

# 魚類の耳石の成長に伴う形態変化と体サイズ推定のための基礎的研究

三井 翔太

## 1. はじめに

魚類の中でも条鰭類の内耳に存在する耳石は、平衡感覚や聴覚の感知に関与している生体鉱物である (Schulz-Mirbach *et al.*, 2019)。耳石には扁平石、星状石、礫石の3種があり、それぞれが左右の内耳に1対ずつ存在する。コイ目やアロワナ目などを除くほとんどの分類群では扁平石が最も大きく、目や科・属・種といった高次～低次の分類群ごとに特異的な形態を有する (飯塚・片山, 2008; Lin & Chang, 2012; Nolf, 2013; 以下、扁平石を「耳石」と称する)。耳石は炭酸カルシウムが主成分であり、筋肉などの軟組織と比べて消化に強い (大泉ら, 2001)。以上の性質から、魚類や鯨類といった魚食動物の食性解析において、消化管内に残留した耳石に基づき、餌となった魚類が種同定されている (Lin *et al.*, 2020; 三井, 2022)。

捕食者の種や成長段階により、それらの消化管からは、様々な体サイズの被食魚類に由来する耳石が得られる可能性がある。そのため、耳石に基づき種を同定するには、魚体の成長に伴う耳石の形態変化を明らかにする必要がある。体成長に伴う耳石の形態変化は、日本産魚類ではハダカイワシ科 (大泉ら, 2001) やニシン科 (飯塚・片山, 2008; Mitsui *et al.*, 2020)、イカナゴ属 (武藤・山田, 2019) などで調べられているが、いまだ知見は断片的である。

また、食性解析において捕食者の餌サイズ選好性を解明する事により、食物網や他の捕食者との共存機構の理解に繋がると考えられる。しかし、胃内容物として得られる魚体は消化によって原形を留めていない事も多く、生時の体サイズの推定が困難な場合がある。そうした場面において、耳石の外部形態を用いた分析は有効である。耳石は、魚体の成長に伴いタンパク質と炭酸カルシウム等が沈着する事により付加成長を続ける (麦谷, 1994; Campana, 1999)。そのため、胃内容物として得られた耳石の長さ (耳石長) を計測する事で、被食魚のサイズが推定できる場合があり、胃内容物の定性分析のみならず定量分析も可能となる (大泉

ら, 2001)。日本産魚類では、例えばマイワシおよびウルメイワシ (Mitsui *et al.*, 2020)、ハダカイワシ科の17種 (大泉ら, 2001)、マダラ (鶴沢, 1992)、マアジの幼魚 (Kanaji *et al.*, 2010) について耳石長と体長の関係式が示されている。しかし、多くの種において両者の関係は明らかにされていない。

そこで本研究では、耳石に基づく種同定および体サイズ推定に必要な基礎知見を得て、より高解像度な胃内容物分析を可能とすることを目的として、鯨類や大型魚類の被食魚類として出現した事例がある2種：カタクチイワシ *Engraulis japonica* およびマハゼ *Acanthogobius flavimanus* (三井ら, 2014; 橋本・中臺, 2021) を対象とし、体成長に伴う耳石の形態変化の記載および耳石サイズ・体サイズ間関係の推定を行った。

## 2. 調査方法

### 2.1 供試魚の収集および耳石の摘出

カタクチイワシは、相模湾東部 (神奈川県三浦半島沿岸) で定置網および投網で採集された。マハゼは、神奈川県および東京都の海岸および流入河川で、釣りおよび手網、投網で採集された。各個体について種同定 (中坊, 2013) および写真撮影、標準体長 (以下、「体長」と表記) の計測を行った後、左右の耳石を摘出した。供試魚の個体数および体長を表1に示した。摘出した耳石は、70%エタノールで洗浄し軟組織を取り除いた後、室温で乾燥させた。

表1 供試魚データ

標準和名	学名	個体数	体長(mm)
カタクチイワシ	<i>Engraulis japonica</i>	56	40.4-144.1
マハゼ	<i>Acanthogobius flavimanus</i>	33	32.8-125.0

## 2.2 耳石の形態解析

耳石の形態用語および計測部位は、大江ら（2020）、山下ら（2021）に準拠した。図1に示した各部位を、実体顕微鏡に装着したデジタルカメラで撮影した画像に基づき、画像計測ソフト（画像カラスンボ Free ver.1.0；片山博文MZ「画像カラスンボ Free ver.1.0 and 画像カラスンボ Pro ver.1.2」）を用いて計測した。なお、左右の耳石の形態が互いに非対称である場合があるため、Mitsui *et al.*（2020）にならい、右側の耳石のみを用いた。体長と耳石各部の計測値との関係式は、大泉ら（2001）にならい、アロメトリー式で表した。ただし、カタクチイワシでは上部嘴状突起長が0である標本が含まれていたため、1次式で回帰した。

## 3. 結果

### 3.1 体成長に伴う耳石の外部形態変化

#### 3.1.1 カタクチイワシの耳石

カタクチイワシの耳石の計測値を表2に、小型～大型個体の耳石を図2に、体長と耳石各部位の相対成長を図3にそれぞれ示した。

小型～大型個体の耳石に共通する特徴は次のとおりであった：全形（側面観）が紡錘形である、内側面が膨らむ、伸長した嘴状突起を有する、腹部周縁に小棘が並ぶ（図2）。

その一方で、以下のような体成長に伴う形態変化が認められた。耳石長および耳石高、耳石厚、嘴状突起長は、いずれも単調増加していた（図2、図3A-D）。耳石の全形は細

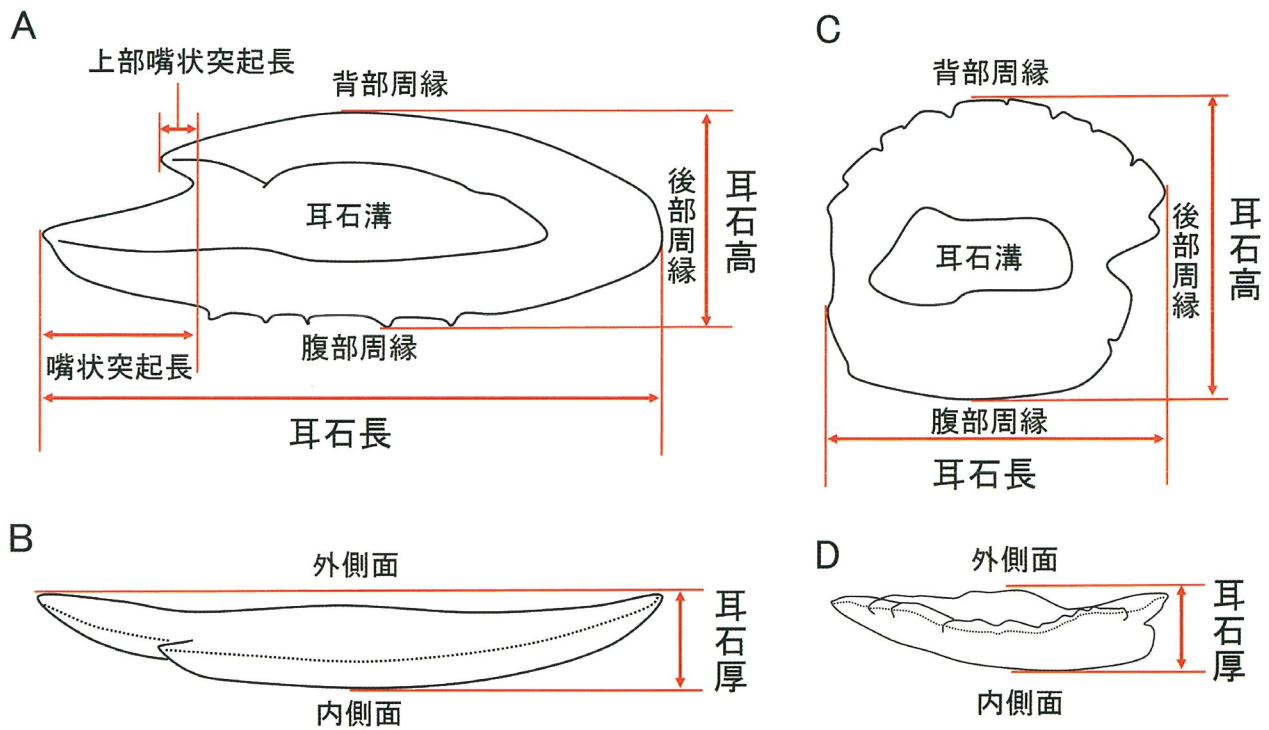


図1 耳石各部の名称および計測部位

A、Bはカタクチイワシ、C、Dはマハゼの右側の耳石の形態を示す。AおよびCは内側面観、BおよびDは背側面観。

表2 カタクチイワシおよびマハゼの耳石各部の計測値

種名	標本数	耳石長	耳石高	耳石厚	嘴状突起長	上部嘴状突起長	耳石長:耳石高	耳石長:耳石厚	上部嘴状突起長:嘴状突起長
カタクチイワシ	56	1.29-4.32	0.72-1.61	0.25-0.55	0.23-1.14	0-0.36	1.73-2.71	4.80-8.03	0-0.38
マハゼ	33	1.24-4.22	1.34-3.64	0.40-1.02	-	-	0.92-1.17	3.04-4.70	-

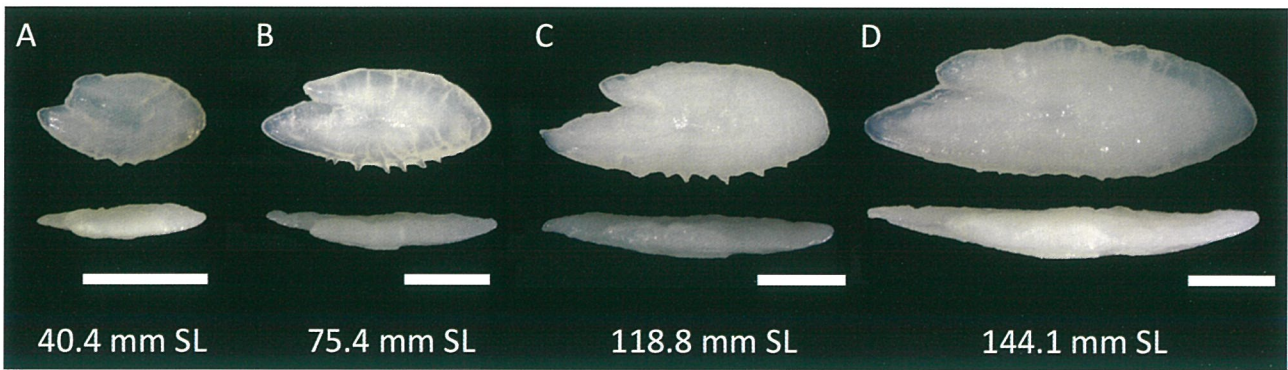


図2 カタクチイワシの体成長に伴う耳石の形態変化  
上段は内側面観、下段は背側面観。スケールバーは1 mm。

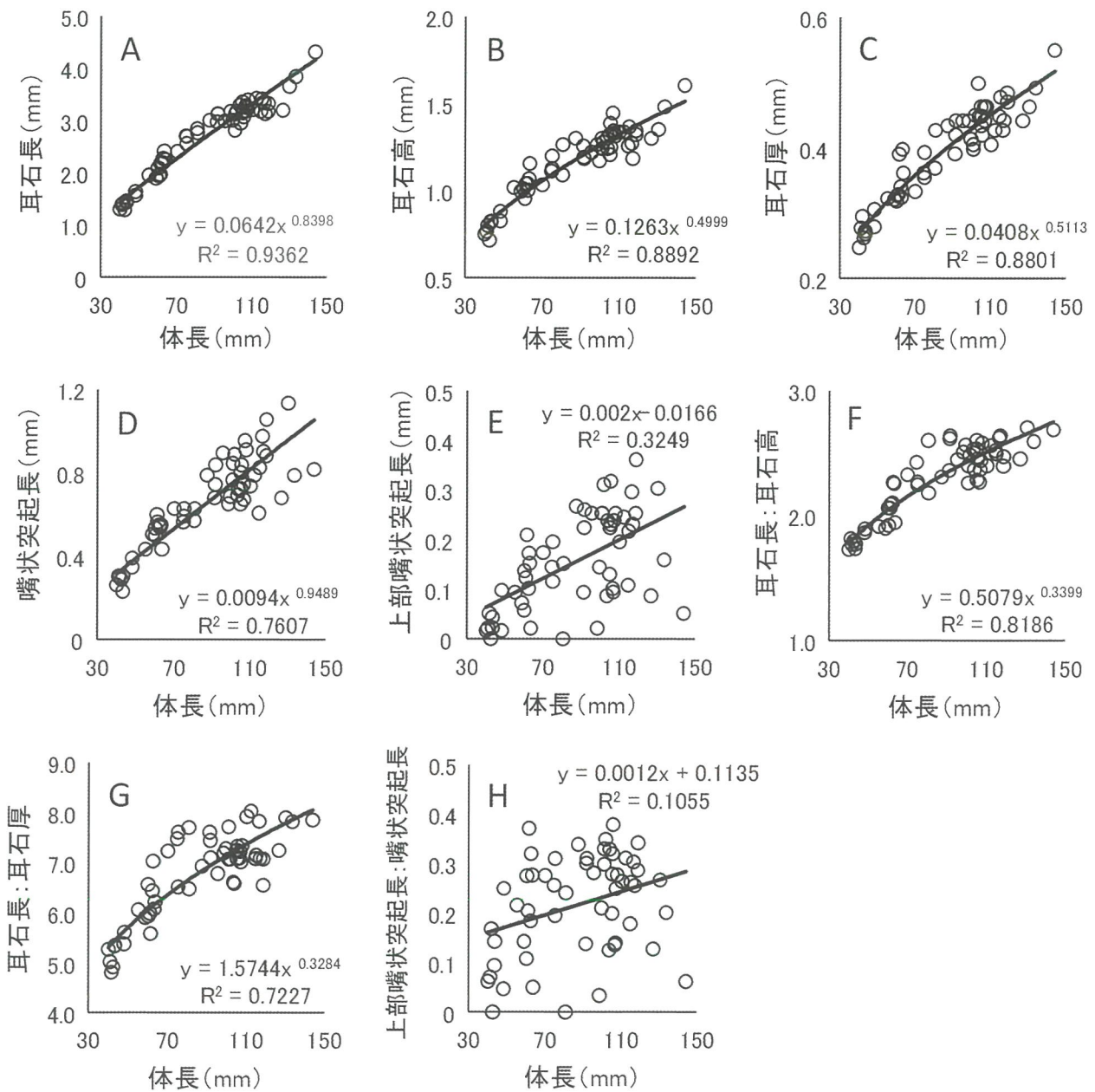


図3 カタクチイワシ耳石の各計測部位の相対成長

長く変化しており(図2)、耳石長:耳石高の値は1.73—2.71の範囲で単調増加していた(表2、図3F)。外側面は体長40 mm程の小型個体では僅かに膨らむが(図2A)、それより体長の大きな個体の耳石では外側面が平坦ないし僅かに窪み(図2B-D)、耳石長:耳石厚の値は4.80—8.03の範囲で単調増加していた(表2、図3G)。上部嘴状突起長および上部嘴状突起長:嘴状突起長の値は個体変異が著しく(図3E、3H)、体成長に伴う変化は認められなかった。

### 3.1.2 マハゼの耳石

マハゼの耳石の計測値を表2に、小型～大型個体の耳石を図4に、体長と耳石各部位の相対成長を図5にそれぞれ示した。

小型～大型個体の耳石に共通する特徴は次のとおりであった:背部周縁が凸曲線を描く、腹部周縁は直線的である、後部周縁中部に1個の切刻がある、内側面が膨らむ(図4)。

その一方で、以下のような体成長に伴う形態変化が認められた。耳石長および耳石高、耳石厚は、いずれも単調増加していた(図5A-C)。耳石の全形は僅かに細長く変化しており(図4)、耳石長:耳石高の値は0.92—1.17で単調増加していた(図5D)。体長約60 mm以下の個体の耳石では外側面が膨らむが(図4A、4B)、それより大きな個体の耳石では外側に向かって反っていた(図4C-E)。耳石長:耳石厚の値は単調増加していた(図5E)。周縁部の鋸歯は、体長約30 mmの個体では不明瞭で(図4A)、より大型の個体で顕著になる傾向がみられた(図4B-C)。

## 3.2 耳石サイズに基づく体長推定

### 3.2.1 カタクチイワシの耳石

カタクチイワシの耳石の計測部位のうち、体成長に伴う単調増加が認められなかった上部嘴状突起長を除いた各計測部位に基づく体長の推定式は、以下のよう求められた。

$$SL = 27.928 OL^{1.1292} \quad (R^2 = 0.9322)$$

$$SL = 64.43 OH^{1.8083} \quad (R^2 = 0.8702)$$

$$SL = 432.01 OT^{1.7539} \quad (R^2 = 0.8624)$$

$$SL = 125.46 RL^{0.8806} \quad (R^2 = 0.7621)$$

SLは体長(standard length)、OLは耳石長(otolith length)、OHは耳石高(otolith height)、OTは耳石厚(otolith thickness)、RLは嘴状突起長(rostrum length)をそれぞれ示す。単位はいずれもミリメートルである。

### 3.2.2 マハゼの耳石

マハゼの耳石長および耳石高、耳石厚に基づく体長の推定式は、以下のよう求められた。

$$SL = 28.766 OL^{1.0073} \quad (R^2 = 0.9391)$$

$$SL = 25.627 OH^{1.2164} \quad (R^2 = 0.9551)$$

$$SL = 121.9 OT^{1.2614} \quad (R^2 = 0.8624)$$

各計測値の略表記及び単位は、カタクチイワシと同様である。

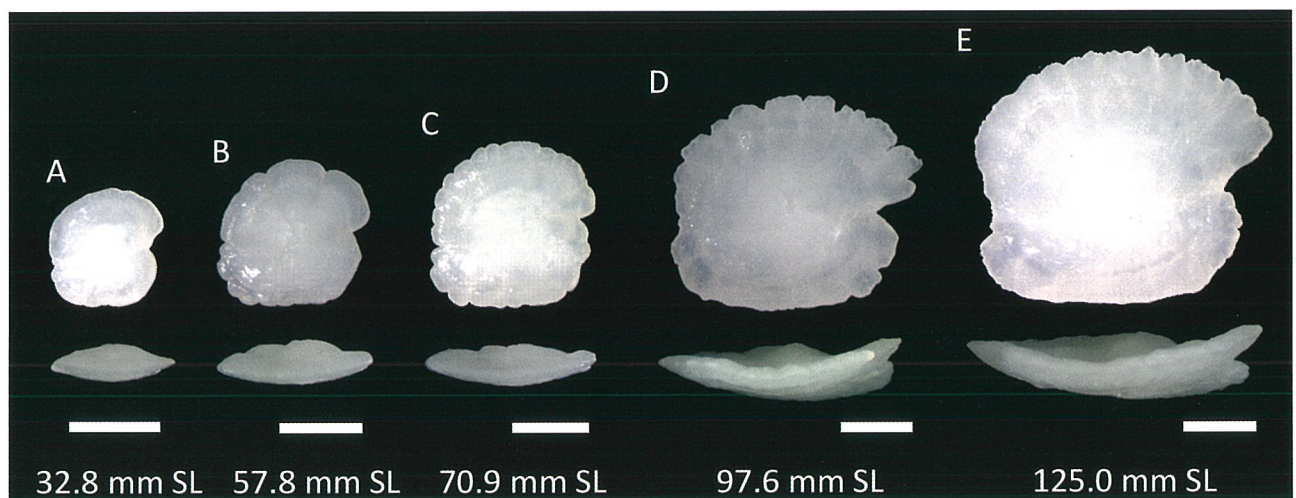


図4 マハゼ耳石の体成長に伴う形態変化  
上段は内側面観、下段は背側面観。スケールバーは1 mm。

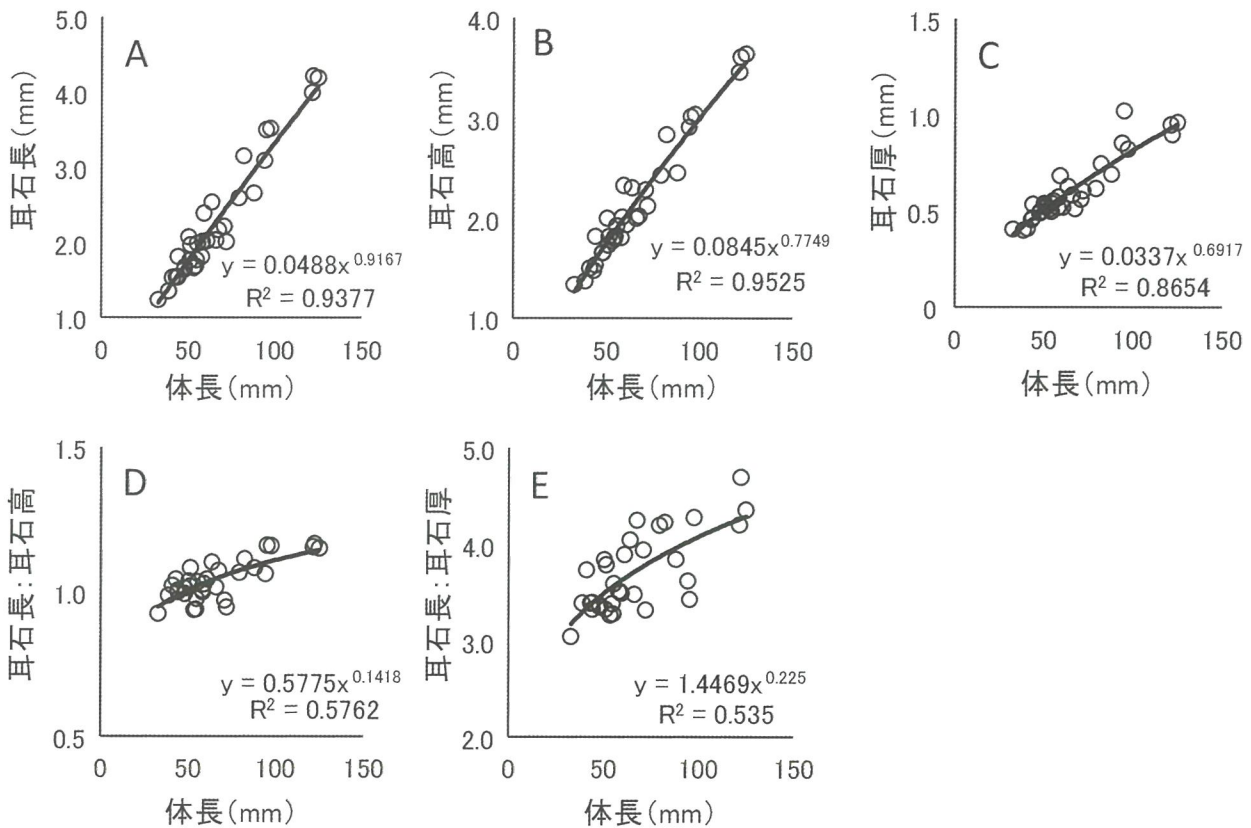


図5 マハゼ耳石の各計測部位の相対成長

## 4. 考察

### 4.1 2種の体成長に伴う耳石の形態変化

本研究により、カタクチイワシおよびマハゼの体成長に伴う耳石の外部形態変化が明らかとなった。ここで示された耳石の形態学的特徴が、今後の胃内容物同定の基礎知見となる。

今回、両種の耳石において耳石長：耳石高の値が体成長に伴い高くなる、すなわち全形が細長くなる傾向がみられた。耳石の各計測部位の比率は、しばしば種の識別形質として用いられる（大泉ら，2001；Schwarzthans, 2013；Mitsui *et al.*, 2020など）。例えばMitsui *et al.* (2020)は、日本産ニシン科魚類12種の成魚の耳石の形態を種間比較し、マイワシやウルメイワシなどは耳石長：耳石高の値が2.0以上で、2.0未満の他種と識別されるとした。しかし、体長約100 mm未満のマイワシおよびウルメイワシでは耳石長：耳石高の値が2.0未満であるため、本形質を種同定のキーとして用いる際は耳石のサイズに注意が必要であると

述べている（Mitsui *et al.*, 2020）。したがって、食性解析においてカタクチイワシおよびマハゼの耳石を他種と識別する際にも、耳石のサイズによる形態変異を考慮すべきと考えられる。今後は、日本近海に分布する他種の耳石との識別のため、幅広い分類群間で成長段階ごとに耳石の形態を比較する必要がある。

### 4.2 耳石サイズに基づく体長推定

耳石サイズに基づき体長を推定するには、体成長に伴い成長する部位を用いることが重要である。その点において、上部嘴状突起を除くカタクチイワシおよびマハゼの耳石の各計測部位は体成長に伴う成長が認められたため、体長推定に有用と考えられる。

ただし、胃内容物の耳石に基づき体長を推定する際は、消化により耳石の周縁部が溶解、損傷している場合がある事に注意が必要である（Wijnsma *et al.*, 1999；三井, 2022）。周縁部が損傷した耳石の計測値を用いた場合、実

際よりも過小な体長が算出されるであろう。その一方で、魚体の頭部に取まっていた耳石であれば消化による損傷を受けておらず、比較的高い精度で体長を推定することが可能である。

また本研究では、耳石長のみならず、他の計測部位と体長との関係式も求めた。これらを用いることで、例えば半消化状態の魚体の頭部から摘出した際に誤って嘴状突起や後端部が欠損してしまった耳石でも、耳石高などの他の計測部位に基づき体長が推定できる。今後、本研究により示された関係式が、胃内容物として得られた2種の体長推定に用いられることが期待される。

#### 4.3 今後の課題

耳石の外部形態や体サイズとの相対成長には、産卵群や生育環境の違いによる変異があることが知られる (Kanaji *et al.*, 2010)。本研究では、カタクチイワシ、マハゼともに地理的に比較的狭い範囲で得られた個体を用いた。しかし今後は、より広範囲の水域から得られた標本を用いて地理的変異を検討し、より正確な種同定や体長推定に資する知見を蓄積する必要がある。

さらに、低次栄養段階にある他の魚類についても耳石サイズと体長との関係を解明する必要がある。本研究ではカタクチイワシとマハゼの2種を対象としたが、捕食者の胃内容物として出現する魚類は、海域や捕食者の種により多様である (小枝・本村, 2017; 三井, 2022など)。今後、より多くの種において耳石の種同定や体長推定が可能となれば、食性解析の精度や解像度が向上すると考えられる。

## 参考文献

- Campana, S. E. 1999. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. *Marine Ecology Progress Series*, 188: 263-297.
- 橋本慎治・中臺 翔. 2021. 荒川下流沿岸域で捕獲したスズキ *Lateolabrax japonicus* の胃内容物調査. 帝京科学大学紀要, 17: 75-81.
- 飯塚景記・片山知史. 2008. 日本産硬骨魚類の耳石の外部形態に関する研究. 水産総合研究センター研究報告, 25: 1-222.
- Kanaji, Y., Kishida, M., Watanabe, Y., Kawamura, T., Xie, S., Yamashita, Y., Sassa, C. and Tsukamoto, Y. 2010. Variations in otolith patterns, sizes and body morphometrics of jack mackerel *Trachurus japonicus* juveniles. *Journal of Fish Biology*, 77: 1325-1342.
- 片山博文MZ「画像カラスンポ Free ver.1.0 and 画像カラスンポ Pro ver.1.2」<https://katahiromz.web.fc2.com/karasunpo/#license>, 2022年9月6日確認
- 小枝圭太・本村浩之. 2017. 鹿児島大学総合研究博物館に所蔵されている胃内容物魚類標本. *Nature of Kagoshima*, 43: 257-269.
- Lin, C.-H. and Chang, C.-W. 2012. Otolith atlas of Taiwan fishes. National Museum of Marine Biology and Aquarium, 415 pp.
- Lin, C.-H., Lin, J.-S., Chen, K.-S., Chen, M.-H., Chen, C.-Y. and Chang, C.-W. 2020. Feeding habits of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the Western Indian Ocean reveal a size-related shift in its fine-scale piscivorous diet. *Frontiers in Marine Science*, 7: 582571. doi: 10.3389/fmars.2020.582571.
- 三井翔太. 2022. キンメダイの胃内容物として得られた魚類の耳石の同定. 株式会社日本海洋生物研究所 2022年報, 77-84.
- 三井翔太・大泉 宏・樽 創. 2014. 相模湾に漂着したカマイルカおよびオガワコッコウの胃内容物. 神奈川県立博物館研究報告 (自然科学), 43: 7-21.
- Mitsui, S., Strüssmann, C. A., Yokota, M. and Yamamoto, Y. 2020. Comparative otolith morphology and species identification of clupeids from Japan. *Ichthyological Research*, 67(4): 502-513.
- 麦谷泰雄. 1994. 魚類の耳石情報解析に関する研究. 日本水産学会誌, 60(1): 7-11.
- 武藤望生・山田光紗. 2019. 北海道オホーツク海沿岸におけるイカナゴ属魚類3種の耳石形状の変異. *魚類学雑誌*, 66(1): 101-108.
- 中坊徹次 編. 2013. 日本産魚類検索 全種の同定 第三版. 東海大学出版会, xi+2428 pp.
- Nolf, D. 2013. The diversity of fish otoliths, past and present. Royal Belgian Institute of Natural Sciences, 222 pp.
- 大江文雄・安藤佑介・鶴飼宏明・廣瀬浩司・河野重範. 2020. 熊本県天草市五和町に分布する更新統小串層の耳石群集. 御所浦白亜紀資料館報, 21: 1-20.
- 大泉 宏・渡邊 光・杵 雅利. 2001. 西部北太平洋に生息するハダカイワシ類の耳石による種同定. *海洋と生物*, 23(6): 626-637.
- Schulz-Mirbach, T., Ladich, F., Plath, M. and Heß, M. 2019. Enigmatic ear stones: what we know about the functional role and evolution of fish otoliths. *Biological Reviews*, 94(2): 457-482.
- Schwarzans, W. W. 2013. A comparative morphological study of the recent otoliths of the genera *Diaphus*, *Idiolychnus* and *Lobianchia* (Myctophidae). *Palaeo Ichthyologica*, 13: 41-82.
- 鶴沢和宏. 1992. 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. *人類学雑誌*, 100(3): 331-339.
- Wijnsma, G, Pierce, G. J. and Santos, M. B. 1999. Assessment of errors in cetacean diet analysis: in vitro digestion of otoliths. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 79: 573-575.
- 山下龍之丞・三井翔太・碧木健人・瀬能 宏. 2021. 神奈川県沿岸より初記録となるヌエハゼ *Siphonogobius nua* Shibukawa & Iwata, 1998の形態と生息環境. 神奈川自然誌資料, (42): 57-64.

