

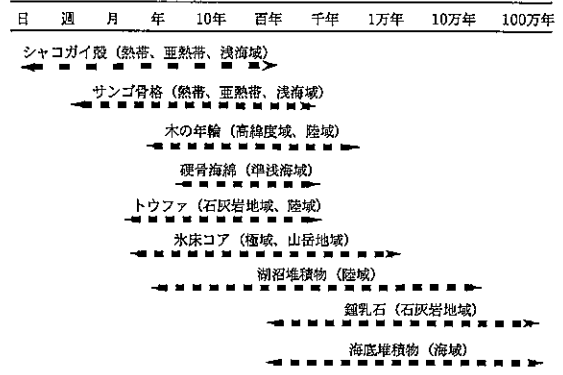
シャコガイが記録する日単位の環境変動

渡邊 剛¹⁾

1. はじめに

近年、地球規模の温暖化が騒がれているが、その温暖化に人類の活動がどの程度影響を与えているのかを見積もるためには、少なくとも産業革命以前からの気候変動を詳しく知る必要がある。しかし、現存する長期の気温記録や歴史文書などの有力な証拠は北半球のごく限られた地域でしか残っていない。それらを補うために、例えば、木の年輪や氷床コアといったいわゆる“高解像度”の環境指標を用いた古気候の復元が試みられてきた。第1図にこれまで古気候、古環境研究で使われてきた代表的な古気候指標と、それぞれの指標で復元可能な解像度と時間範囲を示した。これらの環境指標はそれぞれの試料の性格上、地理的な制約を受け、また、そこから復元できる解像度も異なる。ここでいう高時間解像度とは、我々が日常生活で体感することができるレベル、季節変化以上の解像度を持つ気候復元ができるという意味で使うことにする。

サンゴ礁に広く棲息するシャコガイは、二枚貝のなかで最大の殻を形成する。その殻は100年以上にも渡って年輪と日輪を形成しながら成長を続けるので、環境変動の記録を非常に高時間解像度で記録している。シャコガイを用いた古環境解析は他の指標では困難な超高解像度の解析が期待できると言える。シャコガイ殻を用いた古環境解析では、熱帯、亜熱帯の海洋表層の環境復元が期待できる。エルニーニョ現象に代表されるように、熱帯域の海洋環境は地球全体に与える影響は極めて大きい。熱帯域の海洋環境の過去における変動を知るには、少なくとも季節変動以上の解像度を持つ環境指標を用いる必要があるが、木の年輪は熱帯域では不明瞭であったり古くからの観測データが極



第1図 代表的な環境指標とその時間解像度。

端に少ないなどの理由から今までは過去に遡ってその季節変動を知ることが困難であった。1970年代に熱帯域のサンゴ礁に生息するサンゴの骨格にX線を照射することによって年輪が観測されることが発見され、サンゴ骨格を用いた熱帯域の海洋環境の可能性が出てきた。サンゴ骨格を用いた古環境研究は、特にここ10年間、上述のような社会的な要請と相まって急激に発展してきている。サンゴ骨格は群体として数百年間に渡って年間に1-2cmの速度で成長を続けるので、過去数百年間の海洋環境を高解像度で記録している。しかし、同時に、サンゴ骨格は複雑で空隙の多い微細構造をしているために、月単位以上の解像度での環境解析や化石を用いた研究の際には、特に注意が必要である。シャコガイの殻は日輪が観測されるなど非常に緻密な構造をしており、サンゴ骨格よりもさらに細かい環境解析に使うことが可能で、また、保存状態のよい化石試料も容易に手に入れることができる。ここでは、サンゴ骨格を用いた環境解析の場合と比較し、シャコガイの殻を用いた場合の利点や過去の研究例、これからの課題と展望を述べる。

1) 国立科学博物館/日本学術振興会特別研究員：
〒169-0073 東京都新宿区百人町3-23-1

キーワード：シャコガイ、酸素同位体比、日輪、環境変動、高解像度

2. シャコガイの生物学的特徴

シャコガイ科 (Tridacnidae) は、現生では2属8種が知られており、インド・太平洋のサンゴ礁に広く生息分布している。シャコガイの体内には造礁性サンゴと同様に共生藻類 (Zooxanthellae) が生息しており、そのため石灰化速度が速く殻の成長速度も1年間に1-2cmと速い。また、この共生藻類は光合成のために日射が必要なので、シャコガイはおよそ水深30m以浅に生息する。写真1Aはグレートバリアリーフの水深約10m付近に生息するオオジャコガイ (*Tridacna gigas*) と呼ばれるシャコガイ科の中で最も大きい殻をもつ種である。この種は殻長が1m以上、重さが200kg以上にもなり、自身の重みだけで、海底に固着している。シャコガイの化石は始新世 (Eocene) 以降の石灰岩等の層準から広く産出される。シャコガイの殻は内層、外層共にあられ石からなる緻密な構造をもち、特に厚さ方向に発達している内層は、海水や穿孔性の生物からの変質や浸食を受けることなく、化石においても保存状態は極めてよい。写真1Bは久米島の泊港で新たな水路をサンゴ礁内に作るときのドレッジによって発見されたオオジャコガイ (*Tridacna gigas*) の化石である。この種は日本の海域からは絶滅したとされおり、その原因は興味深い謎である。この個体は放射性炭素年代測定の結果約6,000年前のものであることがわかり、成長線の観測や同位体比の測定から日輪などの微細構造や化学組成が当時のまま保存されていることが明らかになった (Watanabe *et al.*, in prep. a)。

A



B

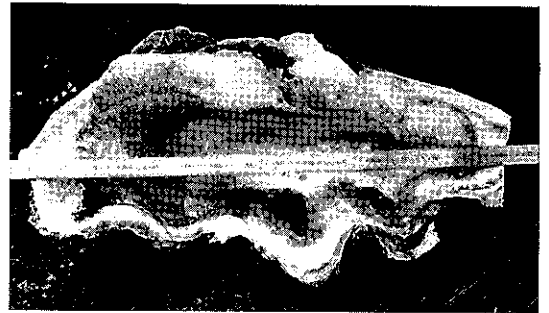


写真1 シャコガイ殻の写真、A；現生の中水中写真、オオジャコ (*Tridacna gigas*)、グレートバリアリーフ、B；化石の写真、オオジャコ (*Tridacna gigas*)、久米島産。

比や微量元素を年輪に垂直な測定ラインから一定間隔でサンプリングを行い、分析をするわけだが、サンゴ骨格では年輪以上の細かい成長線を観測することが困難なために季節変化以上の正確な時間を各測定値に与えることは難しい。例えば、酸素同位体比の極大値、極小値を水温の最高と最低時に形成されたものと仮定して形成時期を決め、それ以外の期間は成長速度が一定と仮定して形成時期を推定しなくてはならない。シャコガイ殻を用いる場合、日輪の幅を測定ライン沿いに測定、カウントしていくことによって、化学分析が行われた場所が採取された日から遡って何日目であるかを正確に知ることができる (渡邊・大場, 1998, Watanabe and Oba, 1999)。この点で、シャコガイは季節変化以上の環境変動を正確に復元できる有力な材料だといえる。

次に、シャコガイ殻のあられ石は酸素同位体比において現場海水とほぼ同位体平衡で形成される、

3. 環境指標として用いる場合の利点、注意点

シャコガイ殻を環境指標として用いる場合の最大の利点は、やはりシャコガイ殻の持つ成長速度の速さと緻密な構造を生かした超高解像度の古環境復元ができるという点であろう。シャコガイの成長輪は、大きく分けて年輪 (写真2A) と日輪 (写真2B) がある。どちらも殻を成長方向に垂直に切断した面を研磨することで、容易に観察することができる。年輪は研磨した面から肉眼で、日輪は光学顕微鏡や電子顕微鏡でそれぞれ観察することができる。通常、サンゴ骨格を用いた環境解析では、同位体

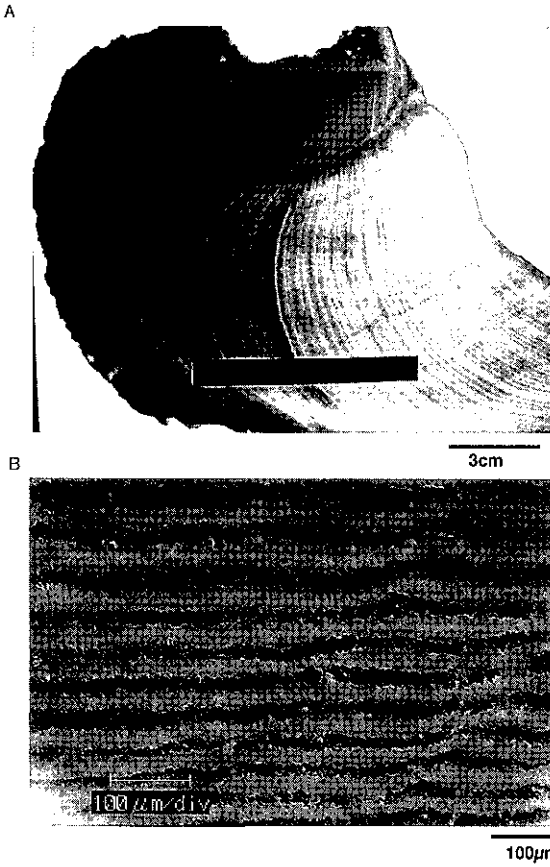
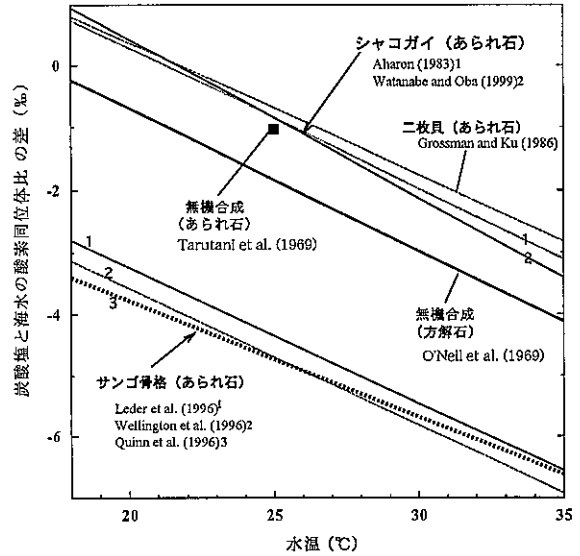


写真2 シャコガイ殻内層に観察される年輪(A)と日輪(B).

このことはシャコガイ殻の酸素同位体比を用いて古環境解析をする際の大きな利点と言えよう。一般に炭酸カルシウムが同位体平衡で沈積すれば、その炭酸カルシウムの酸素同位体比は、水温と水の酸素同位体比によって決定される (Epstein et al., 1953)。第2図にシャコガイ殻の酸素同位体比における温度スケールを示す。あられ石からなるシャコガイ殻の温度スケール (Aharon 1983, Watanabe and Oba, 1999) は他のあられ石の二枚貝の温度スケール (Grossman and Ku, 1986) とも類似したものであり、また25℃で無機合成されたあられ石の値にも近い。一方、同じくあられ石のサンゴ骨格の温度スケールでは、傾きはシャコガイ殻や無機合成された方解石の温度スケールに近いが、絶対値は大きく異なっている。これは一般に vital effect (生物作用) と呼ばれサンゴ骨格を用いた環境解析での大きな問題になっている。

シャコガイ殻を用いた古環境研究で注意しなく



第2図 シャコガイ殻の温度スケール。

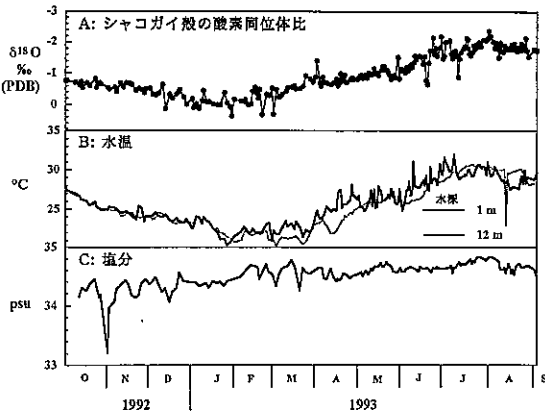
てはならない点もいくつかある。まず、オオジャコ (*Tridacna gigas*) などの極端に大きな種を用いない場合、発見時に死んでいる個体や化石の個体を用いる場合には現地性かどうかを確認する必要がある。また、シャコガイは成熟して配偶子を形成するようになると殻の成長速度が著しく遅くなる (Romanek et al., 1986, Watanabe et al., in prep, a)。Romanek et al. (1987) は成熟したシャコガイは体内のエネルギーを殻形成よりも配偶子形成の方により多く使うようになるために、酸素・炭素同位体比共に平衡からずれると述べている。Watanabe et al. (in prep, a) はこの Romanek et al. (1987) の成熟前後での同位体比の違いは、成熟後、成長速度が遅くなるが測定間隔と測定粉末量が変化らないために各測定点の持つ分解能が成熟前と後では異なるためであると説明し、成熟前後で同位体比の平均値は相違がないことを示した。しかし、いずれにしても、成熟前後での成長速度の著しい差は、サンプリング方法を変えるなどの工夫によって対処する必要がある。

4. これまでのシャコガイ殻を用いた古環境研究

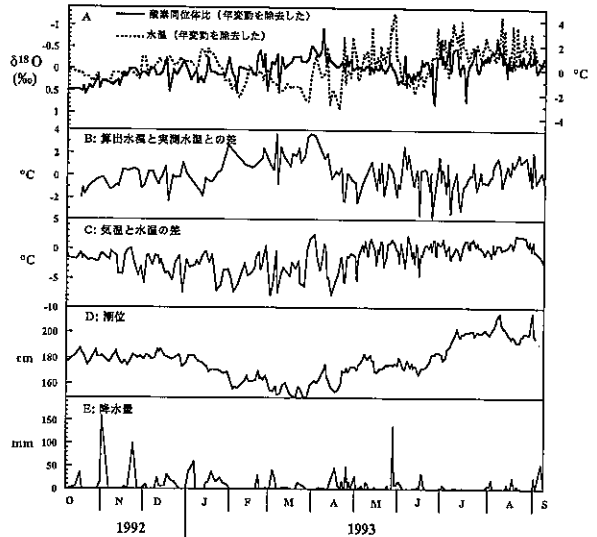
シャコガイを使った研究は1980年代から行われてきたが、その数は同様のサンゴ骨格を用いた研究に較べてはるかに少ない。第1表にこれまでのシャ

第1表 これまでのシャコガイを用いた古環境研究.

引用文献	種	海域	年代	測定間隔
Aharon et al.,1980, Aharon, 1983	<i>Tridacna gigas</i>	バブアニューギニア	14万年前～現在	1年
Aharon and Chappell,1986	<i>Tridacna gigas</i>	バブアニューギニア	14万年前～現在	数ヶ月
Romanek et al.,1986, Jones et al.,1986	<i>Tridacna maxima</i>	南西太平洋 (Rose環礁)	現在	月
Aharon,1991	<i>Tridacna gigas</i>	グレートバリアリーフ	現在	数ヶ月
Romanek and Grossman, 1989	<i>Tridacna maxima</i>	南西太平洋 (Rose環礁)	現在	数ヶ月
Patzold, 1991	<i>Tridacna gigas</i>	バラオ	現在	月
Watanabe and Obe, 1999	<i>Hippopus hippopus</i>	石垣島	現在	日
Watanabe et al., in prep.	<i>Tridacna gigas</i> , <i>Tridacna maxima</i>	久米島	6000年前	月
Watanabe et al., in prep.	<i>Tridacna gigas</i> .	バブアニューギニア	14万年前～現在	週～月



第3図 石垣島産現生シャコガイ殻の酸素同位体比, Watanabe and Oba (1999)より引用.



第4図 日レベルのシャコガイ殻の酸素同位体比の変動要因, Watanabe and Oba (1999)より引用.

コガイを用いた古環境解析の研究例をまとめた。1980年代はAharonやChappellなどによる隆起サンゴ礁の化石のシャコガイの酸素同位体比から氷床量の変化に伴う海水準変動を推定するという研究が主で、測定技術の問題もあり高解像度の古環境研究はあまり行われてこなかった。1990年代に入ると測定技術の向上やサンプリング技術の開発により、シャコガイ殻の特性を生かした高解像度の測定がなされるようになり、主に現生のシャコガイを用いたキャリブレーション研究が行われきた。ここでは、筆者らによる石垣島産の現生シャコガイ殻を用いた古環境研究の一例を紹介する。

Watanabe and Oba (1999)は、石垣島産の現生シャコガイ殻を冷凍マイクローム法(渡邊, 大場, 1998)による回収率の高いマイクロサンプリング方法を用いることによって、50 μ m間隔で酸素同位体

比を測定することに成功した。これはこのシャコガイ殻の成長速度を考慮すると1～2日間の測定間隔であるということができる。前章で述べたように、成長線間隔を同位体比測線に沿ってカウントすることによって、各同位体比の測定結果には、各々正確な形成日時を与えることができ、現場の水温との一対一の対応が可能となった。第3図はこうにして得られたシャコガイ殻の酸素同位体比と現場水温及び塩分(現場から約8km地点)との対比である。殻の酸素同位体比は主に水温の変動によって決定されており、塩分から算出される海水の酸素同位体比の値を考慮して第2図の水温スケールが求められた。殻の酸素同位体比の変動は細かい水温変動も記録しているようにも見る事ができるが、例えば、1992年11月の大幅な塩分低下の影響を反映していない。さらに細かい変動の要因を考

察するために、酸素同位体比の変動から年変動を差し引いたものを第4図に示す。1993年2月から1993年の3月は潮位が低く(第4D図)、この間、シャコガイ殻の酸素同位体比から算出された水温と実測の水温との差が大きい(第4B図)。また、この間は気温と水温の差の変動に似た変動を示している(第4B図)。これは、このシャコガイが採取された川平サンゴ礁の地形で説明される。つまり、潮位が低い時期、このサンゴ礁は外洋とサンゴ礁の境界付近に発達する礁嶺によって、外洋からの海水が流入にくく準閉鎖系になる。そのため、この時期は約8km離れた水温観測点の水温と合わずに、むしろ気温の影響を受けている。逆に、潮位が高い時期は、外洋の海水は自由にサンゴ礁内の出入りすることができるために、1992年11月の大雨の塩分低下の影響も外洋水と混ざり、礁外に速やかに排出されるために殻の酸素同位体比には反映されないと考えられる。このように、サンゴ礁のように特殊な地形で生息する生物を環境指標に用いる場合、現場の地形がローカルな環境因子に与える影響についても考慮に入れる必要があることを示唆している。

5. シャコガイ殻を用いた古環境研究の今後の課題と展望

5.1 化石への応用

近年、サンゴ骨格を用いた環境解析では、化石を用いた解析が盛んになってきている。化石のサンゴを放射性炭素やウラン系列などの年代測定法を用いることによって、現在からは直接遡れない時代においても、ある特定の時代の季節変動や数十年の気候の変動を解明することができる。シャコガイ殻は極めて緻密な構造をしており、多くの場合化石の保存状態が極めてよい。これはサンゴ骨格が複雑で空隙の多い微細構造をしているために変質を受けやすいのに比べても有利な点である。著者は現在、約6,000年前の久米島産のシャコガイ(Watanabe *et al.*, in prep.a)、約4年前のパプアニューギニア産のシャコガイ(Watanabe *et al.*, in prep.b)を用いた高解像度の古環境解析を試みて、それぞれ興味深い過去の環境変動を季節変化レベルで復元することができた。

5.2 微量元素、同位体比の組み合わせ

サンゴ骨格中の酸素同位体比と微量元素の組み合わせから、水温と降水量や塩分をそれぞれ算出するという試みが、近年行われている(Gagan *et al.*, 1998, Watanabe *et al.*, 2001)。その原理は、炭酸塩の酸素同位体比は水温と海水の同位体比を反映し、一方、炭酸塩のSr/Ca比やMg/Ca比などの微量元素は基本的には水温のみを記録していることに基づいている。また、海水の酸素同位体比は降水や蒸発、淡水の流入などの影響を受けるので、海水の塩分と非常に相関がよいので、これらの関係式の連立方程式を解けば、水温と塩分を分離して定量化できるというものである。シャコガイはサンゴ骨格と同様にあられ石からなるので、この原理をシャコガイに応用すれば、サンゴ骨格の場合と同様に水温、塩分の定量化は可能であろう。さらに、シャコガイの場合、周囲の海水と同位体平衡で殻を沈着させるので、塩分の推定精度を向上させることが期待される。

5.3 サンゴ骨格、硬骨海綿との組み合わせ

シャコガイは日レベルの超高解像度の古環境復元には最適である。しかし、同時に100年を越す長寿の個体を探すのはサンゴ骨格に較べると容易ではない。最近、サンゴ礁地域に生息する硬骨海綿を用いた古環境解析が注目を集めている。硬骨海綿(Sclerosponge)は、海綿動物門に属する生物で、サンゴ礁の海域に生息し、イシサンゴとよく似た炭酸塩の骨格を形成する。硬骨海綿は、1970年代にはその特異な形態から、硬骨海綿綱として独立した分類群とされていたが、その後、系統的に異なるものが混在した、所謂、他系統であることがわかり、現在では種毎に普通海綿綱(Demosponge)と石灰海綿綱(Calcarea)とに分類されている。硬骨海綿はイシサンゴやシャコガイと異なり、共生藻類を含まず、光の少ないか全く届かないサンゴ礁の洞窟内やサンゴが生息できない準浅海域(水深300m付近まで)に生息している。骨格の成長速度は1年に0.1mmから1mmと非常に遅く、数百年間に渡って成長を続ける。サンゴ礁域に生息するシャコガイ、サンゴ骨格、硬骨海綿など、それぞれ時間解像度や生息環境が異なる生物試料を組み合わせるによって、互いの利点を生かした環

境解析が可能になるであろう。

6. まとめ

1. シャコガイ殻には日輪が存在し、超高解像度での古環境復元が期待できる。
2. シャコガイ殻は同位体平衡で殻が形成される。
3. シャコガイ殻は非常に緻密な構造をしているために、化石でも保存がよい。
4. 今後、化石個体への応用やサンゴ骨格、硬骨海綿など、解像度の異なった生物指標との組み合わせによって、お互いの長所を生かした古環境研究が可能である。

謝辞：本稿の公表の機会を与えて下さった川幡穂高博士に感謝いたします。また、著者とのシャコガイを用いた古環境研究の共同研究に携わっていただいた方々に感謝の意を表します。また、本稿に対する有益なコメントを頂いた査読者の鈴木 淳博士に感謝いたします。

文 献

Aharon P. (1983) : 140,000-yr isotope climatic record from raised coral reefs in New Guinea. *Nature*, 304, 720-723.

Aharon P. (1991) : Recorders of reef environment histories: stable isotopes in corals, giant clams, and calcareous algae. *Coral Reefs*, 10, 71-90.

Aharon P. and Chappell J. (1986) Oxygen isotopes, sea level changes and temperature history of a coral reef environment in New Guinea over the last 105 Years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 56, 337-379.

Aharon P., Chappell J. and Compston W. (1980) : Stable isotope and sea-level data from New Guinea supports Antarctic ice-surge theory of ice ages. *Nature*, 283, 649-651.

Epstein S., Buchsbaum, Lowenstam, H.A. and Urey, H. C. (1953) : Revised carbon-water isotopic temperature scale. *Bull. Geo. Soc. Am.*, 64, 1315-1356.

Gagan M. K., Ayliffe L.K., Hopley D., Cali J.A., Mortimer G.E., Chappell J., McCulloch M.T. and Head M.J. (1998) : Temperature and surface-ocean water balance of the mid-Holocene tropical Western Pacific. *Science*, 279, 1014-1018.

Gagan M. K., Ayliffe L. K., Beck J. W., Cole J. E., Druffel E. R. M., Dunbar R. B. and Schrag D. P. (2000) : New views of tropical paleoclimates from corals. *Quaternary Science reviews*, 19, 45-64.

Grossman E. L. and Ku T.-L. (1986) : Oxygen and Carbon isotope Fractionation in Biogenic Aragonite: Temperature Effects. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 59, 59-74.

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.

Leder J. J., Swart P.K., Szmart A.M. and Dodge R.E. (1996) : The origin of variations in the isotopic record of scleractinian corals: I. Oxygen. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60, 2857-2870.

O'Neil J.R., Clayton, R.N. and Mayeda T.K. (1969) : Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates, *J. Chem. Phys.*, 51, 5547-5558.

Pätzold J., Heinrichs J. P., Wolschendorf K. and Wefer G. (1991) : Correlation of stable oxygen isotope temperature record with light attenuation profiles in reef-dwelling *Tridacna* shells. *Coral Reefs*, 10, 65-69.

Quinn T. M., Taylor F. W., Crowley T. J. and Link S. M. (1996) : Evaluation of sampling resolution in coral stable isotope records: A case study using records from New Caledonia and Tarawa. *Paleoceanography*, 11, 529-542.

Romanek C.S. and Grossman E.L. (1989) : Stable isotope profiles of *Tridacna maxima* as environmental indicators. *Palaios*, 4, 402-413.

Romanek C. S., Jones D. S., Williams D. F., Krantz D. E. and Radtke R. (1987) : Stable isotopic investigation of physiological and environmental changes recorded in shell carbonate from the giant clam *Tridacna maxima*. *Marine Biology*, 94, 385-393.

Tarutani T., Clayton R.N. and Mayeda T.K. (1969) : The effects of polymorphism and magnesium substitution on oxygen isotope fraction between calcium carbonate and water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33, 987-996.

渡邊 剛・大場忠道 (1998) : 冷凍マイクローム法による現生シャコガイ殻の酸素同位体比より推定される詳細な水温変化。 *地球化学*, 32, 87-98.

Watanabe, T. and Oba, T. (1999) : Daily reconstruction of water temperature from oxygen isotopic ratios of a modern *Tridacna* shell with freezing microtome sampling technique. *Journal of Geophysical Research*, 104, 20667-20674.

Watanabe, T., Chappell, J. and Gagan, M.K. (2002) : High resolution isotopic records of *Tridacna* shell from a late Quaternary coral reef of the Huon Peninsula, New Guinea. (in prep. b).

Watanabe T., Winter A. and Oba T. (2001) : Seasonal changes in sea surface temperature and salinity during the Little Ice Age in the Caribbean Sea deduced from Mg/Ca and 18O/16O ratios in corals. *Marine Geology*, 173, 21-35.

Watanabe, T., Suzuki, A., Kawahata, H., Kan, H. and Ogawa, S. (2002) : A 60-year isotopic record of a mid-Holocene fossil giant clam (*Tridacna gigas*) in the Ryukyu Islands: Physiological and paleoclimatological implications at their geological latitudinal limit. (in prep. a).

Wellington G.M., Dunbar R.B. and Merlen G. (1996) : Calibration of stable oxygen isotope signatures in Galapagos corals. *Paleoceanography*, 11, 467-480.

WATANABE Tsuyoshi (2002) : Daily environmental changes recorded in giant clams.

<受付：2002年5月21日>