

総説

長寿二枚貝ビノスガイの殻の地球化学分析を通じた古環境復元～海流から津波まで～

窪田 薫

神戸大学大学院人間発達環境学研究所

※2022年4月1日以降：海洋研究開発機構海域地震火山部門地震発生帯研究センター海底地質・地球物理研究グループ

Paleoenvironmental reconstruction through geochemical analysis of long-lived bivalve shells (*Mercenaria stimpsoni*)

Kaoru Kubota

Graduate School of Human Development and Environment, Kobe University, 3-11 Tsurukabuto, Nada-ku, Kobe, Hyogo 657-8501, Japan; after April 2022, Marine Geology and Geophysics Group, Research and Development Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology, 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka-shi, Kanagawa 237-0061, Japan (kaoryu0129@gmail.com)

Abstract. Unlike the tropical to subtropical areas where reef-building corals are distributed, high latitude paleoenvironmental records with high temporal resolution over the past centuries are scarce. Long-living bivalve shells can be a good candidate for paleoenvironmental recorders. In such a situation, it has recently been revealed that modern cold-water bivalve *Mercenaria stimpsoni* (Stimpson's hard clam) living in shallow seafloors of North Japan have a lifespan of over 100 years. In this review, details of sclerochronological analysis and analytical procedures oxygen stable isotope and radiocarbon measurements of *M. stimpsoni* shells collected from shallow seafloors of Funakoshi Bay and Otsuchi Bay are described. Then, ecological (e.g., shell growth patterns) and paleoenvironmental (e.g., oceanic currents, tsunamis) findings that were obtained through these analyses are described.

Key Words: *Mercenaria stimpsoni* (Stimpson's hard clam), geochemistry, oxygen stable isotope, radiocarbon, Nuclear weapons test, Tsunami

はじめに

古気候復元研究において、月～年といった高時間解像度の記録を得られる地質学試料は限られている。そうしたものの中には、造礁・深海サンゴや軟体動物などの生物源炭酸カルシウム骨格のほか、樹木年輪、年縞堆積物、アイスコアなどが挙げられる。特に、海の海洋表層環境復元においては造礁サンゴによる記録が有効である (Neukom *et al.*, 2019)。しかし、造礁サンゴが分布するのは熱帯～亜熱帯域であるため、得られる古気候記録もこうした地域に偏りがちであり、高緯度域の過去数百年にわたる古環境記録は不足しているのが現状である。そこで、成長速度が早く、また生息域も高緯度から低緯度まで幅広い二枚貝は特に有用な環境プロキシ (間接指標) の一つとして研究されている。これまで、オオシャコガイ (giant clam, *Tridacna gigas*)・アイスランドガイ (ocean quahog, *Arctica islandica*)・ナミガイ類 (geoduck clam, *Panopea generosa*) の殻の微量元素・酸素同位体・年間成

長量を用いて数十～数百年スケールの古気候復元が行われてきた (Strom *et al.*, 2004; Schöne *et al.*, 2004; Sano *et al.*, 2012; Hori *et al.*, 2015)。特に筆者は、岩手県大槌湾・船越湾、北海道紋別などの浅海底 (5～20 m) で採取された、現生のビノスガイ (Stimpson's hard clam; *Mercenaria stimpsoni*) を用いた古環境復元研究を行ってきた (Kubota *et al.*, 2017, 2018, 2021; Tanabe *et al.*, 2017; Shirai *et al.*, 2018) (図1)。その結果として、日本に現存する二枚貝としては最長となる100歳を越す長寿の個体が見つかっており、中緯度～高緯度域の古気候記録の空白を埋める有用な記録媒体として期待されている。本論文では、ビノスガイの殻の分析手法および殻形成パターンを概観するとともに、これまでに得られたビノスガイ殻を利用した古環境研究の概要を述べる。

ビノスガイの生態と殻の分析法

ビノスガイは、二枚貝綱異齒亜綱マルスダレガイ目

マルスダレガイ上科マルスダレガイ科に属する（奥谷編, 2017）。最近の分類研究によれば, 本種の属名は *Mercenaria* ではなく *Securrella* が使われる場合がある（奥谷編, 2017）。北西太平洋・日本海・オホーツク海の浅

い海の砂地を好んで生息する好冷水二枚貝である（波部, 1977; Higo *et al.*, 1999）。内在性の濾過食者であり, 海水中の植物プランクトン（主に珪藻）や有機物などの懸濁物質を食料としている（Kubota *et al.*, 2017; 清家ほか, 2017）。おおよそ15歳程度で, 人の拳ほど（10 cm程度）のサイズになる, 大型の二枚貝である。大型の殻を持つことから, 高時間解像度の環境復元が可能であるという特徴がある。後述するように, 内在性であること, 15歳程度までの殻の成長速度が大きい（5–10 mm/yr）こと, 殻が厚い（2–10 mm）ことなどから（図1）, ビノスガイを捕食できる上位生物は限定的であると思われる。稚貝の死殻については時折捕食痕が認められるが, 生貝の殻を貫通した捕食痕はこれまでのところ確認できていない。

以下, 古環境解析に用いる上で必要となる, 殻の各種分析手法について述べる。ここでは, 成長線解析, 酸素同位体分析, 放射性炭素分析に焦点を当てる。ビノスガイの外表面には同心円状の狭い板状の輪肋が見られ, 砂粒が挟まるほどの深さである（約1 mm程度）。成長方向は殻の表面に明瞭に現れているものの, 殻表面を分析に用いると, 分析対象とする部位以外の殻が混入したり, 砂粒などに起因する物質によって汚染されてしまったりする恐れがあるため, 殻断面を分析に用いた。採取された生貝の貝殻を生きたままこじ開けると, 殻を傷つけてしまうおそれがあるが, 一度冷凍することによって, 殻の成長線や同位体情報を損なうことなく, 容易に殻を開けることが可能である。死殻の場合はこうした問題は回避できるが, 貝殻が破損している可能性がある。また, 死殻の場合, 右殻と左殻を混同して分析対象とすると, 古環境記録が重複してしまう可能性があるため, どちらかを選択する方が無難である。筆者は, 岩手県船越湾の海底からスキューバ潜水によって多数の死殻を回収しているが, これまでのところ右殻のみを分析対象としている。

死殻については殻表面に付着生物や砂粒が多く見られたため, ブラシを用いて汚れを入念に除去した。まず, 殻の最大成長軸方向に沿って, 樹脂で強化した上で岩石カッター（Buehler社製 Isomet）を用いて切断し, 厚さ5 mm程度の切片を作成し, 殻断面を鏡面状態になるまで研磨した。十分に研磨し終えたのち, 表面を乾燥させ, デジタル顕微鏡（KEYENCE社製）を用いて観察・撮影した。ビノスガイの殻断面は, 光輝層（中層）を挟んで, 外層と内層に分かれる（疋田, 1996; Tanabe *et al.*, 2017）（図2）。さらに外層は, 微細成長線の配列角度や結晶の微細構造の違いから2層に分けられる（疋田, 1996; Tanabe *et al.*, 2017）。要約すると, 三層構造となっており, 外側から, 外層の外側（Outer-OL）, 外層の内側（Inner-OL）, 内層（IL）と定義した（図2）。外層の外側および外層の内側には, 濃い成長線に加え, 微細な成長線構造が多数見られる。年輪に相当する, 濃い成長線を観察する程度であれば50倍程度の倍率で十分であるが, さらに年輪の

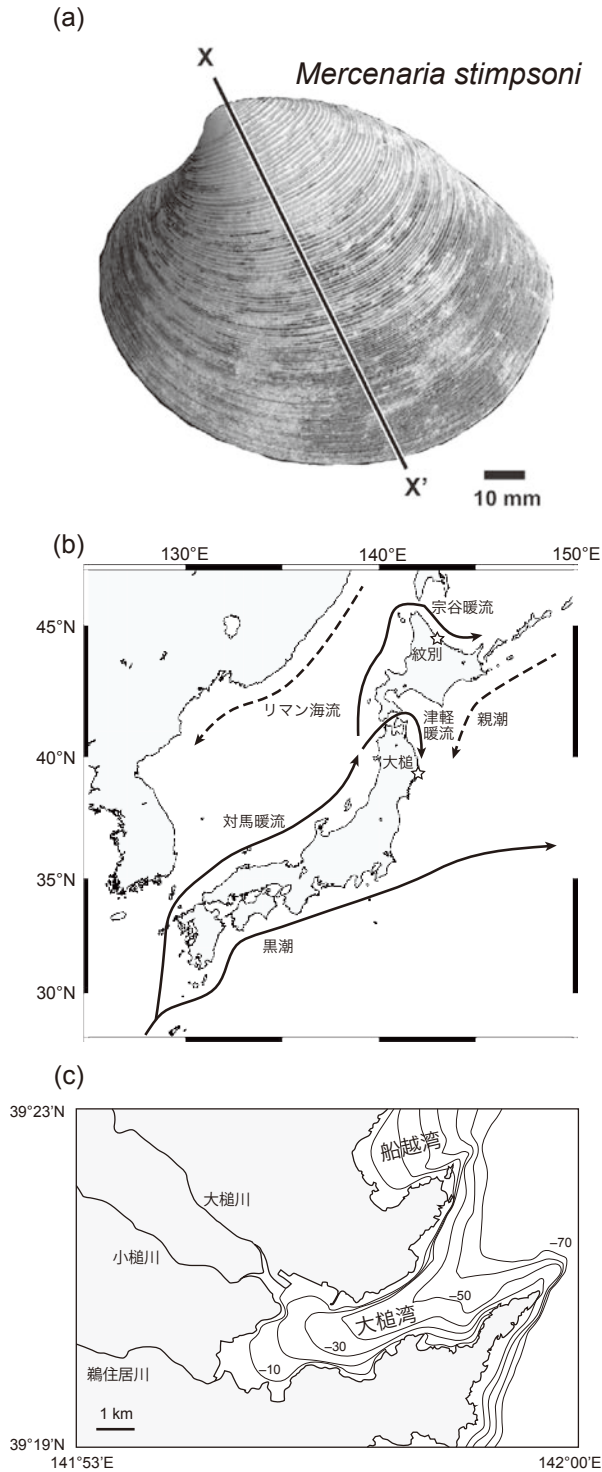


図1. 試料としたビノスガイと試料採集地点。(a) ビノスガイの全体写真。X-X'は切片作成のために切断した, 殻の最大成長軸。(b) 研究対象地(星印)と, 日本周辺の海流(実線: 暖流, 破線: 寒流)。(c) 船越湾および大槌湾周辺の地形。等深線の間隔は10 m. Kubota *et al.* (2018) を一部改変。

中に見られる微細成長線を観察するためには100倍程度の倍率に加え、ハイダイナミックレンジ (HDR) モードでの撮影が必要であった。高解像度の画像に、画像解析ソフトウェアを用いた処理を行うことで、成長線解析を行った。成長線の間隔の計測にはフリーソフトのImage Jを用いた。成長線解析には、樹木年輪の解析に古くから使われているArstanを用いた (<https://www.ldeo.columbia.edu/tree-ring-laboratory/resources/software>, 2022年1月24日参照)。若齢期から老齢期にかけての殻成長量の急激な低下を負の指数曲線でフィッティングし、その残差分をさらに規格化した (詳しくは, Jones *et al.*, 1989などを参照のこと)。各成長年の成長指標 (growth index ; GI) を以下の式から求めた。

$$GI = \frac{m_t}{p_t}$$

ここで、 m_t はある年の測定された成長量であり、 p_t はフィッティングさせた負の指数曲線が予測する成長量である。その上で、すべての年のGIデータから平均値 (x_{GI}) および標準偏差 (σ_{GI}) を得て、殻成長の無次元量である標準化成長指標 (Standardized Growth Index ; S_{GI}) を得た。

$$S_{GI} = \frac{(GI - x_{GI})}{\sigma_{GI}}$$

S_{GI} を計算することにより、異なる個体間や、異なる成長段階での比較が可能になる。それぞれの個体の年間成長量変動が同期しているかどうかは、EPS値 (Expressed Population Signal) を求めることで評価した。一般に、EPS値が0.85を上回ると、個体間の同期が統計学的に有意であると判断される。

ひとたび画像が撮影された後は、切片を各種化学分析に用いることが可能である。外層の外側を酸素同位体分析に、外層の内側を放射性炭素分析に用いた。内層については貝の軟体部と接しており、呼吸由来の二酸化炭素によって、内液が比較的低いpH状態に維持されており、殻が溶かされている。殻が溶かされるということは、付加成長でないことを意味するため、連続的な環境復元には不向きである。そのため、内層については、切削は行わなかった。

生物源炭酸カルシウム試料の酸素同位体分析は、古くから古水温復元に用いられてきた、古環境復元でもっとも基本的な分析である (Urey, 1947)。切片に対して垂直にデンタルドリル (松風社製のタングステンカーバイドでできた三角形のドリル) を下ろし、深さ1mm程度・直径1mm程度の穴を開けた。その際に削られた粉末試料を回収し、酸素同位体分析に用いた。一般的な安定同位体質量分析計に必要な炭酸カルシウムの量は100 μ g程度である (石村, 2021)。炭酸カルシウムの酸素同位体からの水温換算式は複数報告があるが、軟体動物が生成するアラレ石 (アラゴナイト) に関する換算式としてKim

et al. (2007) を用いた。この水温換算式は、厳密には水温だけでなく、海水の酸素同位体も変数として含まれるが、本研究で扱う海域については、海水の酸素同位体の季節変動は無視できる程度であるため、一定値として扱うことが可能である。参考までに、岩手県船越湾の場合、塩分から推定される海水の酸素同位体変動の大きさは $\pm 0.1\%$ (1σ) であり、酸素同位体の分析精度と同程度に小さい (Kubota *et al.*, 2017)。ここで、酸素同位体比はデルタ表記 (千分偏差) で表現される。

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{sample}}}{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{std}}} - 1 \right) \times 10^3 (\text{‰})$$

${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{sample}}$ と ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}_{\text{std}}$ はそれぞれ測定試料と標準物質 (VPDB) の ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ 比である。炭酸カルシウムをリン酸と反応させ、二酸化炭素を抽出する際には同位体分別が生じるため、反応温度 (72 $^{\circ}\text{C}$) に応じた補正を行った (Kim *et al.*, 2007; 西田, 2020)。標準物質の繰り返し測定によって評価される、酸素同位体の測定精度は、0.15 $\%$ 程度である (1σ)。

炭酸カルシウム試料の放射性炭素分析には、酸素同位体分析と比較して、はるかに多くの試料を要する。分析に必要な試料量の微量化の努力は世界中のラボで日夜進行中だが、一般的な商用の年代測定サービスには依然として数mg～10mg程度の炭酸カルシウムを要するのが現状である。加速器質量分析計を用いた分析の原理など、放射性炭素分析一般についての日本語の総説論文としては、中村 (1995, 2003) などが詳しいので参照されたい。本研究では主に2種類の試料採取法を採用した。一つは、殻がもっとも最近形成された部位の採取法である。これは、殻の内側の縁辺部 (外層の内側に相当) をグラインダーで削ることによって採取した。この最縁部が溶解の影響を受けていないことは、殻断面に見られる成長線が保存されていることから確認している。また、死殻の場合は、海底における溶解や二次的な炭酸塩鉱物の沈殿によって、オリジナルの同位体情報が損なわれている可能性があるため、表面の数10 μm を削って、新鮮な面から分析用の試料を採取した。より試料採取が難しいのは、殻断面である。前述の理由で、ピノスガイ殻の表面からの試料採取は、汚染のリスクが高い。そこで本研究では、GEOMILL326 (坂井, 2009) という、数 μm の精度で切削をコントロールできる3次元ステージを備えた、高精度切削装置を試料採取に用いた。ここで、得られる試料の時間解像度の劣化を抑えるため、比較的殻成長量が大きい年 (例えば、 $>300\mu\text{m}/\text{yr}$) を選択的に切削することが重要である。切削幅は500 μm 程度、切削長は5mm程度、切削深度は1.2mm程度で10mg程度の試料を採取することができた。後述するように、若齢期 (15歳以下) の殻の年間成長量は数mmであるため、1年以下の時間解像度でのサンプリングが可能である。一方、老齢期 (15歳以上) については、時間解像度が数年間に劣化するこ

とは避け難い。得られた炭酸カルシウム (CaCO₃) の粉末試料は、ガラスラインを用いて真空下でリン酸と反応させ、エタノールシャーベットを用いて水を捕集し、二酸化炭素 (CO₂) のみを液体窒素で捕集した。精製された二酸化炭素を、水素とともにガラス管に封入し、鉄触媒のもとで高温 (620°C) で熱することで還元し、グラファイト (C) に変換した。得られたグラファイト試料を専用の容器に詰め、加速器質量分析計を用いて放射性炭素を分析した。最近ではグラファイト化を行わずに二酸化炭素のまま放射性炭素分析が可能になっており、より多くの試料を、より迅速に行えるようになっている (Fagault *et al.*, 2019)。

放射性炭素濃度の表記に用いられる F¹⁴C と Δ¹⁴C の定義は以下の通りである (Stuiver and Polach, 1977)。

$$F^{14}C = \frac{A_{SN}}{A_{ON}}$$

ここで、A_{SN} と A_{ON} はそれぞれサンプルとアメリカ国立標準技術研究所 (NIST) が提供する標準物質であるシュウ酸の ¹⁴C/¹²C 比である (加えて ¹³C/¹²C 比の補正も行われている)。

$$\Delta^{14}C = (F^{14}C \times e^{\lambda(1950-x)} - 1) \times 10^3(\text{‰})$$

ここで、λ は放射性炭素の壊変定数、x はサンプルの暦年代である。生貝の場合は年輪計数によって成長年が求まり、海水試料の場合は海水の採取年がこれに相当する。死殻の場合は死亡年未知のため、年代が決定されない限り、Δ¹⁴C 値を表記することは適当ではない (詳しくは、Kubota *et al.*, 2018, 2021 を参照のこと)。本研究では名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究部もしくは株式会社パレオラボの加速器を放射性炭素の分析に用いているが、その測定精度は F¹⁴C 値にして 0.003 程度、Δ¹⁴C 値にして 3.4 程度である (1σ)。

殻形成パターン

ここでは、主に筆者の所属研究グループによってこれまでに得られた、ビノスガイの殻成長パターンとその規定要因について述べる。

酸素同位体の季節変動

船越湾 (図1) から採取されたビノスガイの殻の断面の外層の外側の酸素同位体分析から、過去の水温変動が復元された (Kubota *et al.*, 2017)。ここで、海水の酸素同位体比の直接観測記録は限定的であるため、酸素同位体-表層塩分の線形関係を利用し (Yamamoto *et al.*, 2011, 2013)、表層塩分の平均値から求めた、-0.1‰ という値を用いた。また、ビノスガイは長寿であるが故に、比較のために用いる観測水温が入手しにくいという問題がある。例えば、試料番号 130305FKW (図3(a)) は、2013年3月

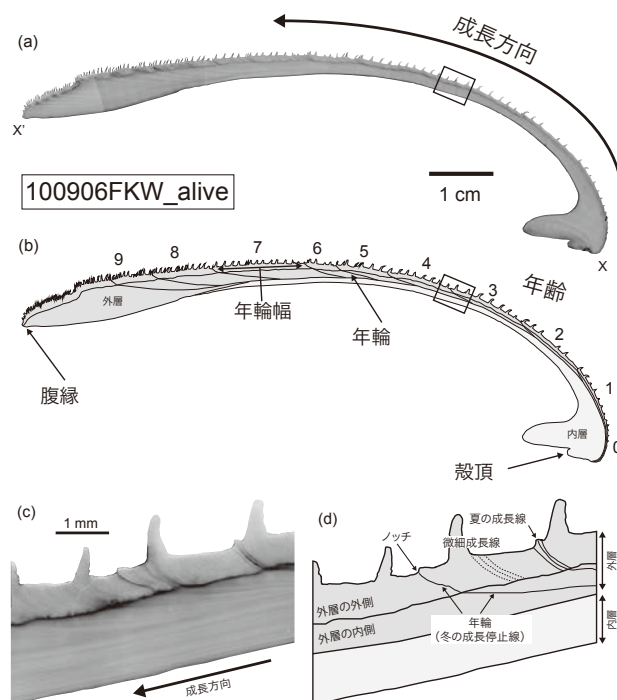
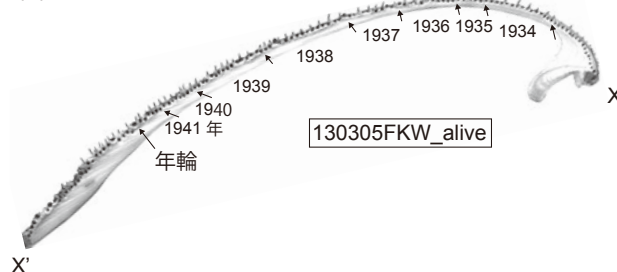


図2. ビノスガイの殻断面と成長線。(a) 2010年9月6日に船越湾から採取された現生ビノスガイの殻の最大成長軸の断面写真。(b) 同イラスト。(c) (a) と (b) の四角で囲まれた部分 (3歳齢と4歳齢の殻成長部分の境界) の拡大写真。(d) 同イラスト。Kubota *et al.* (2017) を一部改変。

(a) 酸素同位体分析



(b) 放射性炭素分析

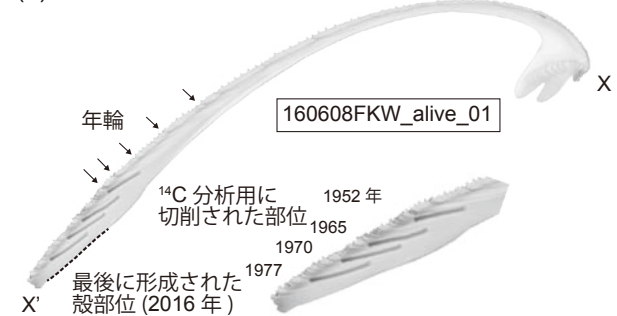


図3. ビノスガイ殻断面からの試料採取箇所。(a) 酸素同位体分析用の試料採取後の、2013年3月5日に船越湾から採取された現生ビノスガイの殻断面写真。外層の外側をほぼ等間隔で垂直に切削し、粉末を採取した。(b) 放射性炭素分析用の試料採取後の、2016年6月8日に船越湾から採取された現生ビノスガイの殻断面写真。外層の内側を成長線に沿って、切削して粉末を採取した。切削によって数年程度程度の時間の平滑化が起きることに注意。それ以外に、最後に殻形成が行われた部分として、最縁部も削って粉末を採取した。Kubota *et al.* (2018) を一部改変。

5日に船越湾で採取された、1933年生まれの79歳の個体であり (Shirai *et al.*, 2018), 若齢期は1933～1941年に相当する (殻の年間成長量が約1mmを上回り, 殻の外層の外側の酸素同位体比に季節変動が見られる期間) (図3, 4). この間に船越湾で行われた, 毎月の水温観測記録は存在しない. そのため, 船越湾近傍の外洋域の水深20mの毎月の水温観測記録 (岩手水産技術センター, https://www2.suigi.pref.iwate.jp/download/dl_info, 2022年1月24日参照) と比較した (図4) (Kubota *et al.*, 2017). 若齢期の酸素同位体比が大きな変動を示し, 老齢期に近づくにつれて, 変動が小さくなり, 比較的高い同位体比 (約0‰) に漸近した (図4). 若齢期の酸素同位体から復元された水温の変動は, 概ね船越湾の観測水温と一致した. そのため, 若齢期の酸素同位体の大きな変動は, 水温の季節変動によってもたらされていることが分かった. ただし, 細かく見ると, 冬季の最低水温は記録されていないことが分かる. 例えば, 酸素同位体から復元された最低水温は10°Cを上回っているのに対し, 実際の冬の観測水温はそれよりも低く, 約5°Cである (図4). これは, 酸素同位体の測定精度の問題でも, 酸素同位体からの水温の復元精度の問題でもなく, ピノスガイが冬季の間, 殻成長を停止したために, 記録が欠落したためと考えられる. この成長停止の時期は, 酸素同位体の分析から, どのタイミングで起きているのかを正確に追跡することができる. 殻を切削する前の画像との比較から, 濃い成長線は, 冬季の成長停止線であることが明らかとなった (図2-4). この成長停止線は, 外層の外側から内側にかけて繋がっているだけでなく, 外層の外側に深い窪み (ノッチ構造) を伴うことが多いことも分かった (図2). 若齢期の殻部位には, 夏～秋に相当する外層の外側及び外層の内側に比較密集した, 濃い成長線が見

られることがあるが (夏の成長線), 冬季の成長停止線とはノッチの有無や酸素同位体の値から区別することが可能である (図2).

およそ15歳程度までは, 酸素同位体の季節変動から, 年輪に相当する成長停止線の判別が可能であるが, その後は急速に成長停止線の間隔が狭まり, 年輪であるのかがどうか酸素同位体だけでは判断が難しい. そこで有用なのが, 大気圏核実験由来の放射性炭素である. 詳しくは後述するが, 1955年頃から増大する人為起源の放射性炭素の有無を調べることで, 年輪計数が正しいのかどうかの客観的な判断が可能である.

ピノスガイ殻の成長様式

年輪の間隔の計測から, 船越湾に生息するピノスガイの殻の成長曲線が明らかとなった (図5). 概ね, 15歳程度までは成長が早く (若齢期), 年間数mm～数10mmであるのに対し, その後は急激に成長が遅くなり (老齢期), 年間数10～数100 μ m程度となった.

若齢期の酸素同位体の変動パターンをより詳しく見ると, 分析のための殻の切削間隔がほぼ均等であるにもかかわらず, 左右対称となっておらず, やや非対称となっていることがわかる (図4). このことは, 殻の成長が常に一定ではなく, 春～夏にかけてより早いことを意味する. また, 1月～5月の間の, 水温が約10度を下回る期間は殻成長がほとんど停止していることが分かる. すなわち, 夏の間は殻が連続的に成長するため, 酸素同位体比の最低値が夏の最高水温を記録することを意味する. 一方で, 冬の間は殻成長が少ないために, 冬の最低水温はほとんど復元できないことを意味する. また, 老齢期に目を向けると, 酸素同位体が夏の水温に近づいていることが分かる (図4). このことは, 老齢期の殻成長は, 夏

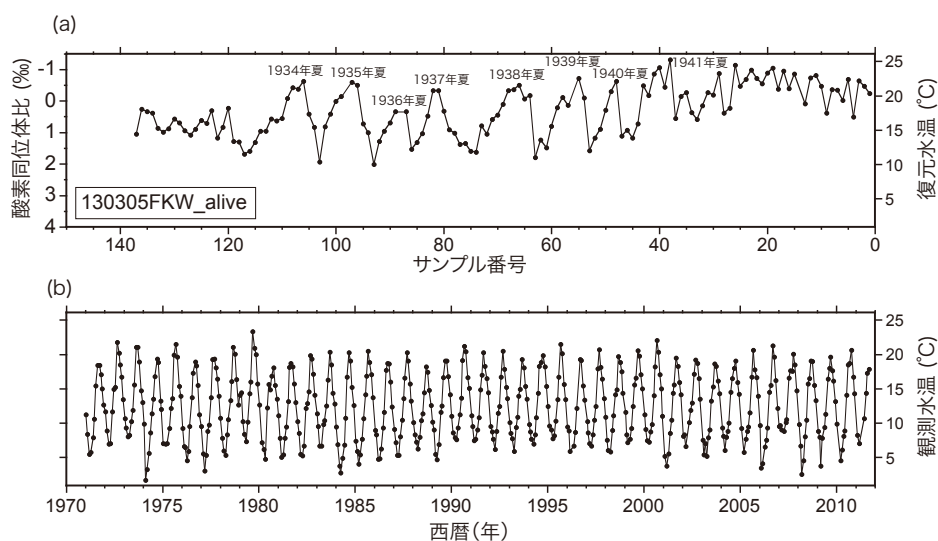


図4. ピノスガイ殻の酸素同位体比からの復元水温と観測水温の比較. (a) 2013年3月5日に船越湾から採取された現生ピノスガイ1個体 (図3 (a) と同じ) の酸素同位体変動と復元水温. (b) 船越湾の外洋における水深20mの観測点の水温変動.

の期間がほとんどを占めることを意味している。

同じ地域に生息する異なる個体間で年輪幅の変動パターンが同期していることが明らかになり(図5), 年輪年代学を応用することで, 複数個体の記録を統合して過去に記録を延伸することが可能であることが分かった(Kubota *et al.*, 2017; Tanabe *et al.*, 2017; Shirai *et al.*, 2018). 6個体の年輪変動パターンはいずれの組み合わせで統計学的に有意な相関であった($r > 0.45$, $p < 0.001$). すべての年輪記録がカバーできる1960年以降のピーク的位置に着目すると, 1963~65年, 1970年, 1973年, 1976~78年, 1981年のピークは6個体中すべてに確認された。ただし, ビノスガイの殻の年輪幅の変動の規定要因については, まだはっきりと分かっていない。少なくとも北海道紋別で得られた個体群は, 年平均水温変動との有意な相関が確認されている(Tanabe *et al.*, 2017)。このことは, 太平洋数十年規模変動(PDO; Pacific Decadal Oscillation)といった, 大きい空間スケールの水温変動の復元にビノスガイ殻が有用であることを示唆している。しかしながら, 一方で岩手県船越湾に生息する個体群については, PDOのような水温変動との良い相関は確認されておらず, 栄養塩量などの他の要因が規定している可能性がある(Kubota *et al.*, 2017)。今のところメカニズムははっきりとしていないが, 船越湾に生息するビノスガイの年輪幅の変動は, 1940年以降に限定すれば, 太平洋よりもむしろ大西洋の水温変動との対応が良いことも分かっている(Shirai *et al.*, 2018)。

若齢期の年輪幅は比較的大きく, その中に微細成長線が観察される。二枚貝の微細成長線は複数の環境要因によって変動するが, 例えば, 比較的好く成長線解析が進んでいる, ビノスガイの近縁種であるホンビノスガイ(*Mercenaria mercenaria*)については, 水温, 餌の量と質(例えば組成, 消化のしやすさ, 毒性など), 懸濁物質を輸送する低層流の速度, 捕食者密度といった要因が微細成長線の変動を規定しているとされる(Kennish and Olsson, 1975, Rice and Pechenik, 1992; Henry and Nixon, 2008)。これまでのところ, ビノスガイの微細成長線の変動の主たる規定要因は特定できていない。少なくとも, 船越湾に生息する個体については, 微細成長線の間隔は年ごとにそれほど変動せず, 年輪幅が大きい年ほど微細成長線の本数が多いことなどが明らかになっている(Kubota *et al.*, 2017)。

放射性炭素が明らかにする古海洋・古災害

核実験由来の人為的な放射性炭素

1950年から1960年代にかけて世界中で行われた大気圏核実験に伴い, 地表の放射性炭素が急増した(Bomb- ^{14}C)。比較的高速やかに混合する大気中のBomb- ^{14}C 記録は, 南北半球のわずかな違い(約4%)こそあるものの(Büntgen

et al., 2018; Hogg *et al.*, 2020), 全球的に比較的均質であり, 世界中の樹木年輪を用いた復元や大気中の直接捕集によって明らかになっている。一方, 海洋中のBomb- ^{14}C は, 海水の複雑な混合過程を反映して, 不均質に分布している(例えば, 1970年のガラパゴス諸島とハワイ諸島周辺の海水の間には約150%の差が見られる)(Druffel, 2002)。加えて, 海洋中のBomb- ^{14}C 記録は, 造礁サンゴが分布する熱帯~亜熱帯域に偏っており, 高緯度については連続した記録がほとんど得られていない。したがって, 離散的

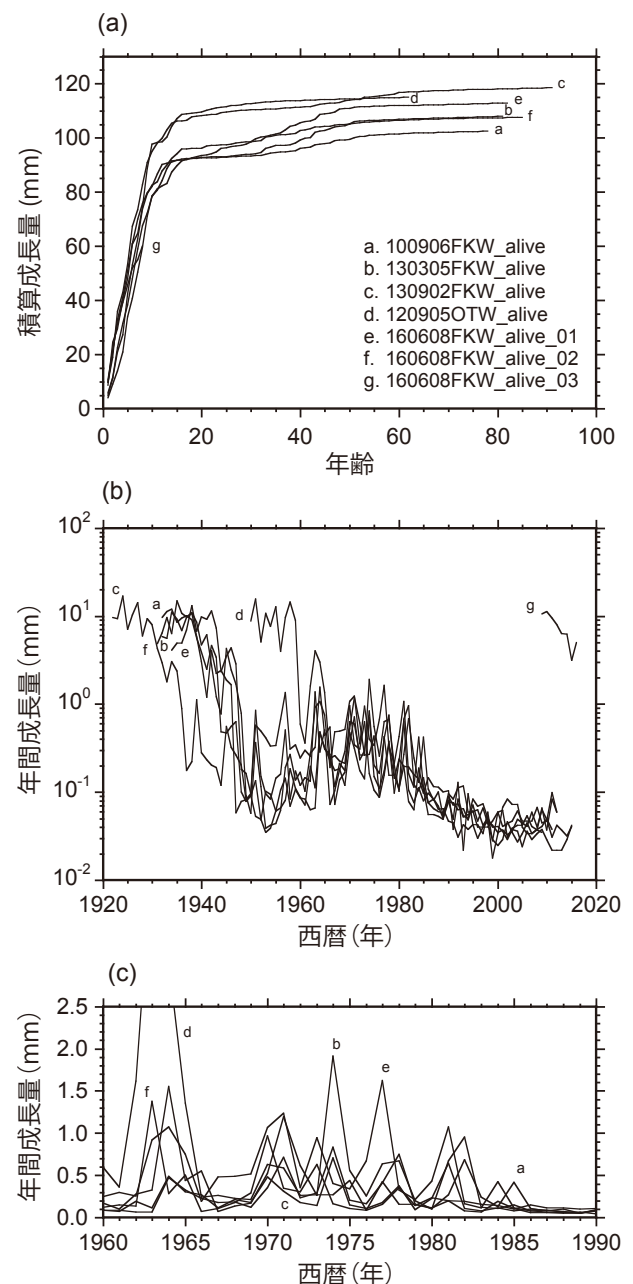


図5. ビノスガイの殻成長量の経年変化。(a) 船越湾・大槌湾で採取された7個体の現生ビノスガイの成長曲線。(b) 同じ7個体の現生ビノスガイの年間成長量(年輪幅)の時間変動。(c) (b)のうち, 個体間の年間成長量の同期が顕著な1960~1990年部分の拡大図。

な海水の直接観測記録からおおまかに推測しているに過ぎないのが現状である。寿命が長く、サンゴと同程度の水深に生息するピノスガイの殻は、連続的なBomb-¹⁴C記録の復元に非常に適している。

ここで一つ注意しなければならないのは、貝殻の放射性炭素濃度が、海水の溶存無機炭素 (DIC) のそれを直接的に反映するかどうか、という点である。その理由として、殻の炭酸カルシウムの素材として、海水の溶存無機炭素以外の炭素 (例えば、餌や呼吸由来の炭素など) が関

与している可能性があるためである。例えば、Tanaka *et al.* (1986) は、一部の軟体動物 (ヨーロッパイガイ *Mytilus edulis*, アメリカガキ *Crassostrea virginica*, オオノガイ *Mya arenaria* など) の殻の50%は海水の溶存無機炭素ではなく代謝由来であることを報告している (その他の貝類の代謝由来の炭素の寄与率は西田 (2020) に詳しくまとめられているので参照されたい)。もしそれが正しく、代謝由来の炭素と海水の溶存無機炭素との間に時間差があるのであれば、殻の放射性炭素が海水のそれを直

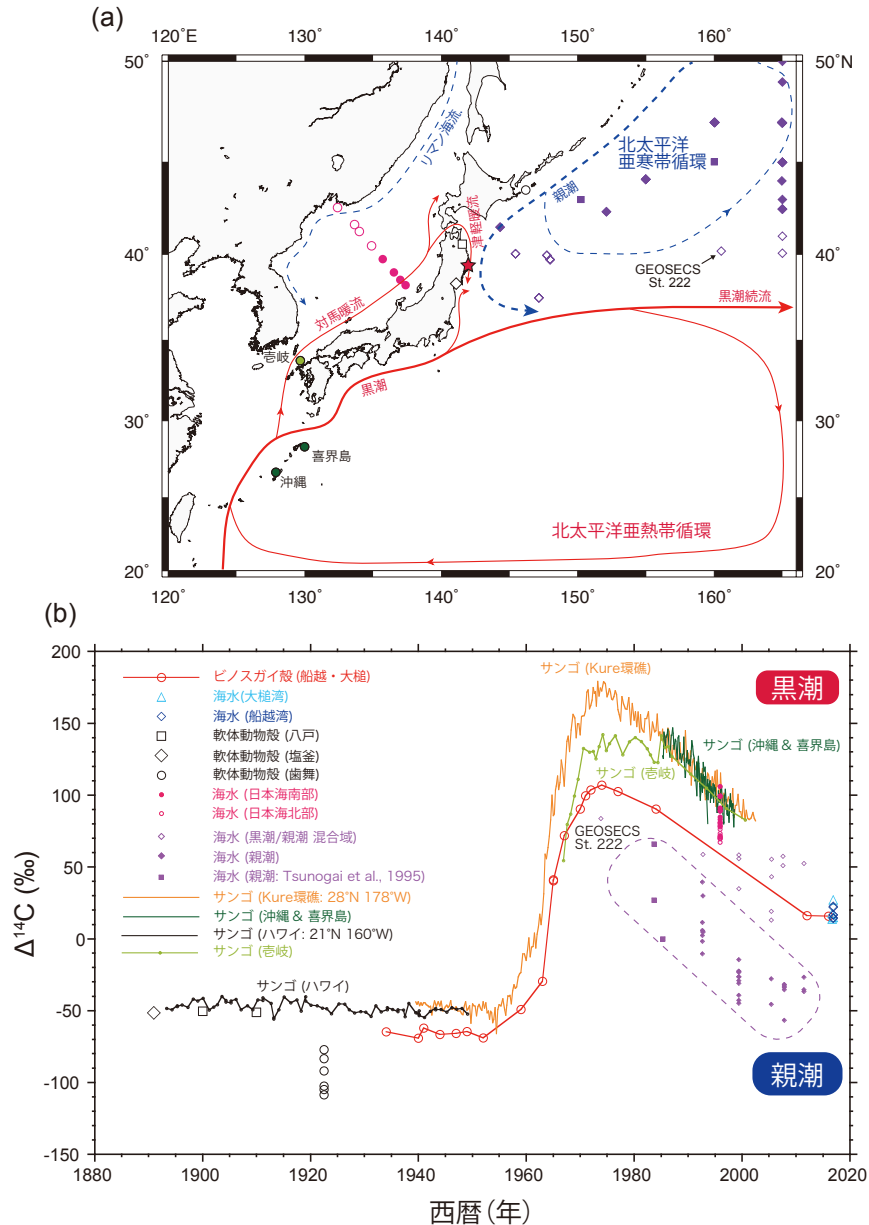


図6. 日本近海の主要な海流と放射性炭素濃度の経年変化 (Kubota *et al.*, 2018 を改変). (a) 日本近海の主要な海流系と、過去の放射性炭素濃度記録が得られている地点. (b) 船越湾・大植湾から採取されたピノスガイ6個体の殻を利用して作成した、三陸海岸 (津軽暖流) の Bomb-¹⁴C 記録. 実線は低緯度～中緯度に生息する造礁サンゴ骨格を利用した連続的な復元記録 (ハワイ, Kure 環礁, 沖縄, 喜界島, 奄岐) (Konishi *et al.*, 1981; Druffel *et al.*, 2001; Morimoto *et al.*, 2004; Mitsuguchi *et al.*, 2016; Andrews *et al.*, 2016). 点は1950年以前に採取された軟体動物の殻 (八戸, 塩釜, 函舞) (Yoneda *et al.*, 2007; Yoshida *et al.*, 2007; Kuzmin *et al.*, 2007) や、研究船によって直接採水した海水の値 (Tsunogai *et al.*, 1995; Olsen *et al.*, 2016). 破線で囲まれた海水のデータは、北太平洋亜寒帯循環域で採取されたもので、親潮の代表としてみなせる。

接反映しなくなってしまう。それを確かめるために、船越湾および大槌湾で海水を採水し、0.45 μm のフィルターでろ過した上で放射性炭素の濃度を測定したところ、殻の放射性炭素と一致することが示された (Kubota *et al.*, 2018). ここで、海水の放射性炭素の測定には、沈澱法という、海水の溶存無機炭素を炭酸ストロンチウム結晶として沈殿させ、二酸化炭素を抽出する方法を採用した (南ほか, 2015; 南・高橋, 2016). ただし、同手法は収率が悪いことに加え、作業が煩雑であるという課題が残されており、新たにヘッドスペース法によるより簡便な分析手法も開発されている (Takahashi *et al.*, 2021).

船越湾から採取した現生ピノスガイ5個体と、大槌湾に生息する現生ピノスガイ1個体の記録を統合し、北西太平洋高緯度域としては初となる、海水のBomb- ^{14}C 記録を作成することに成功した (図6). 両湾での違いは確認されず、すべての記録を統合した (詳しくはKubota *et al.*, 2018). 大槌湾・船越湾を含む、東北の三陸海岸の浅海は、海岸に沿って南下する津軽暖流の影響を広く受けている (Hanawa and Mitsudera, 1986; Ishizu *et al.*, 2016). したがって、今回得られた記録は、津軽暖流の代表記録とみなせる。

1975年頃のピーク以降の記録に着目すると、津軽暖流のBomb- ^{14}C 記録は、日本近海を流れる暖流 (黒潮/対馬暖流) と寒流 (親潮) の中間的な値を示すことがわかった (図6) (Kubota *et al.*, 2018). 親潮域の連続的な記録はこれまで得られておらず、北方四島の歯舞で採取された軟体動物の殻を用いた復元記録 (Yoneda *et al.*, 2007; Yoshida *et al.*, 2007; Kuzmin *et al.*, 2007) や、研究船を用いて海水を直接採水し分析した記録 (Tsunogai *et al.*, 1995; Olsen *et al.*, 2016) がいくつか得られているに過ぎない (当該海域の海水の放射性炭素分析の中でもっとも古いものがGEOSECS St.222におけるもの). これらの記録を参考にすると、少なくとも親潮域の放射性炭素濃度は黒潮のそれより低かったことがうかがえる。これは、北太平洋の湧昇域に親潮が端を発しており、放射性炭素が枯渇する深層水の影響を受けているためと考えられる。また、三陸海岸のBomb- ^{14}C 記録は、壱岐で復元された、対馬暖流の代表とみなせるBomb- ^{14}C 記録よりも低い極大値を示すことも明らかになった (図6). さらに、日本海南部の、対馬海流が影響を及ぼす海域の海水の記録よりも低い値を示している (図6). これらの観測事実から、対馬暖流が日本海で低い放射性炭素濃度を持つ水塊と混合したというよりは、津軽海峡を越えて津軽暖流に形を変えたのちに低い放射性炭素濃度を持つ水塊 (すなわち親潮) と混合したことが示唆される。実際、三陸海岸のBomb- ^{14}C 記録は、黒潮/親潮混合域から採取された海水の値と非常に整合的である (図6). また、1950年以前の、Bomb- ^{14}C が存在しなかった時代についても、津軽暖流の放射性炭素濃度が黒潮域と親潮域の放射性炭素

濃度の中間的な値を示していたことは共通している。

ここで、ピノスガイの殻に基づく復元は、サンゴ骨格のように年平均値ではなく、殻成長がより大きい夏に記録が偏っていることに注意が必要である。三陸海岸では夏は津軽暖流の影響が強まるが、冬は親潮の影響が強まり、海水の放射性炭素濃度も大きく低下することがわかっている (詳しくはKubota *et al.*, 2018). 夏に記録が偏っていること、三陸海岸は夏ほど津軽暖流の強い影響下にあること、それが故に津軽暖流の良い代表となっていることに留意すべきである。

死殻の放射性炭素分析が明らかにしたピノスガイ大量死イベント

船越湾の海底から採取された死殻27個体 (右殻のみ) のうち、9個体が2010年に最後の殻形成をしていることが成長線解析から明らかになった (図7) (Kubota *et al.*, 2021). サンプル数が十分に得られており、大きな殻の年成長量変動が確認されている、1960~1985年にかけてのEPS値は0.85を上回っており (10年の時間窓で5年間隔の解析を行った)、これらの相関が統計的に有意であることも確認された (図7). なお、これ以外の期間は、生貝と死殻の重複する期間外であったり、殻の年成長量変動が小さすぎたりして、有意性は確認されなかった。ピノスガイは2~5月の間は殻を成長させない。つまり、これら9個体が死亡したのは、2011年2~5月の間ということになる。複数のピノスガイが同時に死亡した原因としてもっとも可能性が高いのが、2011年3月11日に襲来した津波である。船越湾における津波の遡上高は29.4mと推定されており (Ishimura and Yamada, 2019)、海底環境の大規模な擾乱と生態系への大きな影響があったことが、津波前後の潜水調査を通じて報告されている (Seike *et al.*, 2013, 2018). しかしながら、稀にしか採捕できないピノスガイに対する影響については何もわかっていなかった。

北日本で初めて作成された連続的なBomb- ^{14}C 記録は、1950年以降に死亡した個体の、高精度の年代決定ツールとしても使用可能である。そこで、上述の9個体について、殻断面のBomb- ^{14}C 記録が極大を迎える1970年~1980年頃との最縁部 (すなわち死亡年) について放射性炭素を分析したところ (ともに外層の内側)、成長線解析を支持する結果が得られた (図8) (Kubota *et al.*, 2021). すなわち、1970年~1980年頃の高い放射性炭素濃度 ($F^{14}\text{C}$ 値 = 1.02~1.12) が得られただけでなく、最縁部の $F^{14}\text{C}$ 値も、2010年~2016年の調査で採取された現生個体の $F^{14}\text{C}$ 値や、2016年に採取した現場海水の $F^{14}\text{C}$ 値と整合的な結果となった (図6, 8). すなわち、死殻の放射性炭素分析の結果は、成長線解析と同様に、上述の9個体は2011年3月11日に死亡したと考えて矛盾はないという結果になった。

さらにこれらの推察を裏付けるのが、船越湾の水深20mから採取された堆積物の柱状試料のうち、津波堆積物に埋没していた合弁のピノスガイの存在である(図9)(Kubota *et al.*, 2021)。船越湾で採取された津波堆積物の堆積構造と堆積メカニズムおよび底生生物への影響についてはSeike *et al.* (2017, 2018)に詳しい記載がある。合弁であることは、その場で生き埋めになって死亡したことを示唆している。その直上の層には平行葉理が見られ、津波によって堆積したものと考えられる。それ以外の、津波前後の堆積物は、底生生物による攪拌によって、比較的均質な構造をしており、堆積構造の違いが目立つ。津波の際に海底の堆積物が大規模に侵食されて再堆積したことを物語っている。柱状試料採取時にこの合弁の試料が割れてしまったために、成長線解析は叶わなかった

が、最縁部の放射性炭素の分析結果($F^{14}C = 1.04$)は、2011年3月11日に生き埋めになったことを裏付けていた(図8, 9)。ここで、Bomb- ^{14}C を利用した年代決定手法は、数年という驚くべき年代決定精度を有するものの、1年という精度で死亡年を特定するには至らないことを述べておくべきであろう。それには、放射性炭素の分析誤差だけでなく、ピノスガイの殻を削る際の時間の平滑化の問題などが関わっている。Bomb- ^{14}C を利用した年代決定に、殻の成長線解析を組み合わせることによって、2011年3月11日に発生した津波がピノスガイの大量死を引き起こしたという結論を導くことが初めて可能になった。

では、ピノスガイはどのようにして津波によって死亡したのだろうか。津波による海底土砂の急激な移動に巻き込まれ堆積物深くに生き埋めになり、飢餓や酸欠など

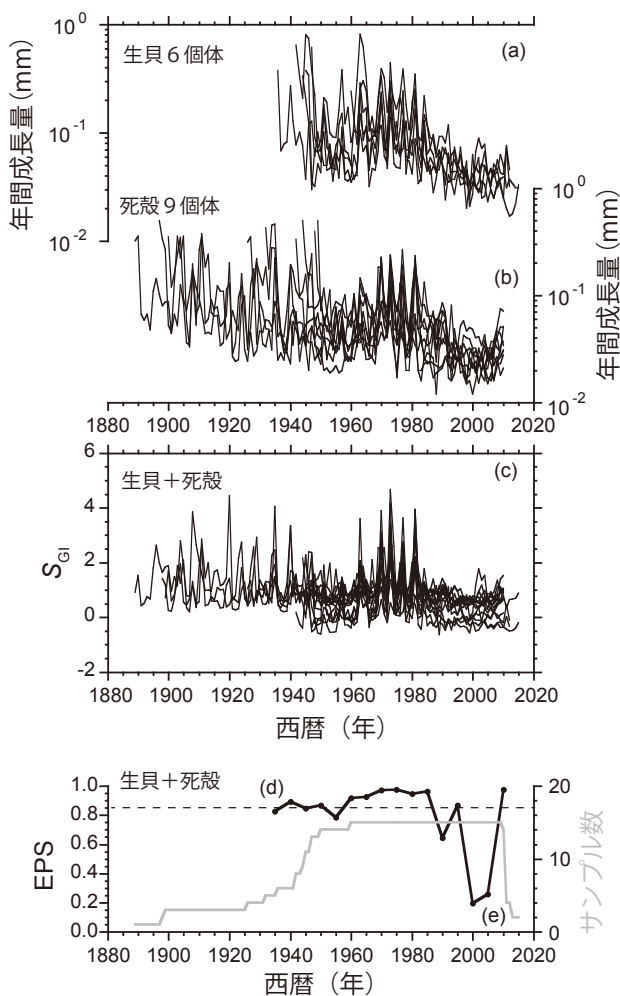


図7. ピノスガイの年間成長量、標準化成長指標 (S_{GI}), S_{GI} のEPS値の経年変化。(a) 船越湾から採取された生貝6個体の年間成長量(ただし、年間成長量が10mmを越すデータは除外している)。(b) (a)と同じく、船越湾から採取された死殻9個体(2010年に最後の殻形成をしていることが分かったもの)の年間成長量。(c) (a)と(b)と同じ生貝および死殻の標準化成長指標(S_{GI})の時系列データ。(d) 生貝および死殻の S_{GI} のEPS値および(e)そのサンプル数。Kubota *et al.* (2021)を一部改変。

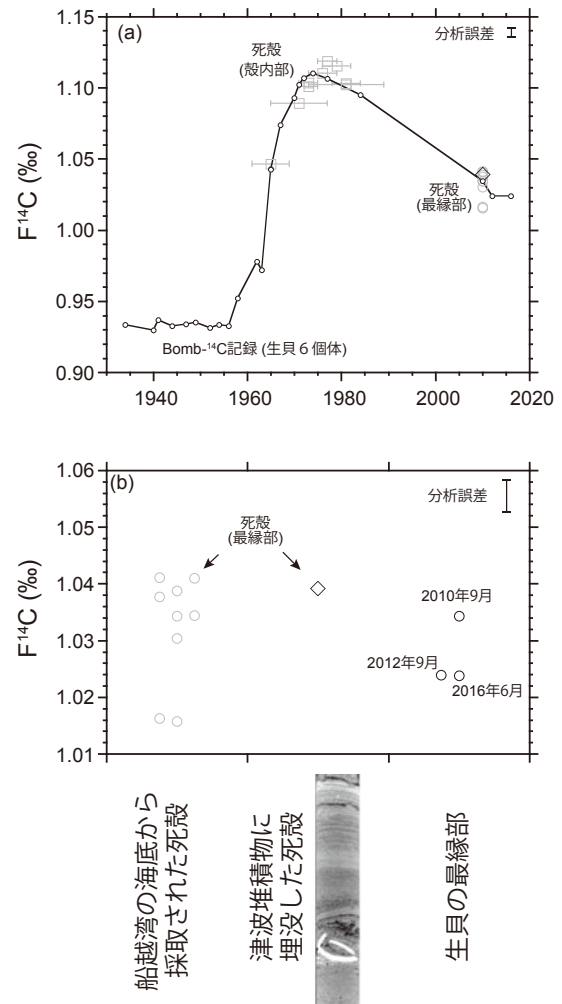


図8. 津波堆積物に埋没した死殻および現生ピノスガイの放射性炭素濃度の比較。(a) 船越湾・大槌湾から採取された現生ピノスガイ6個体の殻を利用して作成した、三陸海岸(津軽暖流)のBomb- ^{14}C 記録(黒の実線)。船越湾の海底から採取された9個体分の死殻の殻内部(四角)および最縁部(丸)の放射性炭素濃度。津波堆積物に埋没していた合弁のピノスガイの最縁部(ひし形)の分析結果も示す。(b) (a)に対応した、死殻および生貝の最縁部の放射性炭素濃度。Kubota *et al.* (2021)を一部改変。

で死亡した可能性が挙げられよう。上述の、津波堆積物に埋没した状態で見つかった合弁のピノスガイはそれを裏付けている。しかし、逆に海底に露出したことによって捕食されやすくなってしまった可能性も考えられる。現在のところ、大量死に至った原因については特定されておらず、今後の研究が待たれる。

大規模な津波によってピノスガイが大量に死滅するということは、過去の同様の規模の津波によっても大量死していた可能性があるということである。最近三陸海岸を襲った大津波としては、明治(1896年6月)と昭和(1933年3月)のものが挙げられる(遡上高はそれぞれ38m, 29m)(Ishimura and Yamada, 2019)。今後、船越湾のピノスガイの年間成長量変動の時系列データ(マスタートクロロジー)がより過去に延伸されれば、これらの大津波によって死亡した個体も見つかる可能性がある。また、殻自体の化学組成の変化にも履歴が残っている可能性がある。特に、6月に発生した明治の三陸津波に関して、殻の化学組成に変化がないかを現在レーザーアブレーション型ICP質量分析装置を用いて調査を進めている。

おわりに

本論では、主に筆者の所属する研究グループが最近得たピノスガイの殻を用いた古環境研究のこれまでの成果について概観した。北日本に限らず、韓国・サハリンなどからも、ピノスガイの生貝および死殻の産出が報告されている(Khim *et al.*, 1998; 奥谷編, 2017)。また、化石のピノスガイもまた、日本各地の陸上新生界から、北海道・東北の縄文遺跡群の貝塚から、数は少ないながらも産出している(青木・馬場, 1971; 横山ほか, 2001; 赤松, 2003; 松島, 2010)。ピノスガイを用いた古環境研究はまだ始まったばかりであり、稀に見る長寿であるという特徴を生かし、古環境分野におけるさらなる発展が見込まれる。Bomb-¹⁴C曲線についても、特に北日本の記録は依然として不足しており、道北～道東の生貝のピノスガイを用いて、記録の作成を目指したいと考えている。酸素同位体ステージ5e(約12万年前)や、縄文時代前期(約6千年前)といった、過去の温暖期に着目した研究も、今後積極的に推進したい研究テーマの一つである。若齢期の酸素同位体分析からは約10年分の夏の最高水温が復元でき、さらに長生きの個体であれば、年間成長量変動から約100年分の水温変動が復元できる(紋別で採取されたピノスガイの例)。そして、過去の海流・栄養塩循環を復元できるような新たな古環境指標の開発も推進したいと考えている。

謝辞

ピノスガイの殻を用いた古環境研究を行うにあたり、白井厚太郎博士(東京大学)、杉原奈央子博士(東京大学)、清家弘治博士(産業技術総合研究所)、棚部一成博士(東京大学名誉教授)、南 雅代博士(名古屋大学)、中村俊夫博士(名古屋大学名誉教授)に多大なるご尽力をいただいた。船越湾における潜水調査の際にはフクダ海洋企画の福田介人氏と、東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センターの船舶職員の方々にご協力いただいた。中島 礼博士(産業技術総合研究所)には日本古生物学会第170回例会における招待講演の機会をいただき、本論の執筆に繋がった。研究費の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(JP13401521・JP16781047・JP15647913/H05823)、文部科学省・東北マリンサイエンス拠点形成事業「海洋生態系の調査研究」、株式会社パレオ・ラボ「若手研究者を支援する研究助成」、公益財団法人クリタ水・環境科学振興財団「国内研究助成(16B015・17K007)」、名古屋大学宇宙地球環境研究所「加速器質量分析装置等利用(共同利用)」、高知大学全国共同利用・共同研究制度(14B024)によって支援いただいた。二名の査読者および編集委員には、原稿を注意深くお読みいただき、適切な助言をいただいた。以上の方々、機関に厚く御礼申

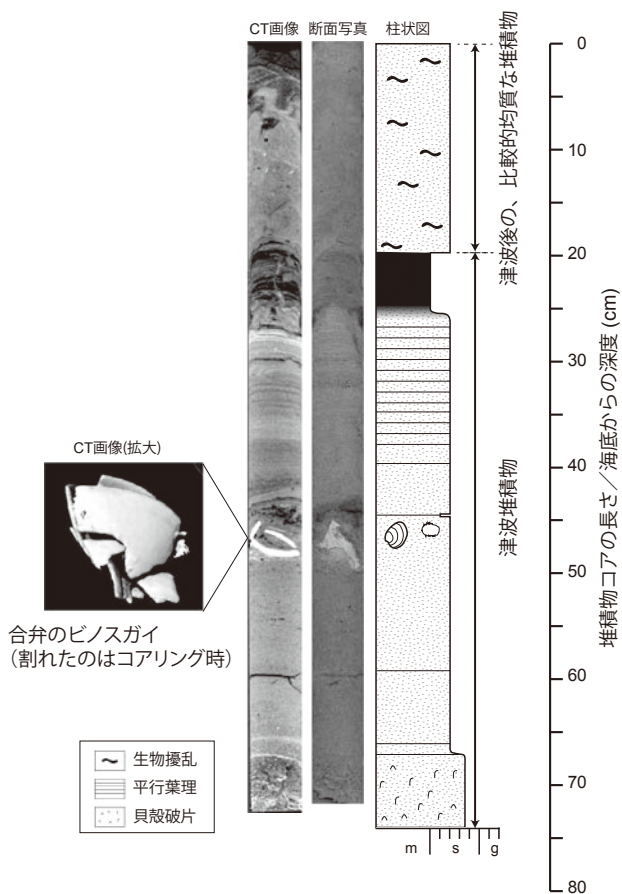


図9. 船越湾の海底から採取された、堆積物コアのCT画像、断面写真、柱状図(Seike *et al.*, 2017の図を改変)。柱状図中のイラストは、ピノスガイおよびオカメブンプク(*Echinocardium cordatum*)。深度45cmに合弁状態のピノスガイの死殻が見つかった。柱状図中の横軸は粒度を表し、m, s, gはそれぞれ泥, 砂, 礫。

し上げる。

引用文献

- 赤松守雄, 2003. 北海道の自然史. 北方新書, 北海道.
- Andrews, A. H., Siciliano, D., Potts, D., DeMartini, E. E. and Covarrubias, S., 2016. Bomb radiocarbon and the Hawaiian Archipelago: Coral, otoliths and seawater. *Radiocarbon*, **58**, 531–548.
- 青木直昭・馬場勝良, 1971. 木更津－市原地域の瀬又, 上泉および成田層の貝化石群とその産出層準. 地質学雑誌, **77**, 137–151.
- Büntgen, U., Wacker, J., Galvan, D., Arnold, S., Arseneault, D., Baillie, M., Beer, J., Bernabei, M., Bleicher, M., Boswijk, G., Brauning, A., Carrer, M., Ljungqvist, F. C., Cherubini, P., Christl, M., Christie, D. A., Clark, P. W., Cook, E. R., D'Arrigo, D., Davi, N., Eggertsson, O., Esper, J., Fowler, A. M., Gedalof, Z., Gennaretti, F., Griebinger, J., Grissino-Mayer, H., Grudd, H., Gunnarson, B. E., Hantemirov, R., Herzog, F., Hessl, A., Heussner, K.-U., Jull, A. J. T., Kukarskih, V., Kiryandov, A., Kolar, T., Krusic, P. J., Kyncl, T., Lara, A., LeQuesne, C., Linderholm, H. W., Loader, N. J., Luckman, B., Miyake, F., Myglan, V. S., Nicolussi, K., Oppenheimer, C., Palmer, J., Panyushkina, I., Pederson, N., Rybníček, M., Schweingruber, F. H., Seim, A., Sigl, M., Churakova (Sidorova), O., Speer, J. H., Synal, H. A., Tegel, W., Treydte, K., Villalba, R., Wiles, G., Wilson, R., Winship, L. J., Wunder, J., Yang, B. and Young, G. H. F., 2018. Tree rings reveal globally coherent signature of cosmogenic radiocarbon events in 774 and 993 CE. *Nature Communications*, **9**, 3605.
- Druffel, E. R. M., 2002. Radiocarbon in corals: Records of the carbon cycle, surface circulation and climate. *Oceanography*, **15**, 122–127.
- Druffel, E. R. M., Griffin, S., Kashgarian, M., Guilderson, T., Southon, J. and Schrag, D., 2001. Changes in subtropical North Pacific Radiocarbon precede climate variability in the tropical Pacific. *Radiocarbon*, **43**, 15–25.
- Fagault, Y., Tuna, T., Rostek, F. and Bard, E., 2019. Radiocarbon dating small carbonate samples with the gas ion source of AixMICADAS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **455**, 276–283.
- 波部忠重, 1977. 日本産軟体動物分類学: 二枚貝綱/掘足綱. 372p., 図鑑の北隆館, 東京.
- Hanawa, K. and Mitsudera, H., 1986. Variation of water system distribution in the Sanriku Coastal Area. *Journal of the Oceanographic Society of Japan*, **42**, 435–446.
- Henry, K. M. and Nixon, S. W., 2008. A half century assessment of hard clam, *Mercenaria mercenaria*, growth in Narragansett Bay, Rhode Island. *Estuaries and Coasts*, **31**, 755–756.
- Higo, S., Callomon, P. and Goto, Y., 1999. Catalogue and Bibliography of the Marine Shell-bearing Mollusca of Japan. 749p., Elle Scientific Publications, Osaka.
- 疋田吉識, 1996. マルスダレガイ科二枚貝の殻体構造とその分化. 地質学雑誌, **102**, 847–865.
- Hogg, A. G., Heaton, T. J., Hua, Q., Palmer, J. G., Turney, C. S., Southon, J., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Boswijk, G., Bronk Ramsey, C., Pearson, C., Petchey, F., Reier, P., Reimer, R. and Wacker, L., 2020. SHCal20 Southern Hemisphere calibration, 0–55,000 years cal BP. *Radiocarbon*, **62**, 759–778.
- Hori, M., Sano, Y., Ishida, A., Takahata, N., Shirai, K. and Watanabe, T., 2015. Middle Holocene daily light cycle reconstructed from the strontium/calcium ratios of a fossil giant clam shell. *Scientific Reports*, **5**, <http://dx.doi.org/10.1038/srep08734>
- 石村豊穂, 2021. 極微量炭酸塩の高精度安定同位体比分析の実現: ナノグラム領域の新たな環境解析. 地球化学, **55**, 63–86.
- Ishimura, D. and Yamada, K., 2019. Palaeo-tsunami inundation distances deduced from roundness of gravel particles in tsunami deposits. *Scientific Reports*, **9**, 1–8.
- Ishizu, M., Itoh, S. and Tanaka, K., 2016. Influence of the Oyashio Current and Tsugaru Warm Current on the circulation and water properties of Otsuchi Bay, Japan. *Journal of Oceanography*, **73**, 115–131.
- Jones, D. S., Arthur, M. A. and Allard, D. J., 1989. Sclerochronological records of temperature and growth from shells of *Mercenaria mercenaria* from Narragansett Bay, Rhode Island. *Marine Biology*, **102**, 225–234.
- Kennish, M. J. and Olsson, R. K., 1975. Effects of thermal discharges on the microstructural growth of *Mercenaria mercenaria*. *Environmental Geology*, **1**, 41–64.
- Khim, B. K., Je, J. G., Han, S. J., Woo, K. S. and Park, Y. A., 1998. Oxygen isotope profile and age determination of Venus clam *Mercenaria stimpsoni* (Bivalvia: Veneridae) from the East Sea. *The Korean Journal of Malacology*, **14**, 9–17.
- Kim, S. T., O'Neil, J. R., Hillaire-Marcel, C. and Mucci, A., 2007. Oxygen isotope fractionation between synthetic aragonite and water: influence of temperature and Mg²⁺ concentration. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **71**, 4704–4715.
- Konishi, K., Tanaka, T. and Sakanoue, M., 1981. Secular variation of radiocarbon concentration in seawater: Sclerochronological approach. In Gomez et al., eds., *Proceedings of the Fourth International Coral Reef Symposium (Vol. 1)*, 181–185. Marine Science Center, University of the Philippines, Manila.
- Kubota, K., Shirai, K., Murakami-Sugihara, N., Seike, K., Hori, M. and Tanabe, K., 2017. Annual shell growth pattern of the Stimpson's hard clam *Mercenaria stimpsoni* as revealed by sclerochronological and oxygen stable isotope measurements. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **465**, 307–315.
- Kubota, K., Shirai, K., Murakami-Sugihara, N., Seike, K., Minami, M., Nakamura, T. and Tanabe, K., 2018. Bomb-¹⁴C peak in the North Pacific recorded in long-lived bivalve shells (*Mercenaria stimpsoni*). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **123**, 2867–2881.
- Kubota, K., Shirai, K., Murakami-Sugihara, N., Seike, K., Minami, M., Nakamura, T. and Tanabe, K., 2021. Evidence of mass mortality of the long-lived bivalve *Mercenaria stimpsoni* caused by a catastrophic tsunami. *Radiocarbon*, **63**, 1629–1644.
- Kuzmin, Y. V., Burr, G. S., Gorbunov, S. V., Rakov, V. A. and Razjigaeva, N. G., 2007. A tale of two seas: Reservoir age correction values (R, DR) for the Sakhalin Island (Sea of Japan and Okhotsk Sea). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, **259**, 460–462.
- 松島義章, 2010. 貝が語る縄文海進－南関東+2°Cの世界 増補版. 有隣新書, 神奈川.
- 南 雅代・高橋 治, 2016. 人工海水を用いた沈殿法の検討 高塩濃度の水試料に沈殿法が使えるか. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, **27**, 135–138.
- 南 雅代・高橋 治・荒巻能史・太田友子・中村俊夫, 2015. 水試料の¹⁴C比較プログラム (RICE W) 沈殿法の検討. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, **26**, 132–137.
- Mitsuguchi, T., Hirota, M., Paleo Labo AMS Dating Group, Yamazaki, A., Watanabe, T. and Yamano, H., 2016. Post-bomb coral $\Delta^{14}\text{C}$ record from Iki Island, Japan: Possible evidence of oceanographic conditions on the northern East China Sea shelf. *Geo-Marine Letters*, **36**, 371–377.
- Morimoto, M., Kitagawa, H., Shibata, Y. and Kayanne, H., 2004. Seasonal radiocarbon variation of surface seawater recorded in a coral from Kikai Island, subtropical Northwestern Pacific. *Radiocarbon*, **46**, 643–648.
- 中村俊夫, 1995. 加速器質量分析 (AMS) 法による¹⁴C年代測定の高精度化および正確度向上の検討. 第四紀研究, **34**, 171–183.
- 中村俊夫, 2003. 加速器質量分析 (AMS) による環境中およびト

- レーザ放射性同位体の高感度測定. *Radioisotopes*, **52**, 145–171.
- Neukom, R., Steiger, N., Gómez-Navarro, J. J., Wang, J. and Werner, J. P., 2019. No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. *Nature*, **571**, 550–554.
- 西田 梢, 2020. 貝類の炭素・酸素安定同位体比研究. 化石, **107**, 5–20.
- 奥谷喬司編, 2017. 日本近海産貝類図鑑 第二版. 1242p., 東海大学出版部, 東京.
- Olsen, A., Key, R. M., van Heuven, S., Lauvset, S. K., Velo, A., Lin, X., Schirnack, C., Kozyr, A., Tanhua, T., Hoppema, M., Jutterström, S., Steinfeldt, R., Jeansson, E., Ishii, M., Pérez, F. F. and Suzuki, T., 2016. The Global Ocean Data Analysis Project version 2 (GLODAPv2) —An internally consistent data product for the world ocean. *Earth System Science Data*, **8**, 297–323.
- Rice, M. A. and Pechenik, J. A., 1992. A review of the factors influencing the growth of the northern quahog, *Mercenaria mercenaria* (Linnaeus, 1758). *Journal of Shellfish Research*, **11**, 279–287.
- 坂井三郎, 2009. 高精度マイクロミル「GEOMILL326」による微小領域切削と極微量粉末回収法. *JAMSTEC-Report*, 35–38.
- Sano, Y., Kobayashi, S., Shirai, K., Takahata, N., Matsumoto, K., Watanabe, K., Sowa, K. and Iwai, K., 2012. Past daily light cycle recorded in the strontium/calcium ratios of giant clam shells. *Nature Communications*, **3**, 1–6.
- Seike, K., Sassa, S., Shirai, K. and Kubota, K., 2018. Lasting impact of a tsunami event on sediment–organism interactions in the ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **123**, 1376–1392.
- Seike, K., Shirai, K. and Kogure, Y., 2013. Disturbance of shallow marine soft-bottom environments and megabenthos assemblages by a huge tsunami induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake. *PLoS one*, **8**, e65417.
- Seike, K., Shirai, K. and Murakami-Sugihara, N., 2017. Using tsunami deposits to determine the maximum depth of benthic burrowing. *PLoS one*, **12**, e0182753.
- 清家弘治・白井厚太郎・窪田 薫, 2017. 岩手県船越湾における大型底生生物の個体群動態: 2011年大津波後6年間の継続調査 日本水産学会誌, **83**, 668–671.
- Schöne, B. R., Castro, A. D. F., Fiebig, J., Houk, S. D., Oschmann, W. and Kröncke, I., 2004. Sea surface water temperatures over the period 1884–1983 reconstructed from oxygen isotope ratios of a bivalve mollusk shell (*Arctica islandica*, southern North Sea). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **212**, 215–232.
- Shirai, K., Kubota, K., Murakami-Sugihara, N., Seike, K., Hakozaiki, M. and Tanabe, K., 2018. Stimpson's hard clam *Mercenaria stimpsoni*, a century-long climate recorder for the northwest Pacific coast. *Marine Environmental Research*, **133**, 49–56.
- Strom, A., Francis, R. C., Mantua, N. J., Miles, E. L. and Peterson, D. L., 2004. North Pacific climate recorded in growth rings of geoduck clams: a new tool for paleoenvironmental reconstruction. *Geophysical Research Letters*, **31**, <https://doi.org/10.1029/2004GL019440>
- Stuiver, M. and Polach, H. A., 1977. Reporting of ^{14}C data. *Radiocarbon*, **19**, 355–363.
- Takahashi, H. A., Handa, H. and Minami, M., 2021. A simple CO_2 extraction method for radiocarbon analyses of dissolved inorganic carbon in water samples without a carrier gas. *Radiocarbon*, **63**, 1339–1353.
- Tanabe, K., Mimura, T., Miyaji, T., Shirai, K., Kubota, K., Sugihara, K. and Schöne, B. R., 2017. Interannual to decadal variability of summer sea surface temperature in the Sea of Okhotsk recorded in the shell growth history of Stimpson's hard clams (*Mercenaria stimpsoni*). *Global and Planetary Change*, **157**, 35–47.
- Tanaka, N., Monaghan, M. C. and Rye, D. M., 1986. Contribution of metabolic carbon to mollusk and barnacle shell carbonate. *Nature*, **320**, 520–523.
- Tsunogai, S., Watanabe, S., Honda, M. and Aramaki, T., 1995. North Pacific Intermediate Water Studied Chiefly with Radiocarbon. *Journal of Oceanography*, **51**, 519–536.
- Urey, H. C., 1947. The thermodynamic properties of isotopic substances. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 562–581.
- Yamamoto, K., Asami, R. and Iryu, Y., 2011. Brachiopod taxa and shell portions reliably recording past ocean environments: toward establishing a robust paleoceanographic proxy. *Geophysical Research Letters*, **38**, <http://dx.doi.org/10.1029/2011GL047134>
- Yamamoto, K., Asami, R. and Iryu, Y., 2013. Correlative relationships between carbon- and oxygen- isotope records in two cool-temperate brachiopod species off Otsuchi Bay, northeastern Japan. *Paleontological Research*, **17**, 12–26.
- 横山芳春・安藤寿男・森 大規, 2001. 茨城県鹿島台地・大洋村田塚における第四系下総層群木下層の堆積シーケンスと軟体動物化石. 茨城県自然博物館研究報告, **4**, 5–6.
- Yoneda, M., Uno, H., Shibata, Y., Suzuki, R., Kumamoto, Y., Yoshida, K., Sasaki, T., Suzuki, A. and Kawahata, H., 2007. Radiocarbon marine reservoir ages in the western Pacific estimated by pre-bomb molluscan shells. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, **259**, 432–437.
- Yoshida, K., Hara, T., Kunikita, D., Miyazaki, Y., Sasaki, T., Yoneda, M. and Matsuzaki, H., 2007. Pre-Bomb marine reservoir ages in the Western Pacific. *Radiocarbon*, **52**, 1197–1206.

窪田 薫は、研究の動向の取りまとめ、評論、原稿作成を担当した。

(2021年10月13日受付, 2022年1月26日受理)

