

現在そして将来へむけた古海洋研究 —高時間解像度から長時間変動解析—

川 幡 穂 高^{1,2)}

1. はじめに

地球環境問題が社会的な問題と捉えられるようになって約十数年が経過した。そして、この問題に含まれる地球温暖化、森林の減少、野生生物種の減少、酸性雨、オゾン層破壊、砂漠化などが相互に依存しあって、複雑にからみあっていることが明らかになりつつある。地球環境問題が顕著になった背景には、人類の活動が自然界に大きな影響をもつに至ったことがある。例えば、温暖化問題についてみると、現在は氷期・間氷期という区分けでは間氷期に相当しているが、現在の大気中の二酸化炭素濃度は最終間氷期最盛期の最大レベルを約20%も上回っていることでも明らかのように、人類が化石燃料を使用して大気中に二酸化炭素を放出し、本来の自然界の炭素循環に変調をもたらしているといえる。

現在の地球環境問題のターゲットは50年から100年後の将来予測であるが、精密な海洋観測や気象観測が実施されてきたこの20余年のデータばかりに頼るのは危険で、自然のサイクルの歴史の変遷を定量的に評価しながら、現在の地球表層の環境の位置づけをきちんとしていくことが求められる。

地質調査所では、平成10年度より5年間の予定で工業技術院特別研究「地球環境の変遷に対する海洋物質循環の影響解明の研究」を開始した。これは、自然の働きによる地球表層での物質循環あるいはエネルギー輸送を明らかにすることが研究目的である。ここでは、その中から3つの重要なトピックスについて問題提起を行う。第一番目は、高時間解像度での過去の環境復元である。第二番目は、氷期・間氷期サイクルが顕著であった第四紀後

期に太平洋が地球的規模の気候や海洋環境に果たしてきた役割の解析である。そして、第三番目は、もっと長いタイムスケールでの地球表層環境の変遷の研究で、地球という星の表層環境を決定した本質を探るものである。

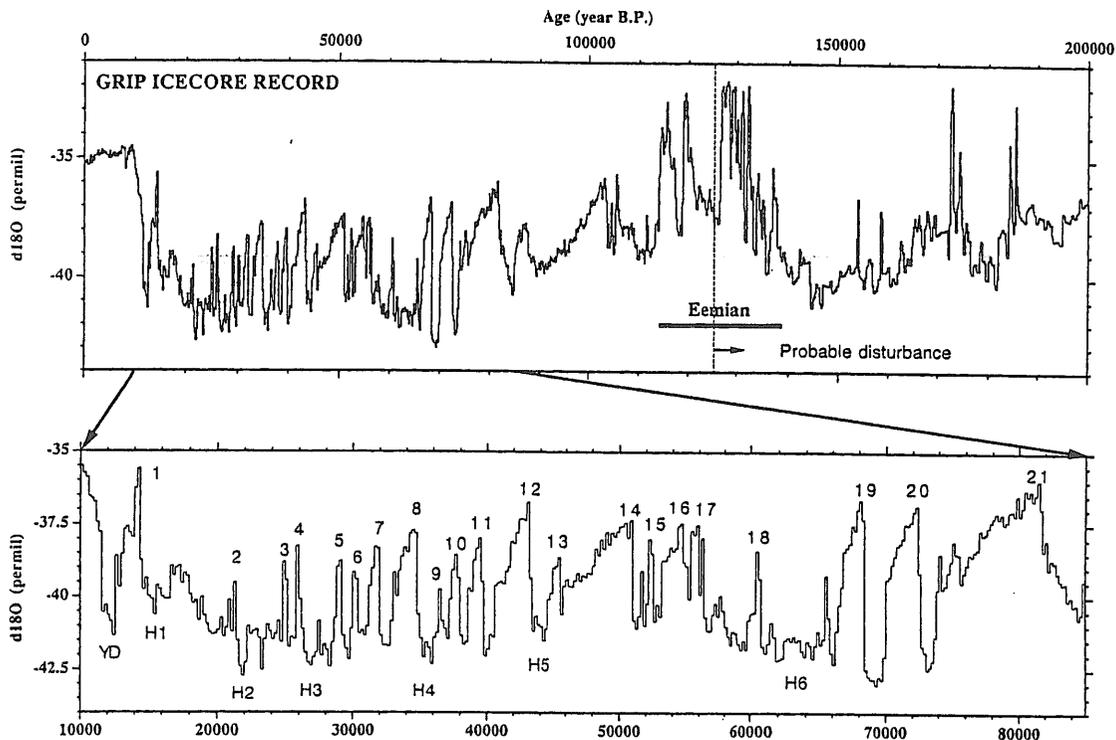
2. 高時間解像度による古環境の復元

グリーンランド氷床コアの酸素同位体比の変動に基づいて、急激な気候変動の繰り返しが実在することが証明され、これはDansgaard-Oeschger cycle (Dansgaard *et al.*, 1993)と呼ばれている(第1図)。この変動の頻度は数百年～数千年に一度であるが、わずか数年～数十年で完了するほど急激な変化を伴っている。この発見は、氷期・間氷期といった数千年から1万年単位で変動する気候変動以外にも短時間で大きな変動をもたらす仕組みが地球表層環境に存在するという点で驚きをもって迎えられた。そこで、高時間解像度による古環境の復元は、地球圏-生物圏国際共同研究(International Geosphere-Biosphere Programme, 略称IGBP)のコアプロジェクトの一つであるページーズ(PAGES: Past Global Changes = 古環境の変遷)でも推進すべき重要項目となっている。特に、日本の位置する西太平洋に限ってみると、この地域はPAGESの中でオーストラリアから東アジアまでを対象地域としたPEP II(沿岸)およびIMAGES(International Marine Global Change Study: 半遠洋域・外洋)に対応している。

低緯度の沿岸での環境復元は、珊瑚骨格やシャコ貝などを用いて行うことが可能である(鈴木ほか, 1998)。珊瑚年輪は1年間に約1cm成長するので、

1) 地質調査所 海洋地質部
2) 東北大学大学院理学研究科(連携講座)

キーワード: 高時間解像度, 表層循環, インドネシア通過流, スーパーブリューム, 気候変動



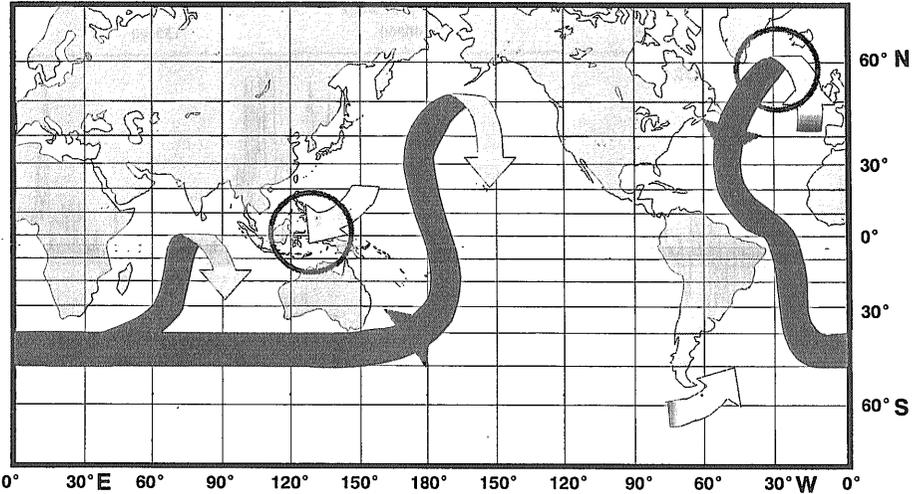
第1図 Dansgaard-Oeschger cycle (Dansgaard et al., 1993)と呼ばれている。YDはヤングドライアス期 (Yanger Dras期)、H1, H2, はハインリッヒイベント (Heinrich Event)を表す。

それを厚さ約0.2mmの50層にスライスして、各々の層の酸素同位体比やSr/Ca比などを分析すると、過去300年間の低緯度域の水温や塩分などを約1週間の解像度で求めることができる。一方、沿岸、半遠洋、遠洋に至る海域での解像度はこれよりおともの数十年から百年以下の時間解像度をめざして現在IMAGESプログラムが実施されている。

これは、PAGESなどに援助されて成立したプロジェクトで、1995年にスタートした。フランスを中心としてドイツ、アメリカ、イギリスや現在では日本も含めて14ヵ国以上が参加している。その研究目的は、国際協力により高時間解像度で質の高い古海洋学的データの蓄積を行うこと、コア試料の総合解析による海洋環境変遷の研究を行うことである。航海は通常MARION DUFRESNE号を使用して実施されているが、西太平洋では1996年に台湾が南シナ海を対象として約10日間の航海を組んでいる。1998年には、科学技術振興調整費「炭素循環に関するグローバルマッピング」「全地球ダイナミクス：中心核に至る地球システムの変動原理の解明に関

する国際共同研究」を中心として西太平洋暖水塊、南シナ海、東シナ海を対象に、1998年7月に航海が実施された。日本人の研究者も数名乗船した。

IMAGESの航海では、精度良く種々の指標を分析するために直径15cm径以上の柱状堆積物コア採取と同地点でマルチプルコアアラやボックスコアによる不攪乱表層堆積物採取が義務づけられている。また、古海洋環境復元のために現在の海洋環境を理解しておくことが不可欠であるため、底層水と間隙水の採取、CTD (電気伝導度、水温、深度)観測、プランクトンネットによる生物採取、セジメントトラップによるフラックスと季節性の検討もしばしば調査項目に加えられている。分析項目に関しては、多岐の項目が選定されていて、一次生産、水温・塩分・二酸化炭素分圧などの海洋表層の諸量、炭酸塩の保存性、酸化還元状態、風化生成物 (陸源) 供給量について化学成分や同位体組成の環境指標が整理されており、これらのデータセットが蓄積されればきわめて精度の高い環境復元が達成できると期待される。時間解像度は堆積速度に



第2図 深層水をモデル化したもの。ストンメルが提唱したような経路を経て海洋を1周していく。暗色は深層水の流れを、明色は表層水の流れを表す。

依存しているが、しばしば堆積層の厚さで1cmきざみで分析が行われているので、沿岸域で1,000年間に5m(5m/1,000年)という堆積速度の場合には解像度は2年となり、半遠洋域で10cm/1,000年、遠洋域で5cm/1,000年の場合には、解像度はそれぞれ100年、200年となる。もし、長さ50m程度の堆積物柱状コアが採取されれば、沿岸域で1万年以上、半遠洋域で50万年、遠洋域で100万年間をカバーすることができる。

西太平洋での研究テーマについては、赤道から中緯度までの海域では熱輸送が重要である。特に、西太平洋暖水塊と、それから派生した黒潮と親潮の流路や流量の変化は地球的規模の気候変動にも大きな影響を与えるものと考えられている。一方、北太平洋海域では、一次生産の変遷と中深層形成が重要なテーマとして挙げられる。この海域での中層水形成は地球的規模での二酸化炭素の吸収にも影響を与えた可能性が指摘されているが、未だ結論は得られていない(例、川幡、1997a)。

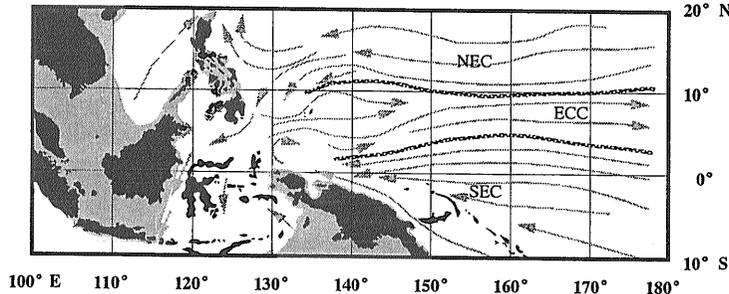
3. 氷期・間氷期の気候変動で太平洋はどのような働きをしていたか？

海洋の大循環は、表層と深層の流れから構成されている。表層水循環は海流で知られる運動で、通常大気との運動と密接な関係があるため風成循環と呼ばれている。この循環の大きな働きは赤道域

から極域へ熱エネルギーを運搬していることである。深層循環は海流で運ばれる水を補償する働きを一部で担っているが、その駆動力は密度差で、熱塩循環と呼ばれている。現在の深層水が形成される場所は、温度が低く、塩分が高い海域で、北大西洋と南極ウェッデル海の2カ所である。深層水をモデル化したものが第2図で、ストンメルが提唱したような経路を経て海洋を1周していく。北大西洋のグリーンランドの東方で形成された深層水は、西岸境界流として大西洋の西側を南下し、南極海に達すると、ウェッデル海で形成された深層水も加え、南極をまわる周南極深層流となり、太平洋・インド洋を北上していく。北太平洋の表層水は北大西洋のそれと同じく低温であるが、塩分が低いために相対的に密度が小さく、深層水は形成されない。一番古い北太平洋の海水の年齢は約2,000年に達している。

これらの深層水は太平洋で徐々に上昇し、最終的に表層水となり、大西洋にもどっていく。この際、北太平洋の表層水はインドネシアを通過してインド洋にはいり、南極周極流となって、南大西洋にはいって北上する。

これまで、後期第四紀の海洋環境変動に関する研究では、北大西洋の研究が主流であった。これはこの海域で深層大循環を支配する深層水が形成されると考えられていたからで、深層水の形成場が現在よりも南下すれば、太平洋の深層水の流路、



第3図 氷期のインドネシア多島海を中心とした海域の陸地の推定図。黒色は現在の陸地を、暗色は氷期の陸地を表す。NECは北赤道海流を、SECは南赤道海流を、ECCは赤道反流を表す。

流量にも大きな影響がでたものと推定されている。このように、氷期・間氷期の海洋環境変動の研究では北大西洋が主役を演じる一方、深層水を作れない太平洋は、大西洋をはるかにしのぐ面積および海水量を有しながら、その海洋大循環や地球的規模での気候変動における役割は明確ではなかった。しかしながら近年、西太平洋暖水塊内に存在するインドネシア通過流が、「表層循環の関所」で、この海域での海洋環境変動が地球的規模での海洋循環や気候変動で主役を演じていた可能性がでてきた(第3図)。その最も基本的な構図はこの地域の水深にある。現在のインドネシア通過流はインドネシア多島海を通過しているが、少なくとも最終氷期最盛期に海水準が約120m下がった時には、ほとんどの大陸棚は陸化し、太平洋からインド洋へ表層水が通過できたのは、ロンボク海峡とその東側のみであった。このため、通過量はかなり制限されたであろうし、この海域での表層水の塩分、水温の変動は、地球的規模での海洋循環においても大きな影響をもたらしていたに違いない。

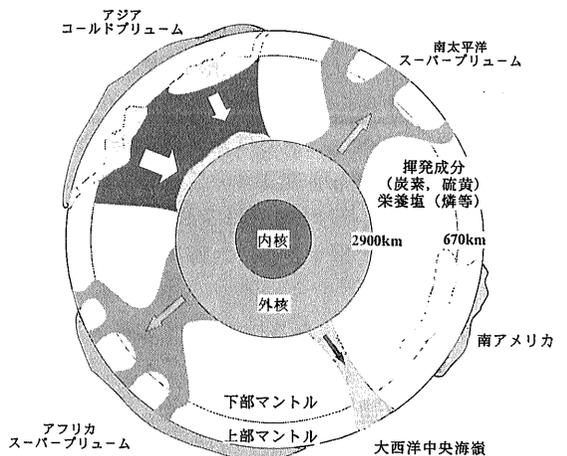
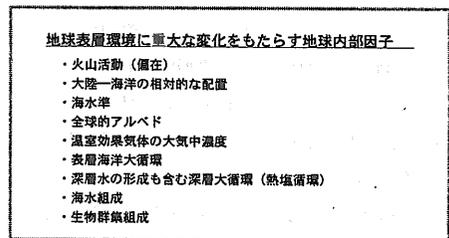
4. スーパープリウムと表層環境

顕生代の5億7,000万年間に、気候は単純に寒冷化あるいは温暖化したのではなく、温暖気候と寒冷気候が交互に4回ずつ訪れた(Frakes *et al.*, 1992)。汎世界的規模の絶滅を何度か経験しながらも生物の多様性は概して増大してきた(例、川幡, 1997b, 1998)。顕生代初めに超大陸ゴンドワナが分裂し、次の超大陸パンゲアは古生代から中生代にかけて分裂し、現在に至っている。

このような地球環境は、これまで地球表層のみ

を対象として説明されることが多かった。しかし、近年スーパープリウムの活動という地球深部のダイナミクスが解明されるにつれて、地球表層と深部とが互いに影響していることも明らかになってきている(丸山ほか, 1993; 磯崎, 1997)。そこで、地球表層に関する環境研究も地球全体のエネルギー輸送、物質循環という観点から研究する段階に入ってきたと考えられる(第4図)。

地球表層環境の変動は表層の物質循環の変動を伴うことが多い。ここでは、観点を变えて時間ス



第4図 地球表層に影響を与える地球内部因子とスーパープリウムの模式図。

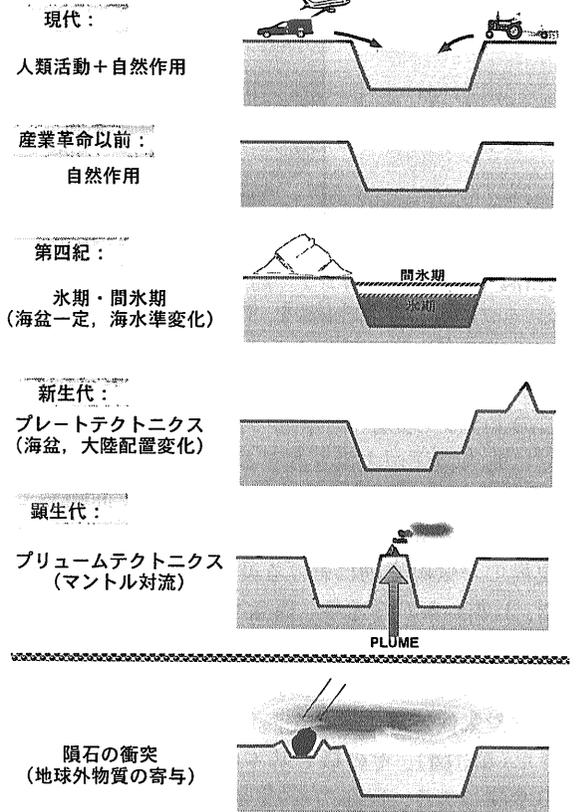
ケールとリザーバーの関係から整理した(川幡, 1998). 地球表層のリザーバーと元素の滞留時間という観点から地球表層の環境変動を分類したものを第5図に示す. これらは変動の時空間スケールから6つに大きく分類され, (1) 人間活動の影響を強く受ける 10^0-10^2 年以下の変動, (2) 10^2-10^3 年程度の変動をもつ産業革命以前の完新世の変動, (3) 10^3-10^5 年変動の卓越する氷期・間氷期のくり返しに伴う変動, (4) プレート運動の影響を受ける 10^6-10^7 年オーダーの変動, (5) 地球内部の影響を受ける 10^8 年以上の長期間の変動, そして, (6) 地球外物質の影響(隕石の衝突を含む)による変動となる.

産業革命以降のこの200年間は, 完新世のいわばバックグラウンドに相当する地球表層環境が人間の活動により乱されている時代である. 現在の地球環境問題は人間による環境危機を意味しており, 生物の絶滅などを含めて, 地質学的時間からみれば非常に速い環境および生物相の変化が進行している.

氷期・間氷期の繰り返しが卓越した第四紀は高緯度域での気温変動と海水準変動で特徴づけられる. これに伴い, 大気中の二酸化炭素は約300ppmv(体積で 10^{-6})から200ppmv以下まで大きく変動してきた(例, Barnola *et al.*, 1987). これを説明するため, 海洋リザーバーの変動が注目された. それは地球表層の炭素リザーバーの中で特に大きく, わずかに変化しても大気圏に存在する炭素量を大きく変動させてしまうからである. これまで海洋深層大循環の変動や中層と深層の海水の化学組成の違いで大気中の二酸化炭素の変動を説明しようと試みられてきたが(例, Broecker, 1982, Boyle, 1988), これらは基本的に海洋リザーバー内で炭素の分布を変更することで二酸化炭素の変動を解釈しようとするものである. この時間範囲では海水準は変化するものの海盆の形状はほとんど一定である.

これより時間が長くなるとプレートの移動によって大陸や海盆の形状が変化し, 海洋表層循環や海洋大循環, 陸源物質の海洋への供給, 海溝付近でのマントルへの物質の供給, 大陸への海洋物質の付加などが起こる. この一つの例として南極周極流(Circum-Antarctic circulation)の確立が挙げられ

気候変動と炭素循環に関する研究



第5図 異なる時間スケールに呼応した物質循環のバタンの模式図(川幡, 1998).

る. 新生代の特徴は寒冷化と極域での氷河化であるが, 南極大陸の熱的な孤立化はこれと密接に結びついていると考えられている(Kennett, 1982). 暁新世(6500-5500万年前)の南極大陸はすでに極域に位置していたが, 顕著な氷河化はまだ起こっていなかった. 亜南極域の表層海水温は約 18°C と比較的高く, 深層水も暖かかった. 初期始新世から中期始新世にかけて, オーストラリア大陸は南極大陸から北に移動を開始し, 両大陸の間に海洋はできたが, 南極周極流は陸塊によってさえぎられていた. これが後期始新世になると $100-300\text{m}$ の深度の海峡で太平洋とインド洋はつながった. 南西太平洋の亜南極海では, 表層水温は初期始新世には約 20°C , 中期には $12-14^{\circ}\text{C}$, 後期には 10°C まで下がっていった. 南極周極流のもう一つの障害であった南極大陸と南米の間のドレーク通路(Drake Passage)が開きはじめたのは, 磁気異常

の証拠から約2,900万年前とされている。ただし、最初の数百万年の間は大西洋と太平洋の深層水の行き来は限られていたが、約2,200万年前になると、海盆の形状は現在の海洋と本質的に同じものになり、南極周極流の発達によって熱的孤立はさらに進み、氷床の発達につながった。このように海盆の配置の変化は大循環にも影響を与え、高緯度域で生物起源オパール堆積物が優位にたち、炭酸塩堆積物が中低緯度に移動していくなど生物圏や物質循環にも大きな影響を与えた。

数千万年から数億年の時間レンジになると、マンツルの深部まで含めた物質循環が重要となってくる。顕生代を通じて何回かスーパープレュームの活動のあったことがわかってきており、その活動が活発であった時には下部マンツル物質が地球表層まで達し、炭素などの揮発成分や栄養塩を大量に地球表層リザーバーにもたらし、これが石炭や石油の形成に重要な役割を果たした可能性が指摘されている(Larson, 1991a, b)。

以上述べた以外に重要なものとして、地球外物質の地球表層リザーバーへの供給が挙げられる。この例として有名なK/T境界の一つの原因として、ユカタン半島への隕石の衝突を挙げることができる(Alvarez *et al.*, 1992)。これはリザーバー全体の物質質量を変えようというよりは、地球最表層リザーバーへの衝撃的なフラックスという形で特徴づけられる。

このように物質循環における滞留時間が長くなるにつれて、地球内部の変化の影響がでてくる。中期白亜紀には、気温、黒色頁岩や石油の形成速度、海水準がいずれも高くなったとされており、マンツルコア境界から上昇してくるスーパープレュームの活動と関係あったと推定されている。地球表層環境の変動も地球全体の物質循環という観点から解析する必要がある。

謝辞：本稿を準備するにあたって、工業技術院特別研究「地球環境の変遷に対する海洋物質循環の影響解明の研究」および科学技術振興調整費「炭素循環に関するグローバルマッピングとその高度

化に関する国際共同研究」の研究費を使用した。また、今井 登博士、池原 研博士および前田玲奈氏に査読していただき原稿が改善された。ここに感謝いたします。

引用文献

- Alvarez, W., Smit, J., Lowrie, W., Asaro, F., Margolis, S.V., Claeys, P., Kastner, M. and Hildebrand, A.R. (1992) : Proximal impact deposits at the Cretaceous-Tertiary boundary in the Gulf of Mexico: A restudy of DSDP Leg 77, sites 536 and 540. *Geology*, 20, 697-700.
- Barnola, J.M., Raynaud, D., Korotkevich, Y.S., and Lorius, C. (1987) : Vostok ice core 160,000-year record of atmospheric CO₂. *Nature*, 329, 408-414.
- Boyle, E.A. (1988) : The role of vertical chemical fractionation in controlling late Quaternary atmospheric carbon dioxide. *J. Geophys. Res.*, 93, 15,701-15,714.
- Broecker, W.S. (1982) : Ocean chemistry during glacial time. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 1689-1705.
- Dansgaard, W., Johnsen, S., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjornsdottir, A.E., Jousel, J. and Bond, G. (1993) : Evidence for general in stability of past climate from a 250-kyr ice core record. *Nature*, 364, 218-220.
- Frakes, L.A., Francis, J.E. and Syktus, J.I. (1992) : Climate modes of the Phanerozoic. Cambridge University Press, Great Britain, 274p.
- 磯崎行雄 (1997) : 分裂する超大陸と生物大量絶滅. *岩波科学*, 67, 543-549.
- 川幡穂高 (1997a) : 北太平洋における炭素循環に関連した古海洋研究の現状. *地球化学*, 31, 153-162.
- 川幡穂高 (1997b) : 地球表層環境変動とスーパープレューム. *岩波科学*, 67, 554-559.
- 川幡穂高 (1998) : 顕生代の地球表層環境変動-気候, 生物イベント, 物質輸送, そしてスーパープレューム-. *地質学論集*, 49, 185-198.
- Kennett, J.P. (1982) : Global paleoceanographic evolution: critical events in ocean history. In Kennett, J.P., *Marine Geology*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 695-751.
- Larson, R.C. (1991a) : Latest pulse of the Earth: evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology*, 19, 549-550.
- Larson, R.C. (1991b) : Geological consequences of superplumes. *Geology*, 19, 963-966.
- 丸山茂徳・深尾良夫・大林政行 (1993) : プレュームテクトニクス. *科学*, 63, 373-386.
- 鈴木 淳・谷本陽一・川幡穂高 (1998) : サンゴ骨格による古海洋学的情報の復元. *地球化学*, 投稿中.

KAWAHATA Hodaka (1998) : Study on paleoceanography - high resolution and long term -

<受付：1998年6月18日>