

石垣島の化石サンゴ年輪による 9～12世紀の海洋環境復元

阿部 理

(名古屋大学環境学研究科)

森本 真紀

(名古屋大学環境学研究科)

浅海 竜司

(琉球大学理学部)

“造礁サンゴ”とは何ですか？と尋ねられることがあり、一時、小笠原諸島沖での密漁が話題となったサンゴを対比として説明することになっている。当該の八方サンゴ、いわゆる宝石サンゴの多くが水深数百メートルの、太陽光の達しない無光層で生息するのに対し、六方サンゴである造礁サンゴのほとんどは有光層以浅に生息する。宝石サンゴは地中海および太平洋の限られた海域に単一群体または小群集として分布するのみであるが、造礁サンゴは世界の熱帯・亜熱帯域のほとんどの海洋でサンゴ礁として巨大な群集構造を形成する。また、骨格成長速度にも大きな違いがあり、宝石サンゴが年約0.1 mm程度であるのに対して、造礁サンゴは数cmに達する種も存在する。いずれも炭酸カルシウムの骨格をもつ両者の生物・生態学上の差異のほとんどは、造礁サンゴにのみ存在する共生藻に起因するといっても大きな間違いではない。

造礁サンゴは、胃腔細胞内に褐虫藻と呼ばれる渦鞭毛藻の一種を宿し、その光合成産物を重要なエネルギー源としているため、効率的な代謝と速い成長が可能である一方、生育は温暖域と有光層に限定される。造礁サンゴが高い成長速度をもった結果、巨大集団として沿岸にサンゴ礁地形を形成するまでになり、共生藻を持たないそのほかのサンゴは造礁サンゴが生息できない環境に追いやられ現在の分布となったともいえるだろう。

造礁サンゴは一般に体長数mm程度のサンゴ虫(ポリプ)が集合して群体を形成し、群体が集まり群集を形成する。群体の形態には枝状、卓状、塊状などがあり、そのうち塊状の造礁サンゴ群体は比較的

成長速度が低い(0.5～2.0 cm/年)代わりに、骨格密度が高く崩壊しにくいいため、群体高が5～6mに達する巨大なものもまれにみられる。また、亜熱帯や水温の季節性が存在する熱帯の塊状サンゴは骨格密度の変化による年輪を形成する。

造礁サンゴが生息する亜熱帯～熱帯域は、同時に海洋の観測記録の蓄積に乏しい海域でもある。日本近海を例にあげると、本研究対象地域でもある石垣島では、近海を航行する研究船や商船ボランティアによる水温観測については、1960年代以降は年間約50～100回程度行なわれているが、1930年代以前は10回以下である。1980年代以降、表面水温に関しては、それまでの船舶観測に代わり、人工衛星による観測網が発展したため、現在はほぼ毎日の観測が可能となっているが、海洋観測の中で最も容易な水温観測においても1950年代以前の日本を含めた亜熱帯域の水温の月平均値を正確に把握することは非常に難しい。さらに、海水の鉛直的な挙動を決める重要な因子である塩分について、われわれはわずか60年前の海況を知らない、といっても過大な表現ではない。熱帯については亜熱帯よりもさらに情報が少ない。

そこで、塊状の造礁サンゴ年輪を過去の熱帯・亜熱帯海洋を知るためのツールとして利用する研究が、1990年代以降精力的に行なわれている。塊状の造礁サンゴはほぼ均質な炭酸カルシウムの骨格年輪を形成し、上述したように年間に1cm程度の成長を有することから、月程度の時間分解能で骨格の化学組成を分析することは比較的容易であることと、現在の分析技術では例えば水温であれば約0.2℃の再現性で

復元することができる。これは温度計による水温観測にほぼ匹敵するレベルであり、“水温記録器”として海洋物理学研究への実用的な展開ができる。さらに、船舶水温のような断続・離散的なデータではなく、定点の連続記録を得ることができることは大きな意義をもつ。現在では多様な化学分析が試みられているが、そのなかでも炭酸塩骨格の酸素安定同位体比やアルカリ土類金属（ストロンチウムやマグネシウムなど）の濃度は一般的によく用いられている。前者は水温および塩分の復元指標として、後者は水温の復元指標として用いられており、組み合わせて分析することにより、水温と塩分双方を復元することができる。

そして、造礁サンゴのもう一つの大きな特徴として、化石を用いた、過去の環境復元を、現生試料とおなじ正確さで行なうことができる点があげられる。造礁サンゴ骨格は一般に変成を受けやすいアラレ石（炭酸カルシウム結晶の一つ）から成るために、隆起によって地表面に露出した場合の溶解再結晶（方解石化）や加熱により化学組成が変化するが、化石試料が海中にとどまっていることが明らかな場合は、安定同位体比や金属濃度比などの化学組成はほぼ保存され、年輪構造にも変化は生じない。

本研究は、石垣島の海底下に埋没していた化石サンゴ試料を用いて、西暦9世紀から12世紀の間の連続した300年間の海洋環境復元を行なうことを目的とする。

化石サンゴ試料 (*Porites* sp.) は2001年に石垣島南部の登野城サンゴ礁より採取された。同化石サンゴは低潮位面に達するまで成長した後、サンゴ礁の沖方向への発達により、海底下に埋没していたが、漁船の航路確保のためのサンゴ礁掘削工事により、水中露頭の一部として発見された（図1；Yamano et al., 2003）。同化石サンゴを、天頂部より鉛直方向に油圧式ドリルによる掘削を行ない、全長387 cmの連続コアを回収した。採取したコアから5 mm厚のスラブを切り出し、軟X線写真撮影によって年輪計数を行なったところ、298年生息していたことがわかった。また、コアの最上部および最下部について放射性炭素年代測定を行なった結果はそれぞれ 1220 ± 60

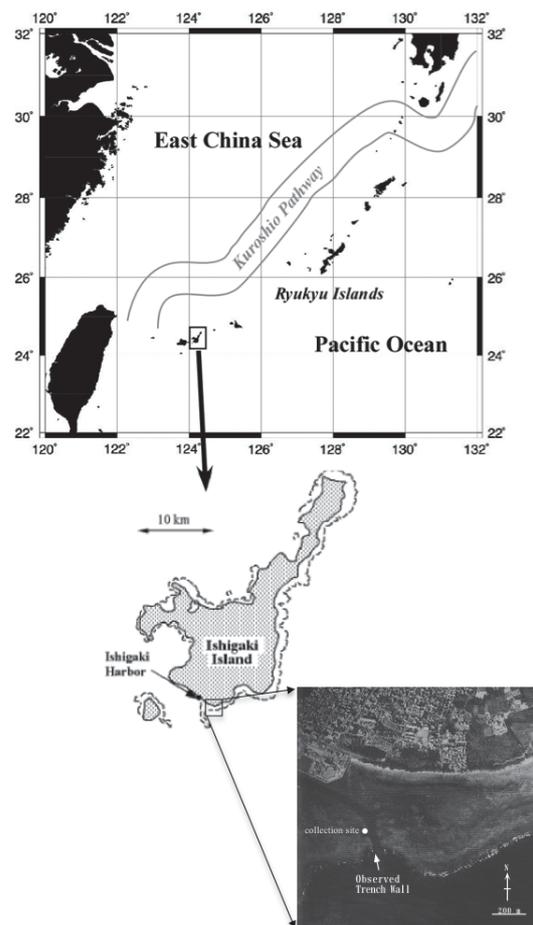


図 1. 研究地点

年、 1485 ± 35 年となった。年代測定を行なった該当部位間の年輪数は274であり、放射性炭素年代差の265年とは測定誤差範囲内で一致していた。目視による骨格状態の観察結果とも合わせ、本サンゴ試料はギャップなく連続成長していたこと、また上方成長速度が平均1.3 cm/年、であることがわかった。

つぎに軟X線写真から骨格内の成長軸を決定し、それに沿って1 mmごとにエンドミルを用いて粉末試料を削り出した（以下、これを高分解能試料と呼ぶ）。高分解能試料数は約4500となったが（コアの全長は398 cmであるが、成長軸が必ずしも鉛直方向ではないことやコア間つなぎ目等では重複して作成するなどのため）、これらをすべて分析すると長い時間と労力がかかる。そこで、本研究では1年ごとに試料をまとめて年平均を分析する方法を採用した。具体的には、1) 年輪の濃淡をグレイスケールで数値化し、ほぼ冬に相当する低密度バンドからつぎの低密度バンドまでを1年と定め、2) その間の高分解能

試料から等量ずつ分取して年試料を再作成する。また、3) 一部期間については、高分解能試料および2)の年試料の安定同位体比をそれぞれ分析し、高分解能試料から得られる年平均値と年試料の結果を比較することで年試料作成方法の妥当性の検証を行ない、その後すべての粉末試料に関して年試料の再作成と分析を行なった。

炭素・酸素安定同位体比分析は、総合地球環境学研究所実験施設のガスベンチー同位体比質量分析計 (Delta V + GasBench II) を用いて行なった。標準試料の繰り返し分析による再現性 (1σ) は炭素・酸

素同位体比でそれぞれ、0.02 および 0.05 ‰であった。また、一部の年試料に関しては、ストロンチウム／カルシウム比を琉球大学の ICP 質量分析計 (XSeries II) を用いて分析した (分析法の詳細は Asami et al., 2013 を参照のこと)。

年試料作成法の妥当性の検証結果を図2および図3に示す。コア最上部について、高分解能試料の安定同位体比分析を行なった結果、酸素同位体比と年輪の画素値の極大・極小値がほぼ一致していることがわかる (図2)。酸素同位体比の極大値は低水温、す

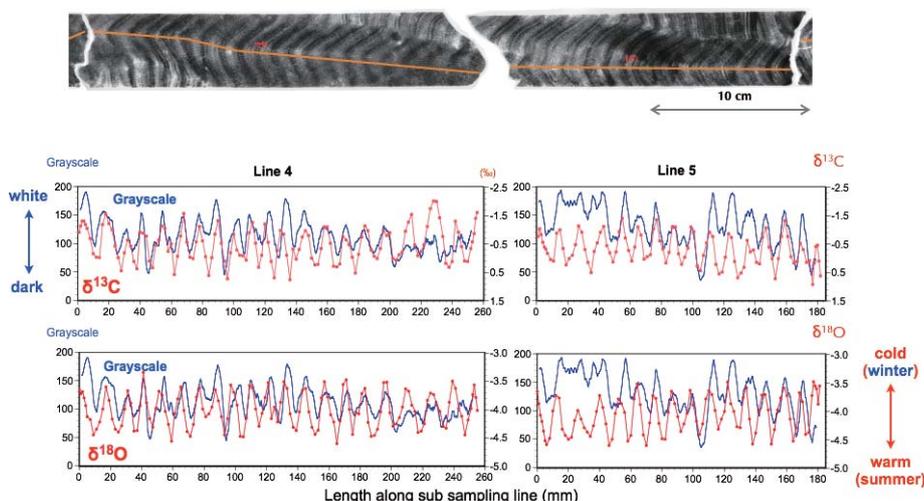


図2. (写真) サンゴ年輪の軟X線画像 (ネガ)。オレンジの線は粉末試料採取測線。(下図) それぞれ上部の画像に対応した年輪のグレースケール数値データ (青) および炭素同位体比 (上部グラフの赤線)、酸素同位体比 (下部グラフの赤線)。グレースケールは 255 が白、0 が黒に相当する。

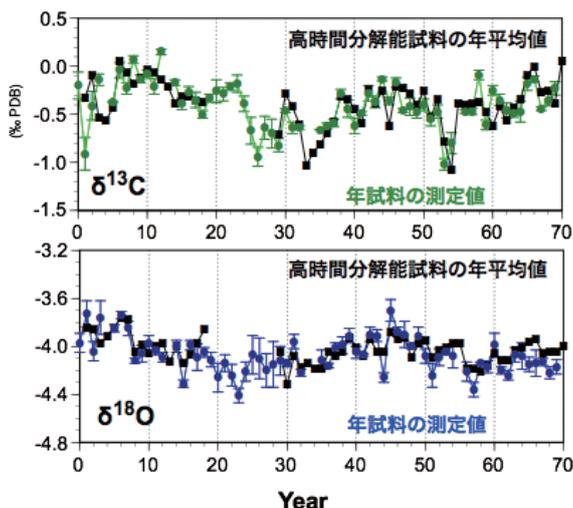


図3. 同一部分について、高分解能試料結果から計算した年平均値 (炭素・酸素同位体比とも黒四角) と年試料の測定結果の比較
年試料は炭素同位体比が緑、酸素同位体比が青で示している。

なわち冬季を示しており、また画素値の極大値は骨格が低密度であることに対応していることから、ほぼ冬季に低密度を示すことがわかる。つぎに高分解能試料から得られる年平均値と年試料の分析値を図3に示す。炭素・酸素同位体比ともによく一致していることがわかる。

さらに、1 mm ごとの粉末試料を分取して年試料を作成する場合、各高分解能試料の重量を等しくす

ることとともに、まとめた年試料を均質化する必要があることがわかった。図4に高分解能試料からの分取後の、ボルテックスミキサーによる均質化時間の違いによる、同一試料内での同位体比のばらつきの頻度分布を示す。頻度が図の上方にいくほど、同一試料内でのばらつきが大きい、すなわち十分に均質化されていないことを意味する。じっさい、攪拌を30秒以内にした場合では、炭素・酸素同位体比と

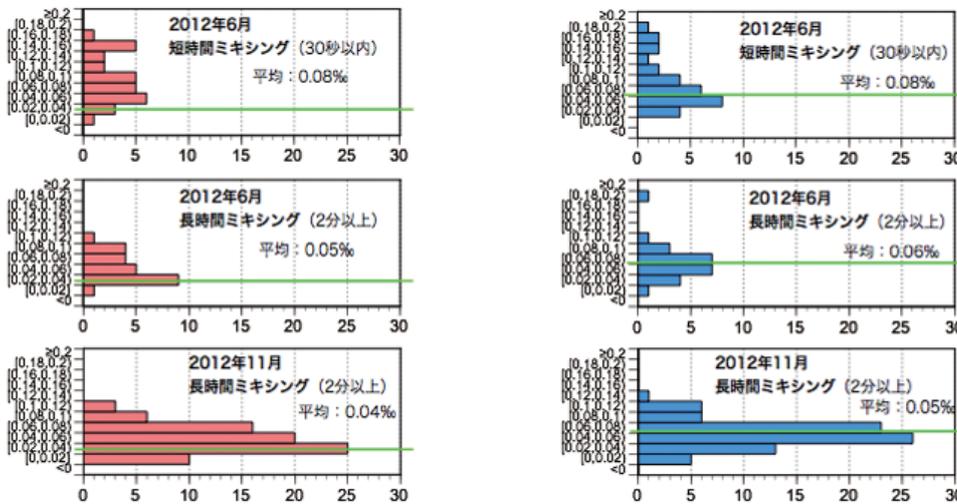


図4. 単一年試料内のばらつき検討結果

単一粉末試料からランダムに3検体を取り出し同位体比を測定した場合の標準偏差の頻度分布を示している。左(赤)が炭素同位体比、右(青)が酸素同位体比のばらつきを示している。上部グラフは年試料作成後、ボルテックスミキサーによる攪拌を30秒行なった場合、中・下部グラフは攪拌を2分以上行なった場合の結果を示している。

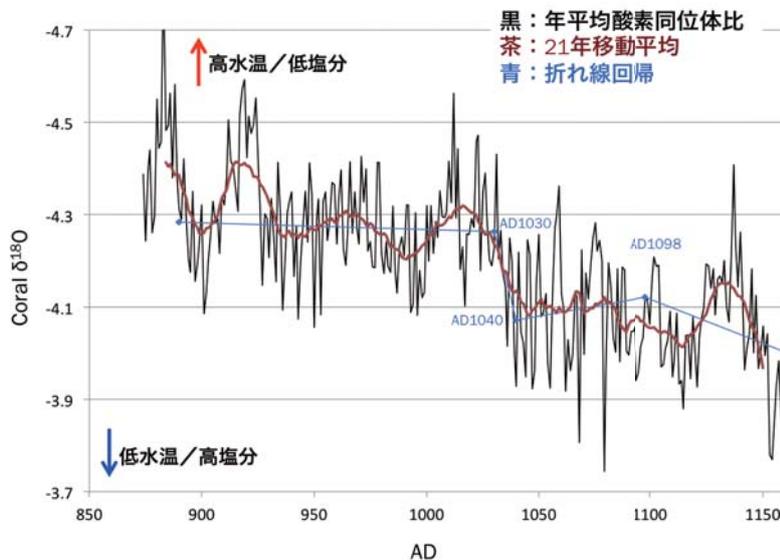


図5. サンゴ年輪の酸素同位体比測定結果
茶色は21年移動平均値、青は折れ線回帰結果である。

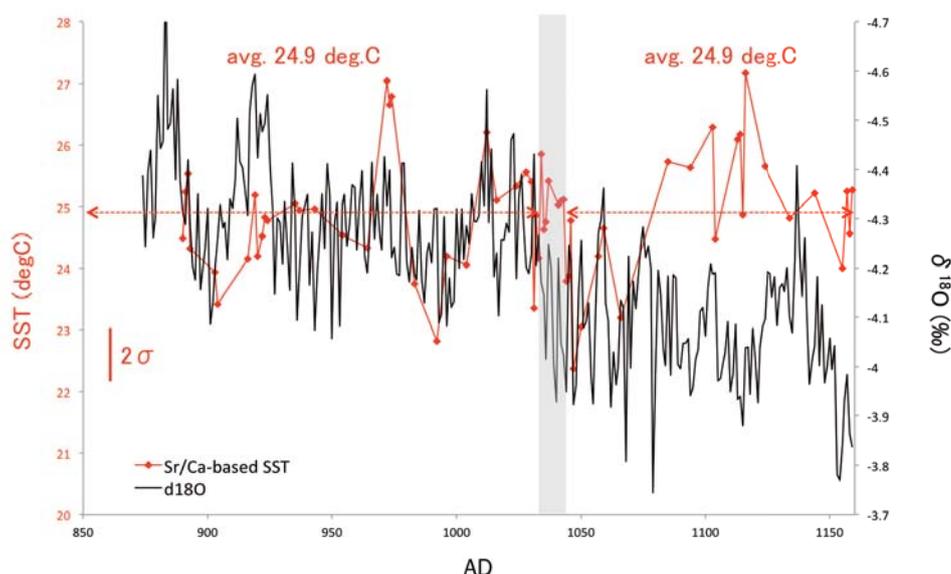


図6. 図5の酸素同位体比に Sr/Ca 水温結果を重ねたグラフ
影になっている部分は 1030-1040 の酸素同位体比急上昇期に相当する。

もにばらつきが大きくなり、確実な均質化には2分以上の攪拌が必要であることが明らかとなった。

すべての年試料の安定同位体比分析結果を図5に示す。放射性炭素年代から暦年代への変換は IntCal09 を用いた。また marine reservoir effect として石垣島で採取した現生サンゴから得られた結果を用いた（未発表）。サンゴ骨格に限らず、水中で形成される炭酸カルシウムの酸素同位体比は、形成時の水温と水の酸素同位体比によって決定され、海洋では水の酸素同位体比の変化はほぼ塩分変化に等しいことから、水温と塩分の二成分の記録を保持しているといえる。図の黒線は年試料の酸素同位体比、太茶線はその21年移動平均値をそれぞれ示している。時系列の特徴としてはまず、西暦880～890年、910～925年にかけて継続的に低い値を示していた。21年移動平均値からこの期間に約40年の明瞭な周期が認められた。つぎに西暦1030年代～1040年代にかけて、長期平均値の大きな増加（図では下方向への変化）が認められた。Tomé and Miranda (2004) による折れ線回帰を用いて屈曲点を検出したところ、西暦1030年と1040年の間に有意なギャップがあることがわかった。西暦874～1030年までの酸素同位体比の平均値は-4.3‰、1040～1160年までの平均値は-4.1‰であり、10年間に0.2‰増加するイベントであったことがわかる。さらに、1030年までは40-50

年周期のリズミカルな変動を示していたが、1040年以降の約60年間にはみられず、12世紀に入り再び現れているようにみえる。

11世紀半ばに見られた酸素同位体比の0.2‰の上昇は、水温に換算すると約1℃の低下に相当し、塩分に換算すると約0.7の増加に相当する (Abe et al., 2009)。水温か塩分のどちらに起因するかを調べるため、いくつかの年試料についてストロンチウム/カルシウム比を分析し、Morimoto et al. (2007) の換算式を用いて水温を復元した (図6)。11世紀半ば前後の水温の長期平均値は一致していたことから、酸素同位体比の増加は水温に起因したものではないことがわかった。なお、9世紀から12世紀にかけての平均水温は、過去80年間の水温とほぼ一致していることも合わせて明らかとなった。これらのことから、石垣島海域において、9世紀後半からの約300年間には水温の長期傾向はほぼ見られないものの、11世紀半ばの短い期間で急激な高塩分化が生じ、その後長期的には安定していたことがわかる。

図7に本研究で得られた石垣島化石サンゴの酸素同位体比、Cook et al. (2012) が構築した東アジア域における地上気温アノーマリ、Mann et al. (2009) が構築した北半球の地上気温アノーマリを示す。Cook et al. (2012) は、中世温候期 (Medieval Climatic

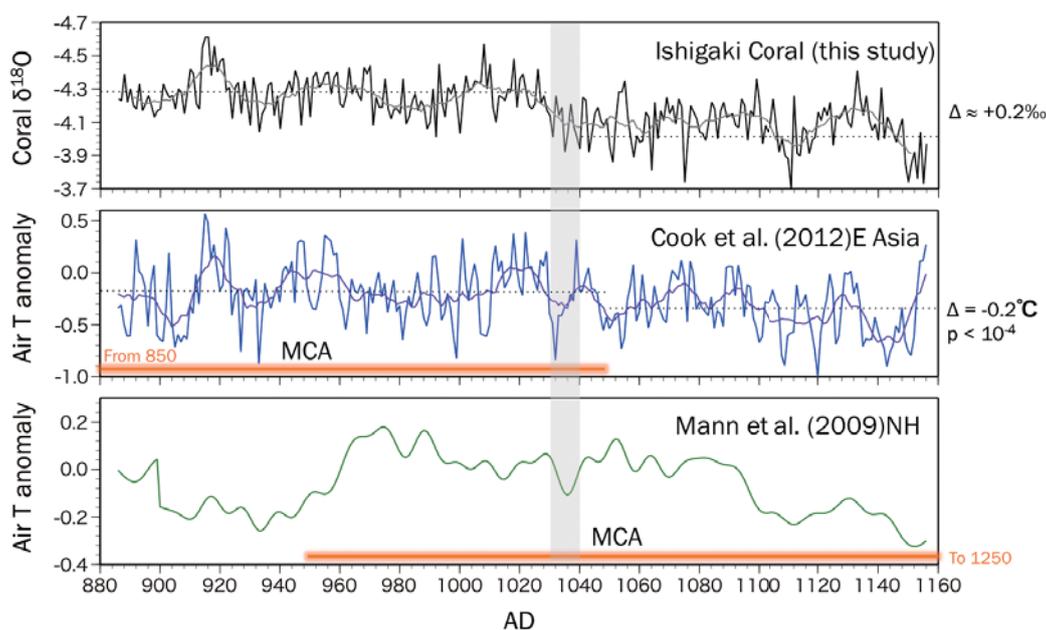


図7 (上) 本研究で得られたサンゴ年輪の酸素同位体比、(中) Cook et al. (2012) による東アジアの夏季地上気温アノーマリ、(下) Mann et al. (2009) による北半球の地上気温アノーマリ。

Anomaly; MCA) を、西暦 850～1050 年と定める一方、Mann et al. (2009) は 950～1250 年の期間を MCA とした。本研究で明らかとなった、石垣島海域の高塩分期の始まり(低塩分期の終わり)は Cook et al. (2012) の MCA 終息期と一致していた。なお、どちらが先行していたか、についてはサンゴ年輪年代が放射性炭素からのみ決定されているため、誤差を考慮すると現時点では判定できない。MCA 終息期の前後に石垣島海域が高塩分化した原因に関しては、推測の域を出ないが、部分的に実施した高分解能試料の測定結果からは夏季が冬季に比べてより大きく変化していたことから、原因は夏季の降水量の減少に起因すると思われる。石垣島を含む東アジアモンスーン域の夏季降水は梅雨と台風によってもたらされることから、両方またはいずれかの降水が減少したのであろう。石垣島付近では夏季の台風は、降水のみならず海洋表層の鉛直混合による海水温の低下をもたらす要因でもあり、台風襲来数の減少は海水温上昇につながる。Sr/Ca 比からは水温変化が検出されなかったことから、梅雨期の降水が減少したことが原因と推定できる。

石垣島南部のサンゴ礁に埋没された化石サンゴ年輪の炭素・酸素安定同位体比および Sr/Ca 比を分析し、9～12 世紀の水温および塩分変化を復元した。対象全期間を通じて、水温は長期安定傾向にあったが、塩分は 11 世紀半ばを境に前後で大きく変化していた。年代決定に誤差を含んでいるものの、この変化は東アジアの気温復元から得られた MCA 終息期にほぼ相当し、東アジア夏季モンスーンによってもたらされる降水量低下が 11 世紀半ばに生じたと推定される。

引用文献

- Abe, O. et al. (2009) A 6.5-year continuous record of sea surface salinity and seawater isotopic composition at Harbour of Ishigaki Island, southwest Japan.
- Asami, R. et al. (2013) MIS 7 interglacial sea-surface temperature and salinity reconstruction from a southwestern subtropical Pacific coral. *Quaternary Research* 80, 575-585.
- Cook, E. R. et al. (2012) Tree-ring reconstructed summer temperature anomalies for temperate East Asia since 800 C.E. *Climate Dynamics* 41, 2957-2972.

- Mann et al. (2009) M. E. et al. (2009) Global signatures and dynamical origins of the little ice age and medieval climate anomaly. *Science* 326, 1256-1260.
- Morimoto, M. et al. (2007) Intensified mid-Holocene Asian monsoon recorded in corals from Kikan Island, subtropical northwestern Pacific. *Quaternary Research* 67, 204-214.
- Tomé, A. R. and Miranda P. M. A. (2004) Piecewise linear fitting and trend changing points of climate parameters. *Geophysical Research Letters* 31, L02207.
- Yamano, H. et al. (2003) Influence of wave energy on Holocene coral reef development: an example from Ishigaki Island, Ryukyu Islands, Japan. *Sedimentary Geology* 159, 27-41.