

B-1. 地球温暖化に係わる二酸化炭素・炭素循環に関する研究

(1) 海洋沈降粒子による炭素の沈降フラックスと環境因子に関する研究

研究代表者

名古屋大学大気水圏科学研究所

大田啓一

環境庁国立環境研究所

(委託先)

名古屋大学大気水圏科学研究所

大田啓一

東京大学海洋研究所

野崎義行

平成5-7年度合計予算額 24,554千円

(平成7年度予算額 8,312千円)

[要旨] 海洋の中・深層水は、人間活動によって発生する二酸化炭素の受け皿として大変重要であり、海洋表層から中・深層水への二酸化炭素の輸送過程とそのフラックスの評価が注目されている。本研究では、西部北太平洋域に広がる沿岸域から外洋の中・深層水への有機物および炭酸塩物質の輸送系を明らかにすることを目的としている。このため、相模湾・東京湾から海溝域につながる相模舟状海盆に焦点をあて、海底表層堆積物および海溝域(JT-08)および東京湾口(TR-2)で実施したセヂメントトラップ実験によって採取した沈降粒子の有機炭素、生物源および陸域源ケイ素ならびに炭酸カルシウムを測定し、沿岸一大陸棚域から外洋中・深層水への有機物の輸送系の解析を試みた。そして、以下に結果をえた。

1) JT-08の921m, 3423m および4529m深における質量フラックスは、深度とともに指数関数的に減少した。しかし、沈降粒子の化学組成は、この粒子が海洋表層の植物プランクトンに由来することを示した。

2) JT-08の8431m深においては、全質量フラックスが急激に増加することを認めた。したがって、海溝斜面に沿った粒子の負荷過程の存在が示唆された。

3) 921m, 3423m, 4529m および8431m深における沈降粒子の有機炭素、生物源および陸源ケイ素および炭酸カルシウム組成の鉛直分布を明らかにし、8431m深に負荷される沈降粒子の有機炭素/有機窒素(C/N)、有機炭素/生物源ケイ素(Org-C/Bio-Si)が、相模舟状海盆の表層堆積物および東京湾口での沈降粒子試料のそれに比べいずれも低い値であることを認めた。8431m深からの沈降粒子の有機炭素/陸源ケイ素(Org-C/Litho-Si)は、921m, 3423mおよび4529m深のそれに比べて低く、むしろ表層堆積物のそれに近い値であった。

4) これらの結果は、8431m深に負荷する粒子は、2元性を有し、陸源ケイ素を主成分とする陸起源粒子と、有機物の負荷に関わる沈降粒子とに分けられる。特に、後者は沿岸域の堆積物表面に沈積した植物プランクトン有機物が、堆積後比較的短時間のうちに海溝斜面と通して海溝域に負荷されるものと判断される。

[キーワード] 海洋、有機物、炭素フラックス、生物源ケイ素、陸源ケイ素、セヂメントトラップ

1. 序

近年、大気中の二酸化炭素の増加に対して人間活動が大きく影響していることが指摘されている。このような二酸化炭素の行方をめぐって、海洋の関わりに大きな関心が持たれている。化石燃料の燃焼、セメント製造および土壌有機物の分解などによって発生する二酸化炭素のうち、60%は大気に残留し、残りの40%の行方が注目されている。海洋、亜寒帯-寒帯域森林ならびに二酸化炭素および窒素酸化物の施肥効果による陸上植生の光合成活性の強化が行方不明の二酸化炭素の受け皿として働き、それぞれは 2.0 ± 0.8 、 0.5 ± 0.5 および $1.4 \pm 1.5 \text{GtC年}^{-1}$ の量で人間活動起源の二酸化炭素を吸収しているとされている (IPCC Group 1, 1995)。しかし、人間活動によって発生する二酸化炭素の受け皿としての陸上植生の役割については多くの議論があり (Ciais, et al., 1995; Keeling et al., 1995)、この量的評価は一般に受け入れられたものとは云いがたい。

地球表層で発生する二酸化炭素の受け皿として海洋の関わりを考える場合、これまで評価の対象にしてこなかった中層水の形成 (Chen, 1995; Tsunogai et al., 1995) とともに、沿岸域から外洋深層水への有機物の水平輸送過程の重要性が指摘されてきている (Monaco, 1990; Biscay and Anderson, 1994)。Biscay and Anderson (1994) によれば、北大西洋のニューヨークバイトにおいて沿岸域で生産された有機物の約10%が、沿岸-外洋間の海水交換および気象擾乱などによる海底表層堆積物粒子の舞上がりや乱泥流の発生などにより沿岸域から外洋深層水に輸送されることが指摘されている。Likens (1975) によれば、河口域-沿岸域における地球規模での基礎生産量は 5.5GtC年^{-1} と見積もられている。この値は全海洋における基礎生産量の約30%を占めている。沿岸域が、特に人間活動による富栄

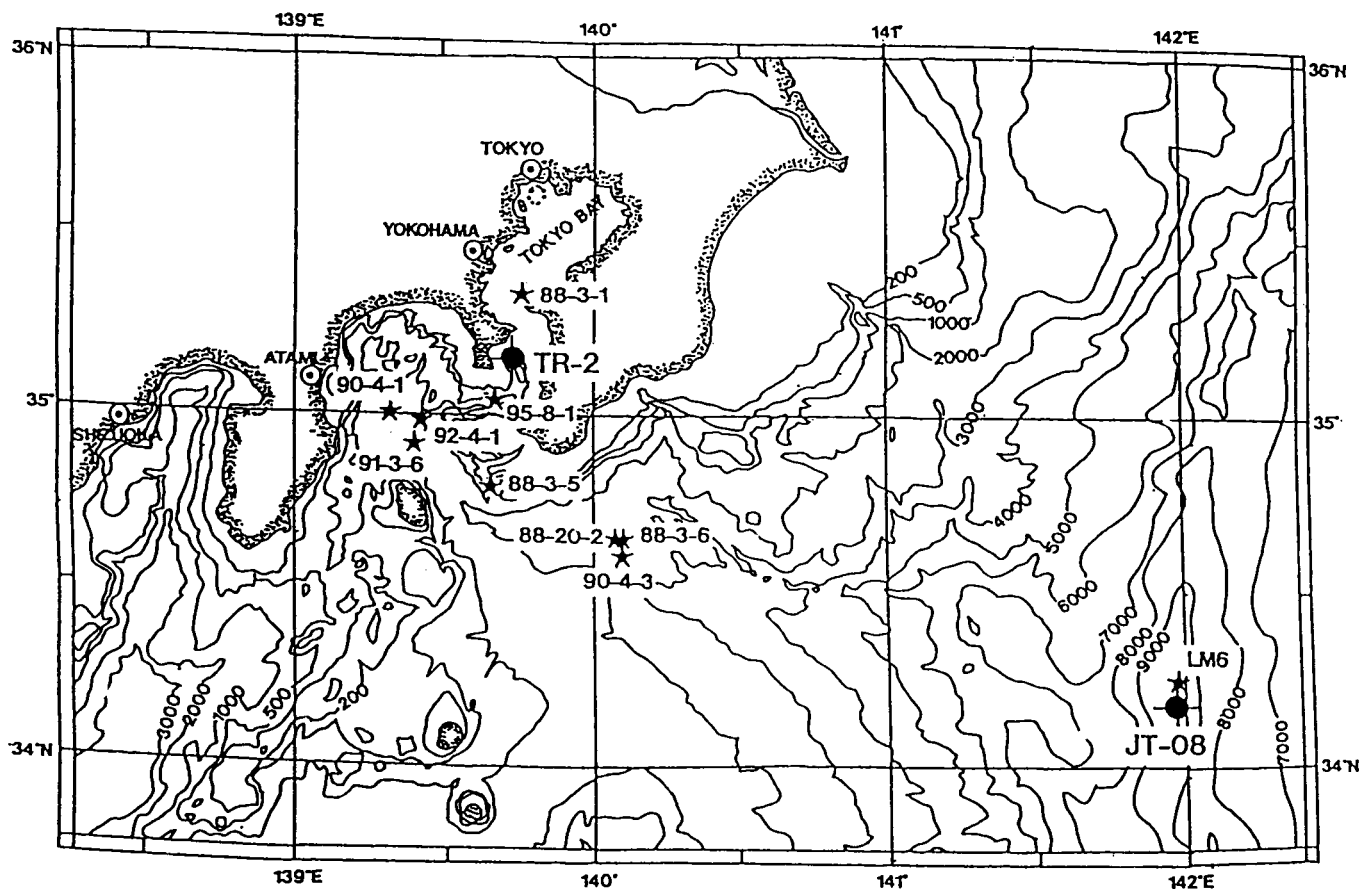


図1 沈降粒子および海底堆積物表層試料採集海域

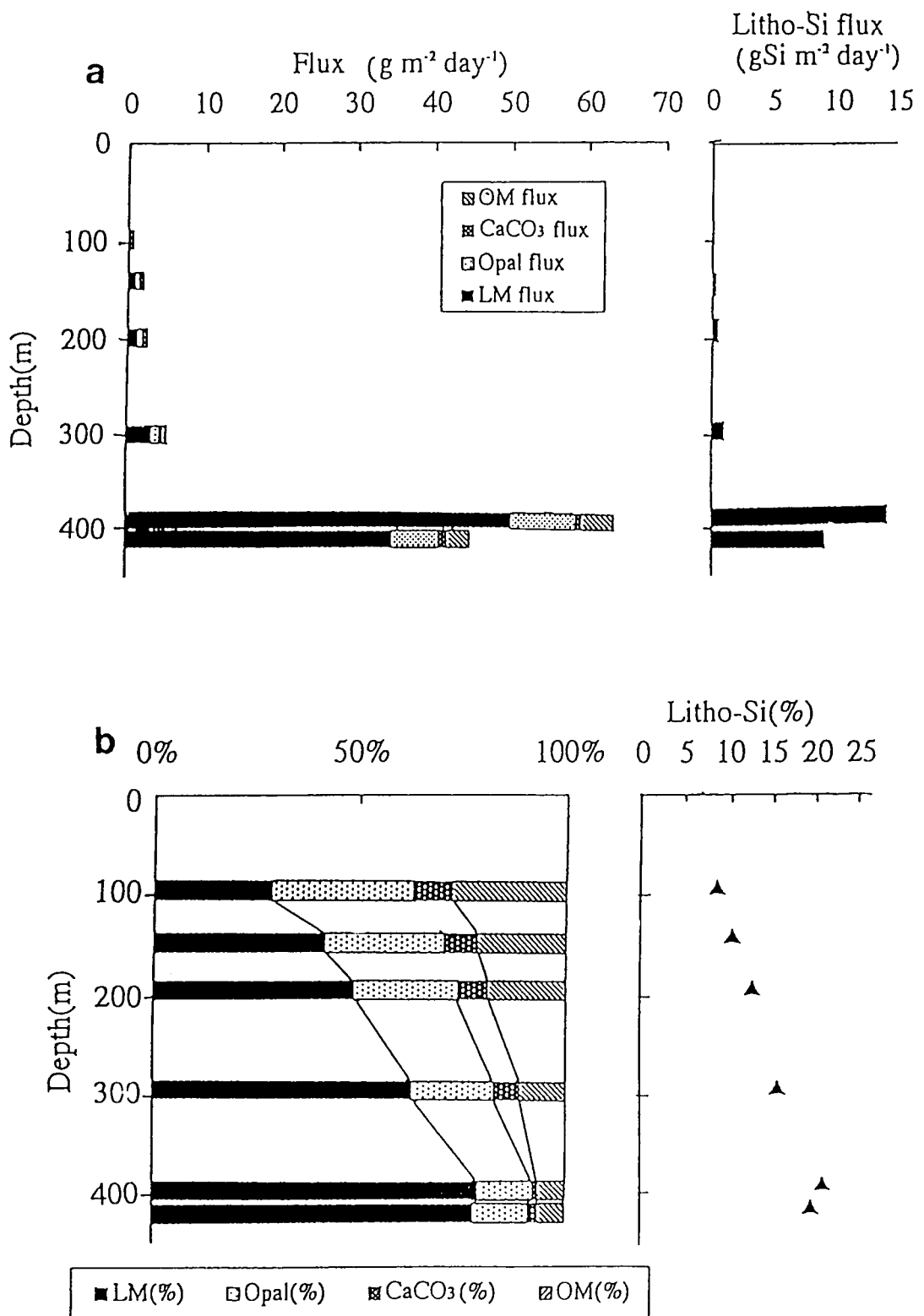


図2 東京湾口の沈降粒子試料における各化学成分の鉛直フラックスと化学組成

養化の影響を強く受けることを考え合わせると、この海域は、基礎生産過程による人間活動起源の二酸化炭素の固定と、固定化された二酸化炭素（有機物）の一部が外洋深層水へ輸送されることを通して、海洋深層水の人間活動起源二酸化炭素の貯留に大きく関わっているものと思われる。したがって、人間活動起源の二酸化炭素の沿岸域から外洋への輸送量の評価は緊急に明らかにしなければならない研究課題である。これらの経緯にたつて、本研究は、まず沿岸域から外洋深層水に向かっての有機物の輸送量の評価とこれに関わる環境制御因子の解明を試みた。このため、関東・東海地方沖の東京湾口および日本海溝最南端三重点付近に時系列型セヂメントトラップを設置し、沈降粒子を捕集するとともに、東京湾および相模舟状海盆海底表層堆積物を採取した。これらの試料の化学組成から、この海域における沿岸域から外洋深層水への有機炭素の輸送過程を検討した。

2. 東京湾口からの全質量、有機物、生物源ケイ素（オパールケイ素）、陸源ケイ素および炭酸カルシウムフラックスの特徴

相模舟状海盆は、全長300kmにおよぶ海盆で相模湾から日本海溝最南端の三重点付近に達している。水深差は9kmにおよび、緩やかな斜面を形成するが、海溝域を越えると水深6kmの北西部北太平洋海盆へと続いている。しかし、この舟状海盆の北東側は房総半島に続く大陸棚および比較的急峻な大陸棚斜面を形成し、海溝域へと続いている（図1）。

内湾から舟状海盆への物質輸送系の特徴を把握するため、一例をして東京湾口付近の水深430mの海域の5層にセヂメントトラックを設置し、沈降粒子捕集した。この沈降粒子試料から全質量フラックスとともに、有機物、生物源ケイ素、陸源ケイ素および炭酸カルシウムフラックスを算定した（図2）。有機物、生物源ケイ素、陸源ケイ素および炭酸カルシウムフラックスの総量は、ほぼ全質量フラックスに見合うものであった。

各化学成分の沈降フラックスは、深さとともに徐々に増加するが、海底付近において顕著であることを認めた（図2a）。この結果から、東京湾口から相模舟状海盆域に流出する粒子は決して全層一様に輸送されるものではないことを見出した。沈降粒子の化学組成は深さとともに大きく変化する（図2b）。陸源ケイ素フラックスの割合が深さとともに増加するのに対して、生物源ケイ素、有機物および炭酸カルシウムフラックスの割合はそれぞれ深さとともに減少する。これは、陸源ケイ素が海水への溶解に対して安定であることとともに、有機物、炭酸カルシウムおよび生物源ケイ素が微生物分解や海水への溶解に対して不安定であることで説明される。この結果から、下層ほど沈降粒子ほど陸起源物質の影響が高く、より年令の経過した粒子の寄与が大きいものと判断される。

有機炭素/生物源ケイ素値を指標として、ここで得られた沈降粒子（TR-2）と東京湾の懸濁粒子（Suspended particles）、東京湾の堆積物表層試料（Sediment, 88-3-1）およびセヂメントトラップサイトよりやや沖合の堆積物表層試料（Sediment, 95-8-1）とを比較してみよう（図3）。この結果は、400m深の沈降粒子は明らかに東京湾の懸濁粒子および堆積物表層試料とは異なり、むしろ東京湾口よりやや沖合の堆積物表層試料に近いものであった。

3. 海溝域における沈降粒子の化学組成

海溝域の921, 3423, 5429 および8431m深に時系列型セヂメントトラップを設置し、26日

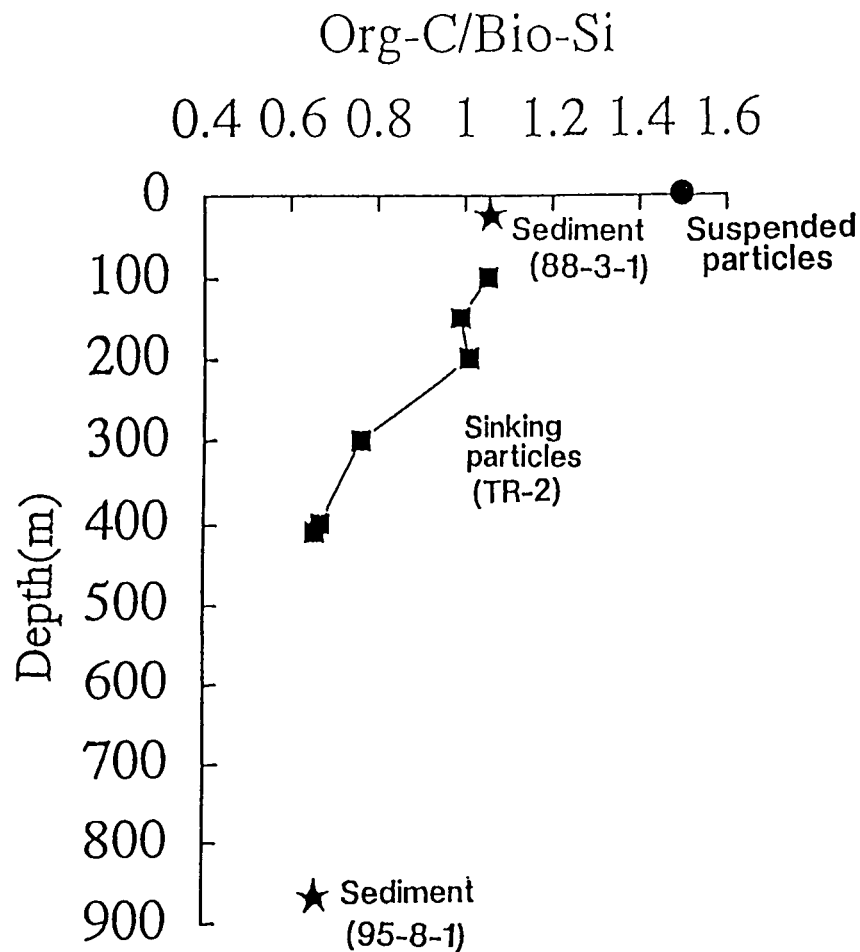


図3 東京湾の懸濁粒子、堆積物表層試料および東京湾口の沈降粒子における有機炭素／生物源ケイ素

毎に捕集ビンを変えて、沈降粒子を採集した。全質量および有機物フラックスを図4に示す。全質量フラックスは、921,3423および5429m深において微かな季節変動は認められたが、深さによる変化は殆ど認められず、全体的にほぼ同じ値が測定された。しかし、8431m深においては、上層よりより大きな全質量フラックスを与え、沈降粒子が鉛直下方輸送に加えて水平輸送によっても負荷されていることを示した。同様なことは、有機物に関してもいえる。ここでは、有機物フラックスの季節変動が、ほぼ捕集ビン一個の時間差（26日間）で深さ方向に遅れる傾向があること、および有機物フラックスの絶対量が深さ方向に減少することが見出された。

全質量、有機物、生物源ケイ素および陸源ケイ素フラックスの鉛直変化を図5に示す。5429m深までの層におけるこれらの物質の鉛直フラックスは、ほぼ全質量フラックスに見合うものであった（95%以上）。また、陸源ケイ素フラックスの深さによる変動はほとんど認められず、これに対して有機物、生物源ケイ素および炭酸カルシウムフラックスは明らかに深さとともに減少することを認めた。

一般に、有機物の分解や生物源ケイ素、炭酸カルシウムの溶解は、現存量に比例して進

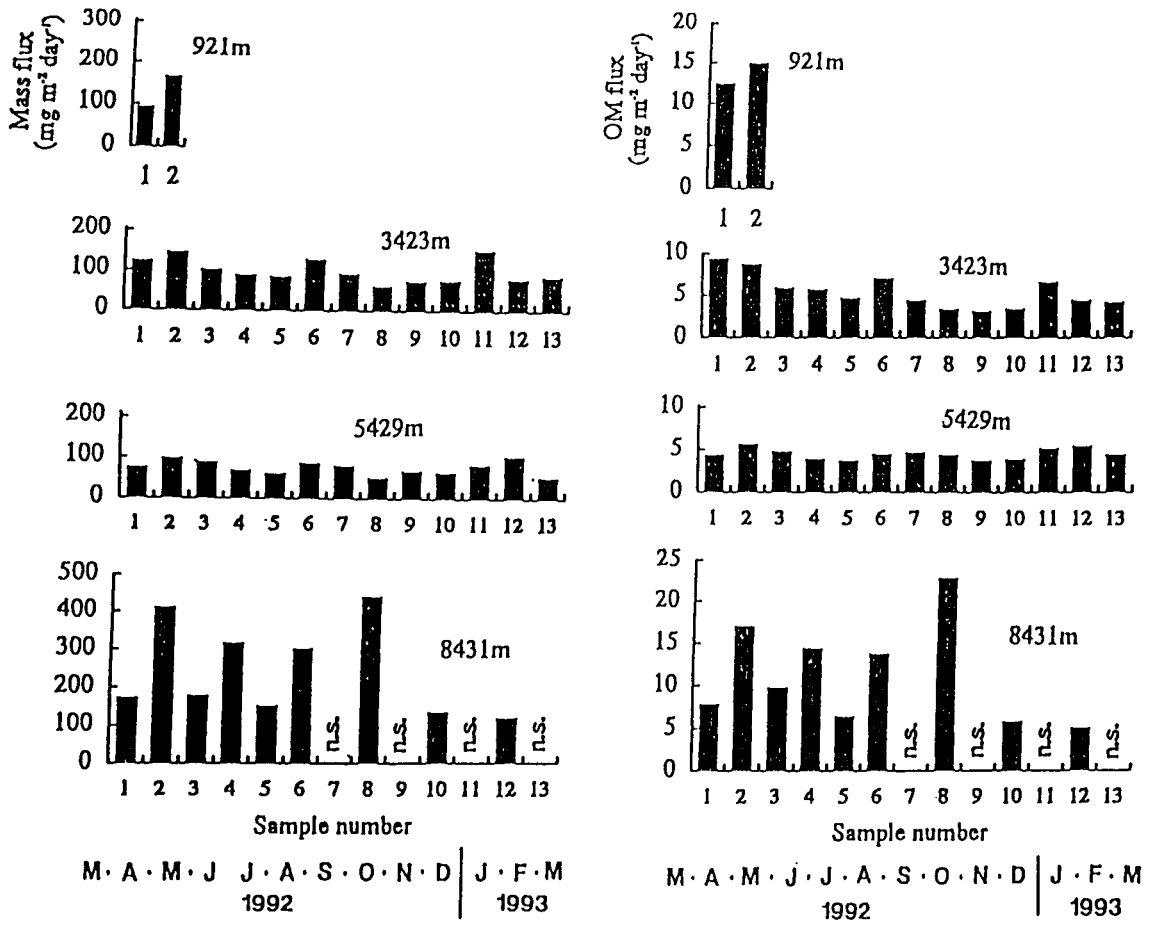


図4 海溝域における全質量および有機物フラックス

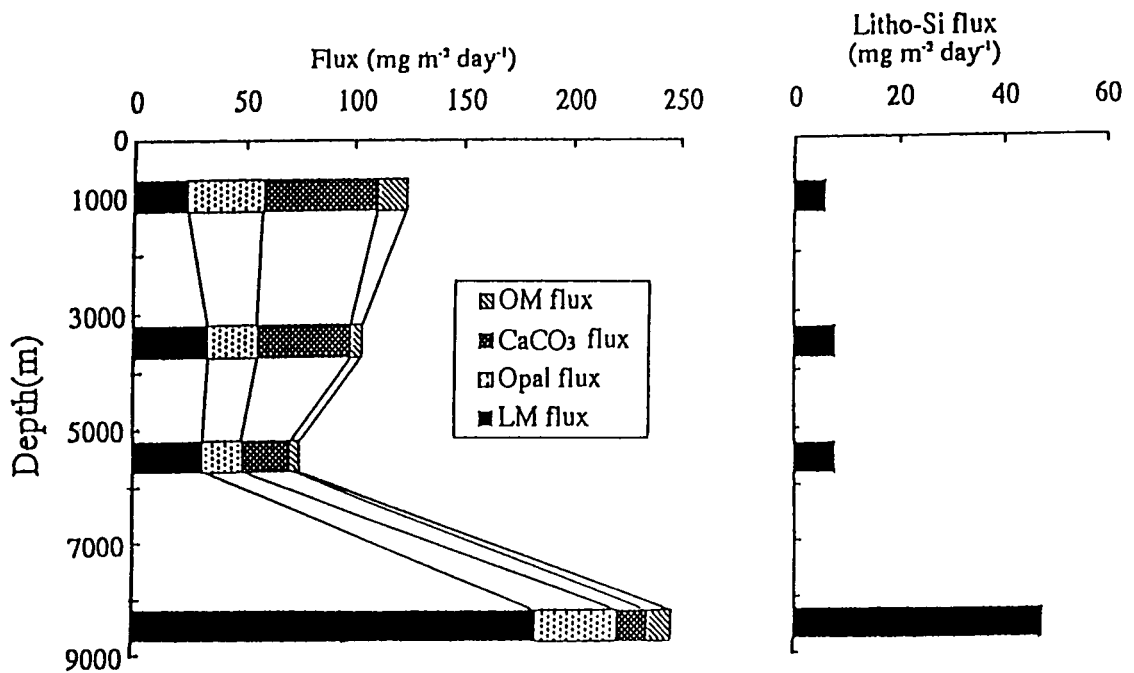


図5 海溝域における化学成分フラックスの鉛直分布

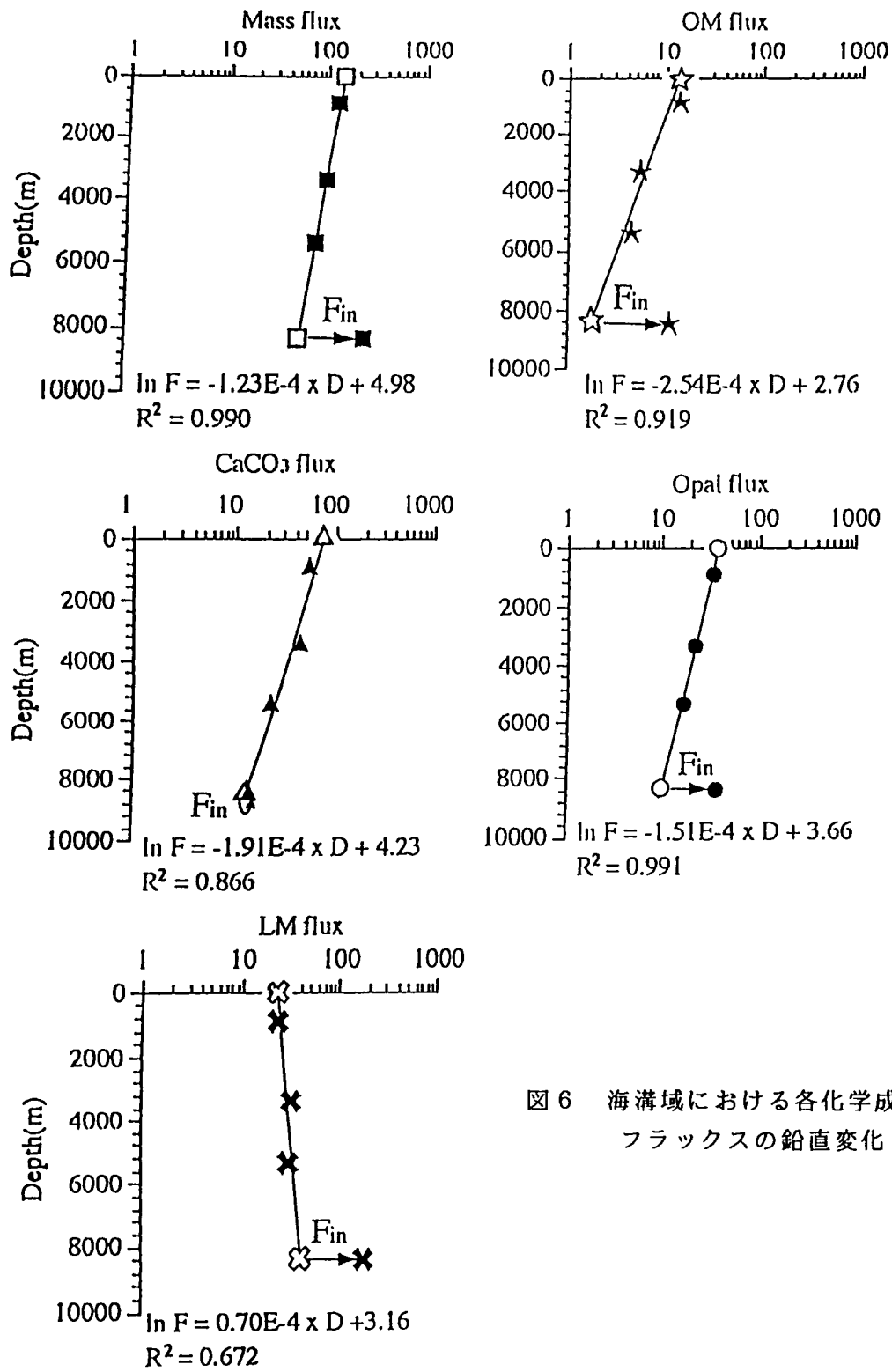


図6 海溝域における各化学成分
フラックスの鉛直変化

行することが知られている。したがって、921, 3423 および5429m深における各化学成分の鉛直フラックスの自然対数を沈降粒子の採集深度に対してプロットした(図6)。その結果、それぞれの化学成分フラックスは一定の減衰係数を与えた。したがって、これを8431m深に拡張して得た値を、この深さにおける表層水から鉛直輸送される各化学成分のフラックスとした。この値とこの深さで実測した各化学成分の鉛直フラックスの値との差を大陸棚—海溝斜面を通して輸送された沈降粒子のフラックス(水平フラックス)とした。

各深さにおける各化学成分の鉛直フラックスと各層間において減衰する各化学成分の鉛直フラックスを図7に示す。5429m深と8431m深との間の数値は、図6に示す式で与えられる8431m深における各化学成分の鉛直フラックスである。したがって、この値と実測値との差が、各化学成分の水平フラックス(F_{in})となる。全質量フラックスでは、鉛直フラックスのおよ4倍に相当する物質が水平フラックスとして大陸棚—海溝斜面域から負荷されるものと計算される。同様なことは有機物および陸源ケイ素についても認められ、水平フラックスの寄与大きいことが示されている。しかし、炭酸カルシウムに関する水平フラックスは極めて小さい。このことは、水平フラックスとして与えられる沈降粒子は炭酸カルシウムをすでに失った粒子と理解される。このことは、大陸棚—海溝斜面を通してある程度時間経過を経たプランクトン粒子が輸送されていると判断される。

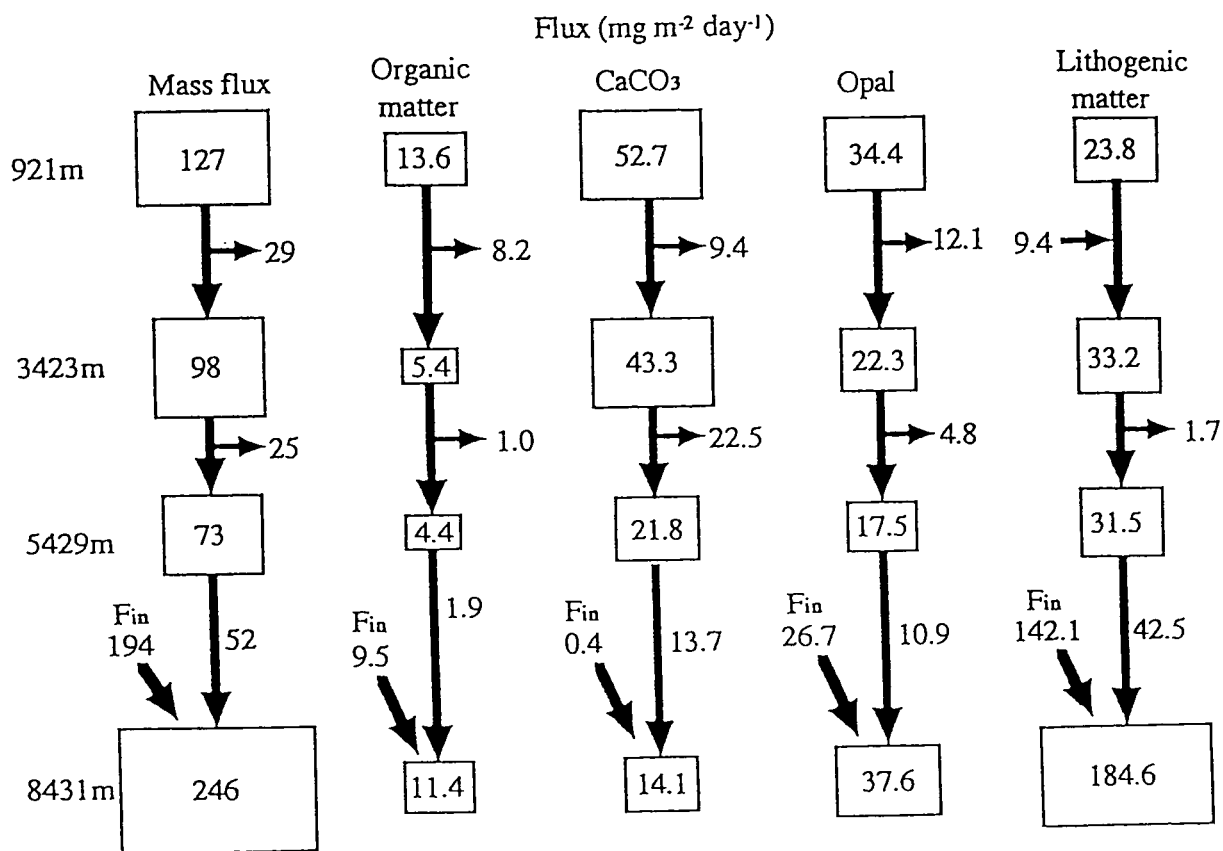


図7 全質量および各化学成分の鉛直フラックスの変化と各深さ間における流入および流出フラックス

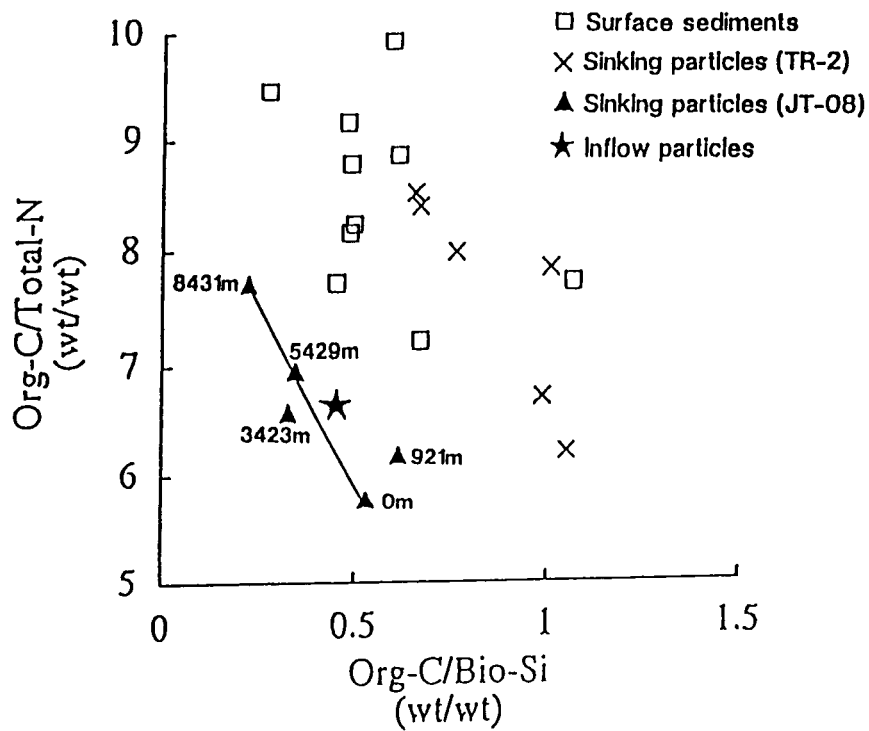
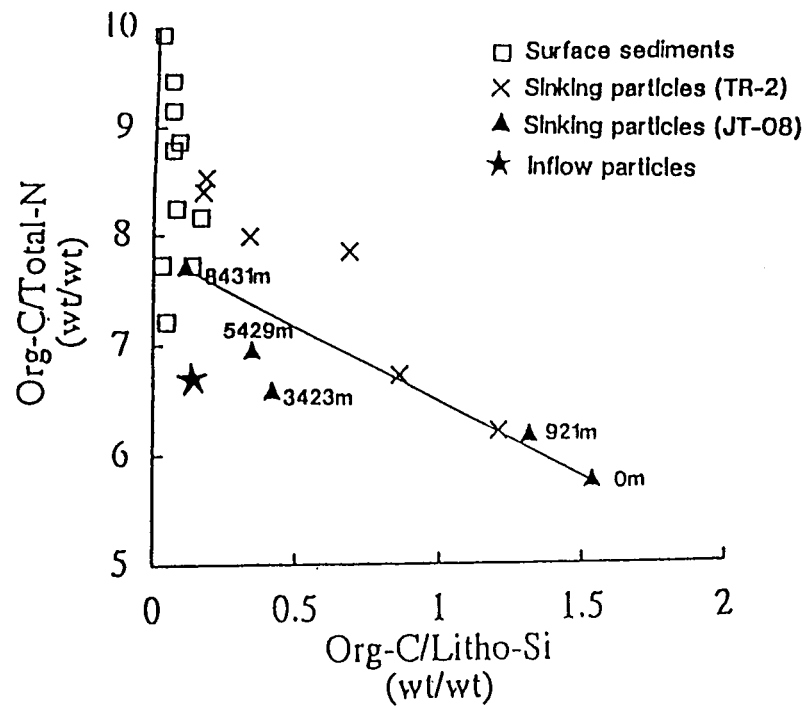


図8 懸濁粒子、海底堆積物表層試料および沈降粒子の有機炭素/全窒素と有機炭素/陸源ケイ素、および有機炭素/全窒素と有機炭素/生物源ケイ素との関係

4. 水平輸送される沈降粒子

相模舟状海盆において、水平輸送される沈降粒子の起源は、東京湾口から流出する粒子（沈降粒子）および相模舟状海盆の表層堆積物が挙げられる。これら海域から採取された沈降粒子および堆積物表層試料について有機炭素／全窒素（Org-C）／Total-N）に対する有機炭素／陸源ケイ素（Org-C/Litho-Si）をプロットした（図8）。その結果、相模舟状海盆からの堆積物表層試料および東京湾口における400m深の沈降粒子試料（TR-2）の有機炭素／陸源ケイ素は海溝域での水平フラックスの関わる沈降粒子とほぼ同じ値を示した。特に、この沈降粒子の陸源ケイ素含有量は73.2%であった。これに対して、東京湾口の400m深の沈降粒子試料の陸源ケイ素含有量も74.2%であった。したがって、陸源ケイ素に関する限り、海底付近を東京湾口から相模舟状海盆域—外洋に流出する粒子が、定性的には海溝域の陸起源ケイ素の水平フラックスに関わるものとも判断される。しかし、この陸源ケイ素の全てが東京湾口からのみ供給されるとは考えにくい。理由は、東京湾口から外洋に移行する陸起源粒子が相模舟状海盆全体に分散し、堆積すると仮定した場合、単位面積当たりの沈降粒子フラックスは極めてわずかである。したがって、陸源ケイ素を持つ粒子は東京湾口ばかりでなく、海溝域を囲む大陸棚—海溝斜面の全てから供給されるものと判断される。

ついで、有機炭素／全窒素に対して有機炭素／生物源—ケイ素をプロットした（図8）。これらのパラメーターは、すべて生物源粒子の特性を示す指標である。したがって、これらの指標は海溝域における化学物質の水平フラックスに関わる沈降粒子のうち、生物源粒子寄与についての情報を与える。図8から、8431m深における有機炭素、全窒素および生物源ケイ素フラックスの増加は、まさに、5429m深以浅の沈降粒子と同様海洋表層の植物プランクトン起源の物質であると判断される。しかし、8431m深における表層植物プランクトン起源物質フラックスは、5429m深以浅におけるこのフラックスの値よりも明らかに大きい。したがって、図8の結果は大陸棚—海溝斜面に沈積した比較的新鮮な植物プランクトン粒子が海溝底に輸送されていることを示唆しているものと判断される。

5. まとめ

本研究は、沿岸域から外洋域にかけての粒子の輸送系を把握することを目的とし、東京湾口（TR-2）および日本海溝最南端の三重点付近（JT-08）に観測点をおき、時系列型セサメントラップを設置して沈降粒子を採集した。また、相模舟状海盆域から海底堆積物表層試料を採取した。これらの試料について、有機炭素、全窒素、生物源ケイ素、陸源ケイ素および炭酸カルシウムを測定した。得られた結果を考察し、以下のことを明らかにした。

- 1) JT-08の921, 3423, 5429m深で採集された沈降粒子は、全質量フラックスと生物起源物質フラックスとの相関が高く、主成分の化学組成がほぼ同じであった。したがって、これらの深さにおける沈降粒子の起源は海洋表層の植物プランクトン粒子であると判断した。また、それぞれの化学物質の鉛直フラックスは深さとともに、指数関数的に減少していた。
- 2) JT-08の8431m深においては、それ以浅の層に比して全質量フラックスおよび陸源ケイ素フラックスが急激に増加していた。このことは、大陸棚—海溝斜面と通してこれらの物質

の水平輸送系の存在を示唆した。

3) 5429m深以浅の深さからの沈降粒子を構成する各化学成分フラックスの対数をトラップ深度に対してプロットし、回帰式を得た。これを、8431m深に拡張することによりこの深さにおける各化学成分の鉛直フラックスを見積もった。実測したフラックスとこの値との差を大陸棚—海溝斜面を通しての沈降粒子フラックス（水平フラックス）とした。

4) 東京湾口において採取した沈降粒子および相模舟状海盆の海底堆積物表層試料の化学組成とJT-08における沈降粒子の化学組成とを比較検討し、つぎのことを明らかにした。すなわち、海溝域の底層付近（8431m深）に輸送される粒子は、陸源ケイ素を豊富に持つ陸源粒子と有機物および生物源ケイ素を持つ粒子との2元性を持つ。また、これらの粒子は、何れも大陸棚—海溝斜面の海底表層にそって海溝底に輸送されるものと推定された。

5) 大陸棚—海溝斜面を通しての粒子の輸送系の詳細な機構については今後の問題として残された。今後は、海洋斜面域での係留実験も同時に実施し、海溝斜面域での沈降粒子フラックスの計測とともに、年間を通して底層流および濁度の変動を計測をし、海水流動とともに、粒子の移動についての情報を把握する必要があることを認めた。

6. 文献

- Biscaye, P.E. and R.F. Anderson (1994) Fluxes of particles and constituents to the eastern United States continental slope and rise: Seep-1. *Deep-Sea Res.* II, 41, 459-509
- Chen, C-T (1995) Variation in oxygen, nutrient and carbonate fluxes of the Kuroshio Current. *Proc. of the 1994 Sapporo IGBP Symposium*, 374-383.
- Ciais, P., P. Tans, J.W. White, M. Trolir, R. Francey, J. Berry, D. Randall, P. Sellers, J. G. Collatz and D. Schiml (1995) Partitioning of ocean and land uptake of CO₂ as inferred by $\delta^{13}\text{C}$ measurements from the NOAA/CMDL global air sampling network. *J. Geophys. Res.* (in press)
- IPCC-Working Group I (1995) Radiative forcing of climate change. In *Climate Change 1994* Ed. by Houghton, J.P. et al., Cambridge University Press, 2-34p
- Keeling, C.D., T.P. Whorf, M. Wahlen and J. van der Plicht (1995) Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375, 666-670
- Likens, G.E. (1975) Primary production of inland aquatic ecosystem. In *Primary Productivity of the Biosphere*, ed. by Lieth, H. and R. H. Whittaker, Springer-Verlag
- Monaco, A., T. Courp, S. Heussner, J. Carbonne, S.W. Fowler and B. Deniaux (1990) Seasonality and composition of particulate fluxes during ECOMARGE-1, Western Gulf of Lions. *Continental Shelf Res.*, 10, 959-987
- Tsunogai, S. (1995) North Pacific and Antarctic Intermediate waters as a sink of the anthropogenic carbon dioxide. *Proc. of the 1994 Sapporo IGBP Symposium*, 412-417