



バイオミネラルゼーションと石灰化

海底洞窟の 地球科学的研究

—海底洞窟生微小二枚貝 *Carditella*
iejimensis の酸素同位体比水温計の
検討—

山 本 なぎさ

北 村 晃 寿

入 野 智 久

Earth scientific study of submarine caves
—an examination of $\delta^{18}\text{O}$ of cavernicolous
micro-bivalve *Carditella iejimensis* as a paleo-
thermometer—

Nagisa Yamamoto • Akihisa Kitamura •
Tomohisa Irino

やまもと なぎさ : 静岡大学
きたむら あきひさ : 静岡大学
いりの ともひさ : 北海道大学

筆者らは、沖縄県伊江島の海底洞窟の地球科学的調査と洞窟棲微小二枚貝 *Carditella iejimensis* の $\delta^{18}\text{O}$ 値から古水温を推定するための基礎研究を行っている。この研究は未完成だが、これまでの研究成果を本論に記す。さらに海底洞窟堆積物のコア試料から得た 7,000 年間の同種の $\delta^{18}\text{O}$ 記録から判明した、太陽活動の変化に起因する大気循環の変動に対する東シナ海の応答モードの変化について紹介する。

1. はじめに

現在、人類は自ら排出した温室効果ガスによる“地球温暖化”という危機に直面しており、地球温暖化に伴う気候変動およびそれに連動する生態系の動態の予測は、最重要課題の一つである。この課題に対処するには、各地域で気候変動ならびに生態系の応答を解明する必要がある。これは気候や生態系は地域固有だからだ。こうした状況の下、古生物学・古海洋学の分野では、化石記録から温暖化及びそれに対する生態系の応答を解明する研究が盛んに行われている。化石記録は気候変動や生態系変動の物的証拠で、第四紀の退氷期の化石記録は、生物種が現在とほぼ同じことなどから、今後の温暖化のアナロジーに適している（例えば、Overpeck *et al.*, 1992 ; Faunmap Working Group, 1996 ; Kitamura *et al.*, 2000 ; Kitamura and Ubukata, 2003）。特に、気候外力の主要因子の日射量分布パターンが「現在」と最も類似する中期完新世以降の気候・環境変動及びそれに伴う生態系変動の解析は重要である。また、地域という観点に立つと沿岸域の情報は非常に重要である。そこが人間活動の主要な場だからだ。そのため、我が国においても沿岸域の古気候・古海洋変動の復元が、花粉データの統計学的解析（例えば、Nakagawa *et al.*, 2002）、浅海の二枚貝の酸素同位体比測定（例えば、Chinzei *et al.*, 1987 ; Schöne *et al.*, 2004 ; Watanabe *et al.*, 2004）、群体サンゴ骨格の地球化学的解析（例えば、Abram *et al.*, 2001 ; Morimoto *et al.*, 2007）などが行われている。だが、いずれの記録媒体にも弱点がある。花粉データで

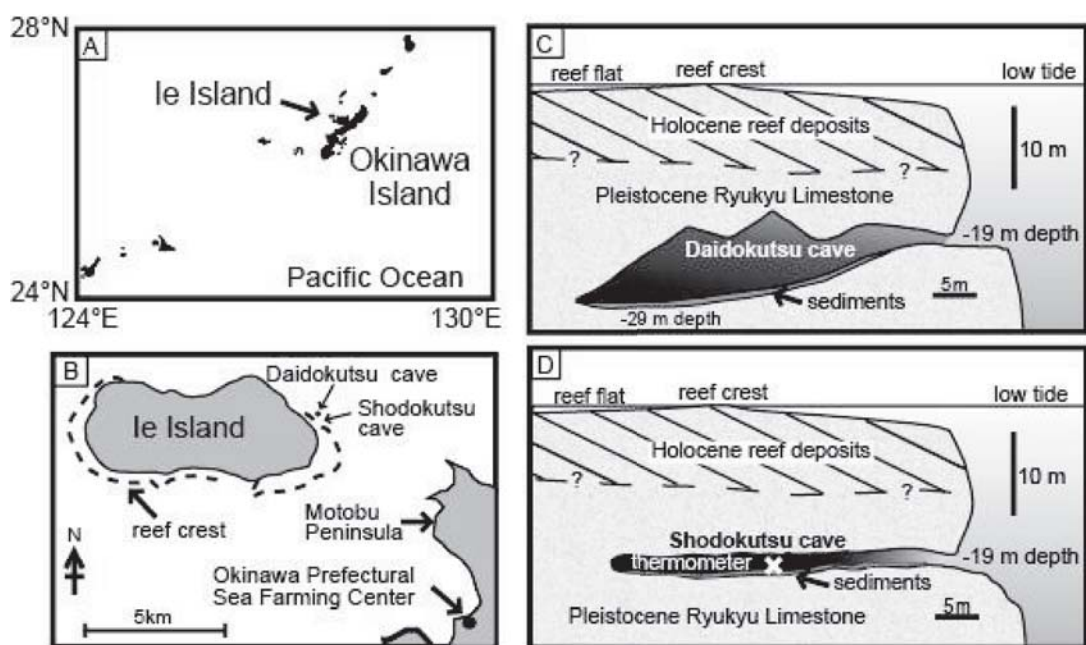


図1 (A) 沖縄県伊江島と、(B) 大洞窟および小洞窟の位置図。

は、人間活動の植生への影響を評価できない。浅海の二枚貝や群体サンゴ骨格を対象にした復元では、試料が不連続のために復元できた期間が断片的で、また人為的改変を含めた沿岸地形の変化の影響を評価できない。そこで、筆者らは海底洞窟に生息する微小二枚貝 *Carditella iejimensis* (イエジマケシザルガイ) の酸素同位体比から、湖沼堆積物や古文書記録からの情報を期待できない沖縄周辺の中期完新世以降の水温の復元を試みており、これまでの研究成果を本論で紹介する。

2. 海底洞窟とは

サンゴ礁の前縁斜面には、しばしば海底洞窟がある。これらは、海水準低下時に陸化した石灰岩体が陸水で溶食されてできた洞窟が、後氷期の海水準上昇で水没したものである。海底洞窟などの隠所的環境が注目を集めたのは、アラゴナイトの骨格に加えて珪質の骨針をあわせ持つ硬骨海綿の発見による (Hartman and Goreau, 1970)。この海綿の形態的特徴から絶滅していた層孔虫の高次分類上の位置が海綿に決定されたのである。つ

まり、硬骨海綿は生きている化石と言える。この発見を契機に、我が国でも 1990 年代より Kase and Hayami (1992) や Hayami and Kase (1993) などによって沖縄周辺のサンゴ礁の海底洞窟内の貝類の研究が行われた。その成果の一つが、第三紀中頃に絶滅したと考えられていた造礁性二枚貝ピクノドンテ属の発見である (Hayami and Kase, 1992)。発見のきっかけになった貝殻は、ダイバーが灰皿に使っていたものだった (速水, 1997)。この二枚貝はオオベッコウガキと命名され、殻長は 10cm に達する (Hayami and Kase, 1992)。しかし、洞窟性の二枚貝のほとんどは数 mm サイズの微小な種で、Kase and Hayami (1992) や Hayami and Kase (1993) は体サイズの小型化は洞窟内の貧栄養への適応と解釈した。以上のように、海底洞窟では隠生動物群に関する分類学的研究が盛んに行われ、近年では内視鏡を使った極狭い隠所空間の生態調査も行われている (Richter *et al.*, 2001)。また最近では、寿命が数百年に及ぶ硬骨海綿の骨格の地球化学的分析による古水温復元も行われている (Haase-Schramm *et al.*, 2003) ;

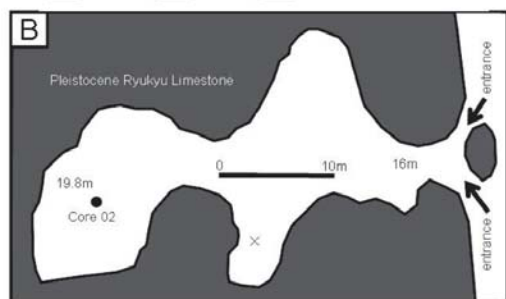
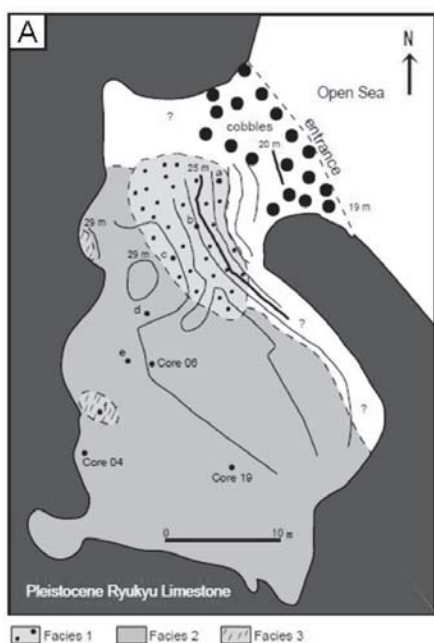


図2 (A) 大洞窟内の水深, 表層堆積物 (a-f) およびコア試料の採取地点. 堆積相 1~3 については本文中を参照. (B) 小洞窟の水深, コア 02 の採取地点. ×印は *C. iejimensis* の放流地点.

大森ほか, 2008).

3. 研究地域の概要

3.1) 洞窟の形状

筆者らが調査している海底洞窟の“大洞窟”と“小洞窟”(両洞窟とも, 北緯 $26^{\circ}43.479'$, 東経 $127^{\circ}43.908'$) は, 沖縄県本部半島の沖合 10km に位置する伊江島東岸のサンゴ礁の前縁斜面にある(図 1). 大洞窟の入口は水深約 19m で, 高さ 2m, 幅 18m, 内部は奥行き 40m, 幅 25m, 天井までの高さは高さ 11.6m の暗黒の広間があり, 最大水深は

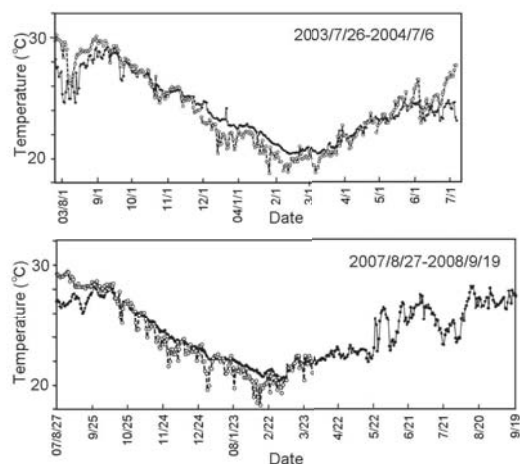


図3 大洞窟と沖縄県栽培漁業センター沖の水温. 黒丸・実線は大洞窟内の 8 時と 9 時の水温の平均値. 白抜き丸・点線は沖縄県栽培漁業センター沖の 9 時 30 分の水温.

29m である

(図 2A). 入口から 10m までは 45 度の斜面となっており, ここには数十 cm 大の礫からなる崖錐堆積物が分布している. 小洞窟の入口は水深約 19m にあり, 大洞窟から約 50m 南に位置する. 奥部まで水平かつ直線状の洞窟で, 奥行き 35m で, 天井までの高さは約 3m である(図 2B). Fairbanks (1989), Bard *et al.* (1996), Toscano and Macintyre (2003) の海水準変動曲線によれば, 大洞窟が浸水し始めたのはおよそ 9,000 年前で, 大洞窟の入口と小洞窟が完全に水没したのは約 8,000 年前である.

3.2) 大洞窟の水温・塩分・海水の酸素同位体

Kitamura *et al.* (2007b) は, 2003 年 7 月 26 日から 2004 年 7 月 6 日までの期間に, 大洞窟の最奥部(入口から 40m, 深度 29m, 洞窟の壁から約 2m の位置)に水温計(日油技研製 NWT-SN)1 機を係留し, 水温情報を得た(図 3A). 係留方法は, 水温計をステンレス製パイプにビニールテープで巻きつけ, パイプを堆積物に刺し込んだ. 水温計の位置は堆積面から 1m 上である. 水温データの計測は 1 時間間隔で, データは水温計の回収後に取得した. 計測の精度は $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ である. 大洞窟の最奥部に設置した理由は, 大洞窟の中央部で堆積物試料の採取・運搬を行なう際に支障が出ないようにす

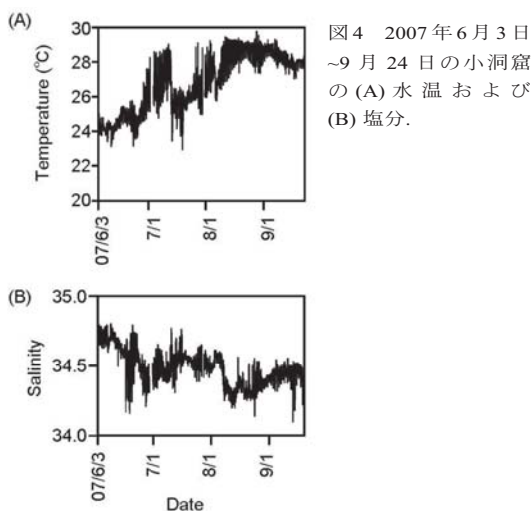


図4 2007年6月3日～9月24日の小洞窟の(A)水温および(B)塩分。

るためである。なお、10月から5月までは冬季の季節風に伴う荒波で海底洞窟に潜れないため、係留の途中での校正を行っていない。

2003年7月26日から2004年7月6日までの期間の水温の範囲は、29.6°C(8月31日)から20.3°C(2月29日)であり、水温の変化は北緯26～27°、東経127～128°の水深30mの月平均水温(<http://jdoss1.jodc.go.jp/cgi-bin/1997/bts.jp>)と良く一致している(Kitamura *et al.*, 2007b; 図3)。また、洞窟内の水温の変化は潮汐サイクルと連動していることが分かった。これは洞窟内の海水が潮汐サイクルで変化していることを示唆する(Kitamura *et al.*, 2007b)。

さらに北村・山本(印刷中)は上記のデータでは7月のデータが不完全なので、それを補完するため、2007年8月27日から2008年9月19日までの水温データを得た。そして、洞窟内の水温に関する全体的傾向、すなわち最高水温は8～9月にあり、最低水温は2～3月で、それぞれ約28～29°Cと約21°Cであることが判明した。さらに、本論において大洞窟内の水温データを沖縄県栽培漁業センター(本部町字大浜853-1)の測定した同センター沖合約70m、水深7.5mの水温と比較したところ、5～8月は大洞窟内よりも、水深7.5mの方が約1～5°C水温が高いが、12～2月は水深7.5mの方が約1～3°C水温が低く、3～4月と9～11月はほぼ同じであることが判明した。このことと洞窟

内の水温と潮汐サイクルとの連動から、夏季の満潮時における大洞窟内の水温上昇は温かい外洋水の流入により、冬季の満潮時の大洞窟内の水温低下は冷たい外洋水の流入によるということで合理的に説明される。つまり大洞窟内と外洋との海水の交換は潮汐サイクルに支配されていることが明らかとなった。

2007年7月2日(10:50～11:15)に大洞窟内とその外の水深30mの地点で海水を採取し、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の測定を地球科学研究所に依頼した。また、海水の採水時に水温・塩分を水温・塩分計(アレック電子ACYT-HR)で測定した(Yamamoto *et al.*, in press)。その結果、海水の $\delta^{18}\text{O}$ 値、水温、塩分は、大洞窟内では0.3‰、25.2°C、34.3であり、外洋では0.4‰、26.6°C、34.2であった。このように洞窟内外で $\delta^{18}\text{O}$ 値と塩分がほぼ同じことから大洞窟内の海水には地下水の影響のないことが明らかになった。

3.3) 小洞窟の水温・塩分・海水の酸素同位体

小洞窟内の水温と塩分は、2007年6月3日から9月24日に水温・塩分計(アレック電子ACYT-HR、10分間隔)で測定した。また、2007年7月2日(10:50～11:15、同日の満潮はおよそ8時で、干潮はおよそ15時)に小洞窟内の海水を採取し、 $\delta^{18}\text{O}$ 値の測定を地球科学研究所に依頼した。また、海水の採水時に水温・塩分を水温・塩分計(アレック電子ACYT-HR)で測定した。その結果、小洞窟内の水温は3ヶ月間に、24～25°Cから28～29°Cまで上昇し、その後はほぼ一定であることが分かった(図4A)。また塩分は、3ヶ月の間に34.7から34.2に低下し、この値は水深30mの平均塩分と同じである(図5A)。2007年7月2日の測定では、洞窟内の塩分(33.9)と海水の $\delta^{18}\text{O}$ 値($0.3 \pm 0.1\text{‰}$)、と水深30mの外洋の塩分(34.2)と海水の $\delta^{18}\text{O}$ 値($0.4 \pm 0.1\text{‰}$)には差は見られなかった。小洞窟内の $\delta^{18}\text{O}$ 値と塩分と洞窟外の30mのそれらとがほぼ同じことから、小洞窟内の海水にも地下水の影響のないことが明らかになった。なお2007年8月27日～9月24日までの小洞窟内の水温は、大洞窟よりも1～2°C高い(図3, 4A)。

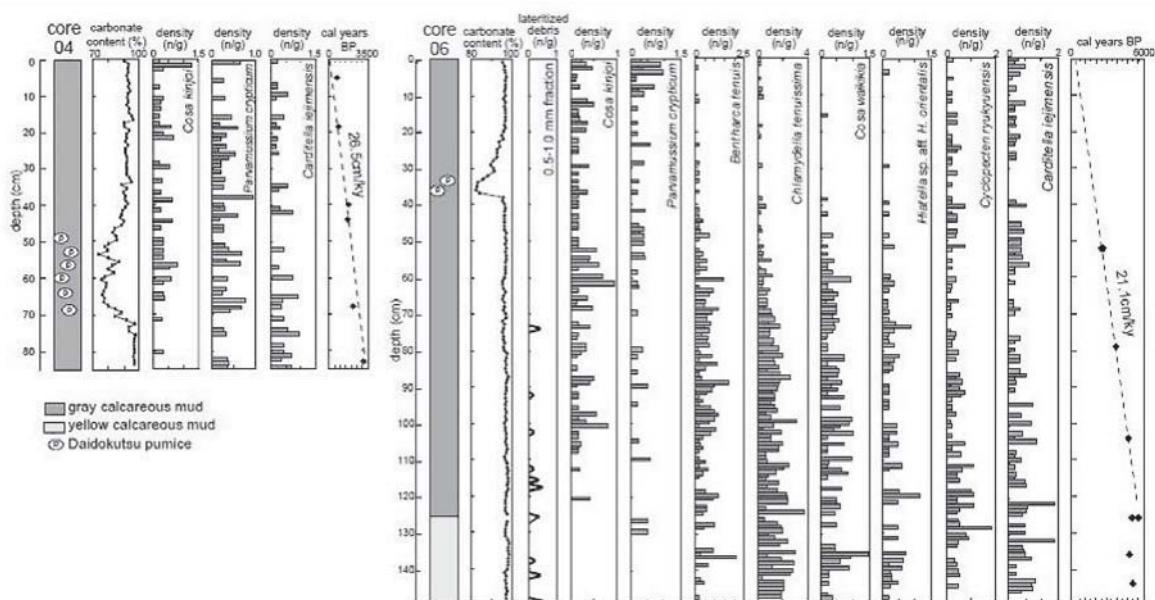


図5 コア04と06の柱状図と、炭酸塩含有率、二枚貝優占種の層位変化、二枚貝の ^{14}C 年代から推定した堆積速度 (Kitamura *et al.*, 2007aを改変)。

4. 大洞窟の堆積物と微小二枚貝類

大洞窟の表層堆積物は、入口付近に分布する崖錐堆積物を除くと3つの堆積相に分けられ、奥に向かって細粒化する(図2A; Kitamura *et al.*, 2007a)。堆積相1は灰白色石灰砂で、地点a～cに見られる。堆積相2は灰白色石灰泥で、地点dとeで見られる。堆積相3は地点fに限定的に見られ、硬骨海綿の遺骸を含む石灰砂である。筆者らは、これまでに堆積相2の分布域から採取した6本のコア(コア01, 02, 04, 05, 06, 19)に関して堆積物の分析を行った。これらのコア試料の長さは43～233cmであり、いずれも基盤には達していない。平均堆積速度は20～40cm/kyrである。コア試料の解析から、堆積相2の下位に2つの異なる堆積物が分布することが判明した。コア05と06では、堆積相2(灰白色石灰泥)の下位に淡黄色石灰泥があり、その境界は明瞭である。放射性炭素年代値に基づくと、境界年代はBC3,500年頃である(図5)。淡黄色石灰泥中の4試料の放射性炭素年代値に深度の変化が見られないことは、堆積が急激に起きたか生物攪拌で時間的平均化を

被ったかのどちらかによる。一方、淡黄色石灰泥の上限が明瞭であることは活発な生物攪拌がないことを意味する。したがって、Kitamura *et al.* (2007a)は淡黄色石灰泥を土石流堆積物と推定している。一方、コア19では、堆積相2の灰白色石灰泥の下位には灰色石灰砂がある(図6; Yamamoto *et al.*, DOI 10.1007/s00338-009-0536-2)。この石灰砂は上方細粒化し、石灰泥に漸移し、その年代は暦年代で約6,000年前である。石灰砂は赤土起源と推測される褐色粒子を含み、この粒子も上方に向かって産出密度が低下する。これらのことから、約6,000年前以前の大洞窟では、前述の淡黄色石灰泥と石灰砂が共存(同時異相)していたことと、約6,500年前に外洋から洞窟内への海水の流入が弱まったことが分かった(Yamamoto *et al.*, DOI 10.1007/s00338-009-0536-2)。

約6,000年前以降から洞窟奥部を中心に堆積した灰白色石灰泥は軽石散在層を挟み、これを北村ほか(2006)は大洞窟軽石と命名した。また、貝類の ^{14}C 年代値と深度から、その堆積年代をBC40±40年～AD240±80年と推定した。この軽石を構成する火山ガラスの SiO_2 は78.0～78.8wt%で、低

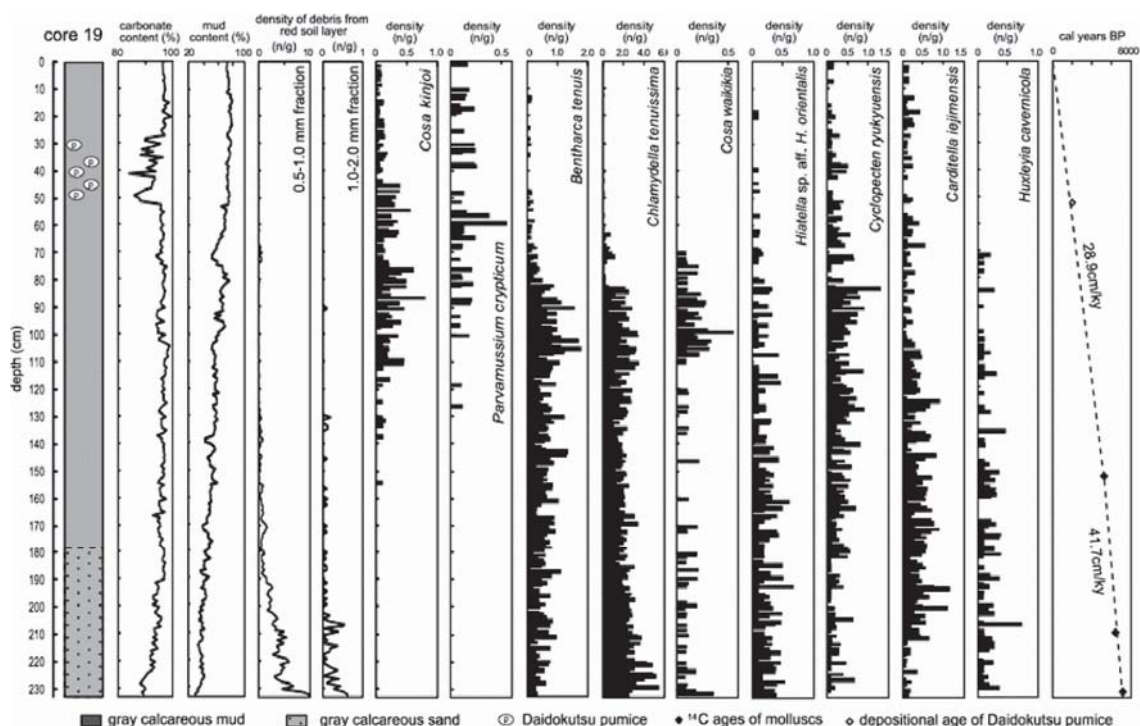


図6 コア19の柱状図と、炭酸塩含有率、含泥率、二枚貝優占種の層位変化、二枚貝の ^{14}C 年代から推定した堆積速度 (Yamamoto *et al.*, in press).

K 流紋岩組成を示す(北村ほか, 印刷中)。大洞窟軽石は、洞窟内のコア試料の対比に有効である。

大洞窟の海底洞窟堆積物は保存状態が非常に良い微小二枚貝を含み、それらの種組成の時空間分布から洞窟の環境変動は復元されている(図5, 6; Kitamura *et al.*, 2007a; Yamamoto *et al.*, DOI 10.1007/s00338-009-0536-2)。表層堆積物から微小二枚貝類の水平分布パターンを調査した結果、洞窟奥部に多く見られる種(*Cosa kinjoi*, *Parvamussium crypticum*)、洞窟入口付近に多く見られる種(*Cosa waikikia*, *Malleus* sp., *Hiatella* sp. aff. *H. orientalis*)、明瞭な分布パターンが見られない種(*Cyclopecten ryukyuensis*, *Chlamydoella tenuissima*, *Carditella lejimensis*)に分類されることが判明した(Kitamura *et al.*, 2007a)。一方、コア試料中の微小二枚貝類の層位分布から、(1) 7,000 年前から洞窟性種が存在することと、(2) 洞窟の奥部では、過去には洞窟入口付近に生息する種が卓越していた

が、その個体密度は徐々に減少し、それに代わって洞窟奥部に生息する種が増加したことが分かった。後者は、洞窟内が閉鎖的になってきていることを示唆し、前述した洞窟外起源の褐色粒子の層位分布から推定した海水の流入の低下と一致する。そして、その原因は、堆積物の充填やサンゴの固着などによって、入口を含むサンゴ礁内部の空隙が充填されたことで、洞窟内外の海水交換の効率が低下したためと考えられる。つまり、時代を遡るとともに、大洞窟内の水温は、外洋との差は減少していくものと推定される。なお、Urukata *et al.* (2009) は堆積物中の微小二枚貝の優占種の原因(卵中で形成される殻)の形態に関する進化学的研究を行っている。

5. 小洞窟の堆積物と微小二枚貝類

小洞窟の奥部から、長さ 41cm のコア試料を採取した。堆積物は白色石灰泥からなり、2 枚の石

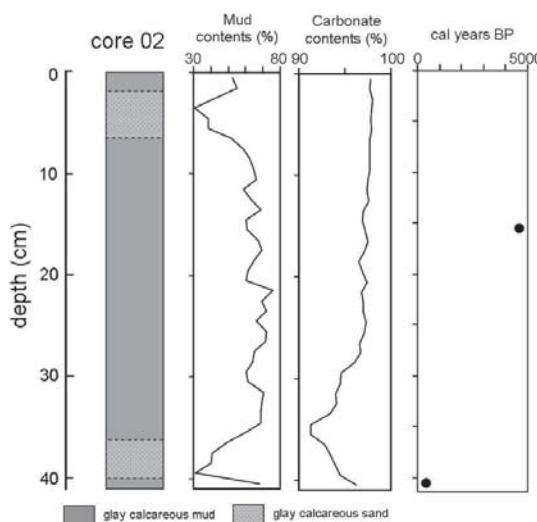


図7 小洞窟で採取したコア02の柱状図、含泥率、炭酸塩含有率、二枚貝の ^{14}C 年代。

灰砂薄層を挟む(図7)。保存状態の良い二枚貝類の ^{14}C 年代値は、逆転現象を示すことから、堆積物は再堆積を被っている可能性が高いことが分かった。ダイバーによると、小洞窟では堆積物の分布がたびたび変化しているという。これらのことは、小洞窟の堆積物が水流で攪乱されていることを示唆する。おそらくは、入口から水平かつ直線状に伸びる形状のため、水流が起きやすいものと思われる。

小洞窟の微小二枚貝類については、Hayami and Kase (1993) は *Bentharca*, *Cosa*, *Dacrydium*, *Parva-mussium*, *Cardita*, *Carditella* の生きた個体を観察するとともに、堆積物中の生きた個体の90%以上が *Carditella iejimensis* であると記している。以上のことから、小洞窟は環境復元の研究には適当ではないが、*C. iejimensis* の生態調査には大洞窟よりも適している。

6. 微小二枚貝 *Carditella iejimensis* の酸素同位体比水温計

6.1) Kitamura *et al.* (2007b) の仮説

上記の研究を通じて、Kitamura *et al.* (2007b) は、沖縄周辺の中期完新世以降の古水温の定量的復元

に、海底洞窟堆積物中の微小二枚貝の酸素同位体比が非常に優れていると考えた。その理由は、(1) 洞窟という半閉鎖的空間のために、波浪による物理的攪拌から堆積物が底護されている、(2) 海底洞窟内に生息する大型底生動物は表生のエビやカニだけなので、生物攪拌をほとんど受けていない、(3) 洞窟性種は洞窟内に生息場が限られるので死殻は現地性である(同一深度のアーカイブである)、(4) サンゴ礁の前縁斜面なので中期完新世以降を通じて地形変化はほとんどない、(5) 二枚貝は付加成長なので、例えば、水温の季節変化を解読できる可能性がある、(6) 人為的攪拌の影響はまったく無い、からである。そして、Kitamura *et al.* (2007b) は、洞窟棲微小二枚貝の優占種のうち *Carditella iejimensis* (図8) が酸素同位体比水温計に最も適しているとした。これは、同種が堆積物表面に生息し、殻が100%アラゴナイトで構成されているからである。さらに、Kitamura *et al.* (2007b) は、大洞窟の表層堆積物から抽出した殻長1.0~3.5mmの *C. iejimensis* の死殻の全殻(1枚の殻を1試料とした)の $\delta^{18}\text{O}$ 値と殻サイズとの間には有意な負の相関があることを見出し(図9)、これを水温が上昇する時期に殻が形成されたためと解釈した。そして、殻サイズと質量の関係式とGrossman and Ku (1986)の水温- $\delta^{18}\text{O}$ 換算式から、殻長1mmの個体が形成時の平均水温は約23℃と算出し、殻長3mmの個体の最外縁形成時の平均水温は約27℃と算出した。これを基に、Kitamura *et al.* (2007b) は、*C. iejimensis* の $\delta^{18}\text{O}$ 値からある年の4~7月の水温を復元できると結論づけた。この解釈は、Yamamoto *et al.* (2008)による大洞窟の表層堆積物から抽出した死殻の $\delta^{18}\text{O}$ 値の測定結果からも支持された。さらに、Yamamoto *et al.* (2008)は大洞窟から採取した4本のコア試料の *C. iejimensis* の $\delta^{18}\text{O}$ 値をコンパイルして、沖縄海域では過去3,000年間には水温変化はほとんどなく、この間に最も高温だった年は最近250年間に起きた可能性の高いことを明らかにした。なお、解析の際には、 $\delta^{18}\text{O}$ 値と殻サイズとの間の関係式を使って殻サイズの $\delta^{18}\text{O}$ 値への影響を補正した。

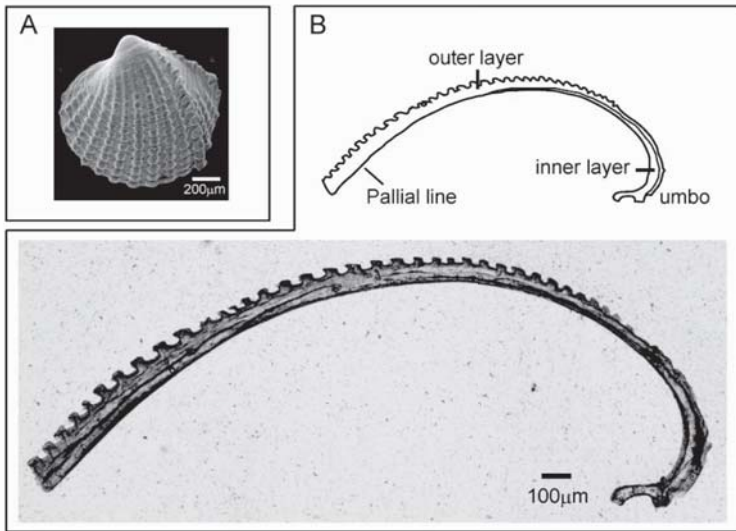


図8 微小二枚貝 *C. iejimensis* の (A) 殻表面, (B) 殻断面。

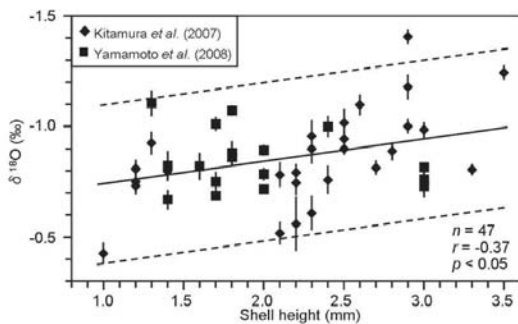


図9 大洞窟表層堆積物から抽出した *C. iejimensis* の $\delta^{18}\text{O}$ 値と殻サイズ(殻高). Yamamoto *et al.* (2008) を改変。

6.2) Yamamoto *et al.* (in press) の仮説

Kitamura *et al.* (2007b) の仮説は、死殻の $\delta^{18}\text{O}$ 値と殻サイズの関係に準拠する。だが、それらの試料は、成長期間も死亡した時期も不明である。よって、後述するように、死殻の $\delta^{18}\text{O}$ 値と殻サイズとの間の相関は、死因の影響による可能性もある。そこで、Kitamura *et al.* (2007b) の仮説を検証するため、Yamamoto *et al.* (in press) は、死殻を対象に、殻の成長に伴う $\delta^{18}\text{O}$ 値の変化を検討した。仮説に従え1つの貝殻では、成長後期の部分ほど軽い $\delta^{18}\text{O}$ 値を示すはずである。このような成長に伴う $\delta^{18}\text{O}$ 値の変化を明らかにする研究では、殻の成長軸に沿ってマイクロドリルで粉末試料を取って $\delta^{18}\text{O}$ 値を測定する (e.g., Jones *et al.*, 1986 ; Tanabe

and Oba, T., 1988 ; Goodwin *et al.*, 2001 ; Watanabe *et al.*, 2004 ; Shōne *et al.*, 2005 ; Surge and Walker, 2006)。しかし、*C. iejimensis* の殻は非常に小さく、かつ薄いため (図8)、この方法を用いることはできない。そこで Yamamoto *et al.* (in press) では、*C. iejimensis* の殻表面の成長線に沿って、1枚の殻を2～5分割し、それぞれのサンプルの $\delta^{18}\text{O}$ 値を測定した (図10)。ちなみに、我々の知る限り、数 mm サイズの二枚貝殻の $\delta^{18}\text{O}$ 値の個体発生変異に関する研究は Yamamoto *et al.* (in press) が初めてである。

19個体の *C. iejimensis* を分析した結果、殻が成長するにつれ、(1) $\delta^{18}\text{O}$ 値が軽くなる、(2) $\delta^{18}\text{O}$ 値が重くなる、(3) 特に傾向が見られない、の3パターンのあることが分かった (図10)。これは、Kitamura *et al.* (2007b) による *C. iejimensis* の $\delta^{18}\text{O}$ 値からある年の4～7月の水温が復元できるという仮説を支持せず、むしろ個体ごとに殻成長季節が異なる可能性を示す。さらに、Yamamoto *et al.* (in press) は、死殻の殻サイズと $\delta^{18}\text{O}$ 値に負の相関があることについて、2つの仮説を提示した。1つは、サンプルサイズ ($n = 47$) の小ささに伴う偶然性である。もう一つは、死亡率の温度依存性である。温暖な時期の死亡率が、寒冷な時期の死亡率より低いのであれば、殻サイズの大きい個体に

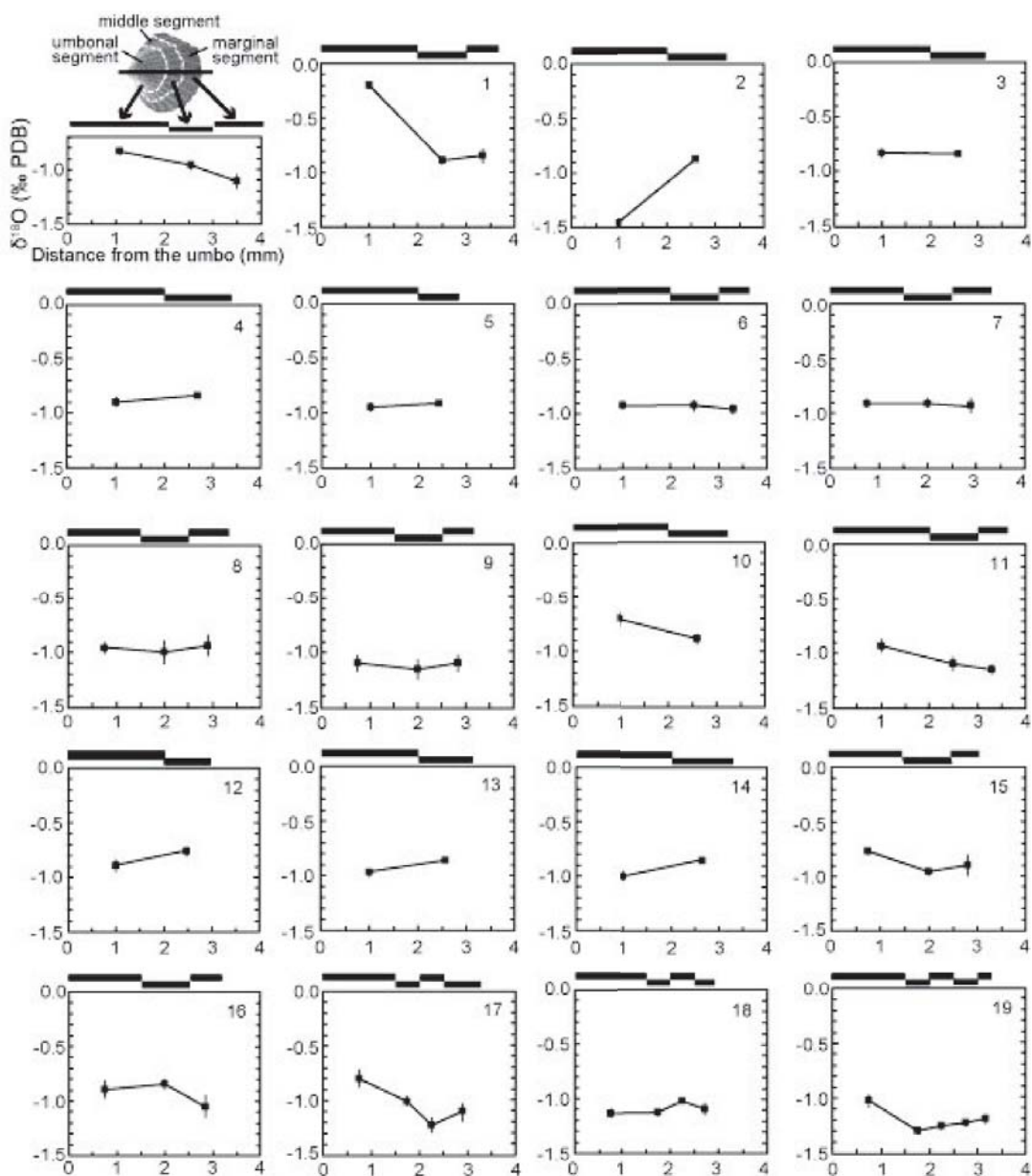


図 10 *C. iejimensis* の個体成長による $\delta^{18}\text{O}$ 変化. 各グラフ上部の黒い棒線は測定試料の採取部位を示す. 3-9: $\delta^{18}\text{O}$ 変化がほぼないタイプ. 1, 10-11: 殻縁に向かって $\delta^{18}\text{O}$ 値が減少するタイプ. 2, 12-14: 殻縁に向かって $\delta^{18}\text{O}$ 値が増加するタイプ. 15-19: 変化はあるが規則性はないタイプ.

おいては、温暖な時期に生息していた個体（低い $\delta^{18}\text{O}$ 値を持つ殻）の占有率が高く、寒冷な時期の個体（高い $\delta^{18}\text{O}$ 値を持つ殻）の占有率は低くなるはずである。

6.3) Yamamoto *et al.* (submitted) の仮説

上記のように 2 つの解釈を検討するために、筆者らは 2008 年の 7 月初め、7 月末～8 月初め、9 月末の計 3 回、小洞窟で *C. iejimensis* の生貝を計 50

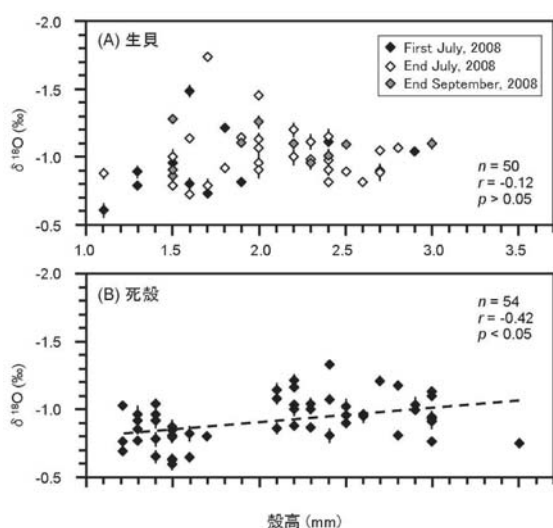


図 11 小洞窟で採取した *C. iejimensis* の (A) 生貝と (B) 死殻の $\delta^{18}\text{O}$ 値と殻サイズ (殻高). 出典は Yamamoto *et al.* (submitted).

個体採取することに成功した。また、小洞窟の堆積物表層から同種の死殻 54 個体を抽出した。これらの $\delta^{18}\text{O}$ 比を測定した結果、死殻については大洞窟の個体と同様に、 $\delta^{18}\text{O}$ 値と殻サイズには有意な相関があったが、生貝については有意な相関は見られなかった (図 11A, B)。また、3 回の時期ともに生きている幼貝の個体を確認できた。以上のことから、筆者らは死殻の $\delta^{18}\text{O}$ 値と殻サイズの関係は、死亡率の水温依存性によると結論づけた (Yamamoto *et al.*, submitted)。つまり、低水温による死亡率の増加で、死んだ個体群には重い $\delta^{18}\text{O}$ 値を持つ個体の比率が高くなる。一方、そのような低水温を生き延びた個体は少ないので、重い $\delta^{18}\text{O}$ 値を持った大きい個体の発見の確率は極めて低い。そのため、 $\delta^{18}\text{O}$ 値と殻サイズとの相関が、死殻のみに生じたのであろう。なお、この関係の成立する重要な背景として、*C. iejimensis* の死因が主に低水温であることが挙げられる。これは、洞窟内の低い捕食圧と安定な環境によるのだろう。

7. 過去 7,000 年間の *C. iejimensis* の $\delta^{18}\text{O}$ 値変化

2007 年に大洞窟で採取したコア 19 は、二枚貝

の ^{14}C 年代から、過去 7,000 年間の記録を持つ (Yamamoto *et al.*, DOI 10.1007/s00338-009-0536-2)。このコアから保存状態の良い個体を抽出し、1 個体を 1 試料として $\delta^{18}\text{O}$ を測定した。その結果、*C. iejimensis* の $\delta^{18}\text{O}$ 記録には、100 年スケールの変動は認められるが、数千年にわたる長期的な傾向は見られなかった (図 12)。この長期的傾向が見られない点は、東シナ海で採取した深海底コア中の浮遊性有孔虫 *Globigerinoides ruber* の Mg/Ca 比と $\delta^{18}\text{O}$ 値を用いた海洋表層水温や海水の酸素同位体比の復元と一致している (Sun *et al.*, 2005 ; Lin *et al.*, 2006)。そして Sun *et al.* (2005) と Lin *et al.* (2006) は、モンスーン地域の陸上の記録 (An, 2000 ; Fleitmann *et al.*, 2003 ; Wang *et al.*, 2005) に特徴的な前期-中期完新世以降の太陽活動に関係する夏季モンスーン強度の低下の影響が東シナ海では認められない理由を、その海洋環境が高緯度地域と低緯度地域の両方で形成される水塊に影響されるためと解釈している。なお最近、Maher (2008) は、中国黄土高原と loessic Russian steppe のレス堆積物の磁気的性質と (Maher and Hu, 2006)、鍾乳石の $\delta^{18}\text{O}$ 記録の比較に基づく、過去の降水量の記録には漸進的なモンスーンの弱体化の証拠が認められないと述べている。したがって、夏季の東アジアモンスーンの活動の長期的変動に対しては検討の余地がある。*C. iejimensis* の $\delta^{18}\text{O}$ 記録では、6,300, 5,870, 5,550, 5,150 年前に重い $\delta^{18}\text{O}$ 値が見られる。これらの期間はボンドイベント 4 (Bond *et al.*, 2001) と一致し、そしてまた太陽活動の低下期に一致する。さらに 6,300 年前と 5,870 年前のイベントは、夏季アジアモンスーンが弱体化したイベント (Neff *et al.*, 2001 ; Wang *et al.*, 2005 ; Selvaraj *et al.*, 2007) とほぼ一致し、6,300 年前のイベントは東シナ海の浮遊性有孔虫記録に見られた 3 回の夏期寒冷化イベント (約 1,700, 2,300 ~ 4,600, 6,200 年前 ; Xiang *et al.*, 2007) の一つと重なる。夏季モンスーンの弱体化と冬季モンスーンの強化は、太陽活動が弱まった時に起きている (Neff *et al.*, 2001 ; Fleitmann *et al.*, 2003 ; Wang *et al.*, 2005 ; Lim *et al.*, 2005 ; Xiao *et al.*, 2006 ;

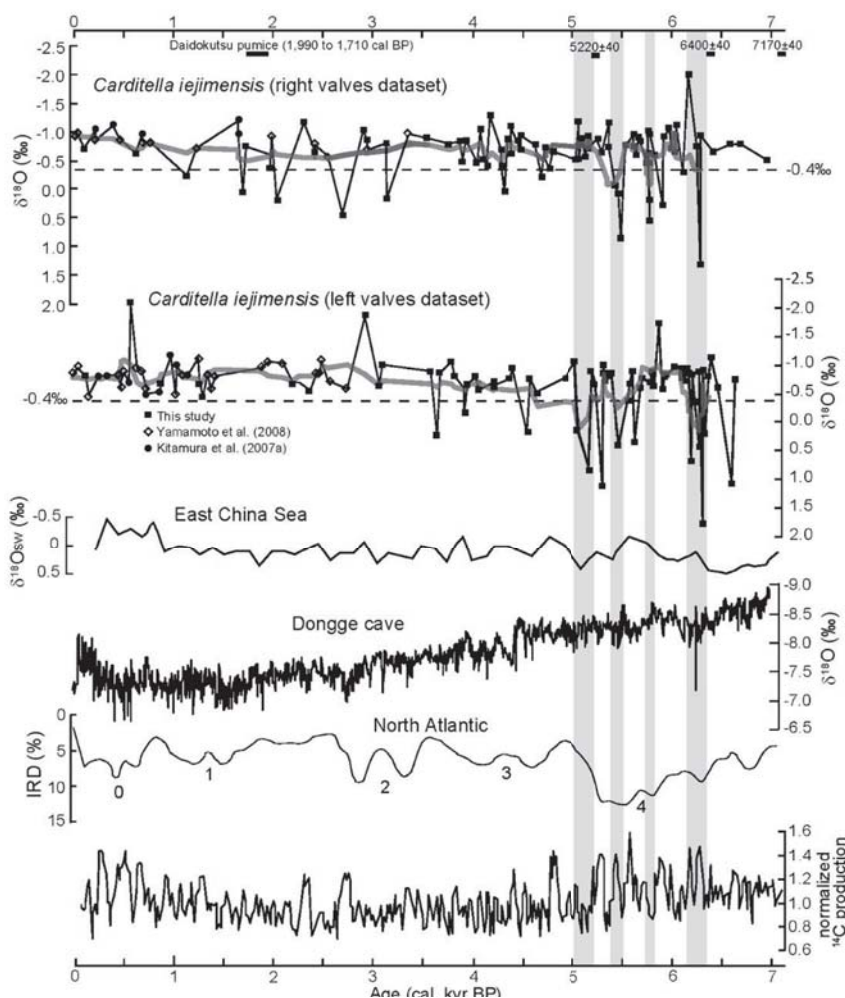


図12 過去7,000年間にわたる *C. iejimensis* の $\delta^{18}\text{O}$ 変化 (Yamamoto *et al.*, submitted), 東シナ海の $\delta^{18}\text{O}_{\text{seawater}}$ 記録 (Lin *et al.*, 2006), Dongge洞窟 (中国) で採取された鍾乳石の $\delta^{18}\text{O}$ 記録 (Wang *et al.*, 2005), 北大西洋の漂流岩屑の占有率 (Bond *et al.*, 2001), ^{14}C 生産量 (Kromer, 2009).

Yancheva *et al.*, 2007). よって異常に重い $\delta^{18}\text{O}$ イベントは、太陽活動変動に起因する夏季モンスーンの弱体化と冬季モンスーンの強化で、比較的寒冷で乾燥した気候が一時的に発生したことを示唆する。

注目すべきは、太陽活動が低下した時期 (e.g., 小氷期のマウンダー、シュペラー、ウォルフ極小期) に夏季アジアモンスーンが弱体化したにもかかわらず (Wang *et al.*, 2005), 異常に重い $\delta^{18}\text{O}$ イベントが約 5,150 年前以降では生じていないことである。このことは、太陽活動の変化に起因する大気循環の変動に対する東シナ海の応答のモードが過去 7,000 年間に変わったことを意味するのかもしれない。本研究で初めて明らかになった東

シナ海のモード変化は、同海域の海洋環境に関する理解が未だに十分でないことを示唆する。そして、このモード変化の原因の究明は、日本周辺の気候変動の予測に使われる気候モデルの改良に結びつくので、大変に重要な新たな研究課題である。

8. 将来に向けて

C. iejimensis の酸素同位体比から水温をさらに定量的に復元するには、同種の殻形成時期を特定する必要がある。洞窟性の微小二枚貝の追跡調査は過去に事例がない。そのため、筆者の一人山本は3年間にわたって追跡調査の方法の確立に取り組んできた。その結果、小洞窟の堆積物から抽出した個体の殻縁を油性染料で標識し、小洞窟内の

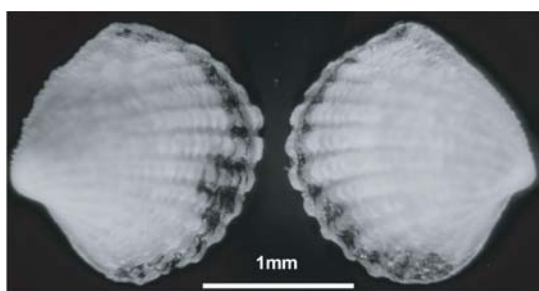


図 13 殻成長追跡により、殻成長が観察できた個体。2008 年 7 月 29 日採取した生貝の殻縁を黒色の油性染料で標識後、放流した個体を同年 9 月 20 日に回収。

海底に設置したゲージ内に放流するという方法で、追跡調査できることが分かった。そして、2008 年 7 月 29 日に採取した生貝 50 個体に標識・放流し、同年 9 月 20 日に 13 個体を回収し、そのうち 3 個体の殻が 0.1mm 成長したことを確認できた(図 13)。この手法で殻形成時期を特定することによって、将来的には 1 枚の貝殻からでも水温の季節変動を定量的に復元でき、上記の異常に重い $\delta^{18}\text{O}$ 値の発生の継続期間に関する情報を得られるだろう。

ところで、海底洞窟に生息する大型の二枚貝ツキヨミガイ *Glossocardia obesa* と巻貝アマガイモドキ *Neritopsis radula* は、大洞窟の堆積物からしばしば化石が見つかる。*G. obesa* は殻高 8cm で重量は 40g に達し、一方、*N. radula* は殻幅 2.5cm で 5g に達するので、 $\delta^{18}\text{O}$ 値測定とともに ^{14}C 年代測定が可能である。したがって、これらの貝類からは、ある時代の水温の季節変動や 5～6 年間の年々変動の情報を得られる可能性は高く、その情報は *C. iejimensis* の酸素同位体比から水温復元を行う際の重要な制約条件を与える。さらに、本稿において筆者らの一人の北村が執筆した海底洞窟堆積物中のホヤの骨片の内包物から過去の海水の塩分や酸素同位体比を直接測定できるようになれば、*C. iejimensis* の酸素同位体比から水温復元の精度はさらに上がる。そして、これら一連の研究によって、太陽活動の変化に起因する大気循環の変動に対する東シナ海の応答モードの変化の原因を究明することで、気候モデルの改良に役立ち、

日本周辺の気候変動の予測の精度向上に貢献できる。

謝辞：本稿の公表の機会を与えてくださった、産業技術総合研究所の鈴木淳博士と中島礼博士と東京大学大学院新領域創成科学研究科の川幡穂高教授に深くお礼申し上げます。研究を進めるにあたり、国立科学博物館加瀬友喜博士および静岡大学理学部の生形貴男博士には助言をしていただいた。大橋秀一氏、金城繁光氏、安村晃伸氏には試料採取にご協力していただいた。褐色粒子および二枚貝の薄片作成には森英樹技官にご協力いただいた。また、本研究の一部には日本学術振興会科学研究補助金(課題番号 16340159, 19540492)、静岡大学創造科学技術大学院自然科学系教育部学生公募プロジェクト、笹川科学研究助成、深田地質研究助成を使用した。ここに心から感謝いたします。

参考文献

- [1] Abram, N. J., Webster, J. M., Davies, P. J. and Dullo, W. C. (2001) : Biological response of coral reefs to sea surface temperature variation : evidence from the raised Holocene reefs of Kikai-jima (Ryukyu Islands, Japan). *Coral Reefs*, 20, 221-234.
- [2] An, Z. S., Porter, S. C., Kutzbach, J. E., Wu, X. H., Wang, S. M., Liu, X. D., Li, X. Q. and Zhou, W. J. (2000) : Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon. *Quaternary Science Reviews* 19, 743-62.
- [3] Bard, E., Hamelin, B., Arnold, M., Montaggioni, L., Cabioch, G., Faure, G. and Rougerie, F. (1996) : Deglacial sea-level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge. *Nature*, 382, 241-244.
- [4] Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muschler, R., Evans, M. N., Showers, W., Hoffman, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I. and Bonani, G. (2001) : Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 294, 2130-2136.
- [5] Chinzei, K., Koike, H., Oba, T., Matsushima, Y., Kitazato, H. (1987) : Secular changes in the oxygen isotope ratios of mollusc shells during the Holocene of Central Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 61, 155-166.
- [6] Fairbanks, R. G. (1989) : A 17,000-year glacio-eustatic sea level record : influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342, 637-642.
- [7] Faunmap Working Group (1996) : Spatial response of mammals to late Quaternary environmental fluctuations. *Science* 272, 1601-1606.

- [8] Fleitmann, D., Burns, S. J., Mudelsee, M., Neff, U., Kramers, J., Mangini, A. and Matter, A. (2003) : Holocene Forcing of the Indian Monsoon Recorded in a Stalagmite from Southern Oman. *Science*, 300, 1737-1739.
- [9] Goodwin, D. H., Flessa, K. W., Schöne, B. R. and Dettman, D. L. (2001) : Cross-Calibration of Daily Growth Increments, Stable Isotope Variation and Temperature in the Gulf of California Bivalve Mollusk *Chione cortezi* : Implications for Paleoenvironmental Analysis. *Palaaios*, 16, 387-398.
- [10] Grossman, E. L. and Ku, T. L. (1986) : Oxygen and carbon fractionation in biogenic aragonite : temperature effect. *Chemical Geology*, 59, 59-74.
- [11] Haase-Schramm, A., Böhm, F., Eisenhauer, A., Dullo, W.-C., Joachimski, M. M., Hansen, B. and Reitner, J. (2003) : Sr/Ca ratios and oxygen isotopes from sclerosponges : Temperature history of the Caribbean mixed layer and thermocline during the Little Ice Age. *Paleoceanography*, 18 (3), 1073, DOI:10.1029/2002PA000830.
- [12] Hartman, W. D. and Goreau, T. F. (1970) : Jamaican coralline sponges : their morphology, ecology and fossil relatives. *Zoological Soc London Symposia*, 25, 205-243.
- [13] 速水格 (1997) : 洞窟性貝類のミラクル. 奥谷喬司編. 貝のミラクル, 257-270. 東海大学出版会, 東京.
- [14] Hayami, I. and Kase, T. (1992) : A new cryptic species of Pycnodonte from Ryukyu Islands : A living fossil oyster. *Transactions and Proceedings of the Palaeontological Society of Japan, New Series*, 165, 1070-1089.
- [15] Hayami, I. and Kase, T. (1993) : Submarine cave bivalvia from the Ryukyu Islands : systematics and evolutionary significance. *The University Museum, The University of Tokyo, Bulletin*, 35, 1-133.
- [16] Ijiri, A., Wang, L., Oba, T., Kawahata, H., Huang, Chen-Y. and Huang, Chi-Y. (2005) : Paleoenvironmental changes in the northern area of the East China Sea during the past 42,000 years. *Palaogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 219, 239-261.
- [17] Jian, Z., Wang, P., Saito, Y., Wang, J., Pflaumann, U., Oba, T. and Cheng, X. (2000) : Holocene variability of the Kuroshio Current in the Okinawa Trough, northwestern Pacific Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 184, 305-319.
- [18] Jones, D. S., Williams, D. F. and Romanek, C. S. (1986) : Life history of symbiont-bearing giant clams from stable isotope profiles. *Science*, 231, 46-48.
- [19] Kase, T. and Hayami, I. (1992) : Unique submarine cave mollusc fauna : composition, origin and adaptation. *Journal of Molluscan Studies*, 58, 446-449.
- [20] 北村晃寿・加瀬友喜・大橋秀一・平本真弓・坂口佳孝・田辺晶史・間藤基之 (2003) : 沖縄のサンゴ礁にある海底洞窟堆積物の堆積相と堆積速度. 第四紀研究, 42, 99-104.
- [21] 北村晃寿・加瀬友喜・海野進・山本なぎさ・大橋秀一・平本真弓・若山奈々美・雨宮真理子 (2006) : 沖縄県伊江島の海底洞窟堆積物から見つかった軽石散在層. 第四紀研究, 45, 141-144.
- [22] Kitamura, K., Hiramoto, M., Kase, T., Yamamoto, N., Amemiya, M., Ohashi, S. (2007b) : Long-term changes in cavernicolous bivalve assemblages and environments within a submarine cave in the Okinawa Islands. *Paleontological Research*, 11, 163-182.
- [23] Kitamura, A., Omote, H. and Oda, M. (2000) : Molluscan response to early Pleistocene rapid warming in the Sea of Japan. *Geology*, 28, 723-726.
- [24] Kitamura, A. and Ubukata, T. (2003) : The sequence of local recolonization of warm-water marine molluscan species during a deglacial warming climate phase : a case study from the early Pleistocene of the Sea of Japan. *Palaeoecography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 199, 83-94.
- [25] 北村晃寿・海野進・山本なぎさ (印刷中) : 大洞窟軽石の主要成分化学組成. 静岡大学地球科学研究報告.
- [26] 北村晃寿・山本なぎさ (印刷中) : 沖縄県伊江島沖の海底洞窟"大洞窟"内の水温記録. 静岡大学地球科学研究報告.
- [27] Kitamura, K., Hiramoto, M., Kase, T., Yamamoto, N., Amemiya, M. and Ohashi, S. (2007a) : Long-term changes in cavernicolous bivalve assemblages and environments within a submarine cave in the Okinawa Islands. *Paleontological Research*, 11 (2), 163-182.
- [28] Kitamura, A., Yamamoto, N., Kase, T., Ohashi, S., Hiramoto, M., Fukusawa, H., Watanabe, T., Irino, T., Kojitani, H., Shimamura, M., Kawakami, I. (2007b) : Potential of submarine-cave sediments and oxygen isotope composition of cavernicolous micro-bivalve as a late Holocene paleoenvironmental record. *Global and Planetary Change*, 55, 301-316.
- [29] Kitoh, A., Motoi, T. and Murakami, J. (2006) : El Niño-Southern Oscillation simulation at 6000 years before present with the MRI-CGCM2.3 : effect of flux adjustment. *Journal of Climate*, 20, 2484-2499.
- [30] Kromer, B. (2009) : Radiocarbon and dendrochronology. *Dendrochronologia*, 27, 15-19.
- [31] Lim, J., Matsumoto, E. and Kitagawa, H. (2005) : Eolian quartz flux variations in Cheju Island, Korea, during the last 6500 yr and a possible Sun-monsoon linkage. *Quaternary Research*, 64, 12-20.
- [32] Lin, Y. -S., Wei, K. -Y., Lin, I. -T., Yu, P. -S., Chiang, H. -W., Chen, C. -Y., Shen, C. -C., Mii, H. -S. and Chen, Y. -G. (2006) : The Holocene Pulleniatina Minimum Event revisited : Geochemical and faunal evidence from the Okinawa Trough and upper reaches of the Kuroshio current. *Marine Micropaleontology*, 59, 153-170.
- [33] Maher, B. A. (2008) : Holocene variability of the East Asian summer monsoon from Chinese cave records : a reassessment. *The Holocene*, 18, 861-866.
- [34] Maher, B. A. and Hu, M. (2006) : A high resolution record of Holocene rainfall variations from the western

- Chinese Loess Plateau : antiphase behaviour of the African/ Indian and East Asian summer monsoons. *The Holocene*, 16, 309-19.
- [35] Morimoto, M., Kayanne, H., Abe, O. and McCulloch, M. T. (2007) : Intensified mid-Holocene Asian monsoon recorded in corals from Kikai Island, subtropical north-western Pacific. *Quaternary Research*, 67, 204-214.
- [36] Nakagawa, T., Tarasov, P. E., Nishida, K., Gotanda, K. and Yasuda, Y. (2002) : Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan : application to surface and Late Quaternary spectra. *Quaternary Science Reviews*, 21, 2099-2113.
- [37] Neff, U., Burns, S. J., Mangini, A., Mudelsee, M., Fleitmann, D. and Matter, A. (2001) : Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6kyr ago, *Nature*, 441, 290-293.
- [38] 大森一人・渡邊剛・白井厚太郎・菅浩伸 (2008) : 太平洋に生息する硬骨海綿の微細構造および微量元素変動. 月刊地球, 30, 322-328.
- [39] Oppo, D. W., Schmidt, G. A. and LeGrande, A. N. (2007) : Seawater isotope constraints on tropical hydrology during the Holocene. *Geophysical Research Letters*, 34, DOI:10.1029/2007GL030017.
- [40] Overpeck, J. T., Webb, R. S. and Webb, T. III. (1992) : Mapping eastern North American vegetation change of the past 18 ka : No-analogs and the future. *Geology*, 20, 1071-1074.
- [41] Richter, C., Wunsch, M., Rasheed, M., Koötter, I. and Badran, M. (2001) : Endoscopic exploration of Red Sea coral reefs reveals dense populations of cavity-dwelling sponges. *Nature* 413:726-731
- [42] Schöne, B.R., Oschmann, W., Tanabe, K., Dettman, D., Fiebig, J., Houk, S.D., Kanie, Y. (2004) : Holocene seasonal environmental trends at Tokyo Bay, Japan, reconstructed from bivalve mollusk shells-implications for changes in the east Asian monsoon and latitudinal shifts of the polar front. *Quaternary Science Reviews* 23, 1137-1150.
- [43] Selvaraj, K., Chen, C. T. A. and Lou, J. -Y. (2007) : Holocene East Asian monsoon variability : Links to solar and tropical Pacific forcing. *Geophysical Research Letters*, 34, L01703, DOI:10.1029/2006GL028155.
- [44] Sun, Y., Oppo, D. W., Xiang, R., Liu, W. and Gao, S. (2005) : Last deglaciation in the Okinawa Trough : Subtropical northwest Pacific link to Northern Hemisphere and tropical climate. *Paleoceanography*, 20, DOI:10.1029/2004PA001061.
- [45] Surge, D. and Walker, K. J. (2006) : Geochemical variation in microstructural shell layers of the southern quahog (*Mercenaria campechiensis*) : Implications for reconstructing seasonality. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 237, 182-190.
- [46] Tanabe, K. and Oba, T. (1988) : Latitudinal variation in shell growth patterns of *P. japonicum* (Bivalvia : Veneridae) from the Japanese coast. *Mar Ecol Prog Ser*, 47, 75-82.
- [47] Toscano, M. A. and Macintyre, I. G. (2003) : Corrected western Atlantic sea-level curve for the last 11,000 years based on calibrated ^{14}C dates from *Acropora palmata* framework and intertidal mangrove peat. *Coral Reefs*, 22, 257-270.
- [48] Ubukata, T., Kitamura, A., Hiramoto M., Kase, T. (2009) : A 5,000-year fossil record of larval shell morphology of submarine cave microshells. *Evolution*, 63, 295-300.
- [49] Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R. L., He, Y., Kong, X., An, Z., Wu, J., Kelly, M. J., Dykoski, C. A. and Li, X. (2005) : The Holocene Asian Monsoon : Links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 308, 854-857.
- [50] Watanabe, T., Suzuki, A., Kawahata, H., Kan, H., Ogawa, S. (2004) : A 60-year isotopic record from a mid-Holocene fossil giant clam (*Tridacna gigas*) in the Ryukyu Islands : physiological and paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 212, 343-354.
- [51] Xiang, R., Sun, Y., Li, T., Oppo, D. W., Chen, M. and Zheng, F. (2007) : Paleoenvironmental change in the middle Okinawa Trough since the last deglaciation : Evidence from the sedimentation rate and planktonic foraminiferal record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 243, 378-393.
- [52] Xiao, S., Li, A., Liu, J.P., Chen, M., Xie, Q., Jiang, F., Li, T., Xiang, R. and Chen, Z. (2006) : Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 237, 293-304.
- [53] Yamamoto, N., Kitamura, A., Irino, T., Kase, T. and Ohashi, S. (2008) : Reconstruction of paleotemperatures in Northwest Pacific over the past 3,000 years from $\delta^{18}\text{O}$ values of the micro-bivalvia *Carditella iejimensis* found in a submarine cave. *Global and Planetary Change*, 62, 97-106.
- [54] Yamamoto, N., Kitamura, A., Ohmori, A., Morishima, Y., Toyofuku, T. and Ohashi, S. (in press) : Long-term changes in sediment type and cavernicolous bivalve assemblages in Daidokutsu submarine cave, Okinawa Islands : evidence from a new core extending over the past 7,000 years. *Coral Reefs*. DOI 10.1007/s00338-009-0536-2
- [55] Yamamoto, N., Sakai, S., Kitamura, A. (in press) : Evaluation of the $\delta^{18}\text{O}$ value of the submarine cavernicolous micro-bivalve *Carditella iejimensis* as a proxy for palaeotemperature. *Paleontological Research*.
- [56] Yancheva, G., Nowaczyk, N. R., Mingram, J., Dulski, P., Schettler, G., Negendank, J. F. W., Liu, J., Sigman, D. M., Peterson, L. C. and Haug, G. H. (2007) : Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon. *Nature*, 445, 74-77.

