

## 日本最長寿の二枚貝殻に刻まれた津波と大気圏核実験の履歴

### History of tsunami and atmospheric nuclear tests recorded in shells of bivalve that has the longest lifespan in Japan

窪田 薫<sup>1\*</sup>・白井厚太朗<sup>2</sup>・杉原奈央子<sup>2</sup>・清家弘治<sup>3</sup>・棚部一成<sup>4</sup>・南 雅代<sup>5</sup>・中村俊夫<sup>5</sup>  
Kaoru Kubota<sup>1\*</sup>, Kotaro Shirai<sup>2</sup>, Naoko Sugihara-Murakami<sup>2</sup>, Koji Seike<sup>3</sup>, Kazushige Tanabe<sup>4</sup>,  
Masayo Minami<sup>5</sup>, Toshio Nakamura<sup>5</sup>

<sup>1</sup>海洋研究開発機構高知コア研究所・<sup>2</sup>東京大学大気海洋研究所・<sup>3</sup>産業技術総合研究所・  
<sup>4</sup>東京大学総合研究博物館・<sup>5</sup>名古屋大学宇宙地球環境研究所

<sup>1</sup>Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Nankoku, 783-8502, Japan.

<sup>2</sup>Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 277-8564, Japan.

<sup>3</sup>Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, 305-8567, Japan

<sup>4</sup>Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, 113-8654, Japan.

<sup>5</sup>Institute for Space–Earth Environmental Research, Nagoya University, Furo-cho, Nagoya, 464-8601, Japan.

\*Correspondence author. E-mail: kaoryu0129@gmail.com

#### Abstract

*Mercenaria stimpsoni* (Stimpson's hard clam), found in shallow sandy seafloor of northeast Japan, has been proved to have longevity of more than 100 years, which is the longest record in Japan. The present study established nuclear bomb testing induced bomb-<sup>14</sup>C records from *M. stimpsoni* shells, for the first time in high latitude western North Pacific, in which chronology is robustly constrained from a synchronized annual growth width pattern among individuals. The record revealed a strong influence of Tsugaru Warm Current on shallow water of northeast Japan. Furthermore, age-determination of dead shells collected from the seafloor of the study region by utilizing the established bomb-<sup>14</sup>C records suggests that past tsunamis are one of the most important reasons of death of *M. stimpsoni*.

**Keywords:** sclerochronology; oxygen isotopes; radiocarbon, bivalve

#### 1. 緒言

1950年代～1960年代に盛んに行われた大気中核実験の結果、地球表層システムの放射性炭素濃度は急増した (Bomb-<sup>14</sup>C)。その結果放出された人為起源の放射性炭素は、大気から海洋表層へと取り込まれ、トレーサーとして海洋物理・生物地球化学循環の理解に役立てられている (Levin & Hesshaimer, 2000; Mahadevan, 2001; Druffel, 2002; Olsen et al., 2016)。海水の放射性炭素が始まったのは1970年代以降であり、それ以前の海水の Bomb-<sup>14</sup>C の連続した変動記録は比較的寿命の長い、造礁サンゴなどの炭酸カルシウム骨格から復元されている (Druffel, 2002; Andrews et al., 2016; Mitsuguchi et al., 2016; Hirabayashi et al., 2017)。研究船を用いた海水の放射性炭素分析は外洋における時空間変動を把握する上で極めて重要だが、連続記録が得にくいという欠点がある。そうした中、連続記録を作成する上で海洋生物の炭酸カルシウム骨格は比類ない価値を持つが、現在から遡って Bomb-<sup>14</sup>C 記録の全容を明らかにするには少なくとも70年は生きる海棲生物の骨格、あるいは

採取年が正確に分かっている試料の長期保存が必要である。しかしながら、日本沿岸の高緯度域においては適した試料が見つかっていないことから Bomb- $^{14}\text{C}$  記録はこれまでのところ得られていない。もっとも高緯度の記録は、造礁サンゴの分布の北限とされる福岡県壱岐（北緯 33.8 度；図 1）に生息する造礁サンゴ骨格を用いたものである（Mitsuguchi et al., 2016）。本研究では、100 年を超す長寿であることが最近分かったマルスダレガイ科の二枚貝ビノスガイ（Stimpson's hard clam, *Mercenaria stimpsoni*）に着目し、岩手県大槌（北緯 39.4 度）における Bomb- $^{14}\text{C}$  記録の作成とその古環境学的応用研究に取り組んだ。ビノスガイは北西太平洋・日本海・オホーツク海の沿岸域に分布し、浅海の砂地を好む、埋在性の濾過食者である（Habe, 1977）。これまでに年輪年代学的・地球化学的研究を通じて、ビノスガイの殻成長パターンや環境因子との関係について研究が進められている（Kubota et al., 2017; Tanabe et al., 2017; 窪田, 2017; Shirai et al., 2018）。

## 2. 研究対象地

研究対象地は東北日本の三陸沿岸に位置する、大槌地域である（図 1）。三陸沖は黒潮・親潮・津軽暖流が合流する混合域であり、世界有数の漁場を形成している。三陸沿岸の浅海域は一年を通じて津軽暖流の影響が強く見られる（Ishizu et al., 2016）。大槌湾とそのすぐ北に位置する船越湾において、それぞれ水深 5 メートル、20 メートルの砂質の海底にビノスガイが生息することがこれまでの調査で明らかになっている（Seike et al., 2013; Kubota et al., 2017; Shirai et al., 2018）。また生貝が見つかった地点の周辺の海底には、合弁・離弁を含む、多数の死殻が多数確認されている。2010 年以降、スキューバ機器を用いた潜水調査を通じて、生貝および死殻を採集した。

破損を防ぐためにエポキシ樹脂で殻の一部を固定し、最大成長軸に沿って切断した。断面は、成長縞がはっきりと観察できるようになるまで念入りに研磨した。その後デジタル顕微鏡で断面を観察し、拡大写真を撮影した（詳細は Kubota et al., 2017 を参照）。

コンピュータ制御の 3 次元可動式ステージを備えた切削装置（GEOMILL326, いずも Web, 日本）に貝殻の薄片試料を固定し、放射性炭素測定用の試料採取を行なった。外層に見られる成長線に沿って長さ約 10 mm, 深さ約 1.2 mm の切削を行ない、約 10 mg の粉末試料を得た（図 2）。このとき、成長量が大きい年を選択的に切削することで、時間解像度の劣化を軽減した。切削の後、断面を再度撮影し、各試料の時間の平滑化の程度を見積もった（1~7 年）。

貝殻に固定される炭素のうち、一部は餌に由来する呼吸由来の炭素であり（Tanaka et al., 1986）、必ずしも海水の溶存炭素を直接反映しない可能性がある。そこで、貝殻の放射性炭素が海水の溶存炭素のそれを反映するかを確認するため、殻の最後に石灰化が行われた部位と現場海水の

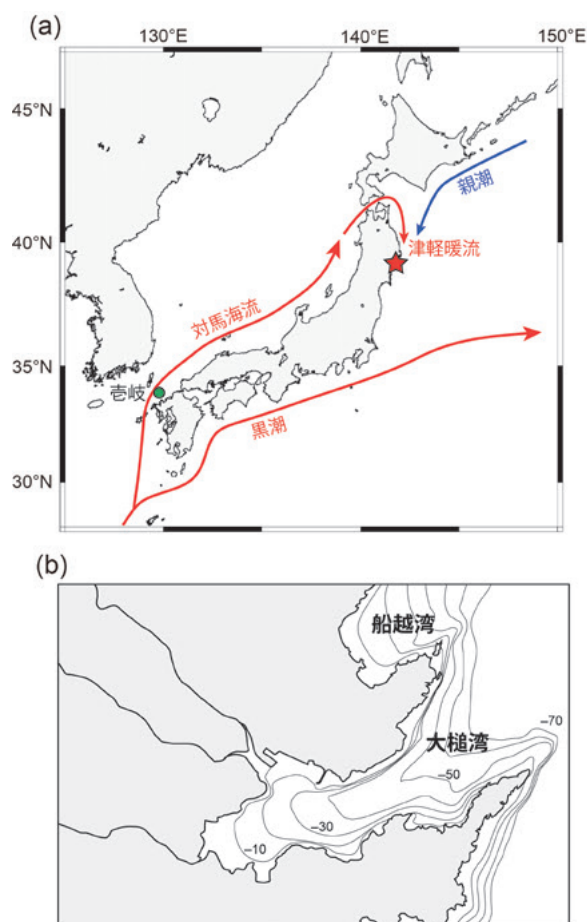


図 1. (a) 研究対象地域の大槌（赤星）の位置と日本周辺の主要な海流. (b) ビノスガイが採取された大槌湾および船越湾の海底地形.

放射性炭素分析を行った。殻については、表面の汚染された／続成作用を被った部分をグラインダーで削った上で、その下の新鮮な部位から試料を採取した。殻については、表面の汚染された／続成作用を被った部分をグラインダーで削った上で、その下の新鮮な部位から試料を採取した。海水については、南ほか (2015) の沈殿法に基づいて行った。採水から1週間以内に海水試料に十分量の飽和塩化ストロンチウムを添加し、炭酸ストロンチウムを沈殿させた。3日以上静置して結晶を成長させたのち、沈殿物をリン酸と反応させることで二酸化炭素を抽出した。炭素の収量は50%程度であったが、共沈殿する硫酸ストロンチウムなどの影響と考えられる (南 & 高橋, 2016)。

生貝6個体、死殻28個体、海水12試料について放射性炭素分析を行った。得られた試料の一部 (炭酸カルシウム10試料) はパレオ・ラボに放射性炭素の測定を依頼した。残りの試料 (56試料) については、名古屋大学宇宙地球環境研究所のタンデム加速器を用いて放射性炭素を分析した。得られた $^{14}\text{C}$ 年代をもとに、Stuiver & Pollach (1977)およびReimer et al. (2002)の表記法に従い、試料の暦年代を加味した $\Delta^{14}\text{C}$ 値を計算した。

#### 4. 結果

大槌湾と船越湾の海水の $\Delta^{14}\text{C}$ 値との間に明瞭な違いは見られず、また海水と殻先端の $\Delta^{14}\text{C}$ 値もよい一致を示した (Kubota et al., in revision)。この結果は、殻が海水の放射性炭素を正確に復元できること、および両湾の記録を統合して大槌地域のBomb- $^{14}\text{C}$ 記録を作成することが可能であることを示している。大槌地域のBomb- $^{14}\text{C}$ 記録は、1952年以降急上昇し、1974年に極大を迎え、その後現在にかけて低下した (図3)。1950年以前／以降で

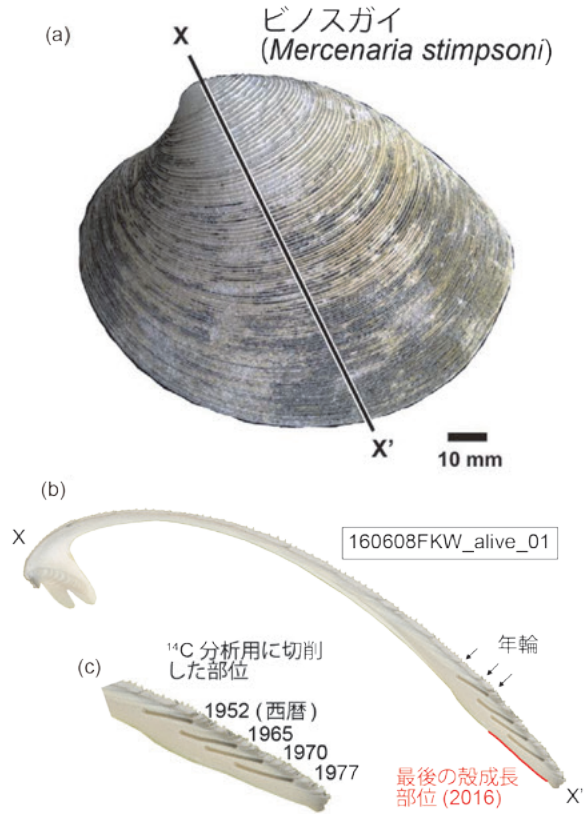


図2. 大槌から得られたビノスガイと殻断面の写真。殻断面および表面から放射性炭素分析用の試料を採取した。各試料の年代は年輪計数に基づく。

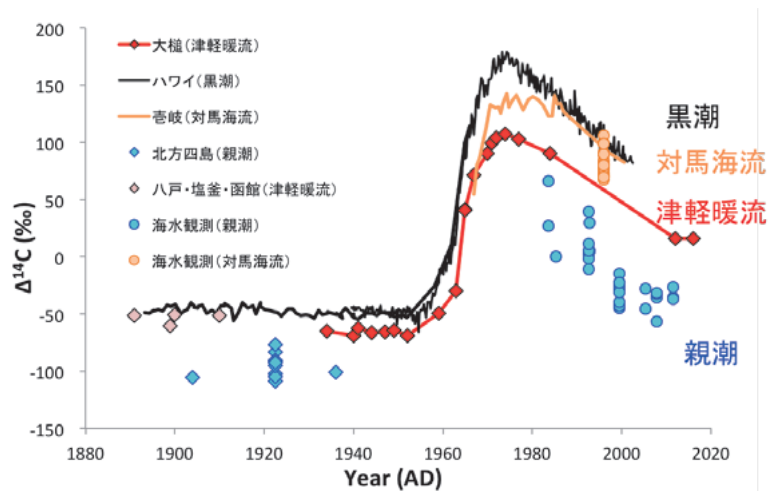


図3. ビノスガイ殻から復元された大槌地域のBomb- $^{14}\text{C}$ 記録 (赤)。黒潮と親潮の中間的な変動を示し、三陸沿岸を南下する津軽暖流の代表的な値としてみなすことができる。

ともに黒潮と親潮の中間的な値を示した（図3）。対馬海流の代表としてみなせる壱岐のサンゴ骨格による復元結果と日本海における海水観測（Mitsuguchi et al., 2016; Kumamoto et al., 2008）は黒潮と類似した変動を示しており，大槌の記録はこれよりもさらに低い  $\Delta^{14}\text{C}$  値を示すことから，対馬海流が津軽海峡を通過したのち，より低い  $\Delta^{14}\text{C}$  値をもつ親潮系の海水と混合した結果と解釈される．先行研究によって報告されている津軽暖流域（八戸・塩釜・函館）における復元結果（Yoneda et al., 2007; Yoshida et al., 2007）は，ビノスガイによる復元結果と整合的であった（図3）．親潮域については Bomb- $^{14}\text{C}$  の連続記録が得られておらず，海水観測（外洋）および1950年以前に採取された試料（北方四島で採取された貝殻など）に基づく推定による離散的な記録しか得られていないが，1950年以前／以降で常に黒潮・対馬海流・津軽暖流よりも低い値を示している（図3）（Kuzmin et al., 2001, 2007; Yoneda et al., 2000, 2007）．このことは，親潮の起源が北太平洋であり，北太平洋では湧昇に伴いより古く（放射壊変により  $\Delta^{14}\text{C}$  値がより低い），比較的 Bomb- $^{14}\text{C}$  に汚染されていない亜表層水が混合している結果と解釈される．

船越湾において採取された死殻の年成長パターンおよび  $\Delta^{14}\text{C}$  値をもとに死亡年代を推定したところ，少なくとも6個体については，2011年3月の津波に伴って死亡した可能性が高いことが明らかになった（Kubota et al., in prep.）．津波に伴う海底環境の擾乱については Seike et al. (2018) に詳しく記載されている．津波によって表層の堆積物が侵食され，埋没性のビノスガイは海底にむき出しになったか，或いは地震による地盤の液状化によってより深部へ埋没した可能性がある．津波が如何にしてビノスガイの死に繋がったのかについては未解明のままであるが，いずれにせよ，ビノスガイはその長い生活史の中で複数回の大津波を経験することから，津波が同地域におけるビノスガイの寿命をも決定づけている可能性がある．今後，より2011.3以前の大津波がビノスガイに与えた影響について詳しく調べることで，津波とビノスガイの生死との関係性が明らかになることが期待される．

## 謝辞

潜水調査では，フクダ海洋企画の福田介人さんに安全を確保していただいた．試料採取では，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お世話になった．ビノスガイの殻の切断では，大気海洋研究所の技術支援職員の後藤貴子さんにお世話になった．殻の放射性炭素年代測定の一連の実験では，名古屋大学宇宙地球環境研究所の池田晃子技術専門職員にご指導および実験環境の保守をしていただいた．研究費の一部は，文部科学省の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」，パレオ・ラボの「若手研究者を支援する研究助成」，クリタ水・環境科学振興財団の「国内研究助成」によって支援していただいた．ここに記して感謝の意を表します．

## 引用文献

- Andrews, A.H., Asami, R., Iryu, Y., Kobayashi, D.R., Camacho, F. (2016) Bomb-produced radiocarbon in the western tropical Pacific Ocean: Guam coral reveals operation-specific signals from the Pacific Proving Grounds. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 6351–6366.
- Druffel, E.R.M. (2002) Radiocarbon in corals: Records of the carbon cycle, surface circulation and climate. *Oceanography*, 15, 122–127.
- Habe, T. (1977) Systematics of Mollusca in Japan, Hokuryukan Book Co., Tokyo.
- Hirabayashi, S., Yokoyama, Y., Suzuki, A., Miyairi, Y., Aze, T. (2017) Short-term fluctuations in regional radiocarbon reservoir age recorded in coral skeletons from the Ryukyu Islands in the north-western Pacific. *Journal of Quaternary Science*, 32, 1–6.

- Ishizu, M., Itoh, S., 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*, doi:10.1007/s10872-016-0383-z.
- Kubota, K., Shirai, K., Murakami-Sugihara, N., Seike, K., Hori, M., 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.
- Kumamoto, Y., Aramaki, T., Watanabe, S., Yoneda, M., Shibata, Y., Togawa, O., Moriya, M., Shitashima, K. (2008) Temporal and Spatial Variations of Radiocarbon in Japan Sea Bottom Water. *Journal of Oceanography*, 64, 429–441.
- Kuzmin, Y.V., Burr, G.S., Jull, A.J.T. (2001) Radiocarbon reservoir correction ages in the Peter the Great Gulf, Sea of Japan, and eastern coast of the Kunashir, southern Kuriles (northwestern Pacific). *Radiocarbon*, 43, 477–481.
- Kuzmin, Y.V., Burr, G.S., Gorbunov, S.V., Rakov, V.A., Razjigaeva, N.G. (2007) A tale of two seas: Reservoir age correction values (R,  $\Delta R$ ) for the Sakhalin Island (Sea of Japan and Okhotsk Sea). *Nuclear instruments and Methods in Physics Research B*, 259, 460–462.
- Levin, I., Hesshaimer, V. (2001) Radiocarbon – A Unique Tracer of Global Carbon Cycle Dynamics. *Radiocarbon*, 42, 69–80.
- Mahadevan, A. (2001) An analysis of bomb radiocarbon trends in the Pacific. *Marine Chemistry*, 73, 273–290.
- Mitsuguchi, T., Hirota, M., Paleo Labo AMS Dating Group, Yamazaki, A., Watanabe, T., 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.
- Olsen, A., R. Key, M., van Heuven, S., Lauvset, S. K., Velo, A., Lin, X., Schirnick, C., Kozyr, A., Tanhua, T., Hoppema, M., Jutterström, S., Steinfeldt, R., Jeansson, E., Ishii, M., Pérez, F. F., 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.
- Reimer, P. J., Brown, T.A., Reimer, R.W. (2002) Discussion: Reporting and Calibration of Post-Bomb  $^{14}\text{C}$  Data. *Radiocarbon*, 46, 1299–1304.
- Seike, K., Shirai, K., 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, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0065417>.
- Seike, K., Sassa, S., Shirai, K., Kubota, K. (2018) Lasting impact of a tsunami event on sediment- organism interactions in the ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123, <https://doi.org/10.1002/2017JC013746>.
- Shirai, K., Kubota, K., Murakami-Sugihara, N., Seike, K., Hakozaiki, M., 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.
- Stuiver, M., Polach, H.A. (1977) Discussion: Reporting of  $^{14}\text{C}$  data. *Radiocarbon*, 19, 355–363.
- Tanabe, K., Mimura, T., Miyaji, T., Shirai, K., Kubota, K., Sugihara, K., Schone, 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., Rye, D.M. (1986) Contribution of metabolic carbon to mollusk and barnacle shell carbonate. *Nature*, 320, 520–523.
- Yoneda, M., Kitagawa, H., van der Plicht, J., Uchida, M., Tanaka, A., Uehiro, T., Shibata, Y., Morita, M., Ohno, T. (2000) Pre-bomb marine reservoir ages in the western North Pacific: preliminary result on Kyoto University collection. *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research Section B*, 172, 377–81.
- Yoneda, M., Uno, H., Shibata, Y., Suzuki, R., Kumamoto, Y., Yoshida, K., Sasaki, T., Suzuki, A., Kawahata, H. (2007) Radiocarbon marine reservoir ages in the western Pacific estimated by pre-bomb molluscan shells. *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research Section B*, 259, 432–437.
- Yoshida, K., Hara, T., Kunikita, D., Miyazaki, Y., Sasaki, T., Yoneda, M., Matsuzaki, H. (2007) Pre-Bomb Marine Reservoir Ages in the Western Pacific. *Radiocarbon*, 52, 1197–1206.
- 窪田 薫 (2017) 岩手県船越湾に生息する長寿二枚貝殻を利用した古環境・炭素循環研究. 名古屋大学年代測定研究, I, 135–140.
- 南 雅代・高橋 浩・荒巻能史・國分(齋藤)陽子・伊藤 茂・中村俊夫 (2015) 水試料の  $^{14}\text{C}$  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, XXVI, 132–137.
- 南 雅代・高橋 浩 (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, XXVII, 135–138.

## 日本語要旨

東北日本（岩手県大槌）から見つかった二枚貝の一種ビノスガイ (*Mercenaria stimpsoni*) は100歳を超す寿命を持ち、日本産の二枚貝としては最長寿であることが最近明らかになった。本研究では、ビノスガイの殻を用いて、複数個体間で同期した年間成長パターンをもとに厳密な年代モデルを構築し、東北地域としては初となる核実験起源の放射性炭素曲線を復元した。その結果、三陸沖の浅海域においては、津軽暖流（対馬海流を起源とする）の影響が強く見られることがわかった。さらに、得られた放射性炭素曲線を大槌の海底から得られた死殻の死亡年代の推定に用いることで、過去の津波イベントがビノスガイの死を招く重要な要因になっている可能性が示された。