2008 年度日本第四紀学会学術賞受賞記念論文

ターミネーションの気候変動

横 山 祐 典^{*1, 2}

海水準の変動は、第四紀の特徴である氷期—間氷期の環境変動を復元することのできる優れた指標である。海水準変動の研究をもとに、地球の近過去の中で最も大きな環境変動である、氷期から間氷期への移行期の気候変動について概観する。特に、最終氷期から現在の間氷期への変遷期と、一つ前の氷期から最終間氷期への変遷期について論ずる。なかでも地球の公転軌道要素、大気中の温室効果ガス、高緯度氷床量といった 3 つの主要な構成要素の変化の相互関係を中心に議論する。

キーワード：海水準、氷期—間氷期、温室効果ガス、炭素循環、ドール・森田効果

I. はじめに

第四紀の気候の大きな特徴の一つは、氷期—間氷期の繰り返しである。地球の公転軌道要素の変化にともなった日射量変化の緯度分布がトリガーとなって、氷床の盛衰や表層気温の変化をもたらしている。氷期には、北米や北欧の地殻を 1,000 m ほど沈める大規模な氷床が存在し (図 1)、全球の海水準は 120~130 m 下がっている (例えば、Yokoyama *et al.*, 2000a, 2001a, 2007a ; 横山, 2004)。

近年、高緯度氷床コアの研究から、日射量変化と、温室効果ガスや気温、ダスト量の変化などとの関係についても細かく議論ができるようになってきた。海水準変動は、第 0 次近似的には全球氷床量の最も正確な指標といえるため、過去の平均的な気候状況 (つまり、氷期と間氷期の変遷) を表すのに優れている。いわゆる高緯度

た (例えば、Yokoyama *et al.*, 2000a, 2001a, 2007a ; 横山, 2004)。

図 1 最終氷期最盛期 (およそ 2 万年前) の北半球氷床分布
Denton and Hughs (1981) を改変。

2010 年 4 月 20 日受付。2010 年 9 月 25 日受理。2009 年 6 月 27 日受賞記念講演会 (於：日本大学) にて講演。

*1 東京大学大気海洋研究所海洋底科学部門および地球表層圏変動研究センター/大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
〒277-8564 柏市柏の葉 5-1-5. E-mail : yokoyama@aori.u-tokyo.ac.jp

*2 海洋研究開発機構海洋・極限環境生物圏研究領域 〒237-0061 横須賀市夏島町 2-15.

の水床変動を直接的に表すことができるため、ミランコビッチ仮説を検証する目的にも用いることができる。

ミランコビッチ仮説では、地球の公転軌道要素の変化にともない、北半球高緯度 (65°N) の夏の日射量に変化することで、氷期-間氷期の変化を起こしているとした。実際、過去の気候変動は、質量分析装置を使った定量的なプロキシ (間接指標) の分析と年代測定が行われるようになって、海洋堆積物の有孔虫の酸素同位体比の分析の周期解析から、公転軌道要素によると思われる周期が卓越していることが明らかになった (Hays *et al.*, 1976)。しかし、未だに多くの謎は残ったままである。例えば卓越周期のうち、10 万年周期は離心率変動によるものだが、それによる氷期-間氷期の日射量の変化はきわめて小さく、単独で氷期-間氷期の気候変動を引き起こしているとは考えにくい。また、アイスコアや海洋プロキシのデータは、第四紀前半、中期更新世までの氷期-間氷期周期は 4 万年であり (図 2)、振幅も第四紀後半ほど大きくなかった (例えば, Clark *et al.*, 2006)。

また、公転軌道要素の気候のフォーシング (外力) 以外に、地球表層環境システムの中でのフィードバック機構の役割も重要である。特に、温室効果ガスの存在は重要で、表層の炭素循環とグローバルな気候変動との前後関係を解明することで、表層の気候サブシステムのつながりを明らかにしようとする研究が広く行われている (例えば, EPICA Community Members, 2006)。その解明にも高時間分解能の海水準曲線が用いられ、氷床量の増減にともなった海洋循環の強弱の研究 (例えば, Edwards *et al.*, 1993; Stocker and Write, 1998; Yokoyama *et al.*, 2001b, c) や、海水準変動と海洋循環の変化にともなう ENSO の変化などの研究もさかに行われている (例えば, Martinez *et al.*, 2003, 2006, 2010; Camoin *et al.*, 2007; Chang *et al.*, 2009; Simms *et al.*,

2009, 2010; González *et al.*, 2010; Inoue *et al.*, 2010)。

本小論では、特に氷期から間氷期へ移行する期間であるターミネーションに注目する。特に、直近の氷期-間氷期の移行期であるターミネーション I と最終間氷期への移行期であるターミネーション II について取り上げる (図 3)。なかでも海水準変動復元の研究を中心に、炭素循環を含む地球表層環境変動についての最近の知見について紹介する。なお年代は、特に断りがないかぎり

図 3 過去 14 万年間の北緯 65° 夏の日射量変化と海水準変動 (横山, 2007a)

図 2 赤道太平洋深海堆積物の底棲有孔虫酸素同位体比曲線

図 4 海水準変動にともなう地球表層の荷重分配変化と固体地球の変形 (横山, 2009a)

暦年代を用いている (例えば, Yokoyama *et al.*, 2000b, 2007b, 2008, 2010a ; Reimer *et al.*, 2004).

II. 海水準変動

陸域水床が融けると海水量が増大する. しかし, 海水準変動の観測値は, 海水量変化と同義ではない. 固体地球の変形を考慮する必要があるためである (図 4). 前述のように, 最終氷期最盛期 (LGM) (22~19 cal ka : Mix *et al.*, 2001) には厚さ 3,000 m にも達していた氷床直下の大陸地殻は, アイススタシーを保つために現在よりも沈降していた (例えば, 横山, 2009a). したがって, 氷床融解にともなう陸域にあった荷重が海水となって海域に移ると, 大陸地殻は隆起する. 一方, 海域では増大した海水の荷重により, 海底が沈降する. 前者をグレイ

シオアイススタシー, 後者をハイドロアイススタシーとよぶ (Nakada and Lambeck, 1987). したがって, 海水準変動の観測値には, 旧氷床域からの距離に依存した 3 つのタイプが存在し, 近い方からそれぞれ, 氷床近傍 (Near-field) 型, 中距離 (Intermediate field) 型, そして遠距離 (Far-field) 型がある. 詳しくは横山 (2004, 2007a, b, 2009a) を参照されたい (図 5).

気候変動と高緯度氷床量の変化の関係を解明しようとする場合, Far-field, つまり旧氷床域から十分離れた地域での海面変動の観測値を用いる必要がある. 低緯度地域のうち, 地震などによるテクトニクス活動が活発ではない場所は, これに適している. しかし, このような地域の海水準でも, アイススタシーの効果は LGM で最大 10~15% の変化をもたらすため (図 6), 地球物理学的なモデルによる補正が必要である (例えば, Yokoyama *et al.*, 2000a, 2001a, c, 2006a ; Lambeck *et al.*, 2002, 2003 ; Milne *et al.*, 2009).

1. 直接観測値

過去の相対的な海水準を決定する方法には, 汽水域の堆積物を異なる深度 (高度) の海底 (陸上) から採取する方法 (Yokoyama *et al.*, 1996) と, 生息深度のわかっているサンゴの深度と年代を用いて相対的な海水準変動を求める方法の 2 種類がある. 前者の例として, 南シナ海の大陸棚の堆積物に含まれるマングローブ堆積物を, 異なる水深から掘削し, ターミネーション I の相対的な海水準変動曲線を復元した研究成果が 2000 年にドイツのグループから発表された (Hanebuth *et al.*, 2000). マングローブは潮間帯に生息するため, マングローブ堆積物の深度分布を解析することで, 過去の相対的な海面変動曲線を描くことができる (図 7). その結果, LGM 直後から完新世の始めまでの海水準変化曲線を復元した. 一方, 同じく 2000 年には, 北西オーストラリアのボナパルト湾の堆積物の解析により, LGM の最低海水準とそれに引き続く海水準上昇が明らかになった (Yokoyama *et al.*, 2000a, 2001a, d). アイススタシーの効果を検討した氷床量相当海水準を求めたこの研究では, 最大氷床量を求めることに成功し, ターミネーションの開始時期が, それまで考えられていた 18 ka (1 ka = 1,000 年前) よりおよそ 1,000 年も遅ることがわかった (Yokoyama, 2010a). この 19 ka のターミネーション開始時期は, 当初議論をよんだ (例えば, Shennan and Milne, 2003) が, 現在では広く受け入れられ (例えば, Clark *et al.*, 2004 ; McCabe *et al.*, 2005, 2007), 再度対象深度を精査した結果でも, 同様の上昇記録が見つかり (DeDeckker and

図 5 旧氷床域からの距離により変化する海水準観測値の変化

アイススタシーの寄与の変化により, 海水量変化は同じでも, 異なる海水準観測値が得られる (横山, 2007a). 旧氷床域 (a) および氷床縁辺域 (b) では, アイススタシーの影響が海水準観測値 (相対的な海水準) に強く反映されるのに対し, Intermediate field (c) および Far-field (d) のそれは, 海水量変化に敏感に反応する.

図 6 アイソスタシーの違いによる観測される海水準計算値の変化

Far-field に位置するオーストラリアのグレートバリアリーフの例 (Yokoyama *et al.*, 2006a を改変). ESL は氷床融解モデルで A—A', B—B' 断面に沿った, 海水準変動観測値 (相対的海水準) の予測値が示されている. 約 2 万年前には, ESL より相対的海水準の値が 25 m も浅い. つまりローカルな海面変化の観測値を使って, グローバルな氷床量 (または海水量) 変動を議論する上で, この補正はきわめて重要であることを示している.

図 7 Intermediate- および Far-field における海水準変動の観測値

Lambeck *et al.* (2002) を改変.

図 8 海水準指標として有効な隆起サンゴ礁および現海面下のサンゴ
地殻変動が活発な地域では、氷期のサンゴ礁が隆起して露頭を形成している (a~c)。隆起速度が求まると、当時の海水準を決定できる (例えば, Yokoyama *et al.*, 2001a, b; Esat and Yokoyama, 2006)。LGM や最終融氷期のサンゴは、船上掘削により海面下から採取する (d: Expedition 310 Scientists, 2006)。

Yokoyama, 2009), 氷床学的にも重要な意味をもつイベントとして注目された (Lambeck *et al.*, 2000; 横山, 2002)。

一方で、近年のターミネーション I における海水準変動の先駆的な情報は、バルバドス沖の海底から採取されたサンゴからもたらされた。大西洋のカリブ海には、太平洋に比べてサンゴの生息種数が圧倒的に少なく、バルバドス沖にはシカツノミドリイシ (*Acropora palmate*) という水深 5 m 以浅に生息する種が特徴的に分布する。このサンゴの生息深度と年代を決定することで、それまでよりも圧倒的に正確な海水準変化曲線が得られた

(Fairbanks, 1989)。さらにサンゴは、ウラン系列核種について閉鎖系を保っているため (Yokoyama and Esat, 2004), ウラン系列による年代決定も行われた (Bard *et al.*, 1990)。サンゴを使った研究は、同じくタヒチ (Bard *et al.*, 1996, 2010; Montaggioni *et al.*, 1997) や、パプアニューギニア (Chappell and Polach, 1991; Edwards *et al.*, 1993) でも行われ (図 8), ターミネーション I の海水準上昇が、ゆっくりと単調に増加したわけではなく、時折急激な変化をともしながら引き起こされたことが明らかになってきた (図 9: Fleming *et al.*, 1998; Lambeck *et al.*, 2002)。

図 9 Far-field から求められた海水準の観測値をアイソスタシーのモデルを用いて
氷床量相当海水準変動値に求めた値

LGM の直後の 19 ka mwp (Yokoyama *et al.*, 2000a, 2001a; DeDeckker and Yokoyama, 2009) や 14 ka の mwp 1a (Fairbanks, 1989) など急激な上昇や停滞を経て、現在の海面高度まで達していることがわかる。Lamberck *et al.* (2002) を改変。

2. 間接的な指標

全球氷床量のプロキシ(代替指標)としては、古くは底棲有孔虫の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{bf}}$) を使う方法がある (Shackleton, 1987)。地球表層の水循環変動により、大陸氷床は海水に比べて、30~40‰ほど軽い酸素同位体比をもった水により構成されている(横山, 2004, 2009b)。したがって、間氷期にはそれらが融解し海洋にもたらされることで、海水の酸素同位体比の平均組成は約 1‰軽くなる (Schrag *et al.*, 2002)。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{bf}}$ は、グローバルな氷床量変動の長期傾向をとらえることができるため、氷床コアなどの気候変動指標と対比する際に広く用いられている。Lisiecki and Raymo (2005) は、異なる海域の 57 本の深海堆積物コアの $\delta^{18}\text{O}_{\text{bf}}$ をスタックし、過去 530 万年間の氷床量変動記録 (LR04) を復元している(図 10)。また Bintanja *et al.* (2005) は、LR04 を用いて年代モデルを構築している。これらのデータにはおよそ 3,000~4,000 年の年代誤差が付随すると考えられており、海水準の見積もりにも 10~15 m の誤差がある (Waelbroeck *et al.*, 2002)。しかし近年、この方法を使って気候変動のタイミングを決定することの問題点が指摘されている。特に、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{bf}}$ が氷床量変動のほかにローカ

ルな水循環プロセスの違いに起因した海水温などの変化のために、例えば北西大西洋のコアから得られた $\delta^{18}\text{O}_{\text{bf}}$ 記録と東赤道太平洋の深海堆積物の $\delta^{18}\text{O}_{\text{bf}}$ 記録とでは、およそ 4,000 年もの時間差が現れることが報告された (Skinner and Shackleton, 2005)。

海水準変動の連続記録を復元するもう一つの方法は、Far-field に存在する縁海の海洋堆積物を用いるものである。特に、外洋との海峡の水深がおよそ 150 m であるような海域では、海水準の変動にともない、外海との海水の交換の影響が内部の塩分変化をもたらす(図 11)。そのため、降水と蒸発のバランスや河川流入量や海水温などを与えることができれば、海水準変動を復元することが可能となる (Rohling *et al.*, 1998; Siddall *et al.*, 2003; Yokoyama *et al.*, 2007a)。この方法での海水準の復元値にはおよそ 10 m の誤差が付随する (Siddall *et al.*, 2003)。

III. 氷期一問氷期での炭素循環変動

氷床コアにトラップされた大気組成を調べた結果、過去 80 万年間、大気中二酸化炭素濃度と表層気温との間にきわめて高い相関があることが明らかになった

図 10 世界の異なる海盆の 57 本の深海堆積物コアから得られた酸素同位体比曲線をスタックして求められた海面変動曲線
Lisiecki and Raymo (2005) を改変.

(EPICA Community Members, 2006). また、大気中の二酸化炭素は、氷期には約 190 ppm、間氷期には約 280 ppm と一定の幅で変化していることがわかった。およそ 100 ppm の大気二酸化炭素の変動はどのようにしてもたらされているのか。図 12 に示すように、海洋、特に深海は、大気と比較して 60 倍の炭素量をもつことから、氷期には大気二酸化炭素が深海に隔離されていたと考えられている (Broecker and Peng, 1982)。

炭素循環の中で重要な位置を占める大気二酸化炭素の深海への隔離のメカニズムには、大きく分けて次の 3 つの種類がある。詳しくは、野崎 (1994)、Sigman and Boyle (2000) や Archer (2003) などを参照されたい。概説すると、一つめは、物理的に海洋へ二酸化炭素を溶け込ませる「溶解ポンプ」である (図 13)。これは、気温が低く風

が強い氷期には、海水に気体を溶解させやすいことなど、塩分や海水の広がりなどが影響して変化するものである。最終的に海洋循環など物理的に深海へ輸送され、DIC (溶存無機炭素) として隔離されるものである。二つめは「有機物ポンプ」とよばれるものである (図 13)。植物プランクトンの光合成によって有機物として、大気二酸化炭素が固定され、そして深海に移動し、一部は堆積物として埋没し、また一部はそこで分解することにより DIC となる。これは光や温度に加え、窒素やリン、鉄などの栄養塩なども重要な規定要因となっている。最後のタイプは「炭酸塩ポンプ」である (図 13)。生物がつくる炭酸カルシウムの増減や溶解により、海水中のアルカリ度が増加することで、大気二酸化炭素分圧の変化に影響する。

図 11 日本海の深海堆積物に見られる表層塩分変動記録

周囲をおよそ 130 m 以浅の海峡で囲まれた日本海では、海水準変動にともなう外洋との海水の交換により塩分が変化すが、特に氷期の氷床が拡大していた時期の海水準が精度よく反映される。Yokoyama *et al.* (2007a) を改変。

図 12 地球表層の炭素循環

大気のリザーバに比べて海洋は 60 倍も大きいため、海洋の変化がすぐに大気へと反映される。

氷期に大気二酸化炭素分圧を 100 ppm ほど減少させるメカニズムとして、これまでにさまざまな方法が提唱されている(表 1)。過去 80 万年間の氷床コアの、気温と二酸化炭素変動の高い相関は、複数メカニズムの組み合

わせが、それぞれのターミネーションで同じように働いて、類似の変動をしているとは考えにくい。しかし、いずれのメカニズムも、単独で 80~100 ppm の変化をもたらすことができない。一方で、後述するように、このうち浅海でのサンゴ礁生育の減少、大陸から南大洋へのダスト供給、海洋全体での栄養塩の増大については、いずれも海水準変動と連動して引き起こされるものであるとして、否定されてきた(Broecker and Henderson, 1998)。ほかの方法にもそれぞれ問題点が残っており、未解決の問題である(IPCC, 2007)。

IV. ターミネーション I

では、直近の氷期の終焉から現在の間氷期である完新世への移り変わりはどのように起こったのだろうか。まず 22 ka に、北緯 65°の夏の日射量が増加する(図 14)。そのため、北半球高緯度の気温が上昇し、氷床融解の引き金となる。実際、グリーンランド氷床コアには、気温の上昇傾向が記録されており(Alley *et al.*, 2002)、上述した LGM 終焉期に認められる海水準急上昇期(19 ka-Mwp)も北半球氷床起源であることが報告されている

図 13 深海に炭素を隔離する自然界の3つのポンプ

表 1 氷期における大気中二酸化炭素低下のメカニズム

1. 陸上における CaCO_3 風化の増大	
2. 浅海でのサンゴ礁の減少	○
3. 海洋沈降物質の有機物と CaCO_3 の比の変化	
4. 大陸からのダスト供給増による南大洋での有機物生産	○
5. 海洋全体での栄養塩増大による有機物生産増加	○
6. 有機物中の炭素/栄養塩の比の増大	
7. 海水温低下による CO_2 溶解度増加	
8. 海水増大による大気-海洋間のガス交換減少	
9. 南大洋の成層化による炭素の深海への隔離	
○印は海水準変動と連動した変化要因。	

IPCC (2007) 改変.

(Bond *et al.*, 1997; Yokoyama *et al.*, 2000a; Elliot *et al.*, 2002; Clark *et al.*, 2004). さらに、氷床の部分崩壊によりもたらされた淡水が、北大西洋の深層水形成を弱め、熱分配の両極シーソー現象 (Stocker *et al.*, 1992) によって南大洋の水温が上昇する。これは、およそ 19 ka から上昇に転ずる南極氷床コアの気温の記録として保存されている (図 14)。南大洋の水温上昇は、海水の広がりをおさえるため、それまで深海に隔離されていた二酸化炭素が大気中に放出される。南極の氷床コア中の二酸化炭素変動は、このシナリオもサポートする (図 14)。放出

図 14 ターミネーション I における気候変動時系列

Severinghaus (2009) を改変.

された二酸化炭素は、温室効果ガスとして地球温暖化を加速する正のフィードバックとして働き、北半球氷床を融解させる (Severinghaus, 2009). その後、ヤンガードライアスといった急激な気候変動などもはさみながら (例えば, Yokoyama *et al.*, 2006b), 完新世に至っている (Yokoyama, 2010a, b).

すなわち、古気候・古海洋の記録と古気候シミュレーションの結果から、ターミネーション I では、北緯65°N の夏の日射量変化が、気候変動の起点となっていることが明らかになってきた (図 14). また、この一連のプロセスの中では、大気二酸化炭素がきわめて重要な役割を果たしている. 実際、二酸化炭素濃度が氷期のままのレベルにとどまっていたとすると、完新世の海水準は現在の間氷期のレベルにまでは到達しなかった、つまり氷床が一部融け残る状態で海面は現在より低い状態にとどまっていた可能性が、モデルの結果から示唆されている (Abe-Ouchi *et al.*, 2007).

V. ターミネーション II

ターミネーション II は、海洋酸素同位体ステージ (MIS) の 5e とほぼ同時期の最終間氷期に至るまでの融氷期をさす (図 3). 比較的データが多くそろったターミネーション I に対して、この時期は同じレベルのデータの量と質では議論を行うことができない. そこで、Broecker and Henderson (1998) は、プリンストン大学の Bender など氷床コアを研究しているグループが採用した方法を使って、氷床コアの情報のみでターミネーションにおける気候変動の前後関係を議論できないかという方法を探った (Bender *et al.*, 1994). それは氷期・間氷期でのドール・森田効果 (Morita, 1935; Dole, 1936) の還元方法を応用したものである. 大気中の酸素同位体比は、標準海水の酸素同位体比より 23.5‰ 重くなっている (Kroopnick and Craig, 1972). これは植生の呼吸と光合成のバランスによってもたらされと考えられているため、すなわち氷期と間氷期では表層の植生分布が異なることから、この値がシフトすると考えられる. 一方で、海洋表層に生息する光合成生物は、その大気中の二酸化炭素と海水を使って有機物を生み出し、酸素を放出する. ここで、氷床の融解が起こり海水準が上昇すると、光合成の際の「原料」である海水の酸素同位体比を軽い方向へシフトさせるため、生成される大気中の酸素同位体比も軽い方向へシフトする. したがって、植生の光合成活動にともなう大気中酸素同位体比変動の見積もりを正確に行うことが可能であれば、大気中の酸素の同位体

比は氷床量の関数として取り扱うことができる (例えば, Shackleton, 2000). Broecker and Henderson (1998) はまず、年代決定がしっかりしているターミネーション I における氷床コア中の二酸化炭素と酸素同位体比の変化のタイミングについて調べた (図 15). その結果、大気二酸化炭素の変化におよそ 2,000 年遅れて、大気中の酸素同位体比が変化することをつきとめた. さらに、バルバドス沖から得られたサンゴの海面変化曲線と対比することで、酸素同位体比が同じく 2,000 年遅れて変化することを確かめた. その後、おなじ南極のボストークコアのターミネーション II の対象層準を調べたところ、酸素同位体比の変化は大気二酸化炭素の変化に 4,000 年ほど遅れて変化することが明らかになった. ターミネーション II では、北半球高緯度の夏の日射量の増加が 140 ka にスタートし、それに遅れて大気酸素同位体比の変化が認められる. これを海水準変動の指標として考えるのであれば、128 ka に氷床が融けて海水準が上昇したということになる. 二酸化炭素の増加は明らかに大気中の酸素同位体比 (海水準) 変動よりも早く、すなわち、氷期-間氷期の大気二酸化炭素濃度変化のメカニズムとして、海水準変動に関連したもの (表 1) は除外して考えなければならないということになった (Broecker and Henderson, 1998).

過去 5 万年より遡って年代を決定できる海水準の指標は、サンゴのみである (Yokoyama *et al.*, 2008). 間接的に α 線計測で測定する方法は 1960~70 年代から行われてきたが (例えば, Omura, 1976), 近年では質量分析装

図 15 ターミネーション I における海水準変動カーブと氷床コア中の酸素同位体比変化カーブ (Broecker and Henderson, 1998)

類似の 2 つの曲線は、およそ 2,000 年のタイムラグをもつ。

図 16 タヒチの IODP コア中から得られたサンゴの深度および年代と海水準カーブとの関係
Thomas et al. (2009) を改変.

置を併用したウラン系列年代測定法を使うことで、12 万年前のサンプルでも誤差が 1% あるいはそれ以下と高精度の測定が可能となった (例えば, Yokoyama et al., 2000b, 2001 a, c; Yokoyama and Esat, 2004; Esat and Yokoyama, 2006; Stirling and Andersen, 2009; 横山, 2009c). しかし, 現在より全球の水床量が大きく, 海面が低下していたサンゴを採取するのはきわめて大きな困難が伴う. 統合国際深海掘削計画 (IODP) の Exp. 310 では, 南太平洋のタヒチ島沖のサンゴ礁を掘削し, 過去の氷期および融氷期の海水準と気候変動を復元するプロジェクトが行われた (Expedition 310 Scientists, 2006). この航海で得られたサンゴの分析の結果, 融氷期の環境変動 (例えば, Asami et al., 2009; Inoue et al., 2010) や海水準変動について (Deschamps et al., 2009) の新たな知見が得られた. その中で, われわれはターミネーション II に注目し, 海水準変動のタイミングと規模について, 果たして Broecker and Henderson (1998) で提唱された前述のようなシナリオが成り立つのか, 直接的なデータを得ることとした (Thomas et al., 2009).

サンゴが形成された際の骨格はアラレ石からなるが, 続成が進むと方解石へと変質する. また, 海水中で二次的なアラレ石の結晶の沈着なども問題となる. このような続成作用の影響のないサンプルを選んで分析することが, 正しい年代を得る上できわめて重要である

(例えば, Yokoyama et al., 2001b, c; Yokoyama and Esat, 2004; Esat and Yokoyama, 2006). X 線による分析や電子顕微鏡による観察から, 続成を受けていないサンゴを選出して, ウラン系列年代測定をオックスフォード大学の誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS) を用いて行った.

まず, およそ 3~4 万年前の MIS 3 (海洋酸素同位体ステージ 3) に相当するサンゴの年代と深度, それに Far-field で得られている海水準のカーブ (Chappell et al., 1996; Yokoyama et al., 2001a; Cutler et al., 2003; Siddall et al., 2003; Arz et al., 2007) と比較し, タヒチのサンゴの種組成が示す生息深度を求めた (図 16). 次に, ターミネーション II に相当する層準のサンゴを分析した. サンゴの年代は連続記録ではないため, 先行研究の海洋堆積物を用いた海水準変動曲線 (Bintanja et al., 2005) と組み合わせることで, ターミネーション II の海水準変動を復元した. それによると, サンゴの年代と生息深度により Bintanja の曲線の年代軸が 4,500 年ずれることが明らかとなった (図 17). これは, 彼らの曲線のもつ年代誤差の範囲である. つまり, およそ 153.4~152.7 ka の海水準は, 現海面より 103~109 m 低かった (図 17). また海水準が上昇に転ずるタイミングは 142 ka となり, ドームふじの水床コアから求められた二酸化炭素濃度上昇のタイミングとほぼ一致する. この時

図 17 ターミネーションIIの海水準と氷床コアのガスの酸素同位体比変化曲線, そしてドームふじ南極氷床コアから得られた大気中二酸化炭素変化
海水準の上昇がすべての変化に先んじて起こっている。また、氷床コアのガス中の酸素同位体比は、海水準変動曲線よりも有意に遅れて変化している。Thomas *et al.* (2009) を改変。

期のドームふじの年代誤差はおよそ $\pm 2,000$ 年である (Kawamura *et al.*, 2007)。

また、このほかに信頼のおけるウラン系列年代が得られた 137 ka 付近の海面は、すでに -85 m まで海水準が上昇したことを示す (図 17)。さらに、*Acropora* や *Porites*、そして同時に産出する石灰藻の産出変化から、海水準が一度 -85 m より浅い深度まで上昇し、その後 20 m 以上低下した後に、さらに上昇したことを表している。Bintanja の曲線は 3,000 年間の平均化データを使っているため、1,000 年スケールの海水準変動はとらえることができない。したがって、高時間分解能をもった紅海の記録 (Siddall *et al.*, 2003) との比較を試みた。その結果、年代決定の誤差範囲である 1,600 年古くスライドさせることで、タヒチのデータと一致し、海面の一時上昇および下降といった急激な変動の存在を確認することができた (図 17)。このターミネーションIIにおける海面の急激な上昇および下降、再び上昇といった変化は、最初にパプアニューギニアのヒュオン半島から報告

され (Esat *et al.*, 1999)、タヒチの有孔虫を使ったわれわれの研究からも示唆されている (Fujita *et al.*, 2010)。しかし、この海水準のエクスカッションの規模は、最終氷期最盛期 (20 ka) に存在した北欧氷床の総量よりも大きく、この規模の変化が比較的短期間で起こることによる、全球的な気候変化への影響も大きかったと考えられるため、今後のさらなる進展が期待されるテーマである。

さて、海水準上昇のタイミングである 142 ka は、氷床コアの酸素同位体比変化よりも 5,000 年以上早く起こっている。このことは、つまり氷期-間氷期の移行期におけるドール・森田効果の単純な仮定をおくことで、大気酸素同位体比を海水準の指標として用いること (Bender *et al.*, 1994; Shackleton, 2000) の危険性を示している。実際、この可能性については、これまでに氷床コアの研究者からも指摘されていた (例えば、Jouzel *et al.*, 2002)。

さらに、今回の海水準上昇のタイミングは、ポストー

図 18 ターミネーションⅡの海水準変化曲線と南北高緯度の夏の日射量変化の関係
Thomas *et al.* (2009) を改変.

ク氷床コアの大気二酸化炭素変化のタイミングに先行して起きており、氷期一週氷期の二酸化炭素濃度の変化に、海水準変動が関係したメカニズムも組み入れて考えられうることを示している。詳細は省くが、近年はこれまで大勢を占めていた「氷期一週氷期の二酸化炭素変動のメカニズムは、一つでなければならない」という「暗黙の了解」が見直されつつある（例えば、Archer, 2003）。今回の研究成果と合わせて、異なるメカニズムを複数組み合わせることにより、およそ 100 ppm という大きな変化を説明できるようになるであろう。

これまでの古気候・古海洋学の研究では、ミランコビッチ仮説により提唱された、北半球高緯度の夏の日射量が最大の時に氷床融解が最大であるということ（Milankovitch, 1930）を用いて年代モデルの構築がされてきた（例えば、Imbrie *et al.*, 1984; Martinson *et al.*, 1987）。しかし、タヒチのサンゴから求められた海面上昇のタイミングは、北半球高緯度の日射量変化のタイミングより、およそ 7,000 年も早い。ターミネーションⅠとターミネーションⅡの気候変化のプロセスが異なる可能性があることを示しており、いわゆるオービタルチューニングを用いて年代を決定し、1,000 年スケールの議論

を組み立てる際には注意が必要であることを示す。

ターミネーションⅡの海面上昇は、北半球の高緯度日射量が低下して最小値を示す時期に起こっている（図 18）。一方、南半球の夏の日射量は最大に近い時期にあたり、実際にターミネーションⅠの融氷期も、南半球の夏の日射量が大い時に起こっている。このことは、南半球の日射量変化の融氷期における重要性や、融氷期の気候変化の日射量変化に対する確率論的な反応（Wunsch, 2004）など、日射量変化に対する地球の気候システムの複雑な応答過程の存在が示唆される。

VI. ま と め

海水準は地球表層の平均的な気候状態に対応するため、古気候・古海洋学の重要な研究対象である。分析技術の発展と、氷床コアや水深 40 m 以深のサンゴ礁群掘削などの特殊なサンプルから、過去の 2 回のターミネーションにおける日射量変化、海水準変動（氷床量変動）、大気二酸化炭素変動、気温変化などの異なる情報を高時間分解能で復元できるようになってきた。その結果、近年には、地球表層システムの複雑なメカニズムの解明に繋がる重要なデータが報告されてきている。例え

ば、現在進行中の IODP Exp. 325 グレートバリアリーフ (共同首席研究員: 横山祐典/Jody Webster) で得られた結果の解析が進むと、タヒチのデータで制約が与えられなかった海水準上昇の規模の直接的な解明や、大気二酸化炭素吸収放出のメカニズムの解明などの知見が加えられていくことが期待される。今後、大気海洋結合大循環モデル (AOGCM) と古気候データとの比較を進めていくことにより (例えば, Yokoyama *et al.*, 2010b), 物質循環を含んだ地球の気候システムの理解が深まってくと考えられる。

謝辞 2008 年度日本第四紀学会学術賞という立派な賞をいただくにあたり、これまで私が研究を進めてきた中で、多くの助言やサポートをいただいたすべての方々に心より感謝いたします。国立極地研究所の三浦英樹博士には、推薦書を準備していただきました。産業技術総合研究所の鈴木 淳主任研究員には、草稿を読んでいただきました。図 13 は大学院生の山口保彦氏に手伝っていただいて作成しました。編集委員会の池原 研博士と綿引裕子編集書記の編集コメントにより原稿が改善されました。本研究は、日本・オーストラリア・アメリカの大学および研究所に拠点を移しながら取り組んできたものです。本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金などの支援により行われました。

引 用 文 献

- Abe-Ouchi, A., Segawa, S. and Saito, F. (2007) Climatic conditions for modelling the Northern Hemisphere ice sheets throughout the ice age cycle. *Climate of the Past*, 3, 423-438.
- Alley, R.B., Brook, E.J. and Anandakrishnan, S. (2002) A northern lead in the orbital band: North-south phasing of ice-age events. *Quaternary Science Reviews*, 21, 431-441.
- Archer, D. (2003) Biological fluxes in the ocean and atmospheric $p\text{CO}_2$. *Treatise on Geochemistry*, 6, 275-291.
- Arz, H.W., Lamy, F., Ganopolski, A., Nowaczyk, N. and Pätzold, J. (2007) Dominant Northern Hemisphere climate control over millennial-scale glacial sea-level variability. *Quaternary Science Reviews*, 26, 312-321.
- Asami, R., Felis, T., Deschamps, P., Hanawa, K., Iryu, Y., Bard, E., Durand, N. and Murayama, M. (2009) Evidence for tropical South Pacific climate change during the Younger Dryas and the Bølling-Allerød from geochemical records of fossil Tahiti corals. *Earth and Planetary Science Letters*, 288, 96-107.
- Bard, E., Hamelin, B. and Fairbanks, R.G. (1990) U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados: Sea level during the past 130,000 years. *Nature*, 346, 456-458.
- Bard, E., Hamelin, B., Arnold, M., Montaggioni, L.F., 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.
- Bard, E., Hamelin, B. and Delanghe-Sabatier, D. (2010) Deglacial Meltwater Pulse 1B and Younger Dryas sea levels revisited with boreholes at Tahiti. *Nature*, 327, 1235-1237.
- Bender, M., Sowers, T. and Labeyrie, L. (1994) The Dole effect and its variations during the last 130,000 years as measured in the Vostok ice core. *Global Biogeochemical Cycles*, 8, 363-376.
- Bintanja, R., van de Wal, R.S.W. and Oerlemans, J. (2005) Modelled atmospheric temperatures and global sea levels over the past million years. *Nature*, 437, 125-128.
- Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Almasi, P., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajadas, I. and Bonani, G. (1997) A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 278, 1257-1266.
- Broecker, W.S. and Henderson, G. (1998) The sequence of events surrounding termination II and their implications for the causes of glacial interglacial CO_2 changes. *Paleoceanography*, 13, 352-364.
- Broecker, W.S. and Peng, T.H. (1982) *Tracers in the sea*. 690 p, Sclidgio, Palisades.
- Camoin, G.F., Iryu, Y., McInroy, D.B. and the IODP Expedition 310 Scientists (2007) IODP expedition 310 reconstructs sea level, climatic, and environmental changes in the South Pacific during the Last Deglaciation. *Scientific Drilling*, 5, 4-12.
- Chang, Y.-P., Chen, M.-T., Yokoyama, Y., Matsuzaki, H., Thompson, W.G., Kao, S.-J. and Kawahata, H. (2009) Monsoon hydrography and productivity

- changes in the East China Sea during the past 100,000 years : Okinawa Trough evidence (MD 012404). *Paleoceanography*, 24 (PA3208), doi : 10.1029/2007PA001577.
- 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., Omura, A., Esat, T.M., McCulloch, M.T., 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 and Planetary Science Letters*, 141, 227–236.
- Clark, P.U., McCabe, A.M., Mix, A.C. and Weaver, A.J. (2004) Rapid rise of sea level 19,000 years ago and its global implications. *Science*, 304, 1141–1144.
- Clark, P.U., Archer, D., Pollard, D., Blum, J.D., Rial, J. A., Brovkin, V., Mix, A.C., Pisias, N.G. and Roy, M. (2006) The middle Pleistocene transition : Characteristics, mechanisms, and implications for long-term changes in atmospheric $p\text{CO}_2$. *Quaternary Science Reviews*, 25, 3150–3184.
- Cutler, K.B., Edwards, R.L., Taylor, F.W., Cheng, H., Adkins, J., Gallup, C.D., Cutler, P.M., Burr, G.S. and Bloom, A.L. (2003) Rapid sea-level fall and deep ocean temperature change since the last interglacial period. *Earth and Planetary Science Letters*, 206, 253–271.
- DeDeckker, P. and Yokoyama, Y. (2009) Micropalaeontological evidence for Late Quaternary sea-level changes in Bonaparte Gulf, Australia. *Global and Planetary Change*, 66, 85–92.
- Denton, G.H. and Hughes, T.J. (1981) *The last great ice sheets*. 484 p, John Wiley and Sons.
- Deschamps, P., Durand, N., Bard, E., Hamelin, B., Camoin, G., Thomas, A.L., Henderson, G.M. and Yokoyama, Y. (2009) Synchronicity of Meltwater Pulse 1A and the Bolling onset : New evidence from the IODP “Tahiti Sea-Level” Expedition. *Geophysical Research Abstracts*, 11 (EGU2009-10233).
- Dole, M. (1936) The relative atomic weight of oxygen in water and in air. *Journal of Chemical Physics*, 4, 268–275.
- Edwards, R.L., Beck, J.W., Burr, G.S., Donahue, D.J., Chappell, J.M.A., Bloom, A.L., Druffel, E.R.M. and 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.
- Elliot, M., Labeyrie, L. and Duplessy, J.-C. (2002) Changes in North Atlantic deep-water formation associated with the Dansgaard-Oeschger temperature oscillations (60–10 ka). *Quaternary Science Reviews*, 21, 1153–1165.
- EPICA Community Members (2006) One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. *Nature*, 444, 195–198.
- Esat, T.M. and Yokoyama, Y. (2006) Variability in the Uranium isotopic composition of the oceans over glacial-interglacial timescale. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 4140–4150.
- Esat, T.M., McCulloch, M.T., Chappell, J., Pillans, B. and Omura, A. (1999) Rapid fluctuations in sea level recorded at Huon Peninsula during the Penultimate deglaciation. *Science*, 283, 197–201.
- Expedition 310 Scientists (2006) Tahiti sea level : The last deglacial sea level rise in the South Pacific : Offshore drilling in Tahiti (French Polynesia). 270 p, IODP Preliminary Report, 310.
- Fairbanks, R.G. (1989) A 17,000-year glacio-eustatic sea level record : Influence of glacial melting dates on Younger Dryas event and deep ocean circulation. *Nature*, 342, 637–642.
- Fleming, K., Johnston, P., Zwart, D., Yokoyama, Y., Lambeck, K. and Chappell, J. (1998) Refining the eustatic sea level curve since Last Glacial Maximum using far-intermediate field sites. *Earth and Planetary Science Letters*, 163, 327–342.
- Fujita, K., Omori, A., Yokoyama, Y., Sakai, S. and Iryu, Y. (2010) Sea-level rise during Termination II inferred from large benthic foraminifers : IODP Expedition 310, Tahiti sea level. *Marine Geology*, 271, 149–155.
- González, C., Urrego, L. E., Martínez, J. I., Polanía, J. and Yokoyama, Y. (2010) Late Holocene mangrove dynamics in the Colombian Caribbean : A history of human and natural disturbances. *The Holocene*, 20, 849–861.

- Hanebuth, T., Stattegger, K. and Grootes, P.M. (2000) Rapid flooding of the Sunda Shelf : A late glacial sea-level record. *Science*, 288, 1033–1035.
- Hays, J.D., Imbrie, J. and Shackleton, N.J. (1976) Variations in the Earth's Orbit : Pacemaker of the ice ages. *Science*, 194, 1121–1132.
- Imbrie, J., McIntyre, A. and Mix, A.C. (1984) Oceanic response to orbital forcing in the late Quaternary : Observational and experimental strategies. Berger, A., Schneider, S.H. and Duplessy, J.-C. (eds.) *Climate and geosciences, a challenge for science and society in the 21st century* : 121–164, Kluwer Academic.
- Inoue, M., Yokoyama, Y., Harada, M., Suzuki, A., Kawahata, H., Matsuzaki, H. and Iryu, Y. (2010) Trace element variations in fossil corals from Tahiti collected by IODP Expedition 310 : Reconstruction of marine environments during the last deglaciation (15 to 9 ka). *Marine Geology*, 271, 303–306.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007—The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, 996 p, Cambridge University Press.
- Jouzel, J., Hoffmann, G., Parrenin, F. and Waelbroeck, C. (2002) Atmospheric oxygen 18 and sea-level changes. *Quaternary Science Reviews*, 21, 307–314.
- Kawamura, K., Parrenin, F., Lisiecki, L., Uemura, R., Vimeux, F., Severinghaus, J.P., Hutterli, M.A., Nakazawa, T., Aoki, S., Jouzel, J., Raymo, M.E., Matsumoto, K., Nakata, H., Motoyama, H., Fujita, S., Goto-Azuma, K., Fujii, Y. and Watanabe, O. (2007) Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years. *Nature*, 448, 912–916.
- Kroopnick, P. and Craig, H. (1972) Atmospheric oxygen : Isotopic composition and solubility fractionation. *Science*, 175, 54–55.
- Lambeck, K., Yokoyama, Y., Johnston, P. and Purcell, A. (2000) Global ice volumes at the Last Glacial Maximum. *Earth and Planetary Science Letters*, 181, 513–527.
- Lambeck, K., Yokoyama, Y. and Purcell, A. (2002) Into and out of the Last Glacial Maximum : Sea-level change during oxygen isotope stages 3 and 2. *Quaternary Science Reviews*, 21, 343–360.
- Lambeck, K., Purcell, A., Johnston, P., Nakada, M. and Yokoyama, Y. (2003) Water-load definition in the glacio-hydro-isostatic sea-level equation. *Quaternary Science Reviews*, 22, 309–318.
- Lisiecki, L.E. and Raymo, M.E. (2005) A Pliocene–Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20, PA1003.
- Martínez, I., Keigwin, L., Barrows, T.T., Yokoyama, Y. and Southon, J. (2003) La Niña like conditions in the eastern Equatorial Pacific and a stronger Choco jet in the northern Andes during the last glaciation. *Paleoceanography*, 18, 1033, doi : 10.1029/ 2002PA 00877.
- Martínez, J.I., Rincon, D., Yokoyama, Y. and Barrows, T.T. (2006) Foraminifera and coccolithophorid assemblage changes in the Panama Basin during the last deglaciation : Response to sea-surface productivity induced by transient climate change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234, 114–126.
- Martínez, J.I., Yokoyama, Y., Gomez, A., Delgado, A. and Matsuzaki, H. (2010) Late Holocene marine terraces of the Cartagena region, southern Caribbean : The product of neotectonism or a former high stand in sea-level?. *Journal of South American Earth Sciences*, 29, 214–224.
- Martinson, D.G., Pisias, N.G., Hays, J.D., Imbrie, J., Moore Jr., T.C. and Shackleton, N.J. (1987) Age dating and the orbital theory of the ice ages : Development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27, 1–29.
- McCabe, A.M., Clark, P.U. and Clark, J. (2005) AMS ^{14}C dating of deglacial events in the Irish Sea Basin and other sectors of the British–Irish ice sheet. *Quaternary Science Reviews*, 24, 1673–1690.
- McCabe, A.M., Clark, P.U., Clark, J. and Dunlop, P. (2007) Radiocarbon constraints on readvances of the British–Irish ice sheet in the northern Irish Sea basin during the last deglaciation. *Quaternary Science Reviews*, 26, 1204–1211.
- Milankovitch, M. (1930) *Mathematische klimalehre und astronomische theorie der klimaschwankungen*. Köppen, W. and Geiger, R. (eds.) *Handbuch der Klimatologie*, Band 1, Teil A, Bornträger : 1–176.

- Milne, G.A., Gehrels, W.R., Hughes, C.W. and Tamisiea, M.E. (2009) Identifying the causes of sea-level change. *Nature Geoscience*, 2, 471–478.
- Mix, A.C., Bard, E. and Schneider, R. (2001) Environmental processes of the ice age : Land, oceans, glaciers (EPILOG). *Quaternary Science Reviews*, 20, 627–657.
- Montaggioni, L.F., Cabiochi, G., Camoin, G., Bard, E., Ribaud-Laurenti, A., Faure, G., Dejardin, P. and Récy, J. (1997) Continuous record of reef growth over the past 14 k.y. on the mid-Pacific island of Tahiti. *Geology*, 25, 555–558.
- Morita, N. (1935) The increased density of air oxygen relative to water oxygen. *Journal of Chemical Society of Japan*, 56, 1291.
- Nakada, M. and Lambeck, K. (1987) Glacial rebound and relative sea-level variations : A new appraisal. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 90, 171–224.
- 野崎義行 (1994) 地球温暖化と海一炭素の循環から探る. 196 p, 東京大学出版会.
- Omura, A. (1976) Thorium and protactinium isotopes in some present-day hermatypic corals and their implications to dating. *Transactions and Proceedings of the Paleontological Society of Japan, New Series*, 101, 271–290.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Bertrand, C.J.H., Blackwell, P.G., Buck, C.E., Burr, G.S., Cutler, K.B., Damon, P.E., Edwards, R.L., Fairbanks, R.G., Friedrich, M., Guilderson, T.P., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Ramsey, C.B., Reimer, R.W., Remmele, S., Southon, J.R., Steiver, M., Talamo, S., Taylor, F.W., van der Plicht, J. and Weyhenmeyer, C.E. (2004) Intcal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0–26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46, 1029–1058.
- Rohling, E.J., Jorissen, M.J., Bertand, P., Ganssen, G. and Caulet, J.P. (1998) Magnitudes of sea-level low-stands of the past 500,000 years. *Nature*, 394, 162–165.
- Schrag, D.P., Adkins, J.F., McIntyre, K., Alexander, J. L., Hodell, D.A., Charles, C.D. and McManus, J.F. (2002) The oxygen isotopic composition of seawater during the last glacial maximum. *Quaternary Science Reviews*, 21, 331–342.
- Severinghaus, J.P. (2009) Climate change : Southern see-saw seen. *Nature*, 457, 1093–1094.
- Shackleton, N.J. (1987) Oxygen isotopes, ice volume and sea level. *Quaternary Science Reviews*, 6, 183–190.
- Shackleton, N.J. (2000) The 100,000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity. *Science*, 289, 1897–1902.
- Shennan, I. and Milne, G. (2003) Sea level observations around the Last Glacial Maximum from the Bonaparte Gulf, NW Australia. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1543–1547.
- Siddall, M., Rohling, E.J., Almogi-Labin, A., Hemleben, C., Meischner, D., Schmelzer, I. and Smeed, D.A. (2003) Sea-level fluctuations during the last glacial cycle. *Nature*, 423, 853–858.
- Sigman, D.M. and Boyle, E.A. (2000) Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide. *Nature*, 407, 859–869.
- Simms, A.R., Aryal, N., Yokoyama, Y., Matsuzaki, H. and Dewitt, R. (2009) Insights on a proposed mid-Holocene highstand along the northwestern Gulf of Mexico from the evolution of small coastal ponds. *Journal of Sedimentary Research*, 79, 757–772.
- Simms, A.R., Aryal, N., Miller, L. and Yokoyama, Y. (2010) The incised valley of Baffin Bay, Texas : A tale of two climates. *Sedimentology*, 57, 642–669.
- Skinner, L.C. and Shackleton, N.J. (2005) An Alternative lead over Pacific deep-water change across Termination I : Implications for the application of the marine isotope stage stratigraphy. *Quaternary Science Reviews*, 24, 571–580.
- Stirling, C.H. and Andersen, M.B. (2009) Uranium-series dating of fossil coral reefs : Extending the sea-level record beyond the last glacial cycle. *Earth and Planetary Science Letters*, 284, 269–283.
- Stocker, T.F. and Write, D.G. (1998) The effect of succession of ocean ventilation changes on ^{14}C . *Radiocarbon*, 40, 359–366.
- Stocker, T.F., Wright, D.G. and Broecker, W.S. (1992) The influence of high-latitude surface forcing on

- the global thermohaline circulation. *Paleoceanography*, 7, 529–541.
- Thomas, A.L., Henderson, G., Deschamps, P., Yokoyama, Y., Mason, A.J., Bard, E., Hamelin, B., Durand, N. and Camoin, G. (2009) Penultimate deglacial sea level timing from uranium/thorium dating of Tahitian corals. *Science*, 324, 1186–1189.
- Waelbroeck, C., Labeyrie, L., Michel, E., Duplessy, J.C., McManus, J.F., Lambeck, K., Balbon, E. and Labracherie, M. (2002) Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. *Quaternary Science Reviews*, 21, 295–305.
- Wunsch, C. (2004) Quantitative estimate of the Milankovitch-forced contribution to observed Quaternary climate change. *Quaternary Science Reviews*, 23, 1001–1012.
- 横山祐典 (2002) 最終氷期最盛期のグローバルな氷床量変動と南極氷床. 月刊地球, 24, 15–22.
- 横山祐典 (2004) 氷期一週氷期スケールおよび Millennial スケールの気候変動の研究: 同位体地球化学的・地球物理学的手法によるアプローチ. 地球化学, 38, 127–150.
- 横山祐典 (2007a) 放射性炭素を用いた気候変動および古海洋研究. 真空, 50, 486–493.
- 横山祐典 (2007b) 地球温暖化と海面上昇. 日本第四紀学会・町田 洋・岩田修二・小野 昭編「地球史が語る近未来の環境」: 33–54, 東京大学出版会.
- 横山祐典 (2009a) 海水準変動とグローバルな氷床量. 日本第四紀学会 50 周年電子出版編集委員会編「デジタルブック最新第四紀学」, CD-ROM: 15, 日本第四紀学会.
- 横山祐典 (2009b) 海水準変動と気候, 海進—海退. 小杉 康・西田泰民・水ノ江和同・谷口康浩・矢野謙一編「縄文時代の考古学 3 大地と森の中で—縄文時代の古生態系—」: 13–24, 同成社.
- 横山祐典 (2009c) TIMS によるサンゴサンプルのウラン系列核種年代測定法. 日本第四紀学会 50 周年電子出版編集委員会編「デジタルブック最新第四紀学」, CD-ROM: 278, 日本第四紀学会.
- Yokoyama, Y. (2010a) Last glacial low stand and shelf exposure. Hopley, D. (ed.) *Encyclopedia of modern coral reefs*. Springer (in press).
- Yokoyama, Y. (2010b) Last glacial interstadials. Hopley, D. (ed.) *Encyclopedia of modern coral reefs*. Springer (in press).
- Yokoyama, Y. and Esat, T.M. (2004) Long term variations of uranium isotopes and radiocarbon in surface seawater as recorded in corals. *Global environmental change in the ocean and on land*, 1, 279–309.
- Yokoyama, Y., Nakada, M., Maeda, Y., Nagaoka, S., Okuno, J., Matsumoto, E., Matsushima, Y. and Sato, H. (1996) Holocene sea-level change and hydroisostasy along the west coast of Kyushu, Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 123, 29–47.
- Yokoyama, Y., Lambeck, K., DeDeckker, P., Johnston, P. and Fifield, L.K. (2000a) Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima. *Nature*, 406, 713–716.
- Yokoyama, Y., Esat, T.M., Lambeck, K. and Fifield, L.K. (2000b) Last ice age millennial scale climate changes recorded in Huon Peninsula corals. *Radiocarbon*, 42, 383–401.
- Yokoyama, Y., DeDeckker, P., Lambeck, K., Johnston, P. and Fifield, L.K. (2001a) Sea-level at the last glacial maximum: Evidence from northwestern Australia to constrain ice volumes for oxygen isotope stage 2. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 165, 281–297.
- Yokoyama, Y., Esat, T.M. and Lambeck, K. (2001b) Coupled climate and sea-level changes deduced from Huon Peninsula coral terraces of the last ice age. *Earth and Planetary Science Letters*, 193, 579–587.
- Yokoyama, Y., Esat, T.M. and Lambeck, K. (2001c) Last Glacial sea-level change deduced from uplifted coral terraces of Huon Peninsula, Papua New Guinea. *Quaternary International*, 83–85, 275–283.
- Yokoyama, Y., Purcell, A., Lambeck, K. and Johnston, P. (2001d) Shore-line reconstruction around Australia during the Last Glacial Maximum and Late glacial Stage. *Quaternary International*, 83–85, 9–18.
- Yokoyama, Y., Purcell, A., Marshall, J.F. and Lambeck, K. (2006a) Sea-level during the early deglaciation period in the Great Barrier Reef, Australia. *Global and Planetary Change*, 53, 147–153.

- Yokoyama, Y., Naruse, T., Ogawa, N.O., Tada, R., Kitazato, H. and Ohkouchi, N. (2006b) Dust influx reconstruction during the last 26,000 years inferred from a sedimentary leaf wax record from the Japan Sea. *Global and Planetary Change*, 54, 239–250.
- Yokoyama, Y., Kido, Y., Tada, R., Minami, I., Finkel, R.C. and Matsuzaki, H. (2007a) Japan Sea oxygen isotope stratigraphy and global sea-level changes for the last 50,000 years recorded in sediment cores from the Oki Ridge. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247, 5–17.
- Yokoyama, Y., Miyairi, Y., Matsuzaki, H. and Tsunomori, F. (2007b) Relation between acid dissolution time in the vacuum test tube and time required for graphitization for AMS target preparation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 259, 330–334.
- Yokoyama, Y., Matsuzaki, H. and Esat, T.M. (2008) Prospects for the new frontiers of earth and environmental sciences. *Quaternary Geochronology*, 3, 206–207.
- Yokoyama, Y., Koizumi, M., Matsuzaki, H., Miyairi, Y. and Ohkouchi, N. (2010a) Developing ultra small-scale radiocarbon sample measurement at the University of Tokyo. *Radiocarbon*, 52, 310–318.
- Yokoyama, Y., Suzuki, A., Siringan, F., Maeda, Y., Abe-Ouchi, A., Ohgaito, R., Kawahata, H. and Matsuzaki, H. (2010b) Northern South China Sea mid Holocene paleoceanography using coupled fossil coral and Atmosphere–Ocean GCM. model. *Geophysical Research Letters*, doi : 10.1029/2010GL044231.

The Paper for the 2008 Japan Association for Quaternary Research Academic Award

Earth surface environmental changes during the last two terminations

Yusuke Yokoyama*^{1,2}

The Glacial-Interglacial cycle is the most prominent feature of the Quaternary environment. The cycles are induced from changes in Earth's orbital parameters though detailed mechanisms such as temporal and spatial asynchronous climate responses which at given times are still uncertain. High-resolution palaeoclimate archives including polar ice cores have been available for the last several decades, and they have revealed the strong coupling between carbon cycle and global climate changes. In this paper, I discuss recent developments in our understanding of surface environmental changes during the last two glacial-interglacial transitions. Providing that glacial to interglacial is

the biggest environmental change of Earth's recent history, palaeoclimate reconstructions based on various proxies can be useful constraints on AOGCMs (Atmosphere Ocean General Circulation Models). To do so, I focus discussions on sea-level history since it is a unique proxy to identify the average status of the surface environment of Earth. Quantities of ocean water, namely global ice volume, can be deduced from sea-level observations if glacio-hydro-isostatic effect is properly treated. Relations among various components of Earth's climate, such as Earth's orbital parameters, carbon cycles, and global ice volumes, are particularly discussed.

Keywords : sea level, Glacial-Interglacial, greenhouse gas, carbon cycle, Dole-Morita effects

*1 Atmosphere and Ocean Research Institute and Department of Earth and Planetary Sciences, University of Tokyo. 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8564, Japan. E-mail : yokoyama@aori.u-tokyo.ac.jp

*2 Institute of Biogeosciences, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC). 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, 237-0061, Japan.