

## 過去数百年間の古気候・古海洋変動を記録する現生サンゴ

数年～数十年スケールの変動と長期変動の復元

浅海竜司<sup>\*,\*\*†</sup>・山田 努<sup>\*</sup>・井龍康文<sup>\*</sup>

(2005年12月19日受付, 2006年4月15日受理)

### Climatic and oceanographic records from modern coral skeletons for the last several centuries: Reconstruction of interannual, decadal-multidecadal, and centennial variability

Ryuji ASAMI<sup>\*,\*\*†</sup>, Tsutomu YAMADA<sup>\*</sup> and Yasufumi IRYU<sup>\*</sup>

- \* Institute of Geology and Paleontology, Graduate School of Science, Tohoku University, Aobayama, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan
- \*\* Present address: Physical Oceanography Laboratory, Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, Aobayama, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan
- † Corresponding author (ryuji@dges.tohoku.ac.jp)

Massive hermatypic corals are one of the most excellent archives for reconstructing paleoclimatic and paleoceanographic changes because they commonly live in shallow tropical and subtropical oceans, grow at a rapid rate, and contain a remarkable array of geochemical tracers within their skeletons. In particular, oxygen isotopic composition and Sr/Ca ratio of coral skeletons have been used as proxies for past thermal and hydrological variations in sea surface conditions. Recent investigations on geochemical records of modern long coral cores provide continuous time series of sea surface temperature and salinity in many tropical regions, which document climatic variability on interannual and decadal to multidecadal timescales (El Niño/Southern Oscillation, Indian Ocean Dipole mode, and Inter-decadal Pacific Oscillation), volcanic eruptions, and global warming. However, high-resolution paleoclimatic records of coral skeletons over the last several centuries are spatially limited and the mechanisms causing the climatic variability remain unclear at present. High-fidelity paleoclimatology should be progressed in order to expand our knowledge on the nature and causes of global climatic changes.

**Key words:** coral skeleton, long coral record, geochemical proxy, climatic variability, sea surface temperature, sea surface salinity

### 1. はじめに

ENSO (El Niño/Southern Oscillation: エルニーニョ/南方振動)をはじめとする地球規模の気候変動メカニズムを解明し, 近年懸念されている地球の将来像を正確に予測することは地球科学の最重要課題の一つである。20世紀初頭にエルニーニョ現象とリンクした南方振動現象が発見されて以来, ENSO に関する

---

\* 東北大学大学院理学研究科地学専攻地圏進化学講座  
〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-3  
\*\* 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻地球環境物理学講座  
〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-3  
† 連絡先 (ryuji@dges.tohoku.ac.jp)

研究が数多く行われてきた。特に、近年、人工衛星や船舶・ブイによる海洋モニタリングの体制が充実し、スーパーコンピュータによる数値モデリング研究が進展するにつれて、ENSOに関する研究は大きく発展しつつある。しかしながら、ENSOの発生・発達・終息のメカニズムなどは必ずしも解明されている訳ではない。また、モンスーンやインド洋ダイポールモード現象、さらには十数年～数十年スケールの気候変動（例えば、IPO: Inter-decadal Pacific Oscillation, Power *et al.*, 1999）、人類の活動による地球温暖化などに関する知見は乏しく、詳細な変動様式を把握するには至っていない。これらの要因の一つとして、地球規模の気候変動に大きな影響を及ぼす海域（特に低緯度域）において、時間解像度の高い長期データが乏しいことが挙げられる。衛星観測や測器などによる海洋の連続データは1950年以降に限られており、それ以前の空白を埋めるためには古文書や気候・海洋のプロキシデータ（気温・日射量・海水温・塩分などの間接指標記録）を利用せざるをえない。

海洋における代表的なプロキシとしてサンゴ、シャコガイ、有孔虫、コケムシといった炭酸塩殻をもつ生物が挙げられる。なかでも、亜熱帯～熱帯域に広く生息する造礁サンゴ（なお、本総説における「造礁サンゴ」とは塊状の造礁サンゴを指し、その大部分は *Porites* 属である）は、骨格に成育時の環境変化が連続的に記録されている点で注目されており、骨格の酸素同位体比は水温と塩分の指標として、Sr/Ca比は水温の指標として有用であるとされている（例えば、McConnaughey, 1989; Beck *et al.*, 1992）。さらに、造礁サンゴは樹木の年輪に類似した密度バンドを形成するため、骨格が形成された年代の決定が比較的容易

であるという利点があるだけでなく（Knutson *et al.*, 1972）、骨格の成長速度が非常に大きいために（およそ5～20 mm/year）、日～年単位という時間解像度で古環境を復元することができる。したがって、群体の直径が数mに達する現生造礁サンゴを用いれば、過去数百年間の海洋環境の季節変化だけでなく、ENSOやIPOなどの数年～数十年スケールの気候変動を復元することが可能である。また、造礁サンゴを用いれば、産業革命以前に遡って海洋環境の変動を復元できるため、人類活動が引き起こした地球温暖化に起因する海水温の変化を評価するための貴重なデータが得られる可能性がある。

現在までのところ、現生の造礁サンゴ骨格から50年以上の酸素同位体比あるいはSr/Ca比の連続記録を抽出した研究は約40例存在する（Fig. 1, Table 1）。100年以上にわたる造礁サンゴ骨格の酸素同位体比記録は、1980年代にセブ島から初めて得られ（Pätzold, 1986）、その後、分析装置の発展と掘削技術の進歩に伴って、1990年代から徐々に研究例が増加した。これらの研究の多くでは、ENSOによる環境変化が顕著に生じる海域、すなわち太平洋赤道域の中部～東部や南太平洋の西部の造礁サンゴ骨格が用いられた（例えば、Dunbar *et al.*, 1994; Linsley *et al.*, 1994; Quinn *et al.*, 1998）。21世紀に入ると、自動サンプリング装置や自動化学分析装置が普及し、太平洋だけでなく様々な海域からも、造礁サンゴ骨格の長期記録が報告されるようになった（例えば、Felis *et al.*, 2000; Ren *et al.*, 2002; Pfeiffer *et al.*, 2004a, b）。

本論文では、様々な海域の造礁サンゴ骨格から抽出された酸素同位体比およびSr/Ca比の長期記録を紹介し、各骨格記録から復元された様々なタイムスケ

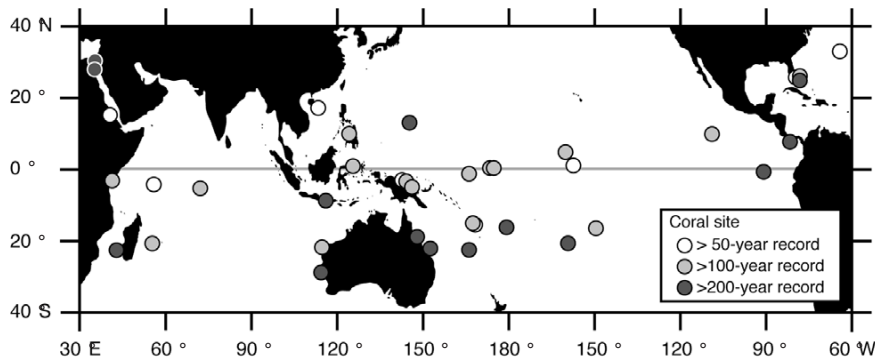


Fig. 1 Location map of modern long corals with > 50-year proxy records of paleo-sea surface temperature and sea surface salinity.

Table 1 List of modern long corals with &gt; 50-year proxy records of paleo-sea surface temperature and -sea surface salinity.

No.	Location*	Latitude	Longitude	Species	Depth (m)	Period (year)	Resolution (samples/year)	Data	Reference
1	Bermuda, WA	32°28'N	64°42'W	<i>Diploria strigosa</i>	12	1928–1982	11	Sr/Ca	Kuhnert <i>et al.</i> (2005)
2	Aqaba, RS	29°26'N	34°58'E	<i>Porites</i> sp.	4.5	1788–1992	1	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Heiss (1994)
3	Ras Umm Sidd, RS	27°51'N	34°19'E	<i>Porites</i> sp.	5.5	1751–1995	6	$\delta^{18}\text{O}$	Felis <i>et al.</i> (2000)
4	Florida, WA	25°00'N	80°36'W	<i>Solenastrea bornoni</i>	2	1899–1996	1	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Swart <i>et al.</i> (1999)
5	Florida, WA	24°56'N	80°45'W	<i>Solenastrea bornoni</i>	5	1824–1985	1	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Swart <i>et al.</i> (1996b)
6	Biscayne, WA	24°25'N	80°10'W	<i>Montastraea faveolata</i>	10	1751–1986	1	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Swart <i>et al.</i> (1996a)
7	Xisha, SCS	16°51'N	112°20'E	<i>Porites</i> sp.	20	1906–1994	12	Sr	Sun <i>et al.</i> (2004)
8	Dur-Ghella, RS	15°43'N	39°54'E	<i>Porites</i> sp.	4–6	1931–1993	5–7	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Klein <i>et al.</i> (1997)
9	Guam, WP	13°36'N	144°50'E	<i>Porites lobata</i>	7.8	1787–2000	12	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Asami <i>et al.</i> (2005)
10	Cebu, WP	10.3°N	124.0°E	<i>Porites</i> sp.		1859–1980	1	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Pätzold (1986)
11	Clipperton, EP	10°18'N	109°13'W	<i>Porites lobata</i>	8.2	1893–1994	12	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Linsley <i>et al.</i> (2000b)
12	Secas, EP	7°59'N	82°03'W	<i>Porites lobata</i>	3	1707–1984	10 (17–7)	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Linsley <i>et al.</i> (1994)
13	Palmyra, CP	5°52'N	162°08'W	<i>Porites lutea</i>	10	1886–1998	12	$\delta^{18}\text{O}$	Cobb <i>et al.</i> (2001)
14	Kiritimati, CP	2°N	157.3°W	<i>Porites</i> sp.	9	1938–1993	12	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Evans <i>et al.</i> (1998, 1999)
15	Bunaken, WP	1°30'N	124°50'E	<i>Porites</i> sp.	3	1860–1990	12	$\delta^{18}\text{O}$	Charles <i>et al.</i> (2003)
16	Maiana, WP	1°N	173°E	<i>Porites</i> sp.	6	1840–1995	6	$\delta^{18}\text{O}$	Urban <i>et al.</i> (2000)
17	Tarawa, WP	1°N	172°E	<i>Porites</i> sp.	6.7	1894–1989	12	$\delta^{18}\text{O}$	Cole <i>et al.</i> (1993)
18	Galápagos, EP	0°25'S	91°14'W	<i>Pavona clavus</i>	1.5	1607–1953	1	$\delta^{18}\text{O}$	Dunbar <i>et al.</i> (1994)
19	Nauru, WP	0.5°S	166°E	<i>Porites australiensis</i>	14	1891–1995	4	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Guilderson and Schrag (1999)
20	Malindi, WIO	3°S	40°E	<i>Porites lutea</i>	6	1801–1994	1	$\delta^{18}\text{O}$	Cole <i>et al.</i> (2000)
21	Muschu, WP	3°25'S	143°35'E	<i>Porites lutea</i>		1910–1997	1	$\delta^{18}\text{O}$	McGregor and Gagan (2004)
22	Laing, WP	4°09'S	144°53'E	<i>Porites</i> sp.	3	1884–1993	4	$\delta^{18}\text{O}$	Tudhope <i>et al.</i> (2001)
23	Mahe, WIO	4°37'S	55°49'E	<i>Porites lutea</i>	7	1846–1995	12	$\delta^{18}\text{O}$	Charles <i>et al.</i> (1997)
24	Madang, WP	5°13'S	145°49'E	<i>Porites</i> sp.	0.2	1922–1991	4	$\delta^{18}\text{O}$	Tudhope <i>et al.</i> (1995)
25	Madang, WP	5°13'S	145°49'E	<i>Porites</i> sp.	3	1880–1993	4	$\delta^{18}\text{O}$	Tudhope <i>et al.</i> (2001)
26	Peros Banhos, CIO	5°20'S	71°55'E	<i>Porites solida</i>	3	1876–1996	7–8	$\delta^{18}\text{O}$	Pfeiffer <i>et al.</i> (2004a)
27	Bali, EIO	8°15'S	115°30'E	<i>Porites</i> sp.	5	1782–1990	12	$\delta^{18}\text{O}$	Charles <i>et al.</i> (2003)
28	Espiritu Santo, WP	15°S	167°E	<i>Platygyra lamellina</i>	1	1806–1978	4	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Quinn <i>et al.</i> (1993, 1996)
29	Espiritu Santo, WP	15.7°S	167.2°E	<i>Porites lutea</i>	1.5	1928–1992	12	$\delta^{18}\text{O}$ , Sr/Ca	Kilbourne <i>et al.</i> (2004)
30	Fiji, WP	16°49'S	179°14'E	<i>Porites lutea</i>	10	1780–1997	12, 6–7	$\delta^{18}\text{O}$ , Sr/Ca	Linsley <i>et al.</i> (2004)
31	Fiji, WP	16°49'S	179°14'E	<i>Diploastrea heliopora</i>	2	1776–2001	1	$\delta^{18}\text{O}$	Bagnato <i>et al.</i> (2005)
32	Moorea, CP	17°30'S	149°50'W	<i>Porites lutea</i>	5	1852–1990	2–10	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Boiseau <i>et al.</i> (1998)
33	GBR, WP	17°47'–18°51'S	146°08'–147°04'E	<i>Porites</i> spp.		1565–1985	0.2	$\delta^{18}\text{O}$ , Sr/Ca, U/Ca	Hendy <i>et al.</i> (2002)
34	La Réunion, WIO	21°S	55°E	<i>Porites</i> sp.	12.3	1832–1995	5–7	$\delta^{18}\text{O}$	Pfeiffer <i>et al.</i> (2004b)
35	Rarotonga, CP	21°14'S	159°50'W	<i>Porites lutea</i>	18.3	1726–1997	12	Sr/Ca	Linsley <i>et al.</i> (2000a)
36	Rarotonga, CP	21°14'S	159°50'W	<i>Porites lutea</i>	18.3	1726–1997	12, 7–8	$\delta^{18}\text{O}$	Ren <i>et al.</i> (2002)
37	Ningaloo, EIO	21°54'S	113°58'E	<i>Porites lutea</i>	3	1878–1994	6	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Kuhnert <i>et al.</i> (2000)
38	Abraham, WP	22°06'S	153°00'E	<i>Porites australiensis</i>	10	1635–1957	0.5	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Druffel and Griffin (1993)
39	Amedee, WP	22°29'S	166°27'E	<i>Porites lutea</i>	3	1657–1992	4	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Crowley <i>et al.</i> (1997), Quinn <i>et al.</i> (1998)
40	Madagascar, WIO	23°09'S	43°35'E	<i>Porites lobata</i>	0–1.1	1659–1995	6	$\delta^{18}\text{O}$ , Sr/Ca	Zinke <i>et al.</i> (2004)
41	Houtman Abrolhos, EIO	28°28'S	113°46'E	<i>Porites lutea</i>	5	1795–1994	6–8	$\delta^{18}\text{O}$ , $\delta^{13}\text{C}$	Kuhnert <i>et al.</i> (1999)

\* RS: Red Sea, WA: Western Atlantic, WP: Western Pacific, EP: Eastern Pacific, CP: Central Pacific, WIO: Western Indian Ocean, EIO: Eastern Indian Ocean, CIO: Central Indian Ocean, SCS: Southern China Sea, GBR: Great Barrier Reef

ルの気候・海洋の変動現象とそれら諸現象間の関連性について論じ、今後の展望について言及する。本論文の内容の理解をより深めるために、これまでに公表されたサンゴ骨格記録の古気候復元の研究に関する論文（例えば、Gagan *et al.*, 2000; Felis and Pätzold, 2004）を参照することを勧める。なお、本論文で取り上げる長尺の造礁サンゴ骨格の古気候研究は、骨格の生物学的・化学的記録と環境因子の定量的関係を構築・評価する研究や、微小領域分析などによって石灰化や骨格形成メカニズムを解明する研究と切り離して考えることはできないが、それらの研究の紹介は他の総説（例えば、Cohen and McConnaughey, 2003; 渡邊ほか, 2004; 浅海ほか, 2004）に詳しく述べられている。

## 2. 数年スケール変動

### 2.1 太平洋のサンゴ骨格記録

ENSO は、WPWP（Western Pacific Warm Pool：西太平洋暖水塊）とその上空の積雲対流活動域の移動と変化、沿岸湧昇や赤道湧昇の変化、ITCZ（Intertropical Convergence Zone：熱帯収束帯）や SPCZ（South Pacific Convergence Zone：南太平洋収束帯）の移動などと関連した大気・海洋場における大規模な数年スケールの変動現象である。ENSO によって生じる環境パラメータ（水温・降水量・気圧など）の変化は太平洋熱帯域全体に及ぶが、特に、エルニーニョ監視区域とされる Niño 3.4 海域（5°S～5°N, 120°～170°W）や Niño 3 海域（5°N～5°S, 150°

～90°W）を中心とする赤道付近の東～中央域で顕著である。一方、西太平洋域では、ENSO による環境パラメータの変化の大きさは東～中央域に比べて小さい。しかしながら、西太平洋域には世界最大の熱エネルギーを有する WPWP が存在し、ハドレー循環や代表的な西岸境界流である黒潮を介して中～高緯度域へ膨大な熱を輸送し、地球規模の気候変動に大きく影響を及ぼす。また、WPWP の規模や挙動は ENSO の変動様式を決める重要な要素であることから、西太平洋域における海洋の動態を知ることは気候変動のメカニズムを解明する上で重要であると考えられる。

造礁サンゴ骨格の酸素同位体比の変化は、主に海水の温度と酸素同位体比（塩分と関連）の変化に依存すると考えられるので（McConnaughey, 1989）、ENSO によって水温・塩分・降水量などの偏差が生じる海域では、それらが造礁サンゴ骨格の酸素同位体比に記録される。例えば、エルニーニョ期（Fig. 2）に水温や降水量の正の偏差が生じる太平洋中部～東部の造礁サンゴ骨格の酸素同位体比には、負の偏差が記録されている（例えば、Cole *et al.*, 1993; Dunbar *et al.*, 1994; Linsley *et al.*, 1994）。また、同時期に水温や塩分に負の偏差が生じる西太平洋域の造礁サンゴ骨格の酸素同位体比には、正の偏差が記録されている（例えば、Tudhope *et al.*, 1995; Quinn *et al.*, 1998; Asami *et al.*, 2004）。逆に、ラニーニャ期（Fig. 2）には、以上とは逆の偏差が記録されている。

このような ENSO による海洋環境の変化の特徴を踏まえて、Asami *et al.* (2005) は、WPWP の北縁部

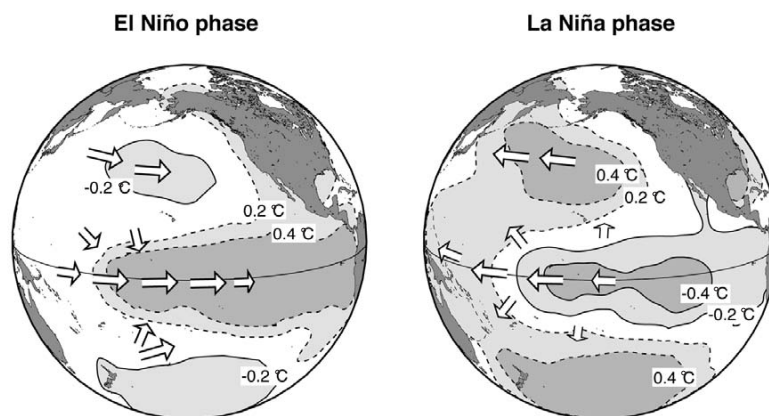


Fig. 2 Schematic diagram showing anomalous climate conditions during ENSO warm (El Niño) and cool (La Niña) phases. Sea surface temperature anomalies and direction of surface wind are shown.

に位置するグアム島の造礁サンゴ骨格から、過去210年間（1790～2000年）の酸素同位体比の時系列データを月単位の分解能で抽出し、Niño 3.4海域の水温偏差との比較ならびに統計学的手法を用いた解析から、過去のENSOの発生履歴を明らかにした。また、スペクトル解析やウェーブレット解析によってENSOに相当する3～8年周期の変動を検出し、18世紀末から現在にかけてENSOの周期性が変化してきたことを示した。彼らが示したENSOに対応づけられる周期は、これまでに報告された太平洋域の造礁サンゴの骨格記録にも見出されている（例えば、ガラパゴス諸島、4.6年；セカス島、3～7年および9年；モーレア島、5.2年；エスプリッツ・サント島、7.4年；アメデ島、3.6年）。また、太平洋赤道域の造礁サンゴの骨格記録には、1920年頃から1960年頃にかけてENSO現象が弱く、1960年頃を境に、以後強くなったことが記録されており、このことは、ENSOの指標であるSOI（Southern Oscillation Index：南方振動指数、タヒチとダーウィンの地上気圧の差を規格化した指数）やNiño 3.4海域の表層水温の周期解析結果とも調和的である（例えば、Cole *et al.*, 1993; Urban *et al.*, 2000; Tudhope *et al.*, 2001）。インドネシアのプナケン島の造礁サンゴ骨格（Charles *et al.*, 2003）には、3.5年と5.5年周期のENSOのシグナルだけでなく、準2年周期の変動が認められ、南シナ海の海水温と有意な相関があることから、この周辺海域の造礁サンゴの骨格記録を用いた古気候研究は、アジアモンスーンとENSOのリンケージを解明する上で重要であると考えられる。

従来、ENSOのメカニズムを振動子理論で説明する考えが提唱されてきた（Delayed Oscillator, Shopf and Suarez, 1988; Western Pacific Oscillator, Weisberg and Wang, 1997; Recharge-Discharge Oscillator, Jin, 1997; Advective-Reflective Oscillator, Picaut *et al.*, 1997）。しかしながら、いずれの振動子理論でもENSO現象を説明することはできるものの、振動子理論モデルを用いて、実際に認められるENSOの不規則な振動を再現することは難しいのが現状である。WPWPが形成する積雲対流にはMJO（Madden-Julian Oscillation, Madden and Julian, 1971）と呼ばれる1～3ヶ月周期の変動現象が存在し、WPWP上や赤道域で強い西風バーストを生むことが知られており、それが表層水温の正偏差のシグナルを東進させ、エルニーニョ現象を生み出すト

リガーとなっている可能性がある（例えば、Lau and Chan, 1985）。近年では、最も有用なENSO指標の一つであるNiño 3.4海域の水温偏差の解析結果から、エルニーニョ現象には主に春に発生するタイプと夏に発生するタイプがあり、発生する時期によってその現象の規模や持続期間に違いがみられることが報告されている（Horii and Hanawa, 2004）。さらに、1980年以降のエルニーニョ現象の発生頻度の増加は、温室効果ガスの増加が要因であるとの見解もある（例えば、Trenberth and Hoar, 1996）。しかしながら、造礁サンゴ骨格による過去数百年間のENSOの復元記録や気象・海洋観測データが示しているように、これまでに発生したエルニーニョ・ラニーニャ現象の規模、発生期間、持続期間、周期性は多様であることから、季節変化から長周期変化までの様々な時間スケールの大気・海洋の変動、垂表層・中層水の変動、中～高緯度域の変動、大気に生じる非周期的変化（ノイズ）などの影響を加味した解釈が必要であると思われる。そのためには、過去数百年間にわたって連続的に成長する造礁サンゴ骨格から、少なくとも月単位の時間分解能の時系列データを高精度で抽出し、過去のENSO現象に関する詳細なデータを様々な海域から蓄積していくことが重要であると指摘される。

## 2.2 インド洋のサンゴ骨格記録

インド洋においてもENSOと類似した大気・海洋間の相互作用現象（ダイポールモード現象, Fig. 3）が存在することが知られており（Saji *et al.*, 1999）、近年、同海域において造礁サンゴの骨格記録から過去の海洋環境を復元する研究が行われている。Charles *et al.* (1997) は、西インド洋低緯度域のセイシェル（マヘ島）の造礁サンゴ骨格の酸素同位体比記録から、5.0～5.5年と3.5～4.0年周期の変動を見出し、同記録がタラワ環礁の造礁サンゴ記録やダーウィンのSLP（Sea Level Pressure：海水面における気圧）記録と相関があることを示した。さらに、同記録は海水温と強い負の相関関係にあり、インドモンスーンの指標となる降雨インデックス（India Monsoon Rainfall Index, Webster and Yang, 1992）と強い正相関関係にあるだけでなく、準2年周期の変動を示すことから、セイシエルの造礁サンゴ骨格はモンスーンの強弱による水温偏差を記録していることが示された。また、セイシェル西方のマリンディの造礁サンゴ骨格の酸素同位体比記録にも5.5年周期の変動がみられ、その変動はNiño 3.4海域の水温変化と同調していると



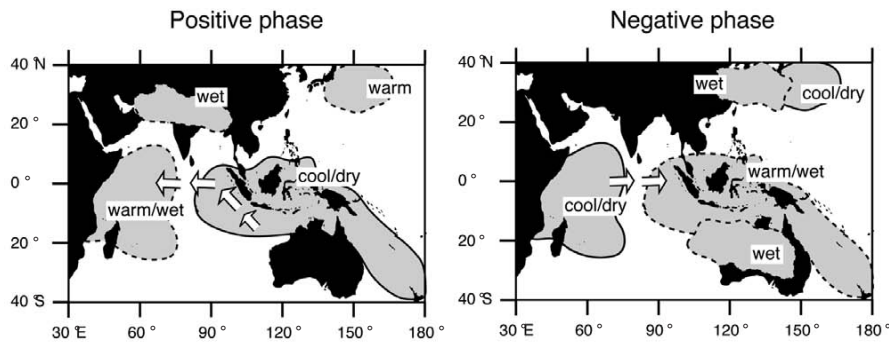


Fig. 3 Schematic diagram showing climate conditions during positive and negative phases of the Indian Ocean Dipole mode. Direction of wind anomaly is shown as arrows.

いう結果が得られている (Cole *et al.*, 2000)。これらの結果は、ENSO 現象は太平洋のみにみられる変動現象ではなく、インド洋や中緯度域の気候場と相互にリンクした現象であることを示している。

一方、南インド洋西部の亜熱帯域においては、ダイポールモード現象の影響を受けて、冬季の海水温に数年スケールの変動が認められることが知られており (例えば、Behera and Yamagata, 2001)、それによって、マダガスカル島や南アフリカの気候は蒸発量や降水量の変化を被るとされている。マダガスカル島南西部の造礁サンゴ骨格の冬季の酸素同位体比記録には、南インド洋におけるダイポールモード現象による気候変化が記録されていることや、1880~1920年、1930~1940年、1970年~現在の3つの期間において、Niño 3 海域の表層水温偏差 (Kaplan *et al.*, 1998) と同調した2~4年周期の変動が見出されることより、ENSO が南インド洋西部の海水温と大気循環に影響を及ぼしていることが示された (Zinke *et al.*, 2004)。また、マダガスカル島東方の造礁サンゴ骨格の酸素同位体比記録には、SOI の周期に相当する数年スケールの変動が見出されており、その変動は、西太平洋からインド洋へ低塩分水を運搬するインドネシア通過流や南赤道海流の強度変化を反映していると指摘された (Pfeiffer *et al.*, 2004b)。インド洋中央域の造礁サンゴ骨格の酸素同位体比は、ITCZ の分布の変化によって生じる降水量の変化を反映しており、最近の20年間においては、ENSO とリンクした数年スケールの変動がみられると報告された (Pfeiffer *et al.*, 2004a)。インド洋の西部と東部は、ENSO とリンクしたダイポールモード現象によって逆の水温偏差を伴うが、セイシェルとバリ島の過去150年間の造礁サン

ゴ骨格の酸素同位体比の差分は、太平洋中央部の水温偏差と様々なタイムスケールで有意な相関を示すことが明らかにされている (Charles *et al.*, 2003)。インド洋は海洋観測データの最も乏しい海域でありながら、ダイポールモード現象や ENSO やモンスーン現象が影響する重要な海域である。今後、この海域から造礁サンゴ骨格の古海洋記録を数多く蓄積して、過去数百年にわたって諸現象の関係性を正確に把握することが望まれる。

### 2.3 紅海・大西洋のサンゴ骨格記録

近年では、太平洋やインド洋以外の海域からも長尺の造礁サンゴコアの骨格記録が報告され、数年スケールの気候変動が議論されている。例えば、Felis *et al.* (2000) は、紅海北部域の造礁サンゴ骨格の酸素同位体比記録に5.7年周期の有意な変動を見出し、その周期性がNAO インデックス (North Atlantic Oscillation index: 北大西洋振動指数, Hurrell, 1995) と Niño 3 海域の水温偏差にも検出されることを示した。NAO (北大西洋振動) は、北大西洋域のアゾレス諸島もしくはジブラルタル海域の高気圧とアイスランド西南域の低気圧の気圧差が逆相関の関係で変化する現象であり、そのインデックス (Hurrell, 1995) はアゾレス諸島とアイスランドの海面における気圧の差として表される。この現象は、北大西洋域だけでなく北米東岸やヨーロッパに気温と降水の変化をもたらすことが知られている。紅海北部の気候は、相対的に寒冷で乾燥した気候 (NAO インデックスが正の時) と相対的に温暖で湿潤な気候 (NAO インデックスが負の時) を反映した数年スケールの変動を示しており、その変動が同海域の造礁サンゴの酸素同位体比に記録されている (Felis *et al.*, 2000)。

また、NAOの記録は、大西洋のバミューダ諸島から得られた造礁サンゴの骨格記録にも認められる。Kuhnert *et al.* (2005) は、クロススペクトル解析の結果から、同諸島産の造礁サンゴ骨格 (*Diploria* 属) の Sr/Ca 比記録と NAO インデックスに74年の有意な周期を見出し、また、同記録と北大西洋の SLP (20°~90°N) との相関の空間分布が NAO に伴う SLP の空間分布と調和的であったことから、この海域の造礁サンゴの骨格記録は NAO を復元する有用な指標となる可能性を指摘した。現在のところ、NAO と ENSO の関連性は明確に示されていないが、北米大陸北西部の氷床コア記録の研究から、北太平洋の冬季の気候変化が太平洋~北米パターン (PNA: Pacific-North American, Wallace and Gutzler, 1981) とよばれる大気循環のテレコネクションと関連した変動を示すことが知られており (Moore *et al.*, 2002)、太平洋の低緯度域と中~高緯度における大気変動が、テレコネクションを通じて大西洋の気候変動に数年スケールの同調変動をもたらしている可能性が考えられる。

### 3. 十数年~数十年スケール変動

従来報告された長尺の造礁サンゴコアの骨格記録 (Table 1) の中から、過去200年近くに及び、各海域における代表的なものを示した (Fig. 4)。Cole *et al.* (2000) の年単位データ以外のプロファイルには、明瞭な季節変化が認められる。5年区間の移動平均で示されるプロファイルには、前節で述べた数年スケールの変動が認められるだけでなく、その変動よりも長いスケールの変動が含まれているようにみえる。実際に、スペクトル解析やウェーブレット解析などを用いた周期解析によって、従来報告された造礁サンゴの骨格記録の多くに十数年~数十年周期の変動が見出されている (例えば、セカス島, 17年および33年; エスブリッツ・サント島, 14~15年; フートマン・アプロラス諸島, 15年; 紅海, 22.8年および70年)。Asami *et al.* (2005) は、グアム島の造礁サンゴ骨格の酸素同位体比記録の周期解析を行い、北西太平洋低緯度海域に15~45年周期の変動が存在することを示した。また、同記録に統計解析を行った結果、1790年以降に寒暖のシフトが10回起っていることを見出し、それらは北半球中緯度域で顕著に認められる気候レジームシフト (例えば, Yasunaka and Hanawa, 2003) の時期と数年のタイムラグをもって概ね一致していることを示した。グアム島近海の南シナ海の造礁サンゴから報

告された過去100年間の骨格記録にも、数十年スケールの変動に対応する水温変化が記録されている (Sun *et al.*, 2004)。太平洋赤道域西部に位置するマイアナ環礁の造礁サンゴの骨格記録からは、この地域が相対的に低温で乾燥した気候の時期であった19世紀中頃から末にかけては、数年スケールの変動が弱く、数十年スケールの変動が卓越したことが指摘されている (Urban *et al.*, 2000)。また、太平洋中央域に位置するパルミラ環礁の造礁サンゴの骨格記録には、0.3°Cの振幅を有する12~13年周期の変動が存在し、これは大西洋の ITCZ の位置の指標とされるノルデステ (ブラジル北東部) の降雨インデックス (Moura and Shukla, 1981) や、セイシエルの造礁サンゴの骨格記録と高い相関を示すことが見出されている (Cobb *et al.*, 2001)。このことは、この海域の水温の数十年スケールの変動が、大西洋の ITCZ の移動やインドモンスーン現象の強弱と同調している可能性があることを示している。

一方、南太平洋 (ラロトンガ島, フィジー諸島, アメデ島) の造礁サンゴの骨格記録には、IPO や PDO (Pacific Decadal Oscillation: 太平洋数十年変動, Mantua *et al.*, 1997) のインデックスと同調した数十年スケールの変動が記録されており、特に、その変動は1880~1950年にかけて振幅が大きく、1800年代の中頃には顕著でなかったことが示されている (Linsley *et al.*, 2004)。さらに、ラロトンガ島の造礁サンゴ骨格の Sr/Ca 比記録には、太陽活動の変動にตอบสนองした約80年周期の海水温変動と、IPO に対応する約25年周期の海水温変動が記録されていることが報告されている (Dima *et al.*, 2005)。従来で長尺サンゴ研究に用いられてきた造礁サンゴは主に *Porites* 属であったが、Bagnato *et al.* (2005) は、フィジー諸島の *Diploastrea* 属のサンゴ骨格記録を用いて海洋環境の復元を試みた。その結果、このサンゴの酸素同位体比の変化は、同諸島の *Porites* 属の酸素同位体比の変化よりも IPO や SPCZ の環境変化のシグナルを明瞭に記録していることが明らかにされ、IPO の変動が1880~1950年頃に顕著であったとした Linsley *et al.* (2004) の見解を支持する結果が得られた。このように、南太平洋域の造礁サンゴの骨格記録には、SPCZ の移動と関連した数十年スケールの変動が過去数百年間にわたって認められることが判明してきた。

十数年~数十年スケールの変動は、気象海洋観測データを用いた解析結果や造礁サンゴ骨格の長期古海

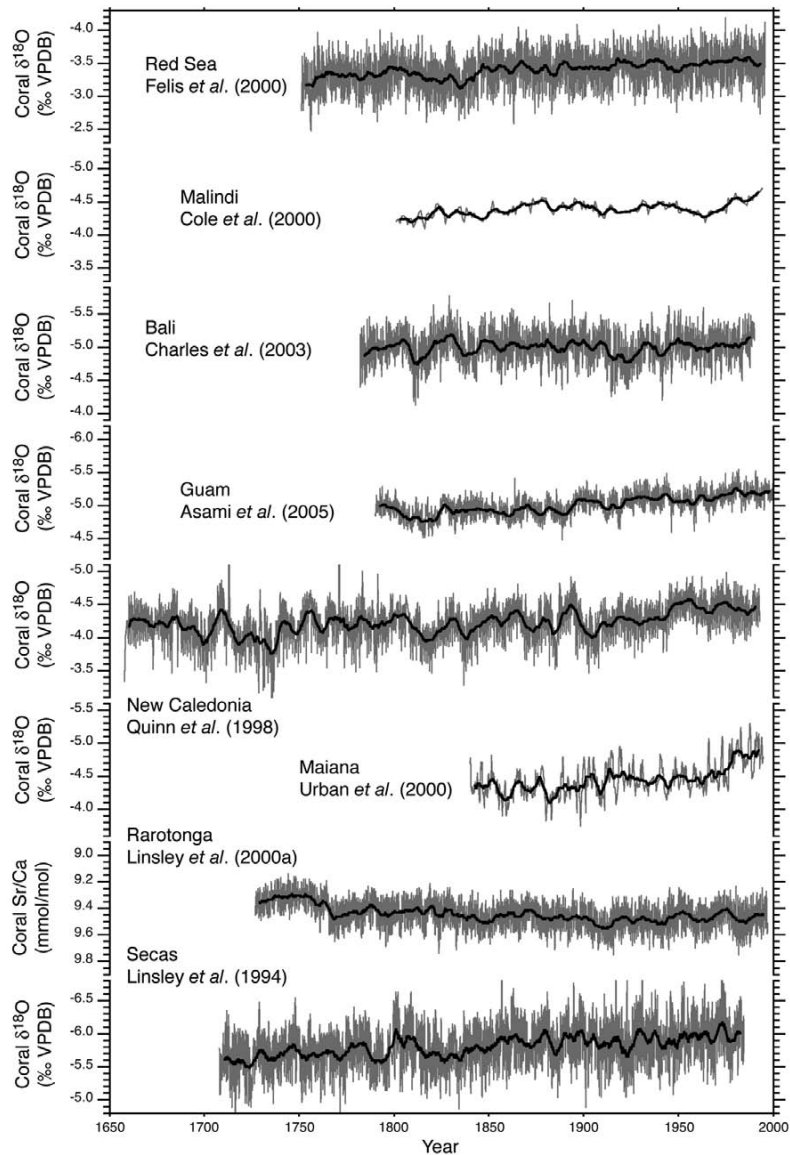


Fig. 4 Comparison of selected time-series records of coral  $^{18}\text{O}$  and Sr/Ca ratio from the Red Sea, and the Indian, Pacific, and Atlantic Oceans, which date back before the year 1850. Bold lines represent the  $^{18}\text{O}$  fluctuations smoothed with a 5-year moving average window.

洋記録が示すように、北太平洋および南太平洋の水温変化や対流活動の変化に伴う気圧変化に顕著に認められる現象であるが、近年、インド洋の造礁サンゴの骨格記録からも同様の周期を示す変動の存在が報告されている (Cole *et al.*, 2000; Zinke *et al.*, 2004; Pfeiffer *et al.*, 2004a)。また、インド洋の海水温と強い相関関係を示す紅海の造礁サンゴの骨格記録からも数十年スケールの変動が見出されている (Klein *et al.*, 1997)。Felis *et al.* (2000) は、紅海の造礁サンゴの骨格記録

に PDO と同調した変化を示す 22.8 年周期の変動と、大西洋熱塩循環の強弱を反映したと考えられる 70 年周期の変動が認められることを示した。さらに、大西洋の造礁サンゴ骨格 (*Montastraea* 属) にも数十年スケールの変動に対応する気候変化が記録されていることが報告されている (Swart *et al.*, 1996a)。

PDO は、気候レジームシフト (気候がある状態から他の状態へ急峻なシフトを伴って変化する現象) と関連した北太平洋域に存在する数十年スケールの変動



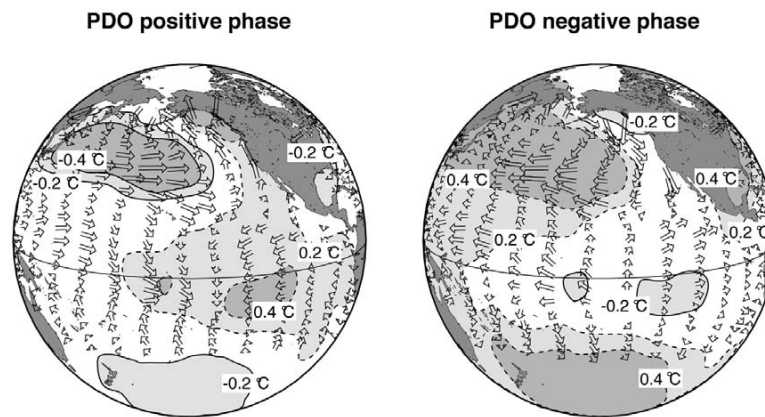


Fig. 5 Schematic diagram of anomalous climate conditions during positive and negative phases of the Pacific Decadal Oscillation (PDO). Sea surface temperature anomalies and direction and intensity of surface wind are shown. Redrawn from Mantua *et al.* (1997) and Mantua and Hare (2002).

であり (Mantua *et al.*, 1997), 北太平洋中央部の水温と赤道域中部～東部・北米西岸海域の水温がシーソーのように正と負の偏差を示し、それに伴ってアリューシャン低気圧や偏西風の強さが変化する現象である (Fig. 5)。そのため、ENSOに伴う大気海洋変動は低緯度域で顕著であるが、PDOに伴う水温偏差と気圧偏差の空間分布は、低緯度域よりも中～高緯度域において強い振幅を示す特徴をもっている。また、PDOは数十年スケールという長い周期性をもった変動とされるが、その主要成分は約20年と50年変動であり、両変動は異なる季節依存性を有することが示唆されている (Minobe, 1999, 2000)。一方、アリューシャン低気圧が強い時期と弱い時期では、エルニーニョ現象が北米の気候へ与える影響が異なることが示されており (Gershunov and Barnett, 1998)、数十年スケールの変動と数年スケールの変動という異なる時間スケールの変動が相互作用している可能性が高い。この数十年変動は時間的・空間的にも大規模な変動現象であるとともに、北太平洋域の海洋生態系にも大きな影響を及ぼすことから、気候学のみならず水産学の分野にとっても重要な研究対象と位置づけられている。しかしながら、数十年変動に関する研究の歴史はENSOに比べて浅く、また、この変動現象の時間スケールに比べて海洋の観測期間が短いことから、その変動様式の全貌ははまだ明らかにされていない。そのメカニズムの解明には、太平洋域で認められる様々な時間・空間スケールの変動現象だけでなく、NAOや北極振動

(AO: Arctic Oscillation) に代表されるような大西洋や北極域の気温・気圧変動の影響も考慮に入れた解釈が必要と思われる。

各海域の造礁サンゴ骨格の長期記録が示すように、数十年スケールの変動は少なくとも過去数百年間は存在してきた現象であり、ENSO変動と同様に各海域の大気海洋相互作用を通して伝達していると思われる。今後、造礁サンゴの骨格記録から過去数百年間の海水温や塩分に関する時系列データが月単位分解能で取得・蓄積されれば、数十年スケールの変動の季節依存性やENSOとの関連性が明らかになり、さらには、樹木の年輪などの陸域の古気候記録との比較によって、中～高緯度の気候変動とのリンケージが明確になると期待される。

#### 4. 火山活動による記録

14世紀頃から19世紀後期頃にかけては、ヨーロッパをはじめ世界各地で大規模な気候の寒冷化が起こったことが知られており、小氷期 (Little Ice Age) と呼ばれている (Matthes, 1939)。そのなかでも、特に寒冷化が著しい時期の一つにドルトン極小期 (18世紀末から19世紀初頭にかけて) が挙げられる。この時期は太陽黒点数が少なく、太陽活動が不活発であっただけでなく、火山活動が活発であった時期と考えられている (Fig. 6)。実際、樹木年輪の密度記録から北半球の気温を復元した研究では、1816年、1817年、1818年には、それぞれ例年より0.5℃、0.4℃、0.3℃気温が

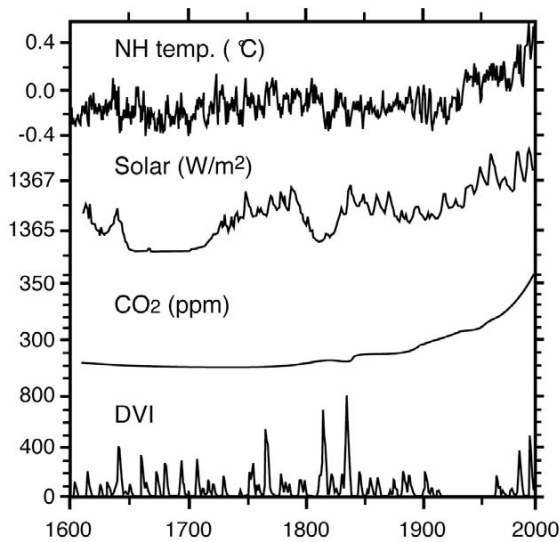


Fig. 6 Reconstructed time series of Northern Hemisphere mean temperature, solar irradiance, concentration of atmospheric CO<sub>2</sub>, and volcanic dust veil index (DVI) for the last 6 centuries. Modified from Mann *et al.* (1998).

低下したと見積もられている (Briffa *et al.*, 1998)。造礁サンゴの酸素同位体比にもこの寒冷化が記録されており、東太平洋域のガラパゴス諸島では1800~1820年頃 (Dunbar *et al.*, 1994)、セカス島では1815~1840年頃 (Linsley *et al.*, 1994)、南太平洋西部のパヌアツとニューカレドニアではそれぞれ1805~1840年頃 (Quinn *et al.*, 1993)と1805~1830年頃 (Quinn *et al.*, 1998)にかけて水温の低下が報告されている。また、グアム島の造礁サンゴの酸素同位体比は1800~1825年頃に明瞭な正のシフトを示し (Asami *et al.*, 2005)、インド洋東部のバリ島 (Charles *et al.*, 2003) や紅海 (Felis *et al.*, 2000) の造礁サンゴの骨格記録にも19世紀はじめに同様のシフトが認められる。これらのことから、18世紀末から19世紀はじめにかけて気候が寒冷化した時期には、太平洋やインド洋の多くの海域で海水温が低下したと判断される。

この寒冷化の時期以外にも、火山活動で代表されるカストロフィックなイベントによる気候変化が、造礁サンゴ骨格の酸素同位体比に記録されている。火山活動により噴出した水蒸気やガスは成層圏で光化学反応を起こして、硫酸塩エアロゾルが生成されるが、これによって、地表に達する日射量が減衰し、一時的に気温が低下する。気温低下の影響は緯度や季節によっ

て異なり、大規模な火山噴火の影響は1~2年程度とされている。西太平洋海域では、1808~1809年 (不明)、1812~1822年 (不明)、1831年 (フィリピン)、1883年 (インドネシア)、1917年 (マリアナ)、1963年 (インドネシア)、1991年 (フィリピン) に大規模な噴火があったことが知られており、グアム島の造礁サンゴの酸素同位体比記録は、それらの噴火後の2年以内、同島周辺の海水温が低下したことを示している (Asami *et al.*, 2005)。また、同記録は火山噴火の規模を表すVEI (Volcanic Explosivity Index, Newhall and Self, 1982) と調和的である。なお、西太平洋海域のニューカレドニアの造礁サンゴ骨格の酸素同位体比記録にも、上記の火山活動による海水温の低下が記録されていることが報告されている (Crowley *et al.*, 1997)。

## 5. 長期変動

本総説で取り上げた造礁サンゴの骨格記録のプロファイル (Fig. 4) には、数十年スケールの変動だけでなく長期にわたるトレンドが認められる。このトレンドが、サンゴ群体が上方に成長することに起因する光量の変化に回答した変化ではなく、また、骨格が続成作用を被ったために化学組成が改変されたことによるものではないと仮定した場合、この長期トレンドは何を意味しているのだろうか。このトレンドをどのような近似式で表すのが妥当であるかは不明であるが、本論文では予察的に2次の多項式近似曲線を用いてこの変動の傾向を捉えてみた。

19世紀以降、西インド洋の赤道域の造礁サンゴ骨格の酸素同位体比 (Cole *et al.*, 2000) には、約0.2‰の低下傾向が見積もられるが、南インド洋の西部と東部における記録 (Zinke *et al.*, 2004; Charles *et al.*, 2003) には長期変化が認められない。一方、太平洋域の造礁サンゴ骨格の酸素同位体比は概ね低下する傾向にあり、海水温の上昇あるいは塩分の低下の傾向を示唆しているが、酸素同位体比の低下の度合いやトレンドは海域間で異なっている。例えば、東太平洋の造礁サンゴ骨格の酸素同位体比記録 (Dunbar *et al.*, 1994; Linsley *et al.*, 1994) は、過去200年間にわたって単調な減少傾向を示すが、西太平洋からの記録 (Quinn *et al.*, 1998; Urban *et al.*, 2000; Asami *et al.*, 2005) では、20世紀以降に酸素同位体比が加速的に低下 (>0.2‰) している。南太平洋の中部に位置するラロトンガ島 (Linsley *et al.*, 2000a) では、18

世紀初めから20世紀初めにかけて海水温が約2℃低下したが、その後の100年間は上昇傾向(約0.5℃)に転じている。また、同海域の造礁サンゴ骨格の酸素同位体比記録から得られた海水の酸素同位体比の変化(Ren *et al.*, 2002)は、過去数百年間にわたって低下傾向にある。このように、WPWPの北縁部に位置するグアム、東縁部に位置するマイアナ環礁、南東縁部に位置するラロトンガ島において、造礁サンゴ骨格の酸素同位体比の長期的な低下傾向が明瞭にみられることから、19世紀以降、WPWPの分布域が拡大してきた可能性が考えられる。さらに、オーストラリア西岸の造礁サンゴ骨格の酸素同位体比記録(Kuhnert *et al.*, 1999, 2000)は、過去200年間にわたる海水温の上昇傾向を示しており、同海域を南下するルーウィン海流がインドネシア通過流の影響を受けていることを考慮すれば、この海水温の上昇傾向もまたWPWPの拡大によるものなのかもしれない。また、南シナ海や大西洋の造礁サンゴの骨格記録(Sun *et al.*, 2004; Swart *et al.*, 1996a)にも、長期にわたる海水温の上昇あるいは塩分の低下傾向が記録されている。これらのことから、過去数百年間の亜熱帯～熱帯域の気候は、大局的には、温暖で湿潤な状態へとシフトしているように見受けられる。しかしながら、測器記録や気候モデル計算によって示された東太平洋域の過去100年間の水温変化は、低下傾向を示し(Cane *et al.*, 1997)、これは同海域で報告されたサンゴ骨格の酸素同位体比の長期トレンドとは異なっている。今後、サンゴ骨格記録を用いて海水温の長期トレンドを定量的に見積もるためには、酸素同位体比だけでなく、Sr/Ca比に基づいた検討を併せて行うことが必要と考えられる。

この過去数百年間の海水温の上昇傾向が、人類活動によって引き起こされた温室効果ガスの増加によるものなのか、黒点変動が示唆するような太陽活動の増大によるものなのか、あるいは両要因の相乗効果によるものなのかは現在のところ不明である。しかしながら、氷床コアや木の年輪などから復元された北半球および南半球の平均気温変化は、小氷期の終焉から加速度的な上昇傾向(約0.7~0.9℃)を示しており(Mann and Jones, 2003)、過去1,000年間の全球平均の気温変化(Mann *et al.*, 1999)と比べてみると、この急速な上昇傾向は自然状態での気候変動のみを反映しているとは考えにくい。また、温室効果ガスの影響を評価した気温変化のシミュレーション結果は、20

世紀以降の水温上昇の少なくとも一部に人為的要素が関与していることを示している(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001)。造礁サンゴの骨格記録が示すように、海水温の上昇のトレンドや度合いには地域差があるだけでなく、長期的なトレンドがみられない海域や海水温が低下傾向にある海域も存在することは、大気-海洋系の気候システムは非常に複雑であることを意味している。したがって、ENSO、ダイポールモード現象、数十年スケールの変動などの気候システムを理解し、温室効果ガスの増加などの人為的影響の程度を見積もるためには、今後、産業革命以前から現在までの海洋環境情報を有する造礁サンゴ骨格の長期記録を様々な海域から蓄積することが重要である。

## 6. おわりに

近年、分析機器の発達によって分析精度が向上し、自動分析装置や自動サンプリング装置の普及によって測定作業の簡易化が進むにつれ、造礁サンゴ骨格の長尺コア試料を用いた古気候復元の研究が大きく進展し、様々な海域から長期環境データが得られつつある。これまでに報告された造礁サンゴの骨格記録の多くは、NOAA(アメリカ大気海洋庁)のWDC-A(World Data Center A) Paleoclimatology database(<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/>)で公表されており、これらの長期データを用いた解析に基づいて、過去数百年間の気候変動に関する議論がなされている(例えば、Evans *et al.*, 2002; Lough, 2004)。現在までのところ、100年以上にわたる造礁サンゴ骨格の酸素同位体比記録あるいはSr/Ca比記録を示した研究は、紅海で2例、インド洋で7例、太平洋で19例、大西洋で2例である。しかしながら、それらの中で月単位の時間分解能をもつ古気候記録はインド洋での2例と太平洋での5例に限られ、なかでも200年以上前にまで遡るデータはバリ島、グアム島、ラロトンガ島から得られているにすぎない。ENSOやダイポールモード現象、モンスーン、十数年～数十年スケールの変動といった様々なタイムスケールの気候変動現象の規模、発生時期、周期性などを正確に理解するためには、月単位以上の高分解能の古気候データを用いた解析が必要不可欠であり、様々な海域から高時間解像度の長期記録を得ることが望まれる。また、それらの諸現象は、太平洋～インド洋～大西洋における大気-海洋の相互作用でリンクしていることから、低緯度域～

高緯度域の気候変動記録を総括的に解釈する必要があり、そのためには、シャコガイ・硬骨海綿などの海域記録や樹木・鍾乳石・山岳氷床などの陸域記録といった他のプロキシとの解析を行うことが重要である。

また、造礁サンゴ骨格から得られる気候記録には、常にある程度の誤差が含まれていることを忘れてはならない。その誤差を最小限にするためには、分析の高精度化だけでなく、生息域における海水温や塩分とサンゴの同位体組成や化学組成との関係を定式化することや、サンゴ試料が続成作用を被っているか否かの吟味を慎重に行うといった基本的な作業が重要である。さらに、飼育実験や微小領域分析などによって、生物学的効果、化学組成の不均質さ、骨格中における金属元素の存在形態などに関する基礎的データを蓄積し、造礁サンゴの骨格記録の気候指標としての確度を定量的に評価する必要がある。

## 謝 辞

本論文で取り上げた造礁サンゴ骨格のデータは、NOAAのWDC-A for Paleoclimatology Contribution Seriesから使用した。産業技術総合研究所の鈴木淳博士、北海道大学大学院の渡邊剛博士、匿名の査読者の方には、適切な助言を頂いた。九州大学大学院の吉村和久教授、琉球大学の大出茂教授、群馬大学の相沢省一助教授には本稿を執筆する機会を与えて頂いた。ここに記して謝意を表する。なお、本研究には、東北大学21世紀COEプログラム「先端地球科学技術による地球の未来像創出」、平成12～13年度科学研究費補助金(奨励研究(A))「造礁サンゴの骨格形成および同位体比記録に関する定量的モデルの一般性の検証と改良」(代表者:山田努, 課題番号:12740288), 平成12～14年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(1))「造礁サンゴの骨格記録に基づく過去1万年間の表面海水温の精密復元」(代表者:井龍康文, 課題番号:12304028), 平成14～16年度科学研究費補助金(若手研究(A))「シャコガイの成長線を用いた古日射量計の開発とその応用」(代表者:山田努, 課題番号14704001), 平成17～19年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(一般))「シャコガイ殻を用いた日単位の海洋環境変化の復元」(代表者:山田努, 課題番号17340153)を使用した。

## 引用文献

浅海竜司, 山田努, 井龍康文(2004) サンゴ骨格の

Mg/Ca比, Sr/Ca比を用いた古水温復元法の現状と問題点. 第四紀研究, **43**, 231-245.

- Asami, R., Yamada, T., Iryu, Y., Meyer, C. P., Quinn, T. M. and Paulay, G. (2004) Carbon and oxygen isotopic composition of a Guam coral and their relationships to environmental variables in the western Pacific. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **212**, 1-22.
- Asami, R., Yamada, T., Iryu, Y., Quinn, T. M., Meyer, C. P. and Paulay, G. (2005) Interannual and decadal variability of the western Pacific sea surface condition for the years 1787-2000: Reconstruction based on stable isotope from a Guam coral. *J. Geophys. Res.* **110**, C05018, doi: 10.1029/2004JC002555.
- Bagnato, S., Linsley, B. K., Howe, S. S., Wellington, G. M. and Salinger, J. (2005) Coral oxygen isotope records of interdecadal climate variations in the South Pacific Convergence Zone region. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **6**, Q06001, doi: 10.1029/2004GC000879.
- Beck, J. W., Edwards, R. L., Emi, I., Taylor, F. W., Recy, J., Rougerie, F., Joannot, P. and Henin, C. (1992) Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios. *Science* **257**, 644-647.
- Behera, S. K. and Yamagata, T. (2001) Subtropical SST dipole events in the southern Indian Ocean. *Geophys. Res. Lett.* **28**, 327-330.
- Boisieu, M., Juillet-Leclerc, A., Yiou, P., Salvat, B., Isdale, P. and Guillaume, M. (1998) Atmospheric and oceanic evidences of El Niño-Southern Oscillation events in the south central Pacific Ocean from coral stable isotopic records over the last 137 years. *Paleoceanography* **13**, 671-685.
- Briffa, K. R., Jones, P. D., Schweingruber, F. H. and Osborn, T. J. (1998) Influence of volcanic eruptions on North Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature* **393**, 450-455.
- Cane, M. A., Clement, A. C., Kaplan, A., Kushnir, Y., Pozdnyakov, D., Seager, R., Zebiak, S. E. and Murtugudde, R. (1997) Twentieth-century

- sea surface temperature trends. *Science* **275**, 957-960.
- Charles, C. D., Hunter, D. E. and Fairbanks, R. G. (1997) Interaction between the ENSO and the Asian Monsoon in a coral record of tropical climate. *Science* **277**, 925-928.
- Charles, C. D., Cobb, K., Moore, M. D. and Fairbanks, R. G. (2003) Monsoon-tropical ocean interaction in a network of coral records spanning the 20th century. *Mar. Geol.* **201**, 207-222.
- Cobb, K. M., Charles, C. D. and Hunter, D. E. (2001) A central tropical Pacific coral demonstrates Pacific, Indian, and Atlantic decadal climate connections. *Geophys. Res. Lett.* **28**, 2209-2212.
- Cohen, A. L. and McConnaughey, T. A. (2003) A geochemical perspective on coral mineralization. *Rev. Mineral. Geochem.* **54**, 151-187.
- Cole, J. E., Fairbanks, R. G. and Shen, G. T. (1993) Recent variability in the southern oscillation isotopic results from a Tarawa atoll coral. *Science* **260**, 1790-1793.
- Cole, J. E., Dunbar, R. B., McClanahan, T. R. and Muthiga, N. (2000) Tropical Pacific forcing of decadal variability in the western Indian Ocean over the past two centuries. *Science* **287**, 617-619.
- Crowley, T. J., Quinn, T. M. and Taylor, F. W. (1997) Evidence for a volcanic cooling signal in a 335 year coral record from New Caledonia. *Paleoceanography* **12**, 633-639.
- Dima, M., Felis, T., Lohmann, G. and Rimbu, N. (2005) Distinct modes of bidecadal and multidecadal variability in a climate reconstruction of the last centuries from a South Pacific coral. *Clim. Dyn.* **25**, 329-336.
- Druffel, E. R. M. and Griffin, S. (1993) Large variations of surface ocean radiocarbon: evidence of circulation changes in the southwestern Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.* **98**, 20249-20259.
- Dunbar, R. B., Wellington, G. M., Colgan, M. W. and Glynn, P. W. (1994) Eastern Pacific sea surface temperature since 1600 A.D.: The  $^{18}\text{O}$  record of climate variability in Galápagos corals. *Paleoceanography* **9**, 291-315.
- Evans, M. N., Fairbanks, R. G. and Rubenstone, J. L. (1998) A proxy index of ENSO teleconnections. *Nature* **394**, 732-733.
- Evans, M. N., Fairbanks, R. G. and Rubenstone, J. L. (1999) The thermal oceanographic signal of El Niño reconstructed from a Kiritimati Island coral. *J. Geophys. Res.* **104**, 13409-13421.
- Evans, M. N., Kaplan, A. and Cane, M. A. (2002) Pacific sea surface temperature field reconstruction from coral  $^{18}\text{O}$  data using reduced space objective analysis. *Paleoceanography* **17**, 10.1029/2000PA000590.
- Felis, T., Pätzold, J., Loya, Y., Fine, M., Nawar, A. H. and Wefer, G. (2000) A coral oxygen isotope record from the northern Red Sea documenting NAO, ENSO, and North Pacific teleconnections on Middle East climate variability since the year 1750. *Paleoceanography* **15**, 679-694.
- Felis, T. and Pätzold, J. (2004) Climate reconstructions from annually banded corals. In: *Global Environmental Change in the Ocean and on Land* (eds. M. Shiyomi *et al.*), TERRAPUB, Tokyo, pp. 205-227.
- Gagan, M. K., Ayliffe, L. K., Beck, J. W., Cole, J. E., Druffel, E. R. M., Dunbar, R. B., Schrag, D. P. (2000) New views of tropical paleoclimates from corals. *Quat. Sci. Rev.* **19**, 45-64.
- Gershunov, A. and Barnett, T. P. (1998) Interdecadal modulation of ENSO teleconnections. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **79**, 2715-2726.
- Guilderson, T. P. and Schrag, D. P. (1999) Reliability of coral isotope records from the western Pacific warm pool: a comparison using age-optimized records. *Paleoceanography* **14**, 457-464.
- Heiss, G. A. (1994) Coral reefs in the Red Sea: growth, production and stable isotopes. *GEO-MAR Rep.* **32**, 1-141.
- Hendy, E. J., Gagan, M. K., Alibert, C. A., McCulloch, M. T., Lough, J. M. and Isdale, P. J. (2002) Abrupt decrease in tropical Pacific sea surface salinity at end of Little Ice Age. *Science* **295**, 1511-1514.
- Horii, T. and Hanawa, K. (2004) A relationship be-



- tween timing of El Niño onset and subsequent evolution. *Geophys. Res. Lett.* **31**, L06304, doi: 10.1029/2003GL019239.
- Hurrell, J. W. (1995) Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science* **269**, 676-679.
- IPCC (2001) Climate change 2001: The Scientific Basis, Contribution of working group I to the third assessment report of Intergovernmental Panel on Climate Change (eds. J. T. Houghton *et al.*), Cambridge University Press, Cambridge, 881 pp.
- Jin, F.-F. (1997) An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO, part I, Conceptual model. *J. Atmos. Sci.* **54**, 811-829.
- Kaplan, A., Cane, M. A., Kushnir, Y., Clement, A. C., Blumenthal, M. B. and Rajagopalan, B. (1998) Analysis of global sea surface temperature 1856-1991. *J. Geophys. Res.* **103**, 18567-18589.
- Kilbourne, K. H., Quinn, T. M., Taylor, F. W., Delcroix, T. and Gouriou, Y. (2004) El Niño-Southern Oscillation-related salinity variations recorded in the skeletal geochemistry of a *Porites* coral from Espiritu Santo, Vanuatu. *Paleoceanography* **19**, PA4002, doi:10.1029/2004PA001033.
- Klein, R., Tudhope, A. W., Chilcott, C. P., Pätzold, J., Abdulkarim, Z., Fine, M., Fallick, A. E. and Loya, Y. (1997) Evaluating southern Red Sea corals as a proxy record for the Asian monsoon. *Earth Planet. Sci. Lett.* **48**, 381-394.
- Knutson, D. W., Buddemeier, R. W. and Smith, S. V. (1972) Coral chronologies: seasonal growth bands in reef corals. *Science* **177**, 270-272.
- Kuhnert, H., Pätzold, J., Hatcher, B., Wyrwoll, K.-H., Eisenhauer, A., Collins, L. B., Zhu, Z. R. and Wefer, G. (1999) A 200-year coral stable oxygen isotope record from a high-latitude reef off Western Australia. *Coral Reefs* **18**, 1-12.
- Kuhnert, H., Pätzold, J., Wyrwoll, K.-H. and Wefer, G. (2000) Monitoring climate variability over the past 116 years in coral oxygen isotopes from Ningaloo Reef, Western Australia. *Int. J. Earth Sci.* **88**, 725-732.
- Kuhnert, H., Crüger, T. and Pätzold, J. (2005) NAO signature in a Bermuda coral Sr/Ca record. *Geochem. Geophys. Geosyst.* **6**, Q04004, doi:10.1029/2004GC000786.
- Lau, K.-M. and Chan, P. H. (1985) Aspects of the 40-50 day oscillation during the northern winter as inferred from outgoing longwave radiation. *Mon. Weather Rev.* **113**, 1889-1909.
- Linsley, B. K., Dunbar, R. B., Wellington, G. M. and Mucciarone, D. A. (1994) A coral-based reconstruction of Intertropical Convergence Zone variability over Central America since 1707. *J. Geophys. Res.* **99**, 9977-9994.
- Linsley, B. K., Wellington, G. M. and Schrag, D. P. (2000a) Decadal sea surface temperature variability in the sub-tropical South Pacific from 1726-1997 A. D. *Science* **290**, 1145-1148.
- Linsley, B. K., Ren, L., Dunbar, R. B. and Howe, S. S. (2000b) El Niño Southern Oscillation (ENSO) and decadal-scale climate variability at 10°N in the eastern Pacific from 1893-1994: A coral-based reconstruction from Clipperton Atoll. *Paleoceanography* **15**, 322-335.
- Linsley, B. K., Wellington, G. M., Schrag, D. P., Ren, L., Salinger, M. J. and Tudhope, A. W. (2004) Geochemical evidence from corals for changes in the amplitude and spatial pattern of South Pacific interdecadal climate variability over the last 300 years. *Clim. Dyn.* **22**, 1-11.
- Lough, J. M. (2004) A strategy to improve the contribution of coral data to high-resolution paleoclimatology. *Palaeoogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* **204**, 115-143.
- Madden, R. A. and Julian, P. R. (1971) Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.* **28**, 702-708.
- Mann, M. E., Bradley, R. S. and Hughes, M. K. (1998) Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* **392**, 779-787.
- Mann, M. E., Bradley, R. S. and Hughes, M. K. (1999) Northern hemisphere temperature during the past millennium: Inferences, uncertain-

- ties, and limitations. *Geophys. Res. Lett.* **26**, 759-762.
- Mann, M. E. and Jones, P. D. (2003) Global surface temperatures over the past two millennia. *Geophys. Res. Lett.* **30** (15), 1820, doi:10.1029/2003GL017814
- Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M. and Francis, R. C. (1997) A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **78**, 1069-1079.
- Mantua, N. J. and Hare, S. R. (2002) The Pacific Decadal Oscillation. *J. Oceanogr.* **58**, 35-44.
- Matthes, F. (1939) Report of committee on glaciers, April 1939. *Eos Trans. AGU* **20**, 518-523.
- McConnaughey, T. A. (1989),  $^{13}\text{C}$  and  $^{18}\text{O}$  isotopic disequilibrium in biological carbonates: I. Patterns, *Geochim. Cosmochim. Acta* **53**, 151-162.
- McGregor, H. V. and Gagan, M. K. (2004) Western Pacific coral  $^{18}\text{O}$  records of anomalous Holocene variability in the El Niño-Southern Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* **31**, L11204, doi:10.1029/2004GL019972.
- Minobe, S. (1999) Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climate shifts. *Geophys. Res. Lett.* **26**, 855-858.
- Minobe, S. (2000) Spatio-temporal structure of the pentadecadal variability over the North Pacific. *Prog. Oceanogr.* **47**, 99-102.
- Moore, G. W. K., Holdsworth, G. and Alverson, K. (2002) Climate change in the North Pacific region over the past three centuries. *Nature* **420**, 401-403.
- Moura, A. D. and Shukla, J. (1981) On the dynamics of droughts in northeast Brazil: observations, theory, and numerical experiments with a general circulation model. *J. Atmos. Sci.* **38**, 2653-2675.
- Newhall, G. C. and Self, S. (1982) The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res.* **87**, 1231-1238.
- Pätzold, J. (1986) Temperature and  $\text{CO}_2$  changes in tropical surface waters of the Philippines during the last 120 years: record in the stable isotopes of hermatypic corals. *Berichte-Rep., Geol.-Palaont. Inst. Univ. Kiel*, **12**, 92 pp.
- Picaut, J., Masia, F. and du Penhoat, Y. (1997) An advective-reflective conceptual model for the oscillatory nature of the ENSO. *Science* **277**, 663-666.
- Pfeiffer, M., Dullo, W. -C. and Eisenhauer, A. (2004a) Variability of the Intertropical Convergence Zone recorded in coral isotopic records from the central Indian Ocean (Chagos Archipelago). *Quat. Res.* **61**, 245-255.
- Pfeiffer, M., Timm, O., Dullo, W. -C. and Podlech, S. (2004b) Oceanic forcing of interannual and multidecadal climate variability in the southwestern Indian Ocean: Evidence from a 160 year coral isotopic record (La Réunion, 55°E, 21°S). *Paleoceanography* **19**, PA4006, doi:10.1029/2003PA000964.
- Power, S., Casey, T., Folland, C., Colman, A. and Mehta, V. (1999) Inter-decadal modulation of the impact of ENSO on Australia. *Clim. Dyn.* **15**, 319-324.
- Quinn, T. M., Taylor, F. W., Crowley, T. J. and Link, S. M. (1993) A 173 year stable isotope record from a tropical south Pacific coral. *Quat. Sci. Rev.* **12**, 407-418.
- Quinn, T. M., Crowley, T. J. and Taylor, F. W. (1996) New stable isotope results from a 173-year coral record from Espiritu Santo, Vanuatu. *Geophys. Res. Lett.* **23**, 3413-3416.
- Quinn, T. M., Crowley, T. J., Taylor, F. W., Henin, C., Joannot, P. and Join, Y. (1998) A multicentury stable isotope record from a New Caledonia coral: Interannual and decadal sea surface temperature variability in the southwest Pacific since 1657 A. D. *Paleoceanography* **13**, 412-426.
- Ren, L., Linsley, B. K., Wellington, G. M., Schrag, D. P. and Hoegh-Guldberg, O. (2002) Deconvolving the  $^{18}\text{O}$  seawater component from subseasonal coral  $^{18}\text{O}$  and Sr/Ca at Raratonga in the southwestern subtropical Pacific for the period 1726 to 1997. *Geochim. Cosmochim. Acta* **67**, 1609

- 1621.
- Saji, N. H., Goswami, B. N., Vinayachandran, P. N. and Yamagata, T. (1999) A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature* **401**, 360-363.
- Shopf, P. S. and Suarez, M. J. (1988) Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Atmos. Sci.* **45**, 549-566.
- Sun, Y., Sun, M., Wei, G., Lee, T., Nie, B. and Yu, Z. (2004) Strontium contents of a *Porites* coral from Xisha Island, South China Sea: A proxy for sea-surface temperature of the 20th century. *Paleoceanography* **19**, PA2004, doi:10.1029/2003PA000959.
- Swart, P. K., Dodge, R. E. and Hudson, H. J. (1996a) A 240-year stable oxygen and carbon isotopic record in a coral from South Florida: Implications for the prediction of precipitation in southern Florida. *Palaios* **11**, 362-375.
- Swart, P. K., Healy, G. F., Dodge, R. E., Kramer, P., Hudson, J. H., Halley, R. B. and Robblee, M. B. (1996b) The stable oxygen and carbon isotopic record from a coral growing in Florida Bay: A 160 year record of climatic and anthropogenic influence. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* **123**, 219-238.
- Swart, P. K., Healy, G., Greer, L., Lutz, M., Saied, A., Anderegg, D., Dodge, R. E. and Rudnick, D. (1999) The use of proxy chemical records in coral skeletons to ascertain past environmental conditions in Florida Bay. *Estuaries* **22**, 384-397.
- Trenberth, K. K. and Hoar, T. J. (1996) The 1990-1995 El Niño-Southern Oscillation event: Longest on record. *Geophys. Res. Lett.* **23**, 57-60.
- Tudhope, A. W., Shimmield, G. B., Chilcott, C. P., Jebb, M., Fallick, A. E. and Dalgleish, A. N. (1995) Recent changes in climate in the far western equatorial Pacific and their relationship to the Southern Oscillation; oxygen isotope records from massive corals, Papua New Guinea. *Earth Planet. Sci. Lett.* **136**, 575-590.
- Tudhope, A. W., Chilcott, C. P., McCulloch, M. T., Cook, E. R., Chappell, J., Ellam, R. T., Lea, D. W., Lough, J. M. and Shimmield, G. B. (2001) Variability in the El Niño-Southern Oscillation through a glacial-interglacial cycle. *Science* **291**, 1511-1517.
- Urban, F. E., Cole, J. E. and Overpeck, J. T. (2000) Influence of mean climate change on climate variability from a 155 year tropical Pacific coral record. *Nature* **407**, 989-993.
- Wallace, J. M. and Gutzler, D. S. (1981) Teleconnections in the geopotential height field during the North Hemisphere winter season. *Mon. Weather Rev.* **109**, 78-812.
- 渡邊剛, Juillet-Leclerc, A., Cuif, J.-P., Meibom, A., Dauphin, Y., Blamart, D., 佐野有司 (2004) サンゴ骨格の微小領域における化学組成の不均質性 石灰化プロセスの解明とサンゴ古水温計への応用. *地球化学*, **38**, 255-264.
- Webster, P. J. and Yang, S. (1992) Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **118**, 877-926.
- Weisberg, R. H. and Wang, C. (1997) A western Pacific oscillator paradigm for the El Niño-Southern Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* **24**, 779-782.
- Yasunaka, S. and Hanawa, K. (2003) Regime shifts in the Northern Hemisphere SST field: Revisited in relation to Tropical variations. *J. Meteor. Soc. Japan* **81**, 415-424.
- Zinke, J., Dullo, W.-Chr., Heiss, G. A. and Eisenhauer, A. (2004) ENSO and Indian Ocean subtropical dipole variability is recorded in a coral record off southwest Madagascar for the period 1659 to 1995. *Earth Planet. Sci. Lett.* **228**, 177-194.