

サンゴ骨格分析による過去の気候変遷の復元

— 生体鉱物を用いた地球化学的手法による地球環境研究 —

鈴木 淳

大気中の二酸化炭素増加による地球温暖化が注目されている。産業革命以降の温暖化傾向や過去の温暖化事象を精密に復元することにより、地球温暖化予測モデルの高度化に寄与できる。海域では、サンゴ骨格の化学分析から過去数百年にわたる水温や降水量、塩分を高い時間分解能で復元する技術が注目を集めている。また、18世紀頃の小氷期¹⁾や約2万年前の冷涼な最終氷期、あるいは350万年前の鮮新世²⁾温暖期といわれる時代のサンゴ化石から、さまざまな指標を複合的に評価し、当時の気候を正確に復元することも重要な課題である。サンゴ骨格を用いた研究手法は、異常高水温によるサンゴ白化現象や、海洋酸性化現象の解明にも貢献することができる。

キーワード: サンゴ、気候、地球温暖化、海洋、酸素同位体比

Paleoclimate reconstruction and future forecast based on coral skeletal climatology

– Understanding the oceanic history through precise chemical and isotope analyses of coral annual bands –

Atsushi Suzuki

Global warming (due to increased carbon dioxide in the atmosphere) has attracted much attention. Yet, predicting trends in the Earth's climate remains difficult. A more sophisticated and accurate Global Warming model can be obtained by reconstructing climatic change since the Industrial Revolution, and other past periods of warming. To this end, a promising area of research in marine science is coral skeletal climatology, which offers a unique method for accurately reconstructing marine temperature and saline concentration over the past several hundred years, with a high temporal resolution (ca. 2 weeks) based on chemical and isotope analysis of long-lived coral skeletons. This method has been successfully applied to the Little Ice Age around the 18th century and the mid-Pliocene warming period of 3.5 million years ago. It can also be applied to biological and environment studies on massive coral bleaching events caused by unusually high oceanic temperature levels and other environmental issues such as ocean acidification.

Keywords: coral, climate, global warming, ocean, oxygen isotope ratio

1 はじめに

地球規模での気候変動を理解するためには、長期間にわたる高解像度の海域・陸域の観測記録が不可欠であるが、1950年以前になると測器による海洋観測の記録は少ない。そこで、大型の造礁サンゴ群体を採取してその骨格にみられる年輪を用いた過去数百年にわたる水温や降水量、塩分の復元が注目されている(図1、2)。サンゴ骨格における年輪の発見は1933年にさかのぼるが、その利点が注目され活発な研究対象となったのはおおむね1995年以降であり、「サンゴ骨格気候学」として大きく発展したのは極めて最近である(図3)。この小論では、サンゴ骨格が過去の地球の気候変動の記録媒体として大変優れており、それから過去の記録を読み出す試みが、最先端の分析技術を駆使して大きく発展していることを示す。

2007年に発表された気候変動に関する政府間パネル

(IPCC)の第4次評価報告書の第一部会の第7章は、「Paleoclimate (古気候)」という題名のもと、数年から数

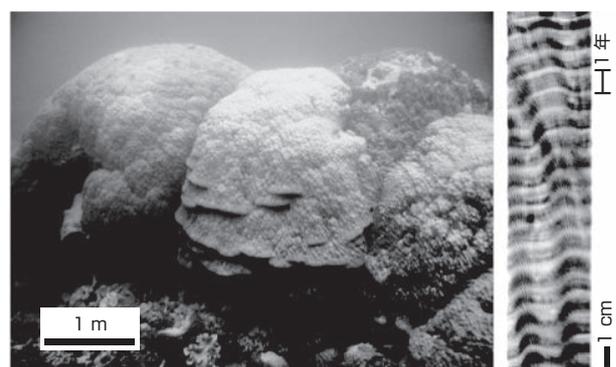


図1 琉球列島石垣島のサンゴ礁でみられるハマサンゴ属の塊状群(左)と柱状試料のエックス線ポジ写真(右) エックス線写真では、濃色のバンドが高密度部に、淡色のバンドが低密度部に対応し、一組でおおよそ1年間の年輪に対応する。

産業技術総合研究所 地質情報研究部門 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第7

Institute of Geology and Geoinformation, AIST Tsukuba Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan E-mail: a.suzuki@aist.go.jp

Original manuscript received September 15, 2011, Revisions received April 9, 2012, Accepted April 26, 2012

十万年のスケールでの気候変動にかかわる研究のレビューが行われた^[1]。この中で、熱帯・亜熱帯域のサンゴ試料の酸素同位体比などの間接指標を用いた高時間解像度（約2週間）の海洋環境復元の研究成果が数多く引用されている。低緯度海域の多くの箇所から現生の大型サンゴにより最近200年間の海水温がそれ以前に比べて明瞭に高い状態にあることを示したことは、サンゴ骨格気候学の成果の代表例とされている。図2に古気候復元に用いられるさまざまな研究対象とサンゴ骨格研究の位置付けを示した^{[1][2]}。

また、小氷期^{用語1}や中世の温暖期、完新世^{用語2}あるいは350万年前の鮮新世^{用語3}温暖期といわれる時代のサンゴ化石から、当時の気候を復元することも重要な課題である。サンゴ骨格を用いた研究手法は、異常高水温によるサンゴ白化現象や、海洋酸性化現象の解明にも貢献できる。

この論文では、現生および化石サンゴの骨格を対象として、過去の気候変遷の復元を目指す研究について、近年のブレイクスルーをテーマとし、さまざまな指標を複合的に評価して進展している最新の研究例を解説しつつ、地球環境の将来の予測精度を向上するための方法論を論じる。

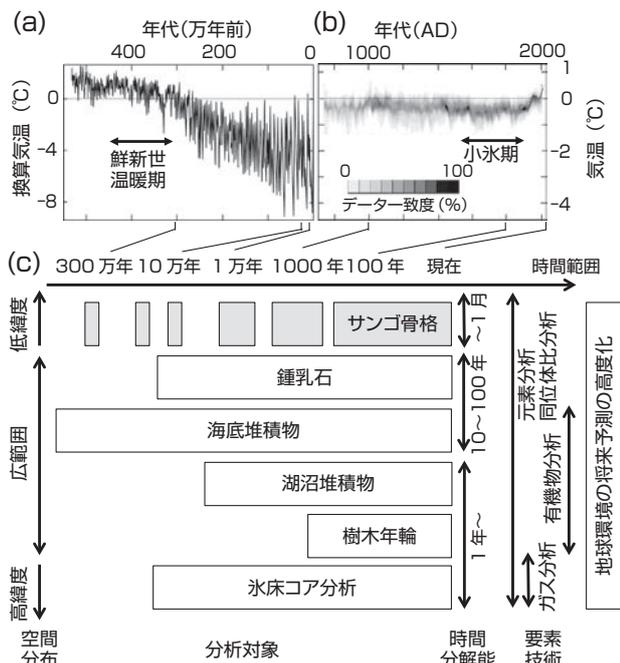


図2 古気候復元に用いられる研究対象とサンゴ骨格研究の位置付け
 (a) 過去550万年間の気温の変化についての推定例^[2]。深海底堆積物の柱状試料から得られた底生有孔虫の炭酸塩殻の酸素同位体比が、全球の氷床量のような指標となることから、過去の気温を推定したもので、南極域について現在との気温差を推定したもので、緯度や地域により気温差の絶対値については大きく異なる。(b) 過去1200年間の気温の変遷（文献^[3]のFigure 6.10.cより）。1961-1990年の平均値に対する偏差が示され、多数の研究の一致度が濃淡で示されている。(c) サンゴ骨格およびその他の古気候復元に用いられる研究対象の産出範囲と分析手法、時間分解能を模式的に示した。

2 サンゴ骨格の化学組成から過去の水温と塩分を知る

熱帯から亜熱帯の浅海域に広く分布するハマサンゴ (*Porites*) 属等の塊状群体には、炭酸カルシウムを主成分とする骨格を1年間に厚さ1~2 cm ずつ分泌しながら、過去数百年にわたり成長を続けるものがある(図1)。骨格は密度の高い部分と低い部分が交互に重なり、通常これで1年の年輪を形成している。群体表面が生きているサンゴから柱状試料を採取すれば、年輪を数えることにより、骨格の形成年代を正確に知ることができる。骨格の成長軸に沿って0.2~0.4 mm 間隔で微小試料を切削して分析することにより月単位あるいはそれよりも高い分解能で古気候を復元できる。

サンゴ骨格の化学組成の中でも、酸素同位体比は研究例が多い。通常、酸素同位体比は、試料中の同位体比(¹⁸O/¹⁶O)について標準試料に対する千分偏差を求めて、 $\delta^{18}\text{O}$ と表記する。炭酸カルシウムに含まれる酸素の同位体比、および海水の水に含まれる酸素の同位体比は、それぞれ添え字 c および w を付けて、 $\delta^{18}\text{O}_c$ 、 $\delta^{18}\text{O}_w$ と表す。炭酸カルシウムの酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}_c$)は、析出したときの水温と海水の酸素同位体比(塩分に相関)に依存する(図4)。骨格の酸素同位体比から水温の推定のためには、その群体上部の酸素同位体比と水温観測記録を比較して得られる関係式を用いることが望ましい。また、骨格成長速度が化学組成に与える影響を避けるために、成長速度が5 mm y⁻¹以上の群体の最大成長軸に沿った分析を行う。年間を通じて塩分の変化が小さい海域では、サンゴの酸素同位体比は水温のよい指標となる。例えば、琉球列島石垣島のサンゴの酸素同位体比は水温とよく対応している^[3]。

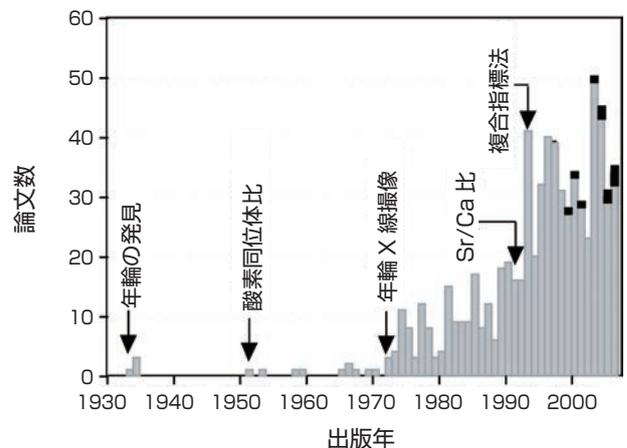


図3 造礁サンゴ年輪に関する論文数の変遷
 オーストラリア海洋科学研究所のホームページに掲載されているAUSCORE, Coral banding bibliographyの論文数より(<http://www.aims.gov.au/pages/auscore/auscore-08.html>)。産総研が関与した論文を黒のシンボルで示した。

サンゴ骨格については、酸素同位体比の他にも有用な間接指標がいくつも見いだされている。サンゴ骨格のストロンチウム/カルシウム比(Sr/Ca 比)やウラン/カルシウム比(U/Ca 比)は水温のみに依存して変化する。

サンゴ骨格の酸素同位体比は水温と塩分(正確には海水の酸素同位体組成)の双方に依存し、Sr/Ca 比は水温のみに依存する。したがって、骨格の Sr/Ca 比から水温を推定し、骨格の酸素同位体比の変動から水温による変化分を差し引けば、その残差として海水の酸素同位体比組成の変化あるいは塩分の変化を知ることができる^[4]。これがサンゴ骨格の酸素同位体比・Sr/Ca 比複合指標法である(図5)。Sr/Ca 比の代わりに、U/Ca 比を使うこともできる。

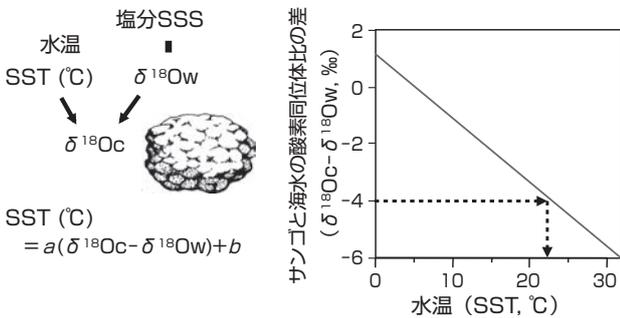


図4 サンゴ骨格の酸素同位体比 ($\delta^{18}O_c$) と水温(表層水温, sea surface temperature, SST)
 酸素同位体比は、試料中の同位体比 ($^{18}O/^{16}O$) について標準試料に対する千分偏差を求めて $\delta^{18}O$ と表記し、炭酸カルシウムの酸素同位体比については、添え字 c を付けて表す。サンゴ群体表面部の酸素同位体比と水温観測記録を比較して関係式を求めれば、過去の骨格の酸素同位体比から当時の水温が推定できる。厳密には海水の酸素同位体比 ($\delta^{18}O_w$) が影響するが、塩分(表層塩分, sea surface salinity, SSS) の変化が少ない海域では無視することもできる。なお、塩分^[4]は海洋学の取り決めにより無単位で表記される。

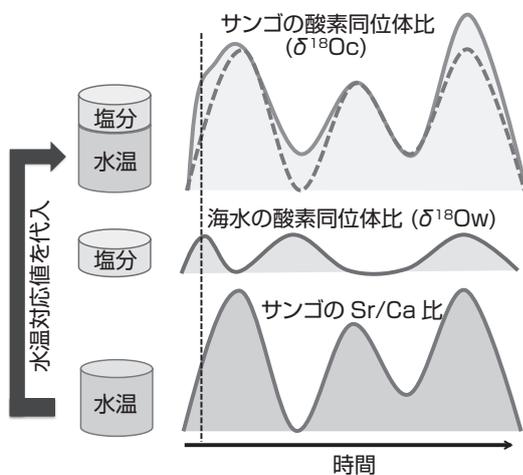


図5 サンゴ骨格の酸素同位体比・Sr/Ca 比複合指標法の概念図
 水温と塩分の季節変化を復元する場合について示した。

3 サンゴ骨格から復元された石垣島と小笠原・父島の近過去の気候変動

日本周辺の北西太平洋域における長尺サンゴ研究は、海外と比較してまだまだ立ち遅れている。我々の研究グループでは、琉球列島の石垣島(24° N, 124° E)と小笠原諸島の父島(27° N, 135° E)についてそれぞれ100年を越える長尺ハマサンゴ柱状試料の化学分析を行い、解析を進めている(図6)。

太平洋ではレジームシフトと呼ばれる気候状態の急変が起きることが知られており^[5]、南半球では1988/1989年のイベントが顕著である^[3]。このレジームシフト以前では、石垣島サンゴ礁浅部の冬の水温は、シベリア高気圧の吹き出しに敏感で、季節風の強さを表すモンスーン指数(イルクーツクと根室の気圧差)とよい相関がみられた。また、石垣島のサンゴ骨格の冬の酸素同位体比は専ら水温に規定されていて、酸素同位体比から復元された冬季最低水温も1971~1987年にかけて冬の季節風の強さを表すモンスーン指数とよい相関を示した。これに対し、レジームシフト以後の石垣島の水温は、モンスーン指数との相関が低下した。そして、モンスーン指数よりも南方変動指数(SOI)との対応がみられるようになってきた。亜熱帯域に区別されていた石垣島の熱帯化ともいべき現象であり、興味深い。また、このサンゴ試料の1900年近傍には低水温期の存在が認められた^[6]。1902年1月は冬のシベリア高気圧の勢力が強かった冬として記録されており、旧日本陸軍の八甲田山雪中行軍遭難事件が起こった。

一方、小笠原サンゴ記録を用いた約130年間にわたる水温と塩分の復元は、北西太平洋域における複合指標法の最初の本格的な適用例である^[7]。また、このサンゴ試料に

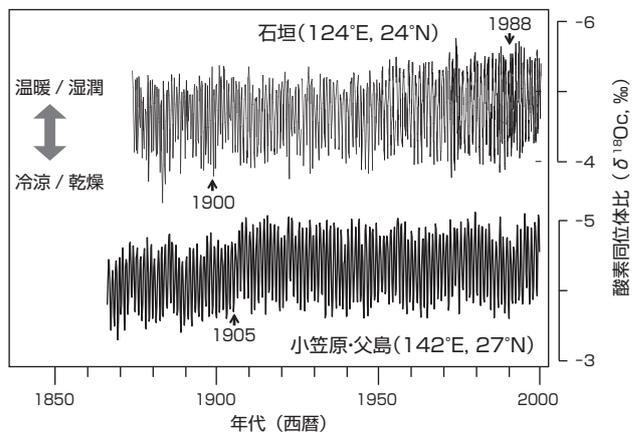


図6 琉球列島石垣島と小笠原諸島父島から採取されたサンゴ骨格の酸素同位体比記録^{[6][7]}
 1~2ヶ月の時間分解能をもち、水温等の季節変動が復元できる。この論文で論じる石垣島サンゴの1900年頃の低水温期、1988/89年のレジームシフト、そして父島サンゴの1905年頃の塩分シフトについては、矢印を付した。

つについては、Sr/Ca 比同様に水温の良好な指標とされる U/Ca 比も分析された（図 7）。酸素同位体比と Sr/Ca 比あるいは U/Ca 比の 2 通りの組み合わせによる水温と塩分の復元結果がよく一致したことは、このサンゴ記録の信頼性が高いことを示唆する（図 8）。復元された水温については、太平洋数十年変動との対応がみられた^[8]。より興味深いのは、1905-1910 年頃に塩分に急激な低下傾向が認められたことである。推定される塩分^[用註 4]の変化はおおよそ 1 であり、大きさの妥当性については問題が残るが、約 130 年間のサンゴ記録の中で最も顕著な変化である。この期間の骨格に続成変質等の兆候は認められなかった。小笠原における 20 世紀初頭の塩分低下の原因としては、当時の偏西風の減衰による小笠原高気圧の弱体化に伴う蒸発量の減少等が想定され、石垣島のサンゴ記録にみられた低温イベントとの関係も興味深い。

4 鮮新世温暖期の化石サンゴによるエルニーニョ現象の復元

太平洋赤道域で数年ごとに発生するエルニーニョ現象は、現在の気候システムにおいて重要な役割を果たしている。今後、地球温暖化が進行すると、このエルニーニョやエルニーニョ・南方振動 (ENSO: El Niño / Southern Oscillation) 現象はどのように変化していくのだろうか？ IPCC 第 4 次評価報告書では、強力なエルニーニョ現象の頻発化を予測しているが^[9]、異論も多い。この問題に関してサンゴ骨格を用いた検討も精力的に行われてきた^[1]。産業革命以前を含む約 500 年間のサンゴ記録の解析によると、エルニーニョの強度は平均水温と相関し、高水温ほどエルニーニョが活発であった。これは、ENSO 変動が地球の平均的な気候状態に影響されることを示し、今後の温

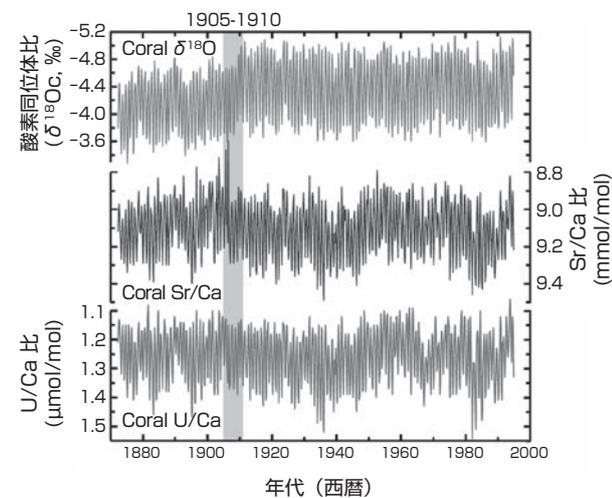


図 7 小笠原諸島の父島のサンゴの酸素同位体比および Sr/Ca 比、U/Ca 比の 130 年間の変動^[7]
酸素同位体比の急激な増加がみられる 1905-1910 年にハッチを施した。

暖化に伴い ENSO 変動が変調する可能性を示唆するものである。また、完新世^[用註 2]中期（約 6000 年前頃）や過去 12 万年間にいくつかみられる温暖期について、当時の水温と ENSO 変動の強度に相関が認められている。これらはみな、ENSO 変動が地球の平均的な気候状態に影響されるとする仮説と整合的である。

約 460 万年前～約 300 万年前の鮮新世温暖期は、将来訪れる温暖化地球の気候条件に最も類似した過去の温暖期であると言われている（図 2a）。各種の恐竜が生息していた約 1 億年前の中生代^[用註 5]のジュラ紀や白亜紀も温暖な時代であるが、当時の大陸配置は現在とは大きく異なっていて、現在の気候と単純に比較することはできない。そして、鮮新世温暖期については、現在のエルニーニョ現象を引き起こす太平洋の東西の水温勾配がなくなり、全域の水温が高い「永続的エルニーニョ状態」になって、数年ごとのエルニーニョ現象は発生しなくなるという仮説が提唱されている。一方、当時も現在のようなエルニーニョ現象は存在し、むしろ太平洋の東西の水温勾配が大きくなって、エルニーニョ現象はより強く、より頻発していたのではないかとする仮説もある。この二つの説は、どちらも時間分解能が数千年～数万年程度である深海底堆積物の柱状試料の解析に基づいたもので、数年間隔で起こるエルニーニョ現象を直接捉えることは困難であった。

著者らの研究グループでは、フィリピン・ルソン島でこの温暖期に相当する地層から保存状態のよい化石サンゴを発見し、その分析からエルニーニョ現象の直接的な証拠としては最古となる水温の変動記録を得ることに成功した^[10]。

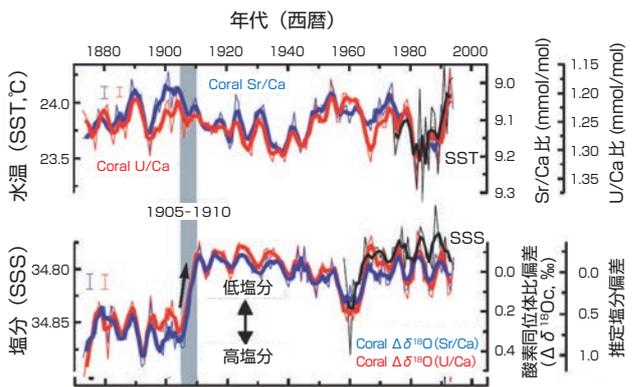


図 8 小笠原諸島父島サンゴから復元された水温 (sea surface temperature, SST) と塩分 (sea surface salinity, SSS) の変動^[7]
塩分については、サンゴ骨格から複合指標法で求められた酸素同位体比の塩分変化寄与分を、北西太平洋海域における海水の酸素同位体比と塩分の関係（塩分 1.0 増加あたり酸素同位体比 0.42 ‰増加）を用いて、塩分に換算したもので、近年の値からの偏差を推定塩分偏差と標記した（右軸）。酸素同位体比と Sr/Ca 比（青線）および U/Ca 比（赤線）の 2 通りの組み合わせによる結果が示されている。観測水温および塩分を併せて示した（黒線）。急激な塩分低下がみられる 1905-1910 年にハッチを施した。

サンゴはアラレ石の骨格を分泌するが、時間の経過とともに地表の温度・圧力条件ではより安定な方解石に変化してしまう。通常、10万年を越えると未変質のサンゴ化石の産出は極めて稀である。しかし、この地層ではサンゴ化石を不透水層である泥岩が取り囲んでおり、初生的なアラレ石骨格の保存に効果的であったと思われる。採取された二つの群体のサンゴ化石について酸素同位体比組成(水温と塩分の指標)を分析し、計70年分の大気と海洋環境の季節変動および経年変動パターンを抽出した(図9a)。

フィリピン周辺の海域は、水温と塩分の変動がエルニーニョ現象の影響を強く受けている場所であり、現生サンゴの酸素同位体比の変動パターンは、現在のエルニーニョ現象の変動パターンをよく記録していることがわかっている。現生サンゴを化石サンゴと同じ手法で解析した結果と比較したところ、鮮新世温暖期には現在とおおよそ同じ周期でエルニーニョ現象が起こっていたことが明らかになった(図9b)。

この結果は、これまで比較的有力であった温暖化地球ではエルニーニョ現象は起こらないとする永続的エルニーニョ説の可能性を否定するものである。また、将来の温暖化した地球においてもエルニーニョ現象が存在することを

強く示唆する。今回の結果は、将来の温暖化におけるエルニーニョ現象の予測とその影響を予測するための新たなヒントになるであろう。

5 異常高水温によるサンゴ白化現象とサンゴ礁生物多様性の減少

1998年初頭、南半球のオーストラリア・グレートバリアリーフで発生したサンゴの白化現象は、季節の推移とともに北半球に移行し、1998年の8月には琉球列島周辺のサンゴ礁においても、かつて例をみない大規模なサンゴの白化現象が発生した^[11]。サンゴ白化現象に関しては、サンゴと共生藻の関係について生物学的・生化学的な研究が盛んに行われてきたが、ここではサンゴの骨格に注目する。サンゴが白化したとき、骨格にはどのような記録が残るのだろうか？

石垣島東岸の安良崎沖のサンゴ礁には、3つのハマサンゴ群体が融合した群体があり、1998年の大規模白化イベントに際し、一つの群体は白化を呈し、隣接する二つの群体は白化を起こさなかったことが確認されている^[12]。骨格の成長軸に沿って高分解能で分析した酸素同位体比プロファイルに白化時期に対応するジャンプが認められ、白化直後から数カ月間、サンゴの骨格成長が停止したことによるものと解釈された^[13]。なお、大規模白化イベントから4年経過した2002年9月にこれらの群体から再び柱状試料が採取され、エックス線画像の観察が行われた。1998年部分の骨格だけ成長速度が顕著に低下した様子が確認できる(図10)。地球温暖化が進行し、高水温現象が頻発化すると、サンゴの骨格成長は阻害され、生育には不適切な環境になることが懸念される。一方で、高水温状態が

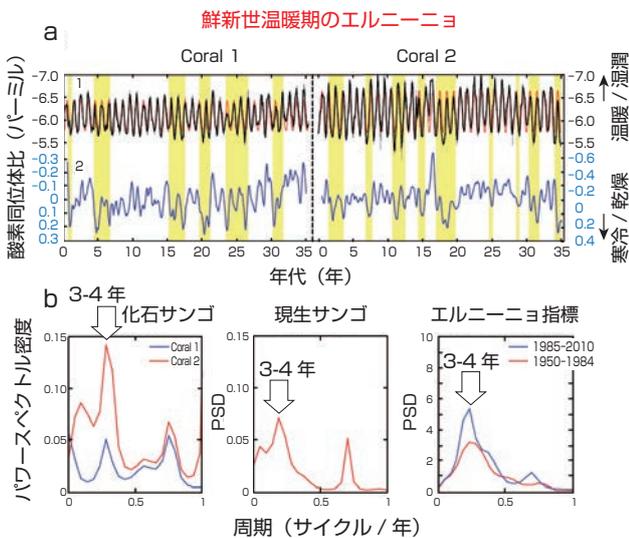


図9 (a) 二つの化石サンゴ群体に記録された鮮新世温暖期のエルニーニョ [10]。約350万年前における、時期の異なる二つのサンゴ群体(Coral1およびCoral2)のそれぞれ約35年間の年周変化を示す。黒線は酸素同位体比変動曲線、赤線は期間内での平均の酸素同位体比の季節パターン。青線は酸素同位体比の変動曲線から平均の季節パターンを差し引いて計算した異常値。黄色ハッチで示した期間がエルニーニョ現象と推定される。(b) パワースペクトル密度^[10]。パワースペクトル密度は時系列データについて、どの周期で変動が大きいかを示し、周期的な変動成分を検出する目安となる。左からそれぞれ化石サンゴの酸素同位体比(青線;Coral1、赤線;Coral2)、現生サンゴの酸素同位体比、エルニーニョ指標(Nino 3.4 index: 熱帯太平洋の水温異常値、青線;1985年~2010年、赤線;1950年~1984年まで期間)のパワースペクトル密度。0.3サイクル/年(3-4年周期)付近に共通のピークがある。

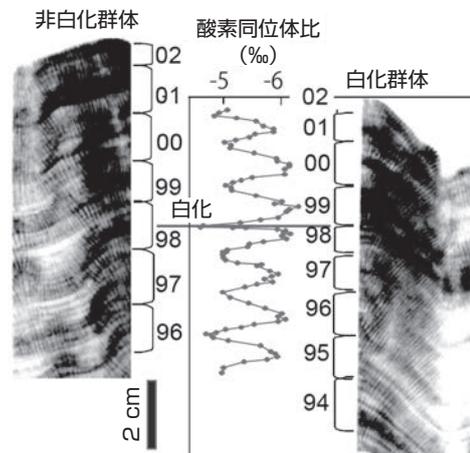


図10 石垣島のハマサンゴ骨格にみられる1998年8月の大規模白化イベントの影響。白化を呈した群体と白化を起こさなかった群体骨格それぞれのエックス線写真と白化したサンゴ骨格の成長軸に沿う酸素同位体比プロファイル。2002年9月に採取された。

短時間で解消すれば、ハマサンゴ等の一部のサンゴは白化から回復して生存を続けることができるかもしれない。異常高水温現象がサンゴおよびサンゴ礁生態系に与える影響の評価も大切な研究課題である。

6 海洋酸性化現象のサンゴ礁への影響

海洋酸性化は、新たな地球規模の環境問題として近年注目を集めている^[14]。人間活動により大気に放出された二酸化炭素が海洋に移行して海水のpHと炭酸塩の飽和度を低下させ、海洋生物の発生やサンゴや有孔虫の石灰化に悪影響を与える^{[15][16]}。グレートバリアリーフの69の海域で採取された塊状ハマサンゴ328群体における骨格分析は、過去400年間安定していた石灰化速度が急速に変化し、1990年以降だけでも14%減少していたことが報告されており、海洋酸性化との関連が示唆されている^[17]。サンゴ骨格中のホウ素同位体比(¹¹Bと¹⁰Bの存在比)は海水のpHのよい指標であり^[18]、長尺サンゴ試料や化石サンゴを用いて過去の海水pHの変遷を復元することは意義ある今後の課題である。ホウ素同位体比の分析は、表面電離型質量分析計(TIMMS)あるいはマルチコレクター誘導結合プラズマ質量分析計(MC-ICP-MS)を用いて測定されるため、これら的高性能分析装置の導入も今後の研究の高度化には必須である。

7 まとめと今後の展望

サンゴ骨格が過去の地球の気候変動を記録している媒体として大変優れていること、そして、それから気候変動の記録を読み出す試みが最先端技術を駆使して発展してきたことを示した(図11)。地球温暖化予測の高度化に向け

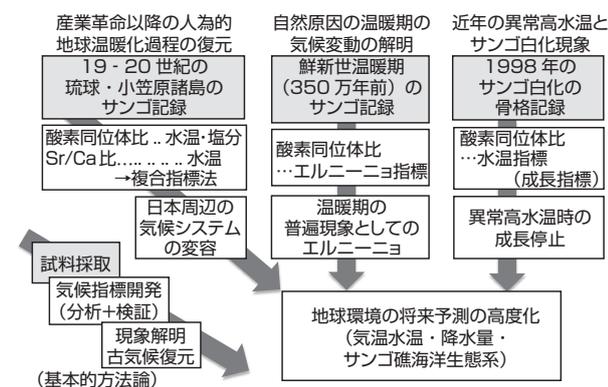


図11 サンゴ骨格気候学の基本的な方法論(左下)と論文で取り上げた3つの研究の展開
「サンゴ骨格から復元された石垣島と小笠原・父島の近過去の気候変動」、「鮮新世温暖期の化石サンゴによるエルニーニョ現象の復元」、「異常高水温現象によるサンゴ白化現象」の3つの研究について、用いられた指標に意味および解釈、そして最終目標への貢献のシナリオを示した。

て、今後もサンゴ骨格研究の必要性は一層高くなるであろう。また、IPCC第4次評価報告書によると、気候モデルによって亜熱帯域では降水量の減少が予測されているが、その確度には向上の余地がある^[9]。水温と合わせて、降水量と関係が深い過去の塩分変動を復元することは急務である。この期待に応えることができるのは、小笠原のサンゴ骨格の例で示した酸素同位体比・Sr/Ca比複合指標法である。この手法は、化石サンゴにも適用することが可能で、例えば、東シナ海では最終氷期のサンゴ化石について検討した例がある^[19]。IPCCの第5次評価報告書は2013年頃に公表の予定である。この間、酸素同位体比・Sr/Ca比複合指標法による気候変動解析とホウ素同位体比分析によるpH復元を推進し、その結果を第5次報告書に反映させていくべきと考える。このために一層のサンゴ骨格気候学の推進が求められる。

一方で、なぜサンゴ骨格の化学組成および同位体組成に水温等の気候因子が記録されるのかという基本的なメカニズムについてはいまだ未解明の部分もあり^[20]、これまでの地球化学的手法に加え、生物学的作用の解明のために飼育実験^{[21][22]}や分子生物学的な手法^[23]も含めた研究が必要である。このようなこれまでの学問分野も超えた研究は、来るべき海洋酸性化によって引き起こされるであろう海洋生物の石灰化阻害現象の予測評価にも応用できる可能性がある(図12)。

2011年3月11日には東北地方太平洋沖地震が発生し、それに伴って発生した津波により、東北地方と関東地方の太平洋沿岸部を中心に壊滅的な被害が発生した(東日本大震災)。日本各地で過去の津波被害の再評価が喫緊の課題とされているが、特に、869年に東北地方を襲った貞観地震津波と1771年に南琉球地方を襲った明和地震津波は、今回の東北地方太平洋沖地震と津波の高さや人的被

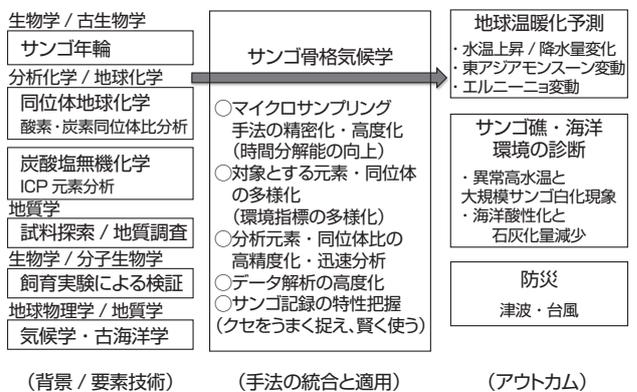


図12 サンゴ骨格気候学の研究展開に係るスキーム
研究の背景になる要素技術や基本的な分野、そしてサンゴ骨格気候学の本体を構成する手法の統合と実際の研究対象への適用、さらにアウトカムとして貢献が予想される社会的ニーズを示した。

害の規模の類似性から注目を集めている。サンゴ骨格気候学は、ハマサンゴ津波石に注目することで、災害研究にも応用することが可能である。著者らの研究グループでは、南琉球・石垣島東岸に分布するハマサンゴ巨礫に放射性炭素年代測定法とサンゴ骨格気候学の手法を適用し、これらが明和の大津波で打ち上げられたものであることを明らかにしている^{[24][25]}。沖縄地方有数の歴史的な地震津波である明和の大津波についての研究への貢献は、地域防災上の観点からも社会的要請が大きい。

謝辞

この論文は、下記の方々との共同研究の成果に基づくものである。記して謝意を表します。東京大学・大気海洋研究所・川幡穂高教授、横山祐典准教授、井上麻夕里博士、オーストラリア国立大学・M.K. Gagan 博士、プレーメン大学・T. Felis 博士、琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底研究施設・酒井一彦教授、井口 亮博士、岩瀬晃啓博士、国立環境研究所地球環境研究センター・野尻幸宏博士、慶応義塾大学理工学部・鹿園直建教授、岡山大学大学院教育学研究科・菅浩伸教授、北海道大学大学院理学研究員・渡邊剛講師、(株)環境総合テクノス・日比野浩平氏、東京都立大学理学部・塚本すみ子博士、産業技術総合研究所・長尾正之博士、岡井貴司博士、塚本 齊博士。また、技術研修生等として産総研でサンゴ骨格関連の研究を実施した檉尾由理子、佐藤崇範（東京都立大学）、加藤郁子（岡山大学）、角田友明、田子裕子、多比良仁、泉田悠人、高橋 ぬり（慶応義塾大学）、三島真理、小泉真認、小林達哉、牛江裕行、荒岡大輔、川久保友太、福嶋彩香、林恵里香（東京大学）、小俣珠乃（海洋研究開発機構）、川島龍憲（北海道大学）の各氏に厚くお礼を申し上げる（敬称略）。

用語解説

用語1：小氷期：およそ14世紀半ばから19世紀半ばにかけて続いた寒冷な期間のこと。気温の低下幅や地域性については不明な点が多い。

用語2：完新世：地質時代区分（世）のうちで最も新しいもので、現代を含む。最後の氷期が終わる約1万年前から現在までを指す。

用語3：鮮新世：新生代の地質時代の一つであり、約500万年前から約258万年前までの期間。アウストラロピテクス等の初期の人類が誕生したのもこの時代である。

用語4：塩分：海水の塩分の分析法および表記については、改訂の長い歴史がある^[26]。電気伝導度の計測による海水の塩分測定が一般化すると、「実用塩分」が定義されるようになったが、標準海水と試水の電気伝導度比に基づく

値であり、無単位とされた^[27]。現在もこの表記が広く用いられている。最近になって、塩分から海水の密度等の物理量をより精密に計算するために、溶存物質の重量を正確に評価した「絶対塩分」が提唱され、これはg kg⁻¹の単位をもつ^[28]。「実用塩分」から「絶対塩分」への換算式も提唱されている。この論文では、実用塩分を塩分と表記し、無単位数として取り扱う。

用語5：中生代：古生代と新生代に挟まれる地質時代の一つであり、現在から約2億5000万年前にはじまり、約6500万年前まで続く。中生代は、三畳紀、ジュラ紀、白亜紀の3つの時代区分で構成されている。恐竜が生息していた時代である。

参考文献

- [1] E. Jansen, *et al.*: Palaeoclimate. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S. *et al.* (eds.)], 433-497, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2007).
- [2] L. E. Lisiecki and M. E. Raymo: A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records, *Paleoceanography*, 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071 (2005).
- [3] T. Tsunoda, H. Kawahata, A. Suzuki, K. Minoshima and N. Shikazono: East Asian monsoon to El Niño/Southern Oscillation: A shift in the winter climate of Ishigaki Island accompanying the 1988/1989 regime shift, based on instrumental and coral records, *Geophysical Research Letters*, 35, L13708, doi:10.1029/2008GL033539 (2008).
- [4] M. T. McCulloch, M. K. Gagan, G. E. Mortimer, A. R. Chivas and P. J. Isdale: A high resolution Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ coral record from the Great Barrier Reef, Australia, and the 1982-1983 El Niño, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 2747-2754 (1994).
- [5] 見延庄士郎: 北太平洋における気候の数十年スケール変動に関する研究-2006年度堀内賞受賞講演-, *天気*, 55 (3), 135-147 (2008).
- [6] M. Mishima, A. Suzuki, N. Nagao, T. Ishimura, M. Inoue and H. Kawahata: Abrupt shift toward cooler condition in the earliest 20th century detected in a 165 year coral record from Ishigaki Island, southwestern Japan, *Geophysical Research Letters*, 37, L15609, doi:10.1029/2010GL043451 (2010).
- [7] T. Felis, A. Suzuki, H. Kuhnert, M. Dima, G. Lohmann and H. Kawahata: Subtropical coral reveals abrupt early 20th century freshening in the western North Pacific Ocean, *Geology*, 37, 527-530, doi: 10.1130/G25581A.1 (2009).
- [8] T. Felis, A. Suzuki, H. Kuhnert, N. Rimbu and H. Kawahata: Pacific Decadal Oscillation documented in a coral record of North Pacific winter temperature since 1873, *Geophysical Research Letters*, 37, L14605, doi:10.1029/2010GL043572 (2010).
- [9] IPCC: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], 18, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2007).

- [10] T. Watanabe, A. Suzuki, S. Minobe, T. Kawashima, K. Kameo, K. Minoshima, Y. M. Aguilar, R. Wani, H. Kawahata, K. Sowa, T. Nagai and T. Kase: Permanent El Niño during the Pliocene warm period not supported by coral evidence, *Nature*, 471, 209-211, doi:10.1038/nature09777 (2011).
- [11] 鈴木 淳, 川幡穂高: 骨格の酸素・炭素同位体比にみるサンゴ白化現象の記録. *地球化学*, 38, 265-280 (2004).
- [12] A. Suzuki, H. Kawahata, Y. Tanimoto, H. Tsukamoto, L.P. Gupta and I. Yukino: Skeletal isotopic record of a *Porites* coral during the 1998 mass bleaching event, *Geochemical Journal*, 34, 321-329 (2000).
- [13] A. Suzuki, M. K. Gagan, K. Fabricius, P. J. Isdale, I. Yukino and H. Kawahata: Skeletal isotope microprofiles of growth perturbations in *Porites* corals during the 1997-1998 mass bleaching event, *Coral Reefs*, 22, 357-369 (2003).
- [14] 諏訪僚太, 中村崇, 井口亮, 中村雅子, 守田昌哉, 加藤亜記, 藤田和彦, 井上麻夕里, 酒井一彦, 鈴木 淳, 小池勲夫, 白山義久, 野尻幸宏: 海洋酸性化がサンゴ礁域の石灰化生物に及ぼす影響, *海の研究*, 19, 21-40 (2010).
- [15] A. Kuroyanagi, H. Kawahata, A. Suzuki, K. Fujita and T. Irie: Impacts of ocean acidification on large benthic foraminifers: Results from laboratory experiments, *Marine Micropaleontology*, 73, 190-195 (2009).
- [16] M. Morita, R. Suwa, A. Iguchi, M. Nakamura, K. Shimada, K. Sakai and A. Suzuki: Ocean acidification reduces sperm flagellar motility in broadcast spawning reef invertebrates, *Zygote*, 18, 103-107, doi:10.1017/S0967199409990177 (2010).
- [17] G. De'ath, J. M. Lough and K. E. Fabricius: Declining coral calcification on the Great Barrier Reef, *Science*, 323, 116-119, doi:10.1126/science.1165283 (2009).
- [18] S. Reynaud, N. G. Hemming, A. Juillet-Leclerc and J.-P. Gattuso: Effect of $p\text{CO}_2$ and temperature on the boron isotopic composition of the zooxanthellate coral *Acropora* sp., *Coral Reefs*, 23, 539-546 (2004).
- [19] M. Mishima, H. Kawahata, A. Suzuki, M. Inoue, T. Okai, and A. Omura: Reconstruction of the East China Sea paleoenvironment at 16 ka by comparison of fossil and modern Faviidae corals from the Ryukyus, southwestern Japan, *Journal of Quaternary Science*, 24, 928-936, doi:10.1002/jqs.1268 (2009).
- [20] 鈴木 淳, 川幡穂高: サンゴなどの生物起源炭酸塩および鍾乳石の酸素・炭素同位体比にみる反応速度論的效果, *地球化学*, 41, 17-33 (2007).
- [21] A. Suzuki, K. Hibino, A. Iwase and H. Kawahata: Intercolony variability of skeletal oxygen and carbon isotope signatures of cultured *Porites* corals: Temperature-controlled experiments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 4453-4462 (2005).
- [22] T. Omata, A. Suzuki, T. Sato, K. Minoshima, E. Nomaru, A. Murakami, S. Murayama, H. Kawahata and T. Maruyama: Effect of photosynthetic light dosage on carbon isotope composition in the coral skeleton: Long-term culture of *Porites* spp., *Journal of Geophysical Research*, 113, G02014, 15, doi:10.1029/2007JG000431 (2008).
- [23] C. Shinzato, E. Shoguchi, T. Kawashima, M. Hamada, K. Hisata, M. Tanaka, M. Fujie, M. Fujiwara, R. Koyanagi, T. Ikuta, A. Fujiyama, D. J. Miller, N. Satoh: Using the *Acropora digitifera* genome to understand coral responses to environmental change, *Nature*, 476, 320-323, doi:10.1038/nature10249 (2011).
- [24] A. Suzuki, Y. Yokoyama, H. Kan, K. Minoshima, H. Matsuzaki, N. Hamanaka and H. Kawahata: Identification of 1771 Meiwa Tsunami deposits using a combination of radiocarbon dating and oxygen isotope microprofiling of emerged massive *Porites* boulders, *Quaternary Geochronology*, 3, 226-234, doi:10.1016/j.quageo.2007.12.002 (2008).
- [25] D. Araoka, M. Inoue, A. Suzuki, Y. Yokoyama, R. L. Edwards, H. Cheng, H. Matsuzaki, H. Kan, N. Shikazono and H. Kawahata: Historic 1771 Meiwa tsunami confirmed by high-resolution U/Th dating of massive *Porites* coral boulders at Ishigaki Island in the Ryukyus, Japan, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11, Q06014, 11, doi:10.1029/2009GC002893 (2010).
- [26] F. J. Millero: History of the equation of state of seawater. *Oceanography*, 23, 18-33, doi:10.5670/oceanog.2010.21 (2010).
- [27] UNESCO: The practical salinity scale 1978 and the international equation of state of seawater 1980, *UNESCO Technical Papers in Marine Science* 36, 13-21 (1981).
- [28] T. J. McDougall, D. R. Jackett and F. J. Millero: An algorithm for estimating Absolute Salinity in the global ocean, *Ocean Science Discussion*, 6, 215-242 (2009).

執筆者略歴

鈴木 淳 (すぎき あつし)

1992年東北大学大学院理学研究科博士課程後期中退、同年工業技術院地質調査所海洋地質部採用。1995年理学博士（東北大学）。産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門を経て、2010年より同地質情報研究部門物質循環研究グループ長、現在は同部門海洋環境地質研究グループ長。海洋地質学、生物地球化学が専門。海洋における炭素循環の研究、サンゴ骨格による古気候復元の研究を行ってきた。現在は、海洋酸性化問題に対して主に飼育実験手法を用いた研究を進めている。



査読者との議論

議論1 全般的コメント1

コメント (富樫 茂子: 産業技術総合研究所)

持続的な社会の実現に不可欠な人間活動による気候変動影響を評価し、将来の予測精度を高めるために、サンゴ骨格に残された過去の気候変動の解析について、新たな地球化学的指標の導入によりブレークスルーしてきていることが示されています。今後の方向についても記述されていて、シンセシオロジーの論文として適格です。

なお、IPCCにおける古気候に関して他にどのような課題があり、その中でサンゴ骨格の位置付けがわかるような概要の図を示していただけないでしょうか。また、気候変動の要因やそれを解析するための要素技術としての指標等との関係がわかるとよいと思います。

回答 (鈴木 淳)

図2として、古気候復元に用いられる研究対象とサンゴ骨格研究の位置付けについて説明図を追加しました。サンゴ骨格以外に古気候復元の対象となる研究材料や分析手法をまとめました。また、対象とする地質時代全体について、気温(水温)の復元図を示し、大局的な傾向を分かりやすく示すを試みました。気候変動の要因については、図のキャプションの中で解説しました。

議論2 全般的コメント2

コメント (内藤 耕: 産業技術総合研究所サービス工学研究センター)

今回の論文は複雑な自然現象を緻密な化学分析の結果のデータを組み合わせ、多面的にモデル化を目指す構成的アプローチです。特にこれまで定性的にモデル化されてきた自然現象を定量的に理解する試みは1990年代から始まったばかりで、今後の実社会への貢献

が大きく期待される研究分野と言えます。そのような意味で、地球科学以外にも多くの研究者や実務者にも関心のある分野であることから、専門用語をできるだけ使わない今回の努力は読者に大きなインパクトを与えます。

そのような意味で、分野外の読者にも内容を理解できるよう、「鮮新世」「完新世」「中生代」「ジュラ紀」「小氷期」といった年代区分を補足説明する表の作成をお願いします。

回答（鈴木 淳）

地質時代の区分については、末尾に「用語解説」を作成して、補足説明をしました。「小氷期」「完新世」「鮮新世」「中生代」について解説をしました。

議論3 シンセシオロジー論文としての構成

コメント（内藤 耕）

全体の理解をさらに進めるために、論文中で利用しているデータがどのような意味をもち、それぞれがどのような相互関係をもっているのかをチャートとして1枚の図を作成し、論文の最後に挿入されることを薦めます。論文を読み進めばそれらは理解できますが、専門外の人がゆっくり読み、最後に全体の論旨や構造の理解を助けることになります。

回答（鈴木 淳）

改訂に際し、あらたに図を加えました。

図11として、論文中で取り上げた3つの研究「サンゴ骨格から復元された石垣島と小笠原・父島の近過去の気候変動」、「鮮新世温暖期の化石サンゴによるエルニーニョ現象の復元」、「異常高水温現象によるサンゴ白化現象」についてデータの意味および解釈、相互の関係を説明することを試みました。また、さらに図12として、サンゴ骨格気候学の研究展開に係るスキームを整理したチャートを用意しました。図11および図12により、現在取り組んでいるサンゴ骨格気候学の全体構造を俯瞰していただけるものと思います。

議論4 さまざまな指標を複合的に評価することの強調

コメント（内藤 耕）

要旨を読みますと自然現象の理解が前面に出ており、より統合的アプローチとしてのシンセシオロジーを明確にするために、まとめの節にあるとおりさまざまな指標を複合的に評価し、現象を正確に理解することの重要性を強調されるとよいと思います。

回答（鈴木 淳）

ご指摘のとおり、サンゴ骨格を対象とした地球化学的手法による気候変遷の復元では、短所長所のある指標を複合的・総合的に評価し、当時の気候を正確に復元することが極めて大切です。この観点を、要旨と（はじめに）で強調しました。

議論5 新たな地球化学的指標の導入によるブレイクスルー

コメント（富樫 茂子）

旧図2に関しては、AUSCOREの引用ですが、新たな地球化学的指標を導入することによりブレイクスルーをする様子がわかるよいグラフです。できればこれに加えて産総研のグループの寄与を示すことはできないでしょうか？

回答（鈴木 淳）

旧図2は、改訂版では図3となりました。このヒストグラムの中に、産総研グループによる論文を示すように変更致しました。

議論6 化石サンゴに記録されている過去の気温変化のスケール

コメント（富樫 茂子）

現世サンゴに記録されている気温変化の観察を、化石サンゴに適用できるという部分は、過去の年代的な拡がりによりわかりやすくするために、鮮新世以降のおよその気温変化を示してください。

回答（鈴木 淳）

新たに追加した図2aに、鮮新世以降の対象とする地質時代全体について、気温の復元図を示し、大局的な傾向を分りやすく示すことを試みました。なお、この気温復元は、深海底堆積物の柱状試料から得られた底生有孔虫の炭酸塩殻の酸素同位体比を元に、南極域について現在との気温差を推定したもので、緯度や地域により気温差の絶対値については大きく違う可能性があることにご留意下さい。