

魚類の生息環境履歴解析—履歴書“耳石”を読み解く—

環境部 自然環境課 城内 智行
山津 浩紀

要 旨

本報告では、魚類の持つ耳石及びその輪紋について概説し、近年注目されている魚類耳石の微量元素を用いた生息環境履歴の推定手法に関して文献情報を整理するとともに、当協会の取り組みについて紹介する。

1. はじめに

食卓にのぼる多くの食品のうち、農畜産物はその生産、流通過程が管理されているものが多く、生産に関する履歴をたどることは比較的容易である。しかし、魚介類においては養殖物を除いては、どこで生まれ、どこで、どのくらいの期間を生息していたかなどの履歴を知ることとは農畜産物に比べ困難であるといえる。

現在、魚類の生息履歴を知る方法のひとつとして“耳石”の分析が注目されている。耳石の微細な輪紋が、1日1本形成される日周輪であることが発見されたのは約50年前¹⁾であり、近年では耳石の成分分析による生息環境履歴と組み合わせて解析する技術が発展してきたため履歴書“耳石”を読み解けるようになった。本稿では、魚類の耳石と、微量元素分析を概説するとともに、当協会での取り組みを紹介する。

2. 魚類の耳と石

魚類は、人間のような外から見える耳(外耳)は持たないが、人間の外耳、中耳、内耳のうち、内耳だけを持っており、聴覚のほか、平衡感覚を保つ機能も果たしている²⁾。内耳はカワヤツメなどの円口類、サメ類などの軟骨魚類、そして硬骨魚のすべての魚類にあるが、耳石は硬骨魚類だけが持っている。

耳石は、脳の下にある左右の内耳に3個ずつ合計6個入っている。一般に最も大きいのは扁平石、次に大きいのが星状石、最も小さいのが礫石であり、通常、単に耳石と呼ばれるのは扁平石である(図1上)。例外的に、

コイ科魚類(図1下)の扁平石は細長く脆いため、星状石や礫石が履歴推定に用いられている。

耳石を破損せずに素早く確実に採取するには、頭部における存在位置、耳石の大きさを把握したうえで、頭部を切断し、頭頂骨を削り取り、現れた脳を除去しその下の耳石を上部から採取する技術が必要となる。

耳石は主として炭酸カルシウムの沈着によって形成される硬組織であり、リン酸カルシウムを主体とする骨より硬くなり、物理的にも化学的にも変化しにくい特徴がある³⁾。魚類の耳石は貝類が作り出す真珠と同様な成分の結晶であるが、残念ながら真珠のような光沢はない。

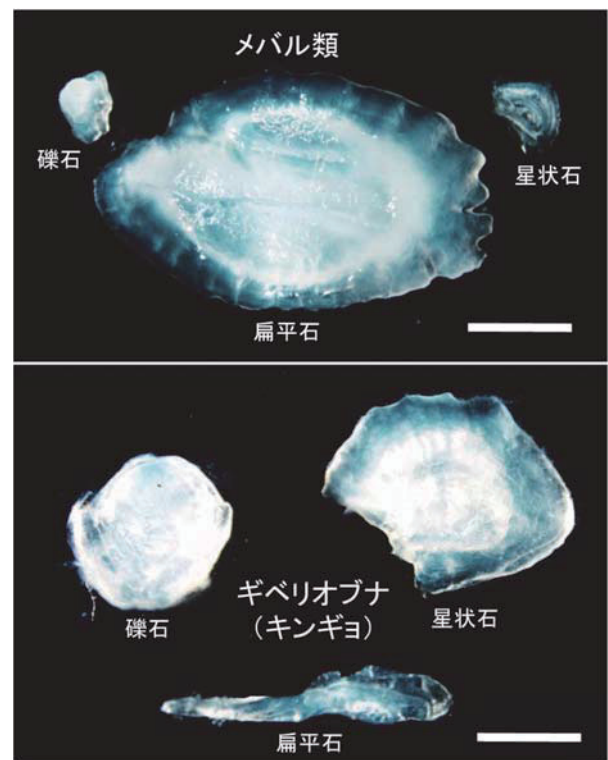


図1 メバル及びキンギョの3種類の耳石(白線は1mm)

3. 耳石形態の種特異性

耳石のサイズ、形態は魚種によって異なり、種の特徴とされる。耳石の形態の特徴については、水産資源の情報の一環として、世界中の多くの魚種で調べられており、耳石図鑑として出版されている国もある(e.g. Lin & Chang 2012)⁴⁾。日本国内では、耳石の出版物は確認できないが、文献として日本産硬骨魚類 29 目 162 科 550 種の耳石形態が類型化されている⁵⁾。

サイズは 1mm 未満から数 cm まで、形態は円形、楕円形、三角形、四角形、不定形などの外形、反り状型や突出隆起型などの側面系、凸面に存在する溝の有無な

ど多様である⁵⁾。耳石の外形の多様性と種特異性について、図 2 に当協会のデータベースより 75 種の写真を参考に示す。これらの種特異性と硬く物理的および化学的に変化しにくい特徴から、水生哺乳動物等の胃内容物中の耳石の種の判別⁶⁾、化石や遺跡中の耳石の種の判別^{7,8)}に活用されている。

耳石形態は、同一種でも生息環境によって異なる場合がある。清流の女王アユに関しては、耳石の微細構造による琵琶湖産、海産と人口種苗の判別方法が報告されている^{9,10)}。当協会では、九州の有明海と筑後川に特産のエツについて、回遊型と陸封型に耳石形態の差異があることを発見した^{11,12)}。

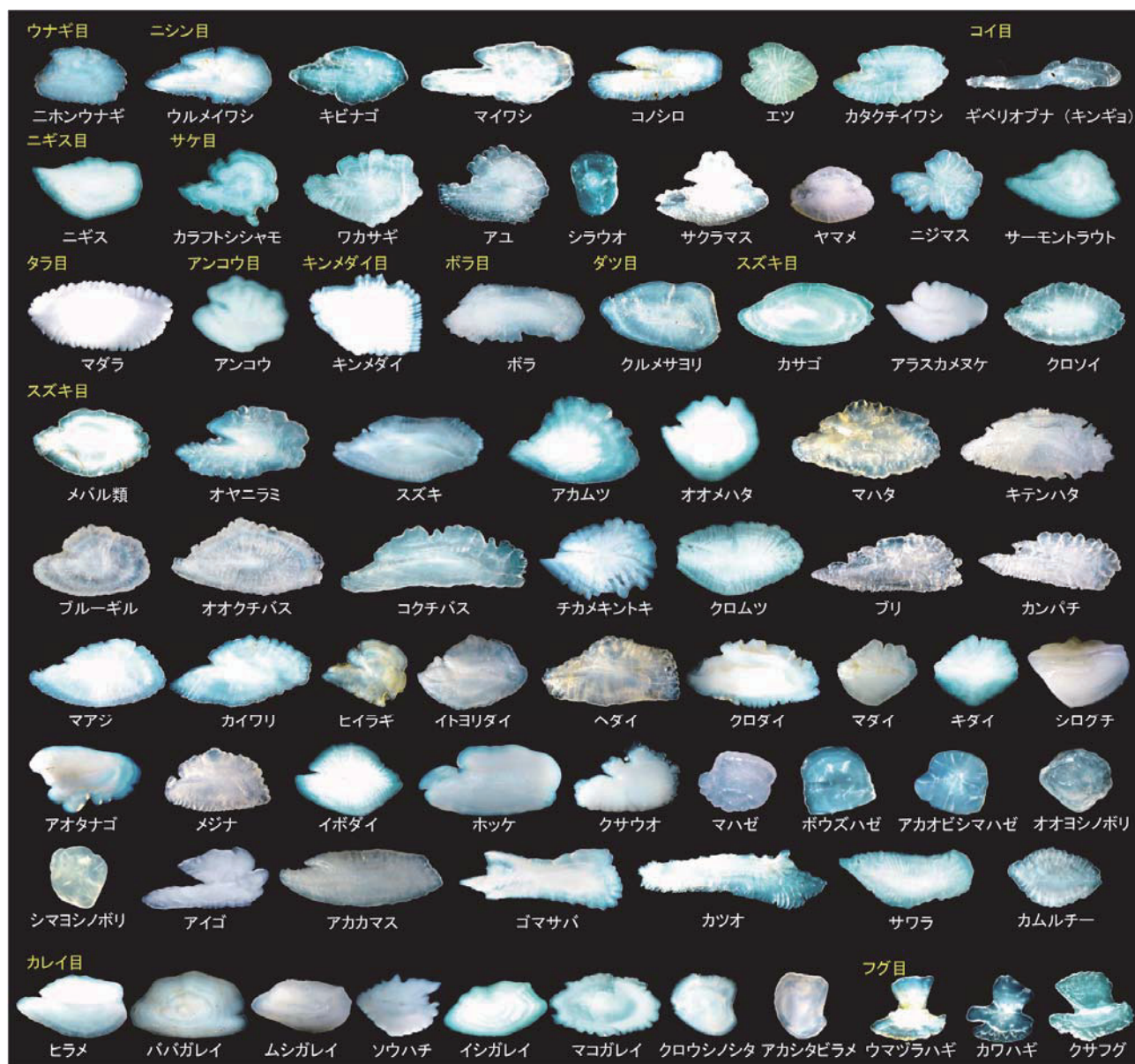


図 2 魚類の耳石の種特異性(すべて扁平石)

4. 耳石の輪紋

樹木は、その断面に同心円状の輪紋を形成し、これらが1年に1本形成される年輪であることが分かっている。魚類の耳石に光を当てて観察すると、**図3**に示すように耳石の形態に合わせて、透明箇所と不透明箇所による樹木と同様な輪紋、つまりは年輪を確認することが出来る。耳石の断面の中央部を拡大してみると、**図4**に示すように輪紋間距離がわずか数 μm の微小な輪紋が確認され、これらは1日1本形成される日周輪である。

魚類の耳石は、魚体の生理代謝の昼夜の変動、季節変動をそれぞれ日周輪(**図4**参照)、年輪(**図3**、**図5**参照)として残している¹³⁾。日周輪からは日齢、年輪からは年齢が分かり、採取日から逆算することで生年月日が推定できる。さらに、その情報から産卵場の特定、産卵習性の解明にも役立つ¹³⁾。

年輪、日周輪はすべての魚類の耳石にあるわけではなく、これまでの研究で輪紋の形成が確認された種について年齢や日齢を推定することが出来る。特に日周輪は若魚にみられるだけの場合が多く、成長により明瞭ではなくなる。寿命が1年のアユや多年生魚種では仔稚魚を対象に、日齢の研究が行われている¹⁴⁾。

年輪を観察する方法としては、水、アルコール、キシレン、グリセリンなどに浸漬して直接観察する方法(**図3**参照)、耳石の表面を研磨して観察する方法、縦断面、横断面もしくは平面方向の切片を作成し観察する方法(薄片法、**図5**参照)、切片を染色する方法、加熱した上で断面を観察する方法、加熱した耳石断面を蛍光観察する方法などがある⁵⁾。日輪を観察する方法では、縦断面、横断面もしくは平面方向の切片を作成し観察する方法(**図4**参照)、切片を塩酸、EDTAなどで前処理して電子顕微鏡で観察する方法¹³⁾が挙げられる。

5. 耳石の微量元素分析

耳石は非常に硬く、代謝が少ないため、半永久的に内外の環境の履歴情報が各輪紋に保持される¹⁵⁾。したがって、耳石の微量元素特性と日周輪、年輪を組み合わせることにより、日単位、年単位の履歴情報を調べる

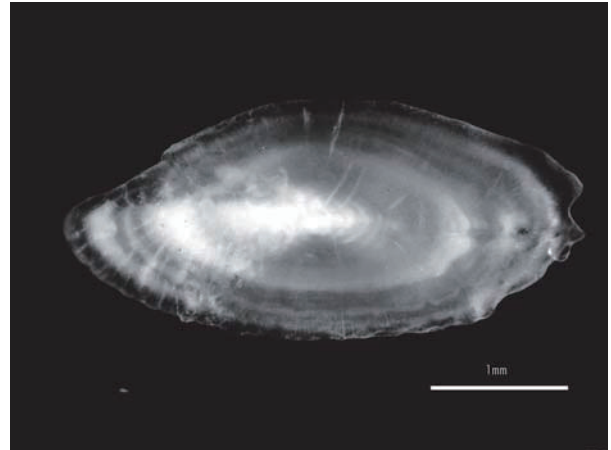


図3 カサゴ耳石の年輪(キシレン浸漬して直接観察)

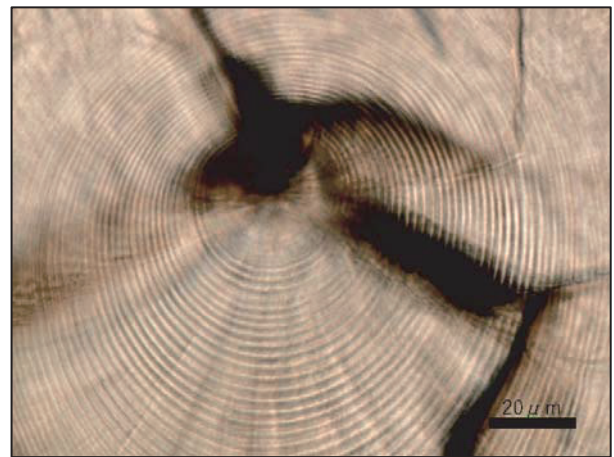


図4 アユ耳石断面の日周輪



図5 スズキ耳石の年輪(横断薄片)

ことが出来る。

耳石は前述の通り、炭酸カルシウムを主成分とする¹³⁾。その他に、1~5%の有機基質や、1%未満のストロンチ

ウム(Sr)、亜鉛(Zn)、銅(Cu)、アルミニウム(Al)などの金属微量元素を含む¹³⁾。図6にアユの耳石断面の成分分析を行った事例を示すように、炭酸カルシウムの成分であるカルシウムと酸素の含有量が多いが、ストロンチウム、ナトリウム、カリウムの含有量は1%未満とごく微量である。これらの微量元素の耳石含有量は、環境中の濃度、水温、塩分などの外的要因の他に、性成熟などの内的要因によっても変化¹⁶⁾するため、これらの微量成分分析が、様々な履歴情報の取得につながる。

代表的な事例が、耳石 Sr/Ca 比による回遊履歴の推定である。耳石は環境水中からカルシウム(Ca)を取り込んで作られるが、同じアルカリ土類金属に属するストロンチウム(Sr)も耳石に取り込まれやすい金属である¹³⁾。河川などの淡水域と海域の Sr/Ca 比は異なり、海域の方が10倍弱大きいため、耳石中の含有量もその比率を保持している。そのため、Sr/Ca 比が高ければ海域に、低ければ淡水域に、中間であれば汽水域に回遊していたことが分かる。図6のアユの耳石の Sr は、中央部で高く(明るく)、辺縁部では低く(暗く)なっていることから、稚魚は海域、成魚は淡水域に生息していたことが分かる。回遊魚の履歴推定に有効で、ウナギ¹⁷⁾、アユ¹⁸⁾、サケ・

マス類¹⁹⁾など様々な水産有用種の生態解明に本手法が活用されている。

マンガン(Mn)の耳石への取り込み量に関しては、貧酸素などの環境ストレスに曝された時に上昇することが報告されている^{20,21)}。また、アイゴ²²⁾、エツ²³⁾に関しては、生息地によって耳石の Mn 含有量が異なるため、産地の判別が可能であることが示唆されている。

バリウム(Ba)は河川で濃度が高く、海域、特に沖合では低い²⁴⁾。耳石の Sr 含有量が生息環境の塩分と正の相関を示すのに対して、Ba 含有量は塩分と負の相関を示すとされる²⁵⁾。エツは生息地によって、耳石の Ba 含有量が異なるため、産地の判別が可能であることが示唆されている²³⁾。

マグネシウム(Mg)は海水のミネラルの主成分の一つであり、海水中に多く淡水中に少ないが、耳石への取り込み量は生息環境の濃度とは関係なく、ほぼ一定とされる²⁰⁾。しかし、魚類の生理的な変化を受けてその含有量が変化し、代謝が活発な夏季に高くなることが報告されている²⁰⁾。キハダマグロに関しては、産地判別が耳石の Mg 含有量により可能であることが報告されている²⁶⁾。

その他に、耳石の酸素安定同位体比による水温履歴

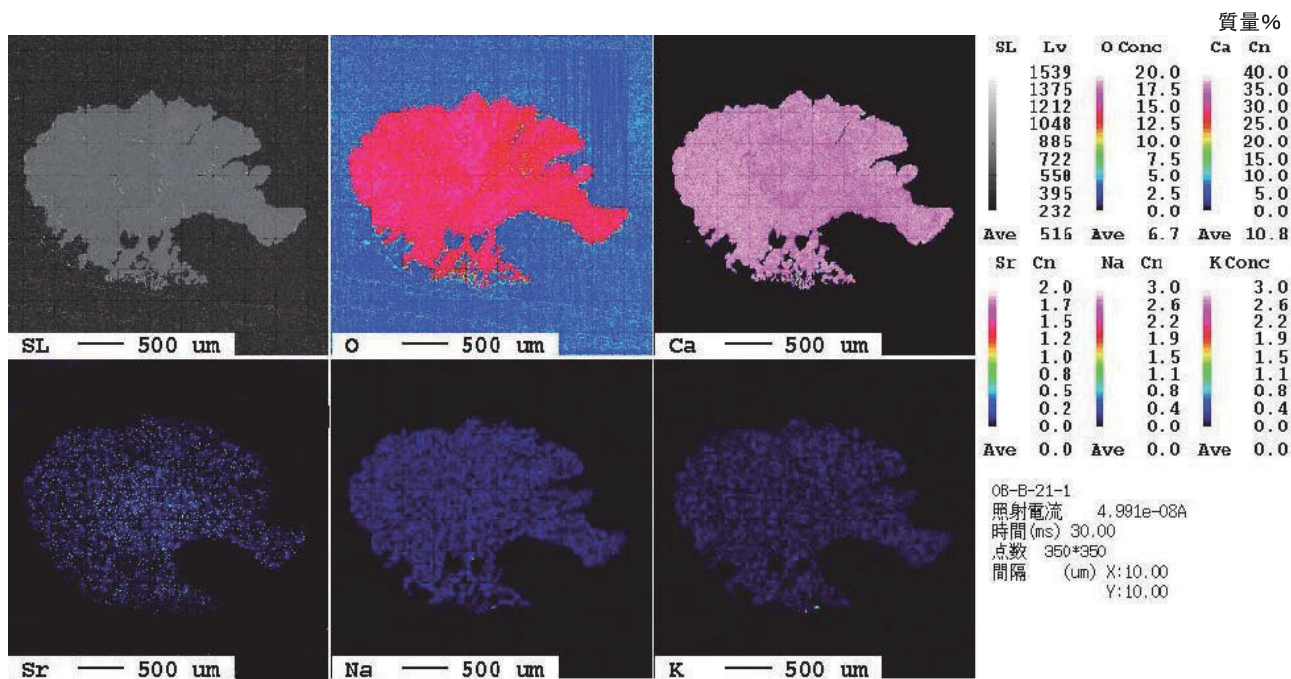


図6 アユ耳石のEPMAによる成分分析結果のマッピング

SL: 電顕像、O: 酸素、Ca: カルシウム、Sr: ストロンチウム、Na: ナトリウム、K: カリウム

の推定²⁷⁾、耳石のストロンチウム安定同位体比による母川の推定²⁸⁾など、様々な手法が開発されている。

6. 当協会での取り組み

耳石分析技術は、水産有用種の資源保護のためだけでなく、絶滅危惧種の保全にも大いに活用できる手法である。しかし、その技術は煩雑であり、一部の大学の研究者や水産研究所が活用しているだけで、一般的に普及しているとは言い難い状況である。

当協会では、様々な魚類耳石を収集し形態や輪紋に関するデータベース化(図 1、2 参照)を図るとともに、日周輪、年輪の計測技術(図 3、4、5 参照)、Sr/Ca 比の分析技術(図 6 参照)を習得してきた。現在は、他の微量成分分析、安定同位体の分析技術の導入、イカ類の平衡石、軟骨魚類の椎骨への技術応用を図っているところである。今後はこれらの技術を業務として活用するだけでなく、耳石の取り出し、年齢査定などの基礎技術の普及啓発を進めることで、水産資源保護や絶滅危惧種の保全の一助になればと考えている。

参考文献

- 1) Pannella: Fish Otoliths: Daily Growth Layers and Periodical Patterns. *Science* 173:1124-1127 (1971).
- 2) 岩井: 13.3 聴・測線系. 水産脊椎動物 II 魚類 p179-189 (1985).
- 3) 麦谷: 3 章, 耳の中の履歴書. 尼岡編著, 魚のエピソード-魚類の多様性生物学-. p45-56 (2001).
- 4) Lin, Chang: Otolith Atlas of Taiwan fishes. 415p (2012).
- 5) 飯塚, 片山: 日本産硬骨魚類の耳石の外部形態に関する研究. *水研センター研報* 25: 1-222 (2008).
- 6) Mitsui, Strüssmann, Yokota, Yamamoto: Comparative otolith morphology and species identification of clupeids from Japan. *Ichthyological Research* (on line first) <https://doi.org/10.1007/s10228-020-00746-6> (2020).
- 7) 北村: 掛川市本郷東より産出する前期更新世の耳石化石. *静岡地学* 110:31-41 (2014).
- 8) 鶴沢: 耳石にもとづくマダラ(*Gadus macrocephalus*) 漁期の研究-有珠 10 遺跡出土マダラ耳石について-. *人類誌* 100:331-339 (1992).
- 9) 井塚: 海産アユと人工採苗アユの形態の差異について. *神水試研報* 第 6 号: 11-21 (2001).
- 10) 沢田, 吉田, 手塚, 石島: 那珂川に遡上したアユと放流された人工産アユの形態比較(平成 18 年度~). *栃木県水産試験場研究報告* 51: 14-16 (2008).
- 11) Jouuchi: Discrimination by the otolith of the landlocked Japanese Grenadier Anchovy *Coilia nasus*. 6th International Otolith Symposium, Keelung Taiwan. 15-20 (2018).
- 12) 城内, 望月, 宇野, 柴田: 諫早湾干拓調整池のエツの年齢組成と耳石による有明海産との識別. 2018 年度水産海洋学会研究発表大会, 発表要旨 (2018).
- 13) 麦谷: 硬骨魚類の耳石形成と履歴情報解析. 和田, 小林編著, 海洋生物の石灰化と硬組織 p285-298 (1999).
- 14) Tsukamoto, Kajihara: Age determination of ayu with otolith. *Nippon Suisan Gakkaishi* 53:1985-1997 (1987).
- 15) 新井: 魚類の回遊履歴—解析手法の現状と課題. *魚類学雑誌* 49: 1-23 (2002).
- 16) 角田: 魚類耳石の元素分析による環境塩分履歴の把握. *日本海水学会誌* 51: 247-254 (1997).
- 17) Sudo, Fukuda, Aoyama, Tsukamoto: Age and body size of Japanese eels, *Anguilla japonica*, at the silver-stage in the Hamana lake system, Japan. *Coastal Marine Science* 36:13-18 (2013).
- 18) 大越: 第 9 章 耳石のミネラルでアユやウナギの回遊を探る. 大越編著, 海のミネラル学—生物との関わりと利用. p164-169 (2007).
- 19) 津行, 反町, 新井, 海野: 耳石 Sr:Ca 比によって推定した利根川産大型ヤマメの回遊履歴. *生物圏科学* 55: 1-6 (2016).
- 20) Limburg, Casini, Hussy, Walther, Wuenshel,

- Heimbrand, Samson: Is otolith Mg adding nuance to the hypoxia story? 6th International Otolith Symposium 2018, Taiwan. Abstract OC-II01 (2018).
- 21) Heimbrand, Limburg: Losing track of time: Dubious age determination of Baltic cod, probable causes and promising solution. 6th International Otolith Symposium 2018, Taiwan. Abstract OS-IV08 (2018).
- 22) 山田, 馬場: アイゴの耳石微量元素濃度の発育に伴う変化とその海域間比較. 水産海洋研究 73:8-15 (2009).
- 23) 望岡, 白井, 杉原, 川上, 的場: 耳石微量元素分析によるエツの由来河川推定と人工種苗放流魚識別の可能性. 令和元年度日本水産学会秋季大会講演要旨集 p42 (2019).
- 24) 中村, 副島, 加藤: 半閉鎖性水域における溶存バリウムおよびケイ酸塩の分布の特徴. 「海—自然と文化」東海大学紀要海洋学部 4:117-132 (2006).
- 25) Nelson, Powers: Validation of specific otolith chemistry and salinity relationships. 6th International Otolith Symposium 2018, Taiwan. Abstract OC-IV10 (2018).
- 26) Arrate, Fraile, Crook, Greig, Murua: Investigating the origin of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the western Indian Ocean using an otolith chemistry approach. 6th International Otolith Symposium 2018, Taiwan. Abstract OL-IV03 (2018).
- 27) 尾田, 鐵, 坂井, 石村: 耳石の安定同位体比を用いたマイワシの回遊履歴の判別法. 水産海洋研究 80:48-55 (2016).
- 28) Kennedy, Klaue, Blum, Folt, Nislow: Reconstructing the lives of fish using Sr isotopes in otoliths. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 59: 925-929 (2002).