

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21340152

研究課題名（和文）

腕足動物殻の同位体組成の研究—顕生代海洋炭素・酸素同位体変動の解明のために—

研究課題名（英文）Isotopic compositions of brachiopod shells - Toward a definitive understanding of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater

研究代表者

井龍 康文（IRYU YASUFUMI）

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：00250671

研究成果の概要（和文）：

腕足動物化石の $\delta^{13}\text{C}$ 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値をより信頼性の高い古環境指標とするため、現生腕足動物殻の炭素・酸素同位体組成の種間差および個体差の程度を検討した。亜熱帯～冷水帯域の現生腕足動物殻の $\delta^{13}\text{C}$ 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値の種間差を検討した結果、殻の同位体組成に影響する生物学的同位体効果の程度は種によって大きく異なることが明らかとなった。従来の研究において古環境指標として有用とされた種のうち、熱帯～亜熱帯域および冷水帯域に生息する現生腕足動物（2属2種）の個体差を検討した結果、炭素同位体および酸素同位体に関して周囲の海水と同位体平衡もしくはそれに近い状態で形成され、その $\delta^{13}\text{C}$ 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値の個体差が小さい部位を特定することができた。しかし、同位体組成に影響する生物学的同位体効果の程度は、同一種内においても個体間の違いが認められた。このように、古環境指標として最適な種および特定の部位の同位体組成を用いた時のみ、腕足動物化石の $\delta^{13}\text{C}$ 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値を用いたより正確な古気候・古海洋環境の復元が実現できる。

研究成果の概要（英文）：

This study examines inter- and intraspecific variations in carbon- and oxygen-isotope compositions ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$) of modern brachiopod shells to establish sound basis to use the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of fossil brachiopods as proxies for $\delta^{13}\text{C}$ values of dissolved inorganic carbon and seawater temperature and/or $\delta^{18}\text{O}$ values ($\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$). Interspecific variations in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of six modern-brachiopod species collected from a subtropical to cool-temperate environments showed that the degree of the vital effect is highly variable among species. Intraspecific variation in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of two modern-brachiopod species (9 and 8 specimens of *Basiliola lucida* and *Terebratulina crossei*, respectively) demonstrated that $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of some shell portions show small variations and are identical or close to those of calcite precipitated in isotopic equilibrium with the surrounding seawater. Such portions are useful to reliably reconstruct ancient ocean environments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・層位・古生物学

キーワード：腕足動物，炭素同位体，酸素同位体，個体差，顕生代

1. 研究開始当初の背景

海水の炭素・酸素同位体組成 ($\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{18}\text{O}$) は、地球規模の気候変動や炭素循環変動などにより変化することが知られているため、海棲生物 (例えば、サンゴ、有孔虫、軟体動物、腕足動物など) が形成する炭酸塩骨格・殻の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{18}\text{O}$ は、顕生代における気候変動を明らかにするための最も有力な代替指標の1つとされている。顕生代 (特に古生代) を通じて豊富な化石記録を有する腕足動物は、1960年代初頭に「現生腕足動物の殻は周囲の海水とほぼ酸素同位体平衡下で形成される」という報告がなされて以来、古環境の復元に最適な生物群の1つとして注目されてきた。従来復元された顕生代の海水の炭素・酸素同位体組成変動曲線は、古生代を中心として、その約70%ものデータを腕足動物化石からの記録に依っている。しかし近年、現生腕足動物の殻の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{18}\text{O}$ と周囲の海水の溶存無機炭素の $\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) と $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$) を詳細に検討した研究により、腕足動物には、生息域周辺の海洋環境を“正確に”に記録している種とそうでない種があり、さらに有用な種においても殻の部位によって生物学的同位体効果 (いわゆる vital effect) の程度が異なり、有用な部位とそうでない部位があることが明らかとなってきた。よって、腕足動物化石の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{18}\text{O}$ を用いてより信頼性の高い古環境の復元を行うためには、古環境指標として有用なタクサを選定し、その殻の中で最も有効な部位を用いる必要があり、それらの選定基準を構築することが急務である。

2. 研究の目的

現段階では、腕足動物の殻の $\delta^{13}\text{C}$ 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値と生息域周辺の海水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 値および $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ 値との関係を詳細に検討した研究例が少ないことや、同殻の $\delta^{13}\text{C}$ 値と $\delta^{18}\text{O}$ 値の再現性を評価する上で重要な同一種内の個体差がほとんど吟味されていないことが、早急に解決されるべき問題点として挙げられる。そこで、本研究では、現生腕足動物殻の同位体組成の種間差および個体差の程度を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

3. 1 試料

種間差の程度を明らかにするためには、様々な海域より採取された現生腕足動物殻の同位体組成を詳細に分析し、生息域周辺の海水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 値および $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ 値との比

較を数多く蓄積する必要がある。本研究では、従来の研究で検討されていない熱帯～亜熱帯海域の深い水深に生息する現生腕足動物を対象とし、産業技術総合研究所が2009年7月～8月に実施したGH09航海にて、沖縄県粟国島の水深606mより採取された *Campagea japonica* の生体殻を用いた。

個体差の程度を明らかにするためには、同一環境で生息した同一種内の腕足動物殻を複数個体検討し、それらの同位体組成を詳細に比較する必要がある。本研究では、従来の研究において、海洋環境を正確に記録しているとされた現生腕足動物のうち、岩手県大槌湾より採取された *Terebratulina crossei* および沖縄沖より採取された *Basiliola lucida* (2属2種) の個体差を検討した。*T. crossei* および *B. lucida* はそれぞれは8, 9個体を用いた。

また、腕足動物各種の生息域近傍より底層水を採取した。

3. 2 分析および解析

海水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ の分析手法は、パーミアンドトラップ法とヘッドスペース法を用いた。パーミアンドトラップ法の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 分析は、名古屋大学大学院環境学研究科大気水圏科学系物質循環科学講座の阿部研究室が所有する精製ラインを用いて二酸化炭素 (CO_2) を精製・捕集し、同研究室の Dual Inlet 型同位体比質量分析計 (Finnigan DeltaPlus; ThermoFisher 社製) で行った。ヘッドスペース法の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 分析は、東京大学大気海洋研究所の宮島研究室の所有するガスクロマトグラフ燃焼同位体比質量分析計

(ThermoFisher 社製) を用いて行った。海水の $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ の分析は、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構石油開発技術本部の $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 同位体平衡装置 (Finnigan MAT 社製) と同位体比質量分析計 (Finnigan MAT 252; Finnigan MAT 社製) を用いて行った。そして、得られた海水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 値および $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ 値を用い、海水と同位体平衡下で形成される方解石 (平衡方解石) の $\delta^{13}\text{C}$ 値と $\delta^{18}\text{O}$ 値 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{EC}}$ 値および $\delta^{18}\text{O}_{\text{EC}}$ 値) を算出した。

現生腕足動物殻の $\delta^{13}\text{C}$ 値および $\delta^{18}\text{O}$ 値の分析は、名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻の所有する炭酸塩自動前処理装置 (Kiel III; ThermoQuest 社製) と同位体比質量分析計 (DeltaV Advantage; ThermoFisher 社製) を用いて測定した。

4. 研究成果

4. 1 粟国島沖水深606mより採取された現生腕足動物 *C. japonica* の炭素・酸素同

位体組成

C. japonica の殻の二次層より採取した Ontogenetic series (Ont: 二次層最上部の殻頂から先端部への成長方向), Isochronous series (Iso: 成長線に沿った等時間面方向), Inner series (In: 二次層最下部) の粉末試料の同位体組成と $\delta^{13}\text{C}_{\text{EC}}$ と $\delta^{18}\text{O}_{\text{EC}}$ との関係と比較した結果、以下の成果が得られた。

1) *C. japonica* の殻の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ は、全ての series において値が比較的狭い範囲に収まり、CJ-Ont の $\delta^{18}\text{O}$ には年周期がみられない。

2) 殻の $\delta^{13}\text{C}$ については CJ-Ont の殻頂部分が、 $\delta^{18}\text{O}$ については CJ-In の先端部分がそれぞれ同位体平衡下で形成されており、両者が古環境復元において最も適した部位とされる。しかし、CJ-Ont の $\delta^{18}\text{O}$ は、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EC}}$ からのずれの程度が生息期間を通じてほぼ一様であるため、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EC}}$ からのずれを補正すれば有用な古環境指標となりうると考えられる。

3) 殻の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の相関関係を検討した結果、弱い相関が認められた。また、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{EC}}$ と $\delta^{18}\text{O}_{\text{EC}}$ の範囲からのずれの程度は、全ての series の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{18}\text{O}$ を通して小さいため、同殻の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ に影響する生物学的同位体効果の程度は比較的小さいと考えられる。これは中層～深層に生息する腕足動物の殻の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ が有用な古環境指標となりうることを示唆する。

4. 2 沖縄沖より採取された現生腕足動物 *B. lucida* の炭素・酸素同位体組成の個体差

従来の研究により、*B. lucida* の殻の二次層の Ontogenetic series (BL-Ont) は $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{18}\text{O}$ について周囲の海水と同位体平衡もしくはそれに近い状態で形成されていることが明らかとなっている。そこで本研究では、沖縄沖 (水深約 200 m～300 m) の表層堆積物中より採取された *B. lucida* の遺骸の中から、保存状態がよく準現地性と推定される計 9 個体を選定し、それらの二次層の BL-Ont の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ を測定し、個体差を検討した。用いた *B. lucida* は予め ^{14}C 年代測定を行い、その年代は 1804 cal BP～現在であることを確認した。その結果、以下の成果が得られた。

1) BL-Ont の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ は、全ての個体について値が比較的狭い範囲に収まり、 $\delta^{18}\text{O}$ に年周期はみられない。BL-Ont の $\delta^{18}\text{O}$ には水深に依存した値の違いがみられた。

2) ^{14}C 年代が“現在”の個体と“それ以前 (1804 cal BP～5 cal BP)”の個体とでは、BL-Ont の $\delta^{13}\text{C}$ に系統的な値の違いがみられ (それぞれ、2.00‰～2.07‰および 3.16‰～3.55‰)、前者の値の大部分が $\delta^{13}\text{C}_{\text{EC}}$ の範囲に収まった。両個体間にみられた系統的

な $\delta^{13}\text{C}$ の違いは、海洋の Suess 効果の影響であると考えられる。

3) BL-Ont の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の相関関係を検討した結果、弱い相関が認められる個体と有意な相関関係がみられない個体が認められた。これは、*B. lucida* の殻の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ に影響する反応速度論的同位体効果にも個体差がみられることを示している。

4. 3 大槌湾より採取された現生腕足動物 *Terebratulina crosseii* の炭素・酸素同位体組成の個体差

従来の研究で、*T. crosseii* の二次層の Ontogenetic series (TCr-Ont) の殻頂部と先端部、および Inner series (TCr-In) は $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{18}\text{O}$ について周囲の海水と同位体平衡もしくはそれに近い状態で形成されていることが明らかとなっている。そこで本研究では、大槌湾 (水深 70 m) より採取された *T. crosseii* の生体殻の中から計 8 個体を選定し、それらの二次層の TCr-Ont および TCr-In の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ を測定し、個体差を検討した。その結果、以下の成果が得られた。

1) TCr-Ont の $\delta^{13}\text{C}$ は、全ての個体において、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{EC}}$ よりも低い値を示した。一方、TCr-In の $\delta^{13}\text{C}$ は、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{EC}}$ の範囲にあるか、それよりも低い値を示した。TCr-Ont の $\delta^{13}\text{C}$ プロファイルにみられる個体ごとの変動パターンの違いは、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ の変化のみでは説明しえないため、殻形成時の生理的な要因が強く関与していると推察される。

2) TCr-Ont の $\delta^{18}\text{O}$ は、大部分が $\delta^{18}\text{O}_{\text{EC}}$ の範囲に収まり、全ての個体で顕著な年周期が認められた。*T. crosseii* の殻は、多くの場合、海水温の低い時期に周囲の海水と酸素同位体平衡下で形成されるのに対し、海水温の高い時期は非平衡下 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{EC}}$ よりも重い $\delta^{18}\text{O}$) で形成されることが明らかとなった。TCr-In の $\delta^{18}\text{O}$ は、全ての値が $\delta^{18}\text{O}_{\text{EC}}$ の範囲内にあり、年周期はみられない。また、その値は比較的狭い範囲に収まった。

3) TCr-Ont および TCr-In の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の相関関係を検討した結果、弱い相関が認められる個体と有意な相関関係がみられない個体が認められた。これは、*T. crosseii* の殻の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ に影響する反応速度論的同位体効果にも個体差がみられることを示している。

4) 殻の $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{18}\text{O}$ について各部位 (殻頂、先端、内側) の個体差を比較した結果、成熟した個体 (年齢が 10 歳以上) の殻の先端部を用いた場合の個体差が最も小さく ($\delta^{13}\text{C}$ は $\pm < 0.19\%$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ は $\pm < 0.20\%$)、海水の $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ と $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ をより正確に反映していた。ただし、同部位の $\delta^{18}\text{O}$ から求められる年平均水温は実際の平均水温と比較してやや低く (最大で 5.5°C) 見積もられる

ことも明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 29 件)

- ① Yamamoto, K., Asami, R. and Iryu, Y., Carbon and oxygen isotopic compositions of modern brachiopod shells from a warm-temperate shelf environment, Sagami Bay, central Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 査読有, 2010, 348-359, doi:10.1016/j.palaeo.2010.03.006.
- ② Yamamoto, K., Asami, R. and Iryu, Y., Within-shell variations in carbon and oxygen isotopic compositions of two modern brachiopods from a subtropical shelf environment off Amami-o-shima, southwestern Japan. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 査読有, Vol. 19, 2010, Q10009, doi:10.1029/2010GC003190.
- ③ Yamamoto, K., Asami, R. and Iryu, Y., Brachiopod taxa and shell portions reliably recording past ocean environments: Toward establishing a robust paleoceanographic proxy. *Geophysical Research Letters*, 査読有, Vol. 38, 2011, L13601, doi: 10.1029/2011GL047134.

[学会発表] (計 37 件)

- ① 井龍康文・山本和幸・浅海竜司, 暖温帯陸棚海域から採取された現生腕足動物殻の炭素・酸素同位体組成, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 2009 年 5 月 19 日, 幕張.
- ② 高柳栄子・浅海竜司・大竹二雄・阿部理・北川浩之・井龍康文, 岩手県大槌湾より採取した現生腕足動物 *Terebratulina crosseii* の殻の炭素・酸素同位体組成の個体差, 日本地質学会第 117 年学術大会, 2010 年 9 月 18 日-20 日, 富山 (富山大学).
- ③ 高柳栄子・浅海竜司・大竹二雄・阿部理・北川浩之・井龍康文, *Basilola lucida* の炭素・酸素同位体組成の地域差に関する研究, 東大大気海洋研共同利用研究集会「2010 年度古海洋シンポジウム」, 2011 年 1 月 7 日, 柏 (東京大学大気海洋研究所).
- ④ 高柳栄子・浅海竜司・大竹二雄・阿部理・北川浩之・井龍康文, 腕足動物 *Terebratulina crosseii* はどの程度正確に海洋環境を記録しているか?, 日本古生物学会第 160 回例会, 2011 年 1 月 28 日-30 日, 高知 (高知大学).
- ⑤ 高柳栄子・浅海竜司・大竹二雄・阿部理・北川浩之・井龍康文, 腕足動物殻の炭素・酸素同位体組成はどの程度正確な古環境指標となりうるのか? — *Terebratulina crosseii* を例にして —, 東大大気海洋研研究集会「バイオミネラル化と石灰化」, 2011 年

2 月 10 日, 柏 (東京大学大気海洋研究所).

- ⑥ Takayanagi, H., Asami, R., Otake, F., Abe, O., Kitagawa, H., and Iryu, Y., Intraspecific variations in carbon and oxygen isotope compositions of the modern brachiopod (*Basilola lucida*) shells collected off Okinawa-jima and Amami-o-shima, southwestern Japan. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 20 日~25 日, 幕張.
- ⑦ 高柳栄子・浅海竜司・阿部理・宮島利宏・北川浩之・井龍康文, 粟国島沖 (水深 606m) より採取された現生腕足動物の殻の炭素・酸素同位体組成, 東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会バイオミネラル化と石灰化—遺伝子から地球環境まで—, 2011 年 11 月 18 日, 柏 (東京大学大気海洋研究所).

[図書] (計 2 件)

- ① Expedition 325 Scientists, Great Barrier Reef Environmental Changes. The Last Deglacial Sea Level Rise in the South Pacific: Offshore Drilling Northeast Australia. IODP Prel. Rept., 325. doi:10.2204/iodp.pr.325.2010 [Online] Available from: http://publications.iodp.org/preliminary_report/325/, 2010, IODP Management International, Washington, D. C., p. 127.
- ② Webster, J.M., Yokoyama, Y., Cotterill, C., and the Expedition 325 Scientists, Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Vol. 325, 2011, Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., Tokyo, doi:10.2204/iodp.proc.325.2011.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井龍 康文 (IRYU YASUFUMI)
名古屋大学・環境学研究科・教授
研究者番号：00250671

(2) 研究分担者

北川 浩之 (KITAGAWA HIROYUKI)
名古屋大学・環境学研究科・教授
研究者番号：00234245

大竹 二雄 (OTAKE TSUGUO)
東京大学・大気海洋研究所・教授
研究者番号：20160525

(3) 連携研究者

()

研究者番号：