、本種の回遊特性として滞留期・移動期 (渡洋回遊期) があることが分かってきた。この2つのモードが切り替わる環境的・生物的要因を明らかにすることが、分集団構造解明のための重要案件である。これには環境データ解析、遊泳行動計測、化学分析に加え、環境・内的要因によって行動を変化させる数理モデルによる検討が有効であると考えられていた。

2. 研究の目的

そこで本研究では、西部太平洋・日本海産卵群の識別、両群の年級群への寄与率、交流度合い、東部太平洋域への渡洋回遊の割合などを推定するための負荷型小型記録計による行動および生息環境計測、回遊環境履歴の無負荷型記録計としての耳石 ^{18}O ・微量元素、筋肉の窒素・炭素安定同位体比などの生体内の化学的情報の有効性、ならびに最新の数理行動モデルの有効性などについて検討した。

3. 研究の方法

(1) 行動計測調査を2015年8月に高知県高岡郡中土佐町沿岸の土佐湾で行った。尾叉長30cm未満のクロマグロ幼魚の腹腔に小型記録計 (アーカイバル・タグ, Lotek, Canada) を装着した。装着後、数日間生簀内で遊泳行動を観察し、行動に異常がないことを確認したのち、海洋に放流した。回収された記録計

に60秒ごとに記録された遊泳水深・体温・水温データの解析を行った。また、これまでに得られている本種、比較のために近縁種のタグ・データについても解析を行った。

(2) 本種から採取した耳石 (扁平石・礫石) の ^{18}O 値を、高精度・高感度の炭酸塩安定同位体比質量分析システムを用いて定量した。

また、太平洋 (相模湾) および日本海 (対馬沖) で採集された本種の耳石に含まれる微量元素、土佐湾で採集された個体の筋肉に含まれる窒素・炭素安定同位体比の分集団判別への応用可能性についても検討した。微量元素分析については、耳石の中心核を削り出し、その化学組成をレーザーアブレーション ICP 質量分析法で、窒素・炭素安定同位体比については元素分析装置に接続された安定同位体比質量分析装置で分析した。

(3) 本種の回遊モデル構築のステップとして、比較的遊泳能力の小さい稚魚期間、未成魚期を想定して、それぞれ拡張型キネシス (無定位運動性) モデル、ならびに環境要因から現実的な回遊パターンを導くための遺伝的アルゴリズムを組み込んだニューラルネットワークによる推定方法について検討を行った。

4. 研究成果

(1) 放流直後、本種未成魚は高知沿岸の土佐湾内で滞留していた。すべての個体が常に水深50m以浅の表層を遊泳していた。個体によっては、時おり索餌のために100m以深へ潜行を行った。

遊泳海域の表層の水温は25°C以上あった。体温と水温との温度差は小さかったが、100m以深へ潜行しても体温は20°Cを下回ることはほとんどなかった。本種未成魚は、黒潮内側域である本海域を摂餌のための海域として利用しており、水温が徐々に低下してくる秋から冬季にかけて、成長しながら内温性を高めていくものと推察された。

連携研究者の協力のもと、これまでに回収されているタグから得られたデータを解析したところ、西部太平洋の黒潮・親潮移行域から東部太平洋・カリフォルニア州沿岸への渡洋する回遊の契機は、越冬海域に依存していることが示唆された。

(2) 34日齢の扁平石の ^{18}O 値は、8日齢の耳石と調和的な同位体値を示し、扁平石 ^{18}O は成長しても生息環境の温度指標として有用であることが分かった。さらに1個体内の扁平石の ^{18}O 値は、個体間の同位体値より高い均質性を持つことがわかった。一方で、礫石の ^{18}O 値は扁平石の ^{18}O 値よりも有意に高い ^{18}O を示した。以上から耳石 ^{18}O を水温指標として利用する際には耳石の種類に注意する必要があることが示唆

された。

(2) 分析した耳石中の微量元素は, Li, Na, Mg, Mn, Cu, Zn, Rb, S, Ba である。いずれの元素も耳石内で大きな不均質を示した。特に, いくつかの元素では核の近傍で高い組成を示し, 核から縁辺に成長に従った元素変動が見られたが, 元素の組成の不均質は日本海と太平洋の差異よりも有意に大きく, 集団判別の際に考慮が必要であることが示唆された。また, 脊椎骨のネオジウム同位体比, 筋肉中の水銀・有機汚染物質などが有用な回遊指標になることが見込まれた。

(2) 筋肉中の窒素安定同位体比は, 尾叉長 15 cm 未満では平均値は+7.2‰であったが成長とも大きくなり, 30~35cm で+12.4‰となった。その後は 60~65 cm まで一定の値を示した。これは本種が高知沿岸に来遊後の滞留中に栄養段階が上昇したことを示しており, 本種がプランクトン食から魚食性に変化するためと考えられた。本手法が本種・分集団構造解明のための有効な手段になりうることも示された。

(3) 拡張型キネシスモデルは探索範囲, 探索回数が主要な成魚要因であり, クロマグロの餌および環境探索行動がモデル構築のキー・パラメータであることが示唆された。一方ニューラルネットワークによる推定には, 最適解としての回遊パターンの他に, 回遊を引き起こす外的(環境), 内的要因の双方が重要であり, アーカイバル・タグによる環境と体温の情報を活用することで, モデル構築が進展することが期待された。

複数の手法を組み合わせることで本種の分集団構造や集団間の移動の実態やその意義について科学的に確かな情報を提供しようとした点に本研究の特徴がある。本研究の成果は, 生物の回遊・移動に関する研究分野に大きな刺激を与えるものである。成果に関し, 国際学会での発表および国際学術誌への掲載に取り組み, アウトリーチ活動も行った。本研究および周辺分野の最新の成果を纏めた書籍も出版した。

<引用文献>

Jen-Chieh Shiao 他, Natal origin of Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* inferred from otolith oxygen isotope composition, Marine Ecology Progress Series, Vol. 420, 2010, 207-219
Takashi Kitagawa 他, Immature Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis*, utilizes cold waters in the Subarctic Frontal Zone for trans-Pacific migration, Environmental Biology of Fishes, Vol.84, 2009, 193-196.

Takashi Kitagawa 他, Effect of ambient temperature on the vertical distribution and movement of Pacific bluefin tuna (*Thunnus thynnus orientalis*), Marine Ecology Progress Series, Vol.206, 2000, 251-260.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

北川 貴土, バイオロギングによる魚類の行動研究, 日本水産学会誌, 査読有, 81 巻, 2015, p872,
<http://doi.org/10.2331/suisan.81.872>

北川 貴土, データ回収ネットワークの構築, 日本水産学会誌, 査読有, 80 巻, 2014, p1013,
<http://doi.org/10.2331/suisan.80.1013>

牧口 祐也, 青木 良徳, 北川 貴土, 小型記録計・発信機を用いた魚類の行動・生理解析, 比較生理生化学, 査読有, 31 巻, 2014, pp113-118,
<http://doi.org/10.3330/hikakuseiriseika.31.113>

白井 厚太郎, 微小領域分析法を用いた生物起源炭酸塩骨格の微量元素変動メカニズムに関する研究, 地球化学, 査読有, 48 巻, 2014, pp147-167,
DOI:10.14934/chikyukagaku.48.147

Takashi Kitagawa 他 (著者 9 名の筆頭, 2, 4 番目), Validity of otolith ¹⁸O of Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) as an indicator of ambient water temperature, Marine Ecology Progress Series, 査読有, Vol. 481, 2013, pp199-209,
DOI:10.3354/meps10202

Takayuki Matsumoto, Takashi Kitagawa, Shingo Kimura, Considerations on diving patterns of bigeye tuna *Thunnus obesus* based on archival tag data, Fisheries Science, 査読有, 79, 2013, pp39-46,
DOI: 10.1007/s12562-012-0571-8

[学会発表](計 13 件)

Takashi Kitagawa, Ko Fujioka
Electronic tagging applications and migrations of Pacific bluefin tuna in the western Pacific Ocean, Bluefin Futures Symposium, 2016 年 1 月 18 日, Monterey, CA USA

伊藤 幸彦 他, 沿岸域の循環と食物網動態: 複合生態系モデリング, 東京大学大気海洋研究所共同利用集會, 2015 年 12

月2日, 東京大学大気海洋研究所, 柏市 Ko Fujioka, Ecology of Pacific bluefin tuna, Migration symposium on ISC PBFWG, 2015, Kaohsiung, Taiwan, 2015年11月19日

Yoshinori Aoki, Takashi Kitagawa 他, Change in energy acquisition of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) with northward migration in the western North Pacific, CLIO TOP 3rd Symposium, 2015年9月15日, San Sebastian, Spain
鐵 智美, 石村 豊穂 他. 炭酸塩の高精度・高解像度環境解析の進展～魚類耳石の安定同位体比を用いた環境履歴解析を例に～. 2015年度日本地球惑星科学連合大会. 2015年5月24日. 幕張メッセ. 千葉市

伊藤 幸彦, 羽角 博康, Modelling large-amplitude recruitment variability of marine fish, 2015年度日本地球惑星連合大会, 2015年5月24日, 幕張メッセ, 千葉市

北川 貴土, バイオロギングによる魚類の行動研究, 平成27年度日本水産学会春季大会シンポジウム, 2015年3月27日, 東京海洋大学, 東京都港区

石村 豊穂, 微小領域における炭酸塩の安定同位体比分析の現状, 日本地球化学会年会, 2014年9月16日, 富山大学, 富山市

北川 貴土, データ回収ネットワークの構築, 平成26年度日本水産学会春季大会ミニシンポジウム, 2014年3月31日, 北海道大学水産学部, 函館市

北川 貴土, クロマグロの回遊・行動生態はどこまで分かったか, 日本学術会議公開シンポジウム, 2013年9月29日, 日本学術会議, 東京都港区

北川 貴土, 藤岡 紘, クロマグロ当歳魚の成長に伴う遊泳能力と栄養段階の変化, 平成25年度日本水産学会秋季大会, 2013年9月20日, 三重大学生物資源科学部, 津市

白井厚太郎, 微小領域分析法を用いた生物起源炭酸塩骨格の微量元素変動メカニズムに関する研究, 2013年度日本地球化学会年会, 2013年9月12日, 筑波大学, 茨つくば市

鐵 智美, 石村 豊穂, 北川 貴土 他, 飼育クロマグロ稚魚(34日齢)の耳石の安定同位体組成～環境指標としての耳石活用を目指して, 2013年度日本地球化学会年会, 2013年9月11日, 筑波大学, つくば市

〔図書〕(計5件)

Takashi Kitagawa, Shingo Kimura eds., CRC press, Biology and Ecology of Bluefin Tuna, 2015, 422pp.

Ko Fujioka, Masachika Masujima, Andre M. Boustany, Takashi Kitagawa, CRC press, Biology and Ecology of Bluefin Tuna, 2015, pp101-122

Yosuke Amano, Jen-Chieh Shiao, Toyoho Ishimura, Kazuki Yokouchi, Kotaro Shirai, CRC press, Biology and Ecology of Bluefin Tuna, 2015, pp225-257

北川 貴土 他, 講談社, 水産海洋学入門, 2014, pp24-31

Takashi Kitagawa 他, CRC press, Physiology and ecology of fish migration, 2013, pp152-178

〔その他〕

アウトリーチ活動情報

平成27年度(計6件)

平成26年度(計3件)

平成25年度(計4件)

平成24年度(計9件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北川 貴土 (KITAGAWA, Takashi)
東京大学・大気海洋研究所・准教授
研究者番号: 50431804

(2) 研究分担者

白井 厚太郎 (SHIRAI, Kotaro)
東京大学・大気海洋研究所・助教
研究者番号: 70463908

伊藤 幸彦 (ITO, Sachihiko)
東京大学・大気海洋研究所・准教授
研究者番号: 80345058

(3) 連携研究者

石村 豊穂 (ISHIMURA, Toyoho)
国立高等専門学校機構・茨城工業高等専門学校・准教授
研究者番号: 80422012

藤岡 紘 (FUJIOKA, Ko)
水産研究・教育機構・国際水産資源研究所・研究員
研究者番号: 50603859

(4) 協力研究者

太田 格 (OHTA, Itaru)
チャールズ A. ファウエル (FARWELL, Charles A.)