

# 西太平洋暖水塊の全球表層環境に果たす役割 —特に氷期の環境について—

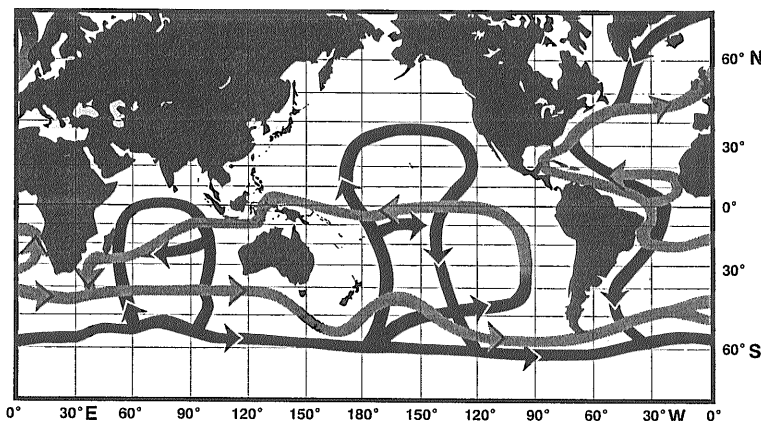
川 幡 穂 高<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

海洋は地球表層の7割を占め, 地球表層の自由水の97%を満たしている. その海水の量の大きさと物質を溶かす性質から, 海洋は物質循環と熱の輸送においても大きな役割を果たしてきた. 炭素リザーバーとしての大きさは大気の約60倍以上もある. 炭素は海水中では炭酸イオン, 炭酸水素イオン等の溶存態無機炭素として存在している. 最近では溶存態有機炭素リザーバーもかなり大きいのではないかと指摘されている. このような海洋における炭素循環に関する問題を扱うには, 海洋全体としてどれだけ存在しているかというバルクの問題, 水平方向および鉛直方向を含めた海洋のどの部分にどれだけ存在しているかという問題およびその時間経過に関する問題を同時に解決していくことが必要である.

一般に, 二酸化炭素を含む溶存炭酸物質は海水に溶存して運搬されるため, 地球的規模の海洋大循環は最も基本的なフレームを提供している. 大

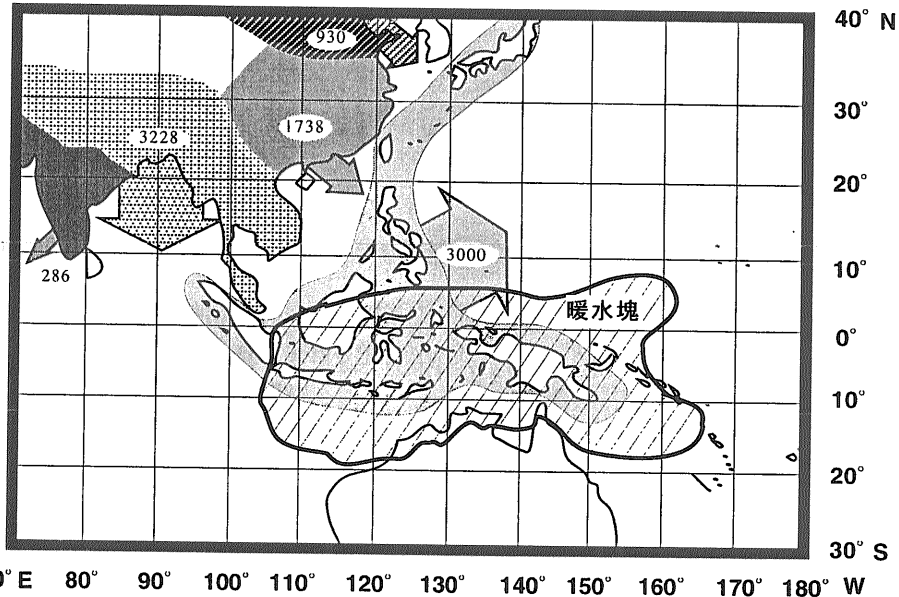
循環の中でも, 深層大循環は海水の密度によって支配されており, しかも密度が塩分と温度の関数になっているため, 熱塩循環とも呼ばれている(第1図). 一般に, 高塩分・低温で密度の高い表層海水は特定の海域にしか分布していないので, 表層から深層への沈み込みは特定の海域に限られている. このような場所は, 北大西洋の北部のグリーンランド沖である. 密度の高い海水がこの辺りで沈み込んで, 北大西洋深層水と呼ばれる深層水が形成される. これは大西洋を南下し, 南極海にはいる. ここで, 新たな水が一部加わって東向きに南極の周りを回り, 三大洋の南端にきたとき一部が分離し, 南極底層水となって北上する. 特に, 太平洋に入ったものは太平洋深層水と呼ばれており, 太平洋西側トンガ海溝付近を北上し, 赤道を越えて, 伊豆・小笠原・マリアナ海溝付近まで到達する. こうしている間に, 太平洋全域で, 徐々に浮き上がっていく. 北太平洋の表層水はインドネシア多島海を通って, 太平洋からインド洋に流れていく(e.g., Godfrey and Ridgway, 1985). この流れはインドネ



第1図  
深層(暗色), 表層(明色)大循環の模式図 (Schmitz, W.J., 1995を改変).

1) 地質調査所 海洋地質部/東北大学大学院理学研究科(連携講座)

キーワード: 第四紀後期, 西太平洋暖水塊, 深層大循環, 表層大循環, インドネシア通過流



第2図 アジアモンスーン地帯から河川を通じて海洋にもたらされる懸濁物の量および西太平洋暖水塊 (Western Pacific Warm Pool) の模式図 (Milliman and Meade, 1982). 斜線の部分は暖水塊を示し、水温28℃の分布域にはほぼ相当している。また、数字は河川から海洋に運搬される懸濁物流量 ( $10^6 \text{ tyr}^{-1}$ ) を表している。

シア通過流と呼ばれている。この表層水はインド洋で、アフリカ最南端に達する(第1図)。一部の海水はそのまま大西洋に入っていくが、ほとんどの海水は東周りに南極の周りをまわってオーストラリアの南方、南太平洋、南米南方を経て、南大西洋にはいり、北上して、北大西洋の深層水を形成することになる。このような世界の大循環の中で西太平洋低緯度域は、太平洋とインド洋をつなぐという意味で、非常に重要な海域となっており、いわば表層水循環の「関所」ということができる。

また、この海域には西太平洋暖水塊という地球の中で最も水温の高い水塊が存在しているため、この海域は熱エネルギーの貯蔵という観点でも注目されている。西太平洋からインド洋低緯度域にかけては、地球上で最も水温の高い水塊として有名な西太平洋暖水塊 (Western Pacific Warm Pool) が存在している。これは、エルニーニョ時には東に移動し、大気などを通じて北米にも影響を与えるなど、この水塊の挙動は地球的規模での気候変動に大きな影響を与えてきたと考えられている。

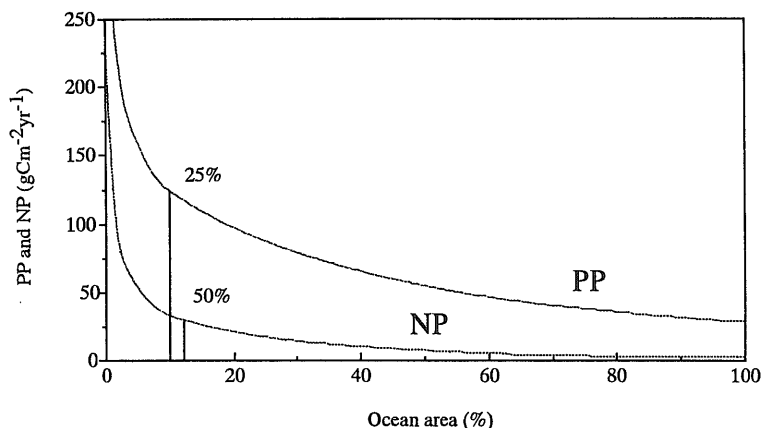
ここでは、西太平洋暖水塊の特徴を生物生産と海流の関係からながめ、この海域の地球の環境変動に果たす役割と将来の課題について述べる。

## 2. 陸源物質の流入が生物ポンプに与える影響

西太平洋低緯度を中心に地球上で最も水温の高い水塊は西太平洋暖水塊と呼ばれているが、この定義を28℃を越える表層水温をもつ水塊とすると、その分布範囲は実は東インド洋にまでまたがる東経100度～170度、北緯10度～南緯10度とかなり広い海域になる(第2図)。もちろん、季節変動やエルニーニョ・南方振動 (ENSO: El Niño/Southern Oscillation) などの変動によってもその分布は大きく変わる。この生成機構の詳細は未だ解明されていないが、東太平洋からはるばる太平洋を流れる西向きの赤道海流が温められ、その結果もたらされるものと考えられている。

水温が高いことにより蒸散量も高くなっているが、これは西太平洋暖水塊周辺地域の大きな特徴となっている。すなわち、高温は蒸発を促し、低圧帯と降雨をもたらししている。全体を通じたバランスについては、降雨による淡水の寄与が多くなり表層水塩分は低くなっている。

多量の雨は、東南アジアの大規模河川やインドネシアの急流河川を通じて、陸源粒子状物質および栄養塩を沿岸から半遠洋海域までもたらししている。



第3図 Berger *et al.* (1987)に基づく世界の基礎生産(PP)のヒストグラム。新生産(NP)は $f = PP/400 - PP^2/340,000$ の式より計算された。図中の縦線は、基礎生産の25%そして、新生産の50%の位置を表している(Berger *et al.*, 1989を改編)。全世界の海域の基礎生産の高い方から12%の海域で、全球のエクスポート生産の50%をまかなうことができる。このことは、基礎生産が高い海域ほど有機炭素による除去が効率的に行われていることを示している。

そこで、西太平洋低緯度域は世界で最も陸の負荷がかかった海域となっている(第2図)。この陸源物質の寄与は、海洋表層での基礎生産を活性化させるため、炭素循環にも大きな影響を与えている。

海洋表層で生物によって生産される総量は基礎生産(一次生産)と呼ばれているが、基礎生産に対するエクスポート生産(大粒子によって除去される有機炭素量)の比率は海域によって異なっているらしい。通常、栄養塩の有光層への供給が最も小さな大洋の亜熱帯ジャイアで最も小さな値を、逆に、中深層との海水の混合により栄養塩の供給されやすい沿岸地方で最大の値を示している。モデル計算によると、全球のエクスポート生産の50%は基礎生産の高い海域でまかなわれている。これは面積でいうと全海洋の12%に相当している。このことは、基礎生産が高い海域ほど炭素の除去率が高いことを意味しており、沿岸から半遠洋域が炭素循環の中で重要な役割を果たしていることを意味している(第3図)。

陸源物質の供給と海洋の生物活動に関する調査はさまざまな海域で実施されているものの、小規模なスケールで行われているものがほとんどである。アジアモンスーンに伴う河川水の供給と生物生産を論じたものは、興味深い結果を示している。ベンガル湾はインド洋をはさんでアラビア海と逆の東側に位置している。ベンガル湾の場合、ガンジス川とブラマプトラ川という世界でも有数の河川を有

している。ヒマラヤの氷河の融水に起源をもつ淡水や雨水と陸源性の粒子状物質が多量に海洋へもたらされている。これらの影響がベンガル湾の南部までどのように及んでいるのかを調べるためにセジメント・トラップ観測が行われた。セジメント・トラップは各測点に二つ設置され、約1年にわたる全粒子束は、北部(海底深度 2,263m の水深 809m に設置)で $49.8\text{g m}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 、中央部(海底深度 3,259m の水深 906m に設置)で $35.2\text{g m}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 、南部(海底深度 4,017m の水深 1,040m に設置)で $32.8\text{g m}^{-2}\text{yr}^{-1}$ であった。粒子束のピークは南西の季節風の時期に観察された。これは河川から海への流入が最大になった時期と一致している。また、北部の深層の試料では、約21%が炭酸カルシウム、16%がオパール、54%が石質性物質、9%が有機炭素であった。北から南の設置点に向かって、炭酸カルシウムは増加し、オパール、有機炭素、石質成分は減少する。これらの粒子束のパタンの支配要因は、①モンスーンによる淡水と陸源碎屑物の流入、②それに影響された海洋生物生産と考えられる(Ittekkot *et al.*, 1991)。

東南アジアのモンスーン地帯からの懸濁物の供給量は全世界の4分の1以上と推定されていて、その海洋への負荷は大きいと予想されている。特に、インドネシア多島海は外洋に面しているので、大陸棚にトラップされずに外洋に運搬される陸源物質はかなり多いものと予想され、陸と海の相互作用

を研究するのに適した海域といえるが、未だ系統的な研究はなされていない。

### 3. 海洋大循環に影響を与えるインドネシア通過流の変動

西太平洋暖水塊の表層水温は、氷期においてもほとんど一定であったと推定されている(e.g., CLIMAP, 1976; Anderson *et al.*, 1989; Thunell *et al.*, 1994). 特に、最終氷期最盛期の1万8千年前にも西太平洋暖水塊が存在していたことが示されている(Thunell *et al.*, 1994). 但し、そのサイズはたぶん減少していたらしい(Martinez, 1994).

一方、熱帯地域の山岳地帯での植生の標高方向での移動からは気温が4–5°C降下したことが示唆されている(e.g., Rind and Petoet, 1985). この明らかに違いの原因として、大気中の湿気もしくは紫外線の強さが候補として挙げられているがよくわかっていない(e.g., Barmawidjaja *et al.*, 1993; Thunell *et al.*, 1994).

前述したように西太平洋低緯度海域は「表層循環の関所」として機能しているが(第1図)、現在よりも氷期により決定的な役割を演じたはずである。最終氷期最盛期の海水準は、バルバドス島の沈降リーフテラスで120±5mと推定されている(Fairbanks, 1989). Chappell *et al.* (1996)による深度変化10mあたり $\delta^{18}\text{O}$ 値の変化量が0.09%という定数を用いると、水量の効果は、約1.2%と計算される。この値は、有孔虫の酸素同位体分析得られた $\delta^{18}\text{O}$ の値1.0~1.9%という範囲に入っている。最終氷期最盛期に海水準が120m程度降下すると、インドネシア通過流が十分通過できる位の深度をもつ海峡はロンボク海峡と隣の海峡のみである。サフルプラットフォームは現在の585,121km<sup>2</sup>から932,147km<sup>2</sup>に増加し、スダプラットフォームは2,065,228km<sup>2</sup>から2,946,543km<sup>2</sup>に増えたと推定されている(Hantoro, 1997).

この頃のインドネシア多島海や北部オーストラリアは現在よりも乾燥していたと示唆されている(Van der Kaars, 1990). モルッカ海(Molucca Sea)での研究結果によると、赤道域はより乾燥状態であったとされ、その原因は河川水量が減少し、北西風の影響が減少し表層水塩分が高くなったた

めと説明されている(Barmawidjaja *et al.*, 1993). また、花粉のデータは乏しいもののインドネシア通過流の西側では約30%も降水量が減少したが、標高による植生のゾーニングは保持されていたらしい。スダプラットフォームは平坦なため、密度の高い熱帯雨林によって覆われていた。一方、スマトラ東部、カリマンタン西南部、ジャワ北部地方の低地は熱帯雨林であったものの、山岳地域では現在よりも高度が低い所まで熱帯山岳性の植生によって覆われていた。また、東南アジアの南西モンスーンは通常北東モンスーンより強いが、最終氷期最盛期には弱くなったとされており、これらの結果と整合的である。

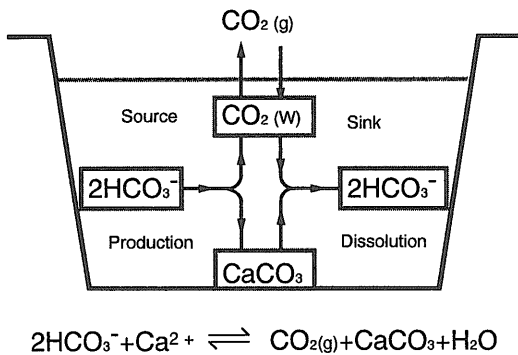
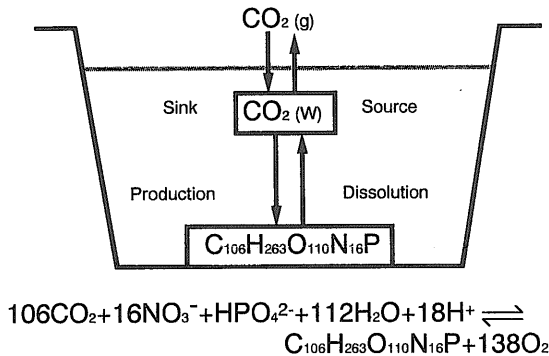
西太平洋暖水塊の生物生産の変動に関しては、現在の基礎生産力が低い海域では、氷期であっても間氷期であっても基礎生産力はほとんど低いままであったが(Kawahata and Eguchi, 1997)、現在の基礎生産力が高い海域では、地球的規模の気候変動に反応して氷期に基礎生産力が高くなったことが示されている(Kawahata and Eguchi, 1996; Kawahata *et al.*, 1998a). 特に、現在基礎生産力が比較的高い西カロリン海盆は、インドネシア通過流の源流域にあたっており、ここでは風速の増大が湧昇などを促進し、基礎生産力を高めることがセジメントトラップ観測から確認されている(Kawahata *et al.*, 1998c).

また、西カロリン海盆では、水深4,400m付近の炭酸カルシウム溶解変動が酸素同位体カーブとほとんど同時に変化していたことから、海底付近の海水の化学組成も敏感に地球的規模の環境変動を反映していたことが示唆されている(Kawahata *et al.*, 1997a).

このように、インドネシア通過流をとりまく地域および海域の環境は、氷期と間氷期で大きく変動したと考えられ、海峡の流量、通過流の塩分、温度の変化が全球大循環をも大きく変化させたと予想されるが、全球を視野にいたした研究は始まったばかりである。

### 4. 今後の課題と方策

炭素循環に係わる陸域と海洋との相互作用の研究では生物活動の質と量の把握が重要である。生



第4図 炭酸塩と有機物の形成・分解の伴う二酸化炭素のやりとりに関する模式図。炭酸塩の殻ができる、2モルの重炭酸イオンが分解して、1モルの炭酸カルシウム殻が形成されるとともに、1モルの二酸化炭素が発生するので、現在の海洋の組成では、二酸化炭素が排出される。

物体に貯蔵される炭素は、主に有機物の形と炭酸塩の形で存在している。海洋には、有孔虫など、炭酸塩の殻を作り出す生物が生息している。これらの働きで、炭酸塩の殻ができると、現在の海洋の組成では、二酸化炭素が排出される。すなわち、2モルの重炭酸イオンが分解して、1モルの炭酸カルシウム殻が形成されるとともに、1モルの二酸化炭素が発生する(Kawahata *et al.*, 1997b) (第4図)。そこで、炭酸カルシウム殻の形成は大気中の二酸化炭素を増加させる方向に働く。もちろん、生物の肉体を構成する有機物は、大気中の二酸化炭素を同化して作られるので、これらの有機物が分解されるまでは、大気中への二酸化炭素の放出以上に、二酸化炭素は固定される。しかし、これらの有機物は短時間のうちに呼吸に使われたり、分解されて二酸化炭素に戻ってしまう。一方、珪藻などは、二酸化炭素を発生する炭酸カルシウム殻を作らないし、

集合体としてより速く沈降するので海洋表層の二酸化炭素の除去に貢献すると予想される。実際、生物起源オパールが多く生産される時期には表層水の二酸化炭素分圧も下がることが報告されている(Kawahata *et al.*, 1998b)。

これらのプランクトンの繁殖は、基礎生産と強く結びついていて、沿岸や半遠洋域で大きくなる傾向がある。特に、西太平洋赤道域は陸からの懸濁物と栄養塩の供給が大きいので、有機物とともに生物起源オパールの生産も活発に行われている可能性が高い。これらの量を把握するためには、西太平洋低緯度域に多くのセジメントトラップ繫留系を設置し、時系列観測を実施する必要がある。特に、陸から運搬される低塩分水、懸濁物と生物活動の関係を捉えるには、衛星画像解析が重要な役割を果たすと期待される。特に、モンスーンに関係した陸域での降雨と海洋での生物ポンプとの関係を時系列データとして得ることは重要なことである。現在、東南アジア域では大量の肥料が使用されつつあり、これらが陸の負荷が大きくなっている沿岸から半遠洋域にどのような影響を与え、しいては全球炭素循環へどのような影響を与えているのか調べることも大切である。

一方、インドネシア多島海が「表層循環の関所」に位置しているので、現在のこの海域での水平方向の海水の流れおよび西カロリン海盆付近のミンダナオドーム周辺での湧昇の大きさがどの位であったかを把握することが第一段階である。次に、古環境研究については、氷期に西太平洋暖水塊の周辺部で水温、塩分が大きく変動した可能性が指摘されており(Martinez *et al.*, 1997)、高時間解像度で浮遊性有孔虫の群集解析やアルケノン分析に基づく水温の定量的評価、これと浮遊性有孔虫の酸素同位体から計算される塩分の評価を実施し、西太平洋暖水塊の変動と地球的規模での環境変動を比較することが必要である。

謝辞：本研究は、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」と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」の成果の一部である。野原昌人博士と前田玲奈氏にコメントを頂き、原稿が改善された。

## 引用文献

- Anderson, D.M., Prell, W.L., Barratt, N.J. (1989) : Estimates of sea surface temperature in the Coral Sea at the last glacial maximum. *Paleoceanography*, 4, 615-627.
- Barmawidjaja, B.M., Rohling, E.J., Van der Kaars, W.A., Vergnaud-Grazzini, C., and Zachariasse, W.J. (1993) : Glacial conditions in the northern Molucca sea (Indonesia). *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 101, 147-167.
- Berger, W.H., Fischer, K., Lai, C., and Wu, G. (1987) : Ocean productivity and organic carbon flux. Part 1. Overview and maps of primary production and export production. Univ. of California, San Diego, SIO Reference 87-30.
- Berger, W.H., Smetacek, V.S. and Wefer, G. (1989) : Ocean productivity and paleoproductivity-an overview. In: Berger, W.H., Smetacek, V.S. and Wefer, G. (eds) *Productivity of the ocean: present and past*. John Wiley, Chichester, Life Science Research Reports, 1-34.
- 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.
- CLIMAP Project Members (1976) : The surface of the ice age Earth. *Science*, 191, 1131-1137.
- 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.
- Godfrey, J.S. and Ridgway, K.R. (1985) : The large-scale environment of the poleward-flowing Leeuwin Current, Western Australia: Longshore steric height gradients, wind stresses and geostrophic flow. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 481-495.
- Hantoro, W.S. (1997) : Quaternary sea level variations in the Pacific-Indian Ocean Gateways; response and impact. *Quat. Int.*, 37, 81-87.
- Ittekkot, V., Nair, R.R., Honjo, V., Ramaswamy, V., Bartsch, M., Manganini, S., and Desai, B.N. (1991) : Enhanced particle fluxes in Bay of Bengal induced by injection of fresh water. *Nature*, 351, 385-387.
- Kawahata, H. and Eguchi, N. (1996) : Biogenic sediments in the Eauripik Rise of the equatorial western Pacific during the last 265kyr. *Geochem. J.*, 30, 201-215.
- Kawahata, H. and Eguchi, N. (1997) : Paleoproductivity in the North Fiji Basin during the late Pleistocene. *J. Oceanography*, 53, 355-364.
- Kawahata, H., Ahagon, N. and Eguchi, N. (1997a) : The fluctuation of carbonate preservation in the deep sea of the Caroline Basin during the last 300kyr. *Geochem. J.*, 31, 85-103.
- Kawahata, H., Suzuki, A. and Goto, K. (1997b) : High  $PCO_2$  in the lagoonal surface water of Palau Barrier Reef and Majuro Atoll-Coral reef ecosystem works as a source of atmospheric  $CO_2$ . *Coral Reefs*, 16, 261-266.
- Kawahata, H., Suzuki, A. and Ahagon, N. (1998a) : Biogenic sediments in the West Caroline Basin, the western equatorial Pacific during the last 330 kyr. *Mar. Geology*. (in press).
- Kawahata, H., Suzuki, A. and Ohta, H. (1998b) : Sinking particles between the Equatorial and Subarctic regions ( $0^{\circ}N-46^{\circ}N$ ) in the Central Pacific. *Geochem. J.* (in press).
- Kawahata, H., Yamamuro, M. and Ohta, H. (1998c) : Seasonal and vertical variations of sinking particle fluxes in the West Caroline Basin. *Oceanologica Acta*. (in press).
- Martinez, J.I. (1994) : Late Pleistocene palaeoceanography of the Tasman sea: Implications for the dynamics of the warm pool in the western Pacific. *Paleogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 112, 19-62.
- Martinez, J.I., De Deckker, P. and Chivas, A.R. (1997) : New estimates for salinity changes in the Western Pacific Warm Pool during the last glacial maximum: oxygen-isotope evidence. *Mar. Micropaleontology*, 32, 311-340.
- Milliman, J. and Meade, R.H. (1982) : World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J. Geology*, 91, 1-21.
- Rind, D. and Petoet, D. (1985) : Terrestrial conditions at the last glacial maximum and CLIMAP sea-surface temperature estimates: Are they consistent? *Quat. Res.*, 24, 1-22.
- Schmitz, W.J. (1995) : On the interbasin-scale thermohaline circulation. *Rev. Geophysics*, 33, 151-173.
- Thunell, R., Anderson, D., Gellar, D., and Miao, Q. (1994) : Sea-surface temperature estimates for the tropical Western Pacific during the last glaciation and their implications for the Pacific warm pool. *Quat. Res.*, 41, 255-264.
- Van der Kaars, W.A. (1990) : Palynology of eastern Indonesian marine piston-cores: A late Quaternary vegetational and climatic records for Australia. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 85, 239-302.

---

KAWAHATA Hodaka (1998) : Effect of Western Pacific Warm Pool on global environments - Especially the ocean environments during the glacials -

---

< 受付 : 1998年6月18日 >