

「海洋域での粒子状物質の流量」に関する SCOPE/UNEP 国際ワークショップ

川 幡 穂 高¹⁾

1. はじめに

SCOPE/UNEP の共催で「海洋域での粒子状物質の流量」に関する国際ワークショップが1993年9月20日から23日までドイツのハンブルク市で開催された。SCOPE/UNEP は Scientific Committee on Problems of the Environment と United Nations Environment Programme の略で、日本語に訳すと環境問題の科学委員会と国連環境プログラムとなる。SCOPE は「生物地球化学サイクル」や「地球的規模の気候変動」を含めた幾つかのテーマ群に分けて

環境に関する研究の促進をはかっている。「海洋域での粒子状物質の流量(Particle flux in the Ocean)」というタイトルのセッションは生物地球化学サイクルのテーマ群に属し、河川から海洋への溶存物質・粒子状物質の寄与や粒子による海洋における炭素循環を主な研究項目としている。前回のワークショップは、1991年にインドのカルカッタ市で開催された。今回のワークショップでは、この2年間に前進した研究成果の発表やそれに伴う活発な議論を通じて、この分野が将来進むべき方向が勧告された。今回は科学者約70名が出席し、開催国であるドイツの他、日本、アメリカ、オーストリア、ブラジル、アルゼンチン、チリ、インド、中国等の多くの国が参加した。以下に海洋の粒子状物質の研究に関連したトピックスや研究動向について簡単に紹介しよう。

2. 粒子状物質の研究

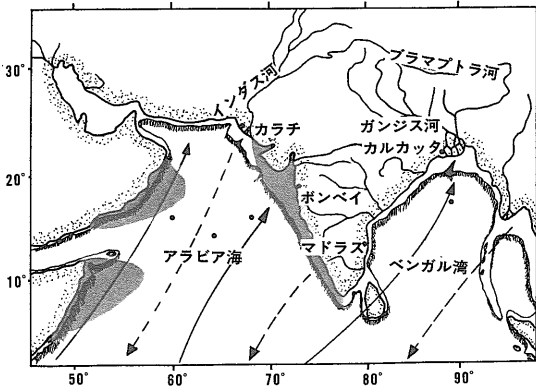
2.1 気候変動・海洋の水路学的変化と粒子状物質の形成

沈降粒子の起源は有機物、炭酸カルシウム生物殻、珪質(オパール)生物殻、及び石質に分類できる。はじめから3番目までの成分は生物活動に関係したもので、これらを合計すると外洋域では沈降粒子の数十%以上に達する。さて、これらの生物起源物質の存在量、中深層への流量、組成は、当然のことながら有光層内の生物活動に大いに影響される。しかも、この活動は有光層内への栄養塩等の供給によって支配されるので、海流や風速等と沈降粒子の粒子束や組成との間に何らかの関係のあること



写真1 国際ワークショップを主催したハンブルク大学生物地球化学・海洋化学教室主任イテコット(Ittekkot)教授

1) 地質調査所 海洋地質部



第1図 アラビア海とベンガル湾のセジメント・トラップ実験測点。灰色の部分はモンスーンの影響で湧昇の顕著な海域で、矢印は、夏季の南西モンスーン(実線)と冬季の北東モンスーン(破線)・シーズン中の風の方向。

が予想される。

アラビア海やベンガル湾での沈降粒子と気候要素の関係は以前にも紹介したが(川幡, 1993), たぶん最もよい例であると思われるので簡単にまとめておこう(第1図)。両地域ともにアジアモンスーン(季節風)の影響下にある。夏季は南西モンスーンと呼ばれインドでは雨期に、冬季の北東モンスーンの時期は乾期に相当し、両季ともに風速が増す。

夏季のアラビア海では、風速の増加に伴いアラビア半島沖で大規模な湧昇がおこり、生物生産が増加する。それに伴い、生物起源の粒子の濃度が増加する。一方、アラビア半島の砂漠から大量のエアロゾル(石質の微粒子)が海洋に落下し、石質の混入が沈降粒子の平均密度の増加をもたらす。沈降粒子は効率的に有光層から除去され、水塊中を落下する速度が速くなり、有機物は分解を免れる可能性が高くなる(Nair et al., 1989)。冬季にも風速が増大し、栄養塩に乏しい極表層の水と少し深い所の栄養塩により富んだ水が混合し、結果として生物生産を高めるが、この時は風向が逆になるので基礎生物生産を刺激するとどまる。インド洋の東側に位置するベンガル湾での沈降粒子の挙動は別の因子によって支配されている。すなわち、南西の季節風の卓越する時期には、ガンジス河とブラマプトラ河流域に多量の雨が降り、河川水は増水し、多量の碎屑物や栄養塩を海に運び込み、それにともない生物生産が活発になる(Ittekkot et al., 1991)。

このようなモンスーンの影響は南シナ海でも観察されていて、アジアモンスーン気候帯が海洋の炭素循環にも重大な影響を与えていることがしだいに明らかになってきている(Zheng, L., 1993)。また、サハラ砂漠の南西沖の大西洋の長期観測では、この3年半の間に沈降粒子が増加する傾向が観測されている。その原因を確定するには至っていないが、その有力な説明としてこの地域の風速が増していることが指摘されている(Fischer and Wefer, 1993)。

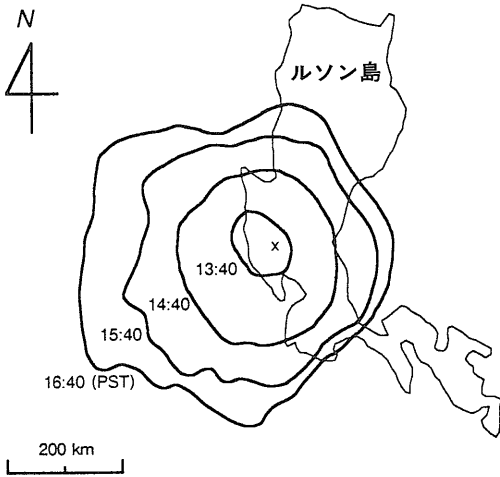
以上のように気候や水理学的な要因が重要視されているが、ヨーロッパの国々が比較的高緯度地域に位置していることや極域の海水の栄養塩濃度が高いこともあり、海水による海表面の被覆は彼らの興味をひいている。北海北部で行われた実験では、水温が -1°C 以下で海水に覆われている時期には沈降粒子の粒子束は小さく、水温が 2°C 以上で海水と温かい海水が接触していた時期には粒子束が大きくなるということが観察されている(Hebbeln and Wefer, 1993)。

以上二、三の例を挙げたが、近年のセジメント・トラップ研究では、沈降粒子と気候要素との関連性を解析することに力点が置かれている。セジメント・トラップは観測船が出かけられない時期にも沈降粒子という固相を通して1年以上にわたって連続観測を行えるという大きな利点をもっている。また、温暖化に関連した海洋の炭素循環の研究においては、炭素そのものに重点があるというよりは、むしろ二酸化炭素の上昇に対応した気候変動の可能性に力点があることを考慮すると上記の研究動向は当然で、さらに発展するように思われる。

2.2 エピソード的な地球活動と沈降粒子の形成

地球表層の環境に与える因子として大規模な火山活動の影響がしばしば指摘されている。これは火山灰が空中高くまいあがり、それが太陽から放射されるエネルギーをわずかながら遮断し、地球表層が吸収する熱量を微妙に変化させるからである。このような火山の爆発は地質学的な時間スケールでしばしば起こったことは明らかであるが、このようなインパクトが海洋の生物活動等にどのような影響を与えるのかについては未知である。

1991年6月に起こったフィリピンのルソン島ピナツボ火山の爆発は、今世紀最大と言われている。その火山灰の降下は衛星からも観察され(第2図)、過去の火山灰堆積物の研究にとってもよいお手本と

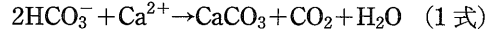


第2図 衛星画像から得られたピナツポ起源の灰雲の拡がり. X印はピナツポの位置を表している (Koyaguchi and Tokuno, 1993).

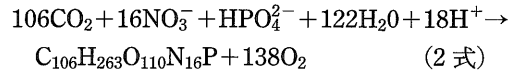
なった. この火山灰は当時フィリピンを襲った台風により西側に流され, 南シナ海にかなりの量が降下した. この海域では1987~1988年と1990~1993年にかけてセジメント・トラップ実験が行われていて, 通常はモンスーンの影響下での海流の流れや表層での生物生産の影響が大きく, 生物起源物質が沈降粒子に占める割合も60~85%と高い. しかし, ピナツポが噴火した1991年の夏には17,000 mg/m²/日という全粒子束が観測され, 年間を通じて8,990 g/m²というたぶん今迄観測された中で飛び抜けて大きな全粒子束を示した. そして, 余りに試料が多かったため, セジメント・トラップのターンテーブルを回転させるモーターが壊れてしまった程である. 火山灰のガラスや鉱物はピナツポ起源であることを示しているし, その粒径はバイモダルになっていて, より大きな粒径のものは表層水に降下してそのまま, より小さな粒径のものは表層水中に繁殖しているプランクトンとともにフィーカルベレットやマリンスノーとして深海にもたらされたことが示された (Wiesner et al., 1993). このような火山の大規模な爆発はめったに起こることではないが, この1991年の石質の粒子束は通常年のその3桁以上高かったので, 少し長い事件スケールで見るとその効果は結構大きいかもしれない.

2.3 珪質プランクトンの繁殖の炭素循環における重要性

炭素循環に伴うプランクトンの活動について, 有機物や炭酸カルシウム等の炭素化合物の輸送は優先度の高い研究対象とされている. 両者の性質は海洋と大気との炭素の移動に関しては逆の働きをしているので注意が必要である(第3図). 表層水での炭酸カルシウムの形成は, 海洋から大気への二酸化炭素の輸送を促す(1式).



一方, 有機炭素の形成は, 表層水中の二酸化炭素の分圧を減らすので, 大気中の二酸化炭素濃度を下げる働きがある(2式).

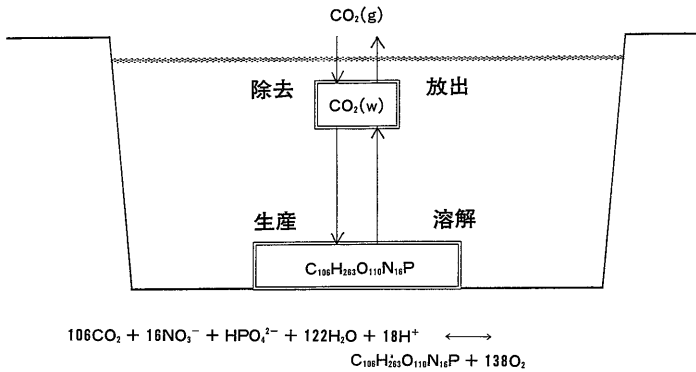


これが分解すると, 水塊では溶存酸素が消費され, 最終的に, 二酸化炭素(これは重炭酸イオンや炭酸イオンになる)が形成され, 硝酸イオン, 燐酸, 水素イオンが増加し, pHが下がる. こうしてできた二酸化炭素や水素イオンは炭酸カルシウムと反応し, 海水中の二酸化炭素分圧を減少させる. そこで, 有機炭素と無機炭素の沈積が同量であると, 海洋と大気の間ではほぼ二酸化炭素の移動がなかったことになる. ただし, 二酸化炭素の移動は, 海水の化学組成, 圧力にもおおいに依存するので, 実際はもう少し複雑で, 現在の表層水の化学組成では, 有機炭素/無機炭素の形成比が2/3以上であると, 海水中の二酸化炭素分圧が下がり, 2/3以下であると, 分圧が上がる.

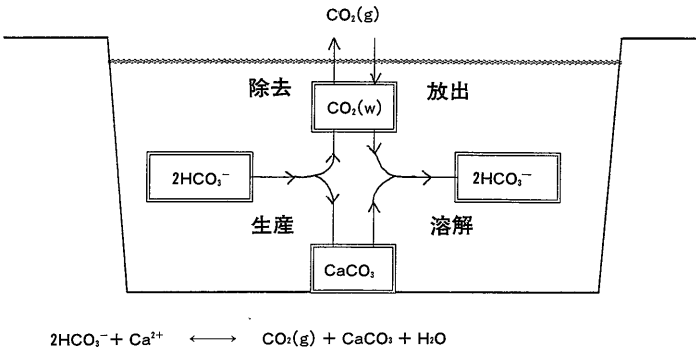
粒子状物質による二酸化炭素の吸収に関しては, 有機炭素/炭酸カルシウム炭素比は一つの重要な指標である. すなわち, この値がより大きいと吸収の程度がより高いことを表すことになる. そこで, 大気中の二酸化炭素を吸収するために生物ポンプが効率的に働くには, 炭酸カルシウム殻を作る円石藻や有孔虫が繁殖するだけではこの比は小さくなり, 海洋表層が二酸化炭素を吸収することは非常に難しくなる. ただし, この値は沈降粒子を採取した深度にも依存するし, 表層水中の生物活動によっても影響される.

アラビア海や西カロリン海盆では全粒子束のピークが年に2回見られることがある. これはもちろん生物活動が関係しているが, 年2回のピーク時

有機炭素



炭酸カルシウム炭素

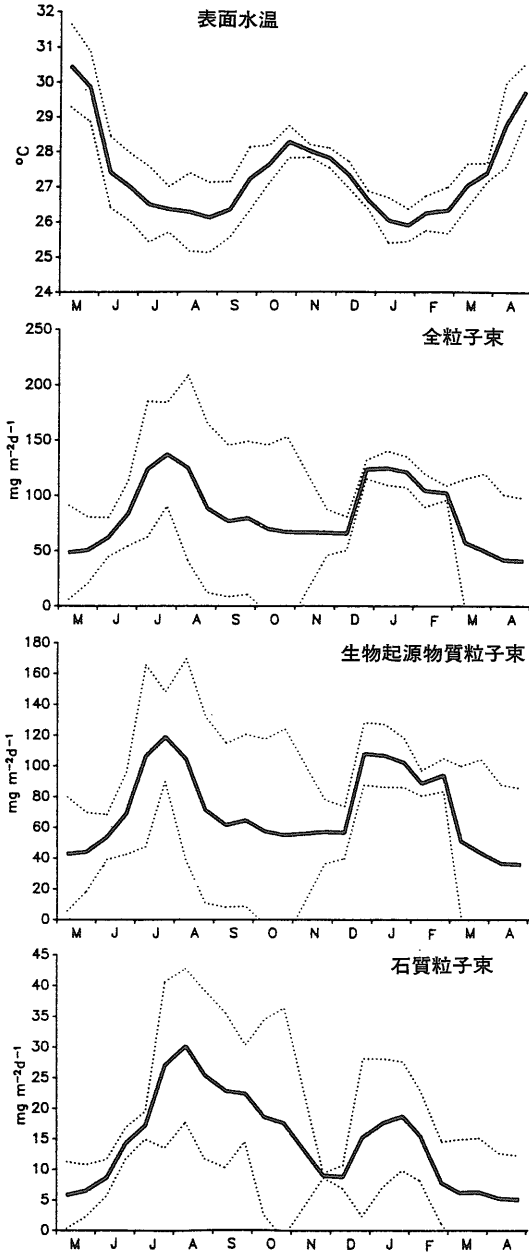


第3図 海洋における有機物と炭酸カルシウムの生産・分解に関連した炭素の流れ。

には生物ポンプの効率が異なっていることが明らかとなっている。すなわち、炭酸カルシウム殻に富む沈降粒子の増大期(有機炭素/炭酸カルシウム炭素比が低い時期)と炭酸カルシウム殻に乏しい沈降粒子の増大期(有機炭素/炭酸カルシウム炭素比が高い時期)である。この後者の時期は珪質(オパール)生物殻の生産の多い時期と一致した。以上の結果は、大気中の二酸化炭素を吸収するための生物ポンプは、珪藻や放散虫等の珪質殻をもつ生物群が優勢な時期により効率的に働くことを意味している(Kawahata, 1993)。このように、炭素循環において珪質殻をもつ生物群の役割の重要性が認識されてきている。

先にもふれたように珪質(オパール)生物殻を生産するプランクトンとして重要なものは珪藻と放散虫である。これらの生物群は有機物よりは解けにくい

オパール殻を残すので環境の変化を復元するのに適している。しかし、現在の海洋はオパールに不飽和なので、沈降粒子や堆積粒子として採取される珪質殻が有光層内の状態をどれ位反映しているのかを知る必要がある。現在までの研究では *Corethron criophilum* は最ももろい殻をもつ珪藻であるが、北太平洋でのセジメント・トラップ実験の結果は、これらの殻が溶解が十分進まないうちに海底に到達することを示している。一方、Phaeodarian 亜目の放散虫は水塊を沈降する間に溶解が進行することを示している。また、有光層内でのオパールの生産と有光層から落ちていく有機物の粒子束との間にも種や棲息時期に関して様々なバリエーションのあることが知られている(Takahashi, 1993)。このように、過去と現在の炭素循環を把握する上で珪質殻をもつ生物群の研究は不可欠であるということがいえよ



第4図 アラビア海における表面水温，全粒子束，生物起源物質粒子束，石質粒子束の平均とその変動幅。

う。

オパールの生産は窒素の循環にも重大な影響をもっていることが最近指摘されている。アラビア海はモンスーンの湧昇や水塊の脱室過程に関連した高い生物生産が観察されているが、沈降粒子の $\delta^{15}\text{N}$ も

これに伴って変化する。 $\delta^{15}\text{N}$ の変動は通常、有光層内への硝酸イオンの供給と除去に影響され、プランクトンの活動に依存している。しかも、その変動は炭酸カルシウム殻が優勢な生物群に富むプランクトンでなく、珪質(オパール)生物殻が優勢な生物群の活動に大いに依存することが明らかとなった。さらに、アラビア海での堆積物中の $\delta^{15}\text{N}$ 値から得られた海洋の窒素循環の過去の変化の記録によると氷期のアラビア海では脱室は相対的に弱かったことが示唆されている。この予察の結果は当時の有機物の高い沈積流量とも整合的であると報告されている (Schäfer and Ittekkot, 1993)。

2.4 長期観測の重要性

アメリカ東海岸バミューダ沖のサルガッソー海では約15年にわたってセジメント・トラップ実験が行われてきた。セジメント・トラップに捕捉される沈降粒子の粒子束やその組成は季節変動がしばしば観測される。そこで、ある地域の状態を把握するには、最低1年間の観測が不可欠であるとされている。さらに、陸上の気象も毎年少しずつ異なっているように、海洋で観測される粒子束にも年変動が観察される。このような年変動をアラビア海でまとめたものが第4図である (Haake et al., 1993)。これによると過去6年間でかなりの変動を示していることがわかる。現在、化石燃料の半量が大气中に残り、二酸化炭素濃度を上昇させているが、残りの半量がどこにいったのかについては未解決である。最も吸収している可能性が高いのは海洋であるが、そのプロセスが海水への溶解なのか、沈降粒子の形成なのか、その仕組みも含めてある程度の推定をたてるには、年変動を考慮したデータの解析なしに精度のよい議論はできない。

また、ベンガル湾等では年によって、季節変動が異なっている場合もあり、これに至っては数年の観測を行ってはじめてその地域の粒子束の特徴になる。海洋はその地域地域によって水塊や海流の状態も異なり、粒子束の性質もそれを反映したものになる。地球的規模でのフラックスを求めるためには、ある地域を代表するような何ヶ所かの観測点で長期観測を行うことが必要である。特に、南半球は北半球よりも海の部分が多いものの、セジメント・トラップ実験がほとんど行われていないのが現状で、今後このような地域でも観測研究が行われる

べきである。

また、セジメント・トラップは観測船の行けない時期にも物質流量を観測する現時点ではほぼ唯一の機器であるが、1測点でカバーできる範囲は限られている。幸い最近では衛星から水温、波高、クロロフィル量等が観測できるようになり、これらから得られた表層水塊の情報とセジメント・トラップに採取された試料との間での対応関係が研究され始めた。この種の研究は時間・空間を連続的に把握できるという点で重要で、将来発展するものと期待できる。

謝辞：今回の国際ワークショップへの出席は科学技術庁二国間協力に伴う専門家派遣の経費によってまかなわれた。また、川幡のドイツ滞在について地質調査所国際室の方々にお世話になった。原稿を中尾征三部長に査読していただいた。皆様に感謝します。

文 献

- Fischer, G. and Wefer, G. (1993) : Seasonal and interannual variability of vertical particle fluxes in the Western Equatorial Atlantic. SCOPE/UNEP Workshop on Particle Flux in the Ocean.
- Haake, B., Ittekkot, V., Rixen, T., Ramaswamy, V., Nair, R. R. and Curry, W. B. (1993) : Seasonality and interannual variability of particle fluxes to the deep Arabian Sea. *Deep-Sea Res.*, **40**, 1323-1344.
- Hebbeln, D. and Wefer, G. (1993) : Sedimentation patterns in the Northern Nordic Seas. SCOPE/UNEP Workshop on Particle Flux in the Ocean.
- Ittekkot, V., Nair, R. R., Honjo, V., Ramaswamy, V., Bartsch, M., Manganini, S., and Desai, B. N. (1991) : Enhanced particle fluxes in Bay of Bengal induced by injection of fresh water. *Nature*, **351**, 385-387.
- Kawahata, H. (1993) : Sediment trap experiments in the West Pacific Ocean. SCOPE/UNEP Workshop on Particle Flux in the Ocean.
- 川幡穂高(1993) : ドイツの海洋環境研究—とくにセジメント・トラップ実験と古環境の研究について—地質ニュース, **465**, 58-68.
- Koyaguchi, T. and Tokuno, M. (1993) : Origin of the giant eruption cloud of Pinatubo, June 15, 1991. *J. Volc. Geoth. Res.*, **55**, 85-96.
- Nair, R. R., Ittekkot, V., Manganini, S., Ramaswamy, V., Haake, B., Degens, E.T., Desai, B. N., and Honjo, S. (1989) : Increased particle flux to the deep ocean related to monsoons. *Nature*, **338**, 749-751.
- Schafer, P. and Ittekkot, V. (1993) : $\delta^{15}\text{N}$ in settling particles in the Arabian Sea. SCOPE/UNEP Workshop on Particle Flux in the Ocean.
- Takahashi, K. (1993) : Siliceous particle fluxes: Tracers for environmental changes. SCOPE/UNEP Workshop on Particle Flux in the Ocean.
- Wiesner, M. G., Wang, Y., Jennerjahn, T. C., Zheng, L., Reschke, S., Tang, Y. m and Wong, H. K. (1993) : Particle fluxes in the South China Sea. SCOPE/UNEP Workshop on Particle Flux in the Ocean.
- Zheng, L. (1993) : Seasonal variations of oxygen and carbon isotopes in planktonic foraminifera in the Northern South China Sea. SCOPE/UNEP Workshop on Particle Flux in the Ocean.

KAWAHATA Hodaka (1993) : SCOPE/UNEP workshop on Particle Flux in the Ocean.

〈受付：1993年10月14日〉