

大槌湾におけるエゾアワビによる 高精度な海洋環境復元に関する研究

所属 東京大学大気海洋研究所 氏名 ファン ズハン (ミヤ)

ショートアブストラクト【要旨】

大槌湾産エゾアワビの殻の複数の同位体 ($\Delta^{14}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$) 分析による海洋環境変動の復元を行った。アワビの殻の $\delta^{18}\text{O}$ は海水温変動を記録し、高精度年齢決定にも利用可能であることが確認された。大槌湾の海水とアワビ殻の $\Delta^{14}\text{C}$ の結果から、大槌湾の水塊は季節変動しており、2019年以降は気候変動と関連して湾内に流入する水塊が変化している可能性が示唆された。本研究の結果、アワビの殻は高緯度域の環境復元に有効であることが明らかとなった。

アブストラクト【本文】

1. 序論

黒潮は台湾の東岸を北上し、東シナ海を経て日本列島の南岸を東へ流れる温かく貧栄養な海流で、この地域の気候や生物多様性、そして海洋環境に大きな影響を与える。一方、親潮はカムチャッカ半島や千島列島沿いを南下する冷たい富栄養な海流で、日本の太平洋沿岸北部に影響を及ぼす。三陸沖は、黒潮と親潮が交わる地域（親潮—黒潮移行帯）となっており、栄養が豊富で多様な海洋生態系を形成している。気候変動による三陸沖の海洋変化について過去の海洋変動から理解することは、将来の気候変動による魚の回遊生態や海洋資源量への影響予測に重要である (Nishikawa et al., 2020)。

2. 研究背景

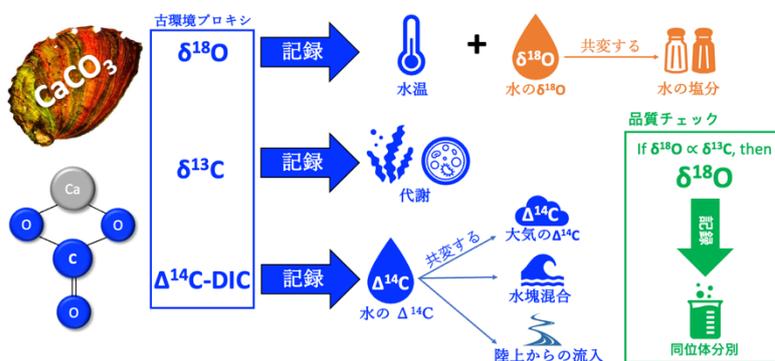


図 1

アワビの貝殻の炭酸カルシウム中の炭素 14 濃度 ($\Delta^{14}\text{C}$)、安定酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$)、および安定炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) は、それぞれ、海水温、生物の代謝、および大気—海洋ガス交換、海水の水塊混合、陸上からの水の流入により変化する大槌湾の海水の $\Delta^{14}\text{C}$ の代替指標（プロキシ）として使用された

炭酸カルシウムの殻を持つアワビ (*Haliotis spp.*)、サンゴが存在しない高緯度地域における過去の海洋環境復元に有効な子気候アーカイブとして期待される。アワビは日本の広範囲に分布しており、また歴史的にも人類社会において古くから利用されてきていることから、過去の環境変動復元や人類の文明の発展を理解するための貴重なツールとして利用可能であると考えられているが、高緯度域におけるアワビの殻を用いた子

ールとして利用可能であると考えられているが、高緯度域におけるアワビの殻を用いた子

気候復元研究は限られている。本研究では、炭素 14 濃度 ($\Delta^{14}\text{C}$)、安定酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$)、および安定炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) のマルチプロキシ分析によって、アワビ殻を用いた高精度海洋環境復元の可能性について検証を行った (図 1)。1950年代から1960年代にかけて行われた核実験により、地球の大気中の ^{14}C は2倍に増加した。この人為的に生成された炭素 14 「bomb- ^{14}C 」は、二酸化炭素の大気—海洋ガス交換を通じて海洋表層に拡散し、湧昇や移流などの水塊混合現象の研究に有用なトレーサーとして利用されてきた (GEOSECS: Broecker et al., 1985; WOCE: Key, 1996; Lan et al., 2024)。 $\Delta^{14}\text{C}$ を用いた水塊混合復元研究は、低緯度域では炭酸カルシウムの骨格を持つ造礁サンゴを用いた研究が進められてきているが (Adkins et al., 2002; Hirabayashi et al., 2017; Hirabayashi et al., 2019)、サンゴが生息しない高緯度海域では古海洋復元に研究可能な生物種が限られている (Kubota et al., 2018; Ota et al., 2019)。炭酸カルシウムの殻を持ち、高緯度域にも生息する貝殻試料は、高緯度海域での古気候復元に利用可能な古気候アーカイブとして期待される。貝殻試料を用いた海水温の復元にはしばしば $\delta^{18}\text{O}$ が使用され、 $\delta^{13}\text{C}$ は生物の代謝情報を提供可能である。本研究では、これらの $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$ を用いたマルチプロキシ分析により、アワビの殻が海洋変動のアーカイブとして有効であるかどうかを、海水試料中の $\Delta^{14}\text{C}$ や海水温記録と比較することで検証した。また、得られた結果を用いて、アワビの年齢測定精度、海水温復元の精度、そして水塊混合と海水・貝殻中の $\Delta^{14}\text{C}$ のシグナルの相互関係など、アーカイブとしての有効性について評価を行なった。

3. 研究目的と手法

本研究では、東京大学大気海洋研究所のシングルステージ型加速器質量分析計を用いて、エゾアワビ (*Haliotis discus hannai*) の貝殻の $\Delta^{14}\text{C}$ 値と海水の溶存無機炭素中の $\Delta^{14}\text{C}$ ($\Delta^{14}\text{C}\text{-DIC}$) 値を測定し、それらの値と変動パターンの比較を行った。アワビの貝殻と海水は、いずれも 2022

年 5 月および 6 月にかけてそれぞれ大槌湾蓬萊島 (ひょうたん島) 付近と大槌湾湾口で採取されたものである (図 2)。大槌湾は北西太平洋に面した三陸海岸に位置する。表層では、日本海からの $\Delta^{14}\text{C}$ が高い津軽暖流が、亜寒帯北太平洋からの冷たく $\Delta^{14}\text{C}$ が低い親潮と合流し、さらに亜熱帯北太平洋からの暖かく $\Delta^{14}\text{C}$ が高い黒潮と合流する複雑な水塊混合が起きている海域である。同じ時期、同じ場所で採取されたアワビ殻と海水の $\Delta^{14}\text{C}$ 値

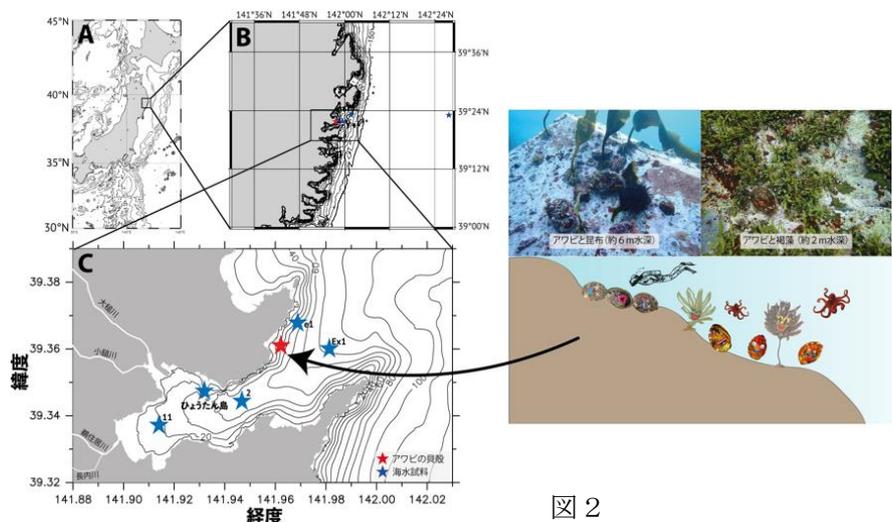


図 2

(A) 日本海と北太平洋を示している日本地図；(B) 東北三陸の地図；(C) 水深と河川を示す大槌湾の地図。アワビの貝殻と水のサンプルの採取地点は、それぞれ (B) と (C) で赤と青の星で示されている

を比較するのは本研究が世界初である。その結果に基づき、アワビの貝殻試料を用いた水塊混合復元について議論を行った。

3. 結果と考察

3.1 アワビの殻の $\delta^{18}\text{O}$ による高精度な海面水温記録と年齢推定

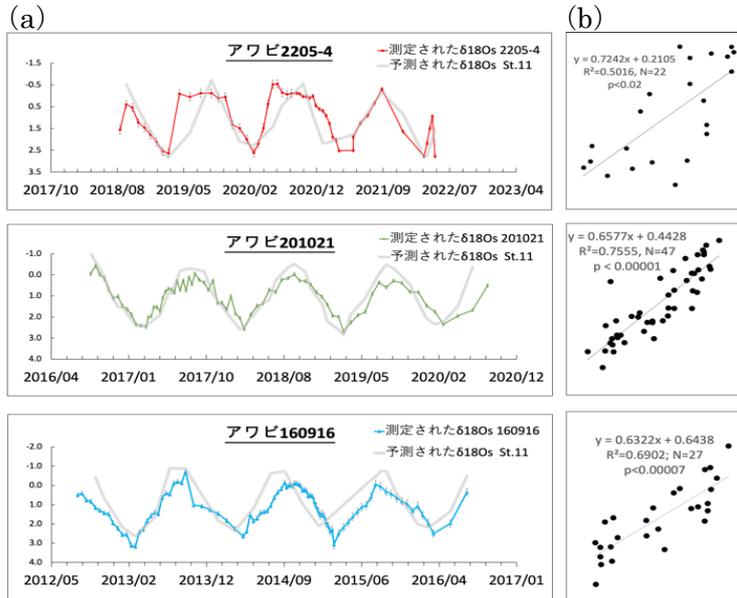


図 3

(a) アワビ 2205-4、201021、160916 の殻から測定された安定酸素同位体値 ($\delta^{18}\text{O}_s$) と、観測温度と塩分を用いて予測された $\delta^{18}\text{O}_s$ との比較；(b) 測定された $\delta^{18}\text{O}_s$ と予測された $\delta^{18}\text{O}_s$ の相関テスト。3つの貝殻すべてにおいて、測定された $\delta^{18}\text{O}_s$ と予測された $\delta^{18}\text{O}_s$ との間に有意な相関が見られた。

本研究では、アワビの殻が環境アーカイブとして有用であることを示した。まず、3つのアワビの殻から測定した $\delta^{18}\text{O}$ の値を、実際の海面水温 (SST) と海面塩分 (SSS) のデータを用いて計算し、推定された $\delta^{18}\text{O}$ の値と比較した。その結果、アワビの殻に含まれる $\delta^{18}\text{O}$ は、成長速度が遅い冬でも温度変化を継続的に記録する優れた指標であり (図 3)、年輪の観察よりも高い精度で年齢を推定できることを明らかにした。

3.2 大槌湾における $\Delta^{14}\text{C}$ -DIC の季節変動と水塊の影響

次に、大槌湾の湾口での海水の $\Delta^{14}\text{C}$ -DIC 分析を行った。その結果、季節ごとに異なる $\Delta^{14}\text{C}$ 値が観測され、水塊の影響によって明確な季節変動を示している (図 4)。特に、3~4月に観測される低い $\Delta^{14}\text{C}$ -DIC 値は、親潮の流入に伴い、 $\Delta^{14}\text{C}$ が乏しい亜寒帯の水塊が優勢であることを示している。逆に、9月の高い $\Delta^{14}\text{C}$ -DIC 値は、 $\Delta^{14}\text{C}$ が高い黒潮や津軽暖流の水塊が優勢であることを示唆しています。

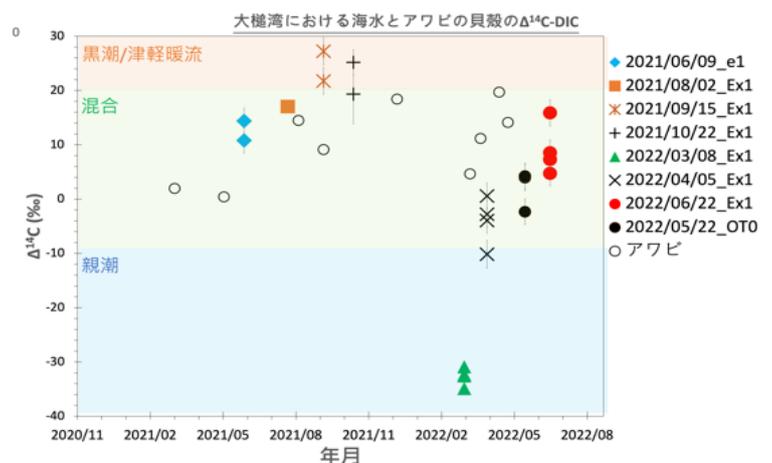


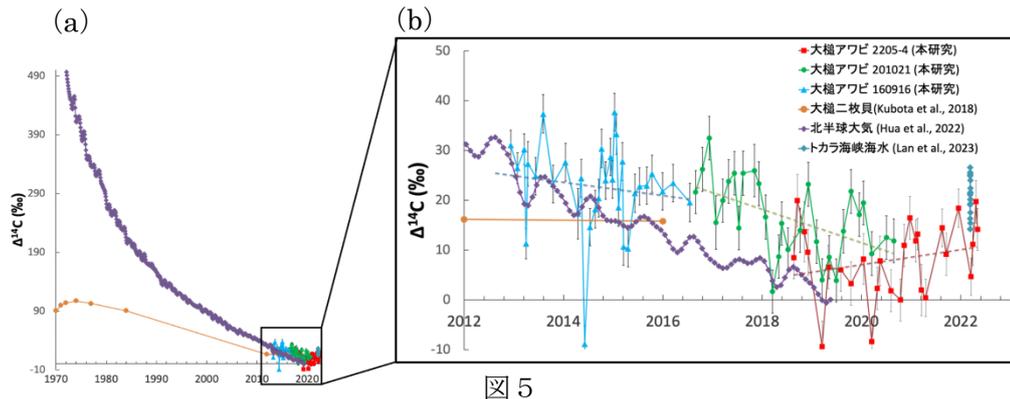
図 4

St. e1、Ex1、および OTO (図 2) で採取された 1-100m 深度の海水における $\Delta^{14}\text{C}$ -DIC ; Satoh et al. (2019) の定義に基づき、「黒潮/津軽暖流」(オレンジ色の影)、「混合」(緑色の影)、

3.3 アワビ殻の $\Delta^{14}\text{C}$ で大槌湾の水塊変動の高精度復元

$\delta^{18}\text{O}$ 値から推定されたアワビ殻の年齢を用いて、 $\Delta^{14}\text{C}$ 値が記録する大槌湾の水塊変動を高精度に復元した。アワビの殻に含まれる $\Delta^{14}\text{C}$ は、2011年から2019年にかけて減少し、2019年以降は増加傾向を示す(図5)。 $\Delta^{14}\text{C}$ の減少は、大気中の核実験由来の $\Delta^{14}\text{C}$ シグナルの減少によるものと考えられる。一方、2019年以降の増加傾向は、気候変動によって大槌湾に黒潮や津軽暖流の影響が強まったことが原因であると考えられる。

これらの分析から、アワビの殻は過去の海洋変動を詳細に記録しており、高緯度海域における過去の海洋環境復元に有用であることを示した。



(a) 1970-2022 大気中の核実験由来の $\Delta^{14}\text{C}$ シグナルの減少；(b) アワビ 160916、201021、2205-4 の殻の $\Delta^{14}\text{C}$ が、北半球の大気 $\Delta^{14}\text{C}$ 、大槌湾の二枚貝の殻に記録された海洋 $\Delta^{14}\text{C}$ 、およびトカラ海峡の海水 $\Delta^{14}\text{C}$ との比較

参考文献：

- 1) Adkins et al. (2002). Radiocarbon dating of deep-sea corals. *Radiocarbon*, 44(2), 567-580.
- 2) Broecker, et al. (1985). The distribution of bomb radiocarbon in the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 90(C4), 6953-6970.
- 3) Hirabayashi et al. (2017). Multidecadal oceanographic changes in the western Pacific detected through high-resolution bomb-derived radiocarbon measurements on corals. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(4), 1608-1617.
- 4) Hirabayashi et al. (2019). Insight into western Pacific circulation from South China sea coral skeletal radiocarbon. *Radiocarbon*, 61(6), 1923-1937.
- 5) Hua et al. (2022). Atmospheric radiocarbon for the period 1950-2019. *Radiocarbon*, 64(4), 723-745.
- 6) Key, R. M. (1996). WOCE Pacific Ocean radiocarbon program. *Radiocarbon*, 38(3), 415-423.
- 7) Kubota et al. (2018). Bomb-14C peak in the North Pacific recorded in long-lived bivalve shells. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(4), 2867-2881.
- 8) Lan et al. (2023). First dataset of dissolved inorganic radiocarbon in the Tokara Strait. *Geochemical Journal*, 57(6), 197-203.
- 9) Lan et al. (2024). Mixing Dynamics Within the Kuroshio Area Are Reflected in Dissolved Inorganic Radiocarbon Values. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 129(4).
- 10) Nishikawa et al. (2020). Detection of the Oyashio and Kuroshio fronts under the projected climate change in the 21st century. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7(1).
- 11) Ota et al. (2019). Northeast Pacific seawater radiocarbon recorded in abalone shells obtained from Otsuchi Bay, Japan. *Radiocarbon*, 63(4), 1249-1258.
- 12) Satoh, N., Fukuda, H., Miyairi, Y., Yokoyama, Y., & Nagata, T. (2019). Position-dependent radiocarbon content of *Undaria pinnatifida* as an oceanographic indicator. *Journal of Oceanography*, 75(4), 349-358.