

沖縄トラフ海域におけるセジメントトラップ実験 : 陸起源物質の挙動と沖縄トラフ海域の生物地球化学的特徴

本多 牧生*¹ 日下部正志*¹

中林 成人*¹ 田中 武男*²

西部北太平洋の亜熱帯海域であり、アジア大陸、東シナ海に隣接する沖縄トラフ海域（沖縄トラフ内、慶良間海裂、琉球海溝）において1993年～1996年にセジメントトラップ実験を実施した。その結果、沖縄トラフ海域の沈降粒子の主要構成成分は大陸、あるいは大陸棚起源の陸起源物質であり、ほとんどは沖縄トラフ内に沈積してしまうことが明らかになった。一方、海底堆積量は沈降粒子束の約8倍であることから、海底付近では大量の陸起源物質が水平方向から輸送され海底堆積物を覆っている様子が明らかとなった。また同海域における炭素フラックス、有機炭素/無機炭素比（Co/Ci比）が北西部北太平洋など他の海域と比べて低いことから、同海域の生物活動は大気中二酸化炭素の吸収に効果的に働いていないことが推察された。

キーワード：セジメントトラップ、沖縄トラフ、東シナ海、黄砂、堆積速度、生物ポンプ

Sediment trap experiment in the Okinawa Trough : behavior of lithogenic materials in the Okinawa Trough and its biogeochemical characteristics

Makio HONDA*³ Masashi KUSAKABE*³
Shigeto NAKABAYASHI*³ Takeo TANAKA*⁴

Sediment trap experiment was carried out from 1993 to 1996 in the Okinawa Trough which is adjacent to the Asia continent and the East China Sea. Results show that major component of settling particles were lithogenic materials derived from the continent and the continental shelf, and most of the materials were rapidly transported vertically to the sea floor without significant lateral transport. Sea floor sedimentation rate was approximately 8 times higher than the total mass flux. This suggests that lithogenic materials are transported laterally along the sea floor into the Okinawa Trough, and that particles transported vertically do not play a significant role in the bulk of lithogenic sedimentation in the Okinawa Trough.

In addition, carbon flux and the ratio of organic carbon to inorganic carbon (Co/Ci) in the

* 1 海洋観測研究部

* 2 深海研究部

* 3 Ocean Research Department

* 4 Deep Sea Research Department

Okinawa Trough was smaller than other areas such as the Northwestern North Pacific. This implies that biological activity in the Okinawa Trough does not work efficiently for the uptake of atmospheric CO₂.

Key Words : Sediment trap, Okinawa Trough, East China Sea, Kosa, Sedimentation rate, Biological pump

1 はじめに

産業革命以来、大気中の二酸化炭素濃度が増加し地球温暖化が懸念されている。大気中二酸化炭素の今後の増加率を知り、気温の上昇、及びそれに伴う海面上昇や生態系の変化を予測するためには、人類起源放出の二酸化炭素の全球的な循環過程を把握する必要がある。そのためには地球表面積の70%を占め、大気中二酸化炭素の約50倍の炭素を蓄積している海洋における炭素循環過程を把握する必要がある。現在、各国が様々な海域で物質循環研究を実施し、各海域におけるプロセス研究を実施している。この中で西部北太平洋での物質循環研究は、大陸～海洋のインターラクションが活発であること、深層水の終着海域で珪藻を中心とした生物生産力が活発であること、中層水が形成され海洋表層の物質を海洋内部へ輸送する能力を持つこと等の点で着目されてきた。海洋が大気中二酸化炭素を吸収するメカニズムは、溶解ポンプ (solubility pump) と生物ポンプ (biological pump) とに大別できる。後者の働きを評価するためには炭素を中心とした化学成分が粒子態としてどのように海洋内部へ輸送されるかを観測する必要がある。海洋における粒子態化学成分の鉛直・水平輸送過程を明らかにするセジメントトラップ実験は、上記情報を与えてくれる粒子を無人で、かつ長期間連続して捕集することができるため、海洋の物質循環研究において中心的な役割を果たしてきた (USGOFs, 1989¹⁾)。北太平洋では日本、米国、カナダが中心となり、多くの海域で同実験が実施されてきた。オホーツク海、ベーリング海を含む北西部北太平洋でも多くのセジメントトラップ実験が実施されてきたが日本南方の亜熱帯海域、及び黒潮海流域で長期にわたるセジメントトラップ実験は実施されてこなかった。このような背景の中で海洋科学技術センターでは、沖縄トラフ海域における物質循環過程を明らかにすべく、1992年からプロジェクト研究「深海における物質循環研究」に着手し、1993年1月からセジメントトラップ実験を開始した。このセジメントトラップ実験においては以下の点を明らかにすることを目的とした。

1.1 陸起源物質の外洋への供給過程、及び外洋の物質循環への影響の把握

亜熱帯域に位置する沖縄トラフ海域は黒潮暖流で覆われている。黒潮域は栄養塩濃度が低く生産力の低い海域であるが、同時に生産性の高い東シナ海に隣接している。近年、海域面積は狭いものの、その高い生産性から海洋の基礎生産力、ひいては海洋のもつ大気中二酸化炭素の制御に大きく関与すると考えられている縁辺海での物質循環研究がクローズアップされている。東シナ海は世界でも有数の広い大陸棚を持つとともに揚子江、黄河といった世界の二大河川を有するため基礎生産力が非常に高く、また陸起源物質の海洋への大供給源となっている (Milliman and Meade, 1983²⁾)。この海域で形成された生物起源物質、及び陸起源物質の外洋への供給過程とその影響力を把握するためには、沖縄トラフ海域で物質循環研究を実施する必要がある。

一方、低生産性の黒潮海域で、しばしば赤潮現象が発生することが報告されてきた。Tsunogai and Kondo (1982)³⁾ はこれが日本で黄砂現象が観測された時に発生している事実に着目し、栄養塩 (リン) を含む土壌物質が大気経由で海洋へ供給されたためであるとした。この他にも土壌物質中のその他の栄養塩や鉄の海洋への供給が海洋の生産性を高めることが多くの研究者により指摘されている (例えばDuce, 1986⁴⁾, Martin *et al.* 1988⁵⁾)。また土壌粒子に含まれる重金属は生物起源粒子に吸着されると錘の役割を果たすため、粒子を迅速に深海底まで輸送するという効果を持つことについても指摘されている (Honjo *et al.* 1982⁶⁾, Ittekkott, 1993⁷⁾)。したがって沖縄トラフのセジメントトラップ実験を通じて、河川及び大気経由で物質がどのように外洋へ運ばれ、海底に堆積したか、そしてその結果、海洋の物質循環過程にどのような変化が現れるのかを考察する。

1.2 亜熱帯海域の生物ポンプ過程の把握

深層水大循環の結果、北西部北太平洋では栄養塩に富む深層水の湧昇により海洋における生物生産力が高い。

そのためどの程度生産力、生物ポンプ能力が高く、海洋全体の炭素循環においてどのような役割を果たすのかを定量的に把握することが重要である。一般的に北西部北太平洋深層水中にはケイ素が多く、そのためこの海域はケイ酸塩の殻をもつ生物が優占種となっていることが多くの研究で明らかになった。特にベーリング海は、南極海と並んで世界で最も生物生産力が高く、ケイ酸塩の海 (silica ocean) であると呼ばれている (Tsunogai *et al.* 1979⁸⁾)。最近のオホーツク海、またベーリング海でのセジメントトラップ実験でもこの点が支持されている (Honjo *et al.* in preparation)。ケイ酸塩の殻をつくる生物は炭酸カルシウムを形成しないため、この種の生物活動の増加は大気中二酸化炭素を吸収する効果をもつと考えられる (Tsunogai and Noriki, 1991⁹⁾)。一方、西部北太平洋でも暖流である黒潮の流入する亜熱帯海域に位置する沖縄トラフ海域では海洋表層の生態系が大きく異なることが予想される。また上述のとおり親潮海流と異なり黒潮海流は貧栄養海域として知られている。したがって同海域でセジメントトラップ実験を実施することで海洋表層の生態系を把握するとともに、深海へ輸送される炭素フラックス、及び炭素フラックスの有機炭素/無機炭素比から同海域の生物ポンプ過程、換言すれば大気中二酸化炭素の吸収効率について考察する。

2 係留系と実験海域

2.1 セジメントトラップ係留系

本研究におけるセジメントトラップとして、時間分画式セジメントトラップMark7G-21 (米国McLane社製) が使用された (写真1, 図1)。セジメントトラップは世界各国で様々な形状のものが市販されており、機種によって捕集効率が異なることが報告されてきた (例えば 乗木・角皆, 1986¹⁰⁾, USGOFs, 1987¹¹⁾)。本セジメントトラップは様々なセジメントトラップ間のインターキャリブレーション、及び放射性同位体の分析の結果、沈降粒子の捕集効率がほぼ100%とされたものであり (Honjo *et al.* 1992¹¹⁾)、使用実績が多く世界的に標準化されつつあるセジメントトラップである (Honjo and Doherty, 1988¹²⁾)。本セジメントトラップは内部容積が約500mlの捕集カップが21個ついたものであり、任意の時間で捕集を開始し、任意の時間で交換が可能のように初期設定できるものである。捕集カップは15日、あるいは17日ごとに交換されるように初期設定した。セジメントトラップを設置する水深の海水を採水し、設置前に各捕集カップに充填した。防腐剤としてはホルマリンを

使用し、ホルマリン濃度が3%~5%、及びpH緩衝用にほう酸ナトリウムを約0.02%になるように各試薬を添加した。

係留索としては破断強度が高く、取扱が容易なビニール被覆された3/16"ワイヤケーブルを使用した。またフロートは従来のガラスフロート3個が一つのプラスチックカバーに収納され一体化された結果、断面積が小さく係留系が海水流動による影響を受けにくいタイプのBilling G6600 (米国Billing社製) を採用した (写真2)。係留系にはセジメントトラップの他、流向流速計や濁度計、及びマンガンファイバーが設置される場合もあった。図2に1993年1月~7月にJAST01に設置したセジメントトラップ係留系を示す。

2.2 実験海域、実験期間

セジメントトラップ実験は1993年1月~1996年8月まで、東シナ海と琉球列島孤の間の背孤船状海盆である沖縄トラフの北端 (JAST01)、琉球海溝陸側斜面 (JAST02)、及び沖縄トラフと外洋域を結ぶ慶良間海裂 (JAST03, JAST04) の4箇所で実施された (図3)。なお同図に併せ示したように、セジメントトラップ試料と比較するため、セジメントトラップ設置地点周辺で海底堆積物を、スミスマッキンタイヤー式採泥器、マルチプルコアラー、及び5mピストンコアラーで採集した。

JAST01では1993年1月~12月、及び1994年10月~1995年8月まで水深約500m, 1,000m, 1,500mにセジメントトラップが設置された。JAST02では1994年10月~1995年8月の間、水深約500m, 1,500m, 3,000mにセジメントトラップが設置された。JAST03では1995年8月~1996年8月の間、1,000mと1,500mにセジメントトラップが設置された。またJAST04ではJAST03と平行してセジメントトラップ実験が実施され、水深約500m, 1,000mと1,500mにセジメントトラップが設置された (図4)。

2.3 サンプルの捕集状況

セジメントトラップ係留系の設置・回収はすべて成功した。また係留されたセジメントトラップ延べ17台もすべて初期プログラムに沿って作動し、コントロールユニットの履歴ファイルから捕集カップの交換、交換時刻の記録は順調に行われたことが確認された。捕集された試料の一例を写真3に示す。しかし、サンプルの捕集についてはいくつかの問題が生じた。一つは大型生物の混入である。本研究では中層 (ここでは有光層直下から水深



写真1 時系列式セジメントトラップ (McLane Mark 7G-21)
Photo 1 Time-series sediment trap (McLane Mark 7G-21).



写真2 ガラスフロート (Billing G6600)
Photo 2 Glass floatation (Billing G6600).

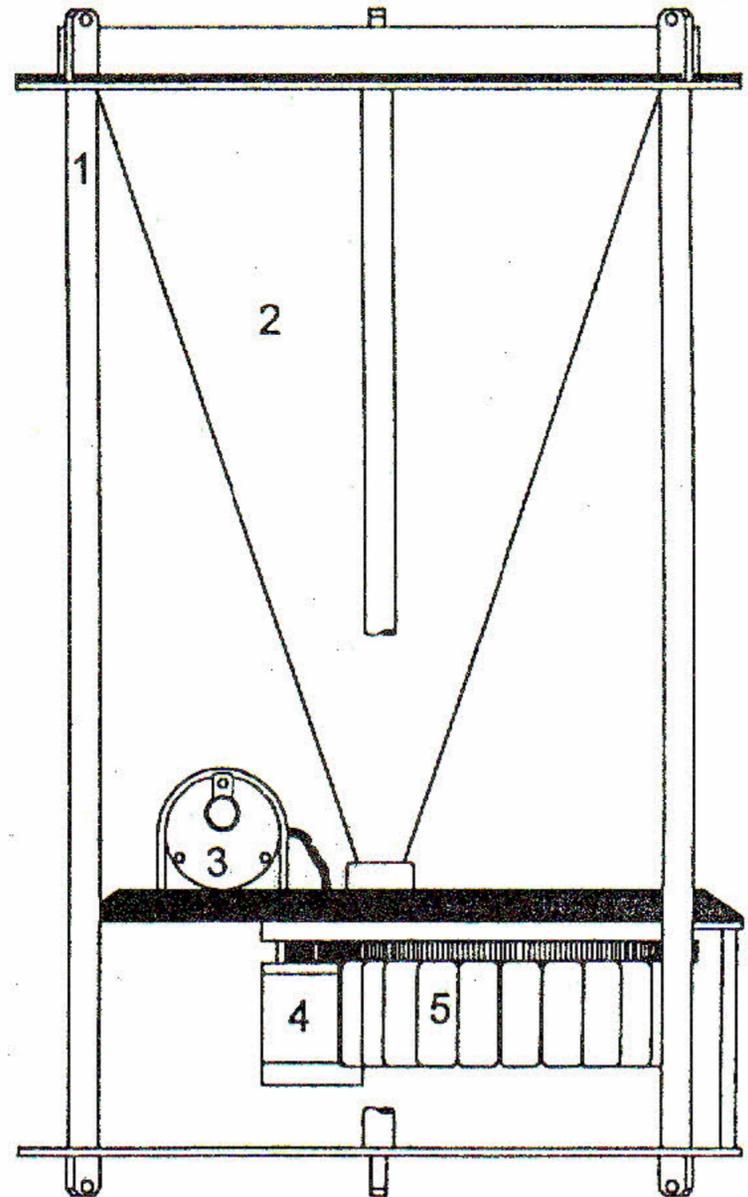
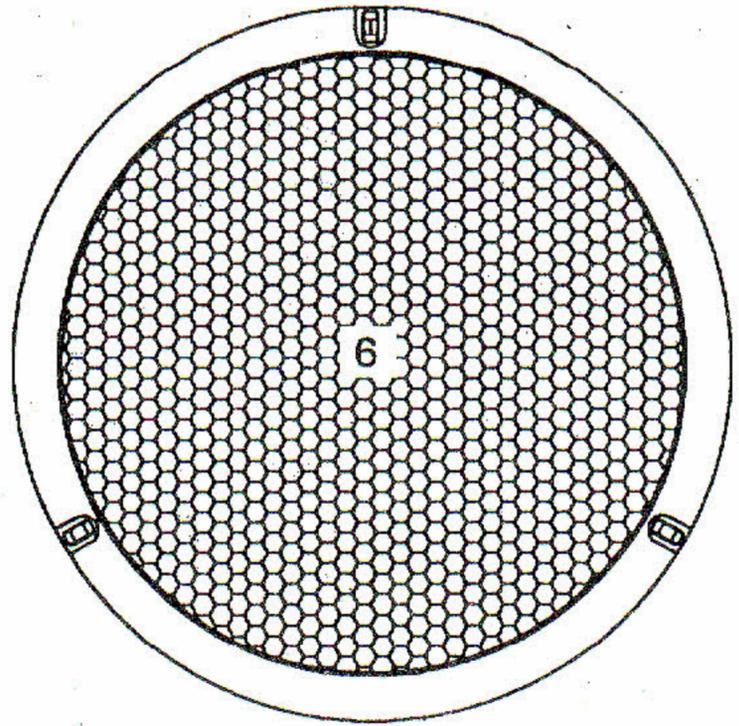


図1 時系列式セジメントトラップ (McLane Mark 7G-21)
1:チタンフレーム, 2:イエローコーン, 3:コント
ローラー, 4:ステッピングモーター, 5:捕集カップ,
6:バッフル

Fig. 1 Time-series sediment trap (McLane Mark 7G-21)

1:Titanium frame, 2:Yellow cone, 3:Controller,
4:Stepping motor, 5:Collection bottle, 6:Buffel.

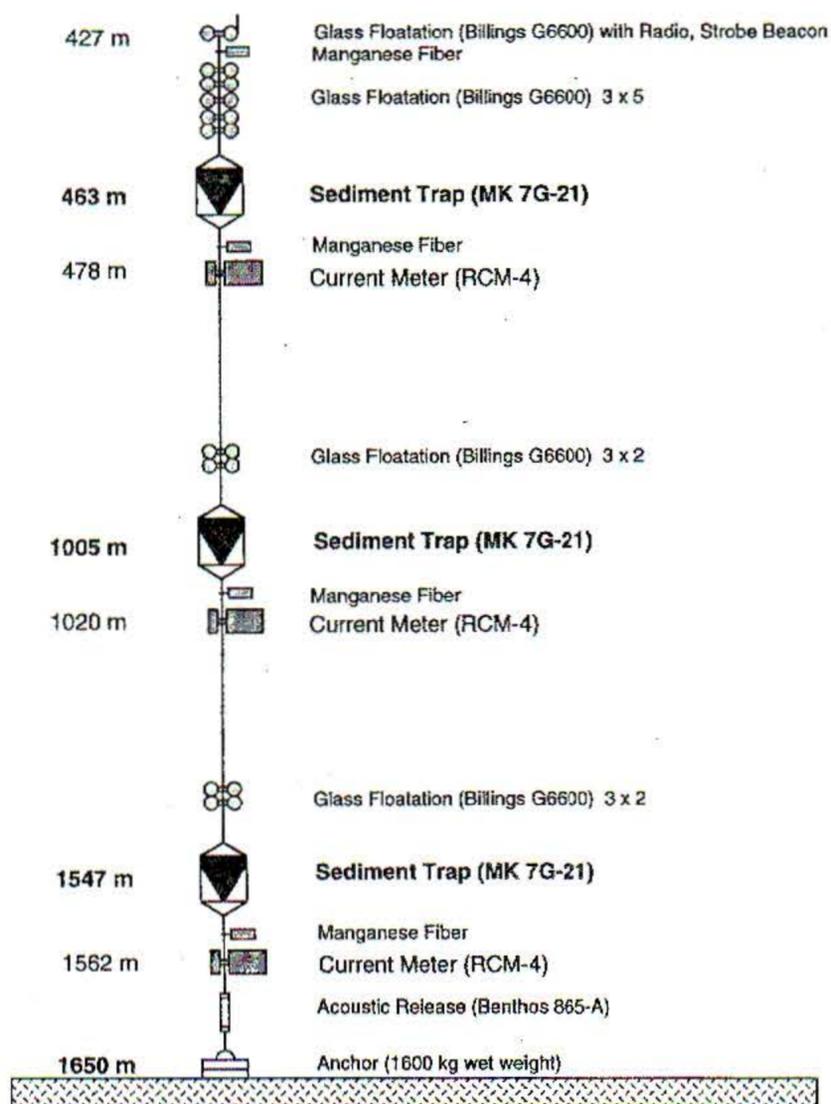


図2 セジメントトラップ係留系 (1993年1月~7月)
 Fig. 2 Sediment trap mooring system (Jan~Jul. 1993).

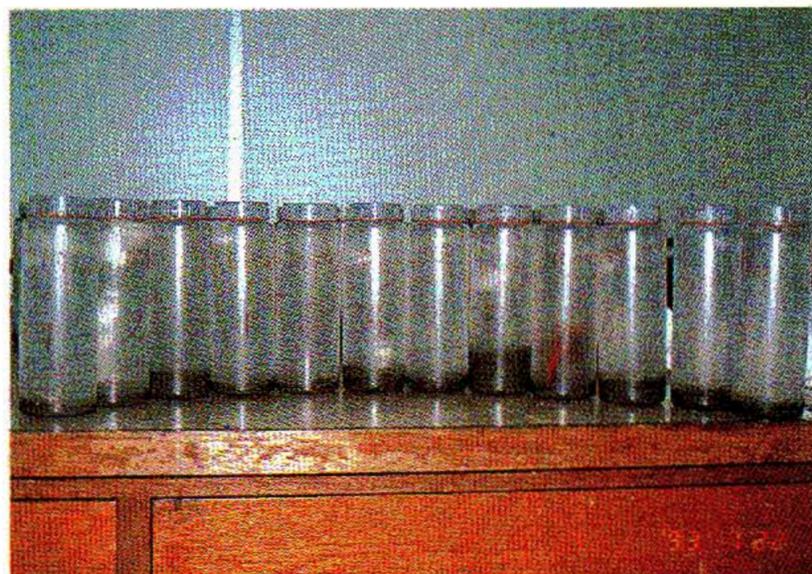


写真3 1993年1月~7月に捕集されたJAST01水深1,000 mでの沈降粒子
 Photo 3 Settling particles collected at 1,000 m water depth at JAST01 during Jan. to Jul. 1993.

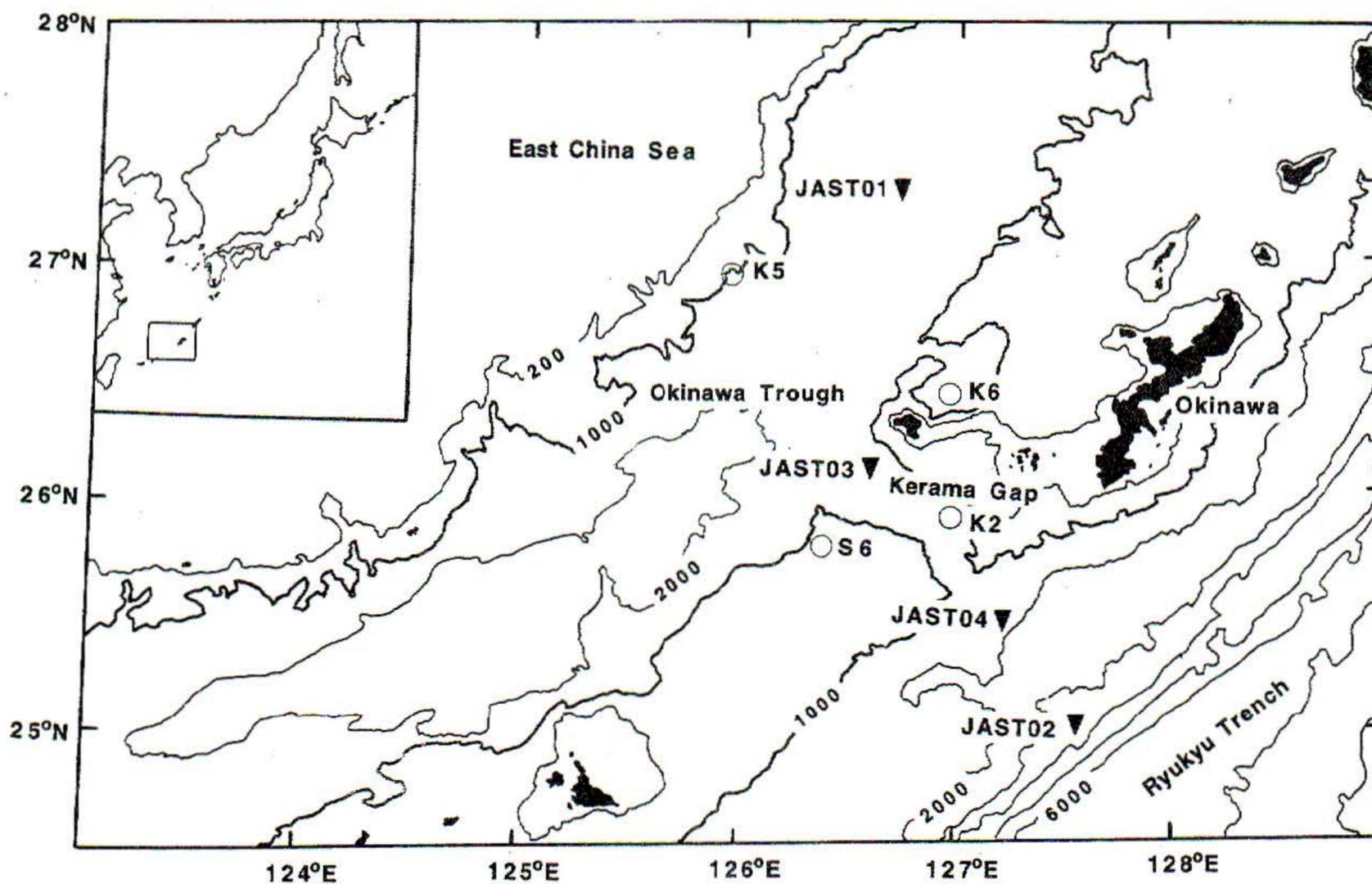


図3 セジメントトラップ実験海域。▼: セジメントトラップ設置地点, ○: 海底堆積物採集地点
 Fig. 3 Experimental site. ▼: Sediment trap mooring, ○: Sea-floor sediment coring.

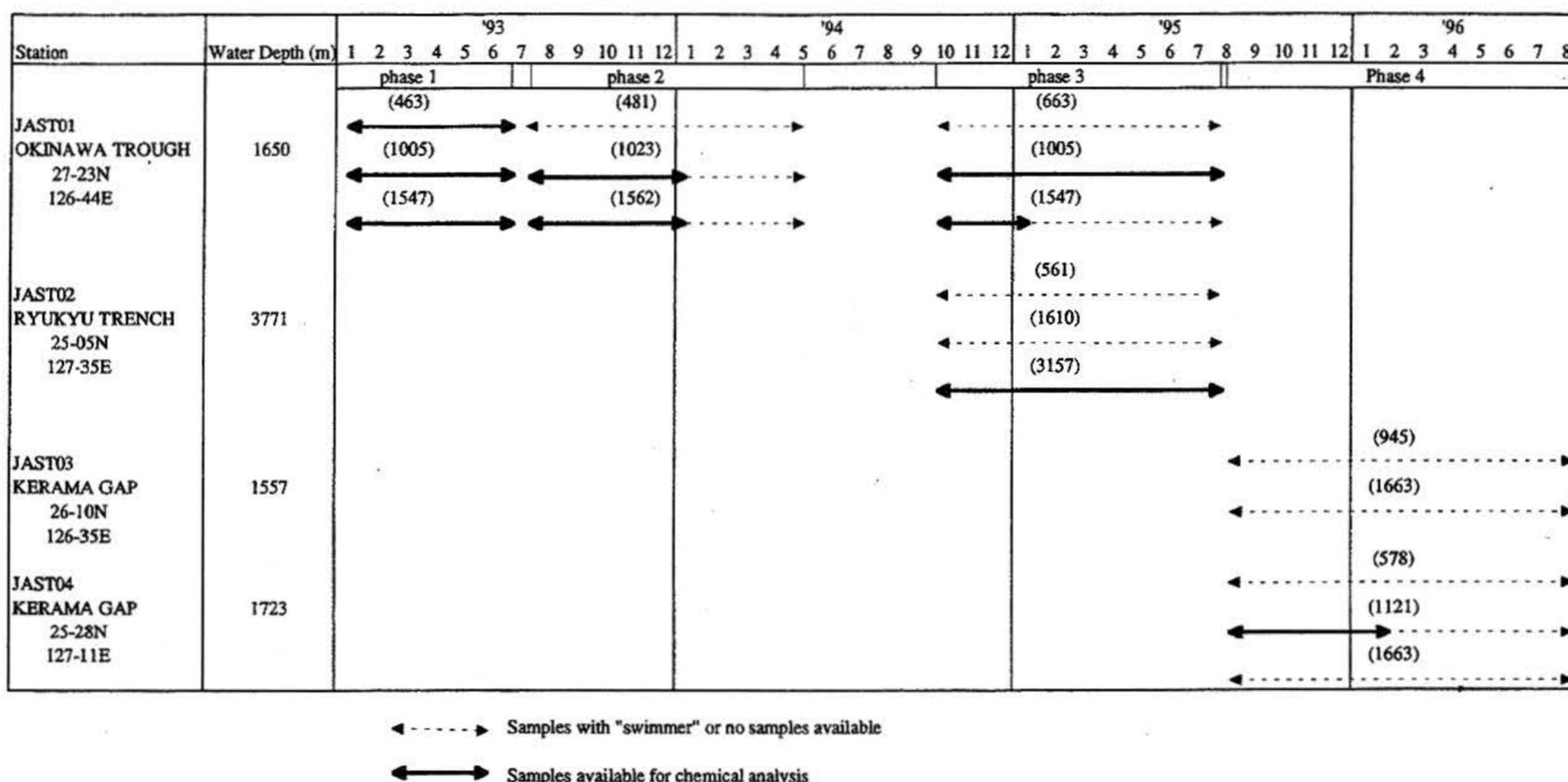


図4 各点におけるセジメントトラップ設置水深と設置期間。カッコ内の数字はセジメントトラップ設置水深。太線は化学分析を実施した試料

Fig. 4 Water depths and time schedules of Sediment trap for each stations. Numbers in parenthesis show sediment trap depths. Thick lines show samples available for chemical analysis.

1,000mまでと定義する)における粒子フラックスの鉛直変化を観測するためほぼすべてのステーションで水深約500mにセジメントトラップを設置した。ところが水深500mの多くのセジメントトラップ捕集カップに直径1mm以上の魚(多くの場合は、はだかいわし)やエビ、クラゲ等が捕集された。これらの生物の中には、セジメントトラップ上部に整流効果のためとりつけられている蜂の巣構造のバツフル(直径2.5cmの六角形の集合体)の内径より大きいものも見受けられた。これらの生物は自由落下してきた沈降粒子とは考えにくく、能動的にセジメントトラップに侵入した“swimmer”と考えられる。これら“swimmer”が侵入した捕集カップの多くは腐敗臭がし、捕集カップ内溶液のpHが7付近まで低下していた。また分析に供する1mm以下の試料も極めて少なかった。セジメントトラップに上記大型“swimmer”が侵入し、捕集口が塞がったり、試料が攪乱されたということは、過去の実験においても報告されている(例えばHonjo and Manganini, 1992¹³⁾)。しかし、本セジメントトラップ実験ほど多くの大型“swimmer”が捕集されている例は極めて少ない。これは今回の実験海域が大陸棚に近接しており、大型生物が集まりやすいことが少なからず影響しているものと推察される。したがって本研究では“swimmer”が混入している捕集試料については、捕集量や組成が変化してしまった(本報告では便宜上、生物攪乱をうけたと記述する)ものと判断し、

水深約500mのセジメントトラップ試料についてはJAST01で1993年の1月~7月に得られた試料のみ化学分析を行った。水深500mに設置したセジメントトラップ以外でも、いくつかのセジメントトラップに上記“swimmer”の混入が認められた。特に慶良間海裂に設置されたJAST03, JAST04の水深1,000m, 1,500mのセジメントトラップの捕集カップには、多くの“swimmer”が侵入していた。そのため慶良間海裂に設置したセジメントトラップのうち、JAST04の水深約1,000mのセジメントトラップ試料の一部のみを化学分析した。

一方、はっきりとした“swimmer”の混入が認められないが、明らかにセジメントトラップの試料捕集効率が低下しているように見受けられる試料も存在した。例えば1993年7月~1994年7月に実施したJAST01の水深約1,000m, 1,500mでは設置から約4ヶ月後、時を同じくして捕集試料がまったくなくなった。またJAST01において1994年10月~1995年8月に実施したセジメントトラップ実験では、水深約1,500mのセジメントトラップの捕集量が、設置後約3ヶ月後にやはりほとんどなくなっている。セジメントトラップによる捕集量が突然低下する、あるいはまったくなくなるという例も過去に多く報告されている。1992年~1993年にウッズホール海洋研究所(以下WHOI)がベーリング海で実施したセジメントトラップ実験では、水深約1,000mに設置したセジメントトラップには、捕集カップの交換が順調に行われたに

もかわらず、粒子が捕集されておらず、水深3,000 mに設置されたセジメントトラップにおいては1993年5月に全粒子束が1,000mg/m²/day以上という極めて大きくなった後、捕集量がまったくなくなっている。この時は(大型swimmerのはっきりとした侵入は認められなかったが)大型swimmerの侵入、あるいは巨大な全粒子束により捕集カップ口が塞がれたためと解釈された。したがって本セジメントトラップ実験においても、捕集カップの交換が順調に実施されていたことを考えると、突然の捕集量の低下は大型“swimmer”の侵入、あるいは巨大な全粒子束により捕集カップ口が塞がれたためと解釈した。

以上の問題のため、セジメントトラップの設置・回収は成功裡に終了したものの、化学分析に供する試料が得られたのは全セジメントトラップ実験の約50%という結果となった(図4)。

3 試料の処理と分析

JAST01の1993年1月～7月の試料についてはWHOIで化学分析を実施し、それ以降の試料については同様の方法で海洋科学技術センター(以下JAMSTEC)で実施した。

3.1 試料の前処理と乾燥重量、全粒子束の測定

セジメントトラップを船上に回収後は、捕集カップ内の上澄液のpHをpH緩衝液(0.02%ほう酸ナトリウム溶液)で約8.3に調整後、速やかに冷蔵保存(4℃)し、実験室に持ち帰った。海底堆積物はサブコア採集後、冷蔵保存した。

上述したとおり回収されたセジメントトラップ試料、特に水深500mのほとんどの捕集カップにはエビ、魚、クラゲといった大型生物が混入していた。実験室ではプラスチックのふるいを用い、試料を1mm以上の部分と1mm以下の部分に分別した。1mm以下のものについては回転式スプリッター(Honjo, 1980¹⁴)で試料を捕集量、あるいは目的に応じて4～10分割にした。

分割された試料を、蒸留水で洗浄しながら、孔径0.4μmのヌクレポアフィルターでろ過した後、50℃で一昼夜乾燥した。その後デシケーター内で放冷し、乾燥重量を測定し各捕集期間の全粒子束を算出した。なお回転式スプリッターにより分割された試料の乾燥重量のばらつきは±3%であった。重量測定後、メノウの乳鉢で試料を均一に粉碎した後、ガラスバイアルに保存した。この試料を各化学分析用試料とした。

3.2 炭素、水素、窒素(CHN)分析

前処理された試料2～10mgを秤量し、アルミ箔、あるいは錫箔のキャップに入れて全炭素測定用のペレットを作成した。また有機炭素のみを測定するために、試料約10mgを500℃であらかじめ燃焼させたグラスファイバーフィルター上で秤量した後、塩酸噴霧中のデシケーター内に一昼夜放置してCaCO₃を溶解した。WHOIではアセトン洗浄を行った錫箔で試料をフィルターごと包んだものを有機炭素測定用のペレットとした。一方、JAMSTECにおいてはCaCO₃を溶解した試料を再度乾燥後、再秤量し、アルミ箔、あるいは錫箔のキャップに入れて有機炭素測定用のペレットを作成し分析を行った。

CHN測定はPERKIN ELMER社製ELEMENTAL ANALYZER 2400CHNにより行った。

測定精度(n=4)は全炭素用試料に関しては炭素は±2%以下、窒素は±0.2%以下という高い数値が得られたが、有機炭素測定試料に関しては炭素、窒素とも±7%という結果になった。これは塩酸噴霧気による炭酸カルシウムの溶解程度、及び試料の乾燥程度にばらつきがあったためと考えられる。

3.3 微量金属成分測定

微量金属成分はICP発光分析法で分析した。ICP発光分析用試料は以下のように調整した。

金属成分をあらかじめ除去したグラファイトるつぼ内でセジメントトラップ試料、または海底堆積物を約20mg秤量した後、約7倍(140mg)重量のほう酸リチウム(LiBO₄)を加え、両者をよく混合する。これを高温炉内に入れ、950℃で15分間加熱し両者を溶解する。溶岩状になった試料をすばやく8%硝酸溶液に入れた後、スターラーを用いて完全に試料を溶解させる。これを約25mg～50mgの溶液として秤量したものを試料とした。

ICP発光分析はICP-ES分析計(SA.Inc社製JY38VHR-C(WHOI)、及びJY/RIGAKU138ULTRACE(JAMSTEC))で行い、検量線法により各成分を定量した(Bankston, 1988¹⁵)。分析成分はFe, Si, Mn, Ti, Al, Ca, Baである。

3.4 放射性核種の分析

(1) セジメントトラップ試料中の²¹⁰Pb

1993年のJAST01の1月～7月の試料については米国南カリフォルニア大学、同年の7月～12月に捕集された試料はJAMSTECにおいてウェル型Ge検出器で、²¹⁰Pb等の放射性核種のγ線を測定した。

(2) 海底堆積物中の放射性核種

セジメントトラップ設置地点の海底堆積物の堆積速度を算出するために、以下の2核種を測定した。

1) ^{210}Pb 法

海底堆積物を2 cmごとに分割した後、沸酸と王水で全分解し、 ^{208}Po を回収率のトレーサーとして加えた。溶液を完全に蒸発乾固した後、再び塩酸で溶解させ、アンモニア水を加え水酸化物を生成する。精製された水酸化物を再び塩酸で溶解させ、銀盤上に付着させた。この銀盤上の試料中の ^{210}Po の放射能を、EG & G ORTEC Octete PC α spectrometryにより測定した。

^{210}Po は堆積物中では ^{210}Pb 放射平衡にあるので、得られた ^{210}Po の放射能は、 ^{210}Pb の放射能とみなすことができる。

^{210}Pb の放射能は堆積物中で下に向かって減少するが、深いところでは一定値をとる。この ^{210}Pb の一定値を堆積物中に存在する ^{226}Ra の放射壊変により生まれ放射平衡に達している ^{210}Pb (supported ^{210}Pb) とし、測定値からこの値を引いた ^{210}Pb を海洋から海底へ供給された ^{210}Pb 濃度 (excess ^{210}Pb 濃度) と仮定した。このexcess ^{210}Pb 放射能の鉛直分布から以下の式を用い、堆積速度 (S) を見積もった。

$$S(\text{cm}/\text{yr}) = -\ln 2 / T_{1/2} \cdot Z / \ln(A_z / A_0)$$

ただし、 $T_{1/2}$ は ^{210}Pb の半減期で22.3 (yr)、Zは堆積物内深度 (cm)、 A_z と A_0 はそれぞれ海底表層下zcmと表層0 cmにおけるexcess ^{210}Pb 放射能である。

2) ^{14}C 法

ピストンコアラーで得られたロングコアから浮遊性有孔虫を取り出し同定した後、過酸化水素水で試料を洗浄し有機物を取り除いた。この試料中の放射性炭素 (^{14}C) 濃度を米国カリフォルニア州のローレンスリバモア国立研究所の加速器質量分析計で測定した。各層の ^{14}C 年代 (T) は以下の式に基づいて算出した。

$$T = 8033 \ln(1 / (1 + \Delta^{14}\text{C} / 1000))$$

ただし、 $\Delta^{14}\text{C}$ は炭素安定同位体 (^{13}C) で同位体補正を行った試料の ^{14}C 濃度と標準物質の ^{14}C 濃度の偏差である。

3.5 その他の分析

一部の沈降粒子試料について有孔虫の定性定量 (熊本大学)、及び ^{14}C 測定 (オランダグローニンゲン大学) が現在実施されているところである。

4 結果

4.1 流向流速

(1) 表層付近の流向流速

本研究は海洋科学技術センターの海洋調査船「かいよう」で行われた。「かいよう」の航海中は「かいよう」に搭載設置されたADCPより、海洋表層 (20 m ~ 80 m) の流向流速を測定した。図5は1995年の航海中に得られた海洋表層 (水深20 m) における流向流速である。この図からJAST01では、黒潮海流内に位置しているため常に1 ~ 3 knots (50 ~ 150 cm/sec) という北東方向への速い流れが卓越していることが明らかとなった。一方、JAST02, JAST03, JAST04では、流速が0.5 ~ 1 knots程度で、流向は分散しているものの北西向き (沖縄トラフ方向) の流れが卓越しているようである。JAST02海域は黒潮逆流が流れていると考えられており、この海域表層内の溶存物質や懸濁物質は、外洋から慶良間海裂を通過し沖縄トラフ内へ向かって輸送されるように見える。

(2) 中深層の流向流速

中深層の流向流速は、係留計に取り付けられたアーンデラー社RCM-4, アレック電子ACM-4, 及びInterOcean社製S4 Current meterの流向流速計で測定された。

1) JAST01

① 水深500 m

水深約500 mのセジメントトラップ直下に設置した流向流速計が作動しなかったため実測できなかったが、過去の報告では水深500 mは黒潮海流の下端に位置し、流速が50 cm/sec程度と中層としてはかなり早い流れで、北東向きの流れが優勢であるとされている (例えば山本ほか, 1993¹⁶⁾。

② 深層 (1,000 m, 1,500 m)

図6(a)に1993年に観測されたJAST01の水深1,000 m (1 ~ 4月), 1,500 m (1 ~ 7月) における流向流速ベクトルの時間変化を示した。同図には水温の時系列、及びセジメントトラップ試料捕集期間ごとの流速の最大値、平均値も併せて示されている。水深1,000 mでは平均で約5 cm/secの流れが存在しており、流向は分散していることがうかがえる。水深1,500 mでは流速の平均値が4 cm/secと若干小さくなる。流向は分散しており明らかに周期的に変動している。スペクトル解析の結果から、水深1,500 mの流れは半日、一日という潮流の変化に相当する周波数成分に加え、約12.9日という長周期成分も見られた。これらの結果、表層と異なり深層では卓越した

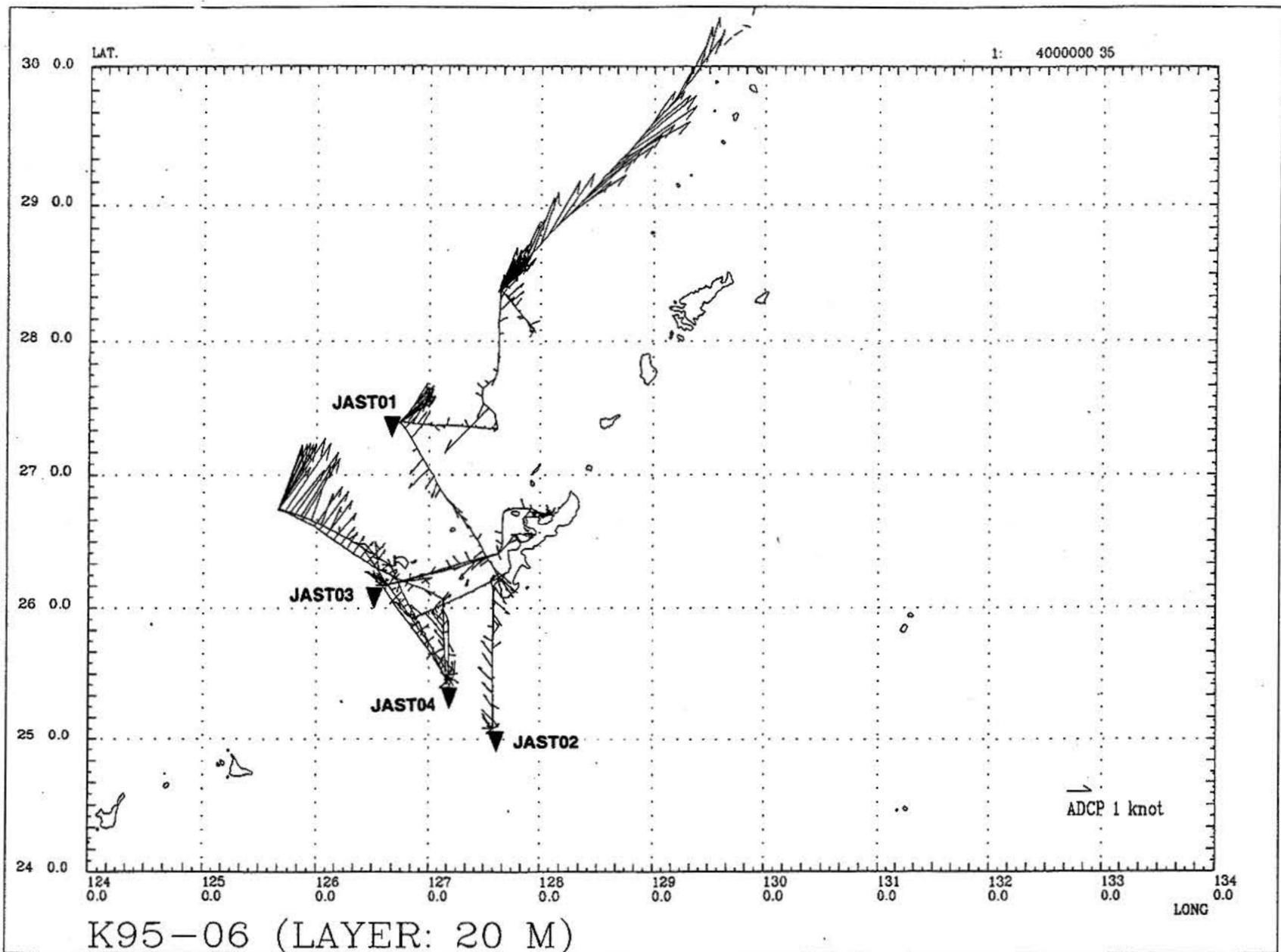


図5 R/V「かいよう」のADCPで観測された実験海域の海洋表層(20m)における流向流速(1995年8月)
 Fig. 5 Current vectors at 20m water depth observed with ADCP on R/V "KAIYO" (Aug. 1995).

流向は存在しないことが明らかとなった。

2) JAST02

① 水深500m

図6(b)(1)に1994年9月~1995年2月に観測されたJAST02の水深500m付近の流向流速を示す。同水深における平均流速は約9 cm/secであり、流向は180度~360度と分散しているものの平均すると西向き(270度)の流れが卓越しており、表層の流向(北西)とほぼ一致した。

② 水深1,500m

図6(b)(2)に水深約1,500mにおける流向流速を示す。平均流速は水深500mと同様に約9 cm/secであり、流向はやはり大きく分散しているものの、平均すると北北西向き(330度)の流れが卓越していることが明らかとなった。

③ 水深3,000m

図6(b)(3)に水深約3,000mにおける流向流速を示

す。流速の平均値は約5 cm/secと小さく、流向は不規則に変化しているように見えるが、平均的に北北東(27度)の流れが卓越しているという結果が得られた。

3) JAST03

① 水深1,000m

図6(c)(1)に1995年8月~1996年における同地点、同水深の流向流速を示す。流速の平均値は約9 cm/secで、流向はやはり大きく分散している。平均的には北北西(330度)の流れが卓越していた。

② 水深1,500m

図6(c)(2)に水深約1,500mにおける流向流速を示す。平均流速は水深1,000mの半分程度の約5 cm/secであった。流向は水深1,000m以上に分散が激しい。平均すると西北西向き(304度)の流れが卓越している。

4) JAST04

① 水深500m

図6(dX1)にJAST04の水深500m (578m) における流向流速の時系列を示す。流速の平均値は約15cm/secであり、流向は、海洋表層が北西～西向きの流れが卓越しているのに対し、北北西～東北東向きの流れが卓越していた。

② 水深1,000m

図6(dX2)に水深1,000m (1,120m) における流向流速の時系列を示す。流速の平均値は約8cm/secであった。流向に関しては、流向計データにノイズが多く判定不可能であった。

以上のことから沖縄トラフ海域表層 (JAST01) では、黒潮海流により北東に向かった速い流れ (> 50cm/sec) が存在し、琉球海溝表層 (JAST02) や慶良間海裂表層 (JAST03, JAST04) では、黒潮本流方向 (北西) へ向かう流れが卓越していることがうかがえる。一方、水深1,000m以深では流速が10cm/sec以下であり、流れの方向は分散しているといえる。

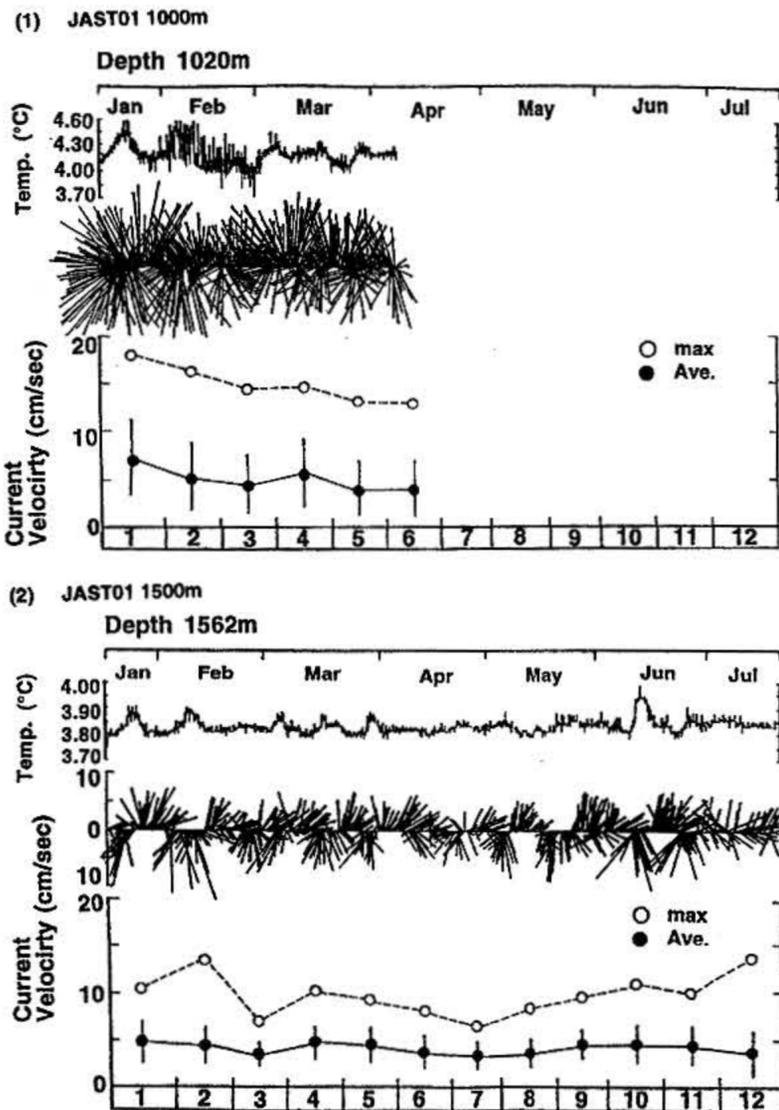
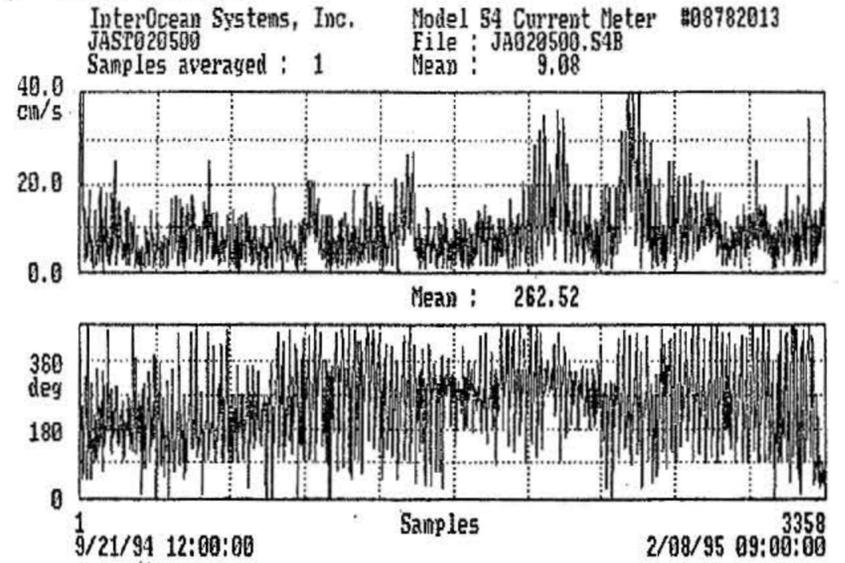


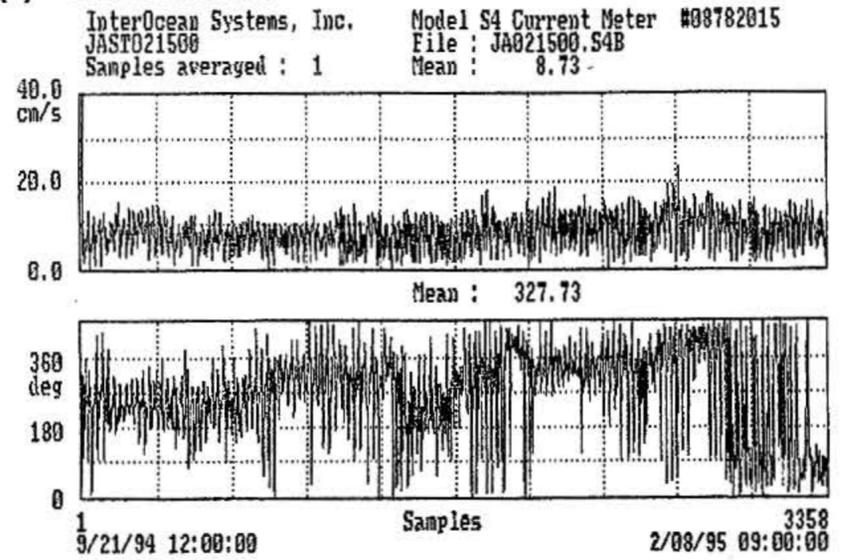
図6(a) JAST01 (沖縄トラフ) の水深約(1) 1,000mと(2) 1,500mにおける流向流速と水温 (1993年1月～7月)

Fig. 6(a) Current vectors and water temperatures at approximately (1)1,000m and (2)1,500m at JAST01 (Okinawa Trough). (Jan.~Jul. 1993)

(1) JAST02 500m



(2) JAST02 1500m



(3) JAST02 3000m

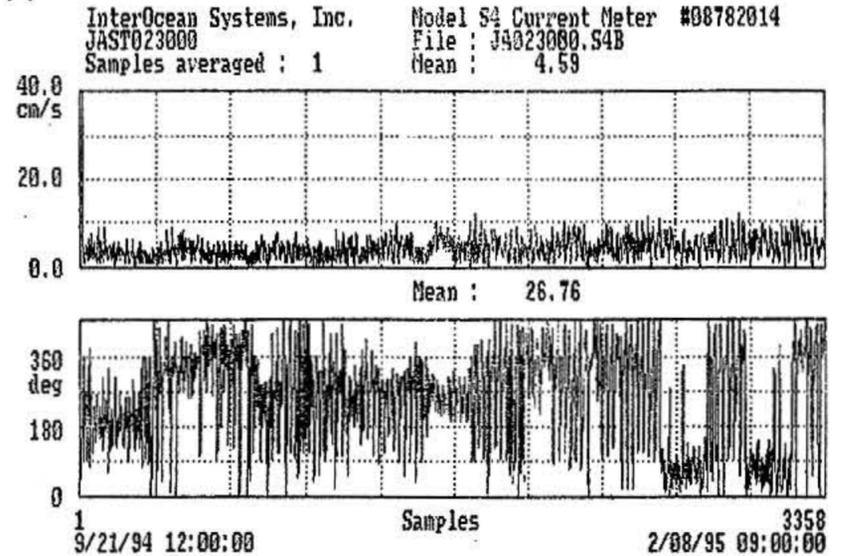


図6(b) JAST02 (琉球海溝) の水深約(1)500m, (2) 1,500m, (3) 3,000mにおける流向流速 (1994年9月～1995年2月)

Fig. 6(b) Current directions and velocities at approximately (1) 500m, (2) 1,500m, (3) 3,000m at JAST02 (Ryukyu Trench). (Sep. 1994~Feb. 1995)

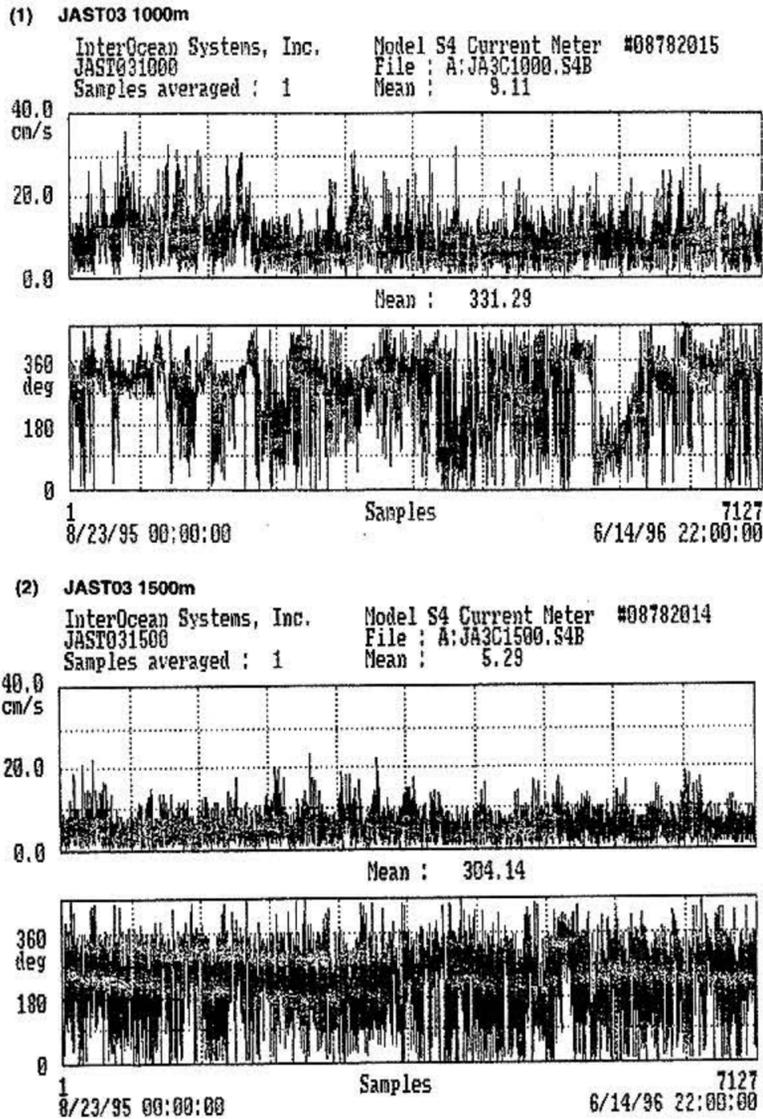


図 6(c) JAST03 (慶良間海裂) の水深約(1) 1,000 m と(2) 1,500 m における流向流速 (1995年 8 月~1996年 6 月)

Fig. 6(c) Current directions and velocities at approximately (1) 1,000 m and (2) 1,500 m at JAST03 (Inside of Kerama Gap). (Aug. 1995~Jun. 1996)

4.2 セジメントトラップ実験結果

付録 1, 2 に化学分析を行ったセジメントトラップ試料の全粒子束, 及び各化学成分のフラックス (1 mm 以下), 及び濃度を示した。

4.2.1 全粒子束

(1) JAST01 (沖縄トラフ)

図 7 は 1993 年 1 月~12 月における水深約 500 m, 1,000 m, 1,500 m の全粒子束を示す。白が 1 mm 以上 (> 1 mm) の粒子束, 黒が 1 mm 以下 (< 1 mm) の粒子束である。図 7(a) から明らかなように水深 500 m の全粒子束は, 水深 1,000 m, 1,500 m のものに比べて極めて少ない。前述のとおり同セジメントトラップのほぼすべての捕集カップには 6 mm 以上の生物 (エビ, はだかいわし, クラゲ等) が捕集されていた。これらは明らかに沈降粒子ではなく自発的に捕集カップし侵入した “swimmer” と考えられる。観測中, 4 月上旬~6 月上旬にかけて比較的捕集粒子量 (特に 1 mm~6 mm サイズのもの) が多かった。これらのほとんどは大型の動物プランクトンのように見えた。

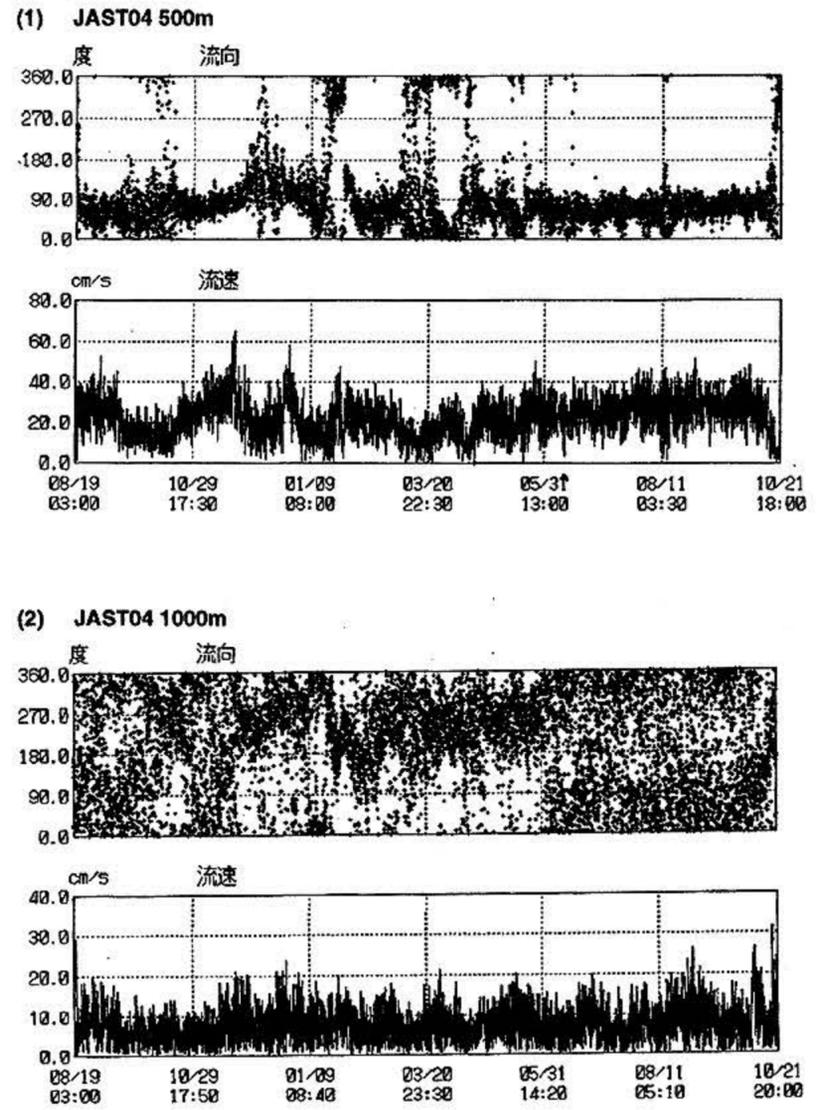


図 6(d) JAST04 (慶良間海裂) の水深約(1) 500 m と(2) 1,000 m における流向流速 (1995年 8 月~1996年 10 月)

Fig. 6(d) Current directions and velocities at approximately (1) 500 m and (2) 1,000 m at JAST04 (Outside of Kerama Gap). (Aug. 1995~Oct. 1996)

これらは春先の植物プランクトンのブルームに続く動物プランクトンのブルームであると考えられる。また 1 mm 以下のものに比べ, 1 mm~6 mm サイズのものが多く, 6 mm 以上のものを除いた全粒子束の 50~90% を占めていた。これも小エビや小魚といった明らかに “swimmer” と考えられるものが多かった。

1,000 m と 1,500 m の全粒子束については 1 月~2 月, 4 月~6 月, 及び 9 月~10 月にかけて比較的大きな全粒子束が観測されており, 両水深での全粒子束の変動はほぼ同調している。このことは両水深間では沈降粒子が大きな分解, あるいは物質の供給を受けることなく, 迅速に鉛直方向に輸送されていることを物語っている (図 7 (b)(c))。

一方, 1994 年~1995 年にかけて実施された JAST01 でのセジメントトラップ実験結果 (図 8) から, 水深 1,000 m のセジメントトラップでは 1993 年と同様に 1 月~2 月, 4 月~6 月, 及び 11 月頃にかけて比較的大きな全粒子束が観測された (図 8(a))。1,500 m のセジメントトラップでは 1993 年の同時期 (11 月~12 月) に比べて高い全粒子

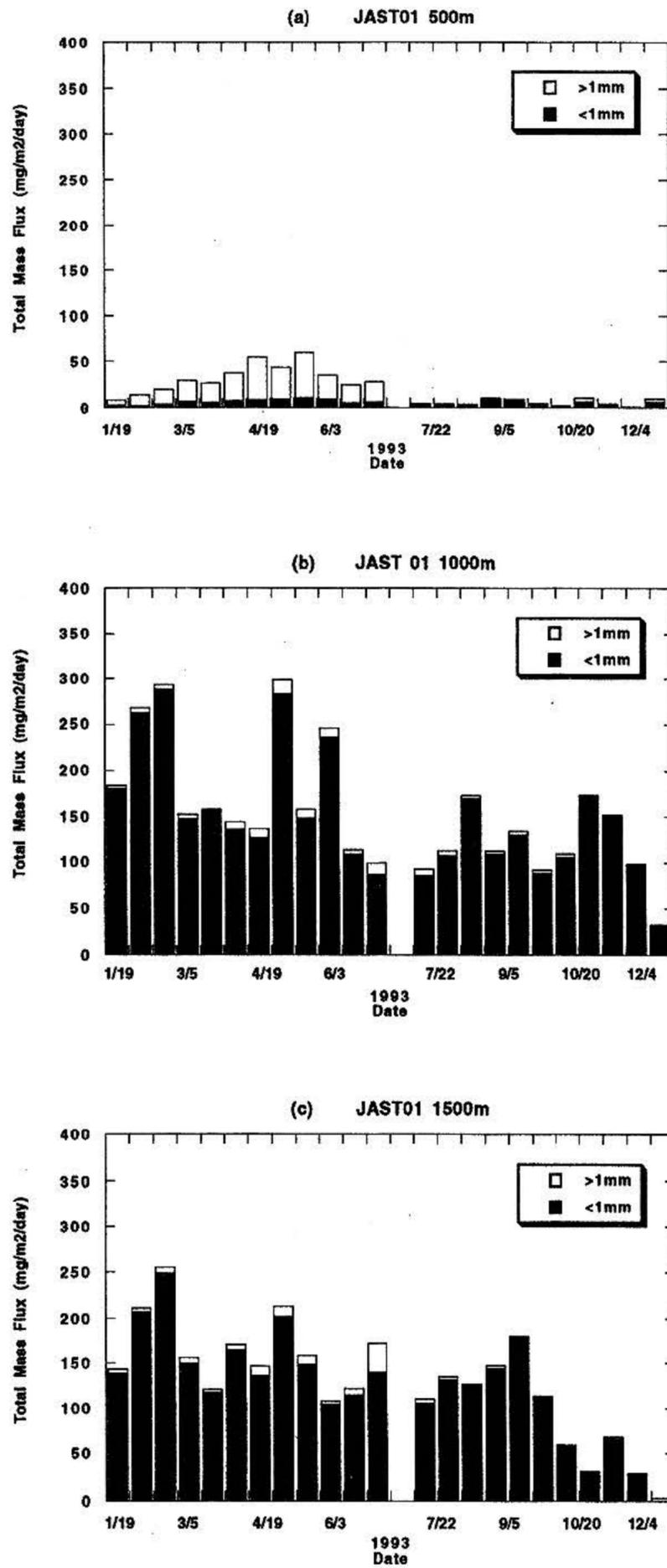


図7 JAST01の水深約(a)500m,(b)1,000m,(c)1,500mにおける全粒子束 (1993年1月~12月)。白は1mm以上の粒子フラックス, 黒は1mm以下の粒子フラックス

Fig. 7 Total mass fluxes at (a)500m, (b)1,000m, (c)1,500m at JAST01 (Jan.~Dec. 1993). Open and closed squares show mass fluxes bigger than 1mm and smaller than 1mm, respectively.

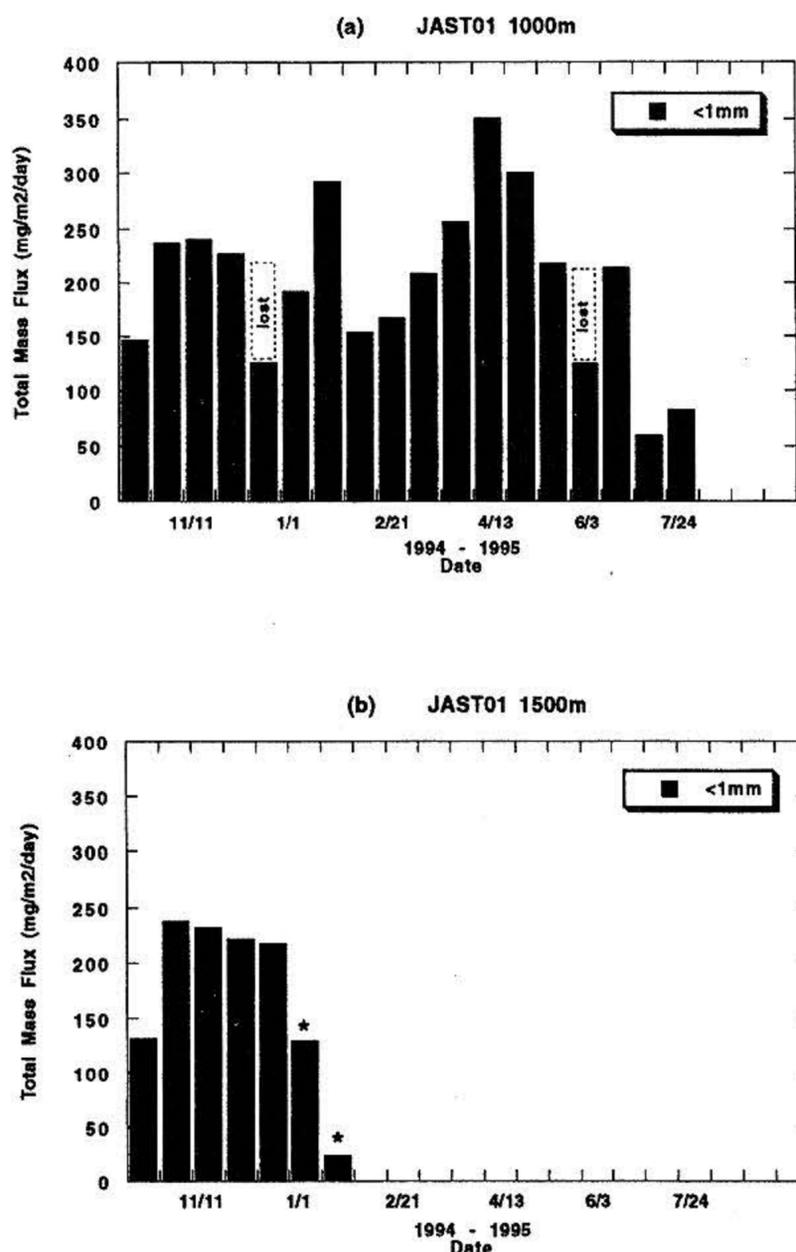


図8 JAST01の水深約(a)1,000 m, (b)1,500 mにおける 1 mm以下の全粒子束 (1994年10月~1995年7月)。lostは前処理中に試料をこぼしたもの。*はswimmerにより捕集量, 化学組成が影響をうけたと考えられる試料

Fig. 8 Total mass fluxes (<1mm) at (a) 1,000 m and (b) 1,500 m at JAST01 (Oct. 1994~Jul. 1995). "lost" show that a part of samples were lost during preparation. * indicates mass and chemical composition of samples affected by swimmer.

束が観測されたが, 1995年1月から全粒子束が減少し, それ以降は捕集粒子がまったくなくなった (図8(b))。これは前述のとおりセジメントトラップの捕集口が "swimmer" により塞がれたためと推察される。

図10(a)はJAST01の2年間の水深1,000 mにおける全粒子束の変動を併せ示したものである。この図から沖縄トラフでは1~2月, 3月下旬~4月, 及び10月に全粒子束が増加するという傾向がうかがえた。

(2) JAST02 (琉球海溝陸側斜面)

JAST02における水深約3,000 mの全粒子束 (図9(a)) はJAST01に比べ少なかった。また全粒子束の顕著な季節変動も見られなかった。この理由として以下の原因が考えられる。

- ① アジア大陸から大気を通して, または東シナ海

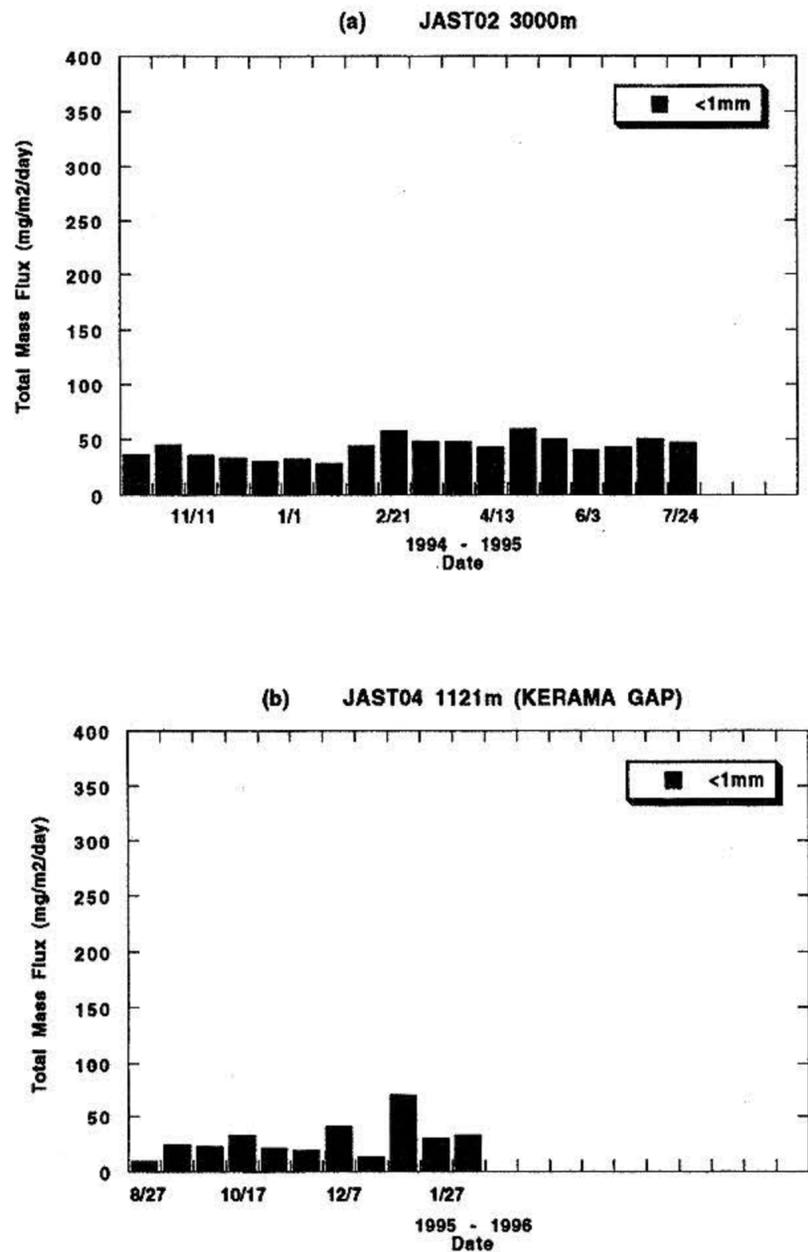


図9 (a)JAST02の水深3,000 m (1994年10月~1995年7月) と (b)JAST04の水深1,000 m (1995年8月~1996年2月) における 1 mm以下の全粒子束

Fig. 9 Total mass flux (<1mm) at (a) 3,000 m at JAST02 (Oct. 1994~Jul. 1995) and (b) 1,000 m at JAST04. (Aug. 1995~Feb. 1996)

を經由して供給される陸起源物質の影響を受けにくい。

- ② 生物活動が活発でない。

- ③ セジメントトラップ設置水深が深いので生物起源物質の再生 (分解) が活発に行われた。

(3) JAST04 (慶良間海裂)

JAST04の全粒子束 (図9(b)) は, 水深が約1,000 m程度であるにもかかわらず, JAST02の3,000 mの全粒子束より少なかった。前述のとおりJAST04では大型 "swimmer" の影響により2月以降の捕集量が大きく生物攪乱されていた。JAST04の水深約500 m, 及び1,500 mの水深に設置されたセジメントトラップ, 及び並列して実施されたJAST03のセジメントトラップの多くに大型 "swimmer" の侵入の形跡が認められている。したがって今回得られた全粒子束は生物攪乱を受けている可能性が極めて高い。

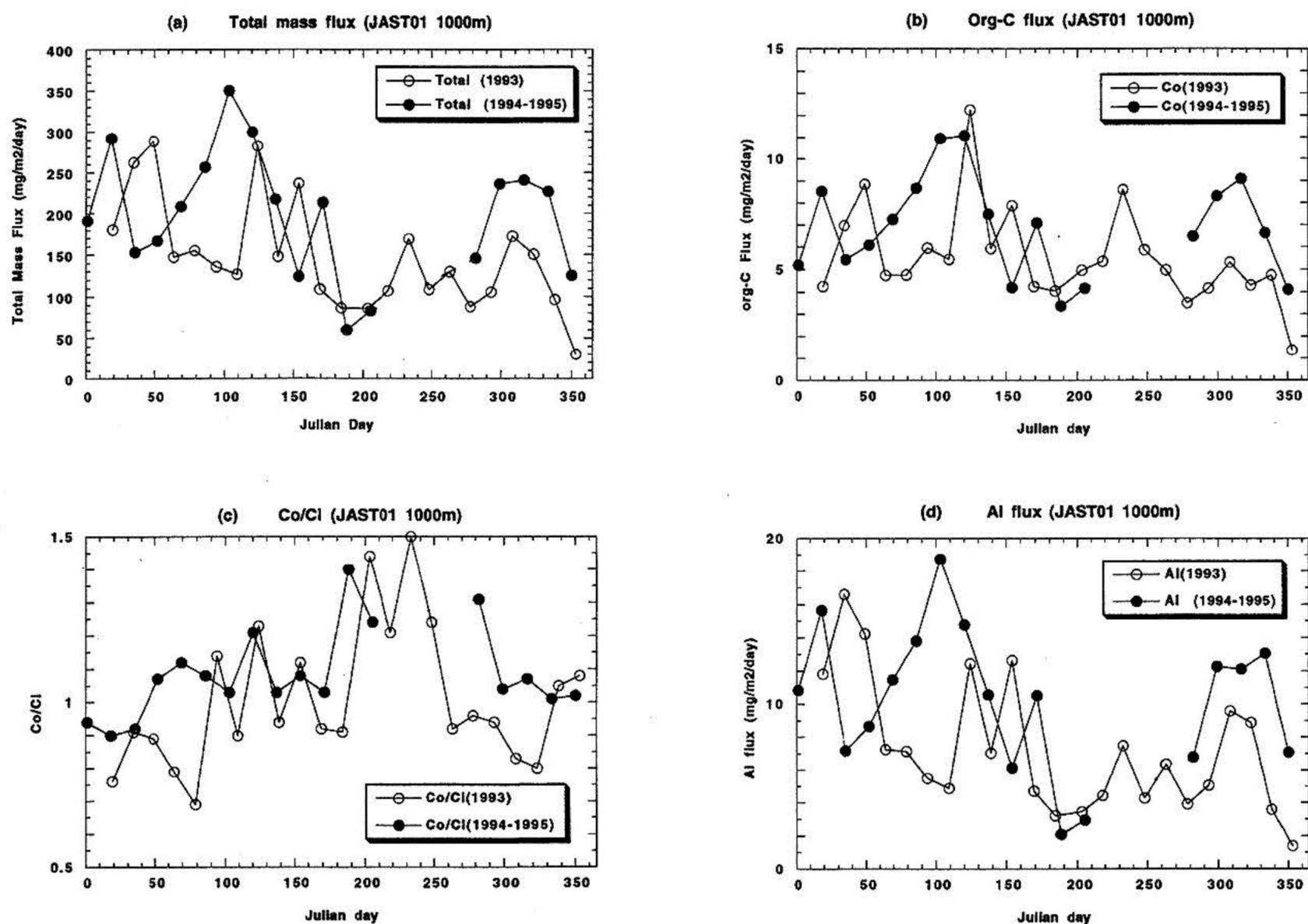


図10 JAST01における2回のセジメントトラップ実験結果の比較
 (a)全粒子束, (b)有機炭素フラックス, (c)Co/Ci比, (d)Alフラックス

Fig.10 Comparison of results obtained from two sediment trap experiments at JAST01.
 (a)Total mass flux, (b)org-C flux, (c)Co/Ci, (d)Al flux

4.2.2 生物起源物質

4.2.2.1 炭素フラックス

図11, 12にJAST01, JAST02に設置されたセジメントトラップに捕集された有機炭素, 及び無機炭素フラックスを示す。概して有機炭素, 無機炭素フラックスは全粒子束とほぼ同様の変動パターンを示した。

(1) JAST01

1993年の1月～7月の500mの炭素フラックスは全粒子束同様極めて低かった(図11(a))。1,000mでは1月～2月, 及び5月初旬に炭素フラックスが増加している。また8月, 及び11月にも全粒子束が若干増加している(図11(b))。1,500mの炭素フラックスは水深1,000mで捕集された炭素フラックスの変動パターンと調和的であり, 1月～2月, 及び5月初旬に炭素フラックスが増加していた。また8月～9月にも炭素フラックスが若干高くなる傾向を示した。一方, 1994年から1995年に実施されたセジメントトラップ実験(図12(a)(b))では, 水深1,000mでの炭素フラックスは11月頃, 及び4月～5月に増加

していた。1994年10月～12月までの化学分析可能な試料捕集に成功した1,500mの炭素フラックスは, 1993年の同時期における1,500mの炭素フラックスよりも高く, 炭素フラックス量は1993年に観測された最大量に匹敵するものであった。

図10(b)はJAST01の水深1,000mにおける2回(1993年, 1994年～1995年)の有機炭素フラックスの変動を比較したものである。これらの変動パターンは図10(a)の全粒子束の変動パターンとよく同調している。この図から, 有機炭素フラックスは増加する時期, 及びフラックス量が2年間で若干異なるものの, 沖縄トラフでは1～2月, 3月下旬～5月初旬, 8月, 及び10月に有機炭素フラックスが増加する傾向があることがうかがえた。

(2) JAST02

JAST02においては炭素フラックス(図12(c))は全粒子束と同様な変動パターンを示し, JAST01と比較すると炭素フラックスは極めて低かった。

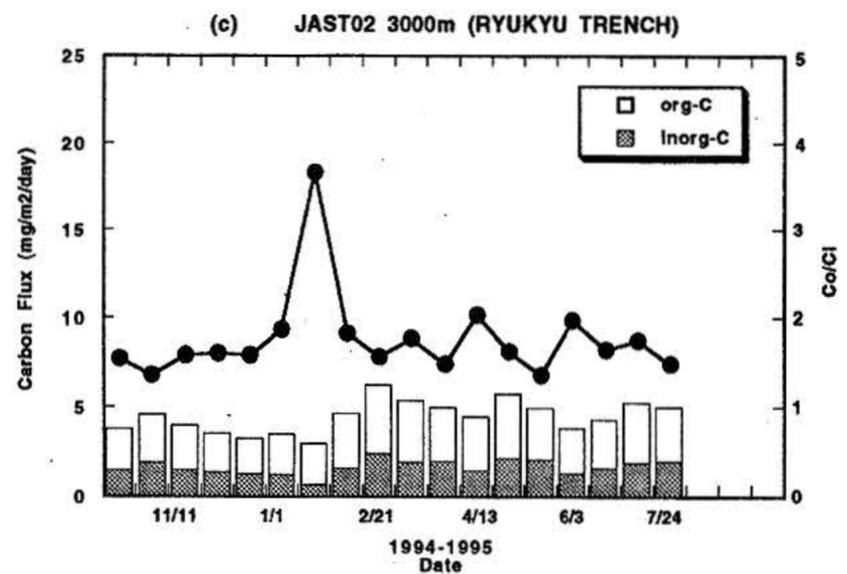
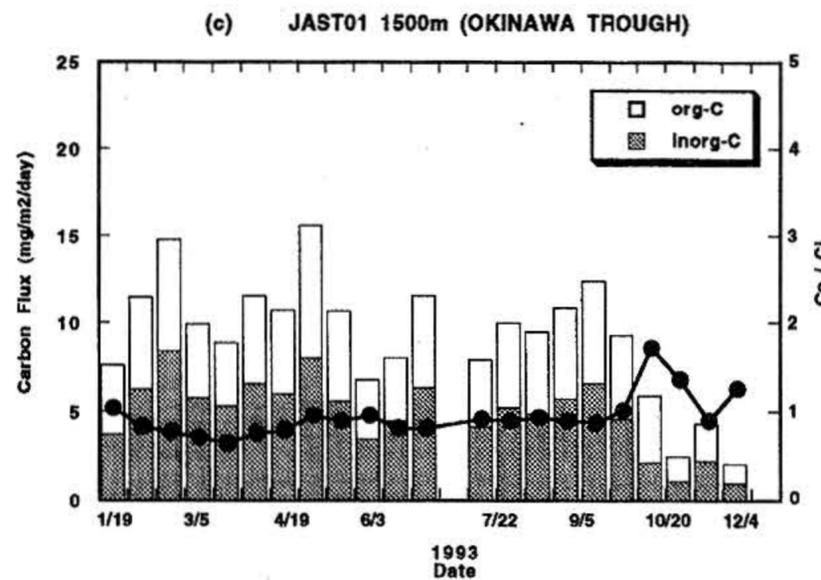
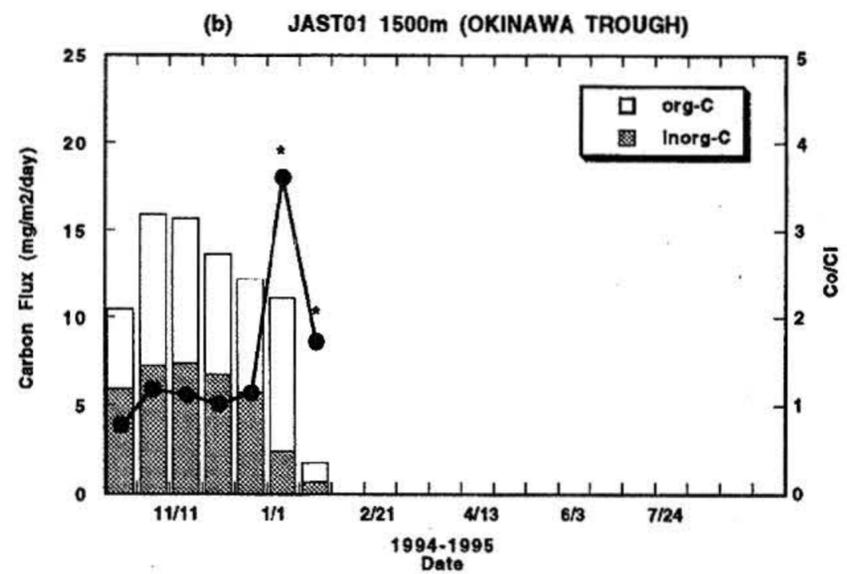
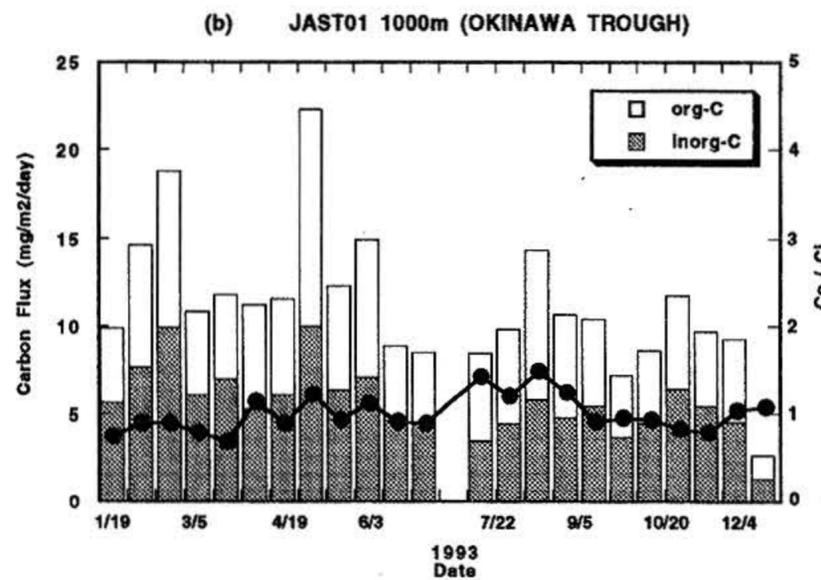
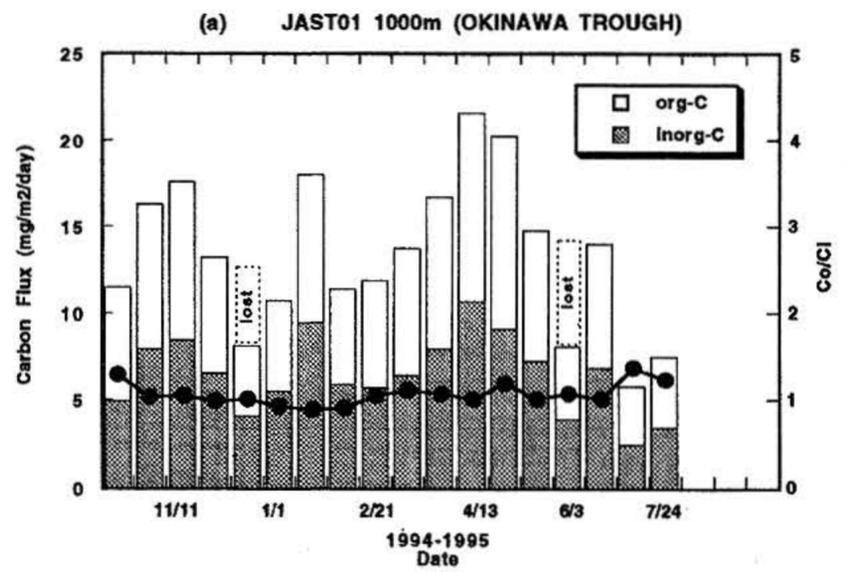
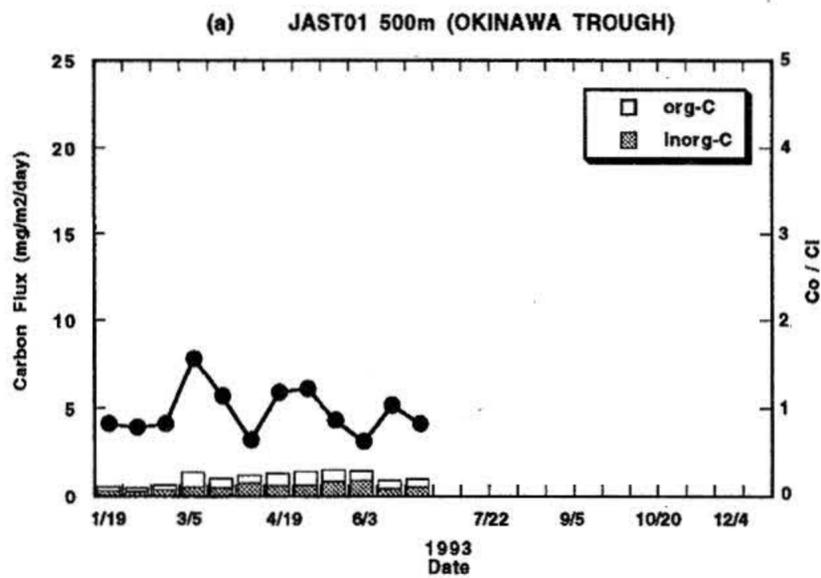


図11 JAST01の(a)500m, (b)1,000m, (c)1,500mにおける有機炭素フラックス(org-C), 無機炭素フラックス(inorg-C), 及び有機炭素フラックス/無機炭素フラックス比(Co/Ci比) (1993年1月~12月)

Fig.11 Organic carbon flux (org-C), inorganic carbon flux (inorg-C) and the ratio of org-C to inorg-C (Co/Ci) at (a)500m, (b)1,000m and (c)1,500m at JAST01. (Jan. 1993~Dec. 1993)

図12 (a)JAST01の1,000mと(b)1,500m, (c)JAST02の3,000mにおける有機炭素フラックス(org-C), 無機炭素フラックス(inorg-C), 及び有機炭素フラックス/無機炭素フラックス比(Co/Ci比) (1994年10月~1995年7月)。
lostは前処理中に試料をこぼしたもの。*はswimmerにより捕集量, 化学組成が影響をうけたと考えられる試料

Fig.12 Organic carbon flux (org-C), inorganic carbon flux (inorg-C) and the ratio of org-C to inorg-C (Co/Ci) at (a)1,000 m and (b)1,500 m at JAST01, and (c)3,000 m at JAST02 (Oct. 1994~Jul. 1995) "lost" show that a part of samples were lost during preparation.

4.2.2.2 Co/Ci比

図11, 12に各セジメントトラップに捕集された有機炭素フラックス/無機炭素フラックス比 (Co/Ci比) も併せ示す。

(1) JAST01

水深500mでは、1993年の上半期のデータしかないが、Co/Ci比が約1であった (図11(a))。また水深1,000m, 1,500mと比較するとCo/Ci比の変動が若干大きい。これは生物攪乱による可能性が高い。水深1,000mと1,500mのCo/Ci比は若干の変動はあるものの年間を通じてほぼ1であった (図11(b)(c))。この傾向は1994年~1995年に実施されたセジメントトラップ試料でも同様の傾向が見られた (図12(a)(b))。ただし1995年1月に水深1,500mの試料でCo/Ci比が3以上という高い値が観測されている (図12(b))。Co/Ci比が増加する場合は、春先の植物プランクトンのブルーム等海洋表層での生物生産力が増加し、珪藻などオパールの殻を形成する生物種が増加していることが多いが、今回見られたCo/Ci比の増加は時期的にこのようなことは考えにくい。同セジメントトラップではこの時期を境に全粒子束が減少し2月以降は捕集粒子がほとんどなくなっている。したがってCo/Ci比が3以上となった1月の試料から既に大型“swimmer”による生物攪乱が始まっていたのではないかと推察される。図10(c)はJAST01における2回のセジメントトラップ実験により得られた水深1,000mで捕集された沈降粒子のCo/Ci比の季節変動を示している。4月からCo/Ci比が増加し、7月~8月頃に一年を通じてもっともCo/Ciが高くなる傾向が示されている。

低いCo/Ci比、並びに生物起源ケイ酸塩 (オパール) が沈降粒子にほとんど含まれていないこと (4.2.3.3 沈降粒子の構成成分参照) から、沖縄トラフ海域ではケイ藻等のケイ酸塩 (SiO₂) の骨格をもつ植物プランクトンではなく、炭酸カルシウム (CaCO₃) 骨格を形成するラン藻や有孔虫等のプランクトンが優占種であると結論づけられる。

一方、JAST02の水深約3,000mで得られた試料のCo/Ci比は沖縄トラフの水深約500m, 1,000m, 1,500mで得られた試料のCo/Ci比より有意に高く年平均で1.5程度であった (図12(c))。一般的に沈降粒子のCo/Ci比は、有機炭素の迅速な分解 (再生) に伴い深度とともに低下する。このことを考慮すると、JAST02の表層ではJAST01の表層に比べてCo/Ci比ははるかに高い沈降粒子が形成されていることが示唆される。

図13はJAST01における沈降粒子の(a)有機炭素濃度, (b)無機炭素濃度, (c)Co/Ci比, 及び(d)有機炭素と全窒素のモル濃度比 (C/N比) の深度変化を示したものである。同図にはJAST01の海底堆積物の表層0~2cm, 及び12~14cmの上記値も併せ示されている。有機炭素濃度, 無機炭素濃度は水深500mの約8%から水深1,000mの約4%と、この水深間で急速に低下している (図13(a)(b))。水深1,000mと水深1,500mの間ではそれほど大きな濃度低下は見られないが、水深1,500mと海底約1,650mの間で再び大きく低下していることが明らかである。一方、沈降粒子のCo/Ci比は深度とともに減少する傾向は見られるもののばらつきの範囲で一致し、約1であった (図13(c))。ただし海底堆積物では値が0.4程度まで低下している。これは水深1,500m以深の海水中、あるいは海底において有機炭素の再生が急激に行われたためと推察できる。沈降粒子のC/N比は水深500mではレッドフィールド比 (Redfield *et al.* 1963)²⁵⁾ にほぼ一致した

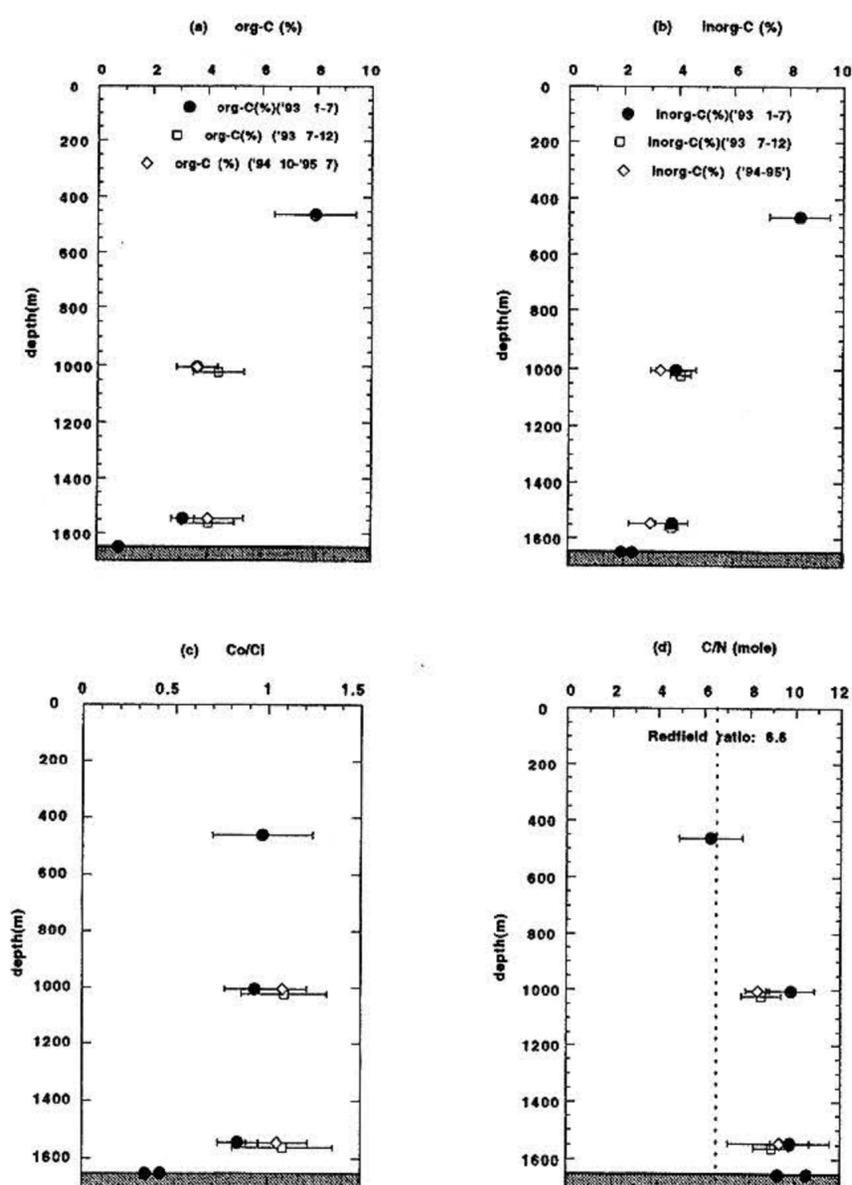


図13 JAST01における(a)有機炭素濃度, (b)無機炭素濃度, (c) Co/Ci比, 及び有機炭素/全窒素比 (C/N比) の鉛直変化

Fig.13 Vertical change in (a)concentration of org-C and (b)inorg-C, (c)Co/Ci, and (d)the ratio of org-C to total nitrogen (C/N) at JAST01.

が水深1,000m以深では9~10程度に増加した(図13(d))。C/N比が深度とともに増加することは多くの研究者により報告されている(Lee and Cronin, 1982¹⁷⁾: Alldredge and Silver, 1988¹⁸⁾: Haake *et al.* 1992¹⁹⁾)。これらの報告では有機炭素に比べ、アミノ酸やアミン態窒素がバクテリアや動物プランクトンに優先的に利用されているためと考えられている。

4.2.3 微量成分

4.2.3.1 アルミニウム (Al)

陸起源物質のトレーサーとなるAlのフラックスの変動を図14(a)~(d)に示す。図14(a)(b)は1993年、及び1994年~1995年におけるJAST01の水深1,000m、1,500mにおけるAlフラックスである。水深1,000mでは1993年には2月、5月、及び10月頃に比較的大きなAlフラックスが観測された。水深1,000mと水深1,500mでの変動パターンはほぼ同調しており、年平均はそれぞれ6.6mg/m²/day、7.0mg/m²/dayで両水深間で大きな差は見られなかった。1994年~1995年に実施したセジメントトラップ実験から、JAST01の水深1,000mでは11月~1月、及び4月頃に高いAlフラックスが観測された。年平均は10

mg/m²/dayであり、1993年より若干大きい。前述したように1,500mのAlフラックスは1994年10月~12月のデータしか有効ではないが、これらのデータからもAlフラックスが水深1,000mと水深1,500mではほぼ一致しており変動パターンも同調していることがうかがえる。図10(d)はJAST01の水深1,000mにおける1993年と1994年~1995年のAlフラックスを比較したものである。若干、フラックスのピーク時期のずれはあるものの、2回のセジメントトラップ実験から沖縄トラフのJAST01では1~2月、4~6月、及び10月~11月にAlフラックスが高くなる傾向があることが明らかとなった。またAlフラックスの変動パターンは有機炭素フラックス以上に全粒子束の変動パターンと同調しており、同海域での沈降粒子量はAlフラックス、換言すれば陸起源物質の量により支配されていると結論することができる。

JAST02, JAST04のAlフラックス(図14(c),(d))はJAST01に比べると全粒子束同様に低く、顕著な季節変動は見られなかった。これはJAST01と比較すると、両海域がアジア大陸、及び東シナ海から離れており、陸起源物質の供給が少ないためと推察される。

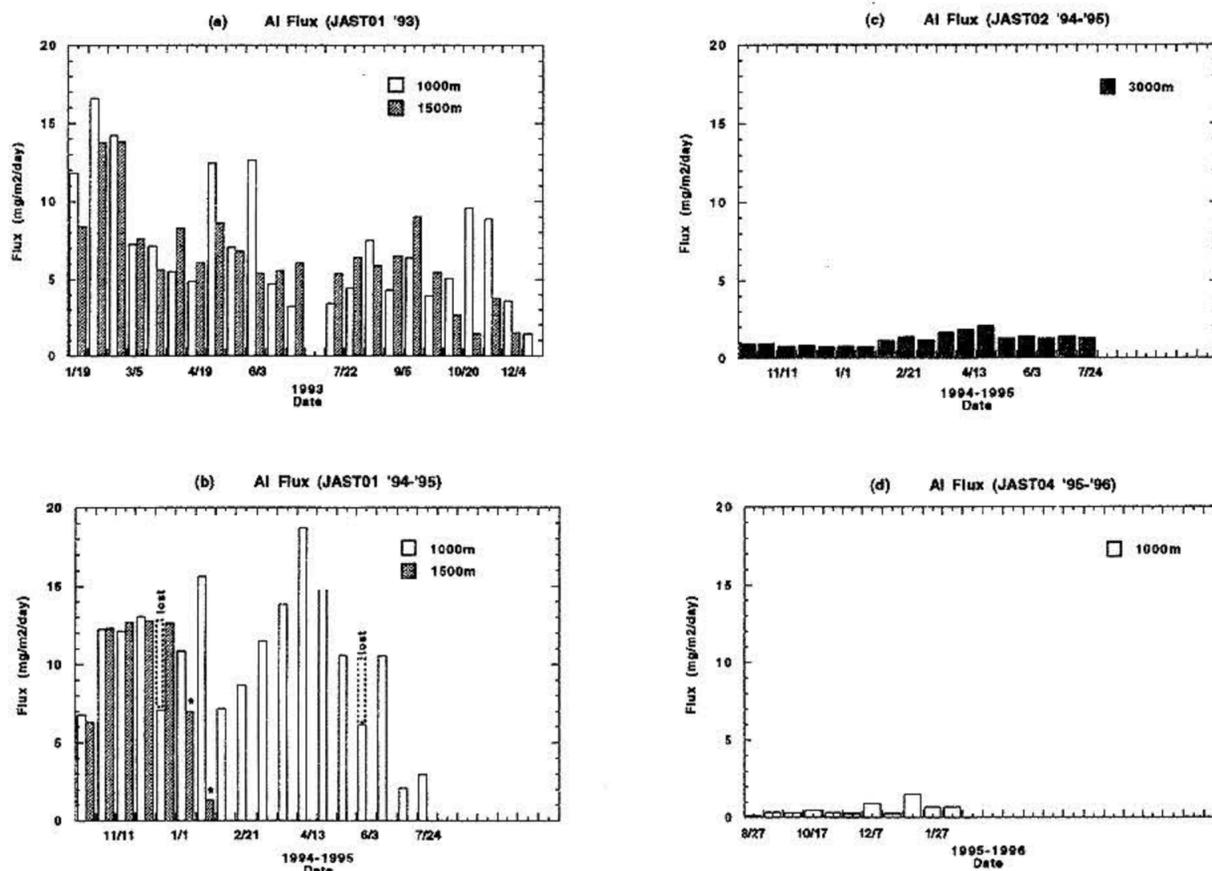


図14 各測点におけるAlフラックス。(a)JAST01の1,000mと1,500m (1993年1月~12月), (b)JAST01の1,000mと1,500m (1994年10月~1995年7月), (c)JAST02の3,000m (1994年10月~1995年7月), (d)JAST04の1,000m (1995年8月~1996年1月)。lostは前処理中に試料をこぼしたもの。*はswimmerにより捕集量、化学組成が影響をうけたと考えられる試料

Fig.14 Al flux at each stations. (a)1,000m and 1,500m at JAST01 (Jan.~Dec. 1993), (b)1,000m and 1,500m at JAST01 (Oct. 1994~Jul. 1996), (c)3,000m at JAST02 (Oct. 1994~Jul. 1995), and (d)1,000m at JAST04 (Aug. 1995~Jan. 1996). "lost" show that a part of samples were lost during preparation. *indicates mass and chemical composition of samples affected by swimmer.

4.2.3.2 その他の微量成分

(1) Ti, Fe, Si

ICP-ESで測定したすべてのセジメントトラップで得られた微量成分フラックスとAlフラックスの関係を図15に示した。このうち、チタン (Ti) (図15(a)), 鉄 (Fe) (図15(b)), 及び全珪素 (Si) (図15(c)) フラックスはAlフラックスと相関係数 (r) が0.99以上と非常に高い相関性を示した。このことは、これらの成分はAlフラックスの変動する時期に、これらの化学成分も同様に変動していたことを意味している。またTi/Al, Fe/Al, Si/Al比はそれぞれ約0.05, 0.5, 及び3.6となり, Taylor (1964)²⁰⁾が示した平均地殻組成 (Ti/Al=0.069, Fe/Al=0.68, Si/Al=3.42) とほぼ一致している。これらのことから同海域でのAl, Ti, Fe, Siは陸起源であり, これらの成分は水中での挙動がほぼ同じであることが明らかとなった。

(2) Ca, Mn, Ba

一方, カルシウム (Ca), マンガン (Mn), バリウム (Ba) はTi, Fe, Siと異なりAlとの相関性が低いことが明らかとなった (図15(d),(e),(f))。Caフラックスは図16に示すように無機炭素フラックスと非常に高い相関を持ち, Ca/Ci比 (重量比) が約3.3であることから, ほとんどがCaCO₃として存在しており生物起源物質と結論づけられる。Mnの場合はJAST01においては, 水深1,500 mにおけるAlフラックスに対するMnフラックスが水深1,000 mにおけるMnフラックスより明らかに高くなっている。図17(a)はJAST01で得られた各水深におけるMnフラックス/Alフラックス比 (Mn/Al) を示している。横軸は対数スケールで表示されており, 水深に伴いMn/Al比が有意の差で増加していることがうかがえる。水深に伴うMnフラックス, 及び沈降粒子中のMn/Al比の増加はよく知られている (例えば角皆, 1987²¹⁾)。これは還元環境となった大陸棚等の浅海域海底, あるいは深海底で, 溶存態となったMnが外洋域へ水平輸送され, 酸化環境で再び粒子態となるためと考えられている。ただし, 同海域の海底には活発な熱水現象があることが, 潜水調査船「しんかい2000」の潜航調査により明らかとなっている (例えばSakai *et al.* 1990²²⁾)。下島 (1994)²³⁾はMnは熱水の主要化学成分であり, 熱水により海洋に放出された溶存態Mnが拡散している様子を報告している。したがって本研究で観測された水深に伴うMn/Al比の増加は熱水の影響である可能性も無視できない。

BaもAlとの相関性が低かった (図15(f))。これはBa

の多くは生物起源のBaSO₄ (バライト) として存在しているためと考えられる。最近, セジメントトラップ実験で得られたBaフラックスが有機炭素フラックスと良い相関関係を持つため, 海底堆積物のBa濃度, 及び堆積速度から古海洋における基礎生産力を推察するということが試みられている (例えばFrancois *et al.* 1995²⁴⁾)。しかし本研究では, 沈降粒子中のBa濃度が低く, 分析精度が低いためか, 両者の間に良い相関関係は見い出せなかった。

4.2.3.3 沈降粒子の構成成分

沈降粒子における生物起源物質, 及び陸起源物質の寄与を明らかにするため, 以下の式を用いて沈降粒子の構成成分を計算した。

(1) 生物起源物質

1) 有機物質 (org-M)

$$\text{org-M} = \text{org-C} \times (1/0.35)$$

ただしorg-Cは有機炭素である。また (1/0.35) は有機物で構成される生物の化学組成比を表すレッドフィールド比: (CH₂O)₁₀₆(NH₃)₁₆H₃PO₄ (Redfield *et al.* 1965²⁵⁾) から求めた。

2) CaCO₃

$$\text{CaCO}_3 = \text{inorg-C} \times 100/12$$

ただしinorg-Cは無機炭素である。

3) 生物起源ケイ酸 (Opal)

$$\text{Opal} = (\text{Total-Si} - \text{Lit-Si}) \times (\text{SiO}_2/\text{Si})$$

ただしTotal-Siは全ケイ素, Lit-Siは陸起源ケイ素で平均地殻組成比 (Taylor, 1964²⁰⁾) からAlフラックス×3.42で算出した。ただし計算上, (Total-Si - Lit-Si) < 0 になったものは0%とした。

(2) 陸起源物質

1) アルミ酸化物 (Al₂O₃)

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{Al} \times \text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2$$

2) 石英 (SiO₂)

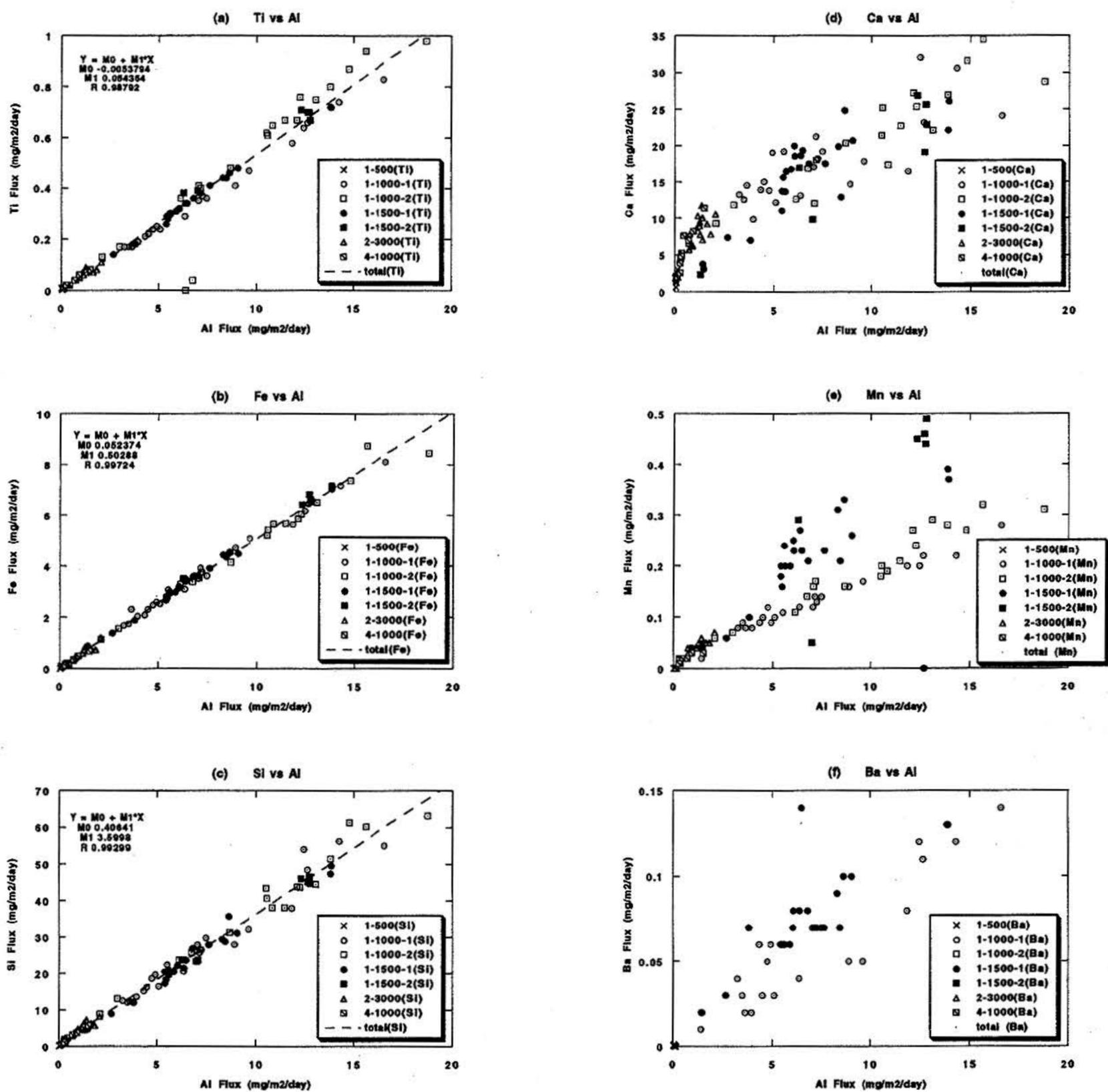


図15 化学成分フラックスとAlフラックスの相関性 (a)Ti, (b)Fe, (c)Total-Si, (d)Total-Ca, (e)Mn, (f)Total-Ba.
 Fig.15 Correlation of chemical components with Al flux. (a)Ti, (b)Fe, (c)Total-Si, (d)Total-Ca, (e)Mn, (f)Total-Ba.

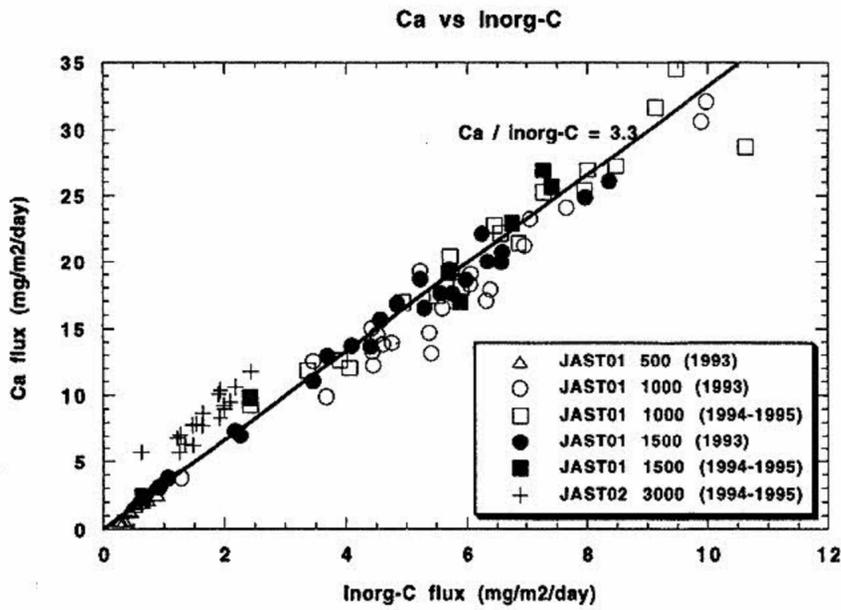


図16. Caフラックスと無機炭素フラックスの相関
Fig.16 Correlation between Ca flux and inorg-C flux.

$$\text{SiO}_2 = (\text{Al} \times 3.42) \times (\text{SiO}_2 / \text{Si})$$

3) 鉄酸化物 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$)

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = (\text{Fe} \times 0.3) \times (\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Fe})$$

$$\text{FeO} = (\text{Fe} \times 0.7) \times (\text{FeO} / \text{Fe})$$

ただし平均地殻組成 (Taylor, 1964²⁰) で, $\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{FeO} = 2.8 : 5.8$ より, $\text{Fe} - (\text{Fe}_2\text{O}_3) : \text{Fe} - (\text{FeO}) \cong 0.3 : 0.7$ とした。

4) その他の成分 (others)

$$\text{others} = \text{全粒子束} - (\text{org-M} + \text{CaCO}_3 + \text{Opal}) - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$$

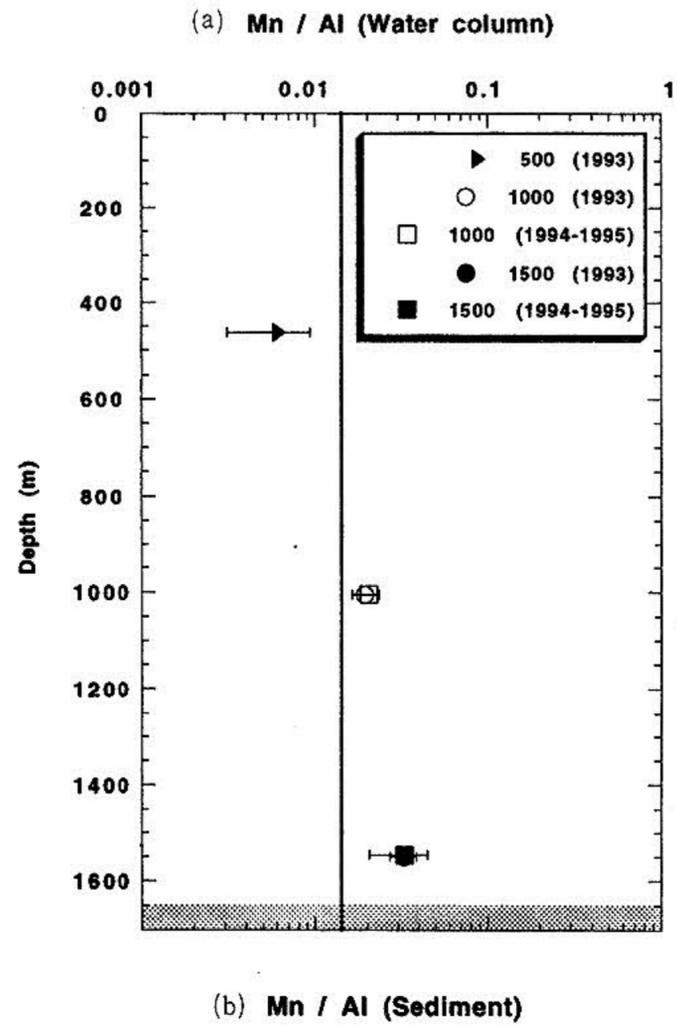
またJAST04の試料についてはorg-C, inorg-Cの測定を行っていないので, org-M, CaCO_3 は以下の式で算出されている。

$$\text{org-M} = \text{全粒子束} - (\text{CaCO}_3 + \text{Opal}) - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$$

ここで CaCO_3 フラックスは, Caフラックス, 及びAlフラックスと平均地殻組成比から推定した陸起源のCaフラックス ($\text{Lit-Ca} : \text{Al} \times 0.5$) により以下の式で算出した。

$$\text{CaCO}_3 = (\text{Total-Ca} - \text{Lit-Ca}) \times (\text{CaCO}_3 / \text{Ca})$$

図18, 19, 20に沈降粒子の構成成分の変動, 及びJAST01の海底堆積物表層0~2cm, 及び表層下12~14cmの構成成分を示す。また詳細を付録3に示す。上からorg-



(b) Mn / Al (Sediment)

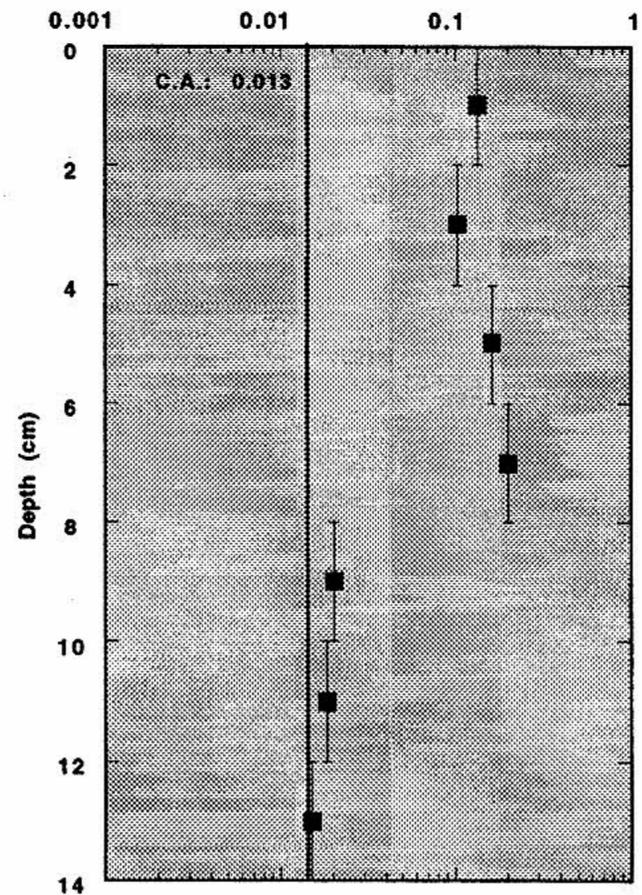


図17 JAST01の(a)水柱, 及び(b)海底堆積物中のMn/Al比の鉛直変化

Fig.17 Vertical change in Mn/Al in (a)water column and (b)sea-floor sediment at JAST01.

M, CaCO₃, Opalの生物起源物質, それより下部(黒で示されているAl₂O₃以下)が陸起源物質である。1993年にはJAST01の水深500mでは生物起源物質(org-M, CaCO₃, Opal)が1月~7月の平均で約85%であった(図18(a))。CaCO₃がほぼ全期間を通じて65%以上(最大で75%)であった。一方, Opalは最大でも5%であり, このことから沖縄トラフ海域がCaCO₃を形成する円石藻(coccolithophorids)や有孔虫(foraminifera)が優占種であることが示唆された。水深1,000mと1,500mでは生物起源物質が年平均で40%程度であり, 沈降粒子に対する陸起源物質の寄与が高いことがうかがえた(図18(b),(c))。ただし水深1,000mでは2月頃から生物起源粒子の割合が増加し始め, 4月, 及び7月頃に生物起源粒子の割合が50%近くまで上昇しており, Opalの割合も高くなっている。これらの時期にはorg-M, CaCO₃, 及びOpalのフラックスが高くなっていることから, 前者を春の生物ブルーム, 後者を夏のブルームと位置づけることが可能である。1,500mのセジメントトラップ試料の構成成分も60%程度が陸起源物質であり, 4月, 及び7月頃に生物起源物質が相対的に増加していることがわかる。同海域で1994年~1995年に実施されたセジメントトラップ実験からも, JAST01における沈降粒子は陸起源物質の割合が約60%であることがわかる(図19(a),(b))。1993年同様, 7月頃に生物起源物質の寄与率が増加しているが, 4月頃の生物起源物質の顕著な増加は見られず, 1,500mでは実験を開始した10月頃に生物起源物質の割合の増加が見られた。

これらのデータとセジメントトラップ実験が実施された地点の海底堆積物の構成成分(図19(c))とを比較すると, 海底堆積物では陸起源物質の寄与率が70~80%に増加している。逆に有機物(org-M)濃度が3%, CaCO₃濃度が15%程度に低下している。これは生物起源物質が海底付近で分解した効果に加え, 後述するように大陸棚, あるいは大陸斜面の生物起源含量の低い海底堆積物が水平輸送され同海域の海底を覆っているためと推察される。

一方, JAST02では陸起源物質の割合は45%程度であった(図20(a))。JAST01に比べると有機物, 及びOpalの割合が増加している。一方CaCO₃は30%程度でありJAST01と有意の差は見られなかった。またJAST02ではothersの割合が増加している。既に紹介した図16はCaとinorg-Cの関係を示したものであるが, JAST02のみCaが過剰に存在していることがわかる(図16の+)。したがってothersの増加はCaOの増加に起因していると考えられた。

JAST04ではorg-Mとothersの値が不明であるものの,

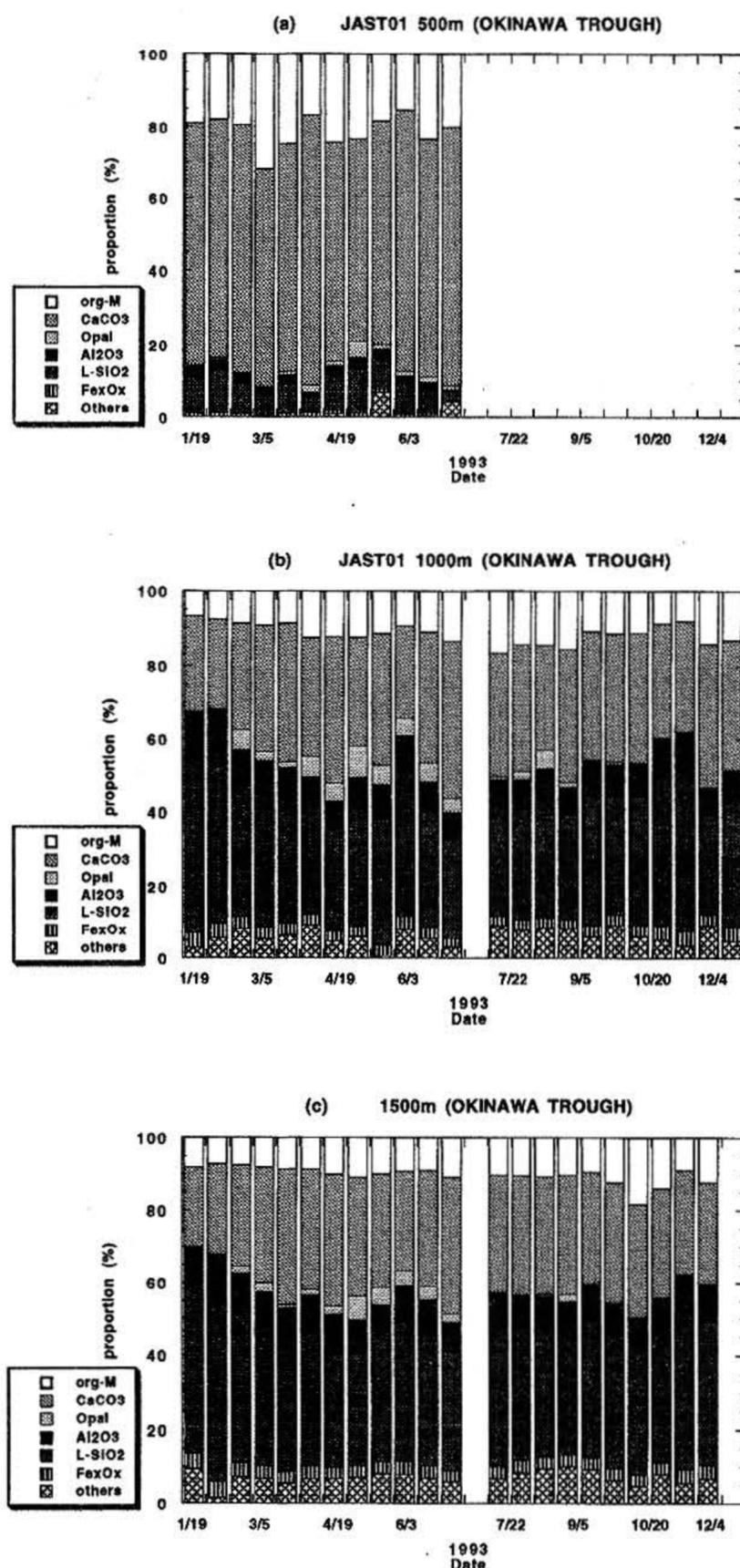


図18 JAST01における沈降粒子の化学組成 (a) 500 m, (b) 1,000 m, (c) 1,500 m (1993年1月~12月)
Fig.18 Chemical composition of settling particles at JAST01. (a) 500 m, (b) 1,000 m, (c) 1,500 m (Jan.~Dec. 1993)

org-Mがまったくない場合, 換言すれば残差をすべて陸起源物質のothersと考えた場合でも陸起源物質は45%程度であり, 生物起源物質の割合が高い(図20(b))。またJAST04ではCaCO₃の割合が全体の50%以上と非常に高く, 粒子の主構成成分となっていた。JAST02, JAST04は大陸, 及び大陸棚から離れており大気経由, 及び海水中での水平輸送による陸起源物質の寄与が少ないためと考えられる。

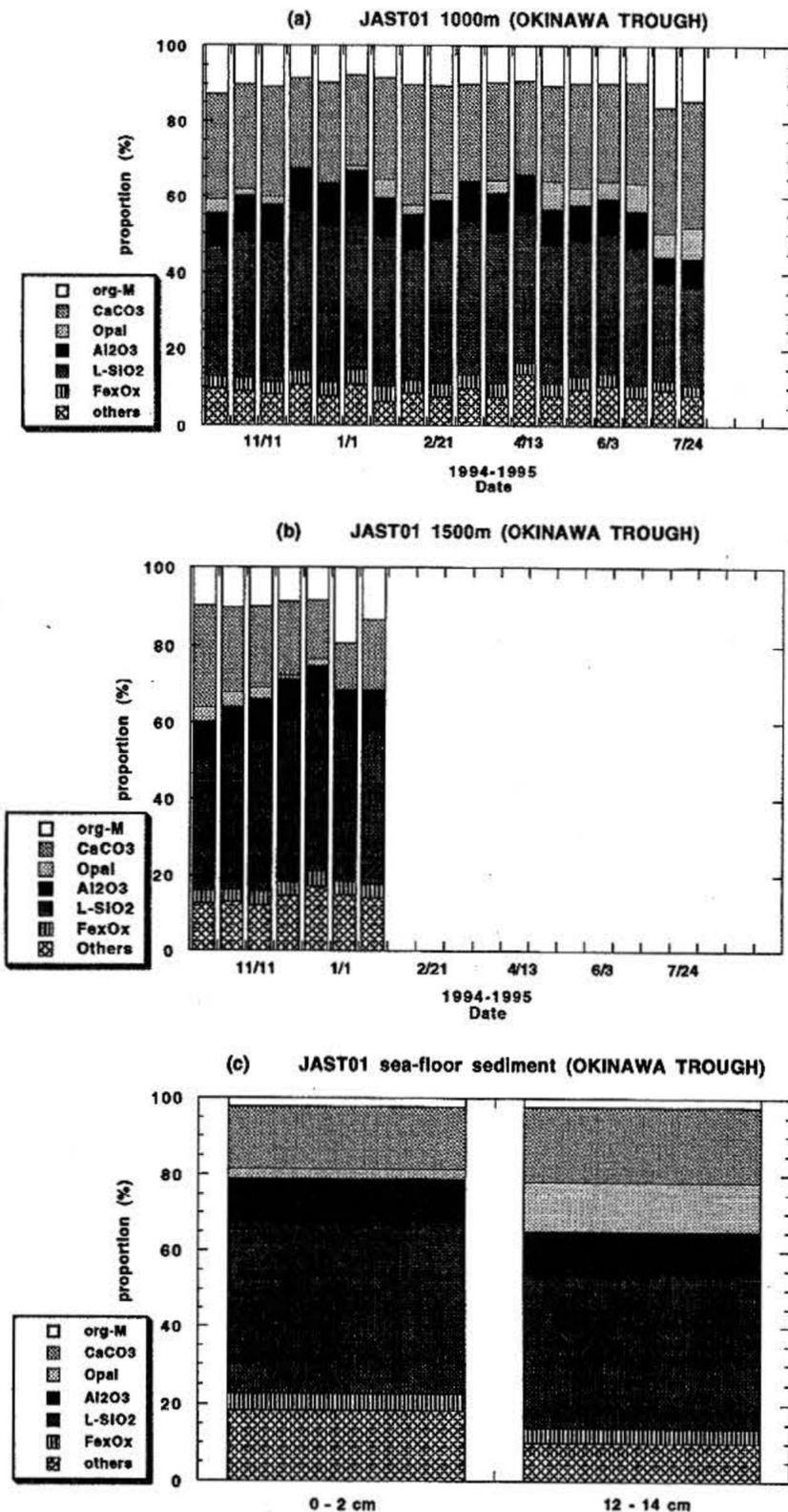


図19 JAST01における沈降粒子と海底堆積物の化学組成 (a) 1,000mと(b)1,500m (1994年10月~1995年7月), (c)海底堆積物 (0~2cm, 12~14cm)
 Fig.19 Chemical composition of settling particles and sea-floor sediment at JAST01. (a)1,000 m and (b)1,500 m (Oct. 1994~Jul. 1995), (c)sea-floor sediment (0~2cm, 12~14cm)

4.2.3.4 ²¹⁰Pbフラックス

地殻に存在している²³⁸Uから数回の放射壊変を経て、²²⁶Raが生まれる。さらに、この²²⁶Raから²²²Rnが生まれるが、これは不活性ガス元素であるため大気中に放出される。この²²²Rnの娘核種である半減期約22年の²¹⁰Pbは大気経由で輸送され大気塵に吸着した後、海洋へ供給される。一方、海洋中で溶存態として存在している²²⁶Raの放射壊変によっても²¹⁰Pbは生まれる。これらの²¹⁰Pbは海水中粒子に吸着 (スキャベンジング) されやすいため、海

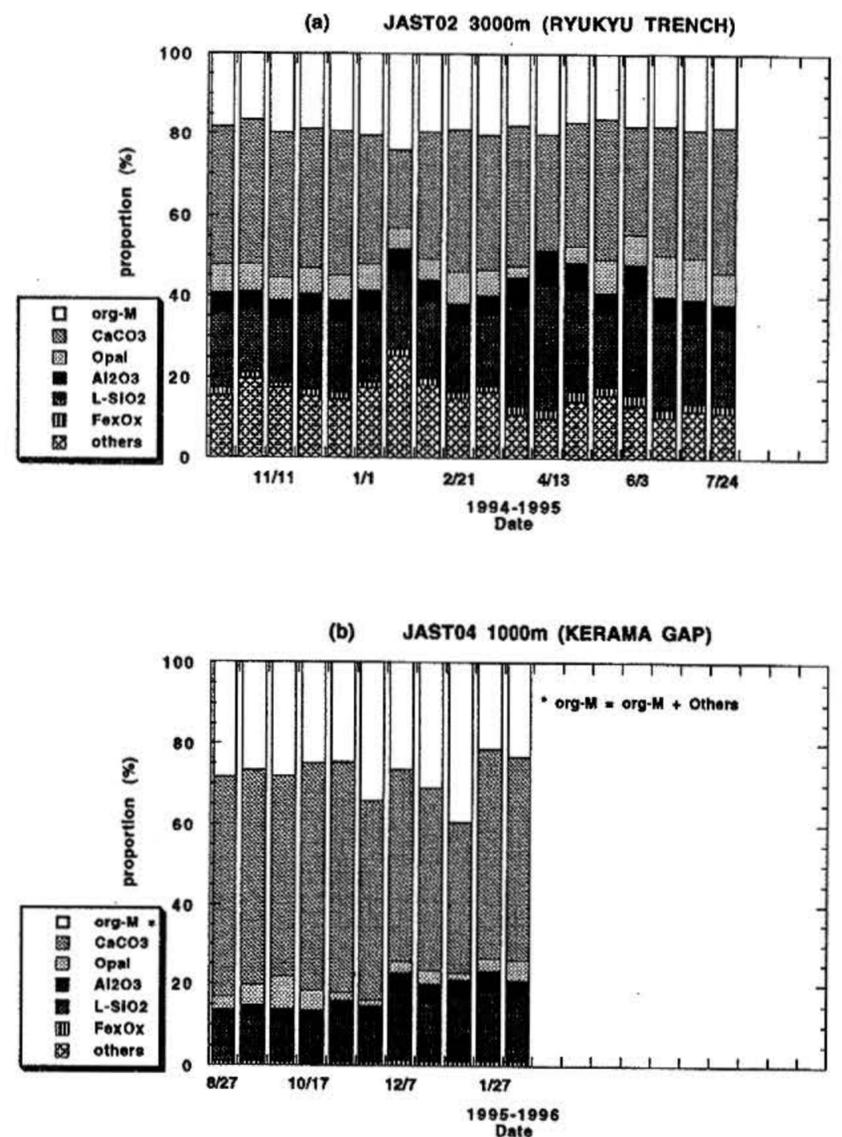


図20 JAST02, JAST04における沈降粒子の化学組成 (a) JAST02 3,000m (1994年10月~1995年7月) (b)JAST04 1,000m (1995年8月~1996年1月)
 Fig.20 Chemical composition of settling particles at JAST02 and JAST04. (a)JAST02 3,000 m (Oct. 1994~Jul. 1995), (b)JAST04 1,000 m . (Aug. 1995 ~ Jan. 1996)

水中粒子の鉛直輸送過程の考察に利用されてきた (Bacon, 1988²⁶⁾: USGOFs, 1990²⁷⁾。

図21に1993年に実施されたJAST01の水深約1,000mと水深1,500mにおける²¹⁰Pbフラックスの年変動を示す。各水深の²¹⁰Pbフラックスの年平均はそれぞれ39dpm/m²/day, 及び53dpm/m²/dayであり, ²¹⁰Pbフラックスが水深1,000mに比べ, 1,500mで増加していることがうかがえる。図22は全粒子束に対する各水深における²¹⁰Pbフラックスである。各水深で全粒子束に対する²¹⁰Pbフラックスの違いはあるものの, ²¹⁰Pbフラックスが全粒子束と良い相関性を示しており, 粒子との吸着性の高さを示している。また水深1,000mから水深1,500mへ粒子が沈降する間に海水中に溶存している²¹⁰Pbが吸着されている様子がうかがえる。

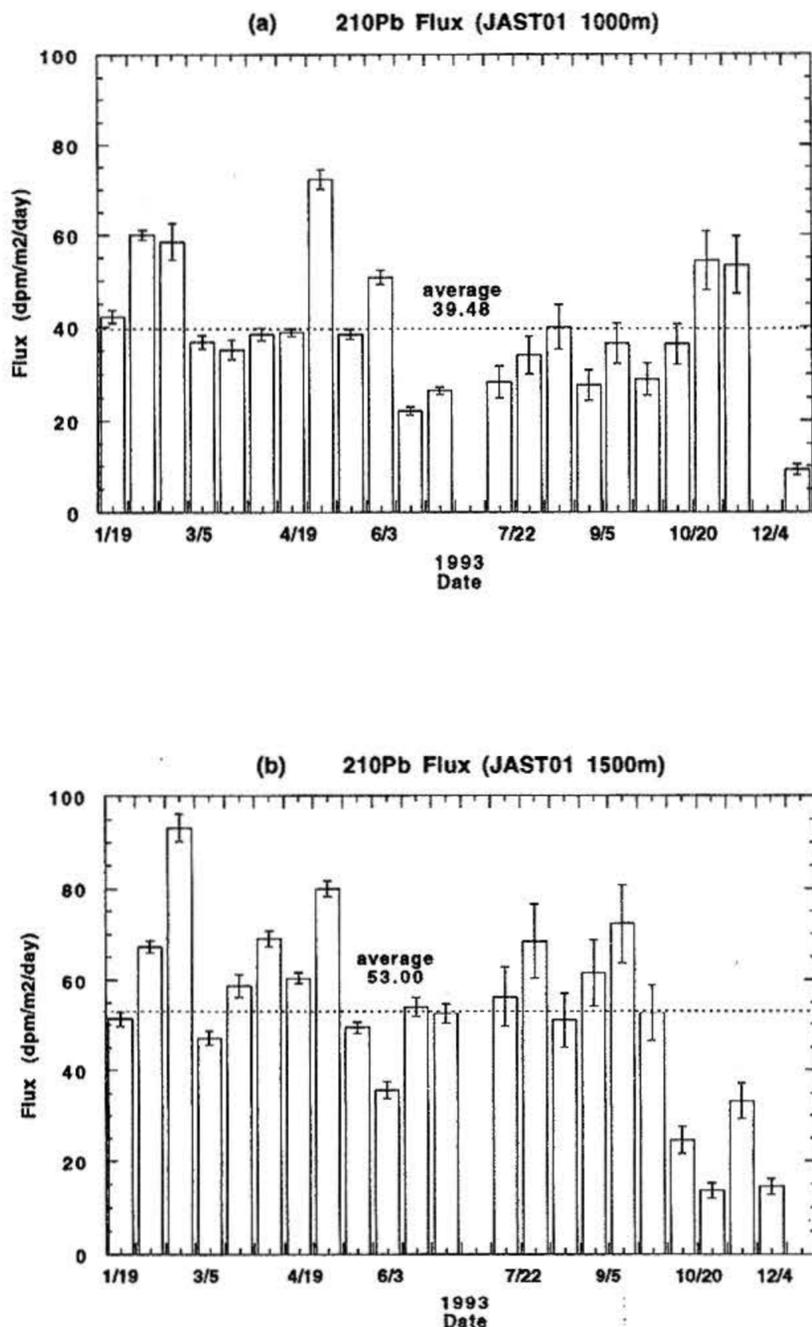


図21 JAST01における²¹⁰Pbフラックス (a) 1,000 m, (b) 1,500 m (1993年1月~12月)
 Fig.21 ²¹⁰Pb flux at JAST01. (a) 1,000 m, (b) 1,500 m (Jan.~Dec. 1993)

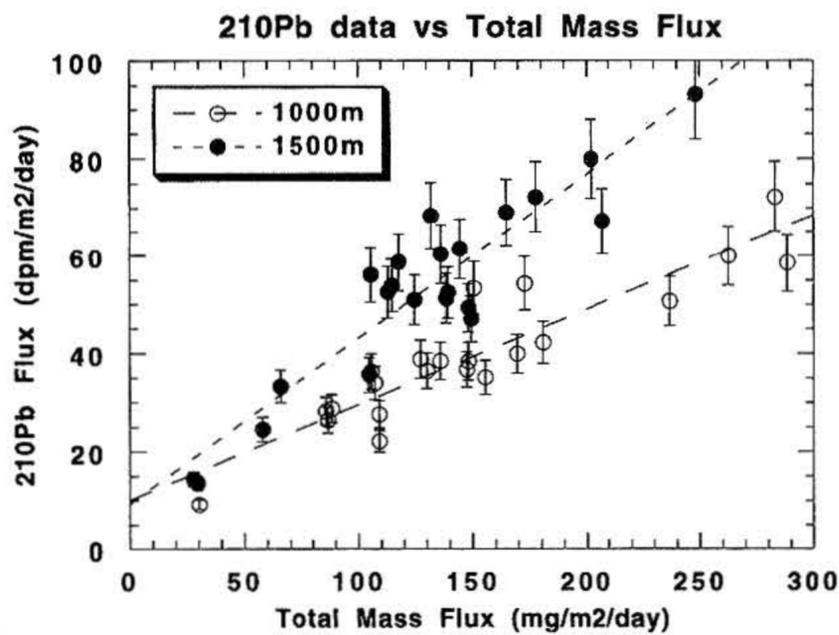


図22 全粒子束と²¹⁰Pbフラックスの相関
 Fig.22 Correlation between total mass flux and ²¹⁰Pb flux.

4.3 海底堆積物

4.3.1 化学成分の鉛直分布

図23は沖縄トラフ (JAST01, K5), 慶良間海裂 (K6, JAST03, S6, K2, JAST04), 及び琉球海溝陸側斜面 (JAST02) の海底堆積物表層 (0~28cm) の各微量成分の鉛直分布を示したものである。これらの図を見ると海底堆積物は, Ca濃度が15%以上と高くAl濃度が5%以下の慶良間海裂と, Ca濃度が10%以下でありAl濃度が6%以上の沖縄トラフ, 及び琉球海溝陸側斜面の二つのグループに分けられる (図23(a),(e))。前述したとおりセジメントトラップ試料ではJAST04でのCaCO₃濃度が全粒子束の約50%以上を占めるのに対し, JAST01, JAST02ではCaCO₃濃度がせいぜい30%とJAST04に比べると低く, 海底堆積物のCaCO₃濃度の特徴を支持しているように見える。慶良間海裂海底堆積物, 及びJAST04の沈降粒子中のCaCO₃濃度が高い理由として

- ① 同海域における生物生産力が高い
- ② 周辺海域から琉球石灰岩が水平輸送された

等が考えられる。これらの点については沈降粒子中の有孔虫の分析が進めばより明らかになると考えられる。

Al, Fe濃度はほぼすべての地点で鉛直的に大きな変化は見られなかった。しかしJAST02では表層下約5cmのところAl濃度が低くなっており, 慶良間海裂のS6では表層から表層下5cmまでAl濃度が2%以下と極めて低くなっていた。これはCa濃度が非常に高いためであり, Alの他, Fe, Ti, 及びSiの濃度も低くなっている。Ti濃度もほぼすべての地点で鉛直的な変化はみられなかった (図23(c))。ただしJAST02のみTi濃度は大きく変化している。表層下5cmにおけるピークはAl濃度と逆相関しており, Al濃度に変化が見られない表層下15cm付近でTi濃度は極大値 (0.6%) を示している。この大きな変動については, 分析誤差の可能性を含め現在考察中である。

Mn濃度はJAST01, 及びJAST02で海底堆積物中に顕著なピークが見られた (図23(f))。一般的に海底堆積物中でMnのピークが見られるのは, 外洋・亜外洋の比較的有機物の少ない赤粘土やケイ質軟泥の場合である (角皆, 乗木, 1983⁵²⁾)。表層は酸化環境であるためMnは溶け出さないが, Mn濃度のピーク以深の海底堆積物が還元環境であるため固相中のMnが溶出し, 間隙水中を移動し, ピーク付近で再び固相になるためと解釈されている。したがってJAST01では海底表層下7cm以深が還元環境になっており, JAST02では13cm以深が還元環境になっていると言える。

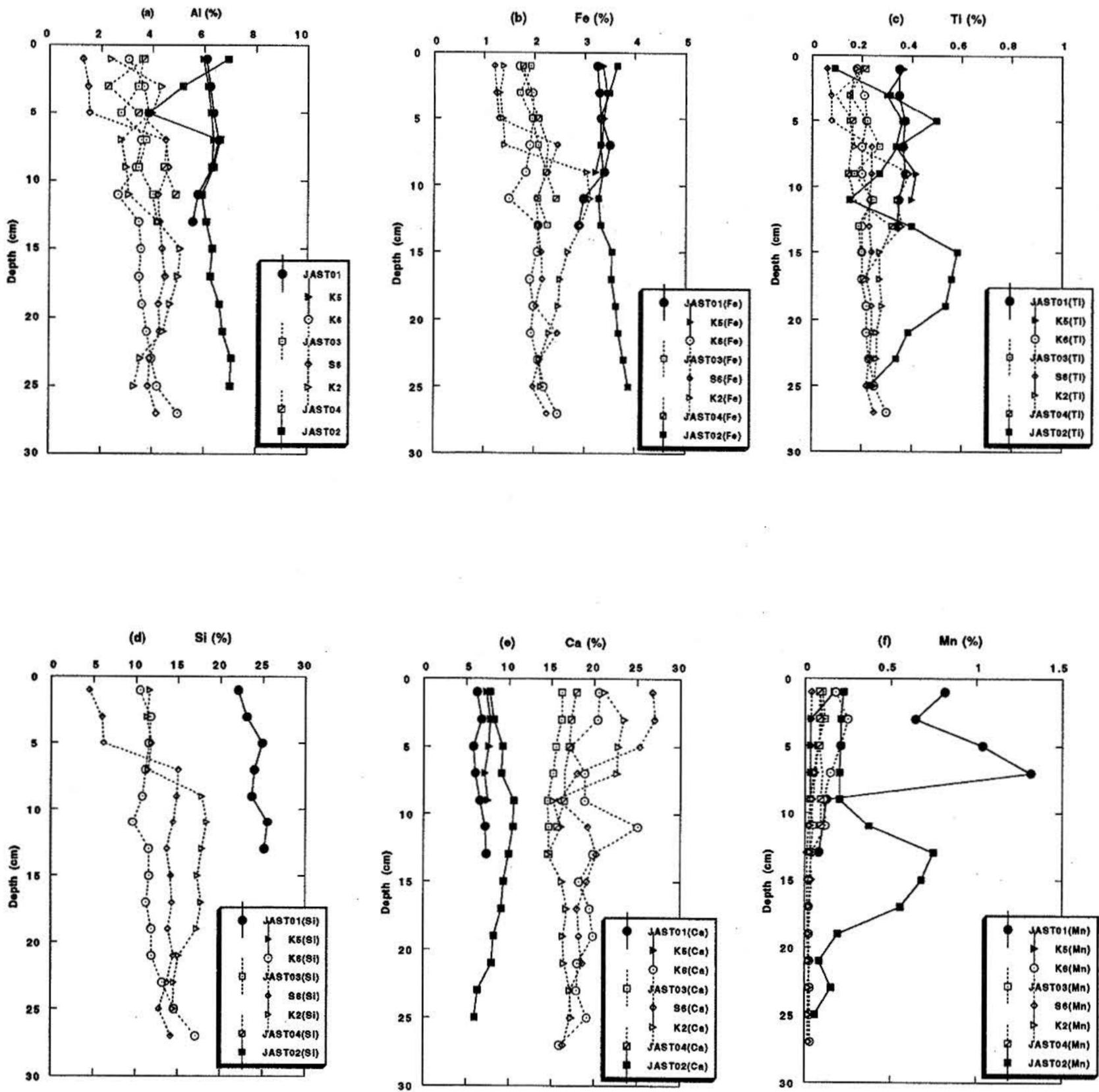


図23 各測点における海底堆積物中の化学成分鉛直分布

(a)Al, (b)Fe, (c)Ti, (d)Total-Si, (e)Ca, (f)Mn

Fig.23 Vertical profiles of chemical components in sea-floor sediments.

(a)Al, (b)Fe, (c)Ti, (d)Total-Si, (e)Ca, (f)Mn

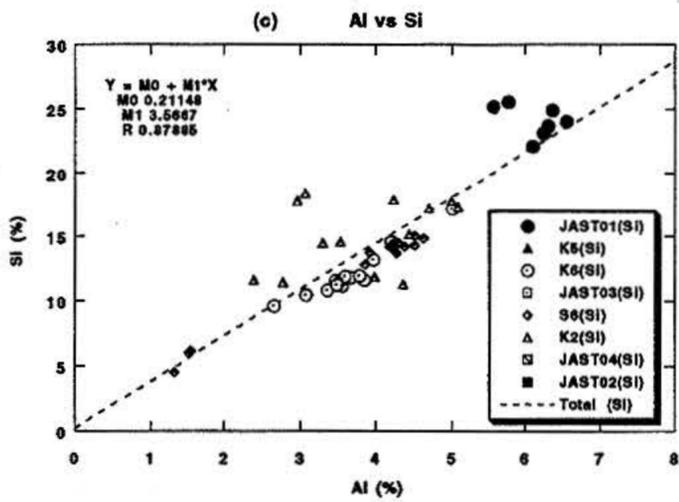
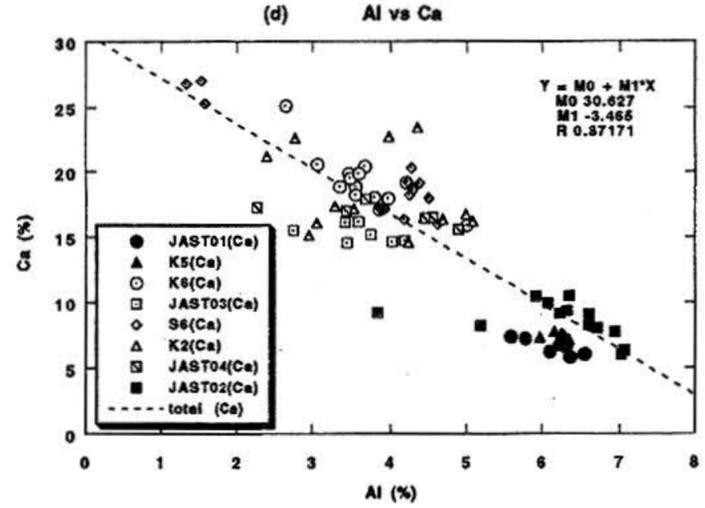
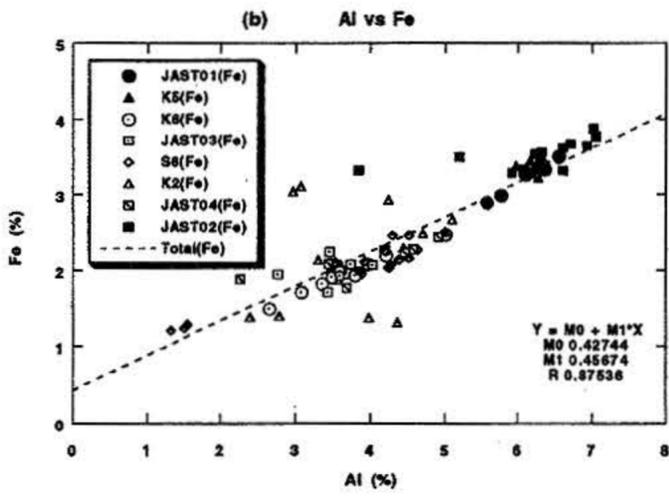
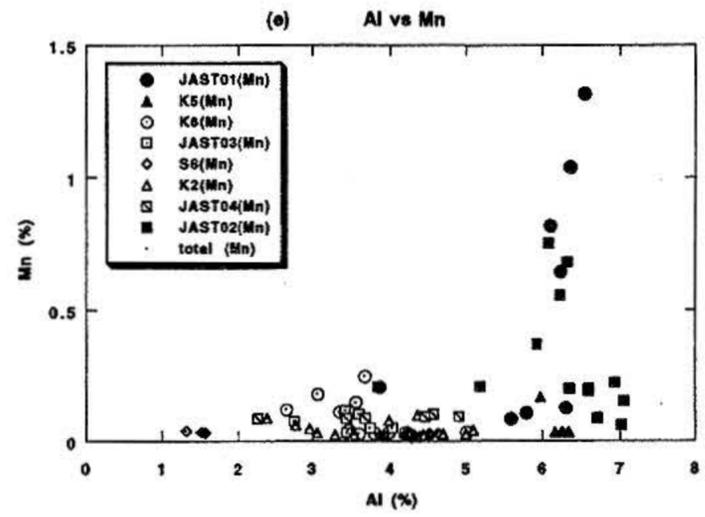
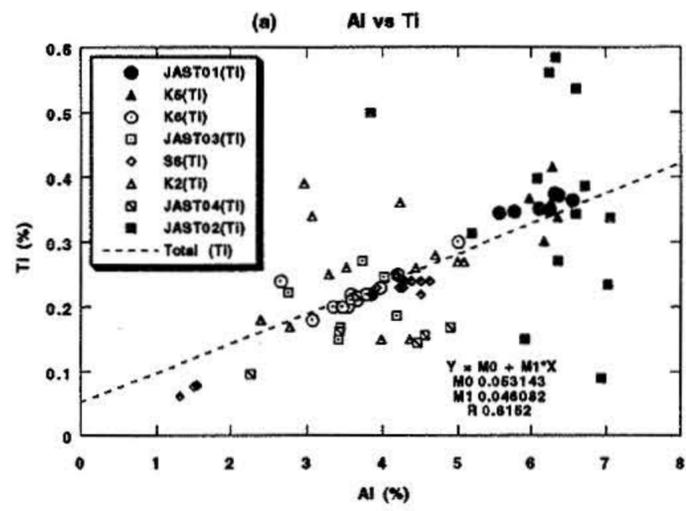


図24 海底堆積物中化学成分濃度とAl濃度の相関性

(a)Ti, (b)Fe, (c)Total-Si, (d)Total-Ca, (e)Mn

Fig.24 Correlation of chemical components with Al concentration in sea-floor sediment.

(a)Ti, (b)Fe, (c)Total-Si, (d)Total-Ca, (e)Mn

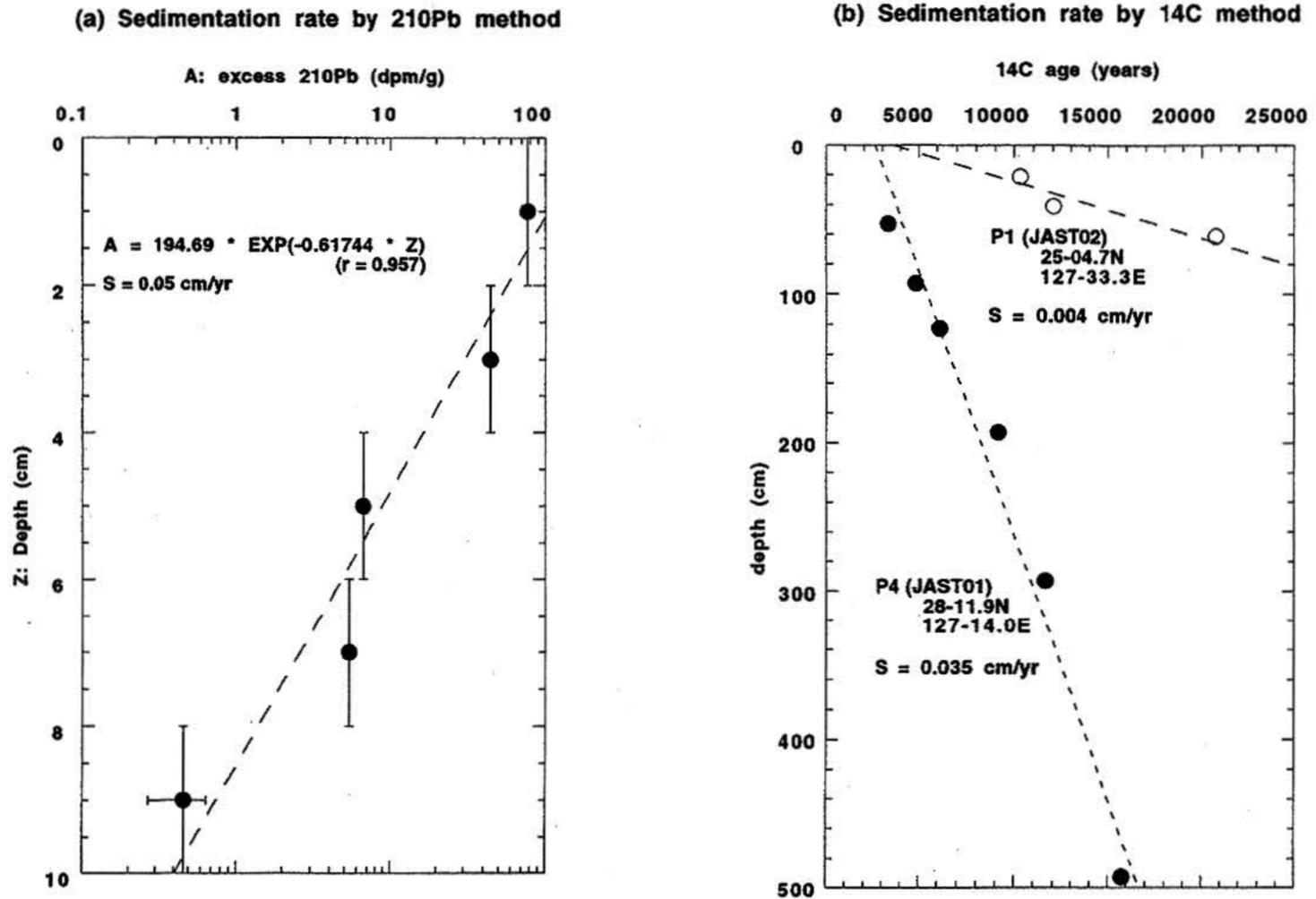


図25 (a) ^{210}Pb 法, (b) ^{14}C 法によるJAST01とJAST02における堆積速度
 Fig.25 Sedimentation rates at JAST01 and JAST02 obtained by (a) ^{210}Pb method and (b) ^{14}C method.

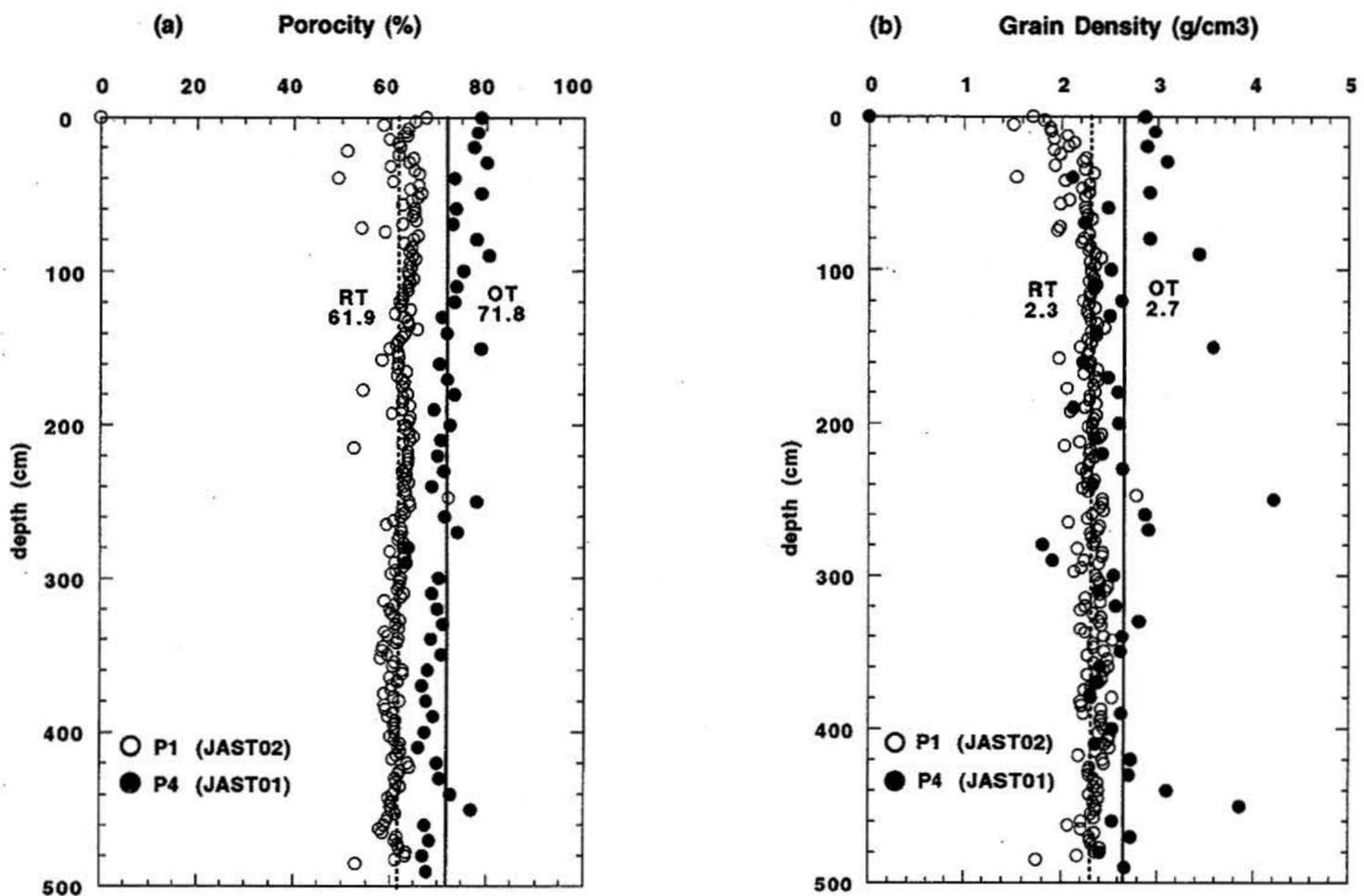


図26 JAST01, JAST02海底堆積物の(a)空隙率と(b)粒子密度
 Fig.26 (a)Porosity and (b)grain density of sea-floor sediment at JAST01 and JAST02.

図24は堆積物中のAl濃度に対する各成分濃度である。Ti/Al, Fe/Al, 及びSi/Al比は正の相関を持ち、沈降粒子と同様の比をもつが、沈降粒子中の同比と比較するとばらつきが大きくなっている。これは酸化還元環境の変化、海底堆積物の再懸濁・再堆積、水平輸送等の変化により、各成分の溶解、供給過程が若干異なることに起因しているものと考えられる。Ca濃度はAl濃度と負の相関を示しており、両者が生物起源物質、陸起源物質の主要構成成分であることがうかがえる。またこの図からも海底堆積物が二つのグループに大別されることを読みとることができる。

4.3.2 堆積速度

海底堆積物の堆積速度は沖縄トラフ内のJAST01付近(JAST01, P4), 及び琉球海溝陸側斜面であるJAST02付近(P1)で測定された。図25(a)は $\text{excess}^{210}\text{Pb}$ 濃度の鉛直分布である。この鉛直分布から算出されたJAST01海底堆積物表層付近の堆積速度は約 0.05cm/yr であった。図25(b)はP4とP1で行ったピストンコアサンプリングで得られたロングコア中の各深度から見つかった浮遊性有孔虫の微化石の放射性炭素(^{14}C)濃度の鉛直分布である。これらの鉛直分布から算出された堆積速度はP4で 0.035cm/yr であり、 $\text{excess}^{210}\text{Pb}$ 法で求めた堆積速度(0.05cm/yr)とほぼ一致した。またこの結果はNarita *et al.* (1990)²⁸⁾が報告した海底堆積物中の ^{210}Pb の鉛直分布から推定される堆積速度(約 0.07cm/year)と桁数が同じでありほぼ一致している。一方、P1での堆積速度は 0.004cm/yr となり、沖縄トラフ内の堆積速度の約 $1/10$ であることが明らかとなった。この結果も、氏家(1986)²⁹⁾が宮古島東方の琉球海溝斜面で得られたピストンコアの二層準に挟まれていた火山灰層から推定した堆積速度(0.003cm/yr)とよく一致している。

4.3.3 空隙率と密度

図26はJAST01, 及びJAST02でのピストンコア試料の湿重量、及び乾燥重量から計算された各層の間隙率(a: porosity), 及び粒子密度(b: grain density)を示したものである(尾田ほか, 未発表データ)。間隙率は深くなるほど小さくなる傾向が見られ、JAST01(OT)の粒子密度は大きくばらついているものの平均をとるとJAST01における間隙率、粒子密度はそれぞれ71.8%, 2.7g/cm^3 , JAST02における間隙率、粒子密度はそれぞれ61.9%, 2.3g/cm^3 と計算された。

5 考察

5.1 500mの全粒子束が少なかった理由

前述のとおりすべての地点(JAST01~JAST04)の水深500m付近(461m~663m)に設置されたセジメントトラップの捕集量は分析を行ったJAST01の水深500mの捕集量と同様に極めて小さかった。

沖縄トラフでは1987年の5月にもセジメントトラップ実験が北海道大学により実施された(Narita *et al.* 1990²⁸⁾)。このセジメントトラップ実験の結果、水深640m, 1,390m, 1,920mでの全粒子束はそれぞれ42, 160, 185 $\text{mg/m}^2/\text{day}$ であった。彼らのセジメントトラップ係留系が設置された地点、水深、セジメントトラップの形状、及び保存試薬が若干異なるものの、本研究で同時期に得られたJAST01での水深500m, 1,005m, 1,547mの沈降粒子量は52, 228, 186 $\text{mg/m}^2/\text{day}$ でありほぼ一致し、浅い水深のセジメントトラップ試料の捕集量が最も少なかった。彼らは捕集試料中の ^{210}Pb 及び ^{234}Th を測定し、これらのフラックスから黒潮海流により浅海域の粒子が水平方向に輸送されたため水深500mには粒子が沈降してこなかった、またそれ以深のセジメントトラップには東シナ海大陸棚を含む周辺海域から水平輸送された海底堆積物が混入したためと結論づけた。過去のセジメントトラップ実験でも、浅い水深に設置されたセジメントトラップの捕集量が、深い水深に設置されたセジメントトラップの捕集量より相対的に少ない場合があることが報告されている。これは深層に設置されたセジメントトラップに設置地点周辺の海底堆積物が再懸濁したもの、あるいは周辺大陸棚や海底斜面から水平輸送された海底堆積物が混入している場合が多い(Gardner *et al.* 1983³⁰⁾; Biscaye *et al.* 1988³¹⁾; Honjo *et al.* 1982⁶⁾)。一方、Siegel *et al.* (1990)³²⁾は数値計算の結果、セジメントトラップ上部に中規模渦が発生した場合、渦の中心にセジメントトラップが設置されていない場合は、浅いセジメントトラップには粒子がつかまらず深度とともに捕集粒子量が増加すると報告している。またHonjo(1996)³³⁾は懸濁粒子の分析や、マリンスノーカメラの観測を通して水深500m以浅の懸濁粒子は十分に凝縮化(aggregate)せず有機物に富むため、安定な沈降粒子にならないとしており、海洋における沈降粒子量を見積もるためには、水深1,000m以深にセジメントトラップを設置しなければ意味がないと考えている。

前述のとおり各水深に設置したセジメントトラップの捕集効率を推定する上で ^{234}Th や ^{210}Pb 等粒子に吸着(スキヤベンジング)されやすい放射性核種は極めて重要な化学

トレーサーとなる。定常状態では、海洋の各水深における²¹⁰Pbフラックスは、大気からの²¹⁰Pbフラックスと海水中の溶存²²⁶Ra濃度の鉛直分布から推定可能である。本研究では大気からの²¹⁰Pbフラックスを 2 dpm/cm²/yr (55 dpm/m²/day) (Turekian *et al.* 1977³⁴) とし、海水中の溶存²²⁶Ra濃度はNozaki *et al.* (1990)³⁵が測定した同海域の溶存ケイ酸濃度 (Si) の鉛直分布から Chung and Craig(1980)³⁶が提案した以下の式を用いて算出した。

$$^{226}\text{Ra} \text{ (dpm/l)} = 0.062 + 0.00124\text{Si} \text{ (}\mu\text{M)}$$

図27に算出されたJAST01の各水深での²¹⁰Pbフラックス推定値 (○: 推定誤差は±15%) と、水深1,000 mと1,500 mに設置されたセジメントトラップの²¹⁰Pbフラックス (●) を比較している。この図から両者がばらつきの範囲で一致していることがわかる。もし²¹⁰Pbフラックスが推定された²¹⁰Pbフラックスよりも低い場合は、海洋表層から粒子が沈降してこないか、沈降してくる粒子を捕集していないことになる。一方、実測値が推定値より高い場合は、海水中で生成され沈降粒子に吸着された²¹⁰Pbフラックス以外に水平方向から粒子に吸着された²¹⁰Pbが供給されたことになる。しかし本研究では水深1,000 mと水深1,500 mでそのようなことは見られない。このことは水深1,000 mには海洋表層から粒子が沈降してきており、両水深間で粒子が水平方向から輸送され、セジメントトラップに混入した割合は極めて低いことを示唆している。したがって、水深500 mのセジメントトラップのみ沈降粒子の捕集量が極めて低いことが推察された。

我々はこれをセジメントトラップの捕集効率が低下したためと推定している。前述のとおりすべての測点 (JAST01, JAST02, JAST04) において、水深500 mに設置したセジメントトラップの多くの捕集カップには、大型の生物 (魚やエビ) が混入した形跡が見られている。ただし捕集カップ内には防腐剤としてホルマリンがセジメントトラップ設置前に添加されているため、いったん捕集カップに捕集された沈降粒子が捕食されたとは考えにくい (ただし大型生物が捕集カップに入った結果、防腐剤が入っているにもかかわらず腐敗した場合は捕集カップ内のpHが低下し、捕集された沈降粒子が分解してしまった可能性もある)。我々はバツフルをすり抜けセジメントトラップ内に侵入した上記大型生物が捕集カップに突入し死んでしまうまでの間、セジメントトラップ内に沈降してくる、あるいはセジメントトラップ内壁に沈降した粒子を捕食していたのではないかと考えている。

ただしJAST01の場合は上記生物攪乱に加え、流体力学的な原因でセジメントトラップの捕集効率が低下した可能性が極めて高い。前述したように水深500 m付近では黒潮の影響で約 1 knots (50 cm/sec) の速い流れが存在していたと推定される。Baker *et al.* (1988)³⁷は流速とセジメントトラップの沈降粒子捕集量との関係について実験を行った。その結果、流速が50 cm/sec以上になると、流速が12 cm/sec以下の時の10%程度まで捕集量が低下することを明らかにしている。一方、Gardner (1985)³⁸は (海水流動に伴い発生する) セジメントトラップの傾きと沈降粒子の捕集効率について実験を行った。

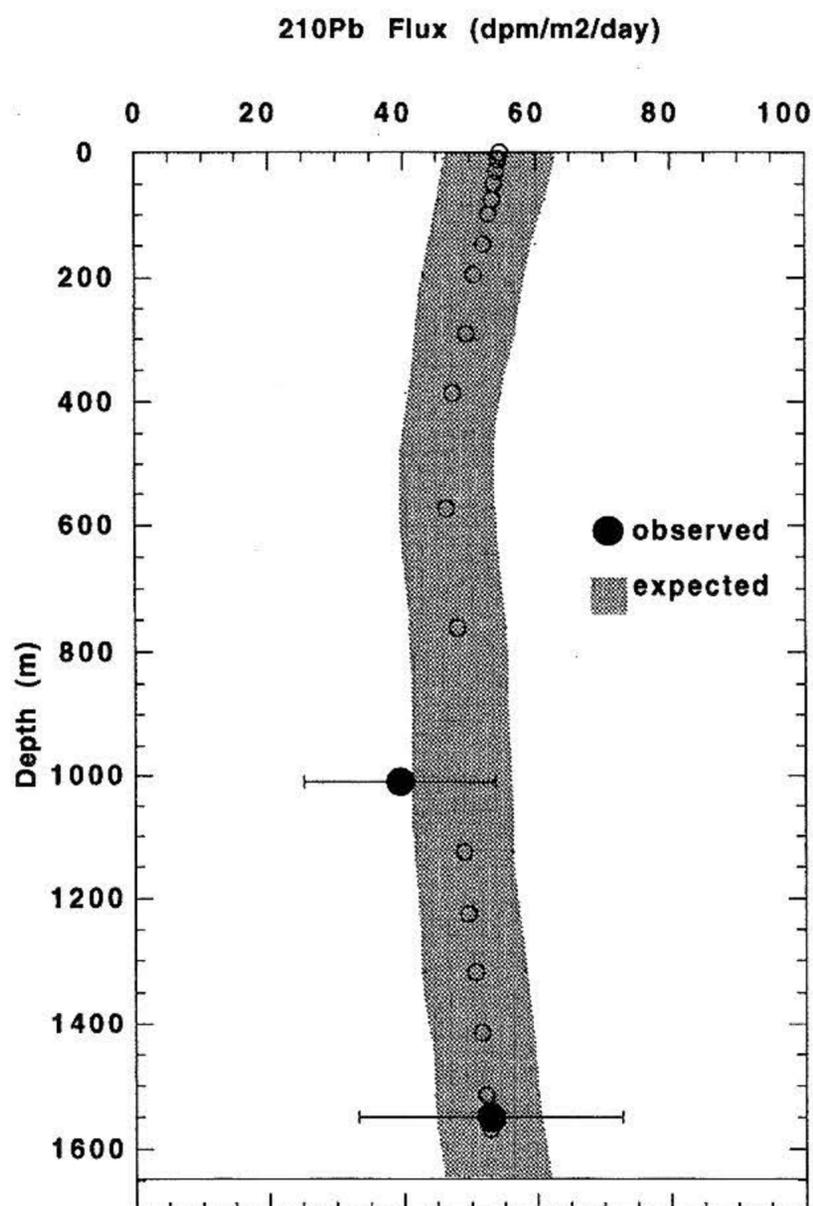


図27 定常状態における²¹⁰Pbフラックス推定値 (○) と観測値 (●) (詳細は本文参照)。推定誤差は±15%

Fig.27 Expected ²¹⁰Pb flux (open circles) under steady state and observed ²¹⁰Pb flux (solid circles) (detail in text). Uncertainty of expected ²¹⁰Pb is ±15%.

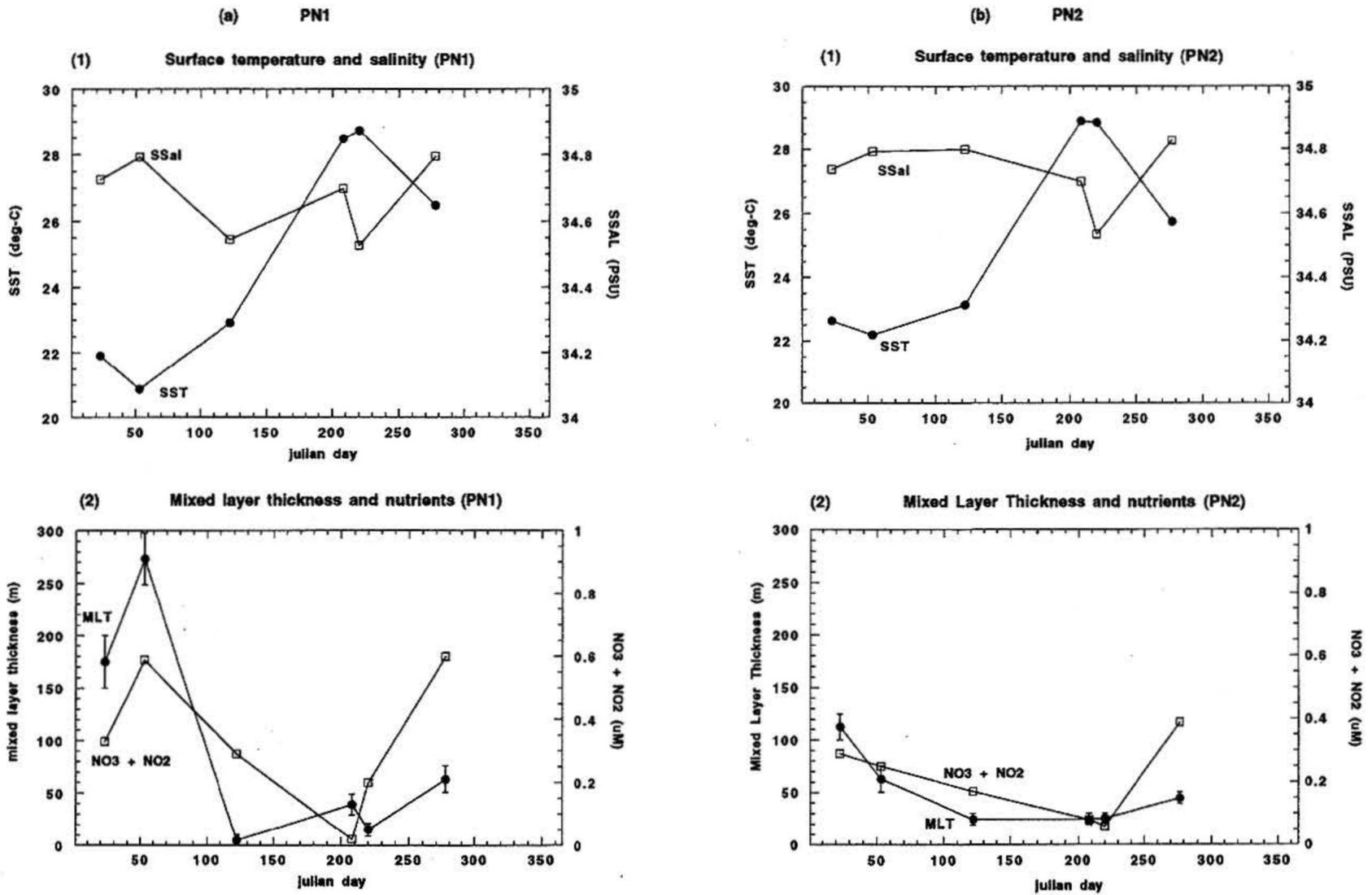


図28 沖縄トラフ海域 (a : PN1, b : PN2) における(1)水温と塩分, (2)鉛直混合層厚さと栄養塩 (NO₃+NO₂) 濃度の季節変動 (長崎海洋気象台, 1993^{(40),(41),(42)}; MASFLEX, 1993^{(43),(44)}, 1994⁽⁴⁵⁾)のデータを用いて作成)

Fig.28 Seasonal variability of (1) Surface water temperature and surface salinity and (2) mixed layer thickness and NO₃+NO₂ at (a) PN1 and (b) PN2 in the Okinawa Trough area (data from Nagasaki Marine Observatory, 1993^{(40),(41),(42)} and MASFLEX, 1993^{(43),(44)} and 1994⁽⁴⁵⁾)

この結果, 傾き 0 度のセジメントトラップの捕集効率を 100%とした時, 傾きが大きくなると次第に捕集効率は増加し, 傾きが45度の時に最大となり捕集効率が300%にまで増加することが明らかとなった。また, それ以上セジメントトラップが傾いた場合は捕集効率が再び低下することも明らかとなった。ただし, 浮力 (係留系の張力), 係留系断面積, 及び現場の流速 (すべての水深で 50 cm/secの流が存在したと仮定) から推定された本研究におけるすべてのセジメントトラップの傾きは最大でも 2 度程度であり, 傾きにより捕集効率が変化したとは考えられず後者の影響は無視できるものと考えられる。したがって今回のセジメントトラップ実験における水深 500mの低い粒子束は, 大型 “swimmer” による沈降粒子の攪乱が主要な原因であり, JAST01においては流体力学的な影響も付加されていると考察した。

5.2 粒子フラックスの季節変動

Honjo (1997)⁽³⁹⁾は世界の各海洋で実施されたセジメントトラップ実験で得られた炭素, Opalフラックスの変動パターンを報告している。これによるとベーリング海やオホーツク海, 及び北部北大西洋では生物起源物質フラックスの季節変動が大きく, 赤道域の季節変動は極めて小さいことが示されている。本研究で得られた沖縄トラフ海域 (JAST01) の粒子フラックスの変動パターンは赤道域のように相対的に小さいといえる。これは同海域が亜熱帯気候帯に属し水温変化があまり大きくないためと, そこを流れる黒潮は栄養塩濃度が低く生物生産力が活発にならないためである。また当初その可能性が予想された, 陸や縁辺海からの栄養塩や微量金属供給による生物生産活動の活発化は本セジメントトラップ実験からは見出せなかった。

1993年に実施された沖縄トラフ内のJAST01における沈降粒子フラックス (1,000m, 1,500m) の変動をまと

めると以下のようなになる。

- ① 全粒子束は2月下旬, 5月, 及び8月~9月に大きく増加している。
- ② 同時期には生物起源の炭素フラックス, 及び陸起源のAlフラックスも増加している。

図28は1993年に長崎海洋気象台(1993)^{(40),(41),(42)}, 及び1993年, 1994年に海洋と陸の相互作用を研究するために実施されたMASFLEX航海(1993, 1994)^{(43),(44),(45)}で得られた沖縄トラフ海域の二箇所(PN1, PN2: JAST01の北東)の海洋表層水温, 塩分, 及び表層混合層厚さ(ここでは海洋表層密度(σ_t)との差が0.125以内の水深とする), 硝酸+亜硝酸塩濃度の季節変動を示したものである。場所により若干の違いが見られるものの1月, 2月には水温が低く, 鉛直混合層が約50~250mと発達しているため塩分, 及び硝酸+亜硝酸塩濃度が高いことがわかる。4月になると水温も上昇し, 鉛直混合層は薄くなっていく。これに伴い硝酸+亜硝酸塩濃度が徐々に低下していく。そして8月頃に水温が最も高くなり, 鉛直混合層の厚さは最も薄くなり, 硝酸+亜硝酸塩濃度も最低となる。そして9月~10月になると水温が低下し始め, 再び鉛直混合層が発達し始め栄養塩濃度も増加するようになる。水平方向への栄養塩の輸送を無視できるとすれば, この結果から4月~8月にかけての栄養塩濃度の低下は明らかに生物活動の活発化に伴うものと考察することが可能である。したがって5月, 及び8月~9月に見られた炭素フラックスの増加は海洋表層における生物活動が活発になったためと考えられる。しかし2月の炭素フラックスの増加が海洋表層の生物活動の増加とは, 海洋構造, 水温, 及び硝酸塩濃度からは考えにくい。ここで注目されるのは同時期のAlフラックスの増加である。沖縄本島の海洋気象台によると1月~3月には沖縄本島で黄砂現象が観測されており, Alフラックスの増加はこれが原因と考えられる。本報告では, このAlが海水中を沈降する際に海水中の有機炭素に富む懸濁物に吸着し, 懸濁粒子が重くなり沈降粒子となったため炭素フラックスが増加したと推察している。

5.3 日本周辺海域と比較した沖縄トラフ海域の特徴

日本周辺海域ではこれまで多くのセジメントトラップ実験が実施されてきた。ここで沖縄トラフ海域の物質循環の特性を明確にするため, 日本周辺海域で行われたセジメントトラップ実験データを整理して比較した。表1にその結果をまとめる(ただし各海域で行われたセジメ

ントトラップ実験は季節, 観測期間, セジメントトラップの種類, 水深, 防腐剤の有無等様々な点で異なるので単純には比較できないことに注意)。

(1) 陸起源物質(Alフラックス)

Alのフラックスが $10\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 以上を記録したのは北海道襟裳岬沖の観測点(EM-1)のみであるが, 沖縄トラフ海域(OT), また四国海盆(SB-1), 日本海溝(JT01)に設置されたセジメントトラップ実験でも比較的高いフラックスが観測されている(ただし1994年~1995年のJAST01の水深1,000mのAlフラックスは平均で $10\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ であった)。Saito *et al.* (1992)⁽⁴⁶⁾は, 四国海盆の深層各水深のAlフラックスを表層まで外挿して算出された表層Alフラックスが, 父島で観測された大気からのAl降水量とほぼ一致したことから, Alの起源を大気経由で輸送された大陸物質としている。日本海溝の場合は海溝斜面に堆積したものが海底濁度層(タービダイト層)として発達しこれが斜面を滑り落ちてセジメントトラップに捕集されたのであろうと解釈されている(本庄, 1989⁽⁴⁷⁾; 野崎, 1989⁽⁴⁸⁾)。沖縄トラフの1993年の場合は後述するように, 上半期は黄砂現象で特徴づけられるように大気経由で大陸の陸起源物質が海洋へ供給され, 下半期は海水流動特性から東シナ海海底で再懸濁した陸起源物質が水平輸送されていると考察された。上記海域ではAl濃度も4%以上という高い値を記録している。陸起源物質のAl濃度を8%と考えた場合, これらの海域の沈降粒子は50%以上が陸起源物質で構成されていることになり, 沖縄トラフの場合は既に示した沈降粒子の構成成分(図18)と一致する。

(2) 生物起源物質フラックス(Co/Ci)

海洋の持つ大気中二酸化炭素の吸収能力を論じる中で, セジメントトラップ実験を実施し, 海洋の有光層内で固定された炭素フラックスがどの程度粒子態として深海へ輸送されるか(生物ポンプ能力)を定量化することが重要である。ただし, 有光層内での生物活動に伴う炭素固定には光合成による有機炭素形成と無機炭素形成があり, 化学量論的には以下の式が示すように前者は有光層海水中の二酸化炭素分圧($p\text{CO}_2$)を低下させるが, 後者は逆に $p\text{CO}_2$ を増加させる。

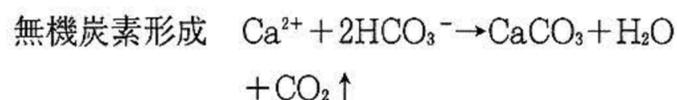
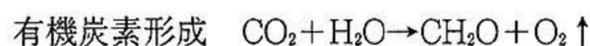


表1 日本周辺のセジメントトラップ実験結果から推察した各海域の生物地球化学的特徴の比較 (参考文献は(1), (3): Honjo (in preparation), (2): 角皆(1990)⁵⁸⁾, (4): Saito *et al.* (1992)⁴⁶⁾, (5): Tsunogai and Noriki (1987)⁵⁹⁾, (6): Masuzawa *et al.* (1989)⁶⁰⁾, (7): Noriki and Tsunogai (1986)⁶¹⁾, and (8): This work)

Table 1 Comparison of biogeochemical characteristics around Japan obtained by sediment trap experiments. Reference numbers indicate (1), (3): Honjo (in preparation), (2): Tsunogai (1990)⁵⁸⁾, (4): Saito *et al.* (1992)⁴⁶⁾, (5): Tsunogai and Noriki (1987)⁵⁹⁾, (6): Masuzawa *et al.* (1989)⁶⁰⁾, (7): Noriki and Tsunogai (1986)⁶¹⁾, and (8): This work

Maritime (Lat., Log)	Period	Water depth (m)	ST depth (m)	Mass Flux mg/m ² /day	org-C Flux mg/m ² /day	Co/Ci	Si/Ca in weight	Al Flux mg/m ² /day	Al Conc. (%)	Ref.
Bering Sea (58.0, 179.5)	91/6	3783	1248	11	0.8	12.4	12.1	0.03	0.24	(1)
	91/6-92/7		3137	167	5.5	3.5	6.6	2.29	1.78	(1)
Bering Sea (53.3, 177.3)	86/6-86/7	3920	110	111	29.0	28.8	4.1	0.10	0.09	(2)
			3030	271	12.3	7.6	9.9	2.45	0.90	(2)
			3680	443	17.6	7.3	16.9	3.01	0.68	(2)
Okhotsk Sea (53.2, 149.5)	90/8-91/7	1160	258	129	12.5	5.0	5.3	0.16	0.10	(3)
			1060	125	4.8	2.4	5.2	0.67	0.67	(3)
North Pacific (46.5, 162.1)	85/8-86/6	5670	780	291	34.1	4.4	2.1	0.39	0.13	(2)
			2930	179	10.3	1.9	2.3	0.27	0.27	(2)
			5240	142	5.6	1.5	2.7	0.85	0.85	(2)
West Pacific (WP-2) (43.0, 150.1)	85/4-85/5	5020	260	216	13.4			0.39	0.18	(4)(5)
			490	216	12.4			0.84	0.39	(4)(5)
			1630	215	21.8			1.51	0.70	(4)(5)
			3320	138	6.7			1.95	1.41	(4)(5)
Off Erimo (EM-1) (41.0, 144.1)	88/9-89/5	5370	5200	317	16.1	17.9	18.1	13.16	4.16	(2)
Japan Sea (JS) (40.5, 138.4)	84/9	3350	870	139	22.1	15.2	5.3	1.07	0.77	(4)(6)
			1130	116	17.8	15.6	5.6	1.37	1.18	(4)(6)
			1880	50	5.4	9.3	3.8	0.90	1.80	(4)(6)
			2730	47	1.5	3.0	4.7	0.85	3.11	(4)(6)
			3260	60	2.3	5.4	< 0	2.33	3.89	(4)(6)
West Pacific (WP-1) (40.3, 146.3)	83/8-83/9	5160	1330	381	42.8	10.5	6.3	3.54	0.93	(4)(5)(7)
			1650	419	33.9	7.6	6.4	4.73	1.13	(4)(5)(7)
			3250	301	14.7	4.5	6.3	4.33	1.44	(4)(5)(7)
West Pacific (WP-3) (40.0, 145.3)	83/8-83/9	5270	1410	115				1.61	1.44	(4)
			4750	122				2.23	1.83	(4)
Japan Trench (JT01) (34.1, 142.0)	86/8-87/5	9200	8800	135	7.6	8.6	2.0	8.59	6.38	(2)
Shikoku Basin (SB-1) (31.3, 137.1)	87/1-87/3	4300	1730	105	5.9	2.2	0.5	4.71	4.49	(2)
			2760	94	3.0	1.4	0.3	4.83	5.14	(2)
			3780	104	4.3	2.3	0.3	6.26	6.00	(2)
Okinawa Trough (OT) (27.2, 126.4)	93/1-93/12 *93/1-93/7	1650	463*	6	0.5*	1.0*	0.03*	0.08*	1.2*	(8)
			1014	148	5.6	1.1	0.13	7.22	4.70	(8)
			1555	124	4.3	1.1	0.08	6.55	5.02	(8)
Ryukyu Trench (RT) (25.0, 127.3)	94/10-95/8	3771	3157	43	2.8	1.7	0.15	1.2	2.81	(8)

したがって外洋域における生物ポンプの効率を論じる際には炭素固定量に加え、両者の形成比を考慮する必要がある。近年、多くの研究者がセジメントトラップ試料中の有機炭素/無機炭素比 (Co/Ci比) に着目し、各海域の生物活動に伴う大気中CO₂の海洋への吸収能力について考察している (例えばTsunogai and Noriki, 1991⁹⁾; Honjo, 1997³⁹⁾)。世界的に見ると深層水が形成される北部北大西洋や南極ウェッデル海、及び黒海で沈降粒子のCo/Ci比が2以上になっているが、大西洋全域や赤道域ではCo/Ci比が2以下となり、赤道域等は1以下となる場合が多いことが報告されている (Honjo *et al.* 1997³⁹⁾)。表1に日本周辺海域におけるセジメントトラップ試料のCo/Ci比も併せ示した。ベーリング海やオホーツク海ではCo/Ci比が、冬期間に1、あるいは1以下に低下する場合があるものの、その他の期間や年平均の同比は3~30という値になっている。同比が1以下になるのは大西洋全般、低緯度海域、及び有機物の分解が進む深海域等である (Tsunogai and Noriki, 1991⁹⁾)。日本周辺海域では植物プランクトンの珪藻種が優占種であり、“Silica ocean” と定義されたベーリング海 (Tsunogai, 1979⁸⁾) でCo/Ci比、及びSi/Caが最も高くなっている。その他の北西部北太平洋でもCo/Ci比はほとんど2以上であり、Si/Ca比も1以上であった。一方、四国海盆、沖縄トラフ海域は両値が相対的に低く、琉球海溝を含めた沖縄トラフ海域では同比が2以下であった。またこの海域ではSi/Ca比 (重量比) が1以下であった。Honjo *et al.* (1997)³⁹⁾はSi/Ca比 (重量比) が1以下の海域を“Carbonate Ocean” と定義しており、赤道域や北大西洋、及び東部北太平洋等がこれに相当するとしている。日本周辺海域では沖縄トラフ海域や四国海盆海域等は“Carbonate Ocean” と位置づけられる。

炭酸の第一、第二解離常数、及び二酸化炭素の溶解度を考慮した場合、表層海水中で固定される炭素のCo/Ci比が約0.7以上であれば、海水中の二酸化炭素分圧 (pCO₂) が低下し、大気中の二酸化炭素が海洋へ吸収されやすくなる。したがって深層で捕集された沈降粒子のCo/Ci比が約0.7以上であれば、海洋表層の生物活動は大気中二酸化炭素を吸収していることになる (ただし沈降粒子のCo/Ci比が0.7以下であっても海水中を沈降する間の有機炭素の分解を考慮すると海洋表層で固定された炭素のCo/Ci比が0.7以上である可能性は高い)。その点では沖縄トラフ海域や四国海盆海域等の“Carbonate Ocean” の生物活動も大気中二酸化炭素吸収に貢献して

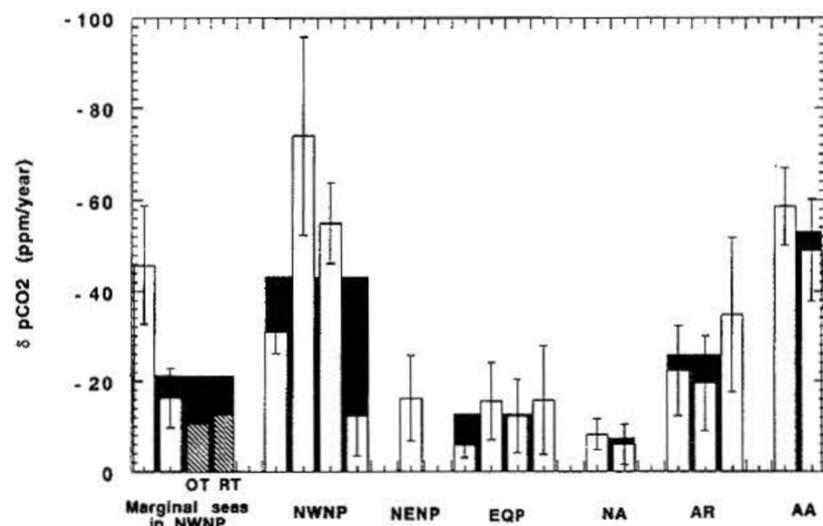


図29 セジメントトラップ実験データから推察した各海域における生物活動に伴う海洋表層中二酸化炭素の低下の年平均値 (δpCO_2) (Honda *et al.*, submitted to JO). OT: 沖縄トラフ海域 (JAST01), RT: 琉球海溝 (JAST02), NWNP: 北西部北太平洋, NENP: 北東部北太平洋 (Station P), EQP: 太平洋赤道域, NA: 北大西洋, AR: アラビア海, AA: 南極海 (セジメントトラップデータは乗木, 1996⁵³⁾; Honjo and Manganini, 1992⁵⁴⁾; Honjo *et al.*, 1995⁵⁵⁾; Haake *et al.*, 1993⁵⁶⁾; Wefer, 1988⁵⁷⁾から引用)

Fig.29 Annual average of δpCO_2 by biological activity in the world ocean estimated from sediment trap data (Honda *et al.*, submitted to JO). OT: Okinawa Trough (JAST01), RT: Ryukyu Trench (JAST02), NWNP: North Western North Pacific, NENP: North Eastern North Pacific (station P), EQP: Equatorial Pacific, NA: North Atlantic, AR: Arabian Sea, AA: Antarctic ocean (sediment trap data from Noriki, 1996⁵³⁾; Honjo and Manganini, 1992⁵⁴⁾; Honjo *et al.*, 1995⁵⁵⁾; Haake *et al.*, 1993⁵⁶⁾; Wefer, 1988⁵⁷⁾)

いと考えられる。ただし“Silica ocean”と比較すると吸収効率は低いということが言える。Honda *et al.* (1996)⁴⁹⁾, Honda *et al.* (submitted to Jour. Oceanogr.) はこれまで実施された世界中のセジメントトラップ実験による炭素フラックスとCo/Ci比、及び各海域表層の水温、塩分、全炭酸、炭酸アルカリ度の値から、各海域の生物活動に伴うpCO₂の低下能力について試算している。その結果、ベーリング海、北西部北太平洋、並びに南極海等の“Silica ocean”では生物活動の持つpCO₂低下能力が高いのに対し、沖縄トラフや琉球海溝、及び赤道域や北大西洋ではpCO₂の低下能力が低いことが示唆された (図29)。

5.4 JAST01における陸起源物質の物質循環

5.4.1 大気からの降下量

鈴木・角皆 (1987)⁹⁰⁾は沖縄本島恩納村において1981年3月～1983年6月の約2年間、大陸土壌起源と考えられる大気塵中のAl, Pb濃度を観測した。そして、大気塵の粒径と降下速度を仮定することで、大気塵(大陸起源土壌粒子)降下量を計算した。その結果、黄砂現象の多い2月～6月の間(黄砂期)の降下量は $15 \text{ g/m}^2/5 \text{ months}$, 黄砂現象のほとんど見られない7月～1月の間(バックグランド期) $1 \text{ g/m}^2/7 \text{ months}$, そして年間降下量を $16 \text{ g/m}^2/\text{yr}$ と推定した。ここで土壌粒子のAl濃度を8%として、1日当たりの降下量に換算し直すと、2月～6月の間はAl平均降下量が $8 \text{ mg/m}^2/\text{day}$, 7月～1月の間は $0.4 \text{ mg/m}^2/\text{day}$, そして1年間の平均が $3.5 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ となる。1993年のJAST01における1月～7月の水深1,000mと水深1,500mのセジメントトラップ実験で得られたAl平均フラックス量は、それぞれ $9.0 \text{ mg/m}^2/\text{day}$, $8.0 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ となり、鈴木と角皆の2月～6月の大気からのAl降下量の試算値とほぼ同じ値となった。また1994年～1995年のJAST01の1月～7月における水深1,000mのAlフラックスは約 $10 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ であり、やはり大気からのAl降下量に匹敵した。大気からの土壌降下量は年により大きく変動すると考えられ、単純に過去の観測結果と今回の結果を比較することには問題はあるが、もし今回の観測期間中にも同程度のAlが降下していたならセジメントトラップに捕集されたAlのほとんどは大気から降下してきたものと考えられる。JAST01において1,000mと1,500mとでAlフラックス量に変化がほとんど見られず、変動パターンも一致していた。このことから沈降粒子中のAl, 他の陸起源物質はほとんど大気中から降下してきたものであり、水柱中を迅速に沈降し、水平方向から供給されてくる陸起源物質をほとんどスキヤベンジングしないで深海まで輸送されるという輸送過程が推察される。

一方、バックグランド期(7月～1月)の大気からのAl降下量は $0.4 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ 程度と報告されているのに対し、1993年7月～12月のJAST01の水深1,000mと1,500mにおけるAlフラックスはそれぞれ 5.3 , $4.8 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ であり、1994年～1995年(10月～12月)では水深1,000mと1,500mのAlフラックスはそれぞれ 10.3 , $11.3 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ であり、大気降下量よりはるかに高くなっていた。このことはバックグランド時期には東シナ海大陸棚を含む周辺海域からAl等の陸起源物質が水平輸送されて同海域で沈降していることを示唆している。水深1,000m

と水深1,500mのAlフラックスに有意な差がなく、 ^{210}Pb フラックスは大気降下量と水柱中でスキヤベンジングされる量と一致していることから、水平輸送はごく浅いところ、可能性としては東シナ海大陸棚縁辺部の水深200m付近で行われていると推察される。Yanagi *et al.* (1996)⁹¹⁾は季節的な風向風速の季節データの統計値を用いて東シナ海における流向流速の季節変動をシミュレーションするとともに、同海域の懸濁物濃度を用いて東シナ海の懸濁物の輸送過程について報告した。この結果、春から夏にかけては東シナ海には黒潮系の水が大陸棚斜面底層付近に沿って侵入し、逆に表層水は東シナ海から黒潮域に流出していくこと、秋から冬にかけては表層付近から水が東シナ海へ侵入し、底層付近の高濁度の海水が黒潮域へ流出していくことを示し、東シナ海大陸棚海底で再懸濁した海底堆積物は秋から冬にかけて沖縄トラフ海域に流出していることを示唆した。これは本研究の結果を支持している。

以上のことから海水中を沈降するAl等の陸起源物質は1月～7月にかけては大気から供給され、8月～12月にかけては東シナ海等周辺海域の海底堆積物から供給されていると考察された。

5.5 海底付近での物質輸送過程

前述のとおり海底堆積物中の ^{210}Pb , 及び ^{14}C の鉛直分布測定から沖縄トラフ(JAST01)と琉球海溝陸側斜面(JAST02)の堆積速度(SR)は、それぞれ約 0.045 , 0.004 cm/year と見積もられた。ここから海底堆積物の沈積量(AR)を以下の式で算出した。

$$\text{AR}(\text{g/cm}^2/\text{yr}) = \text{SR} \times S \times (100 - P) / 100 \times D \times 1000 \times 10000 / 365$$

ただし、S, P, Dはそれぞれ表面積(1 cm^2), 間隙率(%), 粒子密度(g/cm^3)を表している。前述したとおりJAST01における間隙率, 粒子密度をそれぞれ71.8%, 2.7 g/cm^3 , JAST02における間隙率, 粒子密度をそれぞれ61.9%, 2.3 g/cm^3 とすると、JAST01とJAST02の堆積速度はそれぞれ $932 \text{ mg/m}^2/\text{day}$, $96 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ となりJAST01の堆積速度はJAST02の約10倍となっていることが示された(表2)。同表には各海域で実施されたセジメントトラップで得られた全粒子束, 及び各成分フラックスも併せ示されている。

JAST01での堆積速度は1993年のJAST01の水深1,500mの沈降粒子束 $124 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ の約8倍となる。また

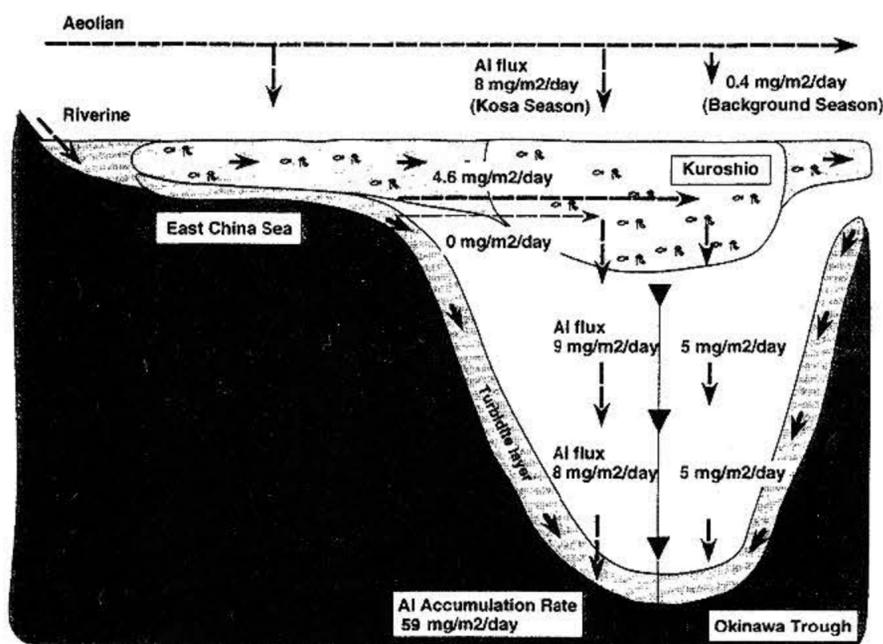


図30 沖縄トラフ海域におけるAlフラックスの循環過程
Fig.30 Schematic view of Al cycle in Okinawa Trough.

表2 JAST01, JAST02における沈降粒子フラックスと海底沈積速度の比較

Table 2 Comparison between settling particle flux and accumulation rate of chemical components at JAST01 and JAST02.

		Total (mg/m ² /day)	Al	org-C	CaCO ₃	Mn
JAST01						
Settling particle	Flux (FL)	124	7	4	41	0.21
(1550m)						
Sea floor sediment	Accumulation rate (AR)	932 *	59	8	150	7.36
(1650m)	(sedimentation rate cm/yr)	0.045				
	(porosity %)	72				
	(grain density g/cm ³)	2.7				
	AR / FL	7.5	9.0	1.8	3.7	35.1
JAST02						
Settling particle	Flux (FL)	42.6	1	3	14	0.05
(3157m)						
Sea floor sediment	Accumulation rate (AR)	96 *	6		15	0.76
(3771m)	(sedimentation rate cm/yr)	0.004				
	(porosity %)	62				
	(grain density g/cm ³)	2.3				
	AR / FL	2.2	6.1		1.1	16.8

* Total accumulation rate = $SR * S * (100 - P) / 100 * D$
 SR: sedimentation rate
 S: surface area = 1 cm²
 P: porosity
 D: grain density

海底堆積物中のAl濃度とARから計算されたAlの海底沈積量は59mg/m²/dayと計算され、これは水深1,500mにおけるAlフラックスの年間平均値7mg/m²/dayの約9倍に相当する。これらのことは水深1,500mと海底の間で、東シナ海大陸棚斜面から陸起源物質が海底に沿って水平輸送されJAST01に堆積していることを示唆するものである。org-CとCaCO₃の海底沈積量は沈降量のそれぞれ1.8倍、3.7倍であり、全粒子束やAlに比べるとその差が小さい。これはorg-CとCaCO₃が海底付近で分解するのに加え、水平輸送されてくる粒子中の両者の濃度が低いと考えられる。

一方、Mnの海底沈積量は沈降粒子中のMnフラックスの約35倍にもなっている。これは水平輸送されてきた

溶存態Mnが海底付近で再び固相Mnになるために加え、海底下約14cmあたりから固相のMnが間隙水中に溶け出し、海底表層から海底下約8cmまでの酸化層(海底下6~8cmが極大層)で再び固相に戻っているためと考えられる。

JAST02における堆積速度は全粒子束の2.2倍となる(表2)。Alの沈積量は水深1,500mのAlフラックスの6.1倍であり、JAST02でも水平方向から輸送された陸起源物質が海底に堆積しているようである。ただし水平方向から輸送されてきた陸起源物質の量は東シナ海大陸棚に隣接するJAST01よりはるかに少ないといえる。JAST02の海底で特徴的なのはCaCO₃の沈積量である。水平方向から輸送された同地点に堆積する海底堆積物はCaCO₃濃度の高い(15~25%)慶良間海裂の海底堆積物である可能性が高い。それにもかかわらずCaCO₃沈積量は水深約3,000m(海底上約600m)におけるCaCO₃フラックスと大きな差はみられない。北太平洋ではCaCO₃の溶解躍層が水深3,500m付近であることが知られており(例えば角皆, 1983⁵³), JAST02ではCaCO₃が水深3,000m以深、特に海底で急激に溶解していることが推察される。

以上をまとめると、JAST01の海底では海底に沿って水平方向から輸送されてきた陸起源物質が堆積しており、沈降粒子の海底堆積物への寄与率はせいぜい13%(124/932)程度であること(図30)、JAST02の海底でも水平方向からの物質の寄与はあるもののその割合はJAST01に比べると小さく、海底ではCaCO₃が急激に溶解していることになる。

6. 結論

1993年~1996年、日本南方亜熱帯域に位置する沖縄トラフ海域、琉球海溝海域においてセジメントトラップ実験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

(1) すべての海域で水深500mで捕集された粒子束は、極めて小さかった。これは“swimmer”による沈降粒子の捕食、分解等の生物攪乱による可能性が極めて高い。またJAST01の場合は、水深500m付近では50cm/sec程度の速い流れが存在していることから、流体力学的な原因によりセジメントトラップの捕集効率が低下していたことも考えられた。

(2) JAST01における2回(1993年、1994年~1995年)のセジメントトラップ実験から沈降粒子の主要構成成分は陸起源物質であった。1~2月、3月下旬~4月、及び10月に全粒子束、生物起源物質、及び陸起源物質が増

加するという傾向がうかがえた。また1,000 mと1,500 mでの全粒子束の変動が同調していること、 ^{210}Pb フラックスの鉛直分布が推定値と一致していることから、両水深間では沈降粒子が大きな分解、あるいは物質の供給を受けることなく、迅速に鉛直方向に輸送されていることを物語っている。

JAST02における水深約3,000 mの全粒子束は、JAST01に比べ全粒子束、生物起源物質、及び陸起源物質が少なかった。また全粒子束の顕著な季節変動も見られなかった。これは、アジア大陸、東シナ海から供給される陸起源物質の影響を受けにくい、生物活動が活発でない、またはセジメントトラップ設置水深が深いので生物起源物質の再生が活発に行われた等の結果によるものと推察される。

(3) 沖縄トラフ海域 (JAST01) の粒子フラックスの変動パターンは赤道域のように小さいといえる。これは同海域が亜熱帯気候帯に属し水温変化があまり大きくないためと、同黒潮域を流れる黒潮は栄養塩濃度が低く生物生産力が活発にならないためである。栄養塩濃度の変動から5月、及び8月～9月に見られた炭素フラックスの増加は、海洋表層における生物活動が活発になったためと考えられる。一方、2月の炭素フラックスの増加は、黄砂現象等によりAlフラックスが増加し、このAlが海水中を沈降する際に海水中の有機炭素に富む懸濁物に吸着し、懸濁粒子が重くなり沈降粒子となったため炭素フラックスが増加したと推察される。

(4) 沈降粒子のOpal含有量が低いことから、沖縄トラフ海域、琉球海溝海域は、赤道域や北大西洋と同様、“Carbonate Ocean”と定義づけられた。また炭素フラックスの Co/Ci 比がほぼ1であり、日本周辺海域では極めて低い値を示した。このことから同海域の生物活動による大気中二酸化炭素吸収効率は低いことが推察された。

(5) JAST01の沈降粒子は生物起源物質が年平均で40%程度であり、沈降粒子に対する陸起源物質の寄与が高いことがうかがえた。一方、JAST02、JAST04では陸起源物質の割合は45%程度であり、JAST01に比べると有機物、及びOpalの割合が増加している。またJAST04では CaCO_3 の割合が全体の50%以上と非常に高く、同地点海底堆積物中の高い CaCO_3 濃度と調和的なものであった。

(6) 大気からのAl降下量、及び東シナ海での流動特

性から、海水中を沈降するAl、Ti、及びSi等の陸起源物質は1月～7月にかけては大気から供給され、8月～12月にかけては東シナ海等周辺海域の海底堆積物から供給されていると考察された。

(7) ^{210}Pb 、及び ^{14}C 測定値から見積もった堆積速度、及びセジメントトラップで捕集された沈降粒子フラックスの比較から、JAST01では海底堆積速度が沈降粒子束の約8倍となった。このことは沖縄トラフでは表層起源で鉛直的に運ばれてきた物質は海底堆積物のほんの一部で、堆積物の多くは東シナ海や周辺の浅い海底から海底に沿ってトラフの海底に運ばれてきた、つまり沖縄トラフは東シナ海や周辺浅海域から海底付近を水平方向に輸送された土砂のたまり場になっている可能性がある。JAST02でも水平方向から輸送された陸起源物質が海底に堆積しているようである。ただし水平方向から輸送されてきた陸起源物質の量は東シナ海大陸棚に隣接するJAST01よりはるかに少ないといえる。またJAST02では CaCO_3 が水深3,000 m以深、特に海底で急激に溶解している様子が明らかとなった。

謝 辞

本研究に関する海洋観測は海洋調査船「かいよう」で実施された。6回のセジメントトラップ係留系の設置、回収は「かいよう」の乗組員、及び日本海洋事業(株)の海上支援員各位による冷静な判断、正確な技術によりすべて成功しました。ここに謝意を表します。本研究における化学分析には以下の研究者が協力してくれました。

- ・ ^{210}Pb 測定：Dr. T-L. Ku (University of Southon California)
- ・ ^{14}C 測定：Dr. J. Southon (Lawrence Livermore National Laboratory)
- ・堆積物処理、含水率・空隙率測定：岩井雅夫博士(高知大学)、土橋正也、山崎誠各氏(熊本大学)
- ・ICP-ES分析：新田済、井上秀一各氏(青山学院大学)

各位に謝意を表します。本研究は筆者らが海洋科学技術センター深海研究部、並びに海洋観測研究部に所属している期間に実施されました。両部の堀田宏部長(現理事)、木下肇部長、並びに菱田昌孝部長を始め、本研究を支援して下さいました研究者各位に謝意を表します。最後にセジメントトラップ実験の実施方法、化学分析方法について指導して下さいましたWoods Hole Oceanographic InstitutionのDr. Susumu Honjo、及びMr. Steven J. Manganini各氏に謝意を表します。

付録1 全粒子束と化学成分フラックス

Appendix 1 Total mass flux and fluxes for chemical components

JAST01: OKINAWA TROUGH																	
Phase Position	Water depth (m)	Date	julian day	Total Mass Flux (mg/m ² /day)		Flux (mg/m ² /day) (<1mm)			Ca	Total-Si	Al	Fe	* ug/m ² /day			Total-P	
				(>1mm)	(<1mm)	org-C	Inorg-C	Total-N					Mn*	Ti*	Ba*		
No.1	27-23N	463	1993/1/19	19	5.28	3.07	0.24	0.29	0.06	0.65	0.18	0.05	0.03	0.40	2.91	0.50	0.00
	126-44E	463	1993/2/3	34	11.12	2.57	0.20	0.25	0.05	0.65	0.18	0.05	0.03	0.40	2.91	0.50	0.00
	1650m	463	1993/2/18	49	15.65	3.69	0.29	0.35	0.08	0.65	0.18	0.05	0.03	0.40	2.91	0.50	0.00
		463	1993/3/5	64	21.41	7.21	0.83	0.53	0.14	1.70	0.22	0.06	0.03	0.59	3.18	0.78	0.03
		463	1993/3/20	79	20.51	5.73	0.53	0.46	0.10	1.29	0.27	0.07	0.05	0.64	3.78	0.11	0.01
		463	1993/4/4	94	29.29	7.53	0.48	0.73	0.10	2.17	0.24	0.05	0.09	0.10	2.91	0.99	0.01
		463	1993/4/19	109	46.29	8.33	0.71	0.60	0.11	1.99	0.43	0.11	0.07	0.14	6.14	0.21	0.01
		463	1993/5/4	124	33.69	9.53	0.79	0.64	0.13	2.00	0.75	0.16	0.09	0.14	8.26	0.17	0.01
		463	1993/5/19	139	48.67	11.10	0.71	0.82	0.09	3.00	0.52	0.13	0.07	0.75	7.03	0.16	0.01
		463	1993/6/3	154	25.03	9.46	0.56	0.89	0.13	2.49	0.47	0.12	0.06	0.71	6.21	0.16	0.02
		463	1993/6/18	169	18.63	5.48	0.45	0.43	0.07	1.44	0.21	0.05	0.03	0.36	2.73	0.71	0.01
		463	1993/7/3	184	21.47	6.22	0.44	0.53	0.07	1.91	0.10	0.02	0.01	0.17	8.90	0.43	0.01
			average		24.75	6.66	0.52	0.54	0.09	1.66	0.31	0.08	0.05	0.40	4.82	0.44	0.01
No.2	27-23N	481	1993/7/22	203	0.79	4.00											
	126-44E	481	1993/8/6	218	0.56	3.85											
	1654m	481	1993/8/21	233	0.08	3.68											
		481	1993/9/5	248	0.42	9.95											
		481	1993/9/20	263	1.52	7.29											
		481	1993/10/5	278	0.23	4.62											
		481	1993/10/20	293	0.21	2.46											
		481	1993/11/4	308	4.56	6.49											
		481	1993/11/19	323	1.00	3.09											
		481	1993/12/4	338	0.19	0.80											
		481	1993/12/19	353	3.92	6.04											
		481	1994/1/3	3	1.53	20.23											
			average		1.25	6.04											
No.1	27-23N	1005	1993/1/19	19	3.17	180.87	4.26	5.60	0.52	16.53	38.04	11.83	5.64	0.20	0.58	0.08	0.09
	126-44E	1005	1993/2/3	34	5.33	262.63	6.97	7.66	0.76	24.14	55.10	16.60	8.12	0.28	0.83	0.14	0.20
	1650m	1005	1993/2/18	49	4.83	288.38	8.85	9.89	1.05	30.63	56.20	14.25	7.17	0.22	0.74	0.12	0.16
		1005	1993/3/5	64	4.70	147.57	4.75	6.05	0.55	18.26	26.51	7.25	3.76	0.13	0.37	0.07	0.08
		1005	1993/3/20	79	2.05	155.63	4.78	6.97	0.58	21.28	25.70	7.15	3.92	0.14	0.38	0.07	0.10
		1005	1993/4/4	94	8.35	135.96	5.97	5.23	0.60	19.30	22.50	5.50	3.08	0.11	0.29	0.06	0.10
		1005	1993/4/19	109	9.66	127.27	5.46	6.06	0.61	19.08	19.75	4.89	2.59	0.09	0.25	0.06	0.10
		1005	1993/5/4	124	15.72	283.07	12.26	9.98	1.47	32.11	54.06	12.44	6.17	0.20	0.64	0.12	0.22
		1005	1993/5/19	139	9.48	148.25	5.94	6.32	0.96	17.06	27.87	7.05	3.51	0.12	0.35	0.07	0.11
		1005	1993/6/3	154	9.77	236.89	7.89	7.06	0.92	23.26	48.44	12.63	6.45	0.22	0.66	0.11	0.12
		1005	1993/6/18	169	4.65	109.14	4.26	4.61	0.50	13.85	18.76	4.71	2.49	0.12	0.24	0.05	0.06
		1005	1993/7/3	184	12.80	86.61	4.06	4.44	0.53	13.31	12.58	3.22	1.69	0.08	0.17	0.04	0.05
			average		7.54	180.19	6.29	6.66	0.75	20.73	33.79	8.96	4.55	0.16	0.46	0.08	0.12
No.2	27-23N	1023	1993/7/22	203	7.32	85.79	4.98	3.46	0.63	12.57	12.15	3.46	1.75	0.09	0.17	0.03	
	126-44E	1023	1993/8/6	218	5.49	107.30	5.37	4.43	0.66	15.07	16.35	4.45	2.32	0.10	0.22	0.03	
	1654m	1023	1993/8/21	233	3.67	169.58	8.60	5.75	1.19	19.30	29.77	7.48	3.61	0.14	0.36	0.07	
		1023	1993/9/5	248	3.33	109.16	5.89	4.76	0.80	13.96	15.29	4.29	2.09	0.09	0.21	0.06	
		1023	1993/9/20	263	3.99	130.15	4.98	5.41	0.68	13.16	20.71	6.37	3.09	0.12	0.29	0.04	
		1023	1993/10/5	278	3.95	88.42	3.52	3.68	0.42	9.92	13.73	3.92	2.05	0.08	0.19	0.02	
		1023	1993/10/20	293	4.04	105.67	4.18	4.45	0.57	12.23	16.58	5.07	2.54	0.10	0.24	0.03	
		1023	1993/11/4	308	1.41	172.69	5.33	6.39	0.79	17.90	32.20	9.59	5.10	0.17	0.47	0.05	
		1023	1993/11/19	323	1.23	150.58	4.31	5.38	0.68	14.72	27.99	8.88	4.70	0.16	0.41	0.05	
		1023	1993/12/4	338	2.20	96.51	4.76	4.52	0.65	14.57	12.36	3.60	2.32	0.08	0.17	0.02	
		1023	1993/12/19	353	2.18	30.23	1.38	1.28	0.23	3.77	4.59	1.41	0.90	0.02	0.07	0.01	
			average		3.53	113.28	4.85	4.50	0.66	13.38	18.34	5.32	2.77	0.10	0.25	0.04	
No.3	27-23N	1005	1994/10/8	282	146.13	6.49	4.94	0.88	16.88	25.69	6.77	3.38	0.14	0.04			
	126-44E	1005	1994/10/25	299	236.31	8.32	7.96	0.99	25.38	43.74	12.26	6.05	0.24	0.76			
	1627m	1005	1994/11/11	316	241.02	9.11	8.48	1.08	27.26	43.87	12.10	5.86	0.27	0.67			
		1005	1994/11/28	333	226.82	6.65	6.56	0.82	22.16	44.50	13.06	6.51	0.29	0.75			
		1005	1994/12/15	350	125.27	4.12	4.06	0.51	12.03	23.64	7.08	3.52	0.16	0.41			
		1005	1995/1/1	1	191.31	5.20	5.51	0.63	17.41	38.20	10.83	5.66	0.19	0.65			
		1005	1995/1/18	18	292.29	8.53	9.47	1.08	34.52	60.24	15.64	8.74	0.32	0.94			
		1005	1995/2/4	35	153.19	5.44	5.91	0.58	18.05	26.43	7.18	3.75	0.17	0.40			
		1005	1995/2/21	52	166.89	6.11	5.72	0.68	20.41	31.31	8.66	4.14	0.16	0.48			
		1005	1995/3/10	69	208.38	7.25	6.46	0.85	22.76	38.22	11.48	5.67	0.21	0.67			
		1005	1995/3/27	86	256.64	8.67	8.01	0.98	26.97	51.43	13.81	7.16	0.28	0.80			
		1005	1995/4/13	103	350.82	10.95	10.63	1.33	28.73	63.15	18.73	8.45	0.31	0.98			
		1005	1995/4/30	120	300.21	11.08	9.13	1.32	31.64	61.24	14.77	7.36	0.27	0.87			
		1005	1995/5/17	137	217.33	7.48	7.28	0.83	25.25	40.73	10.56	5.43	0.20	0.61			
		1005	1995/6/3	154	124.32	4.21	3.90	0.56	12.63	23.73	6.15	3.28	0.11	0.36			
		1005	1995/6/20	171	213.25	7.10	6.87	0.92	21.43	43.44	10.51	5.22	0.18	0.62			
		1005	1995/7/7	188	59.85	3.38	2.42	0.40	9.31	8.83	2.09	1.14	0.06	0.13			
		1005	1995/7/24	205	82.76	4.18	3.37	0.49	11.82	13.19	2.97	1.57	0.07	0.17			
			average		199.60	6.90	6.48	0.83	21.37	37.87	10.26	5.16	0.20	0.57			

Phase Position	Water depth	Date	julian	Total Mass Flux		Flux (mg/m ² /day) (<1mm)			Ca	Total-Si	Al	Fe	Mn	Ti	Ba	Total-P
				(>1mm)	(<1mm)	org-C	Inorg-C	Total-N								
No.1 27-23N	1547	1993/1/19	19	4.58	138.57	3.89	3.70	0.37	12.94	28.76	8.43	4.34	0.21	0.44	0.07	0.07
126-44E	1547	1993/2/3	34	3.95	207.09	5.18	6.25	0.60	22.15	47.35	13.80	7.04	0.39	0.72	0.13	0.08
1650m	1547	1993/2/18	49	6.94	248.36	6.41	8.37	0.79	26.08	49.52	13.84	7.14	0.37	0.72	0.13	0.08
	1547	1993/3/5	64	6.44	149.54	4.13	5.76	0.52	17.56	27.92	7.63	3.91	0.23	0.41	0.07	0.07
	1547	1993/3/20	79	3.16	117.62	3.51	5.30	0.40	16.49	19.74	5.62	2.95	0.20	0.30	0.06	0.05
	1547	1993/4/4	94	5.87	164.76	4.94	6.57	0.61	19.94	29.51	8.28	4.43	0.31	0.44	0.09	0.06
	1547	1993/4/19	109	10.24	136.17	4.73	5.98	0.57	18.62	22.22	6.08	3.20	0.23	0.32	0.08	0.09
	1547	1993/5/4	124	11.18	202.08	7.64	7.97	0.93	24.87	35.77	8.61	4.54	0.33	0.46	0.10	0.15
	1547	1993/5/19	139	10.67	148.25	5.08	5.57	0.61	17.57	26.80	6.81	3.59	0.21	0.36	0.08	0.09
	1547	1993/6/3	154	3.53	104.67	3.33	3.46	0.41	11.05	20.52	5.40	2.82	0.18	0.29	0.06	0.07
	1547	1993/6/18	169	7.29	114.74	3.57	4.41	0.46	13.68	21.08	5.57	2.98	0.24	0.30	0.06	0.08
	1547	1993/7/3	184	32.74	139.39	5.20	6.34	0.68	20.01	22.21	6.05	3.15	0.25	0.32	0.07	0.11
		average		8.88	155.94	4.80	5.81	0.58	18.41	29.28	8.01	4.17	0.26	0.42	0.08	0.08
No.2 27-23N	1563	1993/7/22	203	5.07	105.47	3.78	4.10	0.44	13.73	17.43	5.39	2.67	0.20	0.26	0.06	0.06
126-44E	1563	1993/8/6	218	3.56	131.81	4.75	5.23	0.56	18.65	21.46	6.40	3.39	0.27	0.34	0.08	0.08
1654m	1563	1993/8/21	233	2.01	124.73	4.62	4.85	0.56	16.80	20.57	5.90	2.99	0.20	0.31	0.06	0.06
	1563	1993/9/5	248	2.89	144.55	5.14	5.71	0.64	19.36	23.67	6.50	3.44	0.23	0.34	0.14	0.14
	1563	1993/9/20	263	2.32	177.65	5.80	6.59	0.78	20.76	31.11	9.02	4.47	0.26	0.48	0.10	0.10
	1563	1993/10/5	278	0.94	112.90	4.71	4.57	0.66	15.64	18.35	5.46	2.76	0.16	0.28	0.06	0.06
	1563	1993/10/20	293	1.57	57.75	3.71	2.17	0.57	7.38	9.00	2.65	1.39	0.06	0.14	0.03	0.03
	1563	1993/11/4	308	1.10	29.48	1.44	1.06	0.20	3.75	4.90	1.43	0.74	0.04	0.07	0.02	0.02
	1563	1993/11/19	323	2.14	65.67	2.03	2.26	0.27	6.99	12.01	3.78	1.89	0.10	0.18	0.07	0.07
	1563	1993/12/4	338	0.69	27.56	1.17	0.93	0.16	3.11	4.75	1.47	0.76	0.04	0.08	0.02	0.02
	1563	1993/12/19	353	2.83	0.27											
		average		2.28	88.89	3.72	3.75	0.48	12.62	16.33	4.80	2.45	0.16	0.25	0.06	0.06
No.3 27-23N	1547	1994/10/8	282		131.41	4.55	5.89	0.58	16.95	23.80	6.31	3.50	0.29	0.38		
126-44E	1547	1994/10/25	299		237.58	8.65	7.27	0.76	26.94	46.14	12.31	6.41	0.45	0.71		
1627m	1547	1994/11/11	316		232.14	8.29	7.41	0.84	25.65	46.47	12.72	6.62	0.44	0.70		
	1547	1994/11/28	333		221.77	6.87	6.76	0.62	22.93	44.75	12.77	6.54	0.49	0.67		
	1547	1994/12/15	350		217.47	6.48	5.70	0.57	19.14	45.17	12.66	6.81	0.46	0.70		
	1547	1995/1/1	1		129.34	8.70	2.41	1.59	9.83	23.32	7.01	3.60	0.05	0.39		
	1547	1995/1/18	18		23.98	1.13	0.65	0.14	2.38	4.53	1.32	0.69	0.04	0.07		
		average			170.53	6.38	5.15	0.73	17.69	33.45	9.30	4.88	0.32	0.52		

JAST02: RYUKYU TRENCH

Phase Position	Water depth	Date	julian	Total Mass Flux		Flux (mg/m ² /day) (<1mm)			Ca	Total-Si	Al	Fe	Mn	Ti	Ba	Total-P
				(>1mm)	(<1mm)	org-C	Inorg-C	Total-N								
No.3 25-05N	3157	1994/10/8	282		35.74	2.29	1.47	0.18	6.23	4.26	0.91	0.48	0.04	0.05		
127-35E	3157	1994/10/25	299		45.21	2.64	1.92	0.18	8.35	4.77	0.97	0.51	0.04	0.05		
3771m	3157	1994/11/11	316		35.18	2.43	1.52	0.15	7.90	3.52	0.77	0.39	0.03	0.04		
	3157	1994/11/28	333		32.50	2.15	1.34	0.17	6.33	3.81	0.83	0.45	0.04	0.05		
	3157	1994/12/15	350		29.20	1.98	1.25	0.16	5.71	3.31	0.72	0.38	0.04	0.04		
	3157	1995/1/1	1		31.69	2.27	1.21	0.16	6.80	3.59	0.77	0.41	0.03	0.04		
	3157	1995/1/18	18		27.52	2.31	0.63	0.15	5.73	3.17	0.73	0.37	0.03	0.04		
	3157	1995/2/4	35		43.49	2.99	1.63	0.23	8.69	4.95	1.13	0.60	0.04	0.07		
	3157	1995/2/21	52		57.76	3.83	2.43	0.31	11.75	6.80	1.37	0.72	0.05	0.08		
	3157	1995/3/10	69		48.26	3.43	1.93	0.28	10.37	5.40	1.17	0.59	0.04	0.06		
	3157	1995/3/27	86		47.77	2.98	1.99	0.23	9.25	6.29	1.65	0.73	0.05	0.07		
	3157	1995/4/13	103		42.70	2.99	1.46	0.23	7.80	5.67	1.83	0.74	0.05	0.08		
	3157	1995/4/30	120		59.81	3.56	2.18	0.28	10.59	8.22	2.06	1.21	0.07	0.11		
	3157	1995/5/17	137		50.22	2.85	2.09	0.21	9.50	6.24	1.27	0.84	0.05	0.09		
	3157	1995/6/3	154		40.13	2.54	1.27	0.20	7.08	6.23	1.40	0.82	0.05	0.08		
	3157	1995/6/20	171		42.45	2.67	1.62	0.22	7.79	6.44	1.28	0.73	0.05	0.07		
	3157	1995/7/7	188		50.36	3.34	1.90	0.24	10.09	7.21	1.40	0.81	0.06	0.08		
	3157	1995/7/24	205		46.67	3.00	2.00	0.26	9.01	6.03	1.27	0.74	0.05	0.08		
		average			42.59	2.79	1.66	0.21	8.28	5.33	1.20	0.64	0.05	0.07		

JAST04: KERAMA GAP

Phase Position	Water depth	Date	julian	Total Mass Flux		Flux (mg/m ² /day) (<1mm)			Ca	Total-Si	Al	Fe	Mn	Ti	Ba	Total-P
				(>1mm)	(<1mm)	org-C	Inorg-C	Total-N								
No.4 25-28N	1121	1995/8/27	240		8.87				2.00	0.55	0.12	0.07	0.00	0.01		
127-11E	1121	1995/9/13	257		23.80				5.27	1.75	0.35	0.20	0.02	0.02		
1723m	1121	1995/9/30	274		21.77				4.50	1.84	0.30	0.17	0.02	0.02		
	1121	1995/10/17	291		32.51				7.60	2.30	0.45	0.15	0.02	0.02		
	1121	1995/11/3	308		20.56				4.89	1.33	0.33	0.15	0.01	0.02		
	1121	1995/11/20	325		18.85				3.90	1.07	0.28	0.13	0.01	0.02		
	1121	1995/12/7	342		40.56				8.19	3.76	0.92	0.49	0.03	0.06		
	1121	1995/12/24	359		13.30				2.56	1.13	0.27	0.13	0.01	0.02		
	1121	1996/1/10	10		70.11				11.37	5.71	1.50	0.67	0.03	0.08		
	1121	1996/1/27	27		29.73				6.57	2.85	0.70	0.32	0.02	0.04		
	1121	1996/2/13	44		32.65				6.96	3.15	0.69	0.34	0.02	0.04		
		average			28.43				5.80	2.31	0.54	0.26	0.02	0.03		

付録2 沈降粒子中と化学成分濃度

Appendix 2 Concentrations of chemical components on settling particles

JAST01: OKINAWA TROUGH																
Phase	Position	Water depth (m)	Date	Concentration (%)												
				org-C	Inorg-C	Total-N	Ca	Total-Si	Al	Fe	Mn	Ti	Ba	Total-P		
No.1	27-23N	463.00	1993/1/19	7.82	9.45	1.95	21.17	5.86	1.63	0.98	0.01	0.09	0.02	0.00		
	126-44E	463.00	1993/2/3	7.78	9.73	1.95	25.29	7.00	1.95	1.17	0.02	0.11	0.02	0.00		
	1650m	463.00	1993/2/18	7.86	9.49	2.17	17.62	4.88	1.36	0.81	0.01	0.08	0.01	0.00		
		463.00	1993/3/5	11.51	7.35	1.94	23.58	3.05	0.83	0.42	0.01	0.04	0.01	0.42		
		463.00	1993/3/20	9.25	8.03	1.75	22.51	4.71	1.22	0.87	0.01	0.07	0.00	0.17		
		463.00	1993/4/4	6.37	9.69	1.33	28.82	3.19	0.66	1.20	0.00	0.04	0.01	0.13		
		463.00	1993/4/19	8.52	7.20	1.32	23.89	5.16	1.32	0.84	0.00	0.07	0.00	0.12		
		463.00	1993/5/4	8.29	6.72	1.36	20.99	7.87	1.68	0.94	0.00	0.09	0.00	0.10		
		463.00	1993/5/19	6.40	7.39	0.81	27.03	4.68	1.17	0.63	0.01	0.06	0.00	0.09		
		463.00	1993/6/3	5.92	9.41	1.37	26.32	4.97	1.27	0.63	0.01	0.07	0.00	0.21		
		463.00	1993/6/18	8.21	7.85	1.28	26.28	3.83	0.91	0.55	0.01	0.05	0.01	0.18		
		463.00	1993/7/3	7.07	8.52	1.13	30.71	1.61	0.32	0.16	0.00	0.14	0.01	0.16		
		average				7.92	8.40	1.53	24.52	4.74	1.19	0.77	0.01	0.08	0.01	0.13
		Phase	Position	Water depth	Date	org-C	Inorg-C	Total-N	Ca	Total-Si	Al	Fe	Mn	Ti	Ba	Total-P
No.2	27-23N	481.00	1993/7/22													
	126-44E	481.00	1993/8/6													
	1654m	481.00	1993/8/21													
		481.00	1993/9/5													
		481.00	1993/9/20													
		481.00	1993/10/5													
		481.00	1993/10/20													
		481.00	1993/11/4													
		481.00	1993/11/19													
		481.00	1993/12/4													
		481.00	1993/12/19													
		481.00	1994/1/3													
		average														

Concentration (%)																
Phase	Position	Water depth	Date	org-C	Inorg-C	Total-N	Ca	Total-Si	Al	Fe	Mn	Ti	Ba	Total-P		
No.1	27-23N	1005.00	1993/1/19	2.36	3.10	0.29	9.14	21.03	6.54	3.12	0.11	0.32	0.04	0.05		
	126-44E	1005.00	1993/2/3	2.65	2.92	0.29	9.19	20.98	6.32	3.09	0.11	0.32	0.05	0.08		
	1650m	1005.00	1993/2/18	3.07	3.43	0.36	10.62	19.49	4.94	2.49	0.08	0.26	0.04	0.06		
		1005.00	1993/3/5	3.22	4.10	0.37	12.37	17.96	4.91	2.55	0.09	0.25	0.05	0.05		
		1005.00	1993/3/20	3.07	4.48	0.37	13.67	16.51	4.59	2.52	0.09	0.24	0.04	0.06		
		1005.00	1993/4/4	4.39	3.85	0.44	14.20	16.55	4.05	2.27	0.08	0.21	0.04	0.07		
		1005.00	1993/4/19	4.29	4.76	0.48	14.99	15.52	3.84	2.04	0.07	0.20	0.05	0.08		
		1005.00	1993/5/4	4.33	3.53	0.52	11.34	19.10	4.39	2.18	0.07	0.23	0.04	0.08		
		1005.00	1993/5/19	4.01	4.26	0.65	11.51	18.80	4.76	2.37	0.08	0.24	0.05	0.07		
		1005.00	1993/6/3	3.33	2.98	0.39	9.82	20.45	5.33	2.72	0.09	0.28	0.05	0.05		
		1005.00	1993/6/18	3.90	4.22	0.46	12.69	17.19	4.32	2.28	0.11	0.22	0.05	0.05		
		1005.00	1993/7/3	4.69	5.13	0.61	15.37	14.52	3.72	1.95	0.09	0.20	0.05	0.06		
		average				3.61	3.90	0.44	12.08	18.18	4.81	2.46	0.09	0.25	0.05	0.06
		Phase	Position	Water depth	Date	org-C	Inorg-C	Total-N	Ca	Total-Si	Al	Fe	Mn	Ti	Ba	Total-P
No.2	27-23N	1023.00	1993/7/22	5.80	4.03	0.73	14.65	14.16	4.03	2.04	0.10	0.20	0.03			
	126-44E	1023.00	1993/8/6	5.00	4.13	0.62	14.04	15.24	4.15	2.16	0.09	0.21	0.03			
	1654m	1023.00	1993/8/21	5.07	3.39	0.70	11.38	17.56	4.41	2.13	0.08	0.21	0.04			
		1023.00	1993/9/5	5.40	4.36	0.73	12.79	14.01	3.93	1.91	0.08	0.19	0.05			
		1023.00	1993/9/20	3.83	4.16	0.52	10.11	15.91	4.89	2.37	0.09	0.22	0.03			
		1023.00	1993/10/5	3.98	4.16	0.48	11.22	15.53	4.43	2.32	0.09	0.21	0.02			
		1023.00	1993/10/20	3.96	4.21	0.54	11.57	15.69	4.80	2.40	0.09	0.23	0.03			
		1023.00	1993/11/4	3.09	3.70	0.46	10.37	18.65	5.55	2.95	0.10	0.27	0.03			
		1023.00	1993/11/19	2.86	3.57	0.45	9.78	18.59	5.90	3.12	0.11	0.27	0.03			
		1023.00	1993/12/4	4.93	4.68	0.67	15.10	12.81	3.73	2.40	0.08	0.18	0.02			
		1023.00	1993/12/19	4.57	4.23	0.76	12.47	15.18	4.66	2.98	0.07	0.23	0.03			
		average				4.41	4.06	0.61	12.13	15.76	4.59	2.44	0.09	0.22	0.03	
		Phase	Position	Water depth	Date	org-C	Inorg-C	Total-N	Ca	Total-Si	Al	Fe	Mn	Ti	Ba	Total-P
		No.3	27-23N	1005.00	1994/10/8	4.44	3.38	0.60	11.55	17.58	4.63	2.31	0.10	0.03		
126-44E	1005.00		1994/10/25	3.52	3.37	0.42	10.74	18.51	5.19	2.56	0.10	0.32				
1627m	1005.00		1994/11/11	3.78	3.52	0.45	11.31	18.20	5.02	2.43	0.11	0.28				
	1005.00		1994/11/28	2.93	2.89	0.36	9.77	19.62	5.76	2.87	0.13	0.33				
	1005.00		1994/12/15	3.29	3.24	0.41	9.60	18.87	5.65	2.81	0.13	0.33				
	1005.00		1995/1/1	2.72	2.88	0.33	9.10	19.97	5.66	2.96	0.10	0.34				
	1005.00		1995/1/18	2.92	3.24	0.37	11.81	20.61	5.35	2.99	0.11	0.32				
	1005.00		1995/2/4	3.55	3.86	0.38	11.78	17.25	4.69	2.45	0.11	0.26				
	1005.00		1995/2/21	3.66	3.43	0.41	12.23	18.76	5.19	2.48	0.10	0.29				
	1005.00		1995/3/10	3.48	3.10	0.41	10.92	18.34	5.51	2.72	0.10	0.32				
	1005.00		1995/3/27	3.38	3.12	0.38	10.51	20.04	5.38	2.79	0.11	0.31				
	1005.00		1995/4/13	3.12	3.03	0.38	8.19	18.00	5.34	2.41	0.09	0.28				
	1005.00		1995/4/30	3.69	3.04	0.44	10.54	20.40	4.92	2.45	0.09	0.29				
	1005.00		1995/5/17	3.44	3.35	0.38	11.62	18.74	4.86	2.50	0.09	0.28				
	1005.00		1995/6/3	3.39	3.14	0.45	10.16	19.09	4.95	2.64	0.09	0.29				
	1005.00		1995/6/20	3.33	3.22	0.43	10.05	20.37	4.93	2.45	0.08	0.29				
	1005.00		1995/7/7	5.64	4.04	0.67	15.56	14.75	3.49	1.90	0.10	0.22				
1005.00	1995/7/24	5.05	4.07	0.59	14.28	15.94	3.59	1.90	0.08	0.21						
average				3.63	3.33	0.44	11.10	18.61	5.01	2.53	0.10	0.28				

Phase	Position	Water depth	Date	Concentration (%)												
				org-C	Inorg-C	Total-N	Ca	Total-Si	Al	Fe	Mn	Ti	Ba	Total-P		
No.1	27-23N	1547.00	1993/1/19	2.81	2.67	0.27	9.34	20.75	6.08	3.13	0.15	0.32	0.05	0.05		
	126-44E	1547.00	1993/2/3	2.50	3.02	0.29	10.70	22.86	6.66	3.40	0.19	0.35	0.06	0.04		
	1650m	1547.00	1993/2/18	2.58	3.37	0.32	10.50	19.94	5.57	2.87	0.15	0.29	0.05	0.03		
		1547.00	1993/3/5	2.76	3.85	0.35	11.74	18.67	5.10	2.61	0.15	0.27	0.05	0.05		
		1547.00	1993/3/20	2.98	4.51	0.34	14.02	16.78	4.78	2.51	0.17	0.26	0.05	0.04		
		1547.00	1993/4/4	3.00	3.99	0.37	12.10	17.91	5.03	2.69	0.19	0.27	0.05	0.04		
		1547.00	1993/4/19	3.47	4.39	0.42	13.67	16.32	4.47	2.35	0.17	0.24	0.06	0.07		
		1547.00	1993/5/4	3.78	3.94	0.46	12.31	17.70	4.26	2.25	0.16	0.23	0.05	0.07		
		1547.00	1993/5/19	3.43	3.76	0.41	11.85	18.08	4.59	2.42	0.14	0.24	0.05	0.06		
		1547.00	1993/6/3	3.18	3.31	0.39	10.56	19.60	5.16	2.69	0.17	0.28	0.06	0.07		
		1547.00	1993/6/18	3.11	3.84	0.40	11.92	18.37	4.85	2.60	0.21	0.26	0.05	0.07		
		1547.00	1993/7/3	3.73	4.55	0.49	14.36	15.93	4.34	2.26	0.18	0.23	0.05	0.08		
		average			3.11	3.77	0.38	11.92	18.58	5.07	2.65	0.17	0.27	0.05	0.06	
		No.2	27-23N	1563.00	1993/7/22	3.58	3.89	0.42	13.02	16.53	5.11	2.53	0.19	0.25	0.06	0.06
126-44E	1563.00		1993/8/6	3.60	3.97	0.42	14.15	16.28	4.86	2.57	0.20	0.26	0.06	0.06		
1654m	1563.00		1993/8/21	3.70	3.89	0.45	13.47	16.49	4.73	2.40	0.16	0.25	0.05	0.05		
	1563.00		1993/9/5	3.56	3.95	0.44	13.39	16.37	4.50	2.38	0.16	0.24	0.10	0.10		
	1563.00		1993/9/20	3.26	3.71	0.44	11.69	17.51	5.08	2.52	0.15	0.27	0.06	0.06		
	1563.00		1993/10/5	4.17	4.05	0.58	13.85	16.25	4.84	2.44	0.14	0.25	0.05	0.05		
	1563.00		1993/10/20	6.42	3.76	0.99	12.78	15.58	4.59	2.41	0.10	0.24	0.05	0.05		
	1563.00		1993/11/4	4.88	3.60	0.68	12.72	16.62	4.85	2.51	0.14	0.24	0.07	0.07		
	1563.00		1993/11/19	3.09	3.44	0.41	10.64	18.29	5.76	2.88	0.15	0.27	0.11	0.11		
	1563.00		1993/12/4	4.25	3.37	0.58	11.28	17.24	5.33	2.76	0.15	0.29	0.07	0.07		
	1563.00		1993/12/19													
	average				4.05	3.76	0.54	12.70	16.72	4.96	2.54	0.15	0.26	0.07	0.07	
	No.3		27-23N	1547.00	1994/10/8	3.46	4.48	0.44	12.90	18.11	4.80	2.66	0.22	0.29		
			126-44E	1547.00	1994/10/25	3.64	3.06	0.32	11.34	19.42	5.18	2.70	0.19	0.30		
1627m		1547.00	1994/11/11	3.57	3.19	0.36	11.05	20.02	5.48	2.85	0.19	0.30				
		1547.00	1994/11/28	3.10	3.05	0.28	10.34	20.18	5.76	2.95	0.22	0.30				
		1547.00	1994/12/15	2.98	2.62	0.26	8.80	20.77	5.82	3.13	0.21	0.32				
		1547.00	1995/1/1	6.73	1.86	1.23	7.60	18.03	5.42	2.78	0.04	0.30				
		1547.00	1995/1/18	4.72	2.71	0.58	9.92	18.89	5.50	2.88	0.17	0.29				
		average			4.03	3.00	0.50	10.28	19.35	5.42	2.85	0.18	0.30			

JAST02: RYUKYU TRENCH

Phase	Position	Water depth	Date	Concentration (%)											
				org-C	Inorg-C	Total-N	Ca	Total-Si	Al	Fe	Mn	Ti	Ba	Total-P	
No.3	25-05N	3157.00	1994/10/8	6.41	4.10	0.50	17.43	11.92	2.55	1.34	0.11	0.14			
	127-35E	3157.00	1994/10/25	5.84	4.25	0.40	18.47	10.55	2.15	1.13	0.09	0.11			
	3771m	3157.00	1994/11/11	6.92	4.32	0.43	22.46	10.01	2.19	1.11	0.09	0.11			
		3157.00	1994/11/28	6.61	4.11	0.52	19.48	11.72	2.55	1.38	0.12	0.15			
		3157.00	1994/12/15	6.78	4.27	0.55	19.55	11.34	2.47	1.30	0.14	0.14			
		3157.00	1995/1/1	7.16	3.81	0.50	21.46	11.33	2.43	1.29	0.09	0.13			
		3157.00	1995/1/18	8.41	2.29	0.55	20.82	11.52	2.65	1.34	0.11	0.15			
		3157.00	1995/2/4	6.87	3.74	0.53	19.98	11.38	2.60	1.38	0.09	0.16			
		3157.00	1995/2/21	6.63	4.21	0.54	20.34	11.77	2.37	1.25	0.09	0.14			
		3157.00	1995/3/10	7.10	3.99	0.58	21.49	11.19	2.42	1.22	0.08	0.12			
		3157.00	1995/3/27	6.23	4.17	0.48	19.36	13.17	3.45	1.53	0.10	0.15			
		3157.00	1995/4/13	7.00	3.42	0.54	18.27	13.28	4.29	1.73	0.12	0.19			
		3157.00	1995/4/30	5.96	3.65	0.47	17.71	13.74	3.44	2.02	0.12	0.18			
		3157.00	1995/5/17	5.67	4.16	0.42	18.92	12.43	2.53	1.67	0.10	0.18			
		3157.00	1995/6/3	6.32	3.17	0.50	17.64	15.52	3.49	2.04	0.12	0.20			
		3157.00	1995/6/20	6.28	3.81	0.52	18.35	15.17	3.02	1.72	0.12	0.16			
		3157.00	1995/7/7	6.63	3.78	0.48	20.04	14.32	2.78	1.61	0.12	0.16			
		3157.00	1995/7/24	6.42	4.29	0.56	19.31	12.92	2.72	1.59	0.11	0.17			
		average			6.62	3.86	0.50	19.50	12.40	2.78	1.48	0.11	0.15		

JAST04: KERAMA GAP

Phase	Position	Water depth	Date	Concentration (%)											
				org-C	Inorg-C	Total-N	Ca	Total-Si	Al	Fe	Mn	Ti	Ba	Total-P	
No.4	25-28N	1121.00	1995/8/27				22.55	6.20	1.35	0.79	0.00	0.11			
	127-11E	1121.00	1995/9/13				22.14	7.35	1.47	0.84	0.08	0.08			
	1723m	1121.00	1995/9/30				20.67	8.45	1.38	0.78	0.09	0.09			
		1121.00	1995/10/17				23.38	7.07	1.38	0.46	0.06	0.06			
		1121.00	1995/11/3				23.78	6.47	1.61	0.73	0.05	0.10			
		1121.00	1995/11/20				20.69	5.68	1.49	0.69	0.05	0.11			
		1121.00	1995/12/7				20.19	9.27	2.27	1.21	0.07	0.15			
		1121.00	1995/12/24				19.25	8.50	2.03	0.98	0.08	0.15			
		1121.00	1996/1/10				16.22	8.14	2.14	0.96	0.04	0.11			
		1121.00	1996/1/27				22.10	9.59	2.35	1.08	0.07	0.13			
		1121.00	1996/2/13				21.32	9.65	2.11	1.04	0.06	0.12			
		average						21.12	7.85	1.78	0.87	0.06	0.11		

付録3 沈降粒子の構成学成分

Appendix 3 Chemical composition of settling particles

JAST01: OKINAWA TROUGH			Flux (mg/m ² /day)										Proportion (%)								
Phase Position	Water depth (m)	Date	Total	org-M	B-CaCO ₃	B-SiO ₂	Al ₂ O ₃	L-SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	Others	org-M	B-CaCO ₃	B-SiO ₂	Al ₂ O ₃	L-SiO ₂	Fe ₂ O ₃ + FeO	Others			
No.1	27-23N	463	1993/1/19	3.07	0.69	2.42	0.02	0.09	0.37	0.01	0.03	0.00*	18.93	66.71	0.53	2.61	10.12	1.10	0.00		
	126-44E	463	1993/2/3	2.57	0.57	2.08	0.02	0.09	0.37	0.01	0.03	0.00*	18.00	65.62	0.61	2.97	11.54	1.26	0.00		
	1650m	463	1993/2/18	3.69	0.83	2.92	0.02	0.09	0.37	0.01	0.03	0.00*	19.43	68.38	0.45	2.21	8.59	0.93	0.00		
		463	1993/3/5	7.21	2.37	4.42	0.03	0.11	0.44	0.01	0.03	0.00*	31.99	59.58	0.43	1.53	5.93	0.54	0.00		
	463	1993/3/20	5.73	1.51	3.83	0.07	0.13	0.51	0.02	0.05	0.00*	24.72	62.59	1.07	2.16	8.38	1.08	0.00			
	463	1993/4/4	7.53	1.37	6.08	0.15	0.09	0.37	0.04	0.08	0.00*	16.76	74.34	1.81	1.15	4.48	1.46	0.00			
	463	1993/4/19	8.33	2.03	5.00	0.12	0.21	0.81	0.03	0.06	0.08	24.35	60.02	1.38	2.49	9.68	1.12	0.95			
	463	1993/5/4	9.53	2.26	5.33	0.43	0.30	1.17	0.04	0.08	0.00*	23.46	55.44	4.52	3.14	12.19	1.24	0.00			
	463	1993/5/19	11.10	2.03	6.83	0.16	0.25	0.95	0.03	0.06	0.79	18.28	61.56	1.46	2.21	8.58	0.84	7.07			
	463	1993/6/3	9.46	1.60	7.42	0.13	0.23	0.88	0.03	0.05	0.00*	15.49	71.80	1.24	2.19	8.51	0.77	0.00			
	463	1993/6/18	5.48	1.29	3.58	0.08	0.09	0.37	0.01	0.03	0.03	23.46	65.39	1.53	1.72	6.69	0.73	0.49			
	463	1993/7/3	6.22	1.26	4.42	0.07	0.04	0.15	0.00	0.01	0.28	20.21	71.01	1.09	0.61	2.36	0.21	4.52			
		average		6.66	1.48	4.53	0.11	0.14	0.56	0.02	0.04	0.10	21.26	65.20	1.34	2.08	8.09	0.94	1.09		
	No.2	27-23N	481	1993/7/22	4.00																
126-44E		481	1993/8/6	3.85																	
1654m		481	1993/8/21	3.68																	
		481	1993/9/5	9.95																	
481		1993/9/20	7.29																		
481		1993/10/5	4.62																		
481		1993/10/20	2.46																		
481		1993/11/4	6.49																		
481		1993/11/19	3.09																		
481		1993/12/4	0.80																		
481		1993/12/19	6.04																		
481		1994/1/3	20.23																		
		average		6.04																	
* Others < 0																					
JAST01: OKINAWA TROUGH			Flux (mg/m ² /day)										Proportion (%)								
Phase Position	Water depth (m)	Date	Total	org-M	B-CaCO ₃	B-SiO ₂	Al ₂ O ₃	L-SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	Others	org-M	B-CaCO ₃	B-SiO ₂	Al ₂ O ₃	L-SiO ₂	Fe ₂ O ₃ + FeO	Others			
No.1	27-23N	1005	1993/1/19	180.87	12.17	46.67	0.00	22.35	86.70	2.42	5.08	5.50	6.73	25.80	0.00	12.35	47.93	4.14	3.04		
	126-44E	1005	1993/2/3	262.63	19.91	63.83	0.00	31.36	121.65	3.48	7.31	15.08	7.58	24.31	0.00	11.94	46.32	4.11	5.74		
	1650m	1005	1993/2/18	288.38	25.29	82.42	16.00	26.92	104.43	3.07	6.45	23.81	8.77	28.58	5.55	9.33	36.21	3.30	8.26		
		1005	1993/3/5	147.57	13.57	50.42	3.68	13.69	53.13	1.61	3.38	8.08	9.20	34.16	2.49	9.28	36.00	3.39	5.48		
	1005	1993/3/20	155.63	13.66	58.08	2.67	13.51	52.40	1.68	3.53	10.10	8.78	37.32	1.72	8.68	33.67	3.35	6.49			
	1005	1993/4/4	135.96	17.06	43.58	7.91	10.39	40.31	1.32	2.77	12.62	12.55	32.06	5.82	7.64	29.65	3.01	9.29			
	1005	1993/4/19	127.27	15.60	50.50	6.48	9.24	35.84	1.11	2.33	6.17	12.26	39.68	5.10	7.26	28.16	2.70	4.85			
	1005	1993/5/4	283.07	35.03	83.17	24.68	23.50	91.17	2.64	5.55	17.34	12.37	29.38	8.72	8.30	32.21	2.90	6.12			
	1005	1993/5/19	148.25	16.97	52.67	8.06	13.32	51.67	1.50	3.16	0.91	11.45	35.53	5.43	8.98	34.85	3.15	0.61			
	1005	1993/6/3	236.89	22.54	58.83	11.24	23.86	92.56	2.76	5.81	19.29	9.52	24.84	4.74	10.07	39.07	3.62	8.14			
	1005	1993/6/18	109.14	12.17	38.42	5.68	8.90	34.52	1.07	2.24	6.15	11.15	35.20	5.21	8.15	31.63	3.03	5.63			
	1005	1993/7/3	86.61	11.60	37.00	3.36	6.08	23.60	0.72	1.52	2.73	13.39	42.72	3.88	7.02	27.25	2.59	3.15			
		average		180.19	17.96	55.47	7.48	16.92	65.66	1.95	4.09	10.65	10.31	32.46	4.05	9.08	35.25	3.27	5.57		
	No.2	27-23N	1023	1993/7/22	85.79	14.23	28.83	0.68	6.54	25.36	0.75	1.58	7.83	16.59	33.61	0.79	7.62	29.56	2.71	9.13	
126-44E		1023	1993/8/6	107.30	15.34	36.92	2.42	8.41	32.61	0.99	2.09	8.52	14.30	34.41	2.26	7.83	30.39	2.87	7.94		
1654m		1023	1993/8/21	169.58	24.57	47.92	8.98	14.13	54.82	1.55	3.25	14.37	14.49	28.26	5.29	8.33	32.33	2.83	8.48		
		1023	1993/9/5	109.16	16.83	39.67	1.32	8.10	31.44	0.90	1.88	9.02	15.42	36.34	1.21	7.42	28.80	2.54	8.26		
1023		1993/9/20	130.15	14.23	45.08	0.00	12.03	46.68	1.32	2.78	8.02	10.93	34.64	0.00	9.24	35.87	3.15	6.16			
1023		1993/10/5	88.42	10.06	30.67	0.69	7.40	28.73	0.88	1.85	8.15	11.37	34.68	0.78	8.37	32.49	3.08	9.21			
1023		1993/10/20	105.67	11.94	37.08	0.00	9.58	37.16	1.09	2.29	6.54	11.30	35.09	0.00	9.06	35.16	3.19	6.19			
1023		1993/11/4	172.69	15.23	53.25	0.00	18.11	70.28	2.19	4.59	9.04	8.82	30.84	0.00	10.49	40.70	3.92	5.23			
1023		1993/11/19	150.58	12.31	44.83	0.00	16.77	65.08	2.01	4.23	5.34	8.18	29.77	0.00	11.14	43.22	4.15	3.54			
1023		1993/12/4	96.51	13.60	37.67	0.10	6.80	26.38	0.99	2.09	8.88	14.09	39.03	0.11	7.05	27.34	3.19	9.20			
1023		1993/12/19	30.23	3.94	10.67	0.00	2.66	10.33	0.39	0.81	1.43	13.04	35.29	0.00	8.81	34.18	3.96	4.72			
		average		113.28	13.84	37.51	1.29	10.05	38.99	1.19	2.49	7.92	12.59	33.81	0.95	8.67	33.64	3.24	7.10		
No.3		27-23N	1005	1994/10/8	146.13	18.54	41.16	5.44	12.79	49.61	1.45	3.04	14.10	12.69	28.17	3.72	8.75	33.95	3.07	9.65	
		126-44E	1005	1994/10/25	236.31	23.77	66.36	3.88	23.16	89.85	2.59	5.45	21.26	10.06	28.08	1.64	9.80	38.02	3.40	8.99	
	1627m	1005	1994/11/11	241.02	26.03	70.70	5.33	22.86	88.68	2.51	5.27	19.64	10.80	29.33	2.21	9.48	36.79	3.23	8.15		
		1005	1994/11/28	226.82	18.99	54.63	0.00	24.67	95.71	2.79	5.86	24.18	8.37	24.08	0.00	10.88	42.20	3.81	10.66		
	1005	1994/12/15	125.27	11.78	33.82	0.00	13.37	51.89	1.51	3.17	9.74	9.40	27.00	0.00	10.68	41.42	3.73	7.77			
	1005	1995/1/1	191.31	14.87	45.91	2.49	20.46	79.37	2.43	5.09	20.69	7.77	24.00	1.30	10.69	41.49	3.93	10.82			
	1005	1995/1/18	292.29	24.39	78.92	14.47	29.54	114.62	3.75	7.87	18.75	8.34	27.00	4.95	10.11	39.21	3.97	6.41			
	1005	1995/2/4	153.19	15.54	49.28	4.02	13.56	52.62	1.61	3.38	13.20	10.14	32.17	2.62	8.85	34.35	3.25	8.61			
	1005	1995/2/21	166.89	17.45	47.70	3.63	16.36	63.47	1.77	3.73	12.78	10.46	28.58	2.17	9.80	38.03	3.30	7.66			
	1005	1995/3/10	208.38	20.72	53.83	0.00	21.68	84.13	2.43	5.10	20.48	9.94	25.83	0.00	10.41	40.37	3.62	9.83			
	1005	1995/3/27	256.64	24.78	66.73	9.00	26.09	101.21	3.07	6.44	19.32	9.66	26.00	3.51	10.16	39.44	3.71	7.53			

Phase Position	Water depth	Date	Flux (mg/m ² /day)									Proportion (%)						
			Total	org-M	B-CaCO ₃	B-SiO ₂	Al ₂ O ₃	L-SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	Others	org-M	B-CaCO ₃	B-SiO ₂	Al ₂ O ₃	L-SiO ₂	Fe ₂ O ₃ + FeO	Others
No.1 27-23N	1547	1993/1/19	138.57	11.11	30.83	0.00	15.92	61.78	1.86	3.91	13.15	8.02	22.25	0.00	11.49	44.58	4.16	9.49
126-44E	1547	1993/2/3	207.09	14.80	52.08	0.33	26.07	101.13	3.02	6.34	3.32	7.15	25.15	0.16	12.59	48.84	4.52	1.60
1650m	1547	1993/2/18	248.36	18.31	69.75	4.69	26.14	101.43	3.06	6.43	18.55	7.37	28.08	1.89	10.53	40.84	3.82	7.47
	1547	1993/3/5	149.54	11.80	48.00	3.91	14.41	55.92	1.68	3.52	10.30	7.89	32.10	2.62	9.64	37.39	3.47	6.89
	1547	1993/3/20	117.62	10.03	44.17	1.11	10.62	41.19	1.26	2.66	6.59	8.53	37.55	0.95	9.03	35.02	3.33	5.60
	1547	1993/4/4	164.76	14.11	54.75	2.56	15.64	60.68	1.90	3.99	11.13	8.57	33.23	1.55	9.49	36.83	3.57	6.76
	1547	1993/4/19	136.17	13.51	49.83	3.06	11.48	44.56	1.37	2.88	9.47	9.92	36.60	2.24	8.43	32.72	3.12	6.96
	1547	1993/5/4	202.08	21.83	66.42	13.55	16.26	63.10	1.95	4.09	14.89	10.80	32.87	6.71	8.05	31.22	2.98	7.37
	1547	1993/5/19	148.25	14.51	46.42	7.52	12.86	49.91	1.54	3.23	12.26	9.79	31.31	5.07	8.68	33.66	3.22	8.27
	1547	1993/6/3	104.67	9.51	28.83	4.40	10.20	39.57	1.21	2.54	8.40	9.09	27.55	4.20	9.74	37.81	3.58	8.03
	1547	1993/6/18	114.74	10.20	36.75	4.35	10.52	40.82	1.28	2.68	8.14	8.89	32.03	3.79	9.17	35.58	3.45	7.09
	1547	1993/7/3	139.39	14.86	52.83	3.26	11.43	44.34	1.35	2.84	8.49	10.66	37.90	2.34	8.20	31.81	3.00	6.09
		average	155.94	13.72	48.39	4.06	15.13	58.70	1.79	3.76	10.39	8.89	31.38	2.63	9.59	37.19	3.52	6.80
No.2 27-23N	1563	1993/7/22	105.47	10.80	34.17	0.00	10.18	39.50	1.14	2.40	7.27	10.24	32.39	0.00	9.65	37.45	3.36	6.90
126-44E	1563	1993/8/6	131.81	13.57	43.58	0.00	12.09	46.90	1.45	3.05	11.16	10.30	33.07	0.00	9.17	35.58	3.42	8.47
1654m	1563	1993/8/21	124.73	13.20	40.42	0.84	11.14	43.24	1.28	2.69	11.92	10.58	32.40	0.67	8.93	34.67	3.18	9.55
	1563	1993/9/5	144.55	14.69	47.58	3.09	12.28	47.64	1.47	3.10	14.71	10.16	32.92	2.13	8.49	32.95	3.16	10.18
	1563	1993/9/20	177.65	16.57	54.92	0.56	17.04	66.10	1.92	4.02	16.52	9.33	30.91	0.32	9.59	37.21	3.34	9.30
	1563	1993/10/5	112.90	13.46	38.08	0.00	10.31	40.01	1.18	2.48	7.37	11.92	33.73	0.00	9.13	35.44	3.25	6.52
	1563	1993/10/20	57.75	10.60	18.08	0.00	5.01	19.42	0.60	1.25	2.79	18.35	31.31	0.00	8.67	33.63	3.20	4.84
	1563	1993/11/4	29.48	4.11	8.83	0.02	2.70	10.48	0.32	0.67	2.35	13.96	29.96	0.07	9.16	35.55	3.33	7.97
	1563	1993/11/19	65.67	5.80	18.83	0.00	7.14	27.70	0.81	1.70	3.68	8.83	28.68	0.00	10.87	42.18	3.82	5.61
	1563	1993/12/4	27.56	3.34	7.75	0.00	2.78	10.77	0.33	0.68	1.91	12.13	28.12	0.00	10.07	39.09	3.66	6.92
		average	88.89	10.61	31.23	0.45	9.07	35.18	1.05	2.21	7.97	11.58	31.35	0.32	9.38	36.38	3.37	7.63
No.3 27-23N	1547	1994/10/8	131.41	12.99	49.06	4.76	11.92	46.24	1.50	3.15	1.79	9.89	37.33	3.62	9.07	35.19	3.54	1.36
126-44E	1547	1994/10/25	237.58	24.71	60.58	8.66	23.25	90.21	2.75	5.77	21.65	10.40	25.50	3.64	9.79	37.97	3.58	9.11
1627m	1547	1994/11/11	232.14	23.68	61.71	6.36	24.03	93.22	2.84	5.96	14.35	10.20	26.58	2.74	10.35	40.16	3.79	6.18
	1547	1994/11/28	221.77	19.64	56.37	2.31	24.12	93.59	2.80	5.89	17.06	8.86	25.42	1.04	10.88	42.20	3.92	7.69
	1547	1994/12/15	217.47	18.52	47.48	4.01	23.91	92.78	2.92	6.13	21.72	8.51	21.83	1.85	11.00	42.66	4.16	9.99
	1547	1995/1/1	129.34	24.87	20.05	0.00	13.24	51.37	1.54	3.24	15.02	19.23	15.50	0.00	10.24	39.72	3.70	11.62
	1547	1995/1/18	23.98	3.23	5.42	0.03	2.49	9.67	0.30	0.62	2.21	13.49	22.58	0.14	10.40	40.34	3.82	9.23
		average	170.53	18.23	42.95	3.73	17.57	68.16	2.09	4.39	13.40	11.51	24.96	1.86	10.24	39.75	3.79	7.88

JAST02: RYUKYU TRENCH

Phase Position	Water depth (m)	Date	Flux (mg/m ² /day)									Proportion (%)						
			Total	org-M	B-CaCO ₃	B-SiO ₂	Al ₂ O ₃	L-SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	Others	org-M	B-CaCO ₃	B-SiO ₂	Al ₂ O ₃	L-SiO ₂	Fe ₂ O ₃ + FeO	Others
No.3 25-05N	3157	1994/10/8	35.74	6.55	12.21	2.46	1.72	6.67	0.21	0.43	5.50	18.31	34.17	6.88	4.81	18.66	1.78	15.38
127-35E	3157	1994/10/25	45.21	7.54	16.01	3.11	1.83	7.11	0.22	0.46	8.92	16.69	35.42	6.89	4.05	15.72	1.50	19.74
3771m	3157	1994/11/11	35.18	6.96	12.66	1.90	1.45	5.64	0.17	0.35	6.04	19.77	36.00	5.40	4.13	16.04	1.47	17.18
	3157	1994/11/28	32.50	6.14	11.13	2.08	1.57	6.08	0.19	0.41	4.90	18.89	34.25	6.40	4.82	18.72	1.84	15.08
	3157	1994/12/15	29.20	5.66	10.39	1.82	1.36	5.28	0.16	0.34	4.20	19.37	35.58	6.22	4.66	18.07	1.73	14.37
	3157	1995/1/1	31.69	6.48	10.06	2.05	1.45	5.64	0.18	0.37	5.45	20.46	31.75	6.47	4.59	17.81	1.72	17.21
	3157	1995/1/18	27.52	6.61	5.25	1.44	1.38	5.35	0.16	0.33	6.99	24.03	19.08	5.24	5.01	19.44	1.79	25.41
	3157	1995/2/4	43.49	8.54	13.55	2.33	2.13	8.28	0.26	0.54	7.86	19.63	31.17	5.35	4.91	19.04	1.83	18.07
	3157	1995/2/21	57.76	10.94	20.26	4.53	2.59	10.04	0.31	0.65	8.44	18.94	35.08	7.85	4.48	17.38	1.66	14.61
	3157	1995/3/10	48.26	9.79	16.05	3.00	2.21	8.57	0.25	0.53	7.86	20.29	33.25	6.21	4.58	17.77	1.62	16.28
	3157	1995/3/27	47.77	8.50	16.60	1.39	3.12	12.09	0.31	0.66	5.10	17.80	34.75	2.90	6.52	25.31	2.03	10.68
	3157	1995/4/13	42.70	8.54	12.17	0.00	3.46	13.41	0.32	0.67	4.14	20.00	28.50	0.00	8.10	31.41	2.30	9.69
	3157	1995/4/30	59.81	10.18	18.19	2.52	3.89	15.10	0.52	1.09	8.32	17.03	30.42	4.21	6.51	25.24	2.69	13.91
	3157	1995/5/17	50.22	8.14	17.41	4.06	2.40	9.31	0.36	0.76	7.79	16.20	34.67	8.09	4.78	18.53	2.22	15.51
	3157	1995/6/3	40.13	7.25	10.60	3.09	2.64	10.26	0.35	0.74	5.20	18.06	26.42	7.70	6.59	25.57	2.71	12.95
	3157	1995/6/20	42.45	7.62	13.48	4.42	2.42	9.38	0.31	0.66	4.17	17.94	31.75	10.41	5.70	22.10	2.28	9.82
	3157	1995/7/7	50.36	9.54	15.86	5.19	2.64	10.26	0.35	0.73	5.79	18.94	31.50	10.31	5.25	20.37	2.14	11.49
	3157	1995/7/24	46.67	8.56	16.68	3.61	2.40	9.31	0.32	0.67	5.12	18.34	35.75	7.74	5.14	19.94	2.11	10.97
		average	42.59	7.97	13.81	2.72	2.26	8.77	0.27	0.58	6.21	18.93	32.19	6.35	5.26	20.40	1.97	14.91

JAST04: KERAMA GAP

Phase Position	Water depth (m)	Date	Flux (mg/m ² /day)									Proportion (%)						
			Total	org-M	B-CaCO ₃	B-SiO ₂	Al ₂ O ₃	L-SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	Others	org-M	B-CaCO ₃	B-SiO ₂	Al ₂ O ₃	L-SiO ₂	Fe ₂ O ₃ + FeO	Others
No.4 25-28N	1121	1995/8/27	8.87	2.52	4.85	0.30	0.23	0.88	0.03	0.06	0.00	28.43	54.68	3.37	2.56	9.91	1.05	0.00
127-11E	1121	1995/9/13	23.80	6.39	12.74	1.19	0.66	2.57	0.09	0.18	0.00	26.83	53.52	4.98	2.78	10.78	1.12	0.00
1723m	1121	1995/9/30	21.77	6.16	10.88	1.74	0.57	2.20	0.07	0.15	0.00	28.29	49.95	8.01	2.60	10.10	1.04	0.00
	1121	1995/10/17	32.51	8.09	18.44	1.63	0.85	3.30	0.06									

参考文献

- 1) USGOFS Working Group : Sediment trap technology and sampling. USGOFS Planning Report. (10) : 94pp. (1989)
- 2) Milliman, J. D. and R.H.Meade : World wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology*, **91**, 1-21. (1983)
- 3) Tsunogai, S. and T. Kondo : Sporadic transport and deposition of continental aerosols to the Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, **87**, 8870-8874. (1982)
- 4) Duce, R. A. : "The impact of atmospheric nitrogen, phosphorus, and iron species on marine biological productivity. "p497-529. In : *The role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling*. Edited by P. Buat-Menard, Norwell, Mass, D. Reidal Publishing Company, 549pp. (1986)
- 5) Martin, J. H. and G. R. Gordon : Northern Pacific iron distribution in relation to phytoplankton productivity. *Deep-sea Research*, **35** (2), 177-196. (1988)
- 6) Honjo, S., D. W. Spencer and J. W. Farrington : Deep advective transport of lithogenic particles in Panama Basin. *Science*, **216**, 516-518. (1982)
- 7) Ittekkot, V. : The abiotical driven biological pump in the ocean and short-term fluctuations in atmospheric CO₂ contents. *Global and Planetary Change*, **8**, 17-25. (1993)
- 8) Tsunogai, S., M. Kusakabe, H. Izumi, I. Koike and A. Hattori : Hydrographic features of the deep water of the Bering Sea - The Sea of Silica. *Deep-Sea Research*, **26**, 641-659. (1979)
- 9) Tsunogai, S. and S. Noriki : Particulate fluxes of carbonate and organic carbon in the ocean. Is the marine biological activity working as a sink of the atmospheric carbon?. *Tellus*, **43B**, 256-266. (1991)
- 10) 乗木新一郎・角皆静男 : セジメントトラップの形状比較実験—細長いセジメントトラップに捕捉される軽い粒子の存在. *日本海洋学会誌*, **42**, 119-123. (1986)
- 11) Honjo, S., D. W. Spencer and W. D. Gardner : A sediment trap intercomparison experiment in the Panama Basin, 1979. *Deep Sea Research*, **39** (2), 333-358. (1992)
- 12) Honjo, S. and K. W. Doherty : Large aperture time-series sediment traps ; design objectives, construction and application. *Deep-Sea Research*, **35** (1), 133-149. (1988)
- 13) Honjo, S. and S. J. Manganini (1993) : Annual biogenic particle fluxes to the interior of the North Atlantic Ocean:studied at the 34° N 21° W and 48° N 21° N. *Deep-Sea Research*, **40**, 587-607. (1993)
- 14) Honjo, S. : Material Fluxes and Modes of Sedimentation in the Mesopelagic and Bathypelagic zones. *Journal of Marine Research*, **38**, 53-97. (1980)
- 15) Bankston, D. C. : General Guidelines for Operating a Rapid Sequential Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer. WHOI Technical Memorandum, **4-88**, 23pp. (1988)
- 16) 山本浩文・安藤健太郎・美澄篤信 : CTDを用いた東シナ海の黒潮流量の評価—1989年10月, 1990年10月, 1991年10月のCTDデータより—。 *海洋科学技術センター試験研究報告*, **30**, 37-49. (1993)
- 17) Lee, C. and C. Cronin : The vertical flux of particulate organic nitrogen in the sea : decomposition of amino acids in the Peru upwelling area and the equatorial Atlantic. *J. Mar. Res.*, **40**, 227-251. (1982)
- 18) Alldredge, A. L. and M. W. Silver : Characteristics, dynamics and significance of marine snow. *Prog. Oceanogr.* **20**, 41-82. (1988)
- 19) Haake, B., V. Ittekkot, V. Ramaswamy, R. R. Nair and S.Honjo : Fluxes of amino acids and hexosamines to the deep Arabian Sea. *Marine Chemistry*, **40**, 291-314. (1992)
- 20) Taylor, S. R. : Abundance of chemical elements in the continental crust : a new table. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **28**, 1273-1285. (1964)
- 21) 角皆静男 : 海水中の化学成分の沈降除去に関する“列車と乗客モデル”。 *地球化学*, **21**, 75-82. (1987)
- 22) Sakai, H., T. Gamo, E-s. Kim, M. Tsutsumi, T. Tanaka, J. Ishibashi, H. Wakita, M. Yamano and T. Oomori : Venting of Carbon Dioxide-Rich Fluid and Hydrate Formation in

- Mid-Okinawa Trough Backarc Basin. *Science*, **248**, 1093-1096. (1990)
- 23) 下島公紀 : 沖縄トラフにおける微量元素の分布と挙動. *JAMSTEC深海研究*, **10**, 291-298. (1994)
- 24) Francois, R., S. Honjo, S. J. Manganini and G. E. Ravizza : Biogenic barium fluxes to the deep sea : Implications for paleoproductivity reconstruction. *Global Biogeochemical Cycles*, **9**, 289-303. (1995)
- 25) Redfield, A. C., B. H. Ketchum and F. A. Richard "The influence of organisms on the composition of sea water." p26-77. In : *The Sea* 2. Edited by M. H. Hill, John Wiley and Sons, New York, 554pp.(1965)
- 26) Bacon, M. P. : Tracers of chemical scavenging in the ocean : Boundary effects and large scale chemical fraction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A*, **320**, 187-200. (1988)
- 27) US. GOFS Working Group : Isotopic Tracers, U. S. JGOFS Planning Report, **12**, 116pp. (1990)
- 28) Narita, H., K. Harada and S. Tsunogai : Lateral transport of sediment particles in the Okinawa Trough determined by natural radionuclides. *Geochemical Journal*, **24** (4), 207-216. (1990)
- 29) 氏家宏 : 琉球弧の海底-底質と地質-. 新星図書出版, 120pp. (1986)
- 30) Gardner, W. D., M. J. Richardson, K. R. Hinga and P. E. Biscaye. : Resuspension measured with sediment traps in a high-energy environment. *Earth and Planetary Science Letters*, **66**, 262-278. (1983)
- 31) Biscaye, P. E., R. F. Anderson and B. L. Deck : Fluxes of Particles and constituents to the eastern United States continental slope and rise : SEEP-I. *Continental Shelf Research*, **8**, 855-904. (1988)
- 32) Siegel, D. A., T. C. Granata, A. F. Michaels and T. D. Dickey : Mesoscale eddy diffusion, particle sinking, and the interpretation of sediment trap data. *Journal of Geophysical Research*, **95**, 5305-5311. (1990)
- 33) Honjo, S. : "Fluxes of particles to the interior of the open oceans." p91-154. In : *Particle Flux in Ocean*, Scope volume 57, John Wiley & Sons, New York, 372pp. (1996)
- 34) Turekian, K. K., Y. Nozaki and L. K. Benninger : "²¹⁰Po and ²¹⁰Pb in the eastern South Pacific : The role of upwelling on their distributions in the water column." p157-164. In : *Isotope Marine Chemistry*. Edited by, Uchida Rokakudo, Tokyo, pp. (1977)
- 35) Nozaki, Y., N. Ikuta and M. Yashima : Unusually large ²¹⁰Po deficiencies relative to ²¹⁰Pb in the Kuroshio Current of the East China and Philippine Seas. *Jour. of Geophysical research*, **95**, 5321-5329. (1990)
- 36) Chung, Y. and H. Craig : ²²⁶Ra in the Pacific Ocean. *Earth Planetary and Science Letters*, **49**, 267-292. (1980)
- 37) Baker, E. T., H. B. Milburn and D. A. Tennant : Field assessment of sediment trap efficiency under varying flow conditions. *Journal of Marine Research*, **46**, 573-592. (1988)
- 38) Gardner, W. D. : The effect of tilt on sediment trap efficiency. *Deep Sea Research*, **32**, 349-361. (1985)
- 39) Honjo, S. : "The Northwestern Pacific Ocean, a crucial ocean region to understand global change : rationale for new international collaborative investigations." p233-248. In : *Biogeochemical Processes in the North Pacific*. Edited by S. Tsunogai, Japan Marine Science Foundation, Tokyo, 418pp. (1997)
- 40) 長崎海洋气象台 : 海洋速報-西日本地区海洋気象観測報告. **148**, 38pp. (1993)
- 41) 長崎海洋气象台 : 海洋速報-西日本地区海洋気象観測報告. **149**, 39pp. (1993)
- 42) 長崎海洋气象台 : 海洋速報-西日本地区海洋気象観測報告. **150**, 39pp. (1993)
- 43) MASFLEX : K92-09 MASFLEX Cruise Report, 1993
- 44) MASFLEX : K93-05 MASFLEX Cruise Report, 1993
- 45) MASFLEX : K94-04 MASFLEX Cruise Report, 1994

- 46) Saito, C., S. Noriki and S. Tsunogai : Particulate flux of Al, a component of land origin, in the western North Pacific. *Deep-Sea Research*, **39** (7/8), 1315-1327. (1992)
- 47) 本庄丕 : 海溝の海洋環境研究—その目的と展望. *月刊海洋*, **21** (4) : 181-186. (1989)
- 48) 野崎義行 : 海溝の海洋環境研究について—JT-01を中心にして—. *月刊海洋*, **21** (4), 187-191. (1989)
- 49) Honda, M. C., M. Kusakabe, S. Nakabayashi, S. J. Manganini and S. Honjo : "The efficiency of biological pump in the western North Pacific." p224-232. In : *Biogeochemical Processes in the North Pacific*. Edited by S. Tsunogai, Japan Marine Science Foundation, Tokyo, 418pp. (1997)
- 50) 鈴木利孝・角皆静男 : 大気圏を経由する陸から海洋への化学物質の輸送. *月刊海洋*, **19** (12), 657-662. (1987)
- 51) Yanagi, T., S. Takahashi, A. Hoshika and T. Tanimoto : Seasonal variation in the transport of suspended matter in the East China Sea. *Journal of Oceanography*, **52**, 539-552. (1996)
- 52) 角皆静男, 乗木新一郎著 : 海洋化学—化学で海を解く. 西村雅吉編, 産業図書, 286pp. (1983)
- 53) 乗木新一郎 : 沈降粒子束の変動と粒子の有機炭素無機炭素比. *月刊海洋*, 号外11, 82-88. (1996)
- 54) Honjo, S. and S. J. Manganini : Biogenic particle export to the interior of the North Atlantic Ocean at the 34oN and 48oN stations, 1989/1990 : method and analytical data compilation. WHOI Technical Report, WHOI-92-15, 74pp. (1992)
- 55) Honjo, S., J. Dymond, R. Collier and S. J. Manganini : Export production of particles to the interior of the equatorial Pacific Ocean during the 1992 EqPac experiment. *Deep-Sea Research*, **42**, 831-870. (1995)
- 56) Haake, B., V. Ittekkot, T. Rixen, V. ramaswamy, R. R. Nair and W. P. Curry : Seasonality and interannual variability of particle fluxes to the deep Arabian Sea. *Deep-Sea Research*, **40**, 1323-1344. (1993)
- 57) Wefer, G. G. Fischer, D. Fuetterer and R. Gersonde : Seasonal particle flux in the Bransfield Strait, Antarctica. *Deep-Sea Research*, **35**, 891-898. (1988)
- 58) 角皆静男 : 深海及び深海底における物質移動束に関する研究. 文部省科学研究費補助金一般研究(A) 研究成果報告書. (1990)
- 59) Tsunogai, S. and S. Noriki : Organic matter fluxes and the sites of oxygen consumption in deep water. *Deep-Sea Research*, **34**, 755-767. (1987)
- 60) Masuzawa, T., S. Noriki, T. Kurosaki, S. Tsunogai and M. Koyama : Compositional change of settling particles with water depth in the Japan Sea. *Marine Chemistry*, **27**, 61-78. (1989)
- 61) Noriki, S. and S. Tsunogai : particulate fluxes and major components of settling particles from sediment trap experiments in the Pacific Ocean. *Deep-Sea Research*, **33** (7), 903-912. (1986)

(原稿受理 : 1997年 5月15日)