

D-1 渤海・東シナ海における河川経由の環境負荷が海洋生態系に与える影響評価手法に関する研究

(1) 河口域における流入負荷及びその循環の変動把握手法に関する研究

① 海洋観測による生態系・物質循環機構の流入負荷への応答把握手法の開発に関する研究

研究代表者 国立環境研究所 水圏環境部 水環境工学研究室 村上正吾

環境庁 国立環境研究所

水圏環境部	部長	渡辺正孝
	水環境工学研究室	村上正吾
	水環境質研究室	内山裕夫、徐 開欽、越川 海
	土壌環境研究室	高松武次郎、越川昌美
	EU-STF フェロー	Mary-Hélène NOËL
生物圏環境部	微生物生態研究室	広木幹也、河地正伸
地球環境研究グループ	海洋研究チーム	原田茂樹
地域環境研究グループ	海域保全研究チーム	木幡邦男

平成8年度～10年度合計予算額 65,458千円
(平成10年度予算額 26,993千円)

[要旨]

長江河川水の流入に伴う海洋環境及び生態系に与える影響を把握することを目的として、1997年10月および1998年5月の2回にわたり長江河口沖合での海洋調査を実施した。長江起源水は表層(10m以浅)を伝わり秋季には東経123°付近、春季には東経124°以東まで達し(30‰等塩分線)、また本海域に供給される栄養塩のN/P比は北緯31°30′ 東経122°30′ (測点C1)においてそれぞれ32、47であり窒素過剰であった。植物プランクトンの現存量は秋季には長江起源水と外洋水のフロントで多かったが、春季にはフロントの内側で多かった。これは両季節共に東経123°付近で光制限条件から解放されたためであると考えられた。また植物プランクトンは秋季に珪藻類、春季に渦鞭毛藻類が卓越した。珪酸は両季節とも豊富に供給されており、優占種の決定はその他の要因(成層条件、N/P比など)によるものと考えられた。懸濁粒子に含まれる長江起源、特に人為起源元素の本海域への供給について検討したが、懸濁粒子中元素の殆どはプランクトン等の生物あるいは地殻起源のものであった。また底質からのリン供給の可能性について検討したところ、堆積物粒子に含まれるリンのうち6～17%が生物の利用可能な形態であり、また間隙水中の溶存態無機リン濃度は水塊中の濃度に比べて4～30倍高い濃度で蓄積していた。したがって特に冬季に著しい底質の再懸濁などによって本海域で欠乏しているリンが供給される可能性が示唆された。

[キーワード] 長江河口域、栄養塩、植物プランクトン、懸濁粒子

1. 序

長江の河川流量は約 $1 \times 10^{12} \text{m}^3/\text{年}$ を誇り、アマゾン川、ザイール川に次ぐ流出量である¹⁾。東シナ海の面積および平均水深をそれぞれ $1 \times 10^6 \text{km}^2$ 、50m 程と見積もると長江から東シナ海への年間淡水流入量は東シナ海容積の約 1/50 に匹敵し、長江河川水は河口域のみならず東シナ海の広い範囲にわたる海洋環境および海洋生態系に影響を与えていると考えられる。近年の長江流域における人口増加や農業生産増大に伴い、生活排水や肥料による汚濁が東シナ海に大量に負荷されており、しばしば HAB (Harmful Algal Blooms) の発生が報告されている²⁾。

今後の長江流域における経済活動発展やダム建設等の開発は河口域および東シナ海への汚濁負荷量の更なる増大や質に変化をもたらし、海洋環境および生態系に負の影響を及ぼしかねない。したがって、今後の人為環境負荷の変化が海洋環境に与える影響を予測・評価していくことが求められており、その上で長江流入水の河口域から東シナ海における動態と海洋生態系あるいはその物質循環過程との連関を把握することが不可欠である。

本課題では、河口域から東シナ海における海洋生態系(主に植物プランクトン)およびその物質循環過程に対する長江起源汚濁物質の影響を把握することを目的としている。ここでは長江河口沖に設定した東海特定海区において調査を行った結果を報告する。

2. 研究方法

調査海域は、1997年3月に調印された長江河口域調査に係る日中共同研究実行協議書に基づき東経 $122^{\circ}30'$ ~ $124^{\circ}00'$ 北緯 $31^{\circ}00'$ ~ $32^{\circ}00'$ の範囲(東海特定海区、図1)において、1997年10月19日~10月20日(秋季)および1998年5月14日~5月17日(春季)の2回に亘って中国国家海洋局調査船(海艦49号)を用いて実施した。

東海特定海区に A1~C5 まで計 15 点の観測ステーションを設け(表1)、全 15 点において水温、塩分、pH、溶存酸素濃度、酸化還元電位の鉛直プロファイルを計測した(Hydrolab Surveyor II)。A1、A3、A5、B1、B3、B5、C1、C3 及び C5 の 9 点においては表層、中層(各水深に応じて)、底層(海底直上 1m 深)から 20L ニスキ採水器を用いて採水を行い、栄養塩類(オートアナライザー)、粒子態有機炭素及び窒素(CHN アナライザー)、溶存有機炭素(高温触媒酸化法)、植物プランクトン種組成および現存量(光学顕微鏡下)の分析を行った。動物プランクトンは鉛直引きによって採取し種の同定を行った。また懸濁粒子の 34 種の元素濃度(ICP-AES および中性子放射化分析)を AI 濃度で規格化し、その値

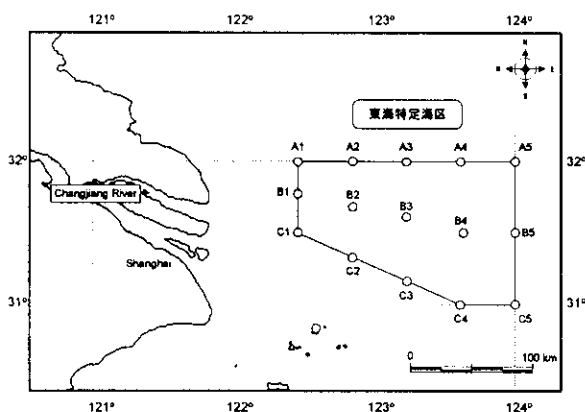


図1 日中共同調査海域(東海特定海区)



図2 調査船 中国国家海洋局海艦49号

の変動から各元素の供給源について検討した。さらに A1、A3、B1、C1 及び C3 においては、マルチコアラーによる採泥を行い、底泥中の栄養塩分析及び底泥からの栄養塩の溶出について検討を行った。

3. 結果と考察

(1) 東海特定海区の水塊特性

本節では、水温、塩分の分布から東海特定海区の水塊構造を考察し、長江起源水が本海域に及ぼしている影響を示す。

①表層における水温・塩分濃度水平プロファイル

東海特定海区調査時の海底地形は大陸側(A1、B1、C1 の平均水深は 27m)から沖側(A5、B5、C5 の平均水深は 42m)に向けて次第に深くなっており、また C3 地点(水深 55m)を中心に窪んだ地形となっている。

秋季、春季の表層 1m の平均水温はそれぞれ 23.1、16.7℃、平均塩分はそれぞれ 31.3、29.9‰で水温、塩分ともに秋季の方が高い値が観測された。最高水温は秋季には C4(24.09℃)、春季には C5(18.55℃)で記録され、また最低水温は秋季春季共に A5(21.37℃、14.8℃)において記録された。最高塩分は秋季には B4 及び A1(34.1‰)、春季には A4 及び A5(31.9‰)であり、最低塩分は秋季には B2 で 27.4‰、春季には C2 で 26.3‰であった。水温、塩分の表層 1m 水平プロファイルによると、それぞれ南高北低、西高東低の傾向が見られる(図 3)。このうち南北方向の温度勾配は、南から供給される黒潮分岐流である台湾暖流と北から下ってくる低温の黄海沿岸流の影響によると考えられる。東西方向の塩分勾配は、C1(秋季)あるいは C2(春季)から北東方向に延びており、河口付近で南東方向に向かう長江水が北へ向かう台湾暖流などの影響で北東方向に分岐した長江起源水を捉えたものであると考えられる。

長江起源水の影響範囲を 30‰等塩分線までと考えると、秋季には 30‰等塩分線が東経 123°程度まで、春季には東経 124°以东まで達していた。一般に長江起源水の影響は流入量の多い夏季に大きく、今回の調査で観測されたような北東方向の低塩分水域を形成する。30‰等塩分線は、例えば 1981 年 8 月には東経 125°まで達していたことが報告されている³⁾。また 1986 年の夏季は低塩分水域の拡がり弱く、30‰等塩分線は 123°30′ 付近に形成された⁴⁾。一方、冬季はプリュームが北東方向に分岐する勢いが弱く、例えば 1996 年 1 月の観測では南東方向に 123°程度までしか達していない⁴⁾。本調査で得られた春季の 30‰等塩分線の拡がりは、1981 年に代表される夏季の一般的な拡がりと比較すると小さいが、1986 年の夏季に比べると大きい。また秋季の低塩分水域の拡がり小さいが、北東方向へのプリューム形成が見られ、南東方向にしか拡がらない冬季よりも長江起源水の影響が広範囲に及んでいたことが示されている。

表 1 観測ステーション一覧

Station	North Latitude	East Longitude	Depth (m)
A1	32° 00'	122° 30'	25
A2	32° 00'	122° 52'	37
A3	32° 00'	123° 15'	40
A4	32° 00'	123° 37'	41
A5	32° 00'	124° 00'	42
B1	31° 45'	122° 30'	29
B2	31° 45'	122° 52'	31
B3	31° 45'	123° 15'	39
B4	31° 45'	123° 37'	41
B5	31° 45'	124° 00'	43
C1	31° 30'	122° 30'	29
C2	31° 20'	122° 52'	40
C3	31° 10'	123° 15'	55
C4	31° 00'	123° 37'	47
C5	31° 00'	124° 00'	41

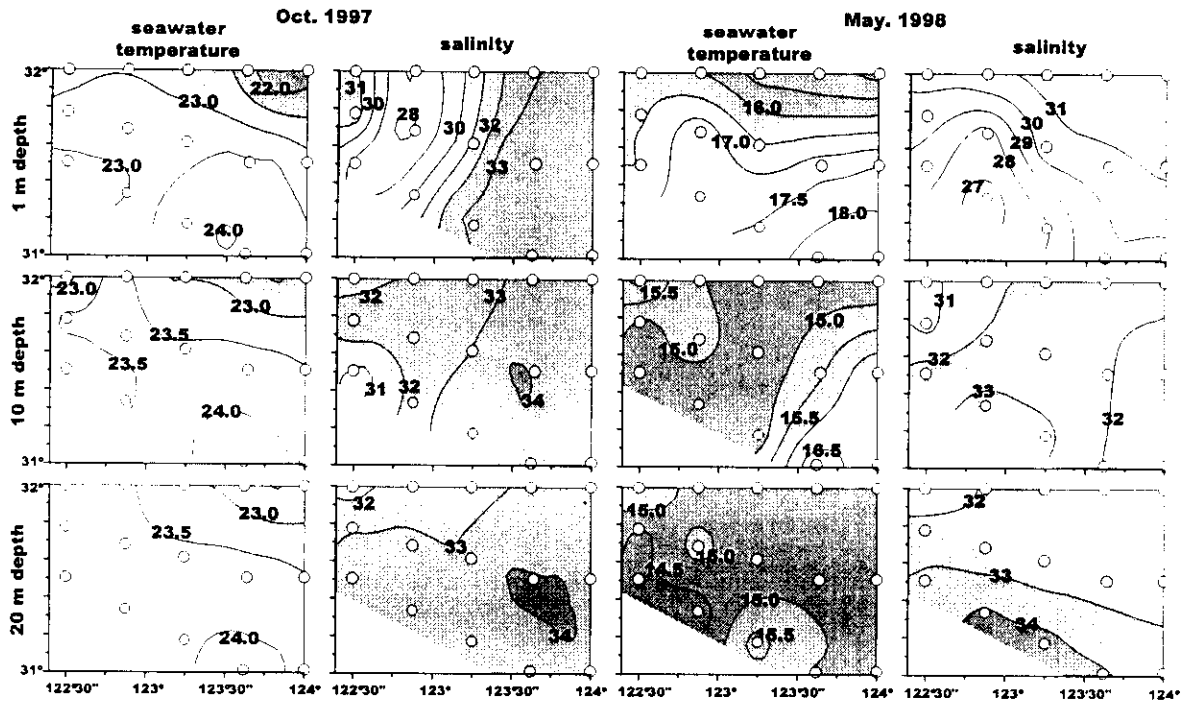


図 3 秋季、春季における水温、塩分の水平プロファイル

②水温・塩分の鉛直プロファイル

水温および塩分の鉛直プロファイルは、長江起源水の影響を強く受けていた(図 4)。河口に最も近く浅い C1 では、春季、秋季共に表層に低塩分水が存在し、深度方向に塩分が高くなっていった。また低塩分水域(表層 1m)が発達した春季の鉛直プロファイルは C1~C5、B1~B4 の広い範囲に亘って水深 10m 以浅に急激な水温・塩分の変化が存在し成層を形成していた。春季に比べて低塩分水域の狭い秋季は C1 の他、C2、B2、A2 などにおいて成層が観測された。

水深 10m 及び 20m における水温・塩分の水平プロファイル(図 3)によると、秋季では台湾暖流と思われる水温 24°C 前後、塩分 33‰ 以上の水塊が南東から、また黄海沿岸流と思われる冷たく若干塩分濃度の低い水塊が北から進入していた。これらの水深においては長江起源水の影響は殆ど見られなかった。春季においても同様な傾向が観測された。また表層で長江起源水の強い影響が観測された C1~C5 に 34‰ 程度の低塩分水が存在し、密度の大きな台湾暖流水塊が密度の小さな長江起源水の下に潜り込んでいることが示されている。

③秋季・春季の長江起源水の影響範囲

東海特定海区として設定した長江沖合は南方からの台湾暖流(高温高塩分)と北方からの黄海沿岸流(低温高塩分)が混ざり合う海域であったと考えられる。低塩分の長江起源水は、これらの高塩分水塊の上を流れ、その厚さは 10m に満たない為に広範囲な海域に影響を及ぼす。30‰ 等塩分線の拡がり(プリューム)は、秋季では 123° 付近まで、春季では 124° 以東に達していた。春季のプリュームは最もプリュームが発達する夏季の状態に近く、また秋季のプリュームは小さいが、冬季(乾期)よりも大きい。春季のプリュームは、例えば長江上流の融雪に伴う流出量増加によって発達したと考えられる。

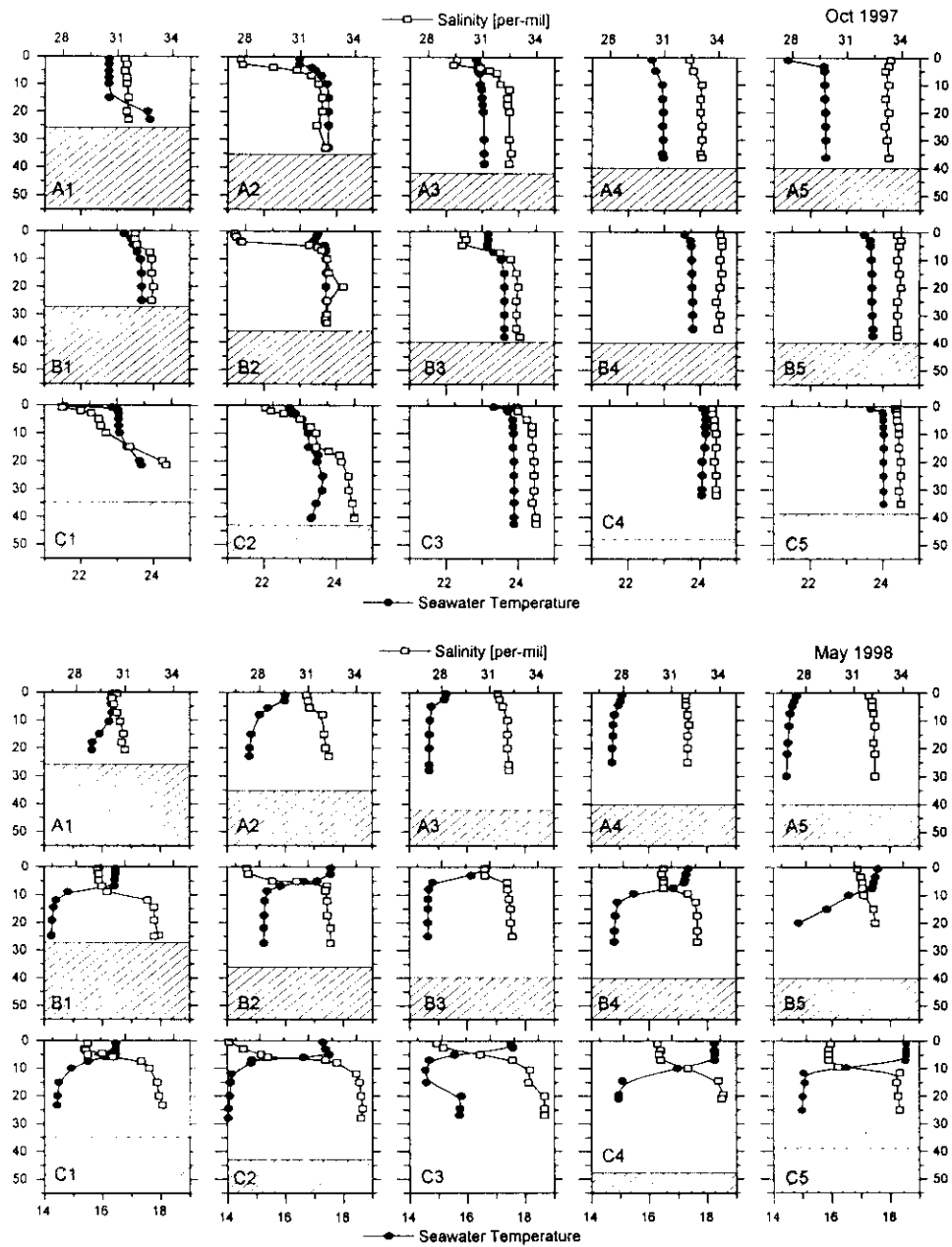


図 4 水温・塩分鉛直プロファイル

上段:秋季、下段春季、○塩分[‰]、●水温[°C]

(2) 東海特定海区への栄養塩供給とプランクトン現存量

本節では、長江から供給される栄養塩の動態について水塊構造及び植物プランクトンによる消費などの観点から述べ、さらに秋季、春季による植物プランクトン種組成の違いについて検討する。

①秋季の栄養塩分布

秋季の PO_4 、 NO_3 、 Si(OH)_4 濃度はいずれも C1 表層において最大値(それぞれ $0.63 \mu\text{M}$ 、 $19.5 \mu\text{M}$ 、 $30.6 \mu\text{M}$)を示した(図 5)。C1 の $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び Si(OH)_4 鉛直分布は明らかに下層に向かって減少しており、下層で栄養塩濃度が高くなる通常の海域とは異なる傾向を有している。C1 の表層は長江起源水が存在しており、これらの栄養塩が河川由来であることが推定された。また PO_4 濃度の表層から下層への減少傾向は相対的に弱かった。

秋季の長江起源水は C1 表層を通り、B2、A2 方向に延びていた(図 3)。B2、A2 に隣接する C3、B3、A3 の表層におけるこれらの栄養塩濃度はその他の地点の表層に比べて低く、また C3、B3、A3 の中・底層における濃度は表層よりも高かった。したがって長江から供給された栄養塩類は、河口に近い C1 よりも C3、B3、A3 などの沖合表層で植物プランクトンに消費されていたことが考えられる。

C1 表層において栄養塩の明かな消費が認められなかったのは、C1 表層の濁度が高く光制限となっていたと考えられる。セッキ板を用いた透明度の測定によれば、C1 では 2.1m、C2 では 5.4m、C3 では 5m が記録されている。

一方、C1 に近い A1、B1 の表層濃度は A3、B3 に比べると高く、また表底層間の鉛直変化も小さい。A3、B3 の水塊は長江起源よりむしろ黄海沿岸流の影響を強く受けており、これらの地点における栄養塩の供給源は長江ではないと考えられる。表底層間の鉛直変化の小ささは、これらの地点においては植物プランクトンによる消費が活発ではないことを示唆している。

②春季の栄養塩分布

春季 C1 表層における PO_4 、 NO_3 、 Si(OH)_4 濃度(それぞれ $0.33 \mu\text{M}$ 、 $12.9 \mu\text{M}$ 、 $20.6 \mu\text{M}$)は、秋季のそれらと比較すると低いですが、鉛直分布傾向は類似していた(図 5)。

春季の長江起源水の影響範囲は秋季に比べて広く、したがって栄養塩の輸送も広範囲に及んでいたと推定される。例えば水温塩分の鉛直プロファイル(図 4)から考えると、C1~C5 及び B1~B4 の表層は軒並み長江起源水が流入していたと言える。これらのステーションにおける $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は、C1 を除くと表層で低く中底層で高かった。したがって C3~C5、B1~B3 においては、植物プランクトンによって表層のリンが消費されていたことが推定される。C1 地点は秋季と同様に濁度が高く光制限下におかれていたと考えられる。

NO_3 濃度も PO_4 濃度と同様に表層で低く、中底層で高い特徴を示した。しかし秋季と比較すると全層に亘って高い濃度であった。 Si(OH)_4 濃度は秋季のプロファイルと著しく異なり、全層に亘って高く且つ C3、C5 では表層が中底層よりも高い濃度を示した。

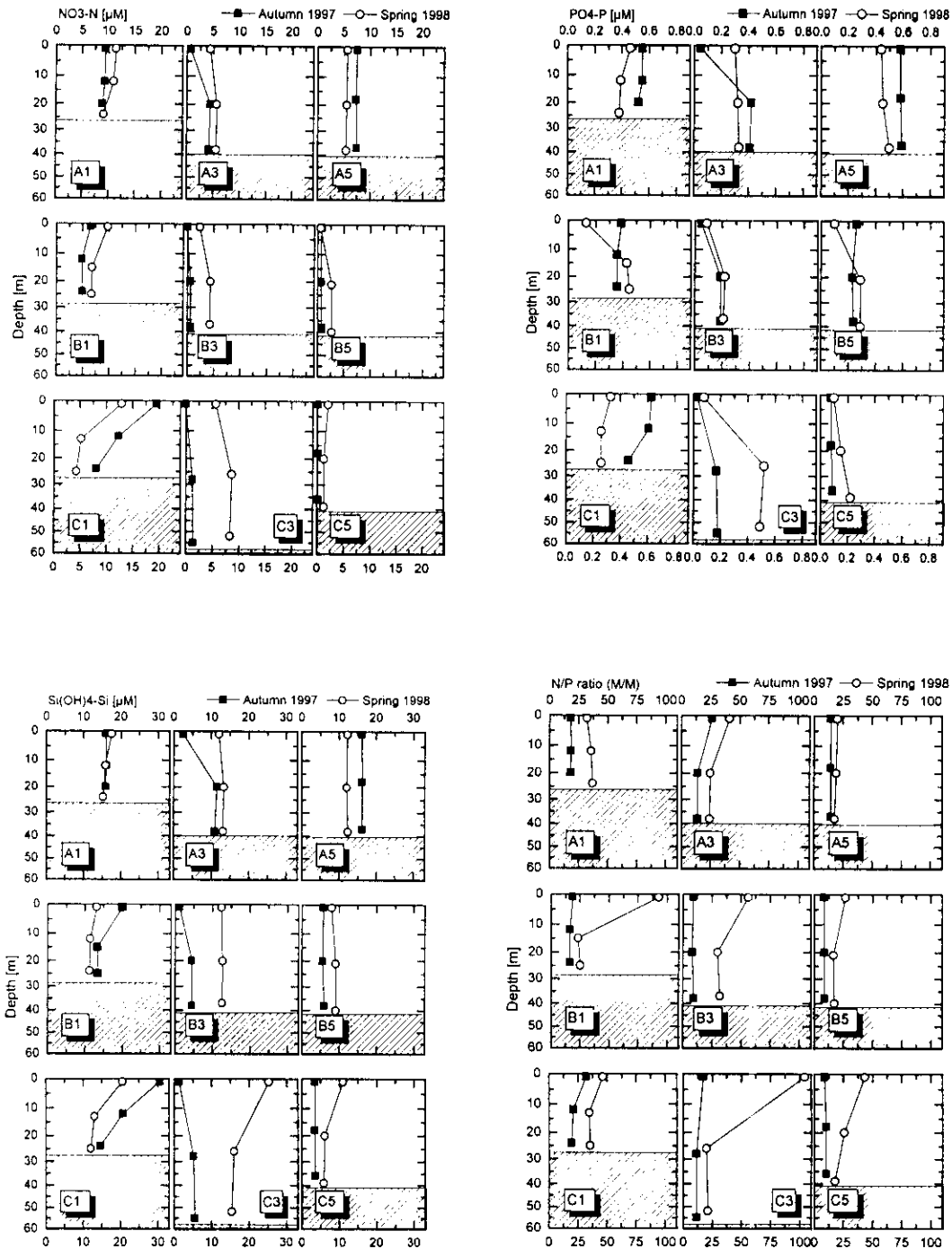


図 5 NO₃ (左上)、PO₄ (右上) Si(OH)₄ (左下) 濃度及び N/P 元素比 (右下)。■ 秋季、○ 春季。

③秋季及び春季の植物プランクトン分布

秋季表層では 123 種の植物プランクトンが観察されたが、そのうち 98 種が珪藻類であり、22 種が渦鞭毛藻であった(中国国家海洋局提供のデータによる)。その中でも *Chaetoseros*、*Skeletonema*、*Nitzschia* などの珪藻が優占種であった。渦鞭毛藻としては *Ceratium*、*Protoperidinium* が存在したが優占率は低い。出現数の大きい測点は A3 (6.2×10^2 cells/ml)、B3 (7.8×10^2 cells/ml)、C3 (3.3×10^2

cells/ml)の順で、これらの測点は長江起源水が外洋水とフロントを形成する海域と一致していた。また A3、B3 では個体数のほぼ 90%を *Chaetoseros* が占めていた。

春季表層では珪藻 39 種、渦鞭毛藻 14 種が確認された。そのうち渦鞭毛藻 *Prorocentrum* が優占種で、B1 (3.6×10^2 cells/ml)、C3 (3.3×10^2 cells/ml)、A3 (1.4×10^2 cells/ml)に多く出現した。またこれらの地点においては個体数の 99%近くが *Prorocentrum* で構成されていた。Chl. *a* 濃度は B1、C3、A3 でそれぞれ 3.4、3.9、2.0 μ g/l であった。春季の長江起源水は東経 124°以東まで達していたが、C5 および B5 の植物プランクトン個体数は 0.1×10^2 cells/ml 以下と少なかった。これは長江から輸送されてきた栄養塩が C3 及び B3 においてほぼ消費されて尽くし、C5、B5 には十分に供給されなかった為であると考えられる。

④秋季及び春季の動物プランクトン分布

秋季は橈脚類 36 種 (*Euchaeta concinna*、*Calanus sinicus* が優占)、ヒドロ虫 12 種 (*Diphyes chamissonis*、*Leusia subtiloides* が優占)、矢虫類 11 種 (*Sagitta enflata* が優占)が観測された。このうち優占橈脚類である *Euchaeta concinna* は A3、B3、C3 に少なく、A1、C1、B1 および A5、C5、B5 に多く観測された。植物プランクトンが A3、B3、C3 で多く観察されたのは、長江起源の栄養塩の供給のみならず、動物プランクトンの捕食圧が小さかったことも一つの要因として考えられる。

春季は橈脚類 8 種 (*Calanus sinicus*、*Paracalanus parvus*、*Oithina* sp. が優占)、矢虫類 (*Sagitta bedoti*)、アミ類などが確認された。*Calanus sinicus* は C1、C3、B3、A5 で、*Paracalanus parvus* は A1 で多く、C5、B5 では少なかった。また植物プランクトンとして分類されるが従属栄養性の渦鞭毛藻 (夜光虫 *Noctiluca scintillans*) が広範囲に出現していた。春季の植物プランクトンは B1、C3、A3 で多いが、B1 及び A3 は相対的に動物プランクトンが少ない為、植物プランクトンに対する捕食圧が低い海域であったと思われる (以上のプランクトンデータは中国国家海洋局からの提供)。

⑤秋季春季の優占種の違い

秋季、春季の優占植物プランクトンはそれぞれ珪藻、渦鞭毛藻であった。長江からこの海域に供給される栄養塩は、C1 における濃度からみると全般に春季の方が低濃度だったと考えられるが、両季節とも珪藻の増殖に十分な珪酸塩が含まれていた。それにも関わらず、春季には珪藻の増殖は殆ど見られず、例えば C3 や B3 の表層においては高濃度の $\text{Si}(\text{OH})_4$ が残存していた (図 5)。

優占種を決定する主な要因として、動物プランクトンによる選択的な摂餌、Si の存在や N/P 比などの栄養条件、栄養塩の鉛直特性などが挙げられる。本調査のみからは観測された優占種の違いを生じさせた要因を特定することはできないが、ここでは栄養塩条件に関わる要因について検討する。

珪藻の増殖には Si が必須であり、Si の欠乏した海域では渦鞭毛藻などが優占する。しかし本海域は春季においても十分な Si が存在しており (図 5)、したがって Si 濃度は春季の渦鞭毛藻卓越に関与していないと考えられる。

N/P 比は植物プランクトンの増殖速度に影響を与え、また種に応じて好 N/P 比が異なるために、しばしば種遷移の原因として議論される⁵⁾。またシスト形成にも関与しており、N/P 比の変動は年間を通しての種遷移に関与すると考えられている。本観測では、秋季表層の N/P (DIN:DIP) 比は 8.4~32 (平均 17)、春季は 20~105 (平均 51) で、また長江に近い C1 でも秋季は 32、春季は 47 で N/P 比は春季の方が大きかった (図 5)。両季節とも N/P 比は Redfield 比 (16:1) よりも高く、長江由来の栄養塩は窒素が過

剩であることがわかる。春季の C3 や B3 でそれぞれ 105、56 という高い N/P 比が観測されているが、長江水供給源に近い C1 では 47(秋季は 32)であるから、これは植物プランクトンの増殖に伴って PO_4 が欠乏した為であり、高 N/P 比の為に渦鞭毛藻が卓越したとは言い難い。したがって両季節の N/P 比の差はそれほど大きくなく、両季節で異なる植物プランクトンが優占した要因としては説明できない。既往の研究では冬季の比は小さく Redfield 比に近く、夏季には本調査で得られた比よりも高い場合が報告されている。おそらく長江河川流出量の季節変化に伴って N/P 比も年周期で変動していると推定される。シスト形成あるいは発芽に N/P 比が強く関与しているならば、藻類のライフサイクルまで考慮した年間を通じた検討を行うことによって、種遷移の要因を議論できるかもしれない。

次に栄養塩の鉛直分布特性と優占種の関係について述べる。水温、塩分の鉛直分布(図 4)をみると、春季は秋季に比べて成層がより発達している。その結果、春季では表層と中底層の栄養塩濃度が大きく異なる。この傾向は制限栄養塩である PO_4 の鉛直分布でより明確である。成層の境界は水深 10m 以浅に存在しているので、表層～中層(例えば C3 では 26m 深)間の測点はないが、おそらく中層での濃度に近い栄養塩がごく浅い水深まで存在していたと推定される。成層が発達し、且つ下層に豊富な栄養塩が存在する海域において植物プランクトンが増殖するためには、下層で栄養塩を摂取し、光の豊富な表層で光合成を行うことが求められる⁶⁾。秋季に卓越した珪藻類は遊泳力を持たないが、春季に増殖した渦鞭毛藻は遊泳力を有し日周鉛直移動が可能である。したがって成層が発達した春季には渦鞭毛藻の方が増殖に適していたと思われる。

(3) 東海特定海区における懸濁粒子の動態

ここでは、前節までに述べた本海域における水塊構造及び生物に関する情報をもとに、生物由来の粒子態有機炭素を中心とした有機炭素の動態と懸濁粒子中の元素の起源について述べ、長江起源水の懸濁粒子への影響を考察する。

① 有機炭素の動態

表層の粒子態有機炭素(POC)の平均濃度は、秋季 0.17mg/l、春季 0.20mg/l でほぼ類似していた。測点間の大小関係も表層では大凡類似していた(図 6)。一方、中層及び底層における平均濃度は、秋季は 0.21mg/l 及び 0.38mg/l(但し 1.6mg/l を記録した A1 を除く)、春季は、0.13mg/l 及び 0.27mg/l であった。つまり、秋季は底層に向かって POC が増加する傾向を示し、春季はその傾向が弱い。この傾向は秋季には遊泳力を持たない珪藻が卓越していた為、それらが底層付近に沈降した結果であると推定される。但し、沿岸に近い A1、B1、C1 における底層 POC 濃度は、植物プランクトンの増殖が見られた A3、B3、C3 よりも非常に高く、植物プランクトン起源の POC であるとは考えにくい。A1、B1、C1 の底層は懸濁粒子が非常に多

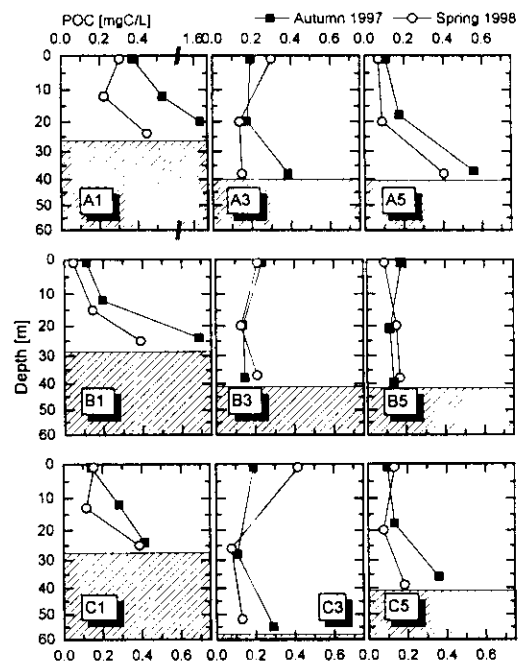


図 6 POC 濃度。■ 秋季、○ 春季

く、おそらく粒子に付着した生物等によるものと推定される。

表層における溶存態有機炭素 (DOC) の平均濃度は、秋季 1.46mgC/l、春季 1.06mg/l で秋季に高い傾向が見られる。沿岸域において珪藻が卓越し栄養塩が枯渇すると、珪藻から蓄積性の高い DOC が放出されるという報告がある⁷⁾。秋季に珪藻現存量が高く且つ N、P、Si の栄養塩が低い C3 表層において、DOC の最大値 1.86mg/l を記録している。したがって本調査で観測された秋季の表層における高い DOC 濃度は、卓越した藻類種の違いと関係があったと考えられる。

②懸濁粒子の起源

懸濁粒子中の元素 X の Al に対する比 (X/Al) は、元素 X の主要な供給源に応じて異なる値を有すると考えられる。ここでは懸濁粒子中の元素のうち 24 元素について、それらの起源を解析した結果を述べる。

表層と中底層で規格値が大きく異なった元素は図 7 に示す 7 元素であった。これらの元素のうち、P、Zn、Sr、Ba、Mg の規格値は表層より底層で低く、Mn、Ca は底層で高かった。

P、Zn はプランクトン粒子中に濃度が高い為、表層で高く底層で低いと考えられる。秋季表層について地点間で比較すると、植物プランクトン現存量の高い A3、B3、C3 で、他の地点より高い値を示した(図 8)。Zn/Al と P/Al には相関 ($(Zn/Al) = 0.02(P/Al) + 0.001$, $R=0.885$) 関係が認められた。切片 0.001 は地殻の Zn/Al に近く、したがって懸濁粒子中の Zn は $Zn/P = 0.02$ であるプランクトンと $Zn/Al = 0.001$ である陸起源の鉱物に起源を持つと考えられた。Sr、Ba、S、Mg は、Zn と同様に P と相関を示し、プランクトン及び鉱物から供給される元素であると考えられた。

一方、Mn/Al は表層で一定の値 (0.008 ± 0.002) を示し、底層 (0.011 ± 0.001) の方が高い値を示した。Ca/Al も底層 (0.35 ± 0.05) の方が表層 (0.23 ± 0.12) より高い値を示した。堆積物中の Mn/Al (= 0.013 ± 0.003) 及び Ca/Al (= 0.36 ± 0.08) 値は表層懸濁粒子よりも高く、したがって底層水の高濃度の Mn、Ca は堆積物の再懸濁によって供給されていたと考えられる。

As、Ce、Co、Cs、Fe、Hf、La、Ni、Pb、Sc、Sm、Th、Ti、V、Y および Yb の X/Al 比は季節・地点・水深によらず一定で、即ちこれら 16 元素の供給源が一定であったと言える。地殻中含有量平均及び土壌

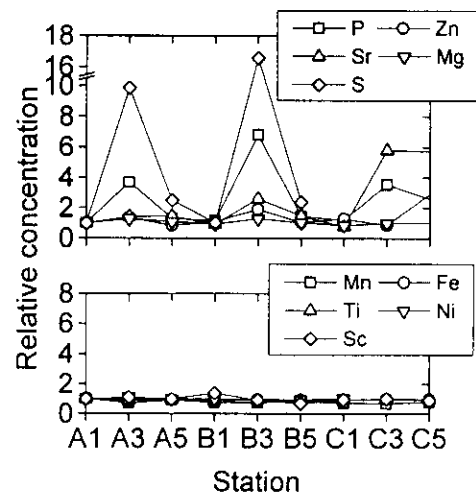


図 8 秋季表層における懸濁粒子の元素組成
Relative concentration = $(X/Al)/(X/Al)_{st. A1}$

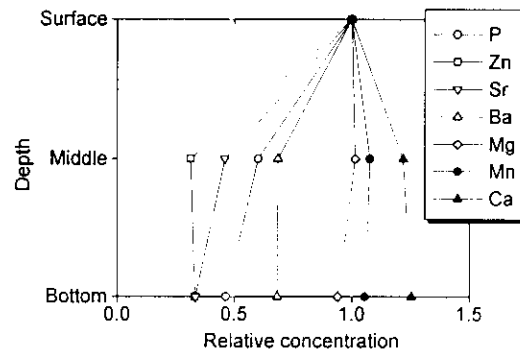


図 7 秋季 C5 における懸濁粒子元素組成鉛直分布
Relative concentration = $(X/Al)/(X/Al)_{surface}$

表 2 本調査の懸濁粒子 X/Al 値と平均地殻含有量及び土壌含有量中央値 (Bowen ら 1979) の X/Al 比の比較

Ele.	X / Al (ppm/ppm)		
	Suspended particles	Mean crust	Median soil content
As	2.0E-04	1.8E-05	8.5E-05
Ce	8.0E-04	8.3E-04	7.0E-04
Co	2.0E-04	2.4E-04	1.1E-04
Cs	1.0E-04	3.7E-05	5.6E-05
Fe	4.9E-01	5.0E-01	5.6E-01
Hf	5.0E-05	6.5E-05	8.5E-05
La	4.0E-04	3.9E-04	5.6E-04
Ni	6.0E-04	9.8E-04	7.0E-04
Pb	5.0E-04	1.7E-04	4.9E-04
Sc	1.0E-04	2.0E-04	9.9E-05
Sm	7.0E-05	9.6E-05	6.3E-05
Th	2.0E-04	1.5E-04	1.3E-04
Ti	5.0E-02	6.8E-02	7.0E-02
V	1.4E-03	2.0E-03	1.3E-03
Y	3.0E-04	3.7E-04	5.6E-04
Yb	4.0E-05	4.0E-05	4.2E-05

中含量中央値の X/Al 比⁸⁾と本研究において測定した懸濁粒子中の X/Al 比を比較すると、Cs/Al と As/Al が懸濁粒子中の方が数倍高い値を示すのを除けば、殆どの元素で明確な差は見られなかった。

今回の基礎的な観測では、例えば塩分濃度の変化に伴う懸濁粒子の組成の変化は観測されず、長江起源水の流入に伴う人為汚染金属等の残留形成は認められなかった。しかし本海域には大量の天然土壌粒子が存在しており、人為起源汚染の影響を希釈している可能性があるかと推定される。

(4) 底質からの栄養塩 (PO₄) の溶出

前節までに、東海特定海区には長江起源水に含まれる栄養塩によって表層において生物生産の盛んな海域が形成されていることを述べた。表層から沈降し海底に堆積したプランクトン由来の有機物は、分解過程を経て再び水塊に栄養塩を供給する源となる。本海域の生物生産は N/P 比の高い条件で行われており、リンの供給が生物生産の維持あるいは赤潮発生の要因となりうる。そこで本節で報告する研究では、底質に含まれるリン(間隙水および底泥粒子)の濃度及び形態の分析、また水塊中のリン濃度との比較を通じて底質からのリン溶出について検討した。

① 堆積物中のリンの形態

A1、A3、B1、C1、C3 の堆積物上部 2cm に含まれるリンを無機態リン、イオン交換態リン、有機態リンの3形態に分けて調べた。無機態リンはリン全体の 70~99%を占め、12~16 μmol/g 存在した。また無機態リンは Ca と結合したものが多く 66~94%を占めた。Ca と結合したリンは海水に溶解したり微生物に分解されない難溶性リンであり、したがって堆積物中のリンの多くは生物に利用されない安定した状態で存在していると言える。イオン交換態リン(PO₄)は無機リンのうちの 1.4~4.0%で、0.1~0.7mol/g であった。また生物が利用可能なリン(イオン交換態リン+有機態リン)の割合は全リンの 6~17%で、北側(例えば A1)で多く、南側(例えば C3)で少ない傾向を示した。これは南側の方が長江起源水によって運ばれる陸起源の鉱物(難溶性リン)の割合が多いこと、また生物分解活性が高い(C/N 比が低い)為であると推定された。

②間隙水中のリン濃度

堆積物間隙水の PO_4 濃度は $1.4\sim 6.0\ \mu\text{M}$ で水塊濃度 ($0.1\sim 0.4\ \mu\text{M}$) の $4\sim 30$ 倍に達した(図 9)。したがって強い海流による再懸濁など底質の攪乱が生じれば、 PO_4 が容易に水塊中に放出されると考えられる。最も間隙水中の濃度が高かったのは測点 C3 で、他地点と比較して $2\sim 4$ 倍であった。また秋季は春季よりも濃度が高い傾向が見られた。この傾向は、間隙水中の栄養塩分布が堆積物極表層よりも 5cm 以深で高いことを考慮すると、春から夏にかけて表層から沈降・堆積した生物の分解によって蓄積さ

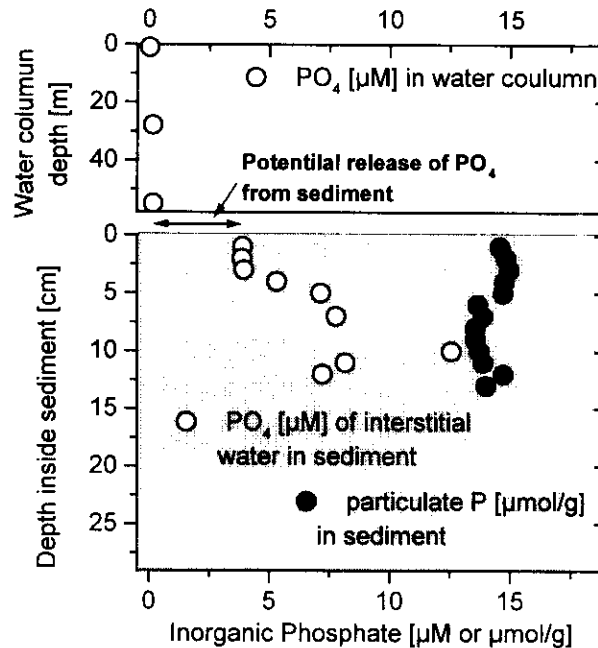


図 9 堆積物、間隙水および水塊中のリン濃度の分布
秋季、測点 C3 (1997 年秋季) における分析結果

れたものと考えることができる。逆に冬季は再懸濁が盛んであり、秋まで蓄積してきた PO_4 は水塊にはほぼ放出され、その結果春季に低い濃度になっていたと考えられる。

5. 本研究により得られた成果

長江河川水の流入に伴う海洋環境及び生態系に与える影響を把握することを目的として、1997 年 10 月および 1998 年 5 月の 2 回にわたり長江河口沖合での海洋調査を実施した。長江起源水は表層 (10m 以浅) を伝わり秋季には東経 123° 付近、春季には東経 124° 以東まで達し (30‰ 等塩分線)、また本海域に供給される栄養塩の N/P 比は北緯 $31^\circ 30'$ 東経 $122^\circ 30'$ (測点 C1) においてそれぞれ 32、47 であり窒素過剰であった。植物プランクトンの現存量は秋季には長江起源水と外洋水のフロントで多かったが、春季にはフロントの内側で多かった。これは両季節共に東経 123° 付近で光制限条件から解放されたためであると考えられた。また植物プランクトンは秋季に珪藻類、春季に渦鞭毛藻類が卓越した。珪酸は両季節とも豊富に供給されており、優占種の決定はその他の要因(成層条件、N/P 比など)によるものと考えられた。懸濁粒子に含まれる長江起源、特に人為起源元素の本海域への供給について検討したと

ころ、懸濁粒子中元素の殆どはプランクトン等の生物あるいは地殻起源のものであった。また底質からのリン供給の可能性について検討したところ、堆積物粒子に含まれるリンのうち 6~17%が生物の利用可能な形態であり、また間隙水中の溶存態無機リン濃度は水塊中の濃度に比べて 4~30 倍高い濃度で蓄積していた。したがって特に冬季に著しい底質の再懸濁などによって本海域で欠乏しているリンが供給される可能性が示唆された。

5. 参考文献

- 1) Fairbridge RW (1980) The estuary: its definition and geodynamic cycle. In: Olausson, E., Cato, I. (eds.) Chemistry and biochemistry of estuaries. John Wiley & Sons, New York, pp1-35.
- 2) Zhu M, Li R, Mu X, Ji Ru (1997) Harmful algal blooms in China Seas. Ocean Research, 19: 2 173-184.
- 3) Yu H, Zheng D, Jiang J (1983) Basic hydrographic characteristics of the studied area (Changjiang estuary and the adjacent East China Sea). In: Proceedings of international symposium on sedimentation on the Continental Shelf, with special reference to the East China Sea. China Ocean Press, Beijing vol.1, pp.295-305.
- 4) Ning X, Vaultot D, Liu Z, Liu Z (1988) Standing stock and production of phytoplankton in the estuary of the Changjiang (Yangtse River) and the adjacent East China Sea. Mar. Ecol. Prog. Ser. 49:141-150.
- 5) 山口峰生 (1993) 植物プランクトンの増殖に及ぼす N:P 比の影響. 吉田陽一編 水域の窒素 : リン比と水産生物 恒星社厚生閣 pp. 11-19
- 6) Watanabe M, Kohata K, Kimura T, Takamatsu T, Yamaguchi S, Ioriya T (1995) Generation of a *Chattonella antiqua* bloom by imposing a shallow nutricline in a mesocosm. Limnol. Oceanogr, 40:1447-1460.
- 7) Norrman B, Zwifel UL, Hopkinson CSJr, Fry B (1995) Production and utilization of dissolved organic carbon during an experimental condition diatom bloom. Limnol. Oceanogr. 40:898-907.
- 8) Bowen HJM (1979) In: Environmental Chemistry of the Elements, Acad. Press (London), pp. 333.

[国際共同研究等の状況]

環境庁と中華人民共和国国家海洋局との間で「東海特定海区河川経由環境負荷及びその海洋生態系に及ぼす影響プロジェクトに関する共同調査研究実施取り決め」が締結され、これに基づき、国家海洋局調査船を用いて共同研究を推進している。

[研究成果の発表状況]

(1) 口頭発表

- ① Koshikawa KM, Takamatsu T, Matsushita R, Takada J, Murakami S, Xu K, Watanabe M: The Japan-China Joint Workshop on the Cooperative Study of the Marine Environment - Environmental capacity and effects of pollutants on marine ecosystem in the East China Sea -, Tokyo (1999)
「Elemental Composition of Suspended Particles in the Changjiang Estuary Mouth」
- ② NOEL MH, Watanabe M: The Japan-China Joint Workshop on the Cooperative Study of the Marine Environment - Environmental capacity and effects of pollutants on marine ecosystem in the East

China Sea -, Tokyo (1999)

「Importance of the Sediment-Water Interface in the Nutrient Status of the East China Sea at the Mouth of the Changjiang Estuary」

(2) 論文発表

- ① Koshikawa KM, Takamatsu T, Matsushita R, Takada J, Murakami S, Xu K, Watanabe M:
Proceedings of the Japan-China joint workshop on the cooperative study of the marine environment.
(1999)

「Elemental Composition of Suspended Particles in the Changjiang Estuary Mouth」(予定)

- ② NOEL MH, Watanabe M : Proceedings of the Japan-China joint workshop on the cooperative study
of the marine environment. (1999)

「Importance of the Sediment-Water Interface in the Nutrient Status of the East China Sea at the
Mouth of the Changjiang Estuary」(予定)

(3) 出願特許、受賞等

なし