

魚類の1日毎の経験水温を世界で初めて解明

—謎だらけの魚類生態の理解と資源保全へ—

概要

京都大学大学院人間・環境学研究科の武藤大知 修士課程学生（研究当時：茨城工業高等専門学校）および石村豊穂 准教授（研究当時：茨城工業高等専門学校 准教授）、水産研究・教育機構の高橋素光 主幹研究員、筑波大学生命環境系の西田梢 特任助教（研究当時：茨城工業高等専門学校、学術振興会 特別研究員）の共同研究グループは、魚類の1日毎の経験水温を世界で初めて解明しました。

水温は海洋生物の分布を決定する最も重要な環境要素の一つで、今後の地球温暖化による海水温の変化は、多くの海洋生物の分布や資源量の変化に大きな影響を与えられていると考えられています。水産資源を今後も持続的に利用していくためには、水温変動が魚類の成長や分布・回遊に与える影響を理解することが重要ですが、海洋を大規模に回遊する魚類の経験環境を詳細に観測する手段には限界があり、魚類の生息環境や生態の理解は進んでいませんでした。本研究では独自開発の安定同位体^{*1}分析技術と画像解析によりマアジ耳石^{*2}の超微小領域の炭素酸素安定同位体（ $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$ ）分析を実現し、魚類個体の稚魚期における1日毎の経験水温を明らかにすることに世界で初めて成功しました。この成果はマアジの成長・生残に最も重要である稚魚期の生態解明に大きく寄与すると期待され、多魚種への応用によって将来的な水産資源の動態評価や資源保全策の策定にも貢献できると考えています。また、鍾乳石・貝・サンゴなど地球環境の変化を記録する炭酸カルシウムの高時間分解能解析にも応用が期待できます。

本成果は、2022年7月29日に国際学術誌「Rapid Communications in Mass Spectrometry」に掲載されました。

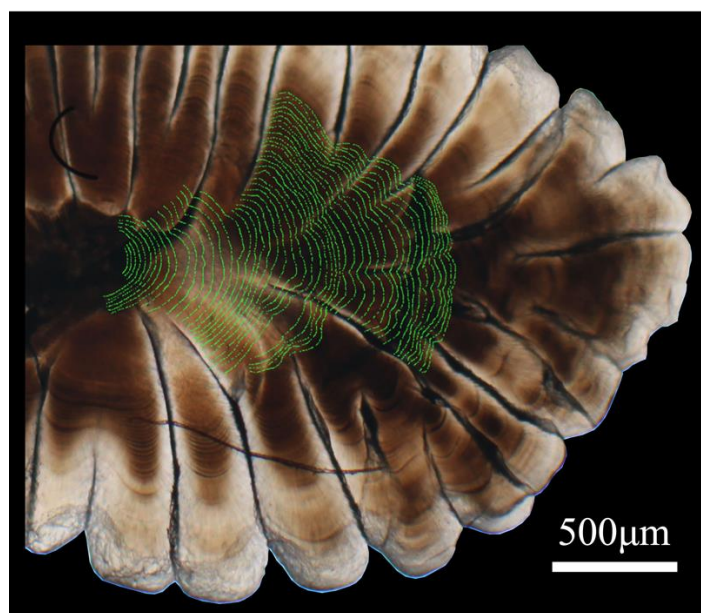


図. マアジ耳石の明瞭化した日周輪

マアジの耳石の成長が良い時期の日周輪^{*3}の形状を正確に読み取り、1本ごとの日周輪の形を明瞭化して切削^{*4}と同位体分析を行いました。緑色の線が日周輪を示しています。

1. 背景

水温は海洋生物の分布を決定する最も重要な環境要素の一つで、今後の地球温暖化による海水温の変化は、多くの海洋生物の分布や資源量の変化に大きな影響を与えると考えられています。水産資源に対する需要が世界的に高まる中、今後も持続的に利用していくためには、水温変動が魚類の成長や分布・回遊に与える影響を理解すること、そしてその情報から今後の資源変動の将来予測や生態系の保全策を考える必要があります。しかし、海洋を大規模に回遊する魚類の経験環境を詳細に観測する手段には限界があり、魚類の生息環境や生態の理解は進んでいませんでした。

本研究であつかうマアジは日本の水産資源の中でも漁獲量の多い魚種の一つで、主に東シナ海と日本海の西部に分布しています。今後も持続的にマアジ資源を利用するためには、その生態を理解し、正確な資源評価をすることが必要です。特に仔稚魚期はマアジの成長・生残に最も重要な期間であり、この時期の生態の理解は資源量変動要因を理解し資源評価を高精度化する上で重要となっています。しかし、魚類の分布・回遊や経験した水温などの基礎情報の解析技術は限られ、海洋におけるマアジの生態は不明な部分が多いのが現状です。

従来の魚類の生態解明手法の1つに、漁獲した魚に電子タグ（以下、タグ）をつけて放流し、再捕獲時にタグを回収する方法があります。しかし、この方法は、体長の大きな成魚にのみ適用可能な方法であり、タグの取り付けができない仔稚魚期の小型個体の生息環境履歴の解明は困難でした。そこで、タグの取り付けなしに、仔稚魚の生息環境を解明するツールとして耳石の安定同位体組成が注目されています。耳石とは、魚類の内耳に存在する炭酸カルシウム (CaCO_3) の結晶です。耳石の酸素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) は経験水温と海水の $\delta^{18}\text{O}$ によって決定され、炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) は餌や代謝といった生態情報を記録しています。また、仔稚魚期の耳石において、1日1本の日周輪が核を中心に付加形成されます。この2つの特性から、耳石の日周輪に沿った成長段階毎の $\delta^{18}\text{O}$ 分析をおこない、生息海域の $\delta^{18}\text{O}$ と対応させることで、経験水温履歴の復元が可能です。

既存の安定同位体比質量分析計を用いた分析には数十 μg 程度の炭酸塩が必要であり、耳石の日周輪に沿った高解像度（1週間程度）の $\delta^{18}\text{O}$ 分析を行うことは困難でしたが、Ishimura et al. (2004, 2008) が開発した連続フロー型微量炭酸塩安定同位体比質量分析システム (MICAL3c) ^{※5} により、0.2 μg 以上（従来法の1/100程度の量）の微量炭酸塩の高精度 $\delta^{18}\text{O}$ 分析が可能になりました。この技術の進歩により、マイワシ仔稚魚の耳石の同位体履歴が3~7日程度の解像度で復元できるようになりました。

今回我々は、日周輪の成長幅がマイワシよりも数倍広いマアジの耳石（図1）を用いることで、1本ごとの日周輪に沿った切削手法を確立し、1日ごとの $\delta^{18}\text{O}$ 履歴（=経験水温履歴）を解明することを目指しました。



図1. マアジ耳石の顕微鏡写真 (a) と耳石中心部付近に確認できる稚魚期の日周輪 (b)

2. 研究手法・成果

本研究では、2014年9月2日に対馬海峡東部(34°41'N, 130°25'E)で漁獲された0歳魚のマアジ(*Trachurus japonicus*)3個体の耳石を用いました。そのうち1個体の耳石について、耳石の成長が良い時期の日周輪の形状を正確に読み取り、画像解析ソフトウェアを用いて1本ごとの日周輪の形を明瞭化しました。その後、微小領域切削装置(Geomill326)を用いて、明瞭化した日周輪に沿って耳石を切削し、微量炭酸塩安定同位体比質量分析システム(MICAL3c)により、同位体組成($\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$)を定量しました。

この切削方法により14.0 μm から62.7 μm (平均27.0 μm)の幅で日周輪に沿った切削に成功しました。これは耳石の成長が良い時期(孵化後30日から70日)では1日毎の日周輪に沿った同位体組成に相当します。 $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ はそれぞれ、-5.77‰から-9.42‰、0.00‰から-1.24‰(水温換算で5°C程度の変化)の間で変動しました(図2)。日周輪1本毎の同位体分析と経験水温変化の解明に成功した研究は世界で初めてです。

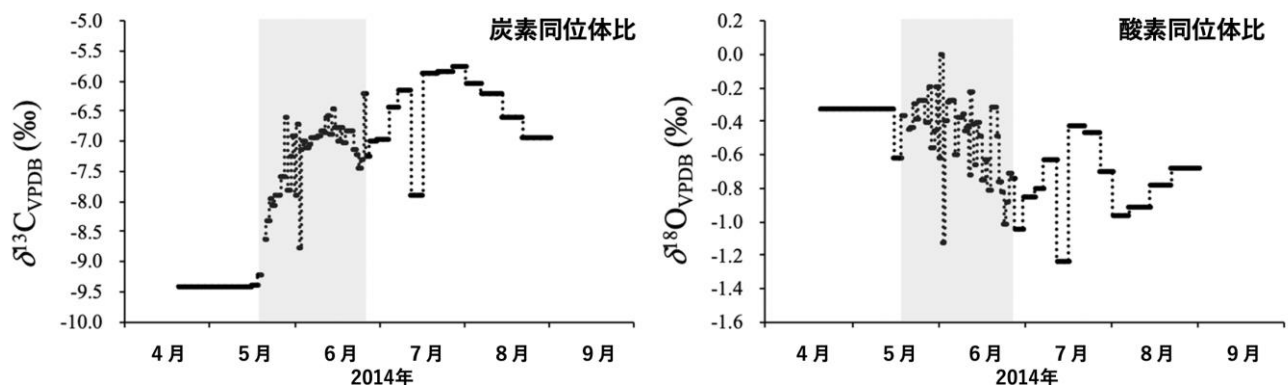


図2. マアジ耳石の成長段階毎の炭素酸素安定同位体比の履歴。灰色は1日毎の履歴を明らかにした期間。

3. 波及効果、今後の予定

本研究の成果は、マアジの成長・生残に最も重要である稚魚期の生態解明に大きく寄与すると期待され、将来的な資源評価や資源保全策の策定にも貢献できると考えています。また、本研究で得られた精密切削の目安(平均27.0 μm)は他の魚種に応用する際の指標となり、得られた知見がマアジのみならず他魚種の耳石の切削の解像度向上にも大きく貢献できると考えています。水産研究機関には、過去数十年の耳石アーカイブ試料が保存されている場合もあり、近年の分析技術の向上と本研究での切削技術の向上はこれらのアーカイブ資料からの経験水温履歴の抽出を可能にし、過去数十年の資源変動要因の解明と将来的な資源変動予測の両方に繋がっていくと考えています。

さらに本研究で得られた技術とノウハウは魚類の耳石だけでなく、サンゴや貝類、鍾乳石など、100年～1000年規模での環境履歴を記録している炭酸カルシムの高解像度同位体分析にも応用可能で、地球環境の変化も詳細に紐解くことが出来ると期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、日本学術振興会 科学研究費助成事業(16H02944, 17J11417, 18H04921, 21K18653, 20K21343, 22H05029)およびクリタ・水環境科学振興財団国内研究助成(21K007)の補助を受けて行われました。また本研究は、水産庁水産資源調査・評価推進委託事業による成果の一部を活用しています。

<用語解説>

※1 **安定同位体**：同位体（同じ元素でありながら、わずかに重さの異なる原子）の中で放射性崩壊によって他の原子に変化しないもの。酸素の場合は質量数が16の原子に対する18の原子の割合のことで、 $\delta^{18}\text{O}$ と表記する。環境の違いによってこの比率がわずかに異なる特性を利用して、環境指標として活用できる。耳石の場合は、 $\delta^{18}\text{O}$ （水温と負の相関）を明らかにすることで水温履歴を復元することが可能であり、 $\delta^{13}\text{C}$ には食性・代謝速度の履歴が記録されている。これらを利用し、魚類においては初期生残水温、鉛直分布、生涯にわたる水平回遊経路など様々な生態情報の抽出が実現されてきた。

※2 **耳石**：魚類の耳石は頭部に形成される炭酸カルシウムの硬組織で、個体の成長とともに同心円状に付加成長し、成長輪として識別することができる。サイズは魚種によって異なるが一般に数 mm 程度の大きさである。

※3 **日周輪**：1日1本刻まれる輪紋。この数を数えて漁獲日から逆算することで日周輪が形成された日を推定可能。成長輪には形成当時の環境情報が化学組成として時系列に記録される。

※4 **切削**：本研究での切削幅（平均27 μm ）は、人の髪の毛の太さの1/3程度に相当。

※5 **連続フロー型微量炭酸塩安定同位体比質量分析システム (MICAL3c)**：ナノグラムオーダー（従来の1/100以下）の炭酸塩 $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{18}\text{O}$ を高精度で分析することが可能な、世界唯一の高感度分析システム。地球科学、環境解析学、生物学、水産学に至るまで活用されており、特に水産分野では耳石 $\delta^{18}\text{O}$ に記録された経験水温履歴解析の時間解像度を従来法に比べて10倍以上向上させる手法を確立し、魚類の回遊生態を高時間分解能で解明する手法に発展している。

<研究者のコメント>

この研究は私が最初に携わった研究です。何もわからない状態から試行錯誤を重ね、多くの人の力をお借りして論文としてまとめられたことを嬉しく思います。本成果が未だ謎の多い魚類の生態解明の一助となり、美味しいマアジの保全に繋がればいいなと思っています。残りの修士生活も気を緩めることなく、マアジの研究に打ち込んでいきたいと思っています。（修士課程2年 武藤大知）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Extracting daily isotopic records on fish otolith (*Trachurus japonicus*) by combining micro-milling and micro-scale isotopic analysis (MICAL-CF-IRMS)（微量切削と微量同位体分析技術の融合によるマアジ耳石の日々の同位体履歴の解明）

著者：Daichi Muto, Toyoho Ishimura, Motomitsu Takahashi, Kozue Nishida

掲載誌：Rapid Communications in Mass Spectrometry DOI：https://doi.org/10.1002/rcm.9366