

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

(2) 汚濁物質が海洋生態系・物質循環に与える潜在的影響の評価手法に関する研究

① 海洋隔離実験生態系を用いた汚濁負荷の海洋生態系への影響評価手法に関する研究

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 原田茂樹

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、牧 秀明
	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
生物圏環境部	微生物生態研究室	広木幹也、河地正伸
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	36,753 千円
	(平成10年度予算額	11,265 千円)

[要旨]

長江河口域への汚濁負荷に対する河口域生態系への影響評価の為に、波高の高い海域に設置可能な隔離生態実験系(浮遊式海洋メゾコズム)の開発及び長江河口域に構築したメゾコズム生態系へのリン及び油負荷実験を行った。

浮遊式のメゾコズム開発では生態系維持に必要な水塊の混合条件を、蛍光色素を用いて調べた。その結果、波高が 30~60cm 程度の海域にメゾコズムを構築した場合、メゾコズム自体の動きが十分な水塊混合を確保することが明かとなった。

長江河口域における汚濁負荷実験では、生物生産の制限栄養塩であるリンを添加し、生態系の応答及び生態系物質循環について検討した。秋季及び春季の実験共に、リン添加(N/P 元素比を 8 に調整)のみで、植物プランクトンブルームが容易に引き起された。ブルームを形成した植物プランクトンは、珪藻(秋季)及び渦鞭毛藻(春季)であった。両季節とも珪酸は豊富に存在し、優占種の決定因子は珪酸塩濃度以外にあると考えられた。粒子態有機炭素量としての生物量は季節に関わらず約 1mg/l 増加し、初期生物量の2倍であった。したがって本海域へのリン負荷は急激な生物量増大を招くと考えられた。また捕食者によるブルーム制御機能は相対的に珪藻ブルームに対して高く、渦鞭毛藻に対しては低いことが明かとなった。

油濁汚染実験では、船舶燃料油水溶性画分をメゾコズムに添加し、生態系への影響を観測した。観察された生物種のうち、特に繊毛虫類及び夜光虫が油添加後に個体数が大幅に減少し、添加油に敏感に影響を受けていたことが示された。また植物プランクトンの光合成活性も大きく減少したことが示され、船舶油流出事故は河口域の生物生産に直接の影響を与えることが示唆された。

[キーワード] 長江河口域、生態系、メゾコズム、栄養塩、リン制限、油濁汚染

## 1. 序

中国経済の急速な拡大は長江などの大河川経由での東シナ海への窒素、リンあるいは有害化学物質の負荷増大に繋がると予測される。それらが東シナ海海洋環境に与える影響が危惧されている。

栄養塩負荷量の増大あるいは質の変化は植物プランクトンを起点とする海洋生物の種構成、食物連鎖構造に大きな影響を与え、生態系物質循環の変動につながる<sup>1),2)</sup>。近年の調査に基づくと、長江河口域では、栄養塩類のうちリン酸( $\text{PO}_4^{3-}$ )は  $0.2\sim 1\mu\text{M}$  程度の濃度で存在し、一方硝酸( $\text{NO}_3^-$ )は常に  $20\sim 50\mu\text{M}$  の濃度で存在している。長江河口域における窒素濃度は、アマゾン川のような他の大河川における濃度に比べてかなり高く、窒素過剰な栄養塩環境(高 N/P 比環境)となっている。これは、農業用肥料として比較的安価なリン含有量の少ないものが長江流域で大量に使用され河口域に負荷されている為<sup>3),4)</sup>、あるいは  $\text{PO}_4^{3-}$ が長江河川水に含まれる流砂に強く吸着され、流砂粒子と共に河口付近の底質に輸送除去されてしまう為<sup>5)</sup>と考えられている。

現在の長江河口域からその沖合には、こうした環境条件に適応した生物(生態系)存在していると思われるが、しばしば有害藻類の発生が報告され<sup>6)</sup>、漁業資源への影響も深刻となっている。更に今後の急激な長江流域開発は長江流出水の質及び量に大きな影響を与え、現在の海洋環境、生態系構造・機能を変化させることが推定される。現在、中国政府は農産物の増産を強力に推進しており、施肥量の増大またリン含有量の高い肥料への転換が予測される。これは長江河口域及び東シナ海への栄養塩負荷総量増大また質の変化(N/P 比低下)につながる。また三峡ダムに代表される長江上流域におけるダム建設はその放水量制御によって海域への流出水量の季節変動を小さくし、更に新たに出現するダム湖は蒸散量を増加させ海域への総流出水量を減少させることが考えられる。流砂の約 75%がダムによって堰き止められ、河口域に負荷される懸濁粒子の減少が予測される<sup>7)</sup>。これは、特にリンの負荷量に影響を与えると考えられる。

栄養塩などの汚濁物質以外にも、工業廃水に含まれる重金属や有機化学物質の負荷、あるいは近年中国沿岸においても深刻さが増している船舶事故等による油濁汚染は、漁業資源量のみならず市場における魚介類の価値に対しても大きな悪影響を与えかねない。

長江河口域および長江河川水が影響を及ぼす海域が現在おかれているこのような状況から、人為起源の汚濁汚染負荷が生態系へ与える影響の評価および将来予測を行うことが早急に求められている。

## 2. 研究目的

本課題の目標は、長江河口域で将来予想される栄養塩負荷の攪乱あるいは近年問題となっている油濁汚染に伴う生物過程を含む物質循環変動の把握及び生態系への影響を評価することである。人為負荷が東シナ海の海洋生態系に与える影響の評価手法の機軸として、自然海域を捕獲し維持制御した閉鎖系隔離実験生態系(海洋メゾコズム)を長江河口域(上海の南東約 100km に位置する嵯泗列島付近)に構築し実験を行った。具体的には以下の3つの目的に沿った研究を行った。

### ①浮遊式メゾコズムの開発

長江河口域に海洋メゾコズムを設置する上で、波浪等の自然条件を考慮すると、従来、国立環境研究所で使用してきた底質固定型メゾコズムでは設置及び運転が困難であることが考えられた。そこで波浪に耐える浮遊式メゾコズムの開発を新たに行った。

## ②リン負荷によるメゾコズム生態系への影響評価

長江河口域では植物プランクトンの増殖に必須のリンが制限因子である。一方で長江流域の開発に伴い、序節に示したような理由から、今後、リン負荷の増大が考えられる。そこで、長江河口域に共同研究機関である中国国家海洋局と共同で海洋メゾコズムを構築し、リンの添加・攪乱による生態系およびその炭素循環に対する影響評価を行った。

## ③船舶油負荷によるメゾコズム生態系への影響評価

長江河口域の船舶由来の油濁汚染は、人為起源汚染の一つとして深刻である。そこで、船舶油を負荷したメゾコズムを構築し、油濁汚染の生態系への影響評価を行った。

## 3. 浮遊式メゾコズムの開発

### (1) 底質固定型メゾコズムの問題点

海域における定点調査では、対象場における生物量や栄養塩濃度などの状態量変化が、水塊移動などの物理的な要因によるものなのか、あるいは生物化学的物質変換によるものかを分離することは難しく、生物過程を中心とした物質循環を生み出す因果関係を明確には結論づけられない。こうした問題点を補う為に、自然海域の生態系をそのまま捕獲し維持する閉鎖系隔離実験系の適用がしばしば図られる。またある種の環境条件に攪乱を与えた系を構築し、生物過程を含む物質循環変動の把握にも適している。

これまで国立環境研究所では瀬戸内海家島海域に於いて人為環境攪乱が生態系遷移に与える影響とそれに伴う物質循環変動の解析を、底質固定型の大規模メゾコズム(容積約 350m<sup>3</sup>)を用いて行ってきた。しかし底質固定式では海底の状態について詳細な事前調査や潜水作業が必要で、中国での構築は、簡単ではない。また設置予定海域は平均波高1mに達し、家島海域に比較すると非常に大きい為、底泥固定式ではメゾコズム海上部の暴れを吸収しきれないことも容易に予想できる。更に陸上拠点の確保が困難であり設置から実験まで全てを調査船上から行うことが要求される。これらの条件を考慮すると従来のメゾコズム構造、運転方法を含め大幅な見直しが求められた。

またメゾコズム実験に関して従来から指摘されてきた問題点として、メゾコズム壁によって内部の乱流エネルギーが失われ鉛直混合が著しく減衰することが挙げられる。カナダの研究グループによるとメゾコズム内部の鉛直拡散係数は、外部(5~50cm<sup>2</sup>/sec)に比較して2桁以上減衰するという<sup>8)</sup>。鉛直混合流が失われると珪藻など遊泳力の無い種が維持されにくく、例えば遊泳力の無い種から他種への優占種変遷が生じた場合に、それが鉛直混合の損失によるものなのか、或いは栄養塩条件等の変動などによるものか判断できなくなる。その他、鉛直混合流は表層への栄養塩の供給、粒子の凝集、捕食者-被捕食者の遭遇確率や捕捉効率、パッチ形成、植物プランクトンへの成長阻害など、多様な生態学的影響をもたらすとされている。先に国立環境研究所が開発した底質固定型メゾコズムでは、ポンプ駆動により表層に上向きジェット水流を与えその流動によって緩やかな鉛直混合流を発生させ問題の解決を図ってきた<sup>9)</sup>。しかしメゾコズム上に常時電源を必要とするこのシステムを陸上拠点のない場所に設置することは難しい。

### (2) 浮遊式メゾコズムの設計・試作

前節で述べた底質固定型メゾコズムの問題点を踏まえ、陸上拠点のない海域への設置に適した浮遊式

メゾコズム（本体と採水システム）及び波力を利用した鉛直混合装置の設計、試作を行った。

調査船から直接クレーンで海上へ設置することを想定し、図 1に示す浮遊式メゾコズムを設計した。海水の導入・排出は開閉弁付きのコーン下部から行うことができるため、海底作業を必要としない。また底質固定型に比較して高波に伴う海上部付近のメゾコズムの暴れに強い。ポリエステル繊維網目を EVA で表面処理したシートと亜鉛メッキしたスチールパイプを用いて円筒（下部は円錐）型に海水を隔離し（直径 5m、最大水深 4.5m、容積約 64m<sup>3</sup>）、メゾコズムをフロートで浮遊させる構造になっている。砕け波が内部に侵入し難いように、シートは海表面から約 1 m 突き出ている。メゾコズムはアンカー固定若しくは観測船に直接結わえることも可能である。採水は水平 3 点及び鉛直方向 3～5 点（0.5, 1.5, 2.0, 2.5, 3.5m）から塩ビパイプ+シリコンホース採水装置を用いる。採水ホースは調査船上にまで延長し、システム設置後は実験者がメゾコズム上に移る必要がなく安全に試料を採取できる。また攪拌装置をメゾコズム内部に 2 本の取り付け（脱着可）。これらは各々片側にフロート反対側にフィンを取り付けたもので、波力を利用してメゾコズム内部に水平および鉛直方向の流れを生み出し、攪拌を促進させることを狙ったものである。

### （3）浮遊式メゾコズム試作機の現場設置と鉛直拡散係数の評価

#### ① 実験方法

試作した浮遊式メゾコズムの設置試験および鉛直混合状態を把握するために、1997 年 3 月 27 日から 3 日間に亘って瀬戸内海姫路沖約 2km に於いて実験を行った。初日にメゾコズム懸垂用のポンツーン（フロートが付いた筏）をアンカーで固定した。2、3 日目にそれぞれ新たな水塊を隔離し、メゾコズム A 系及び B 系を構築した。攪拌装置（フィン）は B 系のみ取り付け。それぞれの条件におけるメゾコズム水塊の鉛直拡散係数を求めるために、水塊隔離後、メゾコズム水深 2m に Rhodamine WT を添加した。Rhodamine 濃度は、拡散後の環境影響を考慮し、Perler<sup>10)</sup>に基づいて最終内部拡散濃度 10 $\mu$ g/l となるようにした。Rhodamine 添加直前（初期）及び添加後 0.5、1、2、3...時間後に採水し、試水中の Rhodamine 濃度を現場で測定した（ターナー蛍光光度計）。各系の測定は Rhodamine が完全に鉛直拡散するまで行った。また同じ試料中のクロロフィル蛍光（*in vivo*）の相対強度を測定した。初期及びある程度混合が進んだ時点で水温、塩分の鉛直プロファイルを測定した（Surveyor、Hydro Lab 社）。波高はチタンパイプ（長さ 5m）の上部 1 m 程が海面に出る状態で垂直に浮かせ、その動きから推定した。またメゾコズム及び攪拌装置の挙動についても適宜目視観察を行った。

#### ② 結果

メゾコズム A における鉛直方向の Rhodamine 濃度分布の時間変化を図 2 に示す。経過時間毎にガウシアン分布が得られた。各ガウシアン分布の分散 ( $\sigma^2$ ) は、鉛直拡散係数 ( $kzm$ )、経過時間 ( $t$ ) によって次式

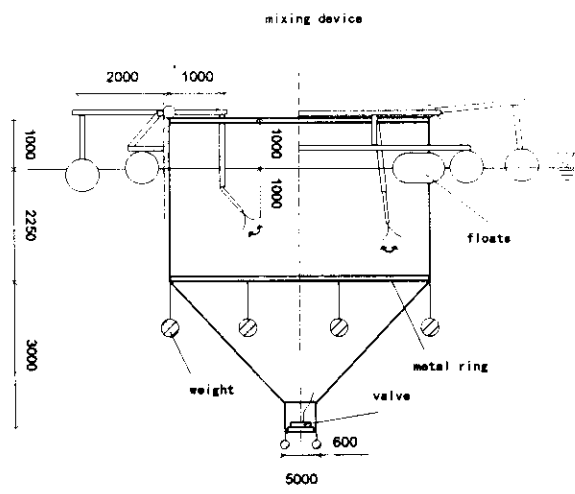


図 1 浮遊式メゾコズム（試作版）

のように表される<sup>11)</sup>。

$$\sigma^2 = 2 \times K_{zm} \times t$$

各分布における分散を縦軸に、経過時間を横軸にプロットしたとき得られる直線の傾きが鉛直拡散係数となる。波条件がほぼ一定であった3時間までのデータを用いるとメゾコズムAの拡散係数は 0.61~0.65 の間で非常に安定しており、平均では 0.62 cm<sup>2</sup>/sec (r<sup>2</sup>=0.98)であった。一方メゾコズムBでは Rhodamine 添加後第1回目のサンプリング時にはほぼ完全に鉛直拡散していた(図 2)。仮に 30 分で完全 0 混合に達したとすると鉛直渦拡散係数は約 11cm<sup>2</sup>/sec となり、メゾコズムAのそれと比較して約 20 倍の高い係数が得られた。またメゾコズムBにおいては水温、クロロフィル蛍光の鉛直方向分布がほぼ一定であり、良く混合されていることが示された。

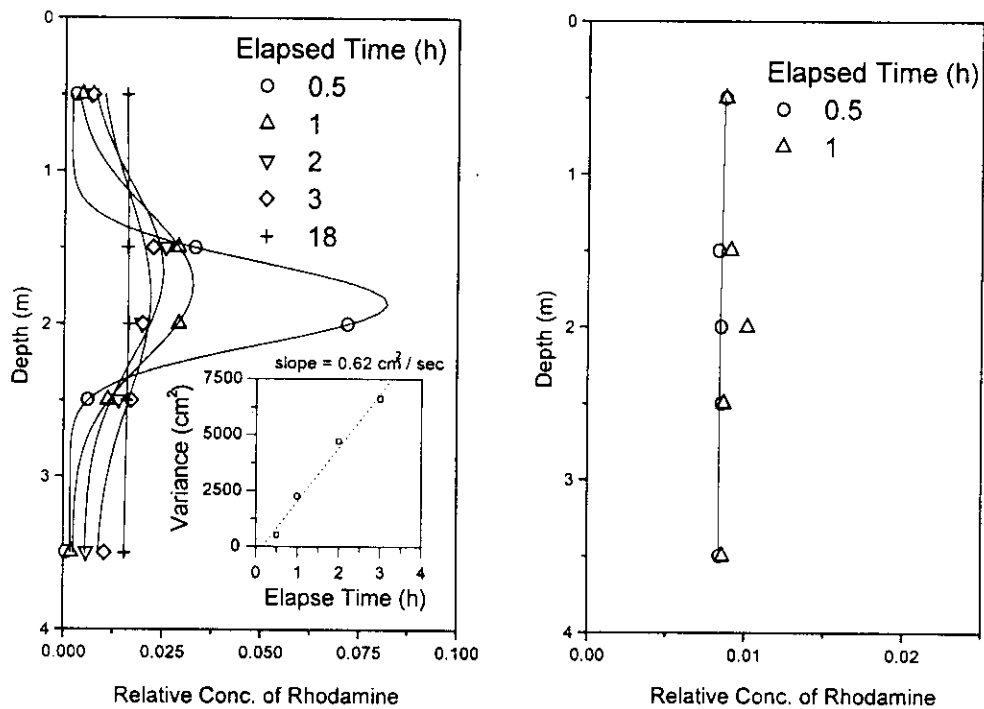


図 2 メゾコズム A (左) 及び B (右) における時間経過に対する Rhodamine WT の鉛直濃度プロファイルの変化。Rhodamine 濃度軸は相対値。左図中プロットは濃度プロファイルをガウシアン回帰したときの分散値の時間変化 (0.5~3h まで)。傾き (0.62 cm<sup>2</sup>/sec) は鉛直拡散係数に相当する。

### ③ 考察

カナダ CEPEX グループのメゾコズムで観測された鉛直渦拡散係数は、Steele ら<sup>11)</sup>によれば 0.06 cm<sup>2</sup>/sec、Mercier<sup>12)</sup>によれば 0.017 cm<sup>2</sup>/sec であり、自然水域 (5~50 cm<sup>2</sup>/sec) よりも 2 桁以上低いと言う。一方、本研究のメゾコズムでは A、B 共に CEPEX に比較して高い値が得られた。理由の一つには波浪条件が挙げられる (表 1)。A、B 共に数十 cm 程度の波高条件であるが、湾内など波の殆ど無い海域に設置される既往のメゾコズムと比較すると、メゾコズム自体が上下左右に大きく揺れ動き、内部水塊にもそのエネルギーが伝達され混合を促している様で

あった。特にメゾコズムBでは外部波高が 50cm 程度の時には内部でも 30cm 程度が観測され、高い拡散係数に寄与していたと考えられる。メゾコズムBでは、攪拌装置（フィン）の動作に応じて Rhodamine パッチ（添加直後）が勢い良く拡散するのも観察されたが、メゾコズム自体の動きによって内部水塊がシート壁に衝突し混合する作用の方が攪拌装置による作用を明らかに凌いでいた。

表1 各実験の波浪条件及び崋泗海域における平均値

	風速 (m/s)	波高 (m)
メゾコズムA	2~3	0.1~0.2
メゾコズムB	>10	0.3~0.6
(崋泗海域10月)	6.7	1.0

メゾコズム設置予定海域(崋泗列島付近)での春秋期の平均波高は、0.9~1m 程度(表1、中国国家海洋局からの提供)であり、本研究で高拡散係数を得たメゾコズムBの波高条件よりも更に高い。したがって本研究で試作した浮遊式メゾコズムを崋泗海域に構築した場合、湧昇流発生装置あるいは試作機に据え付けた攪拌装置などを用いなくとも、既往のメゾコズム実験系に比較して高い拡散係数が得られ、またしばしば問題が指摘されてきた遊泳力のないプランクトンの沈降についても少なく自然に近い条件で生態系が維持できると考えられた。

#### (4) 長江河口域へ設置した浮遊式メゾコズム

試作機を用いた検討に基づき、長江河口域に設置する浮遊式メゾコズムを設計・製作した(図 3)。メゾコズムの基本構造は試作機とほぼ同じであるが、設置及び係留に用いる調査船の甲板のスペース(メゾコズム保管および作業)やクレーン能力(耐荷重量、アーム長)を考慮して、実機シート部の寸法は試作機よりもやや小型の直径 3m、高さ 5.2m、水塊部容積約 25m<sup>3</sup>とした。また開閉器本体はステンレス製であるが、メゾコズム内側で海水と接触する部分には塩ビ板を被せて金属の溶出を防止した。

長江河口域におけるメゾコズム実験は秋と春の二度に亘って行った。最初の実験(秋季)で強度などに若干の問題があることが判明し、二回目の実験(春季)までに幾つか改良を行った。まず、底部の開閉器は海水の導入・排出能力を向上させるため、開口部を 0.3m から 0.55m へ大口径化した。強度確保のため、シートを円柱状に保つリングを3本に増やし、また最上部のリングには井形の梁を通した。メゾコズム本体のポンツーンへの接続は金属ワイヤーを採用した。

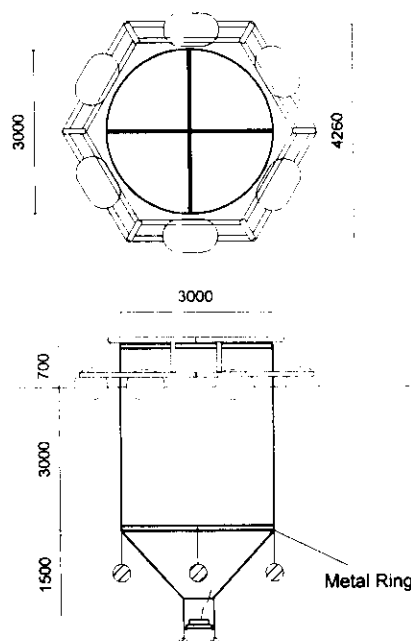


図 3 長江河口域に設置した浮遊式メゾコズム

#### 4. リン負荷によるメゾコズム生態系への影響

##### (1) 背景

長江河口域は、長江から大量に流入する栄養塩によって生物生産が高く豊富な漁業資源に恵まれているが、近年は有害藻類の赤潮発生が多数報告されている。現在の長江河口域及びその周辺海域は、窒素濃度が非常に高く、その結果、植物プランクトンの増殖に必要なリンが相対的に欠乏している。高 N/P 比環境をもたらす要因としては、長江流域の農業生産にリン含有量の低い肥料が大量に使用されていることやリンが長江

河川水に多量に含まれる流砂に物理化学的に吸着し河口付近に堆積除去されてしまうなどの理由が挙げられる。このように N/P 比が高い海域においては、高 N/P 比環境に耐性のある植物プランクトン種が優先的に増殖することがしばしば議論されており、赤潮発生の原因の一つであると考えられる。一方で、長江流域の開発増大に伴い、栄養塩等の汚濁負荷の増大や質の変化、特に巨大ダム completion によるシルト減少に伴ってリン負荷量の増大が生じる可能性がある。

今後、人為汚濁負荷量規制などの海洋環境管理を推進していくためには、現在及び過去の長江河口域の生態系に関する知見と共に、将来予測を行うための知見を集積していくことが求められる。このような状況を鑑み、本研究では、汚濁負荷・攪乱による生態系およびその炭素循環に対する影響について基礎的な知見を得ることを目的として、中国国家海洋局と共同で長江河口域に海洋メゾコズムを設置し、リン負荷・攪乱実験を行った。

##### (2) 実験方法

1997年10月10日～10月17日及び1998年5月19日～5月26日の秋季、春季それぞれ8日間に亘って、長江河口域嵊泗列島の西緑花山島沿岸(北緯 30°50'、東経 122°37' 図 4)においてリン添加メゾコズム実験を実施した。

メゾコズム設置にあたっては、最初に調査船(中国国家海洋局調査船海艦 49号、排水量約 1000t)船首で錨を打ち、船体が常に潮流方向に平行に保たれるようにした。続いて、調査船クレーンを用いて2基の浮遊式メゾコズム(それぞれリン添加系および対照系用)を船体横の海上に降ろし、開閉器を開けて海水を導入・隔離した。メゾコズムは予め船係留用ロープで調査船後部と繋いでおき、水塊隔離後、海流と共に船尾へと移動させた(図 5)。本海域は、潮汐の影響を強く受け、その周期に伴って潮流方向が逆転する。船首で投錨することによって、メゾコズムを常に船尾に係留しておくことが可能となると考えた。

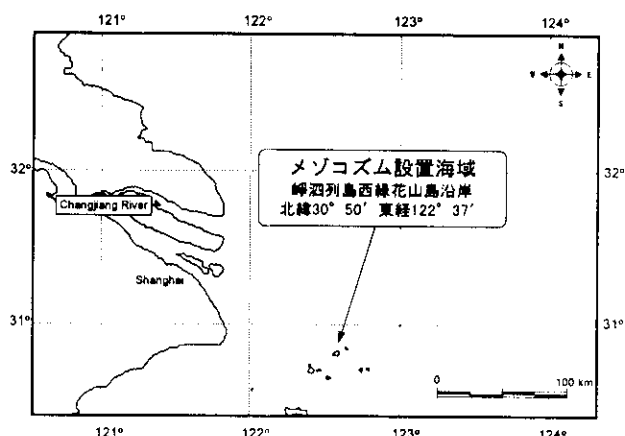


図 4 メゾコズム設置海域



図 5 メゾコズム係留の様子

水塊隔離直後(day 0)の栄養塩濃度を船上で簡易測定し、日没後、2基のメゾコズムの内1つに、N/P比が10~20の範囲を目安にリン酸塩( $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )を添加した。リン添加前の初期(day 0)および翌日以降の毎朝(day 1~)、対照系及びリン添加系メゾコズム1m深からそれぞれバンドン採水を行い、栄養塩濃度(Bran & Luebbe オートアナライザーで)、粒子態有機炭素・窒素(POC、PON)(Fisons CHN アナライザーで)、溶存有機炭素(DOC)(島津 TOC メータで)、溶存無機炭素(DIC)(クーロメータで)色素量(島津 HPLC システムで)、植物・動物プランクトン種及び個体数(光学顕微鏡で)、細菌・ピコプランクトン(蛍光顕微鏡及びフローサイトメータで)、光合成( $^{13}\text{C}$ 法で)等の測定(船上では前処理)を行った。水温、塩分、pH、溶存酸素(DO)のメゾコズム内側及び外側の鉛直分布を多項目水質測定器(Hydrolab 社 Surveyor)で行った。

植物プランクトン食物連鎖及び微生物食物連鎖における炭素の伝達・循環を計測するために、炭素安定同位体トレーサ実験を行った。各メゾコズムから採取した試水をそれぞれ4.5lの透明な2個のポリカーボネート製ボトルに移した。光合成食物連鎖(光合成経路)計測のため、1つのボトルには $^{13}\text{C}\text{-NaHCO}_3$ を約20mg/l(DIC濃度の約10%に相当)を添加した。別のボトルには微生物食物連鎖(細菌経路)計測のため、 $^{13}\text{C}\text{-glucose}$ を約5mg/l濃度(沿岸域細菌群のグルコース同化速度が飽和する濃度)で添加した。トレーサ添加後、ポンプで現場海水を常に供給できる船上に準備した海水槽にボトルを沈め、4時間の現場培養を行った。培養後、懸濁粒子を200、100、20、10  $\mu\text{m}$ のナイロンネット、続いてGF/Fフィルター(孔径0.7 $\mu\text{m}$ )で捕集した。ネットに捕集した懸濁粒子は、ろ過海水で再懸濁した後、GF/Cフィルターに捕集された。各粒径画分中のPOC濃度と炭素安定同位体比( $^{13}\text{C}$  atom%)の計測をCHNコーダー(Fisons)と安定同位体比質量分析計(Finnigan MAT)を直結したシステムで行った。全画分粒子への $^{13}\text{C}$ ラベル蓄積量に対する $>100\mu\text{m}$ 画分粒子への $^{13}\text{C}$ ラベル蓄積割合を動物プランクトンへの炭素伝達率(PLT; percentage label transfer)として定義した(次式)。PLTは動物プランクトンの相対的な捕食活性を表す<sup>13)</sup>。

$$\text{PLT}(\%) = \left( \frac{{}^{13}\text{C}_{\text{ex}, >100\mu\text{m}}}{{}^{13}\text{C}_{\text{ex}, \text{all}}} \right) \times 100$$

ここで ${}^{13}\text{C}_{\text{ex}, >100\mu\text{m}}$ 及び ${}^{13}\text{C}_{\text{ex}, \text{all}}$ はそれぞれ $>100\mu\text{m}$ 及び $>\text{GF/F}(>0.7\mu\text{m})$ 画分粒子中の $^{13}\text{C}$ 蓄積量である。

秋季の実験は島地形による海流・潮流の影響を受けにくい島の北側(外洋側)で行ったが、day 1夕方の海況悪化(平均波高約4m)によって、2基のメゾコズムの内対照系として設定したメゾコズムが外部からの海水侵入を受けた。水没の危険性があったため、直ちに回収した。したがって秋季実験については対照系のデータを採用することができず、代わってメゾコズム外部表層の試料採取を行い、上述した測定項目の一部について分析を行った。秋季のday 6に再び海況が悪化し、リン添加系のメゾコズムも破損する可能性が出てきたため、メゾコズムを波高の低い島の南側に水塊を隔離したまま曳航した。春季の実験では初めから島の南側で行い、リン添加系および対照系の試料を採取することができた。

### (3) 結果

#### ①メゾコズム水塊の安定性(水温・塩分)

秋季リン添加系のメゾコズムは平均23.0 $^{\circ}\text{C}$ 、春季は19.6 $^{\circ}\text{C}$ であった(図6)。メゾコズム内部と外部(水深0~5m平均値)水温の変動は同期していた。メゾコズム外の塩分は、26.4~30.3‰(秋季)および



25.3~30.6‰(春季)の範囲で変動した。本実験海域は潮流の速さ・方向の変化に応じて、長江淡水の影響の大きさが変動していたと思われる。一方、メゾコズム内の塩分は、25.0~26.5‰(秋季リン添加系)および 28.1~28.7‰(春季リン添加系)であった。したがって、隔離した水塊は、本海域を取り巻く水塊の中では、長江河川水の影響を強く受けていたものであると言える。

春季メゾコズムの塩分変動幅はリン添加系及び対照系で各々約 0.6‰及び 0.2‰であった。メゾコズム水塊が外部と殆ど交換が無かったと言える。一方、秋季の塩分は微増傾向にあり、完全な隔離水塊を形成できなかったことを意味していると考えられる。これは、高波による上部からの海水の侵入などが有ったためと考えられた。

メゾコズム内の水温及び塩分等の鉛直分布はほぼ一様な値を示し、したがってメゾコズム水塊はほぼ均一に混合されていたと考えられた。

## ②栄養塩動態

秋季メゾコズム(リン添加系)の初期の栄養塩濃度は、 $\text{NH}_4^+ = 0.5\mu\text{M}$ 、 $\text{NO}_3^- = 24\mu\text{M}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} = 0.65\mu\text{M}$ 、 $\text{Si(OH)}_4 = 40.2\mu\text{M}$  で、N/P(元素)比は約 38 でだった。また春季メゾコズム(リン添加系)では、 $\text{NH}_4^+ = 1.2\mu\text{M}$ 、 $\text{NO}_3^- = 16\mu\text{M}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} = 0.18\mu\text{M}$ 、 $\text{Si(OH)}_4 = 29\mu\text{M}$  で、N/P 比は約 94 であった。両季節ともに、Redfield 比と比べてかなり高い N/P 比条件であった(図 7)。

$\text{PO}_4^{3-}$  添加により、翌朝(day 1)には  $3.1\mu\text{M}$ (秋季)及び  $2.2\mu\text{M}$ (春季)となったが、直ちに減少し始め、day 5(秋季)及び day 6(春季)にはそれぞれ  $0.51\mu\text{M}$ 、 $0.16\mu\text{M}$  と初期濃度以下となった。 $\text{NO}_3^-$  濃度も  $\text{PO}_4^{3-}$  と共に減少し、秋季には day 5 で  $<0.1\mu\text{M}$ (定量限界以下)、春季には day 6 で  $<0.1\mu\text{M}$  となった。これは従来考えられている栄養塩摂取速度よりも高い速度であり、植物プランクトンの活発な増殖を示している。N/P 比は、リン添加翌朝に 7.2(秋季)及び 8.0(春季)と設定されたが、その後も徐々に減少し続け、秋季には最小 1.2 まで、春季には 6.4 まで低下した。また  $\text{Si(OH)}_4$  濃度は、秋季では  $40.2\mu\text{M}$ (day 0)から  $0.7\mu\text{M}$ (day 5)まで減少しほぼ枯渇状態になったが、春季では  $28.5\mu\text{M}$  から  $9.9\mu\text{M}$  への減少に留まった。後述するが、秋季には珪藻類が優占したのに対し、春季には渦鞭毛藻が卓越した。 $\text{Si(OH)}_4$  の減少速度の違いは優占種の違いに起因する。

春季の対照系メゾコズムにおける  $\text{PO}_4^{3-}$  及び  $\text{Si(OH)}_4$  濃度はそれぞれ  $0.14\sim 0.16\mu\text{M}$  及び  $27.2\sim 25.9\mu\text{M}$  でほとんど変化が無かった。また  $\text{NO}_3^-$  濃度は、初期濃度( $14.5\mu\text{M}$ )から徐々に減少し対照系実験最終日(day 6)に  $9.9\mu\text{M}$  となった。 $\text{NO}_3^-$  減少速度は、リン添加系と比較すると明らかに低く、対照系における  $\text{NO}_3^-$  摂取がリンの欠乏によって抑制されていたことを示している。

秋季のメゾコズム外部表層の栄養塩は大きく変動した。 $\text{PO}_4^{3-}$  濃度の変動幅は  $0.14\sim 0.80\mu\text{M}$ 、 $\text{NO}_3^-$  は  $8.6\sim 26.3\mu\text{M}$ 、 $\text{Si(OH)}_4$  は  $15.2\sim 47.1\mu\text{M}$  であった。また  $\text{NO}_3^-$  と  $\text{Si(OH)}_4$  濃度には強い正の相関があった(回帰係数  $>0.99$   $n=8$ )。また塩分が低いほど  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Si(OH)}_4$  濃度が高い傾向がみられた。長江河

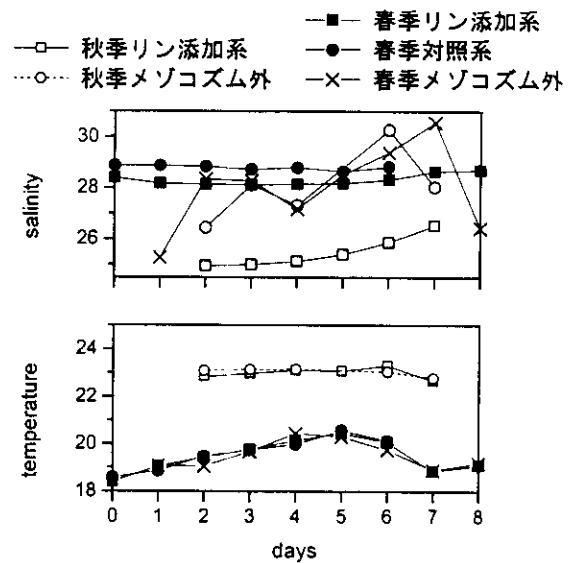


図 6 メゾコズム内部(1m 深)及び外部表層の水温(°C)・塩分(‰) 経日変化

川水には陸起源の珪素が豊富に含まれており、本海域の  $\text{Si(OH)}_4$  濃度は河川水の影響の大きさに応じて変動していたと考えられる。 $\text{NO}_3^-$  と  $\text{Si(OH)}_4$  のバランスが概ね保たれていたと言うことは、おそらく植物プランクトンによる長江起源の栄養塩の摂取が非常に少なかったことを示すと思われる。また本海域は、時折、流砂を多く含む濁水が浸入してくるが、透明度は概ね 1~2m 程度、濁度は 1.5~3mg/l 程である。したがって、本海域の植物プランクトンは光制限よりも寧ろリン制限によって  $\text{NO}_3^-$  摂取が妨げられていたと考えられる。

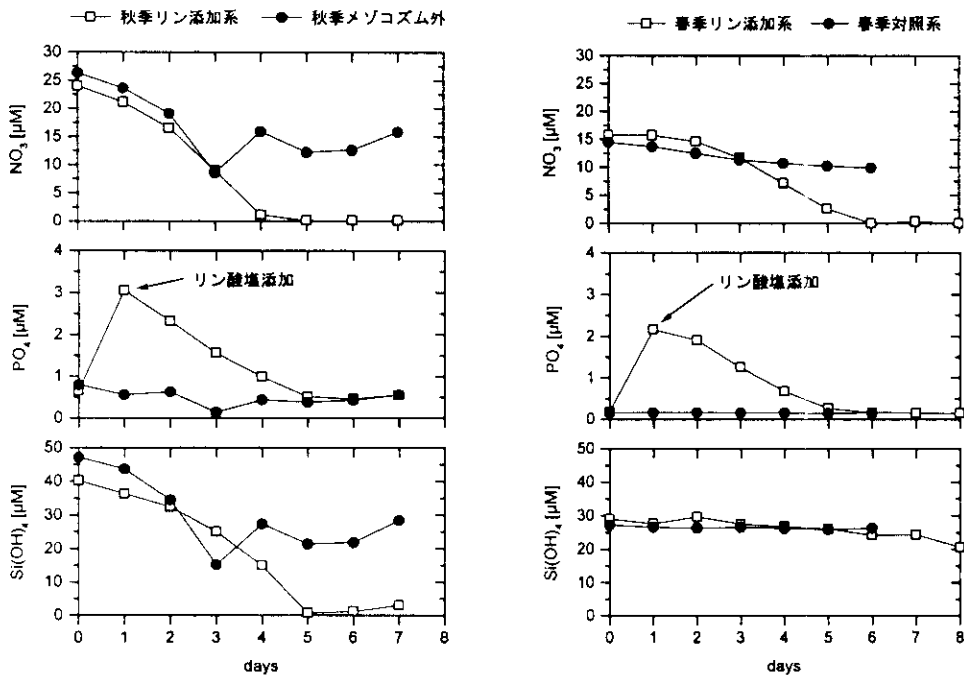


図 7 秋季（左）および春季（右）の栄養塩濃度経日変化

### ③秋季メゾゾムにおける生物量動態

秋季メゾゾムに現場生態系を捕獲した初期(day 0)には、生物量を示す POC(粒子態有機炭素)は 0.42mgC/l であった(図 8)。栄養塩の急速な摂取により植物プランクトンは増殖し、day 6 には、POC は 1.78mgC/l に達した。光合成速度は、リン添加した翌日(day 1)で最大(39.4 $\mu\text{gC/l/h}$ )に達し、day 4 まで高い水準を保った(平均 34.5 $\mu\text{gC/l/h}$ )が、day 6 以降は著しく低下し、4.0~4.8 $\mu\text{gC/l/h}$  に留まった(図 8)。POC も day 6 から day 7 にかけては、1.78mgC/l から 1.00mgC/l まで減少した。

植物プランクトンは最初から珪藻類(特に *Skeletonema costatum*)が卓越し、細胞数の9割以上を占めた。珪藻細胞数は 1.4 $\times 10^2$ cells/ml(day 1)から次第に増加し、day 5 に最大に達した(1.0 $\times 10^3$ cells/ml)。最大に達した後、急激な減少がみられ、最終日 day 7 には 0.5 $\times 10^2$  であった。Chl.a 濃度は珪藻類細胞数と同様な変化を示した。4.8  $\mu\text{gChl.a/l}$ (day 1)から 18.7 $\mu\text{gChl.a/l}$ (day 4)まで増殖し、day 5 から day 6 にかけて急激に減少し、day 7 では 4.0 $\mu\text{gChl.a/l}$  となった。

大型の動物プランクトン(100 $\mu\text{m}$  ネット試料)として、主に橈脚類及び尾虫類が出現した(図 8)。橈脚類(*Paracalanus* sp.及び *Oithona* sp.が優占)は、11 inds/l(day 1)から増加傾向を示し、72 inds/l(day 7)に達した。尾虫類(*Oikopleura* sp.)は day 3 から観察され始め、day 6 に最大(39 inds/l)となった。

小型の動物プランクトン(20-100 $\mu\text{m}$  ネット試料)として、橈脚類幼生、尾虫類、繊毛虫が出現した(図 8)。このうち、尾虫類(*Oikopleura* sp.)は day 3(54 inds/l)から急激な増殖を示し、day 5に  $6.5 \times 10^2$  inds/l に達し、このサイズにおける優占動物プランクトンとなった。

全菌数は  $2.0 \times 10^5$  cells/ml(day 1)から増加傾向を示し、day 3で一つのピーク( $2.2 \times 10^6$  cells/ml)、day 7で最大( $8.3 \times 10^6$  cells/ml)に達した(図 8)。藍藻類は day 1( $1.2 \times 10^4$  cells/ml)から day 2( $3.2 \times 10^4$  cells/ml)にかけて僅かに増加するが、その後 day 5( $6.8 \times 10^3$  cells/ml)まで大きく減少した(図 8)。day 6以降は初期のレベルまで回復した。

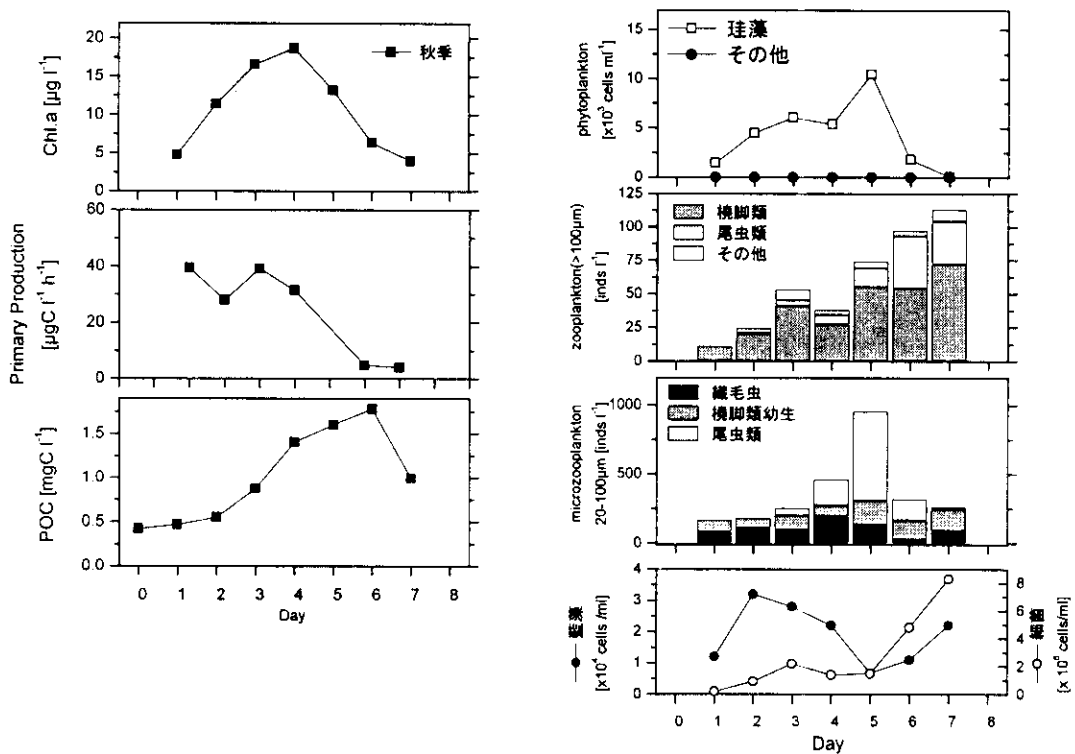


図 8 秋季リン添加系メゾコズムの生物動態

#### ④春季メゾコズムにおける生物量動態

春季メゾコズムの対照系及びリン添加系の初期(day 0)POC 濃度はそれぞれ 0.55 mgC/l 及び 0.22 mgC/l(図 9)、また Chl.a 濃度はそれぞれ 1.8  $\mu\text{gChl.a/l}$ 、0.8  $\mu\text{gChl.a/l}$  であった(図 9)。生物量は対照系の方が多く、二つのメゾコズムの初期状態を完全に同一にすることはできなかった。これは水塊のバッチネス等の影響を受けた為であると考えられる。

リン添加系の POC 濃度は、秋季と同様に栄養塩の消費と共に増加し、最終日の day 8 に最大値(1.29 mgC/l)に達した。光合成速度は、day 1 では  $4.1 \mu\text{gC/l/h}$  であったが、次第に増加し day 5 に最大( $53.5 \mu\text{gC/l/h}$ )となった(図 9)。その後減少し、day 8 では  $26.1 \mu\text{gC/l/h}$  であった。また期間平均は  $26.6 \mu\text{gC/l/h}$  であった。

対照系の POC 濃度は初期濃度 0.55 mgC/l に対して増減 (0.39 ~ 0.72 mgC/l、期間平均 = 0.60 mgC/l) がみられたものの、リン添加系のように明かな増加傾向は認められなかった。光合成速度は 3.5 ~ 12.1  $\mu\text{gC}/\text{l}/\text{h}$  (平均 6.8  $\mu\text{gC}/\text{l}/\text{h}$ ) の幅で推移し、平均値で見積もると、リン添加系の約 1/4 であった。Chl.a 濃度も同様に増加傾向は認められず、0.5 ~ 2.0  $\mu\text{gChl.a}/\text{l}$  の幅であった。

植物プランクトンは、リン系対照系共に初期状態から渦鞭毛藻類(特に *Prorocentrum dentatum*) が卓越した(図 10)。リン添加系の渦鞭毛藻細胞数は  $0.2 \times 10^2 \text{ cells}/\text{ml}$  (day 1) から次第に増加し day 6 に最大値 ( $2.7 \times 10^2 \text{ cells}/\text{ml}$ ) に達した。一方、対照系の渦鞭毛藻細胞数は day 1 に最小値 ( $0.3 \times 10^2 \text{ cells}/\text{ml}$ ) を示したが、day 2 ~ day 5 にかけては  $1.2 \sim 1.7 \times 10^2 \text{ cells}/\text{ml}$  の幅で変動した。また、リン添加系メゾコズムでは day 4 以降に珪藻類(特に *Skeletonema costatum*) が出現し、day 6 に  $0.8 \times 10^2 \text{ cells}/\text{ml}$  に達した。

大型の動物プランクトン(100 $\mu\text{m}$  ネット試料)として、主に橈脚類及び夜光虫(*Noctiluca scintillans*) が出現した(図 10)。リン添加系における橈脚類(*Paracalanus* sp., *Oithona* sp. 及び *Corycaeus* sp. が優占)は、day 1 の 0.5 inds/l から day 7 の 31 inds/l まで増加した。夜光虫は day 3 (36 inds/l) 以降に多く観察され、day 6 に 56 inds/l に達した。対照系の橈脚類は全体的にリン添加系に比較して現存量が高く、橈脚類は day 6 には 49 inds/l まで増加した。夜光虫の現存量はリン添加系と同等で、これも次第に増加する傾向を示した。

小型の動物プランクトン(20-100 $\mu\text{m}$  ネット試料)としては、橈脚類幼生、繊毛虫が目立って観察された(図 10)。このうち、繊毛虫類(特に *Tintinnopsis* sp.)の現存量は day 1 で非常に低かったが、day 2 に  $4.3 \times 10^2 \text{ inds}/\text{l}$ 、day 7 には  $1.6 \times 10^3 \text{ inds}/\text{l}$  に達した。一方、対照系の繊毛虫現存量は、day 1 で  $3.3 \times 10^2 \text{ inds}/\text{l}$  存在したが、その後は  $1.2 \sim 3.5 \times 10^2 \text{ inds}/\text{l}$  で大きな変化は無かった。

全菌数の初期値(day 0)は、リン添加系で  $8.1 \times 10^5 \text{ cells}/\text{ml}$ 、対照系で  $1.1 \times 10^6 \text{ cells}/\text{ml}$  であった(図 10)。リン添加系では day 6 ( $3.6 \times 10^6 \text{ cells}/\text{ml}$ ) まで増加がみられ、最終日 day 8 では  $2.9 \times 10^6 \text{ cells}/\text{ml}$  であった。対照系も僅かに増加したが、最大で  $2.2 \times 10^6 \text{ cells}/\text{ml}$  (day 4)、最終日 (day 6) では  $1.5 \times 10^6 \text{ cells}/\text{ml}$  であった。

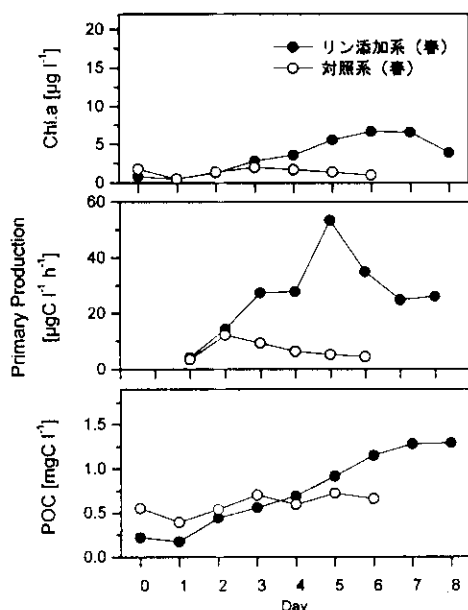


図 9 春季リン添加系及び対照系メゾコズムの生物動態 (Chl.a、光合成速度、POC 濃度)。

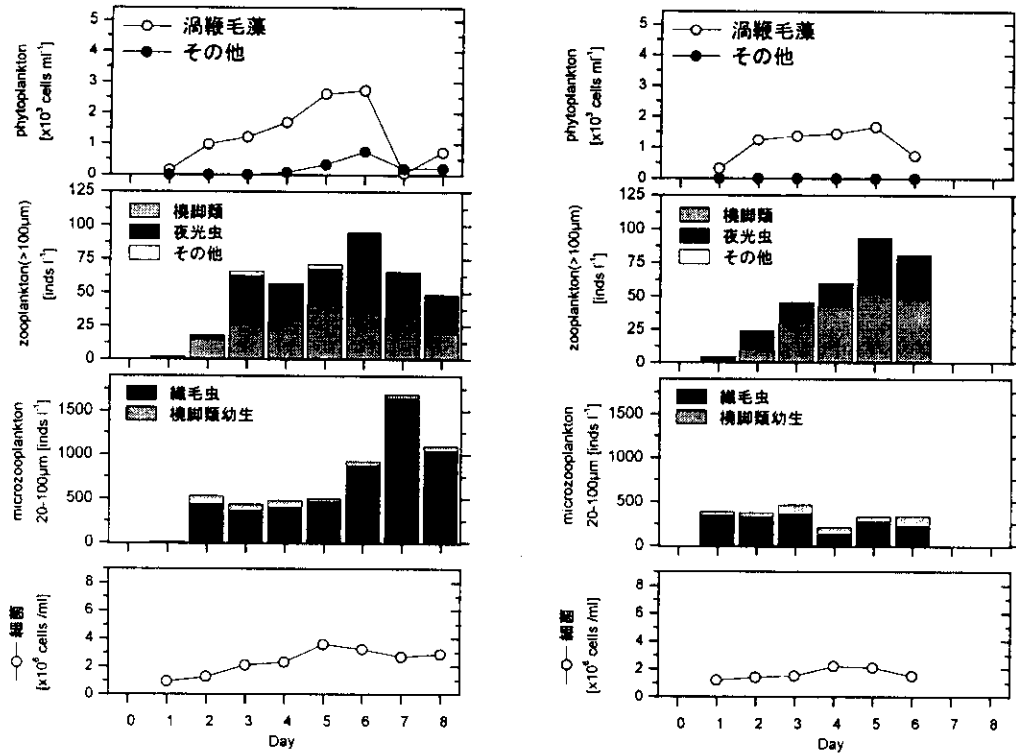


図 10 春季メゾコズムリン添加系（左）及び対照系（右）の生物量動態

### ⑤メゾコズム生物生産量へのリン負荷の影響

秋季及び春季におけるリン添加実験では、それぞれ珪藻 (*Skeletonema*)、渦鞭毛藻 (*Prorocentrum*) が優占種として存在したが、そのどちらの種もリン添加後数日で細胞数を 10 倍程度増加させた。栄養塩のうち、 $\text{NO}_3^-$  は、リン添加後、5 日 (秋季) 若しくは 6 日 (春季) で枯渇状態に近づいた。珪藻が卓越した秋季には、 $\text{Si}(\text{OH})_4$  も 5 日で  $1\mu\text{M}$  以下となっていた。一方、対照系ではこのような著しい栄養塩摂取は観察されなかった。このことから捕獲した生態系は明らかにリンが植物プランクトンの増殖制限因子であり、且つリンの添加によって容易にブルームが生じたと言える。

実験期間中毎日採取した秋季メゾコズム外の表層海水の栄養塩は、潮流変化による長江起源水の影響度の変化に応じて濃度は変動するが、 $\text{NO}_3^-:\text{Si}(\text{OH})_4$  比はほぼ一定で且つ  $\text{PO}_4^{3-}$  は低濃度 (平均  $0.5\mu\text{M}$ ) に保たれていた。これはメゾコズム隔離時と同様な栄養塩環境であり、したがってメゾコズム生態系のみならず、本海域の植物プランクトンがリン制限下におかれていたと考えられる。またメゾコズムにおける観測結果は、特異なものではなく、長江河口域へのリン負荷に対する生態系応答を実験的に実現したものであると言える。

生態系隔離初期の生物量は、POC あるいは Chl.a 濃度基準で考えると、秋季の方が多かった。例えば、day 0 の POC 濃度は、秋季が  $0.48\text{mgC/l}$ 、春季が  $0.22\text{mgC/l}$  であり 2 倍程度の差がある。しかし光合成速度の期間平均はそれぞれ  $24.4$  及び  $26.6\mu\text{gC/l/h}$  でほぼ等しい。また POC の最大値 (秋季は day 6 に、春季は day 8) から初期値 (day 0) を差し引いた値は、それぞれ  $1.36$  及び  $1.07\text{mgC/l}$  であり、これらの差も光合成平均値と同様に小さい。POC の差は、水塊隔離後に植物プランクトンが栄養塩摂取

によって新たに生産した有機炭素と考えることができる。両季節共に、実験の最終日には窒素あるいはシリカが枯渇した状態だったと考えられ、生産された有機物が分解過程を経て再生産過程に移らない限り、これ以上の生物量(POC)増大はないと推定される。したがってメゾコズム(あるいは本海域の)生態系は、人為的なリン負荷によって N/P 比を約 8 にすると、約 1 週間で硝酸態窒素あるいはシリカ(秋季のみ)が枯渇するまで生物量が増大し、且つその増大量は約 1mgC/l であることが示された。

⑥植物プランクトン優占種の違いによる栄養塩摂取の差

秋季、春季の植物プランクトン現存量や優占種に大きな違いがあったのにも関わらず、メゾコズム生態系の総生物生産は両季節でほとんど同じであった。この観測結果について、それぞれ優占した植物プランクトン種の増殖動態(Chl.a あたりの光合成速度(比光合成速度)と栄養塩摂取速度)および栄養塩濃度から考察する。

比光合成速度はリン添加直後(day 1)では両季節で殆ど同じであったが(秋季=8.2 $\mu$ gC/Chl.a/l/h、春季=8.8 $\mu$ gC/Chl.a/l/h)、day 2 以降に大きな差がみられた(図 11)。秋季の比光合成速度は、day 2 に 2.4 $\mu$ gC/Chl.a/l/h を記録し、その後も減少を続けて day 6 には 0.8 $\mu$ gC/Chl.a/l/h となった。一方、春季は day 2 で一旦 11.1 $\mu$ gC/Chl.a/l/h まで上昇し、その後緩やかに減少している。

秋季の比光合成速度が急激に低下したのは、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>あるいは Si(OH)<sub>4</sub> 濃度の減少あるいは栄養塩バランス(e.g. N/P 比)などの栄養塩環境の変化によるものと考えられる。初期に生物量の多い秋季の栄養塩摂取速度は、例えば春季に比べて急激な NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度の減少が認められる。また両季節の生物量初期濃度の差に加え、秋季に卓越した *Skeletonema costatum* が春季の *Prorocentrum* sp.に比べてリン添加に対して敏感に応答していたことも原因として挙げられるだろう。*S. costatum* は、沿岸域における栄養塩負荷に素早く応答し赤潮を形成し易い種として知られている。例えば東京湾での *S. costatum*

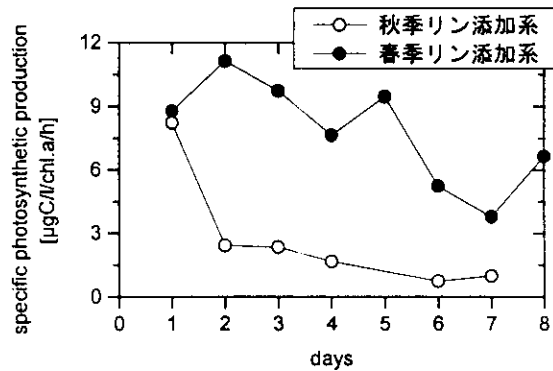


図 11 秋季・春季リン添加系メゾコズムにおける比光合成速度の経日変化

のブルーム形成に関する報告によると、細胞体積あたりの比光合成活性はブルーム初期に最も高く、ブルームピーク時に最小になったという<sup>14)</sup>。本研究でも比光合成速度は初期に最大値を示し、*S. costatum* 現存量のピークは day 5 に観察された。day 5 での比光合成速度は最小値に近い(day 5 は光合成データ欠損の為、day 4 及び day 6 の値から類推)。さらに Chl.a あたりの NO<sub>3</sub><sup>-</sup>減少速度について秋季と春季を比較すると、秋季では day 0 から day 1 にかけての減少が最大(0.61  $\mu$ M /Chl.a /day)であったのに対し、春季は day 3 から day 4 にかけて最大(1.27 $\mu$ M/Chl.a/day)となっていた(図 12)。

これらの結果をまとめると、秋季のメゾコズムでは初期生物量が高いという因子の他に、優占した *S. costatum* がリン添加に即座に応答していたため、期間前半までに  $\text{PO}_4^{3-}$  以外の栄養塩を枯渇させ増殖が停滞していたと言える。一方、渦鞭毛藻が卓越した春季のメゾコズムでは、生物量の少なさと共に、*S. costatum* と比べて緩やかなリン添加への応答を示した。この特性が栄養塩を直ちに枯渇させることなく、期間終了前まで春季メゾコズムの光合成活性を持続させたと言える。

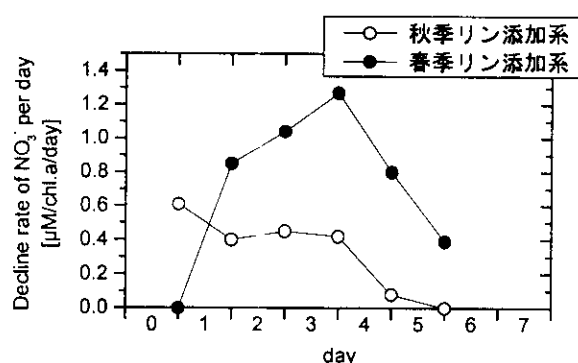


図 12 秋季・春季メゾコズムにおける比  $\text{NO}_3^-$  減少速度 (Chl.a あたり)。

メゾコズムでブルーム形成が観察された植物プランクトンは、秋季春季共に生態系捕獲時

に優占していた種のみであり、種遷移などの現象を確認することはできなかった。これはメゾコズム生態系の観察期間がそれぞれ一週間程度と短いと考えられる。しかしながら、各季節に観察された2つの植物プランクトン種のリン負荷に対する応答特性の違いから考察するならば、急激なリン負荷は *Skeletonema* ブルーム形成を誘導し易く、逆に持続的な負荷は、穏やかな栄養塩への応答を有する *Prorocentrum* ブルームを誘起すると思われる。現時点での長江河口域におけるリン負荷としては、長江起源の淡水流入が直接関わるものと、海底に堆積していた生物の分解を通じて供給されるものがある。淡水に含まれるリン負荷はどちらかと言えば常に低濃度で供給されていると言われていたから、穏やかで持続的なリン負荷であろう。一方、底泥からの供給は、シケなどで攪乱されたときに、急激に生じる可能性があると思われる。長江河口域における種遷移には、こうしたリン供給動態が関わっているのかもしれない。

### ⑦メゾコズム生態系構造と炭素循環過程

リン添加メゾコズムでは、両季節ともに、植物プランクトンのブルームに応答するように捕食者の個体数が増加した。植物プランクトンが活発に光合成生産した有機物を起点として、プランクトン食物連鎖の炭素循環量あるいは質が変化していたことが推定される。また捕食者群の構成は、秋季と春季でそれぞれ異なる特徴を有しており、一次生産者の種の違いに応じて異なる生態系炭素循環経路が形成されていたと推定される。

珪藻ブルームが発生した秋季では、大型動物プランクトン (>100µm) として全期間に亘って橈脚類が優占し、また実験中期からは尾虫類の増加が観察された。安定同位体比を用いたトレーサ実験によると、光合成経路の炭素伝達率 (PLT) は、初期 (day 1) では 0.2% 以下であったが、次第に増加して day 6 には 11% 以上を記録した (図 13)。優占した動物プランクトンのうち、尾虫類はその摂餌様式のためにナノサイズよりも大きな (20µm 以上の) 餌を直接摂食することができず、ピコサイズ (2µm 以下) の細菌や藍藻あるいはナノサイズ (2~20µm) の藻類や原生生物を摂食していると言う<sup>15)</sup>。一方、優占種であった *S. costatum* は群体 (chain) を形成し長く伸び 20µm 以上に達する。したがって、実験中期以降の高い捕食効率は橈脚類による *S. costatum* の捕食によると考えられる。秋季の実験では POC 濃度が day 6 から day 7 にかけて大きく減少しているが、これは栄養塩の枯渇による *S. costatum* の増殖停滞と共に、橈脚類による強い捕食圧によって除去されたものであると考えられる。

渦鞭毛藻 (*Prorocentrum* sp.) ブルームが発生した春季における大型動物プランクトン (>100 $\mu$ m) としては、橈脚類および夜光虫の個体数が増加した。個体数の増加から考えると秋季と同様にブルームを引き起こした植物プランクトンを強く捕食していたと考えられるが、光合成経路の炭素伝達率は珪藻ブルームの秋季に比較して著しく低く且つ増加傾向はみられず(最大 1.1%)、捕食圧が小さいことが推定された(図 13)。一方、春季はマイクロサイズ(20~100 $\mu$ m)の繊毛虫の個体数が急激に増加していた。day 1 では 10cells/l 以下であったが、day 7 には  $1.6 \times 10^3$  cells/l まで増加した。個体数の平均

( $0.6 \times 10^3$  cells/l) は秋季の 6 倍以上に相当する。光合成経路の 20-100 $\mu$ m への炭素伝達率 (PLT) は 2% (day 1) から 16% (day 8) まで次第に増大した。光合成の殆どを担っていたと考えられる *Prorocentrum* は、ほぼ 20 $\mu$ m 以下の画分に存在しており、したがって春季の光合成生産の捕食は橈脚類や夜光虫よりも寧ろ繊毛虫が重要な役割を果たしていたと考えられる。

一般に、植物プランクトンは光合成によって自ら増殖すると同時に、生産の一部を溶存有機物として細胞外に排出する (phytoplankton exudation) と言われる<sup>16)</sup>。排出有機物の多くは生分解しやすい性質をもち、細菌群はこれを分解すると共に同化して粒子態有機炭素 (POC) を生み出す (細菌生産)。リン添加メゾコズムのように植物プランクトンによる生物生産が増大すれば、一般に細胞外排出有機物量が増大し、その結果、細菌生産も増大する関係にある。春季のメゾコズムと比較すると、リン添加系及び対照系の平均溶存有機炭素 (DOC) 濃度は、それぞれ 1.13 および 1.00mgC/l であった(図 14)。また細菌群による  $^{13}\text{C}$  グルコース取り込み平均速度は、それぞれ 0.77 および 0.58  $\mu\text{g}^{13}\text{C} / \text{l} / \text{h}$  であった。DOC 濃度およびグルコース取り込み速度共にリン添加系メゾコズムが対照系メゾコズムを若干上回っており、リン添加による植物プランクトンブルームの発生と細菌活性の関連が示唆される。

さらに植物プランクトンブルームと細菌活性の関係について秋季と春季のリン添加メゾコズムを比較すると、秋季の細菌活性は明らかに春季よりも高かった(図 14)。 $^{13}\text{C}$  グルコース取り込み速度は、秋季では day 2 の  $0.68 \mu\text{g}^{13}\text{C} / \text{l} / \text{h}$  から day 7 の  $10.9 \mu\text{g}^{13}\text{C} / \text{l} / \text{h}$  まで大幅に増えた。一方、春季は相対的に低い活性で推移した。全菌数は、実験初期には両季節とも  $1 \times 10^6$  cells/ml 程度であったが、秋季の方は day 7 に  $8.3 \times 10^6$  cells/ml まで増加している。実験後半の秋季の全菌数は春季のその3倍近い。DOC 濃度も、秋季では最小 1.30mgC/l (day 2) から最大 2.22mgC/l (day 6) まで増加しているのに対し、春季では最小 0.95mgC/l (day 0) から最大 1.27mgC/l (day 8) への増加に留まっている。生分解性 DOC は細菌増殖によって消費されるから、DOC 生産は見かけの増加量よりも大きい。このことを考慮すると、秋季と春季の DOC 生産量の差はさらに大きくなると考えられる。

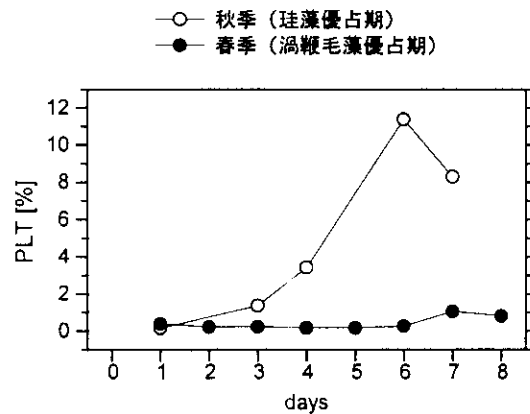


図 13 光合成経路 (>100 $\mu$ m 画分) の炭素伝達率 (PLT) 経日変化 (共にリン添加系メゾコズム)



両季節の光合成速度の平均はほぼ等しいから、DOC の生産量の差は優占した植物プランクトン種の違いや生理状態の違い、あるいは捕食などを通じて引き起こされていたと考えられる。秋季の比光合成速度及び栄養塩摂取速度(例えば  $\text{NO}_3^-$ )は実験前半で高く後半で低下した。一方、春季のそれらは実験中期で最大値を与え、光合成生産が穏やかに増大する傾向を示した。この違いは植物プランクトン種の違いによってもたらされたと考えられるが、生分解性の DOC(つまり細菌増殖につながる DOC)が光合成生産と連動しているならば、秋季の生分解性 DOC 生産は前半から活発に生じていたと考えられる。また秋季の実験後半(day 4~day 7)には特に急激な DOC 増大がみられたが、この期間の *S. costatum* に対する橈脚類の捕食は非常に活発であった。橈脚類の DOC 排泄あるいは捕食動作(餌を食べ散らかすような動作; sloppy feeding)によって餌細胞組織から DOC 滲出が生じていた<sup>17)</sup>ことが推定される。一方でこの期間の *S. costatum* の比栄養塩摂取速度は低く、個々の植物プランクトン細胞の活性が低下していたと考えられる。ある研究では、栄養塩条件の悪化する珪藻ブルームの後半では、植物プランクトン細胞は unhealthy な状態となり、蓄積性の高い半分解性 DOC (semi-refractory DOC)を排出すると報告されている<sup>18)</sup>。おそらく実験後半の多量の DOC 蓄積は、*S. costatum* から排出された半分解性 DOC の寄与も大きいと考えられる。

秋季メゾコズムにおける細菌生産の増大は細菌生産を起点とする食物連鎖にも大きな影響を与えていた。秋季および春季の細菌経路における $>100\mu\text{m}$  以上の生物への平均の炭素伝達率(PLT)はそれぞれ 0.94%および 0.59%、また  $20\sim 100\mu\text{m}$  へはそれぞれ 6.1%および 5.7%であった(図 15)。全般に伝達率は秋季の方が高く、細菌生産が高次栄養生物に捕食・伝達されていたことを示している。特に、秋季の day 4 には  $20\sim 100\mu\text{m}$  への伝達率は 14%に達した。day 4 から day 5 にかけては、 $20\sim 100\mu\text{m}$  画分の尾虫類の現存量が大きく増加しており(図 15)、細菌生産の摂取を通じて尾虫類が増殖したことが示唆される。細菌現存量は、day 4 から day 5 にかけて殆ど変化がないが、これは尾虫類などによる捕食圧と細菌の増殖が拮抗した為であると考えられる。細菌と同程度のサイズをもつ藍藻類の現存量変化をみると、day 4 から day 5 にかけて大きく減少しており、細菌への捕食圧の大きさを示唆している。また  $20\sim 100\mu\text{m}$  画分の尾虫類は、短期間に成長して実験後半には $>100\mu\text{m}$  画分で個体数を増やしている。 $>100\mu\text{m}$  以上の細菌経路の炭素伝達率は実験後半で比較的大きな値を示しているが、 $20\sim 100\mu\text{m}$  画分ほどではない。これは尾虫類が体長長の増加と共にピコサイズの餌を効率よく捕食できなくなる<sup>19)</sup>為であると考えられる。細菌現存量およびグルコース取り込み速度が実験の最後に異常な程増大したのは、細菌への捕食圧が低下したことも原因として挙げられるだろう。

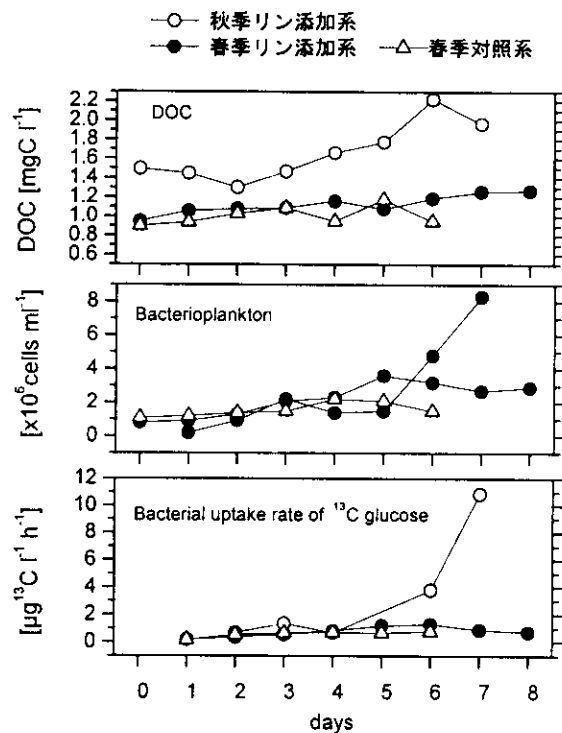


図 14 DOC 濃度、細菌数、細菌群のグルコース同化速度

一方、春季における細菌経路の炭素伝達率は、秋季のように大きく変動する要因(細菌を直接捕食できるような摂餌様式をもった動物プランクトンの出現など)が乏しかった。20~100 $\mu\text{m}$  画分への伝達率が次第に増大する傾向にあるが、これは繊毛虫がナノサイズの原生生物(例えば heterotrophic nanoflagellate)を介して細菌生産を利用していたことを示唆している。しかしながら繊毛虫の増殖を支えていたのは主に渦鞭毛藻であり、秋季の尾虫類のように細菌生産に大きく依存していたとは考えられない。

#### (4)まとめ

秋季および春季の長江河口域生態系をメゾコズムを用いて隔離し、リン添加による植物プランクトン増殖の可能性と生態系物質循環に与える影響について検討した。リン添加は N/P 比=8 となるように行った。その結果、秋季は珪藻 (*Skeletonema*) が、春季は渦鞭毛藻 (*Prorocentrum*) が増殖して

ブルームを形成した。春季対照系メゾコズムでは、このような植物プランクトン増殖は認められず、したがって長江河口域生態系へのリン添加は、植物プランクトンブルームを容易に引き起こすことが示唆された。

リン添加メゾコズムにおける光合成速度の期間平均は両季節共にほぼ類似し、また POC としての生物量増加は共に約 1mgC/l であった。この増加量は水塊隔離時の生物量の約2倍に相当し、優占種の違いに関わらず、本海域へのリン負荷は急激な生物量増大を招くと考えられた。

リン添加による栄養塩バランスの変化に対する応答速度は、優占した植物プランクトンによって異なっていた。*Skeletonema* はリン添加直後から高い増殖活性(Chl.a あたりの光合成速度)を示したが、*Prorocentrum* は数日経過したのちに活性が高まった。この増殖特性の差によって、秋季では実験開始後 2~3 日で栄養塩(硝酸及び珪酸)が枯渇し単位容積あたりの光合成量が大幅に減少したのに対し、春季の光合成量は実験後半まで穏やかに増加した。短期間のメゾコズム実験では種遷移を観察することができなかったが、こうした栄養塩に対する増殖応答特性の違いが、長江河口域における優占種決定の要因の一つであることが推定された。

リン添加メゾコズムの捕食者は、植物プランクトンブルームに反応して個体数を増した。安定同位体トレーサ実験によると、特に秋季の珪藻ブルームに対して橈脚類が大きな捕食圧を有していたことが明らかとなった。逆に春季の渦鞭毛藻に対する捕食圧は相対的に低かった。植物プランクトン現存量の変化は、栄養塩制限などによる植物プランクトン自身の増殖制限と捕食者による植物プランクトンの除去によって調節されている。したがってリン負荷に伴うブルームあるいは赤潮発生の橈脚類の捕食による抑制は、相対的に珪藻に対して効果が高く、渦鞭毛藻に対しては低いことが示唆された。さらに珪藻ブルーム時には溶

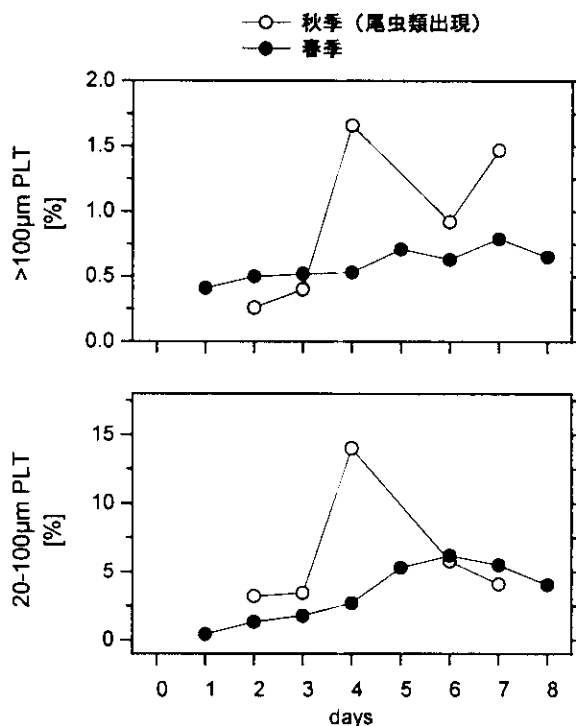


図 15 細菌経路 (>100 $\mu\text{m}$  及び 20~100 $\mu\text{m}$  画分) の炭素伝達率 (PLT) 経日変化 (共にリン添加系メゾコズム)

存有機炭素生産が盛んで且つ細菌生産も増大していた。尾虫類を高次消費者とした細菌生産を利用する生態系も発達し、細菌生産を起点とする微生物食物連鎖が生態系物質循環経路において無視できない役割を担っていたことが明かとなった。

長江河口域生態系がリン制限下にあることはしばしば議論されてきたが、現場において実際にリン添加によって生物生産が増大することを示したのは本研究が最初である。また植物プランクトンの増殖のみならず、リン添加に伴う生態系物質循環への影響を明らかにすることができた。

## 5. 船舶油負荷によるメゾコズム生態系への影響評価

### (1) 背景

長江河口域には、栄養塩などの汚濁物質のみならず、重金属や有機化学物質あるいは油などが負荷されている。河口域における油濁汚染は、長江からの負荷に加え、船舶事故等によるものが、深刻さを増していると言う。油濁汚染は漁業資源量のみならず市場における魚介類の価値に対しても大きな悪影響を与えかねない。

1997年10月に行った東海特定海区(他のサブテーマ参照)における日中共同調査では、5.6~305 $\mu\text{g/l}$ (平均73 $\mu\text{g/l}$ 、15測点)の石油炭化水素が計測されている(青島海洋大学提供による)。100 $\mu\text{g/l}$ を超える値は沖合で観測されており、往来船舶等からの漏洩によると思われる油濁汚染が発生していたと推定される。

こうした船舶からの油流出は頻繁に発生していると考えられ、海洋生態系に与える影響が危惧される。本研究では、油濁汚染がメゾコズム生態系へ及ぼす影響について基礎的な知見を得ることを目的として、中国国家海洋局と共同で長江河口域に海洋メゾコズムを設置し、船舶油を負荷した実験を行った。

### (2) 実験方法

メゾコズムを用いた船舶油添加実験は、1998年5月26日~6月1日までの7日間に亘って、先に述べた春季リン添加メゾコズム実験と同じ場所で行った。リン添加メゾコズム終了後、一旦メゾコズムを船上に回収したのち、2つのメゾコズム(それぞれ油添加系および対照系)に現場の水界生態系を新たに捕獲した。

油添加に先立って、水塊を隔離した日(day 0)の夜間にリン酸塩( $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )を両方のメゾコズムにそれぞれ最終拡散濃度 1.5 $\mu\text{M}$  となるように添加した。本海域の植物プランクトンはリン制限条件となっており、植物プランクトンの増殖力は非常に弱い。リン添加をせずに油を添加し生物活性等を観測したときに、その観測値が栄養塩制限を受けたものなのか、あるいは油による影響なのか判別が難しくなることが推定された。リンを添加することによって予め生物活性を高め、油添加による生物影響をより鮮明に捉えることができると考えた。

リン添加後、一日放置し植物プランクトンを増殖させ、且つ2つのメゾコズムの初期条件を把握することとした。油添加は day 2 の 12:00 に片方のメゾコズムに対して行った。添加した油は船舶燃料として使用される#0 ディーゼル油の水溶性画分である。油水溶性画分は以下の手順で作成した。船上に約 1000l 容のタンクを用意し、現場海水 900l とディーゼル油 100l を攪拌混合し十分に接触・静置した後、水相部をサイホンで静かに汲み上げ分離した。油飽和海水の添加量は、約 25 $\text{m}^3$  のメゾコズム水塊に対して、約 0.8 $\text{m}^3$  である。水溶性画分を用いたのは、油の疎水性成分がメゾコズムシートに付着するなどして油の動

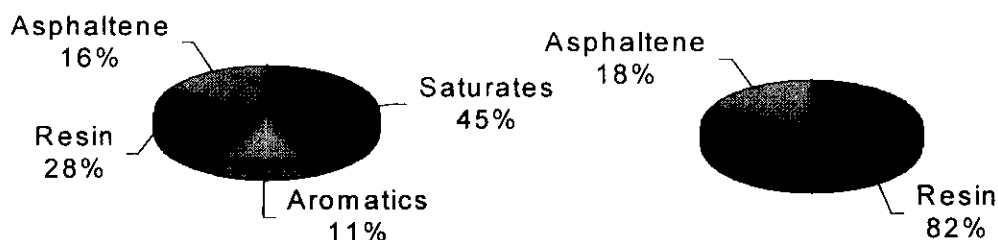


図 16 #0ディーゼル油 (左) 及びその水溶性画分の油組成

態把握が困難になるという技術的な理由もあるが、船舶事故等による流出油成分のうち、例えばオイルフェンスなどを用いた回収が不可能な成分である為に、海域の広い範囲にわたって拡散し生物に影響を及ぼすと考えられるからである。

day 0 から day 6 までの毎朝、対照系及び油添加系メゾコズムの水深 1m からそれぞれバンドン採水を行い、栄養塩濃度などの試料採取を行った。観測はリン添加メゾコズム実験での項目に加えて、油成分の分析(島津 GC/MS システム及びイアトロスキャン)を行った。また植物プランクトン活性への油負荷の影響を調べるために安定同位体トレーサを用いた2種類の回分培養実験(Test A および Test B)を行った。

Test A はメゾコズムに油を添加する直前(day 2)に行った。両方のメゾコズムから海水をそれぞれ透明なポリカーボネートボトルに 4l 採取し、 $^{13}\text{C-NaHCO}_3$  を添加して 4 時間の培養を行った。4 時間後、試水を更に 2l ずつに分割し、それぞれの片方にメゾコズムに添加した油と同じ濃度で加えた。合計 4 本の試水を 16.5 時間培養した。試水の一部を 2、5.5、16.5 時間後に採取し、生物(粒子態有機炭素)への  $^{13}\text{C}$  同化を測定した。

Test B では、油添加後の植物プランクトン増殖能を調べるために、day 4 に油添加系及び対照系メゾコズムから採取した海水に栄養塩( $\text{NO}_3^-$ を  $10\mu\text{M}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ を  $1\mu\text{M}$ )濃度で加え、更に  $^{13}\text{C-NaHCO}_3$  を添加した培養を行った。それぞれのメゾコズムから採取した試水をそれぞれ 2l ずつ 2 つのボトルに分注し、片方に栄養塩を添加した。培養試料の一部を 6、21、45、69 時間後に採取し、生物(粒子態有機炭素)への  $^{13}\text{C}$  同化を測定した。

### (3) 結果と考察

#### ①油水溶性画分の動態

実験に用いたディーゼル油の元組成は飽和炭化水素が 45%、芳香族炭化水素が 11%、残りがレジン、アスファルテンであった。船上で調整した水溶性画分には、飽和炭化水素、芳香族炭化水素がほとんど含まれず、レジンが 82%、アスファルテンが 18%を占めていた(図 16)。油投入直後の初期油分濃度(day 2 昼)は約  $2.0\text{mg/l}$  であったが、day 3 以降は約  $1.6\text{mg/l}$  でほぼ一定であった。day 2 昼の高い値は、混合が不完全であった為と思われる。また油分のバックグラウンドは約  $0.2\text{mg/l}$  であり(対照系)、添加によって油分が約  $1.4\text{mg/l}$  増加したことになる。DOC 濃度は day 2 の  $1.1\text{mgC/l}$ (添加前)から  $3.2\text{mgC/l}$ (day 3)まで増加し、この DOC 濃度も day 6 まで保たれた(図 17)。

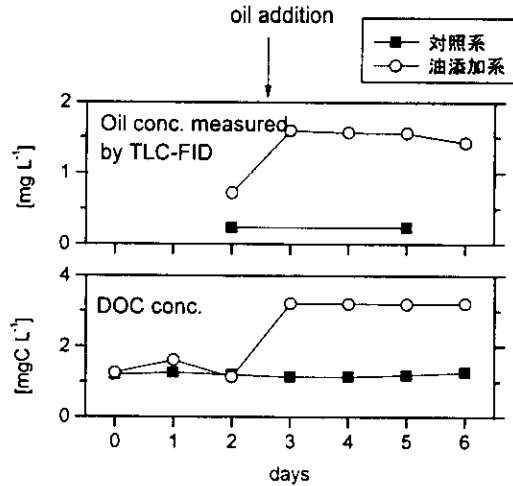


図 17 油分及び DOC 濃度の経日変化

## ②生物量動態

生態系隔離直後のプランクトン組成は両方のメゾコズムで類似していた。渦鞭毛藻 (*Prorocentrum* sp.) が植物プランクトンとして卓越し、捕食者として夜光虫及びマイクロサイズの有鐘繊毛虫の個体数が多かった。但し細胞数あるいは個体数は対照系の方が若干大きかった。初期の対照系における渦鞭毛藻細胞数は、油添加系の約2倍であった。栄養塩類の消費は対照系の方が高く、細胞数の多さによると思われる。

油添加後、対照系に比較して夜光虫及び有鐘繊毛虫個体数は明らかに、また橈脚類も若干の減少傾向が観察された。一方、渦鞭毛藻は、対照系の細胞数変化と比べると、油添加の影響は少ないように思われた(図 18)。油添加後の Chl.a あたりの光合成速度(比光合成速度)も対照系とほぼ同じであった(対照系=4.0~10.5 $\mu\text{gC}/\text{l}/\text{h}$  及び油添加系=5.0~8.6 $\mu\text{gC}/\text{l}/\text{h}$ ) (図 19)。また  $^{13}\text{C}$  トレーサを用いて測定した、光合成経路における $>100\mu\text{m}$  画分への炭素伝達率も両方のメゾコズムで実験期間を通してほぼ同じであった。

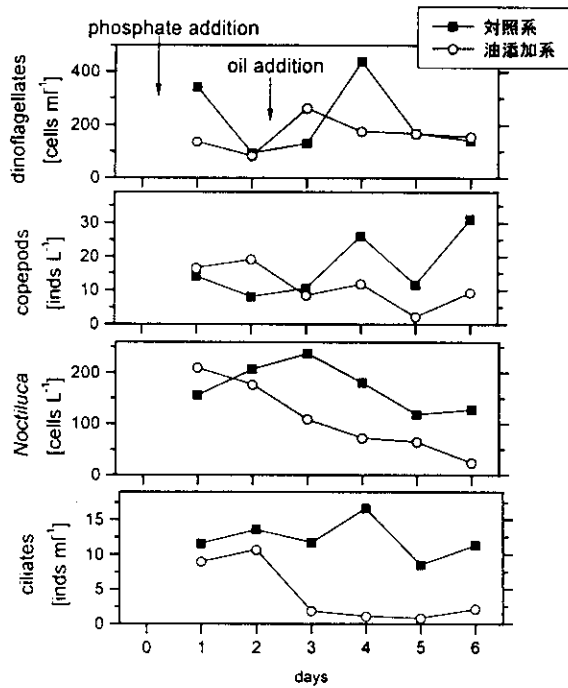


図 18 油添加実験での生物量の経日変化

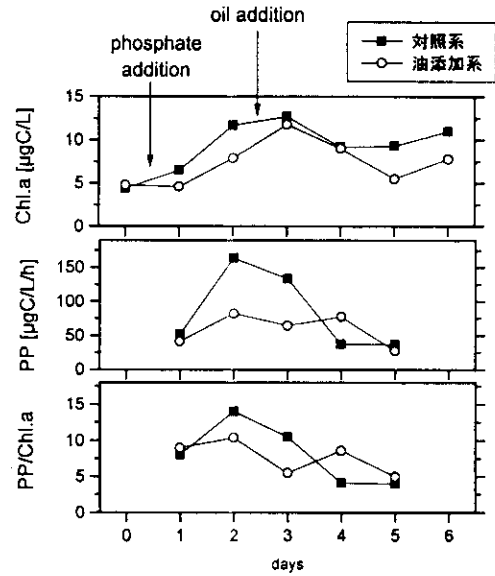


図 19 油添加実験での Chl.a、光合成速度、比光合成速度の経日変化

### ③植物プランクトン活性への影響

これらの観察結果は、本実験条件での油添加は、有鐘繊毛虫や夜光虫を除けば、プランクトン群集にさほど大きな影響を与えないように思われた。しかしながら、油添加の光合成活性への影響を調べるために行った Test A によると、植物プランクトンの光合成は明らかに油添加によって低下した(図 20)。また油添加系及び対照系の day 4 の試水に栄養塩添加して培養を行った Test B によると、対照系試水の生物が時間経過につれて  $^{13}\text{C}\text{-NaHCO}_3$  を同化蓄積したのに対し、油添加系試水では蓄積が計測されなかった(図 20)。これらの実験結果は、油水溶性画分の存在によって植物プランクトンの生理活性が低下し、栄養塩摂取が困難になることを示唆していると考えられる。また渦鞭毛藻の細胞数が両系で類似していた理由として、対照系では栄養塩濃度の低下が増殖を制限し、一方油添加系では油分の影響による光合成活性の低下が挙げられる。さらに言えば、繊毛虫は渦鞭毛藻の優占する系においては重要な植物プランクトン捕食者であると考えられるから、油による繊毛虫の衰退は油添加系における植物プランクトンの現存量維持に繋がったと考えられた。

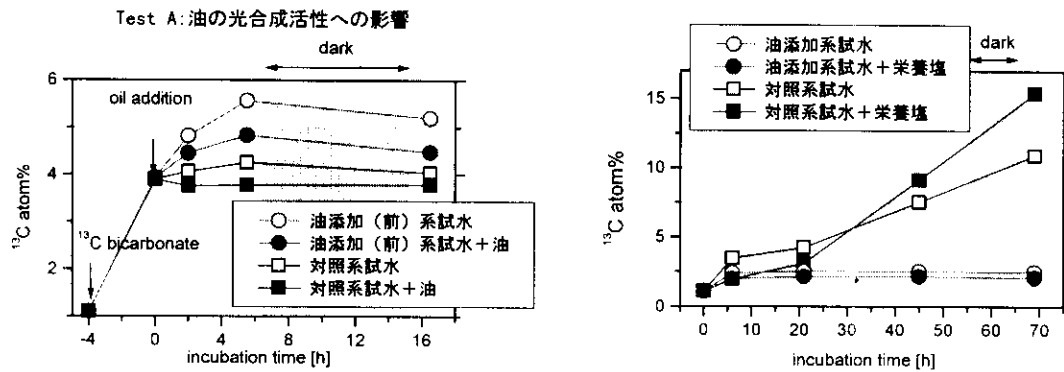


図 20 Test A 及び Test B の結果

#### (4) まとめ

春季の長江河口域においてメゾコズム生態系を構築し、#0 ディーゼル油水溶性画分添加(油分約 1.6mg/l)による生態系への影響を 7 日間に亘って観測した。油添加系と対照系における生物現存量の比較によると、繊毛虫類及び夜光虫が明かな減少傾向を示し、他の生物に比べて油水溶性画分により敏感に反応していたことが示唆された。また植物プランクトンの現存量は対照系と油添加系で大きな差を示さなかったが、 $^{13}\text{C}\text{-NaHCO}_3$  を用いた回分培養試験によると、油水溶性画分の負荷が植物プランクトンの光合成活性を減少させていたことが示された。油負荷による光合成活性低下にも関わらず、対照系と油添加系で植物プランクトンの現存量に差が生じなかったのは、対照系では栄養塩が制限となって植物プランクトン増殖が妨げられていたこと、また油添加系では光合成活性低下と捕食圧の衰退によると考えられた。本研究を通じて、長江河口域における船舶油流出事故は河口域の生物生産に直接の影響を与えることが示された。

#### 6. 本研究により得られた成果

長江河口域への汚濁・汚染負荷に対する河口域生態系への影響評価の為に、波高の高い海域に設置可能な隔離生態実験系(浮遊式海洋メゾコズム)の開発と長江河口域に構築したメゾコズムにおいて生態系へのリン汚濁及び油汚染負荷実験を行った。

浮遊式のメゾコズム開発では、瀬戸内海姫路沖に於いて蛍光色素(Rhodamine WT)をトレーサーとして用いメゾコズム水塊を混合する為の攪拌装置の必要性などについて検討した。一般に穏やかな海域に設置したメゾコズムでは遊泳力のないプランクトンを維持するためには鉛直混合装置が必要とされるが、実験の結果、波高 30~60cm 程度でメゾコズム自体の動きが内部水塊を十分に混合し、鉛直拡散係数は  $11\text{cm}^2/\text{sec}$  に達した。これは、従来隔離実験系の鉛直拡散係数として報告されてきた値の数十倍であった。長江河口域における実験海域は平均波高が 1m 程度であることから、水塊混合用の攪拌装置等は必要ないことが示された。

長江河口域における汚濁負荷実験では、生物生産の制限栄養塩となっているリンを添加し、生態系の応答及び生態系物質循環について検討した。秋季及び春季に行った実験では、両者ともリン添加(N/P

元素比を 8 に調整)のみで植物プランクトンブルームを容易に引き起こすことが示唆された。ブルームを形成した植物プランクトンは、珪藻(秋季)及び渦鞭毛藻(春季)であった。両季節とも珪酸は豊富に存在し、優占種の決定因子は珪酸塩濃度以外にあると考えられた。粒子態有機炭素量としての生物量は季節に関わらず約 1mg/l 増加し、初期生物量の2倍であった。したがって本海域へのリン負荷は急激な生物量増大を招くと考えられた。またリン添加によるブルームにตอบสนองして捕食者の個体数増大及び捕食圧(食物連鎖を通じた生態系炭素循環)の増加が観測された。しかしブルームを形成した植物プランクトン種によって捕食圧は異なり、橈脚類の珪藻(秋季)に対する捕食圧は渦鞭毛藻(春季)に対するものよりも大きかった。つまり橈脚類の捕食によるブルーム抑制は相対的に珪藻に対して効果が高く、渦鞭毛藻に対しては低いことが示唆された。さらに珪藻ブルーム下では細菌生産及び細菌生産を起点とした微生物食物連鎖が生態系炭素循環で重要な役割を果たしていたことが明かとなった。

油濁汚染実験では、船舶燃料油水溶性画分をメゾコズムに添加し、生態系への影響を観察した。観察された生物種のうち、特に繊毛虫類及び夜光虫が油添加後に個体数が大幅に減少し、添加油に敏感に影響を受けていたことが示された。また植物プランクトンの光合成活性も大きく減少したことが示され、船舶油流出事故は河口域の生物生産に直接の影響を与えることが示唆された。

今後益々増大すると考えられる長江起源の汚濁負荷が長江河口域および東シナ海の海洋生態系に与える影響を予測・評価していくことは、海洋環境管理を推進する上で重要である。これらの一連の研究を通じて、その予測・評価に必要な知見を得ることができた。

## 7. 参考文献

- 1) 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
- 2) Harada S, Watanabe M, Kohata K, Ioriya T, Kunugi M, Kimura T, Fujimori S, Koshikawa H, Sato K (1996) Analyses of planktonic ecosystem structure in coastal seas using a large scale stratified mesocosm: a new approach to understanding the effect of physical, biochemical and ecological factors on phytoplankton species succession. *Wat Sci Tech* 34:219-226
- 3) Yu G, Zhou J, Liao X (1990) The biogeochemical behaviors of pollutants and nutrients in the Changjiang Estuary and its adjacent sea area. In *Biogeochemical Study of the Changjiang Estuary* (Eds. Yu, G., Martin, JM., Zhou, J.): 1-15. China Ocean Press.
- 4) Harrison PJ, Yang YP, Hu MH (1992) Phosphate limitation of phytoplankton growth in coastal estuarine waters of China and its potential interaction with marine pollutants. In *Marine ecosystem enclosed experiments* (Eds. Wong, CS., Harrison, PJ.): 192-202. International Development Research Centre.
- 5) Edmond JM, Spivack A, Grant BC, Hu MH, Chen Z, Chen S, Zeng X (1985) Chemical dynamics of the Changjiang estuary. *Continental Shelf Res* 4:17-36.
- 6) Zhu, M., Li R, Mu X, Ji R (1997) Harmful algal blooms in China Seas. *Ocean Research*, 19: 2, 173-184.
- 7) Chinese Academy of Science, Group of Ecological and Environmental Studies on Three Gorges Project (Ed.). 1988. *Studies on the Ecological and Environmental Effects of the Changjiang Three Gorges Project and the Remedies*. Science Press (China).
- 8) Eppley RW, Koeller P, Wallace GT Jr (1978) Stirring influences the phytoplankton species composition



- within enclosed columns of coastal sea water. *J Exp Mar Biol Ecol* 32:219-239
- 9) 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
- 10) Perler AH (1988) Letter to J. Warnquist, Setting maximum dye concentrations.
- 11) Steele JH, Farmer DM, Henderson EW (1977) Circulation and temperature structure in large marine enclosures. *J Fish Res Board Can* 34:1095-1104
- 12) Mercier RS (1982) Mixing and circulation in controlled ecosystem populations experiment (CEPEX) enclosures. Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology
- 13) Koshikawa H, Harada S, Watanabe M, Sato K, Akehata T (1996) Relative contribution of bacterial and photosynthetic production to metazooplankton as carbon sources. *J Plankton Res* 18:2269-2281.
- 14) Han M-S, Furuya K, Nemoto T (1992) Species-specific productivity of *Skeletonema costatum* (Bacillariophyceae) in the inner part of Tokyo Bay. *Mar Ecol Prog Ser* 79:3. 267-273.
- 15) Alldredge AL, Madin LP (1982) Pelagic tunicates: unique herbivores in the marine plankton. *BioScience* 32:655-663
- 16) Kirchman DL, Suzuki Y, Garside C, Ducklow HW (1991) High turnover rate of dissolved organic carbon during a spring phytoplankton bloom. *Nature* 352: 612-614.
- 17) Lampert W (1978) Release of dissolved organic carbon by grazing zooplankton. *Limnol. Oceanogr.* 23:831-834.
- 18) Norrman, B., Zwifel, UL., Hopkinson CS Jr., Fry, B. (1995) Production and utilization of dissolved organic carbon during an experimental condition diatom bloom. *Limnol. Oceanogr.* 40: 898-907.
- 19) Deibel D, Lee SH (1992) Retention efficiency of sub-micrometer particles by the pharyngeal filter of the pelagic tunicate *Oikopleura vanhoeffeni*. *Mar Ecol Prog Ser* 81:25-30

[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「東海特定海区河川經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 H, Xu K, Murakami S, Kohata 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) 「Effect of Phosphorous Enrichment on Phytoplankton Blooms and the Role of Grazers in Marine Mesocosm in the Changjiang Estuary」
- ② Xu K, Koshikawa H, Murakami S, Maki H, Kohata 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) 「Impact of Discharged Fuel Oil on Plankton Ecosystems: A Mesocosm Study in the Changjiang Estuary」

(2) 論文発表

- ① Harada S, Adams EE, Takata RK :J. of Marine Environmental Engineering. (1999)  
「Upwelling seawater by a short submerged wave pump」(印刷中)
- ② Koshikawa H, Harada S, Watanabe M, Kogure K, Ioriya T, Kohata K, Kimura T, Sato K, Akehata T:  
Mar Ecol Prog Ser (1999)  
「Influence of plankton community structure on the contribution of bacterial production to  
metazooplankton in a coastal mesocosm」(印刷中)
- ③ 原田茂樹、E. エリック アダムズ、ロザリンド K. タカタ：日本水環境学会誌 22:320-322  
(1998)  
「波エネルギーを用いた浮遊型海洋メゾコズム内のミキシングに関する研究」
- ④ 越川 海、原田茂樹、渡辺正孝：Bull. Plankton Soc. Japan 46(1): 78-87 (1999)  
「溶存有機物の微生物食物連鎖を経由する高次栄養段階への伝達」
- ⑤ Koshikawa H, Xu K, Murakami S, Kohata K, Watanabe M: Proceedings of the Japan-China joint  
workshop on the cooperative study of the marine environment. (1999)  
「Effect of Phosphorous Enrichment on Phytoplankton Blooms and the Role of Grazers in Marine  
Mesocosm in the Changjiang Estuary」(予定)
- ⑥ Xu K, Koshikawa H, Murakami S, Maki H, Kohata K, Watanabe M: Proceedings of the Japan-China  
joint workshop on the cooperative study of the marine environment. (1999)  
「Impact of Discharged Fuel Oil on Plankton Ecosystems: A Mesocosm Study in the Changjiang  
Estuary」(予定)

(3) 出願特許、受賞等

なし