

ラニーニャ・エルニーニョ期における 珪質沈降粒子フラックス変動

高橋 孝三¹・松枝 大輔²・桂田 陽一郎²
(¹九州大学大学院 理学研究院・²九州大学大学院 理学府)

摘 要

海洋表層から深海底に向けて沈降する粒子中には様々な環境情報が含まれている。特に粒子中の生物遺骸は、その生物が生産された当時の環境情報を記録している。本研究では、中・西部太平洋赤道域で採取されたセディメントトラップ試料から、珪酸塩の殻を持つ珪藻およびレディオラリアフラックスの東西分布、時系列変動を明らかにする事で、エルニーニョ南方振動(ENSO)サイクルが海洋環境に及ぼす変動と、珪質プランクトン群集の間にどのような関係があるのかを探った。その結果、基礎生産者である珪藻フラックスは赤道湧昇流域で高く、西太平洋暖水塊で低いという明瞭な東西分布を示し、本研究海域の水塊特性をよく反映していた。また、海洋の代表的な動物性プランクトンであるレディオラリアは珪藻と同様の変動をしており、その生産は表層の基礎生産を即座に反映していた。さらに、珪藻およびレディオラリアはラニーニャ期における降雨の変化や、西太平洋暖水塊の季節的な東西移動に対応したフラックス変動を示した。加えてレディオラリアに関しては、エルニーニョ発達期における亜表層海流や水塊構造の変化がレディオラリア種の生産に大きく影響していることが明らかとなった。

キーワード：珪藻、セディメントトラップ、沈降粒子、放散虫、レディオラリア、ENSO

1. はじめに

太平洋赤道域の特徴の一つとして、西部域には西太平洋暖水塊(western Pacific warm pool: WPWP)、またその東側の中部域には赤道湧昇流域(equatorial upwelling region: EUR)の二つの異なる水塊が存在する(図1)。西太平洋暖水塊は28°Cを超える海表面水温(sea surface temperature: SST)を保ち¹⁾、その高水温と地理分布は、エルニーニョ南方振動(El Niño-Southern Oscillation: ENSO)の動向に深く関連があることが知られている²⁾⁻⁴⁾。エルニーニョ期にはWPWP分布域は東太平洋まで張りだし、ラニーニャ期には西太平洋に縮小する(図2)。このエルニーニョ・ラニーニャサイクルは、ほぼ4年ごとに訪れる⁵⁾。

珪藻、およびレディオラリア(放散虫)は珪酸塩($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)の殻を持ち、海洋におけるプランクトン群集の主要構成者である。珪藻は海洋において主要な基礎生産者であり、光合成を行うことで有機物を合成することから海洋表層より深海への炭素の輸送という役割を担っている。またその生産過程において、炭酸塩殻をもつプランクトンと異なり炭酸ガスを放出しないため、大気中の炭

酸ガスを増加させることが無いのも特徴である。一方、レディオラリアは海洋の主要な二次生産者であり、その生産は水温・塩分などの物理化学的要素に加え、珪藻などの基礎生産による影響を大きく受けると考えられているが、生態については未知の部分が多い。また、種によって様々な深度域に生息することも特徴の一つである⁶⁾。

本研究では、1999年から2002年に西・中部太平洋赤道海域に設置されたセディメントトラップより回収された試料を用いた。セディメントトラップは海洋中の沈降粒子を捕集する装置である。これまで、西部太平洋海域における沈降粒子研究は、Gupta and Kawahata⁷⁾などによってその化学組成が明らかになっており、Kawahata *et al.*⁸⁾では浮遊性有孔虫の生産について報告されている。また、珪質プランクトン群集(珪藻、レディオラリア)についても、高橋⁹⁾によってその分布について紹介されている。しかしながら、ENSOの変動によって実際の生物群集がどのように呼応するのかについては、まだ十分に研究されているとは言い難い。上記の通り、珪質プランクトン群集は水温や塩分など環境要因の変動によりその群集組成が変化することが知られており、現在

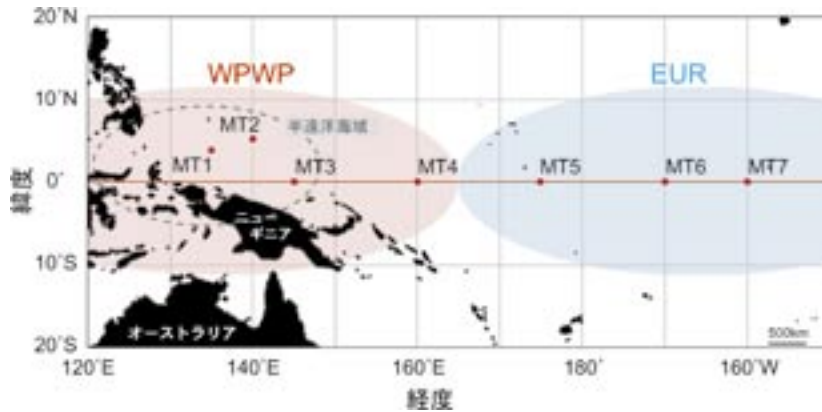


図1 時系列セディメントトラップ設置測点および西太平洋暖水塊(WPWP)と赤道湧昇流域(EUR)の分布。

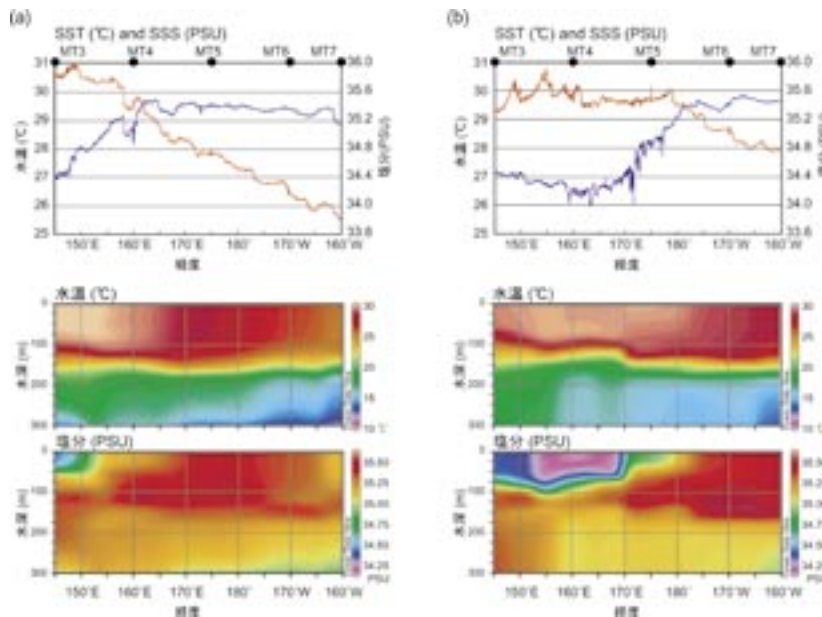


図2 CTDおよびオンライン粒度分布測定機(EPCS)を用いて得られたSSTとSSSの分布(JAMSTEC)²⁸⁾。
 (a) ラニーニャ状況: 2001年1月 (R/V Mirai Cruise Report, MR00-K08),
 (b) エルニーニョ状況: 2002年1月 (R/V Mirai Cruise Report, MR02-K01).

および過去における環境復元の指標としての応用が期待できる。太平洋赤道域の珪藻およびレディオラリア群集の時系列フラックス変動に関する研究は、エルニーニョ、ラニーニャ、モンスーンなど、ほぼ周期的に変動する環境変化に対する生物レスポンスとしての生産力や種構成の変化を明らかにするもので、環境指標シグナルの把握としても古環境学への応用などで大きな意義を持つ。本研究では、珪質プランクトン群集を対象にしてそのフラックス変動を明らかにすることで、海洋生物群集にENSOが及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 試料と方法

海洋科学技術センターが所有する海洋地球研究

船「みらい」のMR98-K02、MR99-K07、MR00K08、MR02K01、MR02-K06、計5回の航海によって、測点MT1からMT7までの各測点でShallow trap (水深約1,000 m) とDeep trap (水深約2,000 m、または3,000 m)の二層式セディメントトラップが設置および回収された(表1)。各セディメントトラップは開口面積0.5 m²で、22本のサンプル瓶を約15日周期で交換することにより沈降粒子を捕集する装置で、1999年1月から2003年1月までの約4年間の試料が得られている。現在までに、珪藻は1999年および2000年、レディオラリアは1999年から2001年までの試料について解析が行われている。回収された試料は1 mmメッシュのふるいにかけて、1 mm以下の粒子に関して回転式スプリッターで顕微鏡観察に適した任意の濃度(1/16~1/1,024)まで分割した。珪藻に関しては1 mm以下の

表1 時系列セディメントトラップの設置定点, 水深, および試料捕集期間(1999年~2002年).

Site No.		MT1	MT2	MT3	MT4	MT5	MT6	MT7	
Trap Location	Lat.	4°N	5°N	0°	0°	0°	0°	0°	
	Long.	135°E	140°E	145°E	160°E	175°E	170°W	160°W	
Trap Depth (m)	Shallow	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	Cruise ID
	Deep	3000	3000	2000	2000	3000	3000	3000	
Trap year1	Deploy.	Jan-99	Jan-99	Jan-99		Jan-99			MR98-K02
	Recov.	Nov-99	Nov-99	Nov-99		Dec-99			
Trap year2	Deploy.	Nov-99		Dec-99	Dec-99	Dec-99	Dec-99		MR99-K07
	Recov.	Oct-00		Jan-01	Jan-01	Jan-01	Jan-01		
Trap year3	Deploy.			Feb-01	Jan-01	Jan-01		Jan-01	MR00-K08
	Recov.			Feb-02	Feb-02	Jan-02		Jan-02	
Trap year4	Deploy.			Mar-02	Feb-02	Feb-02	Feb-02	Jan-02	MR02K-01
	Recov.			Dec-02	Jan-03	Jan-03	Jan-03	Jan-03	
		This study				No sample			

粒子、レディオラリアに関してはさらに63 μm のふるいにかけて、63 μm 以上の粒子をフィルター（直径25 mm、孔径0.45 μm ）上に濾過し、その濾紙の濾過部分の全てをカナダバルサムとキシレンを用いて封入した。完成したスライド標本を光学顕微鏡下で観察した。スライド上で同定された珪藻、レディオラリアの個体数を計数し、開口面積および捕集期間を考慮に入れ1日1 m²当りに沈降する粒子数、フラックスを算出した。

珪藻：Flux (valves m⁻² day⁻¹) = (N/A/D) × C × (S₁/S₂)

レディオラリア：Flux (shells m⁻² day⁻¹) = (N/A/D) × C × 1 (スライド全面計数のため)

N：珪藻およびレディオラリアの計数値、A：セディメントトラップの開口面積、D：サンプル採取期間、C：分割濃度（16~1,024）、S₁：スライド上フィルターの全面積、S₂：計数を行った面積

3. 海洋環境

3.1 海流

西部及び中部太平洋赤道域には大きく分けて、北赤道海流 (NEC)、南赤道海流 (SEC)、北赤道反流 (NECC) の3つの表層海流が存在しており、測点MT3からMT7までは南赤道海流と北赤道反流の間に位置している(図3)。北赤道海流は北緯13°付近でフィリピン諸島にぶつかり南北に分かれる。南方向の流れとしてミンダナオ海流 (MC) となり、その一部は北赤道反流に合流する。一方、南半球ではニューギニア北岸の表層をニューギニア沿岸海流 (NGCC) が流れている。ニューギニア沿岸海流はその駆動力を表層付近で吹く海上風に頼っており、例年夏には北西、冬には南東方向に流れている¹⁰⁾。

なお、水深100 m以深の亜表層海流としては、赤道上を水深200 m付近を東へ向かう赤道潜流

(EUC) が存在している。この流れは、西部太平洋海域の亜表層流が集まったものであり、代表的なものとしてニューギニア北東部沖の水深100 mにニューギニア沿岸潜流 (NGCUC) が流れており、東経140°付近で赤道潜流に合流することが知られている(図3)。

3.2 水塊構造と陸からの影響

赤道上に位置する測点MT3からMT7までの海域は主に西太平洋暖水塊、赤道湧昇流域の二つの水塊により特徴づけられる。通常、中部太平洋赤道域に位置する測点MT7では強い西向きの貿易風により赤道湧昇の効果が大きく、一年を通じて表層水温の低い海域である。この測点から順次、西の測点ほど西太平洋暖水塊により赤道湧昇が抑制され、ラニーニャ期においては西太平洋暖水塊と赤道湧昇流域の境界は測点MT4付近に位置していた(図2)。この中部及び東部赤道海域は、高栄養塩-低クロロフィル (HNLC: High Nutrient Low Chlorophyll) 海域とも呼ばれ、その栄養塩濃度と日照量から見積もられる値よりも実際の生物生産量が低いことが知られている¹¹⁾。これは鉄など生命活動に必須な微量元素の枯渇によるものと考えられており¹²⁾、実際に太平洋赤道域の海水に鉄を付加する実験でプランクトンの増殖速度が有意に速くなることが報告されている¹³⁾。

また、測点MT3は西太平洋暖水塊の中央付近に位置し、その表層は他の測点に比べてもっとも貧栄養な海域であるため一次生産の低い海域であるが¹⁴⁾、最も近い陸域としてパプアニューギニアがあり、その北東側に河口をもつセピク川からの陸源性物質がニューギニア沿岸潜流など亜表層海流を通じてこの付近に供給されていることが報告されている¹⁵⁾。

本研究における測点のうち、MT1及びMT2は赤道上から約5°ほど北の西太平洋暖水塊西端に位置しており、周囲をインドネシア諸島など陸地に囲まれている。この地域特有のスコールによる大量の降雨は月平均にして500 mm以上、パプア

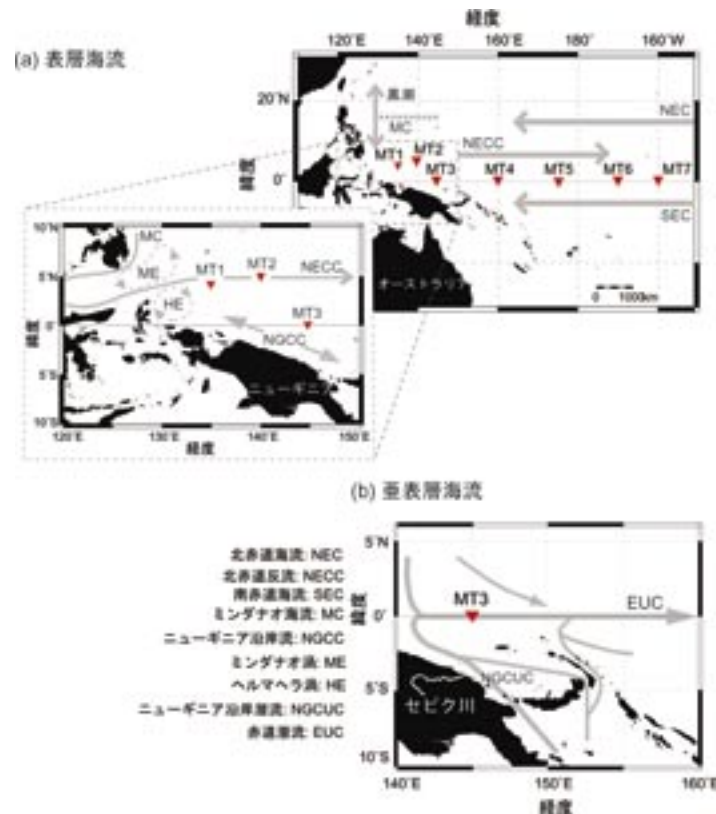


図3 西・中部赤道太平洋における主な海流。
 (a)表層流; (b)セピク川と潜流(Fine et al.¹⁰)を改変).

ニューギニアの一部地域などでは年間10,000 mmにも達する¹⁶⁾。このため、陸域から大量の河川水が海洋に流れ込む。さらに、ミンダナオドームと呼ばれる湧昇域の存在から¹⁷⁾、この海域では栄養塩供給が多いため、西太平洋暖水塊海域でありながら比較的生物生産が高い。ミンダナオドームは、東経130°、北緯7°付近を中心に北赤道海流、ミンダナオ海流、北赤道逆流の三つの海流で囲まれた領域に存在する冷水の湧昇を伴う低気圧性の循環である¹⁸⁾。

3.3 ENSOと環境変動

3.2で述べた水塊構造や大気はENSOにともない変化する。ENSOを判断する指数として南方振動指数(Southern Oscillation Index: SOI)がよく用いられる。このSOIから判断すると、本研究期間のうち1999年から2001年前半はラニーニャ傾向、2001年7月以降はエルニーニョ傾向であった(図4(a))。

ラニーニャ期において、SOIやSSTは季節的かつ周期的な変動をしていた(図4(a)、図4(b))。これは、ENSOに対応して西太平洋暖水塊が東西に移動し、水塊構造が大きく変化したためである。ラニーニャ期には西太平洋暖水塊は西縮して厚い暖水塊を形成する(図2(a)、図4(c))。

このため、西部太平洋域において表層水温は高く水温躍層は深くなり、大気に多量の熱が放出される。この放熱によって赤道太平洋上に東西に横たわる熱帯収束帯(ITCZ: Intertropical Convergence Zone)の勢力が強められ、陸域に多量の雨をもたらす。本研究期間には大部分がラニーニャ傾向であったが、その中でSOIやSSTは季節的かつ周期的な変動をしていた(図4(a)、図4(b))。これに対して2001年7月以降、ラニーニャからエルニーニョへの移行に伴い、西太平洋暖水塊が東進して暖水塊が薄く引き延ばされることで海洋表層は東部赤道域まで高水温になり、逆に西部では暖水塊が浅くなっていた(図2(b)、図4(c))。

4. 珪質プランクトン群集とENSO

4.1 これまでの研究

これまで、1999年1月、11月における珪藻・レディオラリアの現存量(Standing Stock)に関して表層・亜表層の海水濾過試料とプランクトンネット試料の解析が行われており、ラニーニャ期における珪藻とレディオラリアの東西分布および深度分布が明らかになっている^{19),20)}。これらの研究によると、珪藻とレディオラリアの現存量は共

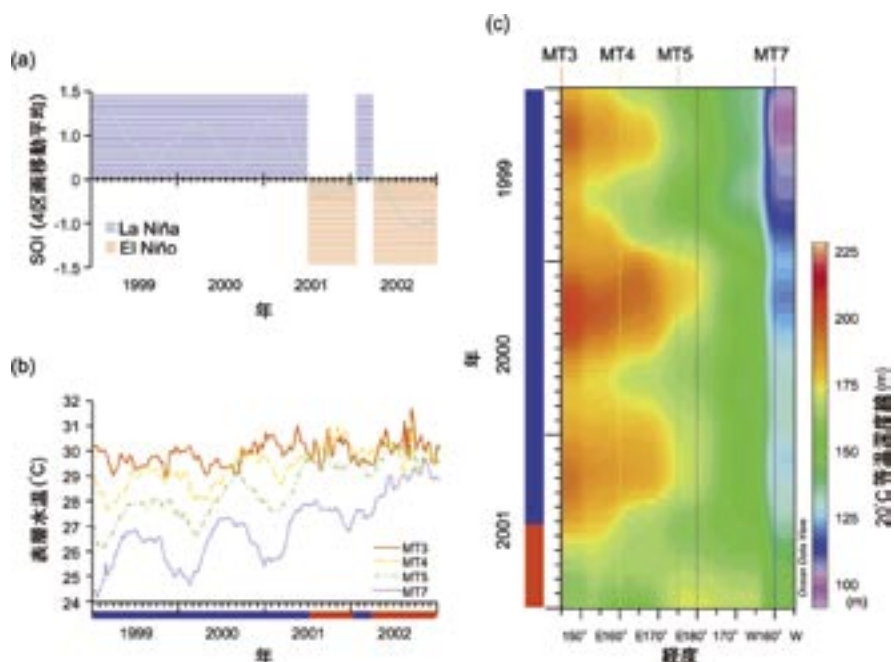


図4 エルニーニョ南方振動に伴う環境変動。
 (a) 南方振動 (Garret)²⁹⁾, (b) SST (Ji *et al.*)³⁰⁾, (c) 20°C等温深度 (McPhaden)³¹⁾.
 (b)および(c)の時間軸の赤色, 青色はそれぞれエルニーニョおよびラニーニャの期間を示す。

に西太平洋暖水塊に属している西の測点で低く、赤道湧昇流域に属している東の測点で高かった。また種により明瞭な東西分布が現れ、特に珪藻に関して西太平洋暖水塊では*Nitzschia bicapitata*、*Thalassionema nitzschioides*などが卓越するのに対し、赤道湧昇流域では*Rhizosolenia bergonii*、*Fragilariopsis doliolus*などが頻繁に出現し、両水塊で明確に種の棲み分けがなされていた¹⁹⁾。さらに、レディオラリアに関しては種によって様々な深度分布域に生息していることが分かった²⁰⁾。以下にその深度域を三つに区分した中で代表的な種を記す。

1. 表層種 (Surface dwellers: 0~120 m): *Pseudocubus obeliscus*, *Didymocyrtils tetrathalamus tetrathalamus*.
2. 亜表層種 (Subsurface dwellers: 120~200 m): *Pseudodictyophimus gracilipes*, *Clathrocorys murrayi*.
3. 中層種 (Intermediate water dwellers: 200~1,000 m): *Litharachnium tentorium*, *Borgertella caudata*.

4.2 珪質プランクトン群集フラックス

全珪藻および全レディオラリアフラックスは東の測点ほど高くなる傾向にあった(図5、図6)。ただし、珪藻では測点MT1、レディオラリアでは測点MT1およびMT2において測点MT5と同程度の高いフラックスを示した。この結果は、4.1で示した珪質プランクトンの現存量の東西分布と同様なものであった。測点MT1、MT2および

MT3は西太平洋暖水塊の西端に位置する半外洋域であり、栄養塩はミンダナオドームの湧昇や河川からの陸源性物質から供給される。それに対して測点MT4、MT5、MT6およびMT7では主に赤道湧昇による栄養塩供給の効果が大きい。そのため西太平洋暖水塊と赤道湧昇流域の間に位置している測点MT3とMT4では、栄養塩供給が最も低くなり、他の測点に比べて珪藻およびレディオラリアの生産が低くなったと考えられる。

全珪藻および全レディオラリアフラックスは顕著な季節変動を示した(図5)。また、全珪藻フラックスと全レディオラリアフラックスは似た変動を示した。海洋における主な基礎生産者である珪藻と二次生産者であるレディオラリアのフラックス変動が類似していたことは、レディオラリアが表層における基礎生産の影響を強く受け、またその変動を即座に反映していることを示している。ただし、測点MT1では珪藻の方がレディオラリアよりも顕著な季節変動を示した。すなわち1999年、測点MT1における全珪藻フラックスは高フラックス期と低フラックス期がはっきりと分かれているのに対して、同時期における全レディオラリアフラックスはその変動が明瞭ではない(図5)。3.2で述べたとおり、測点MT1付近にはミンダナオドームと呼ばれる湧昇域が存在する。Masumoto and Yamagata²¹⁾によるとミンダナオドームには季節性があり、晩秋から春にかけて発

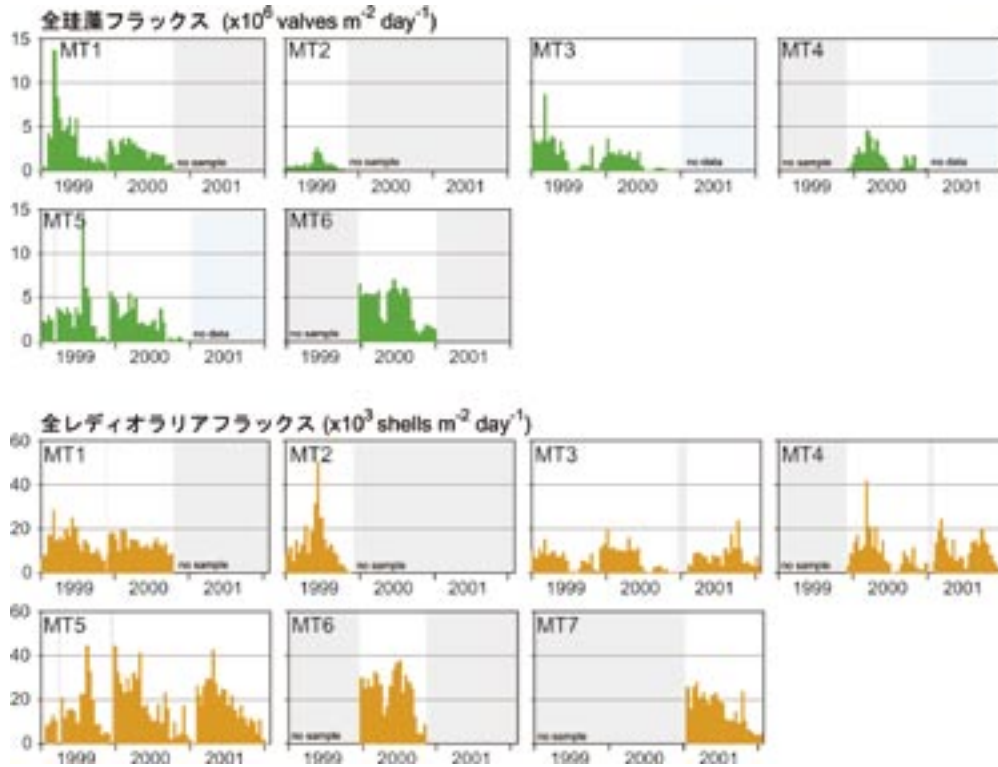


図5 西・中部赤道太平洋7カ所のセディメントトラップ測点における1999年1月から2002年1月までの全珪藻および全レディオラリアフラックスの時系列プロット。

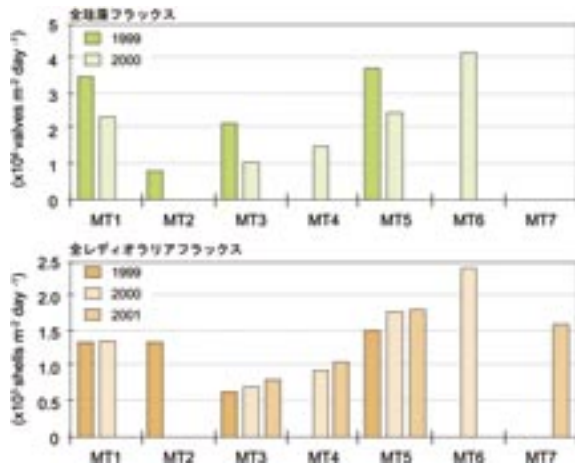


図6 セディメントトラップ測点MT1よりMT7までの年平均フラックス。
(a) 全珪藻(1999年および2000年), (b) 全レディオラリア(1999年, 2000年, および2001年)。

達し、春から夏にかけて東方からの暖水の侵入によって急速に弱まることを報告している。このミンダナオドームの発達時期と測点MT1における全珪藻の高フラックス期とはよく一致しており、ラニーニャ期の西太平洋暖水塊海域において海洋表層での基礎生産に季節的な変動があったことを示すものである。そのため、MT1ではレディオラリアよりも珪藻のフラックスの方により大きな季節変動が現れたものと考えられる。なお、ラニーニャ期における西部太平洋赤道域の珪藻フ

ラックスについては Ono *et al.*²²⁾ に詳しい。

珪藻およびレディオラリアフラックスの東西分布を比較すると、赤道湧昇流域で増加する種と西太平洋暖水塊で増加する種の固有のパターンがあることが明らかである。珪藻の *Rhizosolenia bergonii*、レディオラリアの *Pseudocubus obeliscus* は明らかに西太平洋暖水塊よりも赤道湧昇流域に多く産出する(図7)。一方、珪藻の *Nitzschia bicaipitata* とレディオラリアの *Acanthocorys cf. Variabilis* は逆に赤道湧昇流域よりも西太平洋暖水塊に多い(図7)。Treppeke *et al.*²³⁾ によると珪藻の *N. bicaipitata* はサイズが小さく (Mean = 8.8 μm : 3-38 μm , N=152; Kobayashi and Takahashi, 2002)¹⁹⁾、非常に脆弱な殻を持つことから、栄養塩供給の少ない海域でも比較的多く出現する種であるとされている。それに対して赤道湧昇流域種である *R. bergonii* は頑強で溶解しにくい殻を持つとされる。一方、レディオラリアについては、西太平洋暖水塊種 (*A. cf. variabilis*, *Didymocorytis tetrathalamus tetrathalamus*) に比べて、赤道湧昇流域種 (*P. obeliscus*, *Lithomelissa setosa*) の方が一般的にサイズは小さく、珪藻で赤道湧昇流域海域の方がサイズの大きい種 (>10 μm) が多産したのとは逆の関係である。またその東西分布を見ると、珪藻の方がレディオラリアに比べてより明瞭であることが分かる(図7)。これらの特徴は、水

温・塩分・栄養塩および光量などの影響を受ける珪藻と、二次生産者であるレディオラリアの違いであると考えられる。

4.3 ラニーニャ期における珪質プランクトンフラックスの季節変動

1999年および2000年における測点MT3での全珪藻および全レディオラリアフラックスは、年の前半に高く、後半に低いという周期的な変動パターンを示した(図5)。測点MT3は年間を通じて西太平洋暖水塊に覆われており温度躍層が深いため、深層から表層への湧昇による栄養塩供給が小さい海域である。3.2でも述べたとおり、本海域における珪質プランクトンのフラックスの増減に関わる有力な要因としては、陸域からの河川水を通じて供給される陸源性物質の影響が挙げられる。この陸源性物質は、主にパプアニューギニア北東沿岸を流れる亜表層流(ニューギニア沿岸潜流)を通じて西部太平洋赤道域にまで運ばれている¹⁵⁾。ニューギニア島などに代表される赤道付近の東南アジア地域は11月から4月に雨期を迎えることが知られており¹⁶⁾、この降雨により大量の陸源性物質が海洋に供給され、亜表層流を通じて測点MT3付近にまで運ばれることにより、1999年から2001年前半のラニーニャ期において、このような周期的なフラックス変動を示したものと

考えられる。

測点MT4はラニーニャ期において、西太平洋暖水塊と赤道湧昇流域の境界付近に位置していた(図2(a))。この測点の2000年における全珪藻および全レディオラリアフラックスは、3月、9月付近に高く7月、12月付近で低いという変動であり(図5)、また3月と9月のピークを比較すると、特に珪藻において3月のピークの方が高フラックスであった。このような季節変動は、西太平洋暖水塊の東西移動の影響を受けた結果であると考えられる。測点MT4におけるSSTは、2000年の4月が最も低く、28℃付近まで低下したのに対して(図4(b))、全珪藻および全レディオラリアフラックスは高い値を示した。SSTの低下は西太平洋暖水塊が西縮したためであり、赤道湧昇の強化に伴い一次生産が増加し、その結果、珪藻およびレディオラリアの生産が高まった。これに対して2000年9月には、SSTは高く(図4(b))、西太平洋暖水塊が東進し赤道湧昇の効果が弱まったため、フラックスは2000年3月のピークよりも低い値を示したと考えられる。

全珪藻および全レディオラリアフラックスは、測点MT3, 4に比べて、より赤道湧昇流域に位置する測点MT5において高い値を示した(図6)。1999年はラニーニャ最盛期であり、フラックス

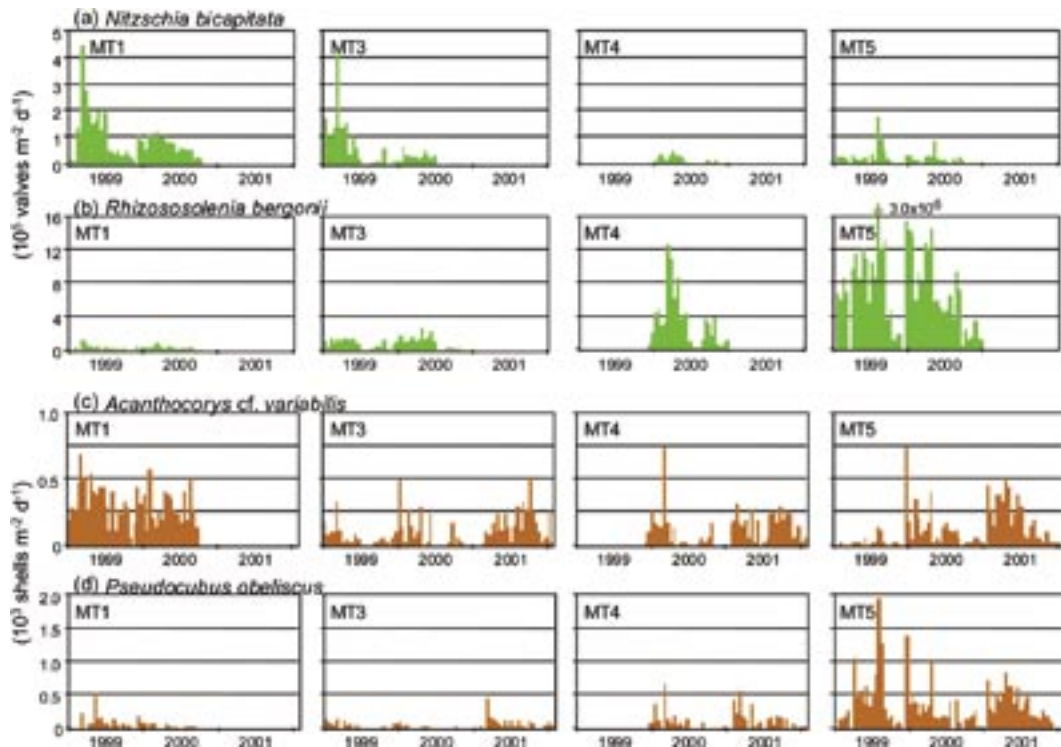


図7 西太平洋暖水塊指標種の時系列プロット。
珪藻：(a) *Nitzschia bicapitata*, レディオラリア, (b) *Rhizosolenia bergonii*, レディオラリア,
珪藻：(c) *Acanthocorys cf. variabilis* および赤道湧昇指標種の時系列プロット,
(d) *Pseudocubus obeliscus*.

変動は特徴的なものであった。2000年と2001年のレディオラリアフラックス変動は、MT5、MT7において年のはじめに高く、後半に向かい徐々に低下していくという変動をともに示した(図5)。この変動は測点MT5ではSSTの変動と関係し、SSTの低い時期にフラックスは高く、SSTの高い時期にフラックスは低い値を示した。SSTの低下は、赤道湧昇の強化を意味しており、測点MT5における珪藻およびレディオラリアフラックスは赤道湧昇の影響を強く受けることが示唆される。

4.4 2001年エルニーニョ発達期におけるレディオラリアフラックスの特徴

2001年7月以降はエルニーニョの発達に伴い(図4(a))、測点MT3およびMT4における全レディオラリアフラックスはラニーニャ期に見られた周期的な変動とは異なる変動を示した(図5)。

測点MT3における全レディオラリアフラックスは1999年および2000年では、4.3で示したように周期的な変動であったのに対し、2001年ではその7月以降のフラックスが過去2年間の変動とは異なり高い値を示した(図5)。測点MT3付近では、エルニーニョ期には西太平洋暖水塊が東進するため熱帯収束域が東側にずれ、一般的に降雨量は減少する。NCEP/NOAAによる東西方向の風応力データによって、測点MT3付近において2001年7月の始めから9月の終わりまで南東貿易風(北西向きの風)が卓越したことが分かっている²⁴⁾。ニューギニア沿岸海流は、主に海上風によって駆動される。よって、2001年7月から9月に南東風の卓越によって西太平洋への陸源性物質の供給量が増大した可能性がある。また近年、陸起源の物質の中で生物活動に必須な元素として鉄が注目されている。西部太平洋海域では、Mackey *et al.*²⁵⁾によって鉄濃度の鉛直分布が報告されている。それによると測点MT3付近において、エルニーニョ発達期(1997年8月)の方がラニーニャ全盛期(2000年1月)よりも、亜表層海水中の鉄濃度が高いことを報告している。またその原因として、ニューギニア沿岸海流の強化にともない陸域からの影響が強まったことを挙げている。また黒田・植木²⁶⁾によると、エルニーニョ発達期において、ニューギニア沿岸海流およびニューギニア沿岸潜流が強化されることを報告しており、その原因として西太平洋暖水塊の東進による西部太平洋域の海面高度の低下を挙げている。研究期間が異なるため一概には言えないが、2001年7月以降、エルニーニョ発達期においてレディオラリアの生産が高くなったことは、

ニューギニア沿岸潜流の強化によって鉄、窒素、リンおよび珪素など陸起源の栄養塩供給が増大したことを示唆している。

測点MT4における全レディオラリアフラックスは、2000年、2001年の両年ともに、3月、9月付近に高く7月、12月付近で低いという周期的なものだった。そのうち、2000年における全レディオラリアフラックスでは3月のピークが9月よりも低かった。それに対して、2001年では3月のピークと9月のピークの高さは同程度であった(図5)。SSTと比較すると、2000年および2001年3月はSSTが29°C付近まで下がっており(図4(b))、全レディオラリアフラックスにはピークが現れた(図5)。これは赤道湧昇の強化に伴い一次生産が増加し、レディオラリアの生産が高まるというラニーニャ期に特徴的な変動であった。一方、2001年6月以降では、1999年から2000年には190 m程度あった20°C等温深度が150 m程度に急激に浅くなっている(図4(c))。これはエルニーニョ化に伴い、西太平洋暖水塊が東進することで暖水塊の厚みが薄くなったことを示している。このため2001年6月以降において、生息深度が120~200 m付近の亜表層種の生産に大きな影響を与えたであろう。実際、Kling²⁷⁾により北太平洋中央部において富栄養水塊での亜表層種とされている*Pseudodictyophimus gracilipes*については、そのフラックスが2001年前半のピークよりも年後半のピークの方が高い値を示した(図8(a))。加えて、*Tetraplecta pinigera*など、他の亜表層種のフラックスも、*P. gracilipes*と同様の変動をした。この時、表層種である*P. obeliscus*、*D. t. tetrathalamus*のフラックス変動が上記の亜表層種とは逆に、年後半に低い値を示した(図8(b))。このような表層種と亜表層種の異なるフラックス変動は、エルニーニョ化に伴う鉛直方向での水塊構造の変化をレディオラリアがよく反映している事を示すものである。

5. まとめ

中部及び西部太平洋赤道域における全珪藻、及び全レディオラリアフラックスの1999年~2001年時系列変動が明らかになった。また、これら珪質プランクトン群集とラニーニャ及びエルニーニョ発達期における環境変動との関係について考察を行った。ラニーニャ期には、ミンダナオドームからの栄養塩供給による影響が大きい測点MT1で珪藻、レディオラリアともにEUR海域と同程度のフラックスであった。特に珪藻はミンダ

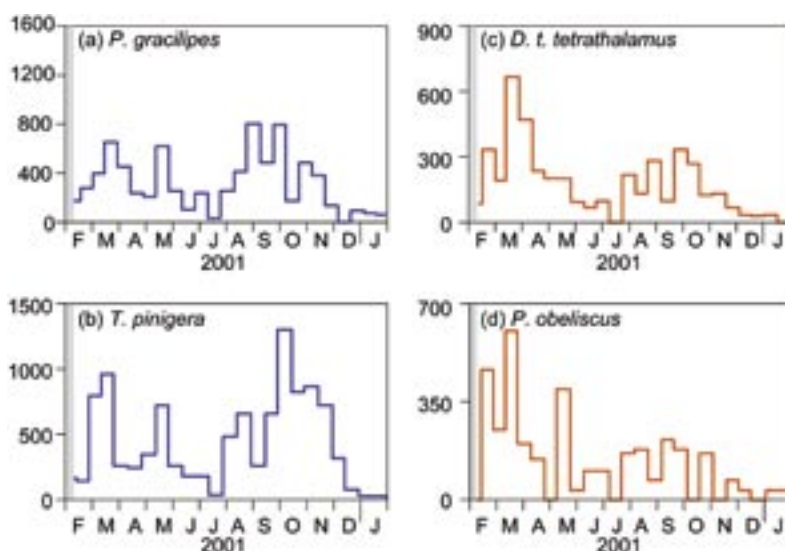


図8 セディメントトラップ測点MT4における2001年2月～2002年1月間の表層および亜表層に特徴的なレディオラリア種のフラックス。
表層種: (a) *Pseudodictyophimus gracilipes*, (b) *Tetraplecta pinigera*,
亜表層種, (c) *Didymocyrtis tetrathalamus tetrathalamus*,
(d) *Pseudocubus obeliscus*.

ナオドームの発達時期に呼応して、その生産が変化していた。また、赤道上の測点 (MT3、MT4、MT5、MT6、MT7) ではラニーニャ期には珪藻、レディオラリアとともに降雨量の変化と西太平洋暖水塊の季節的な東西移動による赤道湧昇の強弱によって支配されていた。レディオラリアに関しては、2001年後半のエルニーニョ発達期には測点MT3、MT4で亜表層海流や水塊構造が変動する事によって、その生産に影響を与えることが示唆された。以上のことから、本研究でラニーニャ期における海洋環境変動と珪質プランクトン群集 (珪藻・レディオラリア) フラックスとの関係が明らかとなったが、エルニーニョ期については未知の部分が多い。そのため、さらに詳細かつ継続的な調査・分析が必要である。今後の課題は、本格的なエルニーニョ期である2002年の珪藻およびレディオラリアフラックスを解析することで、ENSOと珪質プランクトン群集との関係性を明らかにしていくことである。

謝辞

本研究は、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。関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Yan, X.H., C.R. Ho, Q. Zheng and V. Klemas (1992) Temperature and size variabilities of the Western Pacific Warm Pool. *Science*, 258, 1643-1645.
- 2) Picaut, J., M. Ioualalen, C. Menkes, T. Delcroix and M.J. McPhaden (1996) Mechanism of the zonal displacements of the Pacific Warm Pool: Implications for ENSO. *Science*, 274, 1486-1489.
- 3) Inoue, H.Y., M. Ishii, H. Matsueda and M. Aoyama (1996) Changes in longitudinal distribution of the partial pressure of CO₂ (pCO₂) in the central and western equatorial Pacific, west of 160°W. *Geophysical Research Letters*, 23, 1781-1784.
- 4) Le Borgne, R., R.T. Barber, T. Delcroix, H.Y. Inoue, D.J. Mackey and M. Rodier (2002) Pacific warm pool and divergence: temporal and zonal variations on the equator and their effects on the biological pump. *Deep-Sea Research II*, 49, 2471-2512.
- 5) Neelin, J.D. and M. Latif (1998) El Niño dynamics. *Physics Today*, 32-36.
- 6) Kling, S.A. and D. Boltovskoy (1995) Radiolarian vertical distribution patterns across the southern California Current. *Deep-Sea Research I*, 42, 191-231.
- 7) Gupta, L. P. and H. Kawahata (2002) Impact of ENSO variability on the flux and composition of sinking POM in the western equatorial Pacific Ocean: Amino acids and hexosamines. *Deep-Sea Res. II*, 49 (13-14), 2769-2782.
- 8) Kawahata, H., A. Nishimura and M.K. Gagan (2002) Seasonal change in foraminiferal production in the western equatorial Pacific warm pool: evidence from sediment trap experiments. *Deep-Sea Research II*, 49, 2783-2800.

- 9) 高橋孝三(2002)珪藻と放散虫(レディオラリア). 地質ニュース, 576, 37-43.
- 10) Fine, R.A., R. Lukas, F.M. Bingham, M.J. Warner and R.H. Gammon (1994) The western equatorial Pacific: A water mass crossroads. *Journal of Geophysical Res.*, 99, 25063-25080.
- 11) Minas, H.J., M. Minas and T.T. Packard (1986) Productivity in upwelling areas deduced from hydrographic and chemical fields. *Limnology and Oceanography*, 31, 1182-1206.
- 12) Martin, J.H., R.M. Gordon and S.E. Fitzwater (1991) The case for iron. *Limnology and Oceanography*, 36, 1793-1802.
- 13) Takeda, S. (1998) Influence of iron availability on nutrient consumption ratio of diatoms in oceanic waters. *Nature*, 393, 774-777.
- 14) Kawahata, H., M. Yamamuro and H. Ohta (1998) Seasonal and vertical variations of sinking particle fluxes in the West Caroline Basin. *Oceanologica Acta*, 21, 4, 521-532.
- 15) Martin, C.E., B. Peucker-Ehrenbrink, G.J. Brunskill, and R. Szymczak (2000) Sources and sinks of unradiogenic osmium runoff from Papua New Guinea. *Earth and Planetary Science Letters*, 183, 261-274.
- 16) He, Y., A.G. Barnston and A.C. Hilton (1998) A Precipitation Climatology for Stations in the Tropical Basin; Effects of ENSO. *NCEP/Climate Prediction Center, ATLAS, No. 5.*
- 17) Lukas, R., E. Firing, P. Hacker, P.L. Richardson, C.A. Collins, R. Fine and R. Gammon (1991) Observations of the Mindanao Current during the Western Equatorial Pacific Ocean Circulation Study. *J. Geophys. Res.*, 96, 7089-7104.
- 18) 東塚知己・山形俊男(2001)ミンダナオドームの経年変動とENSO. 月刊海洋, 24, 90-97.
- 19) Kobayashi, F. and K. Takahashi (2002) Distribution of diatom along the Equatorial transect in the western central Pacific during the 1999 La Niña condition. *Deep-Sea Research II*, 49, 2801-2821.
- 20) Yamashita, H., K. Takahashi and N. Fujitani (2002) Zonal and vertical distribution of Radiolaria in the western and central Pacific in January 1999. *Deep-Sea Res. II*, 49 (13-14), 2823-2862.
- 21) Masumoto, Y. and T. Yamagata (1991) Response of the western tropical Pacific to Asian winter monsoon: the generation of the Mindanao Dome. *Journal of Physical Oceanography*, 21, 1386-1398.
- 22) Ono, I., K. Takahashi and F. Kobayashi (2004) Time-series fluxes of diatoms in the central and western equatorial Pacific, 1999-2000. *In: M. Poulin, Ed., Proc. 17th Int. Diatom Symposium 2002, Ottawa, Canada.* Biopress, Bristol, England, 271-280.
- 23) Treppke, U.F., C.B. Lange and G. Wefer (1996) Vertical fluxes of diatoms and silicoflagellates in the eastern equatorial Atlantic, and their contribution to the sedimentary record. *Marine Micropaleontology*, 28, 73-96.
- 24) Ji, M. and T.M. Smith (1995) Ocean model response to temperature data and varying surface wind stress: Intercomparisons and Implications for climate forecast. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 1811-1821; zonal and meridional wind stress data is available on homepage, <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.EMC/.CMB/.Pacific/.weekly/.taux/>, <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.EMC/.CMB/.Pacific/.weekly/.tauy/>.
- 25) Mackey, D.J., J.E. O'Sullivan and R.J. Watson (2002) Iron in the western Pacific: a riverine or hydrothermal source for iron in the Equatorial Undercurrent? *Deep-Sea Res. I*, 49, 877-893.
- 26) 黒田芳史・植木 巖(2002)ニューギニア沿岸海流および沿岸潜流の季節・経年変動, 月刊海洋, 34(5), 307-315.
- 27) Kling, S.A. (1979) Vertical distribution of polycystine radiolarians in the central north Pacific. *Marine Micropaleontology*, 4, 295-318.
- 28) JAMSTEC (2003) MIRAI cruise report data set; MR98-K02, MR99-K07, MR00-K08, MR02-K01, MR02-K06, Japan Marine Science and Technology Center. Cruise data is available on homepage, <http://www.jamstec.go.jp/mirai/>.
- 29) Garret, D. (2002) Monthly atmospheric and SST indices. Climate Prediction Center, NOAA. SOI data available on homepage, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/index.html>.
- 30) Ji, M., A. Leetmaa and J. Derber (1995) An ocean analysis system for seasonal to interannual climate studies. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 460-481; SST data is available on homepage, <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.EMC/.CMB/.Pacific/.weekly/.temp/>.
- 31) McPhaden, M.J. (2003) Pacific Marine Environmental Laboratory, NOAA. TAO/TRITON data is available on homepage, http://www.pmel.noaa.gov/tao/data_deliv/deliv.html.

(受付2004年3月3日、受理2004年6月27日)