EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) による塩分濃度の異なる水域で採集されたヤマトシジミ貝殻の Sr/Ca 比

古 丸 明,^{1*} 尾之内健次,¹ 柳 瀬 泰 宏,¹ 成 田 光 好,¹ 大 竹 二 雄²

(2008 年 7 月 3 日受付, 2009 年 2 月 6 日受理)

¹三重大学生物資源学研究科, ²東京大学海洋研究所国際沿岸海洋研究センター

Shell strontium/calcium ratios of *Corbicula japonica*
collected from brackish area with different salinity

AKIRA KOMARU,^{1*} KENJI ONOUCHI,¹ YASUHIRO YANASE,¹
TERUYOSHI NARITA¹ AND TSUGUO OTAKE²

¹Graduate school of Bioresources, Mie University, Tsu, Mie 514-8507, ²International Coastal Research Center, Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Otsuchi, Iwate 028-1102, Japan

To establish a method to estimate habitat salinity of *Corbicula species*, we examined the strontium (Sr) to calcium (Ca) ratios of *C. japonica* collected from lakes with different salinity and that of a freshwater species *C. leana* with an electron probe micro analyzer (EPMA). Sr/Ca ratios in the shell of *C. japonica* from Lake Ogawara, Aomori Pref. (salinity: 0.2–1.7 psu), Lake Shinji, Shimane Pref. (3.3–15.2 psu), Lake Jinzai, Shimane Pref. (7.5–32 psu), Ibi River, Gifu and fresh water species *C. leana* from Hatahoko River, Iki Island, Fukuoka Pref. *C. japonica* collected from high salinity lakes showed high shell Sr/Ca ratios: 8.06 ± 0.30 from Lake Jinzai and 6.84 ± 0.21 from Lake Shinji, respectively. On the contrary, *C. japonica* from low salinity Lake Ogawara and Ibi River showed low Sr/Ca ratios: 3.68 ± 0.18 and 1.33 ± 0.14 , respectively. The fresh water species *C. leana* also showed low Sr/Ca ratio (1.65 ± 0.11). Thus, habitat salinity of *Corbicula species* can be roughly estimated by Sr/Ca analysis using EPMA, and such information may be useful in the determination of place of origin.

キーワード : 塩分, 貝殻, ストロンチウム, マシジミ, ヤマトシジミ

緒 言

現在本邦には在来種として, ヤマトシジミ *Corbicula japonica*, マシジミ *C. leana*, セタシジミ *C. sandai* の 3 種が生息している。これら 3 種は繁殖様式や生息環境が異なっており, ヤマトシジミは河口域や汽水湖に生息し, マシジミとセタシジミは淡水域に生息する。ヤマトシジミとセタシジミは雌雄異体であり, マシジミは雌雄同体である。この中で主な漁獲対象種はヤマトシジミである。近年では, 中国や朝鮮半島からシジミ類が多量に輸入されている。^{1,2)} これらは国内の水域に投棄されることがあるため, ヤマトシジミとの交雑が起こる可能性, さらに新たな疾病や寄生虫を持ち込む可能性などが指摘されている。³⁾ また, 輸入されるシジミの中には形態がヤマトシジミと非常に似ているものが多く, 日本産ヤマ

トシジミと偽って販売する産地偽装が大きな問題となっている。従って, シジミ類において簡便な産地判別手法の開発を行う必要がある。

シジミ類の殻の主成分は魚類の耳石と同様に炭酸カルシウムである。耳石は鱗や骨に比べて代謝回転が極めて小さく, 耳石に取り込まれた微量元素は長期間保持される。⁴⁾ 炭酸カルシウムの結晶構造は生成条件の違いによってカルサイト, アラゴナイト, バテライトの 3 つの同質多型からなり, 海水中のストロンチウムはアラゴナイト結晶に取り込まれやすい性質がある。⁵⁾ 海水中には淡水中と比較して 400 倍のストロンチウムが含まれている。そのため, 海と河川を行き来する魚類の耳石中のストロンチウム/カルシウム (Sr/Ca) 比は, 海で生活する時期には海水中に豊富なストロンチウムが多く耳石に取り込まれるために耳石中の値が高くなる。逆に淡水

* Tel : 81-59-231-9527. Fax : 81-59-231-9538. Email : komaru@bio.mie-u.ac.jp

中のストロンチウム濃度は海水よりはるかに低いため、淡水で生活する時期に形成された耳石中の値は低くなる。⁵⁾ この特性を利用して魚類の河川遡河・降河履歴を明らかにする研究が広く行われている。⁶⁻¹⁰⁾

海産二枚貝の貝殻の成長速度と貝殻中のストロンチウム、バリウム等の微量元素量の相関を調査した研究が報告されている。¹¹⁻¹³⁾ また、淡水産二枚貝と海産二枚貝を比較すると、海産二枚貝の貝殻中にストロンチウム等の微量元素が多く取り込まれている。¹⁴⁾ ヤマトシジミは汽水域に生息することから、貝殻中に海水に由来するストロンチウムが取り込まれている可能性が大きい。また、ヤマトシジミは幅広い塩分の水域に生息しており、生息場所によって貝殻中に異なる濃度のストロンチウムが取り込まれている可能性がある。

以上の背景から生息場所の塩分濃度と貝殻中の Sr/Ca 比の相関を明らかにすることができれば、潮汐の影響を受けて塩分濃度が大きく変動する河口や汽水湖に生息するヤマトシジミの塩分履歴が推定できる可能性がある。また、汽水産のヤマトシジミと淡水産の他種との識別、さらにヤマトシジミにおいても高塩分域に生息しているものと低塩分域に生息しているものとの判別が可能であるかもしれない。本研究では、生息地の塩分と産地が既知である日本産ヤマトシジミとマシジミを用いて、貝殻の Sr/Ca 比を分析し、貝殻の Sr/Ca 比と生息地塩分との関係を明らかにすることを目的とした。

材料と方法

本研究で用いた標本の採集場所を Fig. 1A-D に示した。ヤマトシジミは青森県の小川原湖南部タカトリ産 9 個体 (Fig. 1A, 2006 年 9 月採集)、揖斐川産 (Fig. 1B, 岐阜県海部郡海津町帆引新田、河口から約 18 km の地点) 5 個体 (2005 年 5 月採集)、島根県宍道湖東部産 7 個体 (Fig. 1C, 2005 年 5 月採集)、神西湖産 7 個体 (Fig. 1D, 2006 年 7 月採集) を用いた。マシジミは長崎県壱岐島幡鉾川産 4 個体 (2005 年 10 月採集) を用いた。

生息地の塩分と貝殻中の Sr/Ca 比との関係を調べるために、ヤマトシジミを採集した場所の底層の塩分濃度を月 1 回測定した。ただし、揖斐川とマシジミを採集した壱岐島幡鉾川 (淡水域) においては塩分の測定は行っていない。小川原湖の塩分データは、湖南西部の小川原湖漁協地先 (通称タカトリ) のものを使用した。ただし、2004 年 12 月から 2005 年 3 月までは湖面が凍結し、塩分データは得られなかった。

Sr/Ca 比分析用貝殻サンプルの作成は魚類耳石の方法に準じて以下に行った。まず、貝殻をエポキシ系樹脂 (Spcifix-20, Struers 社) で包埋し、完全に硬化するまで 12 時間放置した。次に、Fig. 2A に破線で示

Fig. 1 Sampling sites of *Corbicula japonica* and *C. leana*. A: Lake Ogawara, B: Ibi River; C: Lake Shinji; D: Lake Jinzai.

Fig. 2 Schematic illustration of the shell (A) and radial section (B) of *Corbicula japonica*. P: periostracum, OL: outer calcareous layer, IL: inner calcareous layer, PL: pellucid layer. Modified from Kobayashi and Takayasu.¹⁵⁾

した様にダイヤモンドカッターで殻頂から殻縁辺部に向かって殻を切断し、切断面をエポキシ系ボンドでスライドガラス上に貼り付けた。硬化後、グラインダーで試料が適切な厚さになるまで削り、粒径 70 μm のダイヤモンドカップ砥石で表面を平滑にし、その後に 3M 社製ラッピングフィルムシート (30 μm , 12 μm , 9 μm) で大きな傷がなくなるまで研磨した。さらに研磨装置 (Potopol-35 Struers 社) 上で粒径 1 μm ダイヤモンドペースト (Struers 社) を使って約 1 時間、次に二酸化シリコンを使って約 5 分間研磨した。この試料に白金パラジウムをコーティングし EPMA 分析に供した。

まず、EPMA 装置 (JXA-8900 日本電子) によって殻断面の面分析を行った。面分析における加速電圧とビーム電流は、それぞれ 15 kV, 5×10^{-7} A とし、ビーム径は 5 μm とした。得られた X 線強度値を Sr 標準資料から得られた値と比較して濃度を求め、全断面における Sr 濃度のカラーマップを作成した。

面分析の結果、Sr 濃度が高い部位は蝶番に近い内殻層部分であることが明らかとなったので、Fig. 2B に矢印で示した部位、蝶番から殻の先端部方向 3 mm の部位において、殻の内側 (軟体部側) を原点として、外側

(殻皮側)に向かって $5\text{ }\mu\text{m}$ 間隔で内殻層における Sr と Ca の濃度を測定し (線分析), 両者の濃度比 (Sr/Ca 比) を求めた。線分析における加速電圧とビーム電流をそれぞれ, 15 kV , $6 \times 10^{-8}\text{ A}$ とし, ビーム径は $5\text{ }\mu\text{m}$ とした。面分析の結果から, Sr/Ca 比の値が大きいのは内殻層の内側であり, 産地間の差が大きいのはこの部位であったので, 本研究では貝殻内側から $5\text{ }\mu\text{m}$ ごとに $500\text{ }\mu\text{m}$ まで計測し, Sr/Ca 濃度比の平均値を求めた。線分析で測定した部位は, 内殻層のみである。本論文では求めた Sr/Ca 濃度比を 10^3 倍した値を Sr/Ca 比と定義して用いた。

Sr/Ca 比の産地間の違いを検討するために, これらのデータを $\log(x+1)$ 変換し, 一元配置分散分析によって検定し, 生息環境の塩分によって殻内の Sr/Ca 比が異なるのかどうかを判断した。産地間で差が生じた場合は Scheff's F test による多重比較を行った。

結 果

採集地点の塩分 小川原湖南部, 宍道湖, 神西湖の塩分の変動を Fig. 3 に示した。2004 年 7 月～2005 年 7 月までの調査期間を通じて, 塩分は神西湖が最も高く, 宍道湖は中間の値を示し, 小川原湖南部は最も低かった。神西湖の塩分は, 2004 年 7 月～12 月には 20 psu 以上の高い値で推移し, 9 月には最高値の 31.2 psu を示した。2005 年 1 月に最低値の 7.6 psu まで低下した。これ以降, 2005 年 2 月～6 月までは 10～15 psu であった。

宍道湖東部の塩分は 2004 年 7 月に最高値 15.2 psu を示し, 9 月にかけて 3.3 psu まで徐々に低くなる傾向が見られた。その後 11 月から翌年 2005 年 3 月までは 6 psu 前後の値で推移した。2005 年 4 月～7 月までは上昇傾向を示し 10 psu 以上の値を示した。

小川原湖南部の塩分は年間を通じて 2.0 psu 以下であった。2004 年 9 月に最高値の 1.7 psu を示し, 2005 年 7 月に最低値の 0.2 psu を示した。2005 年 5 月に塩分は 1.2 psu を示したが, これ以降塩分が 1.0 psu を超えることはなかった。

面分析 面分析による島根県神西湖産ヤマトシジミの貝殻中の Sr 濃度の分析結果を Fig. 4A に示した。貝殻中の Sr 濃度は石灰質内殻層で高い傾向があり, 0.4～0.5% と最も高い値を示した。内殻層において Sr 濃度は均一ではなく, 値の高い黄色い層とやや値の低い青い層が交互に出現していた。外殻層では内殻層より値は低く 0.1～0.3% であった。外殻層の Sr 濃度は一様ではなく, 成長方向に沿って高い層と低い層が観察された。面分析の結果, 内殻層で Sr 濃度が高く (0.5～0.4%), 外側の外殻層で低い (0.1～0.2%) 傾向があることが明らかになった。宍道湖の標本でも (Fig. 4B), 外殻層より

Fig. 3 Monthly change in salinity in Lake Jinzai (Shimane Pref.), Lake Shinji (Shimane Pref.) and Lake Ogawara (Aomori Pref.) from July 2004 to July 2005.

Fig. 4 Distribution pattern of the Sr concentration in the radial section of *Corbicula japonica* shell collected from Lake Jinzai (A) and Lake Shinji (B) by EPMA analyses. Vertical bar represents degree of strontium concentration (arbitrary unit).

Fig. 5 Distribution pattern of the Sr concentration in the radial section of *Corbicula japonica* shell collected from Lake Ogawara (A) and freshwater clam *C. leana* from Hatahoko River, Iki Island (B) by EPMA analyses. Vertical bar represents degree of strontium concentration (arbitrary unit).

Fig. 6 Sr/Ca ratio profile of shell transection in inner calcareous layer of *Corbicula japonica* collected from Lake Jinzai (Shimane Pref.) analyzed with EPMA. The number represents specimen number.

Fig. 7 Sr/Ca ratio profile of shell transection in inner calcareous layer of *Corbicula japonica* collected from Lake Shinji (Shimane Pref.) analyzed with EPMA. The number represents specimen number.

Fig. 8 Sr/Ca ratio profiles of shell transection in inner calcareous layer of *Corbicula japonica* collected from Lake Ogawara (Aomori Pref.) analyzed with EPMA. The number represents specimen number.

内殻層のSr濃度が高く、黄色みを帯びた層として観察された。外殻層は青みを帯びた層として観察されたが部位によっては青白い色を呈する層が見られた。

一方、低塩分湖である小川原湖の標本では (Fig. 5A), Sr濃度が0.3%を上回る点はほとんど無く、貝殻全体が青い色を呈していた。内殻層は外殻層より値が高いことが明らかになった。また、沓岐島幡鈴川産マシジミも外殻層、内殻層ともSr濃度は低く、貝殻全体が青

色を呈していた (Fig. 5B)。

線分析 実道湖、神西湖、小川原湖、揖斐川産ヤマトシジミと沓岐産マシジミの線分析の結果を示した。神西湖の標本では (Fig. 6), グラフの原点側、すなわち内殻層の内側でSr/Ca比が7.0以上の高い値を示す個体が多く、原点から外側 (グラフの右側) ほど値が低かった。この傾向は塩分の高い神西湖標本でのみ見られた特徴であった。

Fig. 9 Sr/Ca ratio profiles of shell transsection in inner calcareous layer of *Corbicula japonica* collected from 18 km upstream of the Ibi River mouth (Gifu Pref.) analyzed with EPMA. The number represents specimen number.

Fig. 10 Sr/Ca ratio profile of shell transsection in inner calcareous layer of *Corbicula leana* collected from Hatahoko River (Iki Island, Fukuoka Pref.) analyzed with EPMA. The number represents specimen number.

Fig. 11 Means of Sr/Ca ratio in inner calcareous layer of *Corbicula japonica* from Lake Shinji, Lake Jinzai, southern part of Lake Ogawara, Ibi River and *C. leana* from Hatahoko River (Iki Island, Nagasaki Pref.). Symbols and bars represent mean $\pm$ standard error.

宍道湖の標本では (Fig. 7), Sr/Ca 比は 6 前後の値を示す個体が多かった。低塩分汽水湖である小川原湖の標本では (Fig. 8), 3 前後の低い値を示した。揖斐川産の標本では (Fig. 9), 2 前後であった。沓崎産マシジミ (Fig. 10) の値も 2 前後の低い値であった。

各産地における貝殻中の Sr/Ca 比の個体毎の測定値の平均値を Fig. 11 に示した。同一産地内の各個体の値の平均値と標準誤差を Table 1 に示した。神西湖産ヤマトシジミ 7 個体の Sr/Ca 比の平均値は 8.06 ± 0.30 で今回分析した産地の中では最も高い値を示した。宍道湖産

Table 1 Mean Sr/Ca ratio of shell inner calcareous layer of *Corbicula japonica* collected in Lakes Jinzai, Shinji, Ogawara and Ibi River and *C. leana* from Iki Island

Locality	No. of specimens	Mean	S.E.
Lake Jinzai	7	8.06	0.3
Lake Shinji	7	6.84	0.21
Lake Ogawara	9	3.68	0.18
Ibi River	5	1.33	0.14
Iki Island	4	1.65	0.11

7 個体も 6.84 ± 0.21 と高い値を示した。神西湖, 宍道湖産の個体の平均値の分布は他の産地よりも広い傾向が見られた。小川原湖南部産 9 個体の Sr/Ca 比の平均値は 3.68 ± 0.18 で神西湖産, 宍道湖産よりすべての個体で値が小さかった。一方, 揖斐川産ヤマトシジミの Sr/Ca 比の平均値は 1.33 ± 0.14 で本研究において分析したヤマトシジミの中で最も低い値であった。沓岐島幡鈴川産のマシジミの各個体の Sr/Ca 比の平均値は 1.65 ± 0.11 と低い値を示した。生息域の塩分が高いほど貝殻中の Sr/Ca 比の値は高い傾向を示した。

Sr/Ca 比を分析した全ての産地の標本で, 殻の内側から $500 \mu\text{m}$ まで $5 \mu\text{m}$ ごとに計測した Sr/Ca 比の値の個体の平均値を産地間で比較した (一元配置分散分析 $p < 0.001$)。しかし, 高塩分である島根県宍道湖と神西湖のヤマトシジミにおいて有意差が認められなかった。揖斐川産のヤマトシジミと沓岐島幡鈴川産のマシジミ間でも両者に有意差が認められなかった (Scheff's F test, $p > 0.01$)。それ以外の産地間の差はいずれの組み合わせにおいてもその差は有意であった (Scheff's F test, $p < 0.01$)。塩分が最も高かった神西湖 (7.5~32 psu) で採集した貝殻中の Sr/Ca 比が最も高く, 次に宍道湖産 (3.3~15.2 psu), 塩分が周年低い小川原湖 (0.2~1.7 psu) では値がこれらの汽水湖の中では一番低かった。

考 察

Corbicula 属のシジミの貝殻は殻皮, 外殻層, 内殻層から構成されている。¹⁵⁾ ヤマトシジミにおいては外殻層と内殻層ともアラゴナイトであることがわかっている。外殻層は微細交叉板構造, 内殻層は複合交叉板構造と呼ばれ, 結晶の配列の仕方が異なっている。¹⁶⁾ また, 内殻層と外殻層とでは結晶構造だけではなく, 成長線の方が異なっている。¹⁵⁾ 本研究の面分析の結果から, シジミ類の貝殻中の Sr 濃度は部位によって異なり, 内殻層に Sr が多く沈着することが明らかとなった。同じ個体であるにもかかわらず, 内殻層の Sr 濃度が外殻層よりも高い値を示すことは興味深い結果である。ヤマトシジミ外殻層と内殻層において Sr の濃度の相違が生じるメカニズムは不明であるが, 2 つの層の微細な結晶構造や成

長速度の違いが Sr 濃度の違いとなっている可能性が大きい。二枚貝貝殻中の Sr/Ca 比と成長速度の関係を調査した結果によると, 研究によって結果が異なるが, 成長速度と Sr/Ca 比の関係には負の相関がみられる場合が多いとされている。¹⁷⁾ また, Stecher らは¹²⁾ 海産二枚貝 *Spisula solidissima* と *Mercenaria mercenaria* では, 水温の季節変化のパターンと貝殻中の Sr/Ca 比が全く逆の相関を示すことを報告している。貝殻中の Sr 濃度と水温の間には直接的な相関はなく, 成長速度との間に相関があるという結論を得ている。また, 成長速度と Sr/Ca 比の間に正の相関が *Mesodesma donacium* と *Chione subrugosa* で報告されている。¹³⁾ これらの結果から貝殻中の Sr/Ca 比に関して一般的な法則性を見出すことは難しいが, 貝殻の成長度が強く影響していることは明らかである。

腹足類において平衡石と胎殻中の Sr/Ca 比について比較がなされている。¹⁸⁾ 同じアラゴナイトであるにもかかわらず, 同じ個体において成長速度が 20 分の 1 程度であった平衡石のほうが, 胎殻より Sr/Ca 比が顕著に高かった。胎殻が形成される外套膜外液と平衡石が形成される平衡胞において, Sr の代謝速度や濃度が異なる可能性が指摘されている。

本研究の結果から, 同じ個体であっても, Sr/Ca 比が外殻層と内殻層とで異なる事が明らかになった。結晶の成長速度と Sr/Ca 比に相関があることが想定される。タマキガイにおいては結晶構造がヤマトシジミと同様にアラゴナイトであり, 外殻層が交差板構造, 内殻層が複合交差板構造を取っている点で共通している。¹⁴⁾ しかも本研究の結果と同様に内殻層の値が高かった。外殻層と内殻層とでは結晶の構造が異なり, 結晶形成時における Sr 沈着速度が異なる可能性も想定される。アコヤガイにおいては同じ真珠層であっても Sr/Ca 比が異なる例があり,¹⁴⁾ 外套膜の部位によってイオン透過性が異なり,¹³⁾ その結果外套膜外液中の Sr/Ca 比が部位によって異なる可能性も想定される。

本研究において, 塩分の高い神西湖, 宍道湖に生息していたヤマトシジミと小川原湖南部のような低塩分域に生息していたヤマトシジミでは Sr/Ca 比の平均値は有意に異なっていた。揖斐川ヤマトシジミや沓岐マシジミでは Sr/Ca 比平均値は低い値を示した (Table 1, Fig. 4)。これらの結果から, ヤマトシジミは塩分の高い水域に生息している個体ほど, Sr/Ca 比が高いことが明らかになった。揖斐川標本は河口から 18 km 地点で採集したものであった。今回は採集地の塩分データは得られなかったが, Sr/Ca 比から大潮満潮時以外の塩分は 0 に近い環境であることが推察される。

Odum¹⁹⁾ は, Sr の濃度を変化させた人工海水中でサカマキガイ属 (*Physa* 属) の貝を飼育したところ, 貝殻

中の Sr/Ca 比は海水中の含量に比例して増加することを報告している。神西湖と宍道湖を比較すると、神西湖の塩分が高かった。しかし貝殻中の Sr/Ca 比の平均値には有意差が検出できなかったことは Dodd and Crisp¹¹⁾ の結論と矛盾しない。ただし神西湖のような高塩分でも塩分の変動幅が大きい場所に生息する個体では、Sr/Ca 比の個体毎の平均値の差も大きかった。塩分が潮汐により変動した際の濾水活動や貝殻形成の応答に個体差がある可能性が想定される。特に短時間で塩分が大きく変化する河口域においては、塩分の変化にともなう軟体部や外套膜外液の浸透圧や貝殻分泌活性などがどう変化するかという生理的な要因が貝殻中の Sr/Ca 比の差になっている可能性が大きい。また水温によって Sr の貝殻への沈着率がどう変化するかなど不明な点が多く残されている。

本研究の結果から、貝殻中の Sr/Ca 比によって汽水産ヤマトシジミと淡水産のシジミの識別は可能であると考えられる。また、同種において神西湖のような高塩分水域に生息しているのか、小川原湖のような低塩分水域に生息しているのかを推定することは可能であろう。今回は Sr/Ca 比の差が生息地間における差が顕著であった内殻層の分析を行った。内殻層においては塩分の短期的な変化に対応した Sr/Ca 比の変化を検出することができなかった。汽水域に生息するシジミの場合、貝殻の成長線が一日にどれくらい形成されるのか、²⁰⁾ どのような外的要因によって貝殻形成速度が決まっているのか²¹⁾等の生理的メカニズムに関する基礎的情報をさらに蓄積する必要がある。

EPMA 法による解析は標本作製に多くの労力が必要で、多検体を分析するには必ずしも向いていない。産地判別のためにはミトコンドリア遺伝子の解析をまず行うべきで、²²⁾ EPMA による手法は生息地の塩分を推定する補助手段として利用可能であろう。最近では酸素・炭素安定同位体比^{23,24)}や Sr 安定同位体から、^{25,26)} 過去の生息水域を推定する試みも行われている。実際に海産二枚貝で行われているように、^{12,27)} 貝殻中に取り込まれた酸素の安定同位体比と微量元素のレーザアブレーション ICP 質量分析 (LA-ICP-MS) によれば、環境履歴と成長、微量元素の組成について詳細な情報が得られるであろう。シジミ類においても Sr 以外の他の元素や安定同位体比により、より正確に産地の環境履歴が推定できるかどうかを検討する必要がある。

謝 辞

本研究は小川原湖漁業協同組合からの奨学寄付金によって実施された。濱田正隆組合長はじめ漁協組合員各位に感謝する。小川原湖の塩分のデータとヤマトシジミを提供していただいた青森県水産総合研究センター内水面

研究所の長崎勝康氏に深く感謝する。神西湖、宍道湖のヤマトシジミ標本と塩分のデータを提供していただいた島根県水産技術センター内水面浅海部の三浦常廣氏と安木 茂氏に深く感謝する。また、EPMA の使用方法をご指導いただいた三重大学工学部の中村昇二氏、EPMA 試料の作成にご協力いただいた三重大学生物資源学部水圏資源生物学研究室各位に感謝する。

文 献

- 1) 農林水産省統計情報部. 平成 13 年内水面漁業養殖生産量. 東京. 2002; 1-7.
- 2) 中井克樹, 松田征也. 日本における淡水貝類の外來種—問題点と現状把握の必要性—. 月刊海洋 2000; **20**: 57-65.
- 3) 石橋 亮. 移入及び日本産シジミの初期発生過程と系統類縁関係に関する研究. 博士論文, 三重大学. 津 2002.
- 4) 麦谷泰雄. 硬骨魚類の耳石形成と履歴情報解析. 「海洋生物の石灰化と硬組織」(和田浩爾, 小林巖雄編) 東京大学出版会, 東京. 1996; 285-297.
- 5) 吉岡小夜子. 生物性炭酸殻中への微量元素の取り込み. 「海洋生物の石灰化と硬組織」(和田浩爾, 小林巖雄編) 東京大学出版会, 東京. 1996; 299-312.
- 6) Radtke RL, Svenning M, Malone, Klements A, Ruzicka J, Fey D. Migration in an extreme northern population of Arctic charr, *Salvelinus alpinus*: insights from otolith microchemistry. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1996; **136**: 13-23.
- 7) Otake T, Uchida K. Application of otolith microchemistry for distinguishing between amphidromous and non-amphidromous stocked ayu, *Plecoglossus altivelis*. *Fish. Sci.* 1998; **64**: 517-521.
- 8) Katayama S, Radtke RL, Omori M, Shafer DJ. Coexistence of anadromous and resident life history styles of pond smelt, *Hypomesus nipponensis*, in Lake Ogawara, Japan, as determined by analyses of otolith structure and strontium: calcium ratios. *Environ. Biol. Fish.* 2000; **58**: 195-201.
- 9) Arai T, Kotake A, Ohji M, Miyazaki N, Tsukamoto K. Migratory history and habitat use of Japanese eel *Anguilla japonica* in the Sanriku coast of Japan. *Fish. Sci.* 2003; **69**: 813-818.
- 10) Saito T, Kaga T, Seki J, Otake T. Otolith microstructure of chum salmon *Oncorhynchus keta*: formation of sea entry check and daily deposition of otolith increments in seawater conditions. *Fish. Sci.* 2007; **73**: 27-37.
- 11) Dodd JR, Crisp EL. Non-linear variation with salinity of Sr/Ca and Mg/Ca ratios in water and aragonitic bivalve shells and implications for paleosalinity studies. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 1982; **38**: 45-56.
- 12) Stecher III HA, Krantz DE, Lord III CJ, Luther III GW, Bock KW. Profiles of strontium and barium in *Mercenaria mercenaria* and *Spisula solidissima* shells. *Geochimica Cosmochimica. Acta.* 1996; **60**: 3445-3456.
- 13) Carre M, Bentaleb I, Bruguier O, Ordinola E, Barrett NT, Fontugne M. Calcification rate influence on trace element concentrations in aragonic bivalve shells: evidence and mechanisms. *Geochimica Cosmochimica. Acta.* 2006; **70**: 4906-4920.
- 14) 和田浩爾. 殻体と外套膜. 「軟体動物学概説上巻」(波部忠重, 奥谷喬司, 西脇三郎編) サイエンス社, 東京. 1994; 135-158.

- 15) 小林巖雄, 高安克己. 汽水棲シジミ類 2 種の殻体内部構造. *LAGUNA* (汽水域研究) 1995; **2**: 33-51.
- 16) Taylor JD, Kennedy WJ, Hall A. The shell structure and mineralogy of the bivalvia II. *Bull. Br. Mus. nat. Hist. Zool.* 1973; **22**: 255-294.
- 17) Strasser CA, Mullineaux L, Walther BD. Growth rate and age effects on *Mya arenaria* shell chemistry: implications for biological studies. 2008; *Exp. Mar. Biol. Ecol.* **355**: 153-156.
- 18) Zacherl D, Paradis G, Lea DW. Barium and strontium uptake into larval protoconchs and statoliths of the marine neogastropod *Kelletia kelletii*. *Geochimica Cosmochimica Acta*. 2003; **67**: 4091-4099.
- 19) Odum HT. The stability of the world strontium cycle. *Science*. 1951; **114**: 407-411.
- 20) 高安克己, 小林巖雄, 森田浩史, 中村幹雄. 実道湖産ヤマトシジミ殻体の微細成長縞の観察. *LAGUNA* (汽水域研究) 1996; **3**: 103-110.
- 21) 大野輝文. 二枚貝の微細成長縞形成時間間隔の多様性. 日本ベントス研究誌 1989; **37**: 35-48.
- 22) 古丸 明. ミトコンドリア DNA によるシジミの種判別「水産学シリーズ 149 水産物の原料・産地判別」(福田裕, 渡部終五, 中村弘二編) 恒星社厚生閣, 東京. 1996; 78-86.
- 23) Thorrold SR, Latkoczy C, Swart PK, Jones CM. Natal homing in a marine fish metapopulation. *Science*. 2001; **291**: 297-299.
- 24) Gao YW, Joner SH, Bargmann GG. Stable isotopic composition of otoliths in identification of spawning stocks of Pacific herring (*Clupea pallasii*) in Puget Sound. *Can. J. Aquat. Sci.* 2001; **58**: 2113-2120.
- 25) Kennedy BP, Folt CL, Blum JD, Chamberlain CP. Natal isotopic markers in salmon. *Nature*, 1997; **387**: 766-767.
- 26) Kennedy BP, Blum JD, Folt CL, Nislow KH. Using natural strontium isotopic signatures as fish markers: methodology and application. *Can. J. Aquat. Sci.* 2000; **57**: 2280-2292.
- 27) Lezareth CE, Putten EV, Andre L, Dehairs F. High-resolution trace element profiles in shells of the mangrove bivalve *Isognomon ephippium*: a record of environmental spatio-temporal variations? *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 2003; **57**: 1103-1114.