HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	サンゴ骨格に記録された小氷期における熱帯域の気候変動
Author(s)	渡邊, 剛
Citation	日本海水学会誌, 56(2), 118-122 https://doi.org/10.11457/swsj1965.56.118
Issue Date	2002-04-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/57438
Type	journal article
File Information	SWSJ_56_118-.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

「サンゴ礁」特集

サンゴ骨格に記録された小氷期における熱帯域の気候変動

渡邊　剛*

Climatic Changes During the Little Ice Age in the Tropical Area Recorded in Coral Skeletons

Tsuyoshi WATANABE*

1. はじめに

人類は，産業革命以降，飛躍的な技術革新とともに地球上の多くの場所で繁栄し続けてきたが，その一方で，人類活動による地球環境に対する影響もまた，深刻さを増してきている．現在，気候変動に関する政府間パネル（IPCC）や京都議定書などに代表されるように地球規模の温暖化が騒がれており，事実，世界各地の観察記録は，年気温平均が過去100年間で0.5°C上昇していることを示している．この地球温暖化現象のどの程度が人類活動の影響であるのか，また，将来の温暖化を正確に見積もることは，未だ極めて難しい課題である．そのためには，少なくとも産業革命以前からの過去の地球の歴史をより詳しく知る必要がある．

産業革命以前の14世紀に始まり19世紀に至るまで，地球は小氷期と呼ばる寒冷化した時期であった．この小氷期を終わらせ現在の温暖化に向かわせる要因が人間活動によるものなのか，或いは地球の気候システムにもともと存在していた地球内部，外部からの要因であるのかは依然明らかになっておらず，現在の地球温暖化を説明するためにも非常に興味深い謎である．その謎を解明するためには，過去数百年間の気候変動の動向を時間的にも空間的にも詳しく知ることが不可欠であるが，残念ながら，我々が手にできる過去の記録は多くはない．寒暖計などによる長期間に及ぶ観測記録は，古くから文明の発達していた高緯度地域の陸域のごく一部に限られており，海域における船舶等による実測記録は精々，過去100年間である．最近になって，人工衛星等によるモニタリングでほぼ全地球の気温，水温を観測できるようになったが，過去に遡れるのは20年程度である．木の年輪，氷床コア，湖底堆積物，古文書などは，これらの観測記録の代わりに過去の気候を復元する有効な指標として広く研究されており，産業革命以前の気候復元を可能にしてきたが，それらの多くは，陸域や高緯度地域に限定されている．

特に，熱帯域，亜熱帯域では，広く古気候復元に利用されている木の年輪の形成が不明瞭なために，小氷期における低緯度地域で気候がどのようなものであったかはほとんど明らかになっていない．近年，エルニーニョ現象に代表されるように，低緯度地域の熱帯，亜熱帯の海洋表層の環境変化が地球全体の気候システムに与える重要性が指摘されているおり，人工衛星やブイを設置しての熱帯域の海洋観測が盛んになってきているが，熱帯域では，過去に遡れるの記録はせいぜい50年程度で熱帯域の過去の海洋環境を復元するため記録が極めて不足しているのが現状である．

サンゴ骨格は熱帯，亜熱帯のサンゴ礁に棲息する造礁性サンゴは年輪を刻みながら数百年間に渡って成長を続けたため，古気候記録が不足している低緯度地域における強力な古環境復元ツールとして注目を集めて

*国立科学博物館地学研究部（〒169-0073　東京都新宿区百人町3-23-1）
Department of Geology, National Science Museum, Research School of Earth Sciences, Tokyo 169-0073, Japan
オーストラリア国立大学
The Australian National University, Canberra, ACT 0200, Australia

いる．本稿では，これまでの小氷期における気候復元の研究を紹介するとともに，サンゴ骨格を用いた古環境復元の実際と今後の展望を述べる．

2. 小　氷　期

小氷期（Little Ice Age）という名称は，中世温暖期と呼ばれる9世紀から13世紀の温暖な時期（Medieval Warm Period）以降，再び氷河の活動が始まった時期としてMatthes[11]によって使われたことに始まる．14世紀から19世紀において，ヨーロッパやグリーンランド，ロシア，北アメリカなどの広範囲に渡って寒冷な気候であったことが，モレーンなどの氷河地形や，歴史文書などから知られている．しかし，その開始時期や地理的な分布などは未だ明らかになっていない．実測の観測記録は寒暖計を用いたものがイングランド中央部などでは17世紀からあるが，極めて限られた場所でしかなく，広く全球的に実測値が存在しているのは，19世紀半ばからである（**図1**）．これらの世界各地の実測データが示すことは，19世紀後半以降地球の気温は全球的に温暖化の傾向にあるが，その上昇のタイミングは，北半球と南半球，海洋と大陸によって異なり，また変動のパターンも季節によって違うということである．これは小氷期における気候変動を考える際にも，同様に考慮しなくてはならないことである．従って，小氷期の気候変動を把握するには，季節変動が読みとれる程の分解能をもつ高解像度の古気候記録を地球上の広くから採取することが求められている．これらの条件を満たす季節変動以上の分解能を持つ古気候指標を**表1**にまとめた．これまで，最も盛んに古気候の復元に用いられてきたものは木の年輪の成長幅から気温を算出するもので，Briffaら[1]は各地の木の年輪のデータをまとめ北半球における過去600年間の推定気温を求めた（**図2**）．また，Jonesら[6]および，Mannら[10]はそれぞれ，木の年輪に加え，氷層コア，湖底堆積物，歴史文書などの古気候指標のデータから

表1　高解像度古気候指標

指標の種類	主な分布
歴史文書	陸地，主に北半球
木の年輪	陸地，中－高緯度地域
アイスコア	極域，山岳地帯
年縞堆積物	陸地，大陸周辺部
サンゴ骨格	亜，熱帯海洋

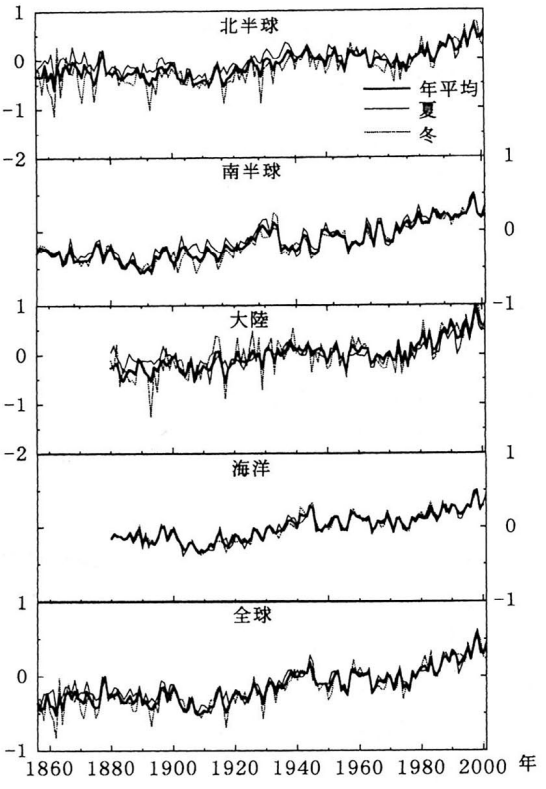

図1　観測データに基づく気温変動；縦軸は1961から1990年の平均値からの偏差

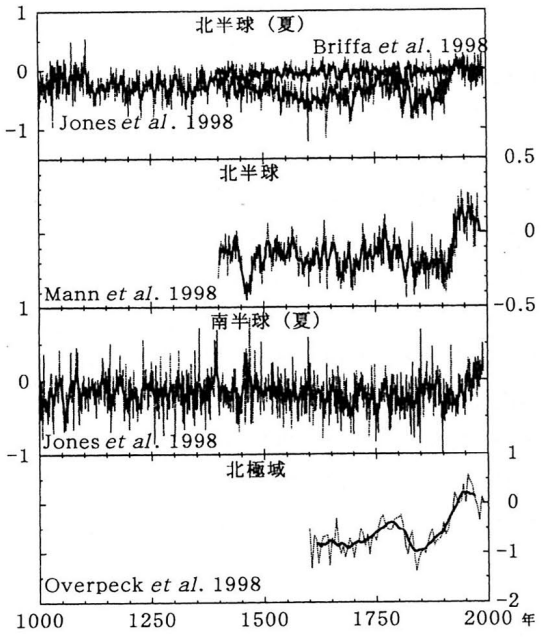

図2　古気候指標から推定される過去数百年間の気温変動；太線は10年間の移動平均，，縦軸はそれぞれ1881から1960年（Briffaら[1]），1961から1990年（Jonesら[6]），1902から1980年（Mannら[10]），及び1901から1960年（Overpeckら[13]）の平均値からの偏差

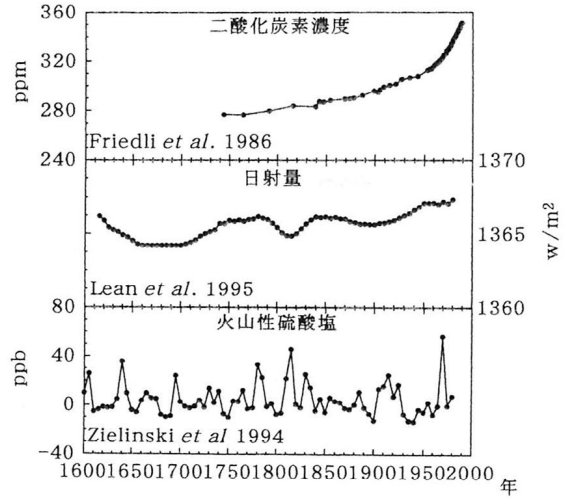

図3　木の年輪，アイスコアから推定される二酸化炭素濃度，日射量及び火山性硫酸化物濃度

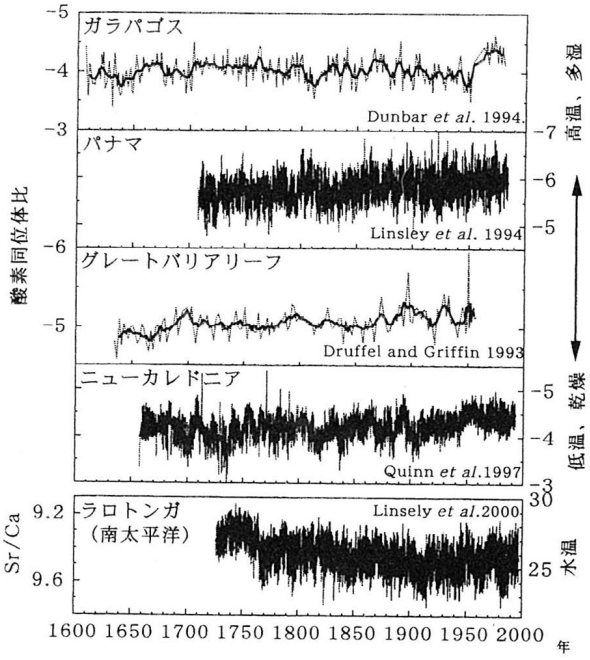

図4　長尺サンゴ骨格記録；太線は10年間の移動平均

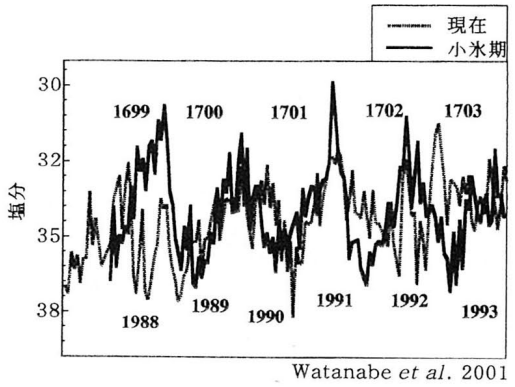

図5　サンゴ骨格の酸素同位体比と微量元素の組み合わせによる算出塩分の例（Watanabe *et al.*, 2001）

北半球，南半球の過去500年間から1000年間の推定気温を求めた（**図2**）．これらの推定気温は，そのもとになった指標の性質上，中緯度地域から高緯度地域の気温をよく反映していると考えてよい．Overpeckら[13]はアイスコア，木の年輪，湖底，海底堆積物などの古気候記録をもとに北極圏における過去400年間の古気温を求めた．これらの復元された古気温からも小氷期には確かに現在や中世温暖期に比べると寒冷な時期であったが，そのタイミングは寒冷化のレベルは全球的に同時であったわけではないということが読みとれる．では，小氷期の寒冷化を起こしたメカニズムは一体なんであったのだろうか．**図3**に木の年輪やアイスコアから推定された過去数百年間の二酸化炭素濃度，太陽日射量，火山由来の硫酸塩の変動を示す．小氷期における気候変動を引き起こす要因が1700年代のマウンダー極小期などに代表される太陽活動の変動の低下などによる外的な要因なのか，或いは火山活動などの地球内部の要因が寒冷な気候を引き起こしたのかは興味深い謎である．また，現在の地球温暖化をもたらした二酸化炭素などの温暖化ガス濃度の上昇といった人為的な要因が小氷期における寒冷化の傾向を終わらせたのだろうか．これらの疑問に答えるには，より広域的な範囲から過去の気候を高解像度で復元する必要がある．

3.　サンゴ骨格年輪と低緯度地域における小氷期の水温の復元

造礁性サンゴの骨格は熱帯，亜熱帯に広く棲息する年輪を形成しながら，数百年間に渡って成長を続けるため，過去数百年間の環境変化が連続的に記録されている．サンゴ骨格は炭酸カルシウムからなり，同位体比や微量元素などの環境指標物質の測定が容易であり，また，骨格の成長速度も1年に1cm前後と速いため，数週間レベルの時間解像度での古環境復元が可能となる．サンゴ骨格は，他の古気候指標を用いての高解像度古気候復元が困難であった低緯度地域からの気候変動の記録を，また，海洋と大気の相互関係を知る上で重要な海洋表層の情報を提供してくれる．

長寿サンゴ群体を用いた過去の気候復元の試みは，近年急激に盛んになってきているが，数百年間に及ぶ解析例は未だ他の古気候指標に比べると多くはない．

サンゴ骨格を用いて過去数百年間まで遡った解析例を図4に示す．骨格中の酸素同位体比は，サンゴが骨格を形成した当時の水温と海水の酸素同位比の両方が保存されている．海水の酸素同位体比は降水量や海水の塩分によって変動しているために，これらの酸素同位体比の数値は，値が低いほど当時が高温多湿で値が高いほど，低温で乾燥した気候だったことを示す．一方，サンゴ骨格の微量元素（Sr/Ca比など）はほぼ水温のみよって支配され，当時の水温を直接復元することができる．これらの結果は，亜熱帯，熱帯地域の海洋においても小氷期における水温の変動は地域差があることを示している．これらのサンゴ記録の変動はエルニーニョ南方振動（ENSO）や熱帯収束帯の変動(ITCZ)，太平洋数十年振動（PDO）など地球の気候を大きく左右する現象を反映しており，今後，熱帯域の海洋が地球の気候システムに与える影響を過去に遡のぼって考えるときに，有力な手がかりを与えると思われる．

4. サンゴ骨格を用いた小氷期における塩分，降水量復元の試み

上述のように，サンゴ骨格の酸素同位体比には水温と降水量，塩分が，微量元素には水温が記録されているので，両者を同じサンゴ骨格から同時に測定しその関係式の連立方程式を解くことによって，水温と降水量，塩分の変動を別々に推定することができる(McCullochら[12]，Gaganら[5])．降水量や海洋の塩分の変動の記録は，地球の気候や海洋の物質循環の変動メカニズムを知る上で極めて重要であるが，気温に比べると現存する記録も極めて少なく，また，古気候指標からの推定も難しい．Watanabeら[15]はカリブ海のサンゴ骨格の長寿サンゴの骨格を用いて，その微量元素と酸素同位体比から小氷期における塩分の変動を推定した．亜熱帯，熱帯域は，地球温暖化ガスの一つである水蒸気を地球上でもっとも多く発生させる場所であり，地球の気候システムに与える影響は大きい．今後，これらの手法は，広く熱帯地域の長寿サンゴへ応用され，過去数百年から現在に至るまでの塩分，降水量の復元が期待される．

5. ま と め

1．9世紀から13世紀の温暖な時期の後，現在の地球温暖化が始まるまでの14世紀から19世紀の小氷期は，全球的に寒冷な時期であったがそのタイミングと程度には地理的な違いがあり，そのメカニズムもわかっていない．

2．小氷期の気候変動のメカニズムを調べることは，現在の温暖化がなぜ起こったのかを説明するためにも重要であるが，地理的，季節的な違いを把握するために，広域的かつ高解像度の古気候復元が求められる．サンゴ骨格は，これまで不足していた低緯度地域の海洋表層でのこれらの情報を提供してくれる．

3．長寿サンゴの骨格を用いることによって，これまで不足していた低緯度地域の海洋表層での水温や降水量，塩分の変動を小氷期の時期にまで遡って復元することができる．

引 用 文 献

1）K.R. Briffa, P.D. Jones, F.H. Schweingruber and T.J. Osborn, "Influence of volcanic eruptions on northern hemisphere summer temperature over the past 600 years", *Nature*, 393, pp. 450－455 (1998)

2）E.R. Druffel and S. Griffin, "Large variation of surface ocean radiocarbon: Evidence of circulation changes in the Southwestern Pacific", *J. Geophys. Res.*, 98, pp. 20, 249－20, 259 (1993)

3）R.B. Dunbar, G.M. Wellington, M.W. Colgan and W. Peter, "Eastern Pacific sea surface temperature since 1600 A.D.: The $\sigma^{18}O$ record of climate variability in Galapagos corals", *Paleoceanography*, 9, pp. 291－315 (1994)

4）H. Friedli, H. Lotscher, H. Oeschger, U. Siegenthaler and B.Stauffer, "Ice core record of the $^{13}C/^{12}C$ ratio of atmospheric CO_2 in the past two centuries", *Nature*, 324, pp.237－238 (1986)

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

6）P.D. Jones, K.R. Briffa, T.P. Barnett and S.F.B. Tett, "High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with general circulation model control-run temperatures", *The Holocene*, 8, pp. 455－471 (1998)

7）J. Lean, J.Beer and R. Bradley, "Reconstruction of solar irradiance since 1610: implications for climate change", *Geophys. Res. Lett.*, 22, pp. 3195－3198 (1995)

8）B. K. Linsley, R. B. Dunber, G. M. Wellington and D. A. Mucciarone, " A coral-based reconstruction of Intertropical Convergence Zone variability over Central America since 1707", *J. Geophys. Res.*, 99, pp. 9977－9994 (1994)

9）B.K. Linsley, G.M. Wellington and D.Schrag, "Decadal sea surface temperature variability in the subtropical South Pacific from 1726 to 1997 A.D. ", *Science*, 290, pp. 1145－1148 (2000)

10) M.E. Mann, R.S. Bradley and M.K. Hughes, "Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries." *Nature*, 392, pp. 779－787 (1998)
11) F.E. Matthes, "Report of committee on glaciers", *Transaction American Geophysical Union*, 20, pp. 518－523 (1939)
12) M.T. McCulloch, M.K. Gagan, G.E. Mortimer, A.R. Chivas and P. J. Isdale, "A high-resolution Sr/Ca and $\sigma^{18}O$ coral record from the Great Barrier Reef, Australia, and the 1982－1983 El Nino", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, pp. 2747－2754 (1994)
13) J.T. Overpeck, K. Hughen, D. Hardy, R. Bradley, R. Case, M. Douglas, B. Finney, K. Gajewski, G. Jacoby, A. Jennings, S. Lamoureux, A. Lasca, G. MacDonald, J. Moore, M. Retelle, S. Smith, A. Wolfe and G. Zielinski, "Arctic environmental change of the last four centuries." *Science*, 278, pp. 1251－1256.
14) T.M. Quinn, T.J. Crowley, F.W. Taylor, C. Henin, P. Joannot and J. Yvan, "A multicentury sable isotope record from a New Caledonia coral Internnual and decadal sea surface temperature variability in the southwest Pacific since 1657 A.D.", *Paleoceanography*, 13, pp. 412－426 (1998)
15) T. Watanabe, A.Winter and T. Oba "Seasonal changes in sea surface temperature and salinity during the Little Ice Age in the Caribbean Sea deduced from Mg/Ca and ^{18}O / ^{16}O ratios in corals", *Marine Geology*, 173, pp. 21－35. (2001)
16) G.A. Zielinski, P.A. Mayewski, L.D. Meeker, S. Whitlow, M.S. Twockler, M. Morrison, D.A. Meese, A.J. Gow, R.B. Alley, "Record of volcanism since 7000 B.C. from the GISP2 Greenland ice core and implications for the volcano-climate system", *Science*, 264, pp. 948－952 (1994)

(平成 14 年 1 月 18 日受付
Received Jan. 18, 2002)