

サンゴ骨格の年代測定と第四紀後期の海面変動

横山 祐典¹⁾

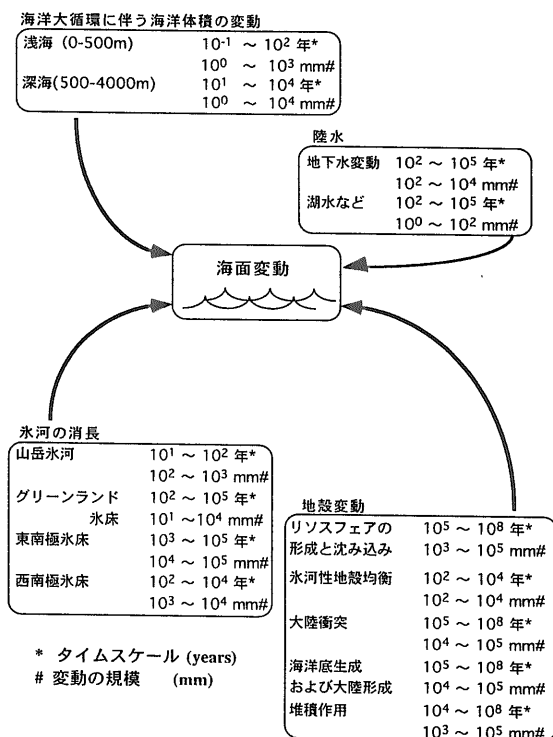
1. はじめに

熱帯から亜熱帯の浅海域に生息する造礁サンゴは、古環境のレコーダーとして、重要な役割をもっている。第四紀後期の海面変動に関する研究は世界中で広く行われているが、パプアニューギニアのヒュオン半島 (Chappell, 1974; Chappell *et al.*, 1996 など) や日本の喜界島 (大村, 1988) など、隆起速度の速いサンゴ礁段丘では、サンゴを古海面指標として用いた研究がよく知られている。特に最終氷期最盛期以降については、サンゴを用いた研究によって、正確な融水の記録が明らかにされてきた (Fairbanks, 1989; Bard *et al.*, 1993; Chappell and Polach, 1991; Bard *et al.*, 1996)。本稿では、海面変動の一般的な概念について解説し、サンゴを使った海面変動の研究について紹介する。

2. 海面変動の3つの要因

海面変動は地球上のいろいろな現象の変動が重なり合った結果として現れてくる。例えば、気候変動やテクトニックなプロセス、ジオイドの変化、潮汐などの現象が、様々なタイムスケールと規模で海面高度に影響を与えている (第1図)。本稿で扱う第四紀後期の海面変動は、約 $10^3 \sim 10^5$ 年 (千年~十万年) スケールの氷床の消長に起因する現象である。氷床から融け出した水は海洋に移動し、そのときの海の面積に応じて海面を上昇させるが、話はそう簡単ではない。同時に、氷床の消長により引き起こされる地殻の変形も海面変動に影響を与える。また、増加した海水の荷重は海洋底を変形させる。

氷床の消長に起因し海水の質量再配分に伴う海面変動を記述する方程式は、Farrell and Clark (1976) により初めて定式化された。これはヨーロッパや北アメリカなど、かつて存在した大規模な氷床の周辺域 (near-field) の海面変動を説明するために使われた。Nakada and Lambeck (1987) は、Farrell and Clark (1976) の方程式を改訂し、地球上における海面変動の空間的かつ時間的バリエーションをより合理的に説明することに成功した。彼



第1図 海面変動に寄与するさまざまなプロセスのタイムスケールと規模 (National Research Council, 1990 のデータから図を作成)。

1) オーストラリア国立大学 地球科学研究所:
Reserch School of Earth Sciences, The Australian National University, Canberra, ACT0200, AUSTRALIA

キーワード: 海面変動, サンゴ, 年代測定, ¹⁴C, U-series

らは、緯度 θ 、経度 λ における時間 τ_0 から τ の間の海面高度の変化 $\Delta Z(\theta, \lambda; \tau)$ を次のように定式化した (Nakada and Lambeck 1987):

$$\Delta Z(\theta, \lambda; \tau) = \Delta Z_{\text{est}}(\theta, \lambda; \tau) + \Delta Z_{\text{ice}}(\theta, \lambda; \tau) + \Delta Z_{\text{water}}(\theta, \lambda; \tau) \quad (1)$$

式 (1) における右辺の3つの項は、それぞれ、ユースタティック海面変動、氷床荷重、そして海水荷重による海面変動の影響を見積もる項として定義される。右辺第一項で表されるユースタティック海面変動 (eustatic または equivalent sea-level) は、次の式で定義される:

$$\Delta Z_{\text{est}}(\theta, \lambda; \tau) = \{ \rho_{\text{ice}} \times \Delta V_{\text{ice}}(\tau) \} / \{ \rho_{\text{water}} \times \Delta A_{\text{ocean}}(\tau) \} \quad (2)$$

ρ_{ice} , ρ_{water} はそれぞれ氷と海水の密度、 ΔV_{ice} は、現在と時間 τ における氷床体積の差、そして ΔA_{ocean} は現在と時間 t における海洋面積の変化量である。この項は、氷床から融け出した水が海洋に移動し、そのときの海の面積に応じて海面が上昇する効果を表しており、氷床の融解史に強く規定される。

氷床荷重による影響を見積もる右辺第二項は、氷床の消長により引き起こされる地殻の変形が海面変動に与える効果を表す。これは、マントルや地殻そして地球表層の質量の再配分に伴うジオイドの変化の影響も含む。この項は、地球のレオロジカルな構造 (マントルの粘性、アセノスフェアの厚さなど) と氷床の時間的、空間的分布の関数である。氷床の荷重による地殻均衡は、氷河性地殻均衡 (glacio-isostasy) と呼ばれる。

(1) 式の三項目の海水荷重による海面変動に対する影響を見積もる項は、氷床から融けだした水の荷重で海洋底が変形を受け、それが海面変動に及ぼす効果を表している。海水の荷重による地殻均衡のことをハイドロアイソスタシーという。

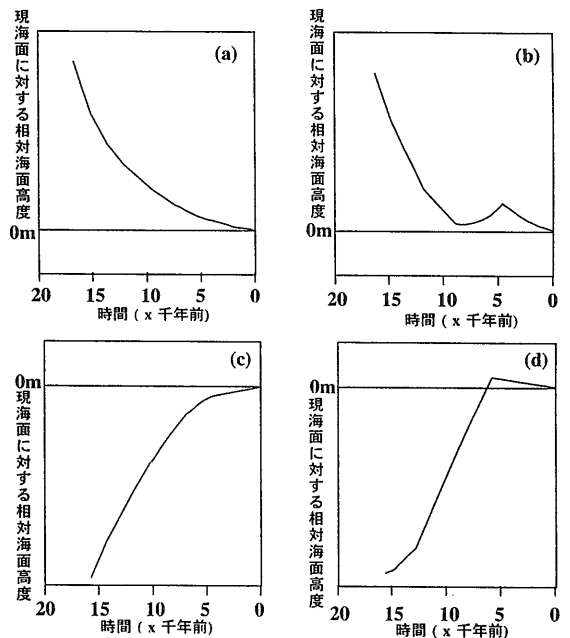
海面高度の変化の方程式 (1) を解いて過去の海面変動を知るためには、時間的・空間的な氷床の消長の記録、地球のレオロジカルな構造パラメータ、そして時間の関数として与えられた海洋地形の3種類のデータを、入力値として用意する必要がある。

3. 海面変動の3つのタイプ

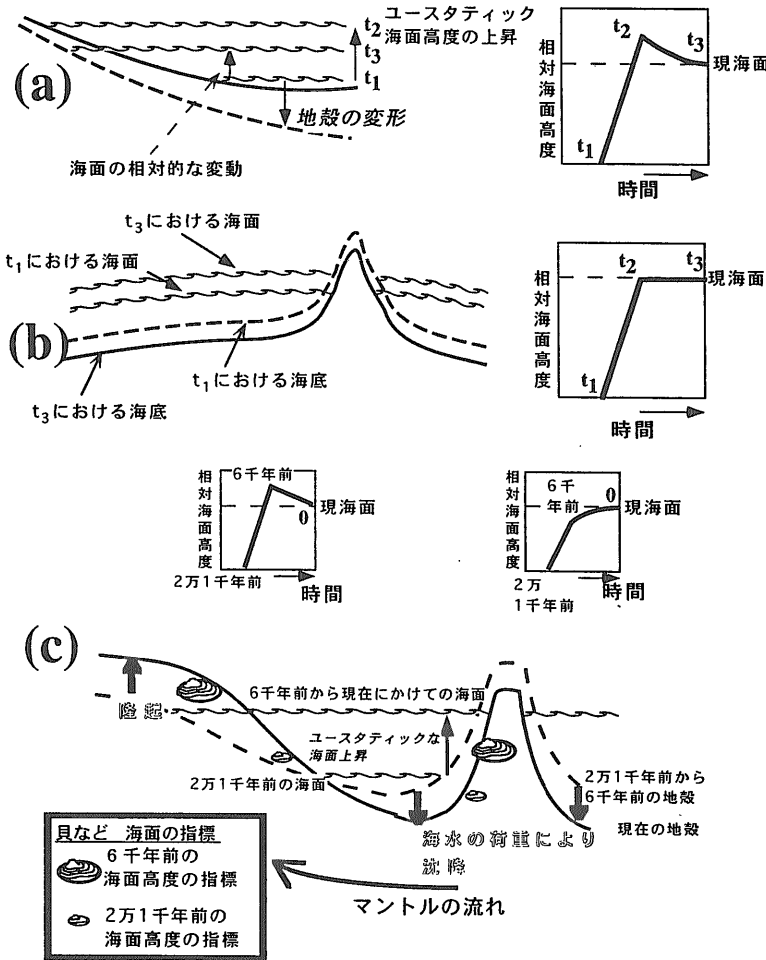
地球上のいろいろな場所で観測される海面変動

の記録は、かつて存在した氷床域からの距離に応じてタイプ分けが可能である。氷床域あるいはその周辺域を near-field、かつての氷床域から中程度に離れた地域を intermediate-field、十分に離れた地点を far-field とよぶ。たとえば、オランダやフランスの大西洋沿岸域は、フェノスカンデア氷床の intermediate-field となり、オーストラリア沿岸や南アフリカ、日本や東南アジアなどは far-field にあたる。それぞれの地点における典型的な海面変動曲線を第2図に示す。

Near-field における海面変動のデータは、氷床の融解史と地球のレオロジカルな構造の違いのどちらにも強く影響を受ける。つまり、これらの地域での海面変動は、ユースタティック海面変動の他に、氷床荷重の影響による地殻変動の影響をも反映している。一般に後者の影響の方が大きく、海面変動記録からそれぞれの成分をとりだすことは困難である。氷床域から離れ、ユースタティック海面変動の影響の方が氷床荷重の影響よりも大きくなるところが、intermediate-field と呼ばれる。一方で、far-field においては、たとえ最終氷期最盛期でも地球のレオロジカルな構造の変化による影響は少な



第2図 氷床からの距離により変わる、海面変動曲線の典型的なタイプ。(a) 旧氷床域、(b) near-field、(c) intermediate-field、(d) far-field の大陸縁辺域 (Lambeck, 1993 を改変)。



第3図

Far-fieldの沿岸域(a)と海洋島(b)における海面変動の概念図。この地域における海面変動の特徴は、時間 t_2 において、沿岸域では完新世高海面が認められるのに対し、海洋島ではそれが存在しない。(c)はハイドロアイススタシーによる、地殻傾動についての概念図。融水によって増加した海水の荷重が、海域にのみ加わり、ユースタティック海面上昇がおわった6,000年前から現在にかけて、海域では沈降し、それによりマンテル物質が移動し、陸域では隆起する。従って、かつては同じレベルにあったはずの、過去のある時期の海面高度の指標が、現在では、海域では陸域よりも低い位置にあらわれることになる。

く、更新世後期から完新世の海面変動は、ユースタティック海面変動の歴史、そして氷床融解史を決めるのに極めて有効である。

式(1)の第一項に直接関係する氷床の時間的消長を知ることは、重要なことである。北半球域の氷床は、比較的良好に研究されている(例えば、Denton and Hughes, 1981)が、南極氷床の消長についてはそれほど詳しく知られていない(Zwartz et al.; 1998)。氷床学的・地形学的に過去の氷床の盛衰を見積もる方法としては、地形に残された氷床拡大の証拠(モレーンなど)を解析するものがあり、水平方向への氷床の拡大は比較的詳しく推定することができる。しかし、氷床の厚さなど垂直方向に関しては推定の信頼度は著しく低い。さらに水平方向についても、氷床の一部が海に位置している場合などは地形学的方法をとるのも困難となる。しかしながらFar-fieldの海面変動を研究することにより、

地球の氷床の消長の歴史、つまりユースタティック海面変動の復元が可能となる。つまりintermediate-fieldまたはfar-fieldに生息するサンゴから海面変動の情報を引き出す際、もっとも期待されるのは、ユースタティック海面変動の復元に対する貢献である。熱帯や亜熱帯のサンゴ記録が、はるか離れた高緯度地方に存在した氷床の消長の歴史を留めていることになる訳である。

Intermediate-fieldやfar-fieldの大陸縁辺における地点において、海水の荷重によるハイドロアイススタシーが海面変動に与える影響は、氷河性地殻均衡にくらべ比較的大きい。融水により増加した海水の荷重が海洋底のみに限られるので、その下のマンテル物質が陸側の方に流れ込み、その結果として相対的に高い海面の指標が陸側に残り、海側に向かうにつれ、比較的低い海面高度の指標が残る(第3図)。これらの観測値は、オーストラリアの

北東海岸 (Chappell, *et al.*, 1982; Nakada and Lambeck, 1989) や北半球では日本の西九州などで研究され (Yokoyama *et al.*, 1996), 計算値との比較によりマントルレオロジーの推定に使われている (Nakada *et al.*, 1998).

4. 海面の指標としてのサンゴとその年代

過去の海面の情報を得る際に必要な条件は、まずその試料が平均海面に対してどれくらいの位置にあったのかを知ることである。一般にサンゴの上方成長は、ほぼ平均低潮位に限定されるため、サンゴ礁地形の形成過程に注意を払えば、過去の海面のよい指標となる。Chappell (1980) は海面上昇に伴うサンゴ礁の発達過程についてのモデルを提唱しており、Neuman and Macintyre (1985) はサンゴ礁の形成と海面変動との関係を、Keep-up タイプ、Catch-up タイプそして Give-up タイプの3つにわけて議論している。このようにサンゴ礁の発達過程と海面変動とはとても密接な関係にあり、過去の海面高度の指標としてサンゴを使うことは、たいへん有効である。

海面変動の情報を得る上でもう一つの重要な要素は、海面高度の指標となるサンゴが息息した時期は今からどれくらい前のことなのかということ調べることである。放射性炭素を使った年代測定 (^{14}C 法) とウラン系列核種を使った年代測定法 (U/Th 法) がそれである。炭酸カルシウムからなるサンゴ骨格は、生育当時の海水中の炭素を取り込み骨格中に固定する。死後、サンゴ骨格が炭素について閉鎖系を保っていたとすると、半減期が 5,730 年の ^{14}C を使ってそれがどのくらい前のサンゴなのかを調べることができる。加速器質量分析器 (AMS) を使った方法が一般的になってきた現在、数十 mg の試料での測定が可能となった。しかし一方で、 ^{14}C 法はいくつかの問題を抱えている。その中の一つが、過去の大気中や海洋の ^{14}C 濃度は一定ではなかったという点、つまり、 ^{14}C 年代尺度と一般の暦年代とは、ずれが生じるという問題である。これは、例えば暦年代で約 20,000 年前のサンプルが ^{14}C 年代では約 17,200 年と出てしまうというように、実際の年代より 2,800 年も若くなってしまう (Bard *et al.*, 1993)。大気中 ^{14}C 濃度の変動の原

因は、主に地球磁場強度の変動、太陽活動の変化、地球上の炭素リザーバーの変化などと考えられている (Bard *et al.*, 1990; Laj *et al.*, 1996)。

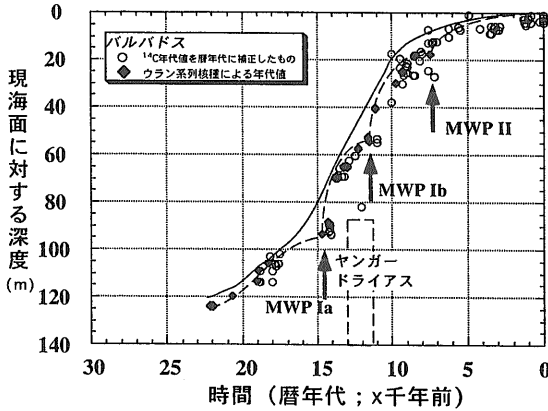
一方、サンゴは海水中のウランを取り込みそれを骨格に保存するため、ウラン系列核種の年代測定に使用できる (Veeh and Burnett, 1982)。ウラン系列年代測定法は、 ^{14}C 法とは異なり正確な暦年代を与えると考えられている。最近では TIMS (表面電離型質量分析計; Thermal Ionization Mass Spectrometry) によって、少ない試料と短い時間で、同位体比の測定が正確にできるようになり (Edwards, *et al.*, 1986; 1988), 更新世のサンゴの年代測定をする際の重要な測定法となってきている (Stirling *et al.*, 1995; Esat, 1995)。

サンゴを年代測定に使用する際、サンゴがその死後 ^{14}C や ^{234}U の壊変系列核種に関して閉鎖系が保たれていなければならない。アラゴナイトからなるサンゴ骨格は、常温常圧下では、より安定なカルサイトに変化してゆく (Deer *et al.*, 1967)。そうすると、 ^{14}C や U-Th についての閉鎖系が崩れてしまい、正しい年代を示さなくなる (Chappell *et al.*, 1974; Chen *et al.*, 1991)。年代測定には、続成作用を受けていない初生アラゴナイトから成るサンゴを用いなければならない。

5. サンゴによる海面変動研究

第四紀後期の海面変動の研究には、隆起サンゴ礁段丘を使った研究 (Bloom *et al.*, 1974; Chappell, 1974; Chappell *et al.*, 1996) や深海堆積物の有孔虫殻の酸素同位体を使った研究 (Shackleton and Opdyke, 1973; Shackleton, 1987) がある。後者は極域氷床は相対的に海水より軽い酸素同位体比をもつということを利用して、サンゴ礁段丘の研究と酸素同位体の研究結果から得られた海面変動の記録は、大まかな部分では一致をみている (Chappell, *et al.*, 1996)。しかし、酸素同位体は氷床のサイズによる変化のみではなく水温や塩分などによっても変動するため、詳細にはズレが認められ、特に氷期のそれは大きい。

氷期の海面変動の復元は、それが現在の海面下に位置することもあり、なかなか研究が進んでいない。それでも 1989 年に Fairbanks がバルバドス沖



第4図 バルバドスでの最終氷期最盛期からの融氷期についての海面変動の記録。Fairbanks (1989)と Bard *et al.* (1993) のデータを Calib.3.0 (Stuiver and Reimer, 1993) により、暦年代に補正。実線はサンゴの生息深度等を考慮して、スムージングしたもの。サンゴのデータポイントをたどった海面変動曲線(点線)では明らかだった融氷パルス(MWP; melt water puls) IaとMWP IbそれにMWP IIであるが、実線では不明瞭になる。タヒチのコアではMWP IIの証拠は認められていない。MWPはBlanchon and Shaw (1995)ではCRE (Catastrophic Sea-level Rise Event)に対応する。

のサンゴをボーリングによって回収し年代測定値を公表した頃から (Fairbanks, 1989), パプアニューギニア (Chappell and Pollach, 1991), タヒチ (Bard *et al.*, 1996) などで、サンゴのボーリングが行われ、後氷期の海面上昇の様子が明らかになってきた(第4図)。これらの海面変動曲線は、氷床学的に求められた氷床の消長記録と海面変動の計算値を比較して得られたユースタティック海面変動曲線と調理的である (Nakada and Lambeck, 1988)。

また、後氷期の連続的なサンゴ試料について、ウラン系列年代測定法と¹⁴C法を同時に適用することにより、古い時代まで¹⁴C年代と暦年代のズレを補正することが可能になった。一般に、¹⁴C年代の補正は、樹木年輪のカウントとその材の¹⁴C年代の対比によるが、11,000年以前についての¹⁴C年代補正は得られていなかった (Becker and Kromer, 1993; Stuiver and Reimer, 1993)。サンゴのU/Thと¹⁴Cを測定することにより、その補正年代区間をおよそ50,000年前まで遡ることができるようになったのである (Bard *et al.*, 1990;1993; Yokoyama *et al.*, 1997)。

6. まとめ

優れた海面指標となる造礁サンゴは、¹⁴C法とU/Th法の2つの年代測定法を用いることができるため、ユースタティック海面変動曲線すなわち氷床の消長を暦年代で描くための貴重な試料となると同時に、¹⁴C年代の補正にも応用できる。ボーリングなどによって、さまざまな年代から連続的にサンゴ試料を得ることは、最終氷期最盛期以降の融氷の歴史や海面上昇の速度などを明かにするために重要であり、多くのサンゴ礁でのサンプリングが望まれる。後氷期に限っても、急激な海水準上昇イベント (Catastrophic Sea-level Rise Event) の有無 (Blanchon and Show, 1995) や融氷パルスの規模とタイミング (Fairbanks, 1989; Chappell and Polach, 1991; Bard *et al.*, 1996) など、サンゴ試料から得られる情報は多い。さらに¹⁴CとU/Th分析を組み合わせた手法を用いることにより、気候や海洋環境の変動についても新たな知見が期待される (Bard *et al.*, 1993; Edwards *et al.*, 1993; Beck *et al.*, 1997)。

謝辞：オーストラリア国立大学地球科学研究所のK. Lambeck教授と九州大学理学部の中田正夫教授には、研究全般にわたりいろいろな助言をいただいた。地質調査所 海洋地質部の鈴木 淳博士、川幡穂高博士には草稿を読んでいただいた。記して謝意を表する。

文 献

Bard E., Hamelin, B., Fairbanks, R.G., and Zindler, A. (1990) : Calibration of the ¹⁴C timescale over the past 30,000 years using mass spectrometric U-Th ages from Barbados corals. *Nature*, 345, 405-410.

Bard E., Arnold, M., Fairbanks, R.G., and Hamelin, B. (1993) : ²³⁰Th-²³⁴U and ¹⁴C ages obtained by mass spectrometry on corals. *Radiocarbon*, 35, 191-199.

Bard E., Hamelin, B., Arnold, M., Montaggioni, L., Cabioch, G., faure, G., and Rougerie, F. (1996) : Deglacial sea-level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge. *Nature*, 382, 241-244.

Beck J. W., Recy, J., Taylor, F., Edwards, R.L., and Cabioch, G. (1997) : Abrupt changes in early Holocene tropical sea surface temperature derived from coral records. *Nature*, 385, 705-707.

Becker B., and Kromer, B. (1993) : The continental tree-ring record-absolute chronology, ¹⁴C calibration and climatic change at 11ka. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 103, 67-71.

- Blanchon P., and Shaw, J. (1995) : Reef drowning during the last deglaciation: Evidence for catastrophic sea-level rise and ice-sheet collapse. *Geology*, 23, 4-8.
- Bloom A. L., Broecker, W.S., Chappel, J.M.A., Matthews, R.K., and Mesoelle, K.J. (1974) : Quaternary sea level fluctuations on a tectonic coast: New $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dates from the Huon Peninsula, New Guinea. *Quaternary Research*, 4, 185-205.
- Chappell J. (1974) : Geology of coral terraces, Huon peninsula, New Guinea: A Study for Quaternary Tectonic Movements and Sea-Level Changes. *Geological Society of American Bulletin*, 85, 553-570.
- Chappell J. (1980) : Coral morphology, diversity and reef growth. *Nature* 286, 249-252.
- Chappell J., and Polach, H. (1991) : Post-glacial sea-level rise from a coral record at Huon Peninsula, Papua New Guinea. *Nature*, 349, 147-149.
- Chappell J., Rhodes E.G., Thom B.G., and Qallensky E. (1982) : Hydro-isostasy and the sea-level isobase of 5,000 B.P. in North Queensland, Australia. *Marine Geol*, 49, 81-90.
- Chappell J., Omura, A., Esat, T., McCulloch, M., Pandolfi, J., Ota, Y., and Pillans, B. (1996) : Reconciliation of late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 141, 227-236.
- Chen J. H., Curran, H.A., White, B., Wasserburg, G.J. (1991) : Precise chronology of the last interglacial period: ^{234}U - ^{230}Th data from fossil coral reefs in the Bahamas. *Geological Society of American Bulletin*, 103, 82-97.
- Deer W.A., Howie R.A., and Zussman J. (1967) : Rock forming minerals. London, Longmans, Green and Co Ltd.
- Denton, G.H. and Hughes, T.J. (eds) (1981) : The Last Great Ice Sheets. Wiley, New York.
- Edwards R. L., Chen, J.H., and Wasserburg, G.J. (1986) : ^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th systematics and precise measurement of time over the past 500,000 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 81, 175-192.
- Edwards R. L., Taylor, F.W., and Wasserburg, G.J. (1988) : Dating earthquakes with high-precision thorium-230 ages of very young corals. *Earth and Planetary Science Letters*, 90, 371-381.
- Edwards R. L., Beck, J.W., Burr, G.S., Donahue, D.J., Chappell, J.M.A., Bloom, A.L., Druffel, E.R.M., Taylor, F.W. (1993) : A Large Drop in Atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ and Reduced Melting in the Younger Dryas, Documented with ^{230}Th Ages of Corals. *Science*, 260, 962-968.
- Esat, T. (1995) : Charge collection thermal ion mass spectrometry of thorium. *Int. J. Mass Spectrom. Ion Processes*, 148, 159-170.
- Fairbanks R. G. (1989) : A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342, 637-642.
- Farrell W. E., and Clark, J.A. (1976) : On postglacial sea-level. *Geophys J. Roy. astr. Soc.*, 46, 647-667.
- Laj C., Mazaud, A., and Duplessy, J.-C. (1996) : Geomagnetic intensity and ^{14}C abundance in the atmosphere and ocean during the past 50 kyr. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 2045-2048.
- Lambeck, K. (1993) : Glacial rebound and sea-level change: an example of a relationship between mantle and surface processes. *Tectonophysics*, 223, 15-37.
- Nakada M., and Lambeck, K. (1987) : Glacial rebound and relative sea-level variations: a new appraisal. *Geophys J. Roy. astr. Soc.*, 90, 171-224.
- Nakada M., and Lambeck, K. (1988) : The melting history of the Late Pleistocene Antarctic ice sheet. *Nature*, 333, 36-40.
- Nakada M., and Lambeck, K. (1989) : Late Pleistocene and Holocene sea-level change in the Australian region and mantle rheology. *Geophys. J. Int.*, 96, 497-517.
- Nakada M., Okuno J., Yokoyama Y., Nagaoka S., Takano S., and Maeda Y. (1998) : Mid-Holocene underwater Jomon sites along the west coast of Kyushu, Japan, hydro-isostasy and asthenospheric viscosity. 第四紀研究 (印刷中).
- National Research Council (1990) : Sea-level change. National Academy Press, Washington D.C., 234p.
- Neumann, A.C., and Macintyre, I.G. (1985) : Reef response to sea level rise: Keep-up, catch-up or give-up. *Proc. 5th Int. Coral Reef Congr.*, 3, 105-110.
- 大村明雄 (1988) : 中部琉球喜界島の地史—琉球石灰岩産サンゴ化石のウラン系列年代測定法のまとめとして—。地質学論集, 29, 253-268.
- Shackleton N. J. (1987) : Oxygen isotopes, Ice volume and Sea level. *Quaternary Science Reviews*, 6, 183-190.
- Shackleton N. J., and Opdyke N.D. (1973) : Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific core V28-238: oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 10^5 year and 10^6 scale. *Quaternary Research*, 3, 39-55.
- Stirling C. H., Esat, T.M., McCulloch, M.T., and Lambeck, K. (1995) : High-precision U-series dating of corals from Western Australia and implications for the timing and duration of the Last Interglacial. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 135, 115-130.
- Stuiver, M., and Reimer, P.J. (1993) : Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program. *Radiocarbon*, 35, 215-230.
- Yokoyama Y., Nakada, M., Maeda, Y., Nagaoka, S., Okuno, J., Matsumoto, E., Sato, H., and Matsushima, Y. (1996) : Holocene sea-level change and hydro-isostasy along the west coast of Kyushu, Japan. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 123, 29-47.
- Yokoyama Y., Esat T., Lambeck K., Fifield K., Cresswell R., Liu K., and di Tada M. (1997) : Radiocarbon time scale calibration. *Ann. Rep. Res School Earth Sci. ANU* 40-41.
- Veeh H.H., and Burnett W.C. (1982) : Carbonate and phosphate sediments. In: Ivanovich M., and Harmon R.S. (eds), Uranium Series Disequilibrium Applications to Environmental Problems. Oxford Univ. Press, pp. 459-80.
- Zwartz D., Bird M., Stone J., and Lambeck K. (1998) : Holocene sea-level change and ice sheet history in the Vestfold Hills, East Antarctica. *Earth Planet. Sci. Lett.* 155, 131-145.

YOKOYAMA Yusuke (1998) : Late Quaternary sea-level change and radiometric dating of coral.

< 受付 : 1998年6月12日 >