

D-1 陸域由来の環境負荷変動に対する東シナ海の物質循環応答に関する研究

(1) 長江河口・東シナ海陸棚域へ供給される環境負荷物質の海洋生態系を介した循環に関する研究

① 環境負荷物質の形態変化と海洋生態系物質循環との相互作用に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

流域圏環境管理研究プロジェクト	海域環境管理研究チーム	越川 海・木幡邦男・牧 秀明
	流域環境管理研究チーム	徐 開欽
生物圏環境研究領域	系統・多様性研究室	広木幹也・河地正伸
水圏環境研究領域	領域長	渡辺正孝
	土壌環境研究室	高松武次郎・越川昌美
(株)日本スーパーマップ		林 秋博・中山建平
<研究協力者>	中国 華東師範大学	陳 中原

平成14～16年度合計予算額 109,203千円
(うち、平成16年度予算額 33,393千円)

[要旨] 東シナ海への長江河川水の流入が陸棚域生態系に及ぼす影響を評価するために、2002年6月、2003年8月ならびに2004年8月に東経124～128度、北緯29度30分～32度45分の海域において海洋観測を実施した。何れの航海においても、東経124～125度上の測点表層に高濃度の溶存態無機窒素を含む長江希积水プルームが捉えられたが、低塩分水の東方への延伸範囲や藻類分布への影響は、長江洪水期前の6月の調査(2002年)と洪水期にあたる8月の調査(2003、2004年)では大きく異なった。6月の調査で東経124度50分の表層に観測された密度躍層上の長江希积水には、*Chaetoceros*、*Minidiscus comicus*等の沿岸性珪藻や高栄養塩環境を好む*Synechococcus*が観察されたが、それよりも東方の測点では暖流系沿岸水および黄海混合水が順次卓越し、藻類は表層よりも密度躍層下・有光層直上に分布が移り、また東経126度を境に外洋性種(円石藻等)へと変化した。一方、長江流量が増大する8月の調査では、長江起源の栄養塩の表層水塊への供給範囲に拡大は認められなかったものの、長江河川水の影響を受けた低塩分水塊の範囲が拡大し、北緯30度30分の測線上では東経127度まで達した。また6月から8月にかけては、季節的な水塊構造の変化と考えられる黒潮亜表層水の縁辺部から陸棚域への迫り上がりの増進や暖流系陸棚底層水の勢力の増大、黄海底層冷水の衰えがみられた。それらの水塊のバランスの変化にもなって、密度躍層下には黒潮亜表層水の影響を強く受け栄養塩を豊富に含む水塊が形成された。8月の調査における藻類分布は、6月の調査では分布範囲が長江希积水の影響を受けた海域に限定された、沿岸性の藻類(2003年の調査では*Chaetoceros*、*Pseudonitzschia*、*Thalassiosira*などの珪藻と*Prorocentrum balticum*などの渦鞭毛藻、2004年の調査では*Synechococcus*)が陸棚全域にわたって優占し、且つ各測点で躍層直上に集積していたことが特徴的であった。長江希积水による栄養塩の供給は限定的であるものの、長江希积水によって沿岸から輸送される藻類が、陸棚域では、外洋から供給される密度躍層下の栄養塩を摂取して群集を維持していたことが示唆された。

[キーワード] 長江、東シナ海、栄養塩、藻類、水塊構造

1. はじめに

近年の中国長江流域の開発は著しく、長江への栄養塩類の負荷は莫大で且つ更に増大する傾向にある。例えば1998年の長江経由の東シナ海への全窒素・全リン負荷量は、上海をはじめとする大都市起源を含めるとそれぞれ年間約147万トン、12.4万トンと試算されている¹⁾。長江から東シナ海への河川水流出量は約9800億m³/年であるから、流出淡水中の全窒素・全リン平均濃度はそれぞれ約100μM、4μMに相当する。海域へのこうした高濃度の栄養塩を含む淡水供給は長江河口域を含む東シナ海沿岸の生態系に影響を及ぼし、実際、赤潮発生頻度は1980年代から1990年代までに4倍程度増加するに至っている²⁾。さらに1995年以降では、東シナ海沿岸域における赤潮形成種が珪藻から渦鞭毛藻へと遷移する傾向が報告されており³⁾、長江流域の開発が海洋生態系に変化をもたらしている可能性が示唆される。また長江河川水の海域への影響範囲は、その流量に応じて変動する。例えば1998年夏季に発生した長江大洪水（推定最大流量86,000m³/s）では、長江起源の濁水や低塩分水が九州沿岸や日本海にまで到達した⁴⁾。つまり長江起源の豊富な栄養塩を含む淡水の流入は、長江河口域を中心とする中国沿岸域のみならず、我が国の排他的経済水域を含む東シナ海陸棚域における藻類一次生産を基礎とする生物資源の維持、海洋環境の形成に深く関与していると考えられる。

2. 研究目的

本研究の目的は、長江淡水を介して東シナ海陸棚域に輸送される栄養塩類等の環境負荷物質の動態と、それら栄養塩類を利用して増殖する藻類の分布や種の構成を明らかにし、東シナ海陸棚生態系に対する長江起源物質の寄与を評価することである。

東シナ海陸棚域の主要な水塊として、北方から張り出す黄海沿岸水、南方から迫り出してくる台湾暖流、大陸棚縁辺部から迫り上がる黒潮等が挙げられる。長江起源の栄養塩類の動態や藻類の分布を評価するうえでは、したがって、長江起源水・物質の追跡とともに、縁辺部を含めた水塊構造を把握し、栄養塩の供給ポテンシャル等について相対的な解析を行うことが求められる。

さらに長江河川流量には明瞭な季節変動が存在し、冬季に少なく（10,400m³/s：1月の過去30年平均）、7～8月にかけて最大流量（49,500m³/s）に達する（図1）。また長江起源水と競合する黄海沿岸水や台湾暖流、黒潮亜表層水なども季節的に勢力が変動するために、それらの相互関係も変化すると考えられる。そこで本研究では季節的に変動する河川水量や関連水塊の勢力の増大あるいは衰退が、陸棚域の栄養塩環境や藻類分布に及ぼす影響を検討するために、長江流量が増大する夏季（8月）及び流量が増大する前（6月）の2つの時期に海洋観測を実施した。

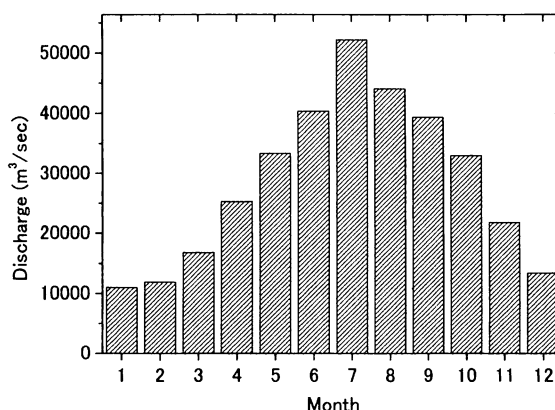


図1 長江下流の月別流量（30年平均値）⁵⁾。

長江の河川流量は夏季に多く、冬季に少ない。7月に最大流量を記録する。東シナ海陸棚域への影響は、約1ヶ月程度のタイムラグをともなって8月に最大になると推定される。

3. 研究方法

(1) 観測方法

東シナ海陸棚域～縁辺部における海洋観測は、西海区水産研究所調査船「陽光丸」を用いて実施した。平成14年度は2002年6月20日～6月28日にかけて全24測点（図2-a）、平成15年度は2003年7月28日～8月9日にかけて全27測点（図2-b）、平成16年度は2004年7月28日～8月9日にかけて全25測点（図2-c）をそれぞれ設定した。以下、各年度の航海をそれぞれYK02、YK03、YK04と略す。YK02およびYK03航海の各測点は、南北測線（North-South Line、東経124度50分前後）および東西測線（East-West Line、北緯30度30分）から、またYK04航海は東西に3測線（South Line：北緯30度30分、Middle Line：北緯31度45分、North Line：北緯32度45分）から構成される。全測点で多項目水質測定装置（アレック電子）による鉛直水質観測及び海底直上水・表層水採取を行った。また重点測点（YK02ではStn06、09、17、16、18、20、22、24の8測点；YK03ではStn06、09、11、13、15、17、20、21、23、25、27の11測点；YK04ではStn02、04、06、08、10、11、13、15、17、18、20、22、24、25の14測点）では、ロゼット・ニスキン採水器を用いた6層採水（表層、躍層直上、クロロフィル蛍光極大層、躍層下、底層、海底直上、以下それぞれSuf、CU、Fmx、CL1、CL2、Btmと略す）を行った。船上で濾過を行い化学成分分析のための溶存・懸濁態試料を調製し凍結保存した。また微生物試料は分析項目に応じてグルタルアルデヒド固定、凍結保存、フィルター捕集を行った。

また東シナ海陸棚域における3ヶ年におわたる調査に先んじて、2001年5月には中国海洋地質調査所所属の「勘407号」を用いて長江河口域の調査を実施した（図2-d、以

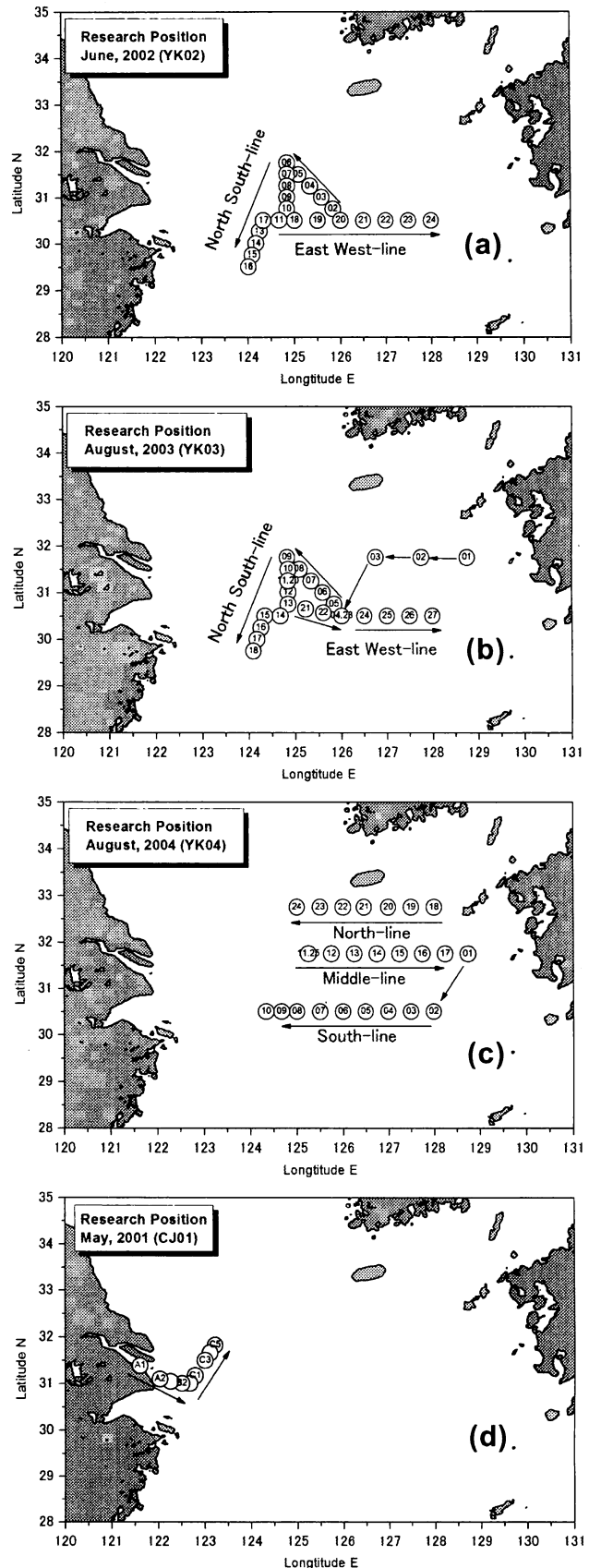


図2 東シナ海陸棚域及び河口域調査測点

下、本調査をCJ01と略す)。長江河口域調査では、多項目水質測定装置（アレック電子）を用いた鉛直水質プロファイルの取得とともに、ニスキン採水器による表層を含めた3層採水を実施し、船上にて栄養塩等の化学分析に供する試料を調整した。

(2) 分析方法

凍結保存した溶存試料で栄養塩類（オートアナライザーを用いた比色法）、溶存有機炭素（HTCO法）、懸濁態試料でクロロフィルaおよび補助色素量・組成（HPLC法）、懸濁粒子濃度（重量法）、懸濁態炭素・窒素濃度（元素分析計）、生物試料で微細藻類・細菌の現存量・種組成（蛍光顕微鏡、走査型電子顕微鏡、フローサイトメータ（以下、FCMと略す）の分析を行った。HPLC法で分析した色素は因子分析法（CHEMTAX program⁶⁾）を用い、藻類の各綱がクロロフィルaに対して占める割合を求めた。

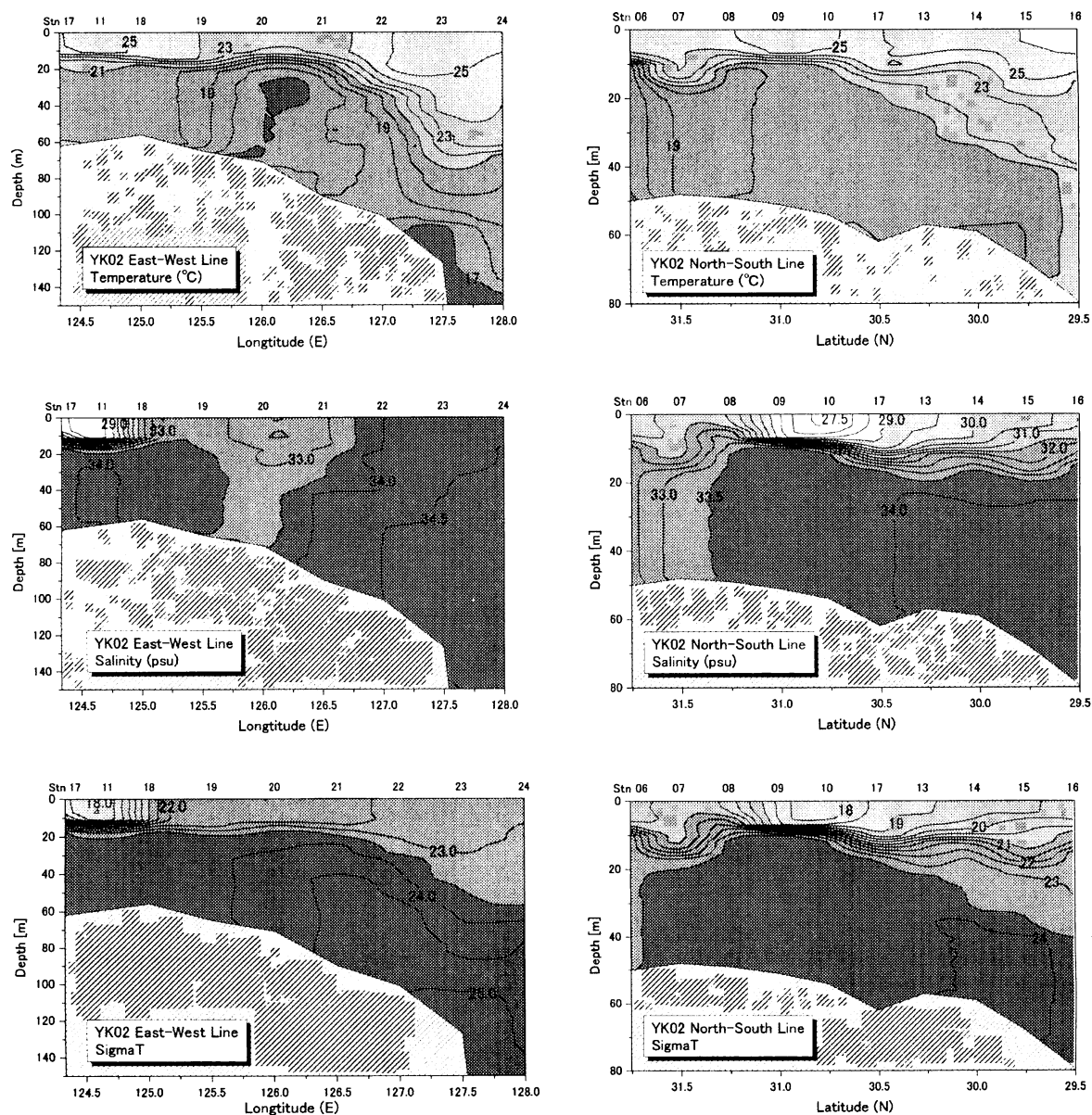


図3 2002年6月(YK02)の東西測線(左)、南北測線(右)の水温・塩分・密度分布

4. 結果・考察

(1) 長江淡水と東シナ海陸棚表層水の混合

YK02の東西および南北測線の水温、塩分、密度 (σT) の断面図を図3に示す。測点06~16に至る南北測線(東経124度50分前後)では、表層に低塩分水が存在し、水深10~20mに明瞭な密度躍層が形成されていた。このうち地理的に長江河口に近い測点06~17の躍層上には塩分31psu以下の水塊が存在し、特に測点10付近では塩分27.5psu以下が観測された。図4に2001年5月に実施したCJ01とYK02の表層水(Suf及びCU層)の栄養塩濃度を塩分に対してプロットしたものを示す。図中の直線は、CJ01の結果から得た長江淡水と陸棚表層の希釈直線である。これら栄養塩のうち、

経年・季節変化が少なく、また窒素、リンに比較して生物過程による除去影響の少ない珪酸(以下 SiO_2)に着目すると、YK02の観測値はほぼこの希釈直線上にあり、特に測点09、17の表層水は長江淡水の影響を受けた「長江希釈水」として同定された。一方、溶存無機窒素(以下DIN)とリン酸態リン(以下 PO_4)濃度は、CJ01の観測で得た希釈直線に必ずしも一致しなかった。長江河口域は塩分約25psu(東経123度付近)以降で表層懸濁物が著しく減少(光制限因子の減衰)し、藻類の増殖が活発になる。その結果、DIN、 PO_4 の取り込み除去が増大し、希釈直線よりもそれらの濃度を減少させたと考えられた。またN/P比は河口域から塩分25psu付近まで約100で一定であるのに対し、測点09、17では PO_4 濃度は $0.1 \mu\text{M}$ 以下まで減少するために、N/P比は最大約200に達した。長江か

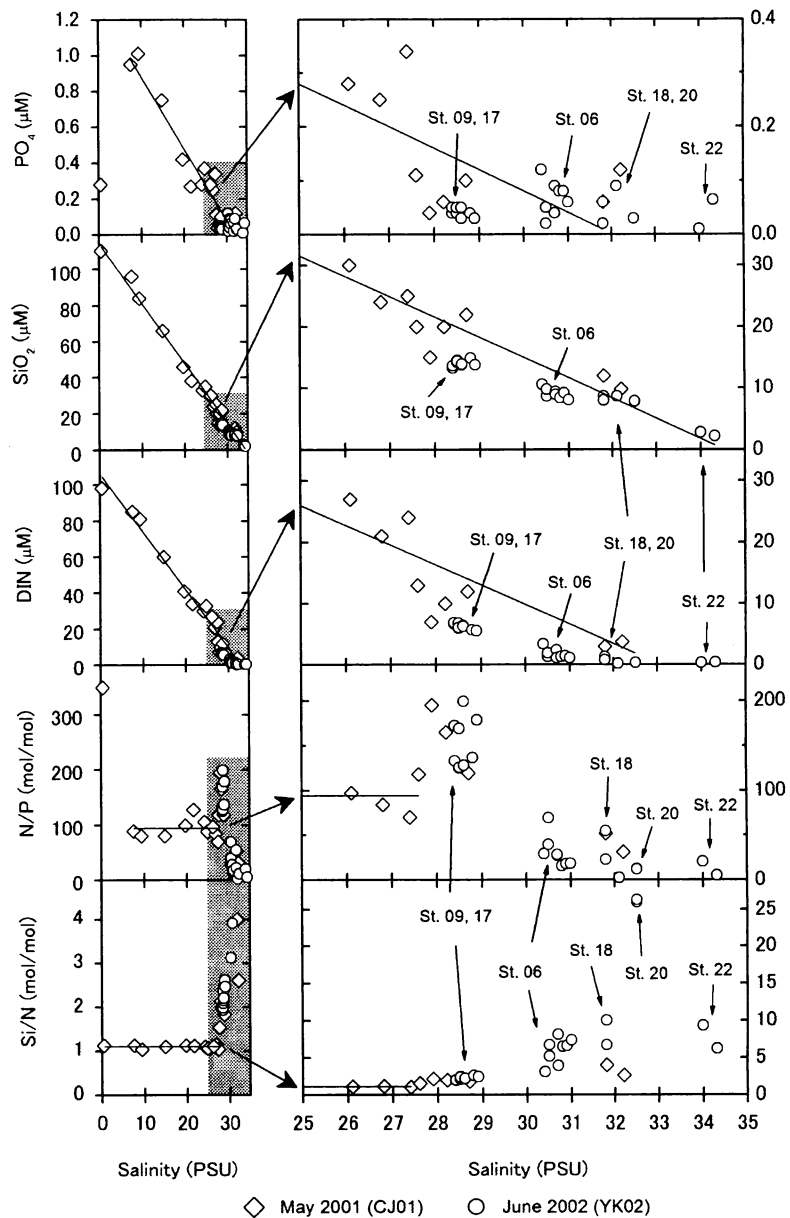


図4 河口(CJ01)－東シナ海陸棚域躍層上層(YK02)における塩分と栄養塩の関係

ら供給される豊富なDINと比べて、 PO_4 が藻類増殖の制限栄養塩となりうると考えられた。

(2) 東シナ海陸棚域の水塊構造

図5にYK03の東西および南北測線の、図6にYK04の南測線、中央測線の水温、塩分、密度断面図を示す。

YK03の南北断面（東経124度50分前後）の表層には、YK02の南北断面（図3右）で観測・同定された長江希釈水で形成された低塩分のプリュームと類似した水塊が観測された。ただしYK02ではプリュームの中心が北緯30度45分付近（YK02 Stn10）に存在していたのに対し、YK03では北緯31度15分（YK03 Stn11）まで約55km北上していた。YK04では南北方向の観測は行わなかったが、中央測線（北緯31度45分）の西端表層（YK04 Stn11）において塩分27psu以下の水塊が観測され、長

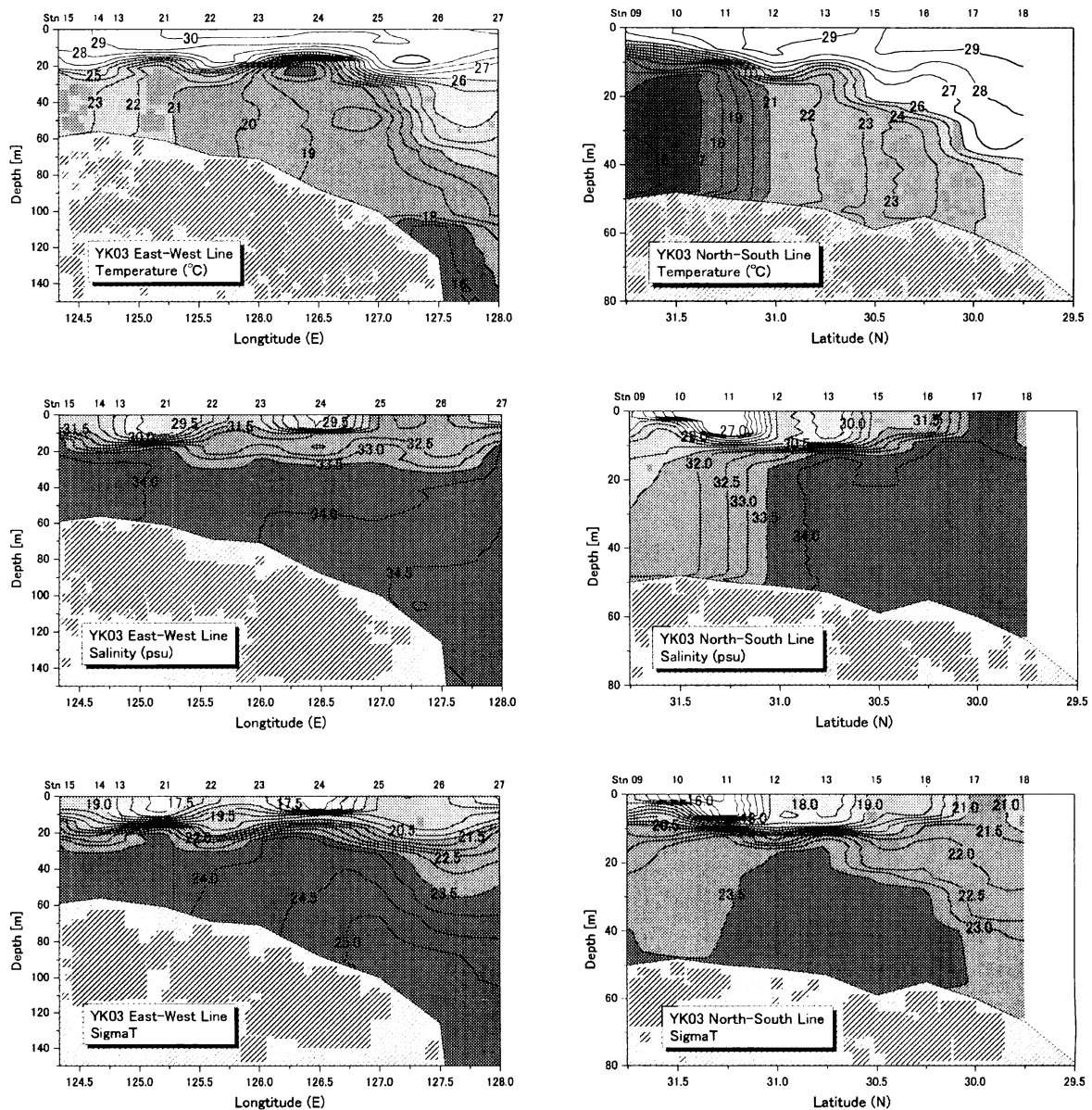


図5 2003年8月(YK03)の東西測線(左)、南北測線(右)の水温・塩分・密度分布

江プリュームの一部と考えられた。YK03のプリューム位置と比較しても、更に50km以上北方に存在していたことを示す。また密度躍層下では、YK02、YK03とも北緯31度30分以上に低温で僅かに塩分の低い水塊（18℃以下、33psu以下）が観察され、黄海底層冷水の影響を示唆している。一方、南方からの暖流系陸棚底層水の張り出しは、夏季に調査を行ったYK03の方が明らかに強い勢力を示した。

北緯30度30分上の東西測線（YK02、YK03の東西測線、YK04の南測線）の断面について3ヶ年のデータを比較すると、夏季に調査を行ったYK03およびYK04では強い日射によって表層水が暖められ形成された明瞭な温度躍層が発達していた。また低塩分水が上層に存在することで形成される塩分躍層は、YK02では東経125度付近（YK02 Stn18）までしか認められないのに対し、YK03では塩分32psu以下の水塊が陸棚域から縁辺部まで広がっており、南北測線の測点11付近を貫く長江希釈

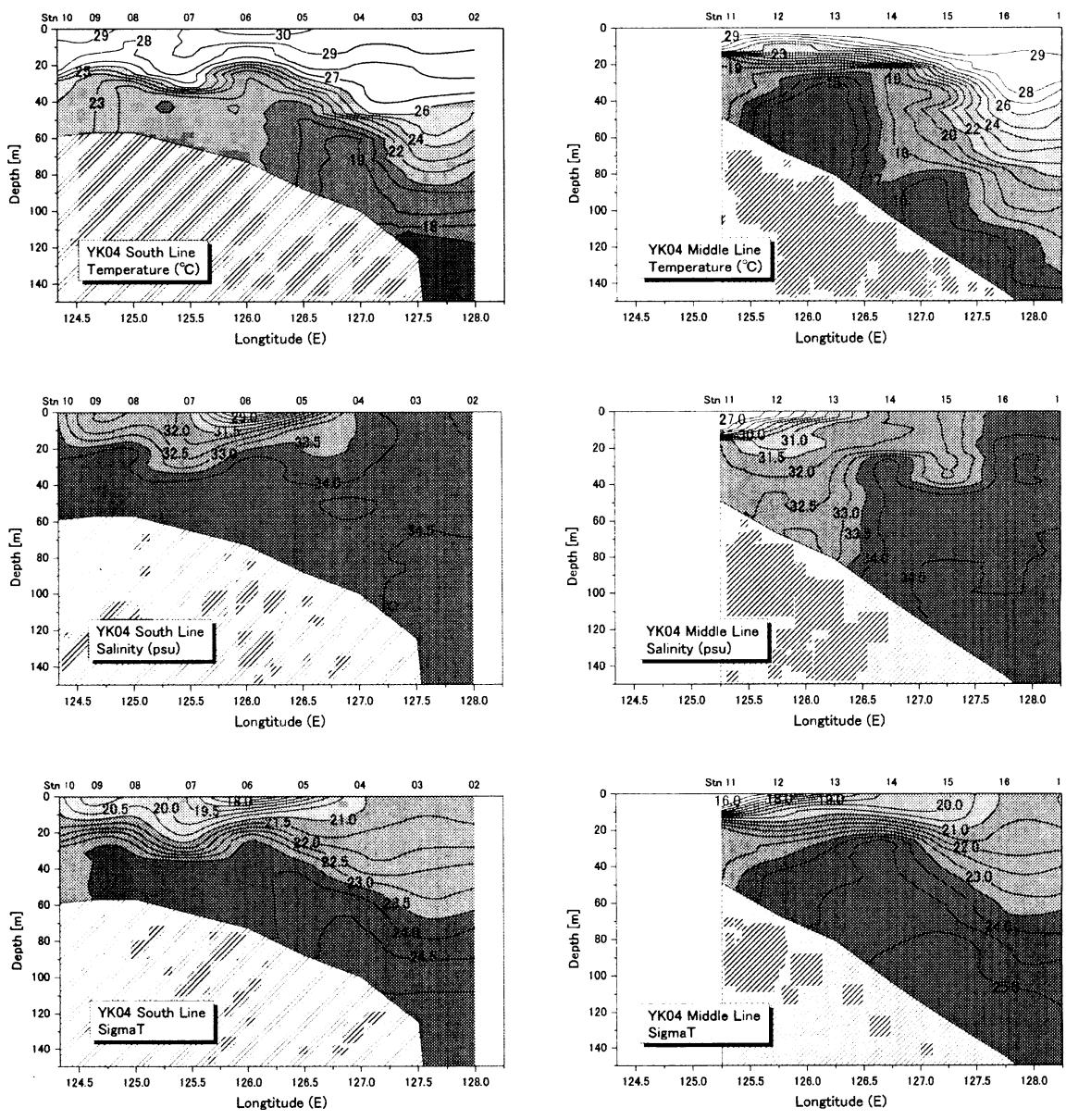


図6 2004年8月(YK04)の南測線(左)、中央測線(右)の水温・塩分・密度分布

水が少なくとも北緯31度30分上の東経127度まで影響を与えていることが示唆された。またYK04では東経126度 (YK04 Stn06) に塩分29psu以下の表層水塊が存在し、東経126度30分 (YK04 Stn05) まで塩分30psu以下の水塊が広がっていた。YK04 Stn06で観測された低塩分水は、中央測線の西端表層 (YK04 Stn11: 北緯31度45分、東経125度15分) で観測された塩分27psu以下の水塊が南東方向に延伸した結果であると考えられる。密度躍層下的水塊については、YK02では縁辺部における西方への黒潮の迫り上がりとともに、東経126度付近に水温17°C程度の冷水塊 (黄海底層冷水) の出現が認められた。一方、YK03およびYK04の南測線では冷水塊の存在は曖昧で黒潮亜表層からの西方への迫り上がりが顕著であった。YK04の中央測線においては東経126度付近に水温15°C以下の冷水塊が存在していることから、黄海底層冷水が夏季には北方に後退していたと考えられた。

横断面図で観察された密度躍層上下における水塊の混合を把握するために、全測点の上層 (水深5m深、密度躍層上) および底層 (海底5m上、ただし水深200m以上の測点では水深200m値を適用) の水温・塩分をプロットした (TS線図～図7)。またYK04の北測線のデータは地理的に他年度のデータと比較することが難しいためプロットから除外した。

YK02のTS線図を解釈すると、上層ではStn10が最も低塩分で、前節で示した栄養塩の外洋水による希釈関係から長江希釈水と分類された。Stn16で観測された塩分31psuの水塊は水温が最も高く、台湾暖流上層水、福建沿岸水を含む暖流系沿岸水であると考えられた。Stn11～15は、Stn10、16の間に存在し、長江希釈水と暖流系沿岸水が徐々に混合している様子が示されている。Stn10の北

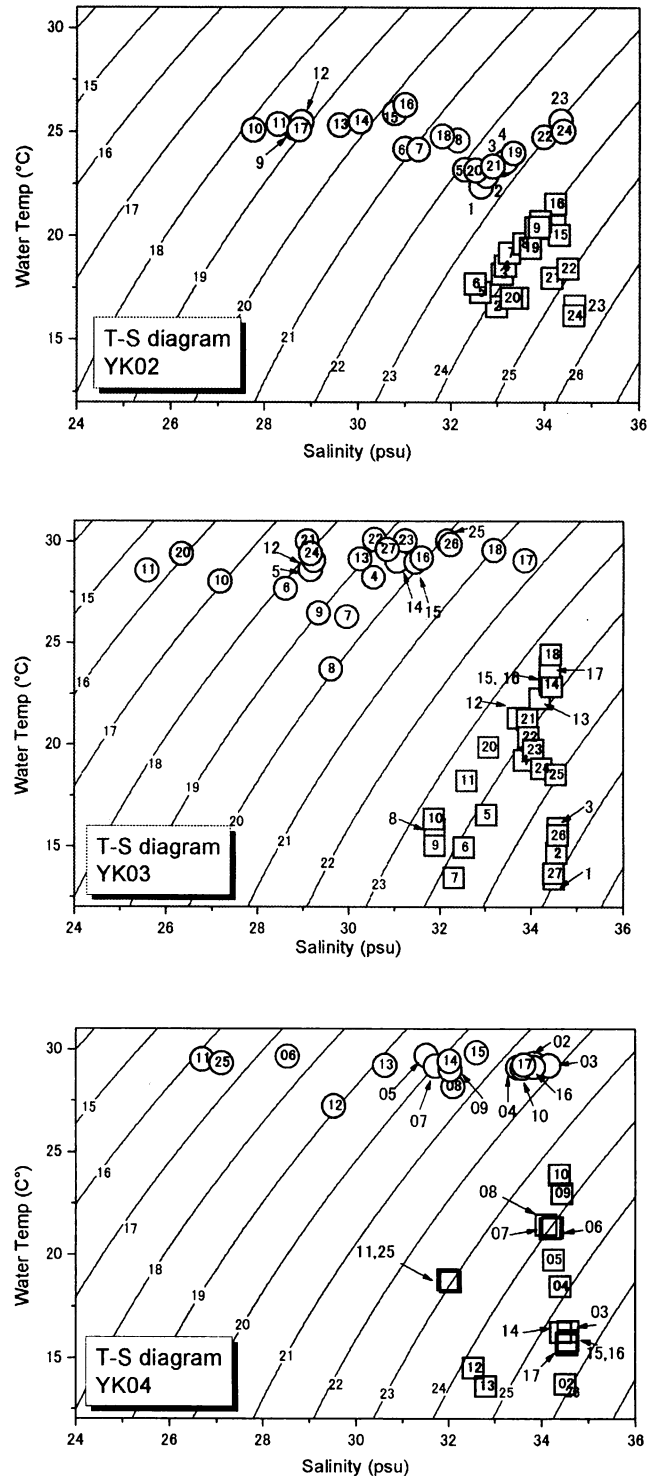


図7 YK02、YK03、YK04陸棚域調査におけるTS線図
○は密度躍層上 (水深5m)、□は海底直上5mのデータである。記号中の番号は測点を示す。

東には、Stn03を中心とする低水温の水塊が見られ、黄海から南下する黄海混合水であると考えられた。Stn06、07は長江希釈水と黄海混合水の混ざり合った水域であると考えられる。また黄海混合水よりも高塩分・高温の水塊がStn22以東に見られ、黒潮系の表層水であると考えられた。

下層には、Stn06を端点とする低塩分・低温水の黄海底層冷水、Stn22~24を端点とする高塩分・低温の黒潮亜表層水、Stn16を端点とする高温の水塊（暖流系陸棚底層水）が見られた。黒潮の影響が強いStn22~24以外の底層水は、ほぼ測点16と06の水塊を結ぶ線上に分布し、黄海底層冷水と暖流系陸棚底層水が相互作用した水塊であると考えられた。

YK03およびYK04のTSプロットの分布形状はYK02のプロットと類似しており、YK02と同様に、表層については 1)長江希釈水、2)暖流系沿岸水、3)黄海混合水、4)黒潮表層水の四つに分類され、また密度躍層下については 1)暖流系陸棚底層水、2)黄海底層冷水、3)黒潮亜表層水の三つに分類されると考えられた。YK02、YK03およびYK04の表層TS分布での最低塩分水塊は、YK03 Stn11の25.6psu、YK04 Stn11の26.7psu、YK02 Stn10の27.7psuであった。YK02とYK03の塩分差は2psu以上であり、またYK04のStn11（東経125度15分）は他年度の測点（東経124度50分）と比較して経度方向で約40km外洋側に位置することを考慮すると、長江希釈水の陸棚域水塊への影響は、6月に実施したYK02航海時よりも、8月に実施したYK04およびYK03航海時の方が大きかったと考えられる。またTS線図から推定される長江希釈水と他の水塊との混合は、YK02では南北に存在する黄海混合水と暖流系沿岸水との間のみに認められたが、YK03およびYK04ではそれらに加えて黒潮表層水との混合も認められた。特にYK03の東西測線の東端表層（Stn27）で観測された僅かに塩分の低い水塊（図5左）は、TS線図上ではStn22や23とほぼ同一の水塊として分類された。またYK04の南測線上中央（Stn06）の表層水のTSプロットは、YK04で最も長江希釈水の影響を受けていたStn11と外洋表層水の間位置し、Stn06が長江希釈水と外洋水の混合により形成されていると解釈された。底層水塊は、YK02では黄海底層冷水と暖流系陸棚底層水との相互作用が顕著で、特に東経125~126度に位置する測点では、黄海底層冷水が東西の水塊混合を分断する形で存在していたため、黒潮亜表層水の影響はほとんど認められなかった。一方、黄海底層冷水の勢力が弱いYK03およびYK04では、黒潮亜表層水と暖流系陸棚底層水との相互作用が相対的に大きな役割を占めていた。

以上、水温・塩分の横断面図およびTS線図から考察される6月（YK02）と8月（YK03とYK04）の東シナ海陸棚環境の差異は、長江の流量が増大する8月に長江希釈水の影響範囲が拡大し、北緯30度30分上では東経128度まで及ぶことがあること、また黄海底層冷水の勢力が衰え、その一方で黒潮亜表層水の縁辺部からの迫り上がりや暖流系陸棚底層水の勢力が強まることが示唆された。尚、東シナ海陸棚域で観察される水塊は、既報⁷⁾において詳細に定義されている。本稿で用いた水塊名はこれに準じた。

（3）栄養塩の供給動態

YK02、YK03およびYK04の栄養塩（DIN、DIP、シリカ）の水平分布を図8~10に示す。上層データはSufとCU層（密度躍層より上）の平均値、下層データはCL2とBtm層の平均値（密度躍層下）である。上層における栄養塩分布では、3ヶ年とも長江希釈水中心付近（YK02 Stn09、YK03 Stn11、YK04 Stn11）で高濃度のDIN（4.4~10.2 μ M）が観測された。長江希釈水の影響範囲が限定されたYK02では、南北測線よりも東方（外洋側）には高濃度のDINは計測されなかった。一方、夏季に調査を実施したYK03およびYK04では、北緯30度30分上のそれぞれStn22（東経125度36分、2.6 μ M）、

Stn06 (東経126度、3.2 μM) において長江希釈水によって輸送されたと推定される比較的高い濃度のDINが計測された。長江希釈水の影響が少ないその他の測点においては、DIN、DIPはともにほ

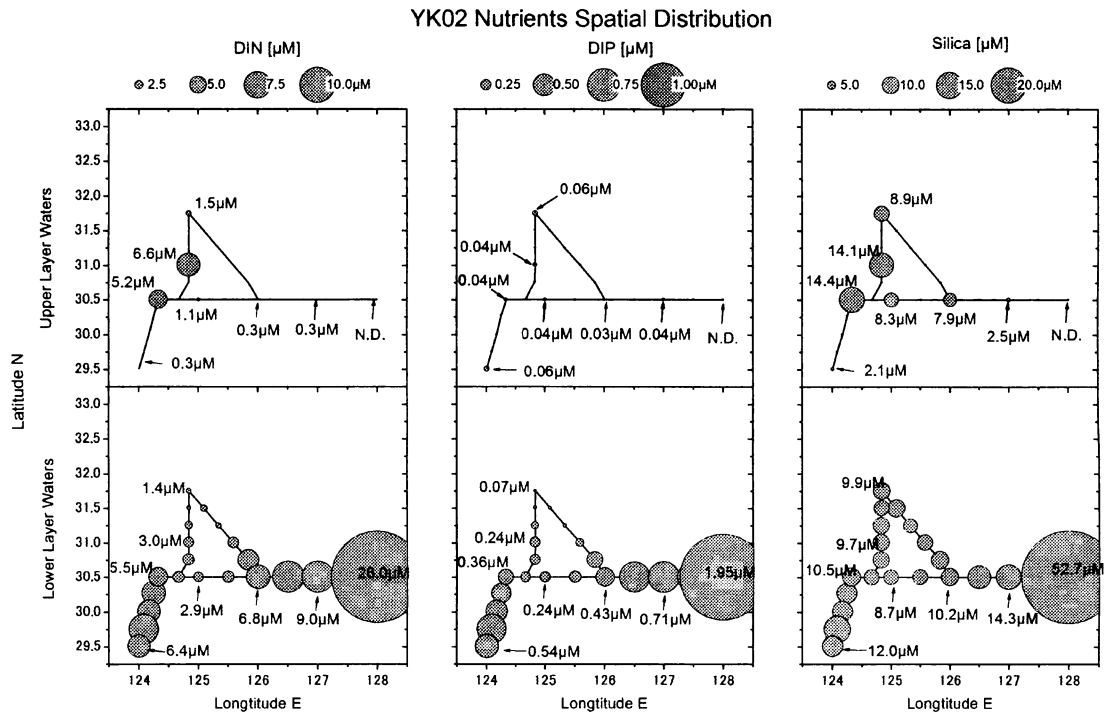


図8 2002年陸棚域調査 (YK02) における躍層上・下水塊の栄養塩の水平分布

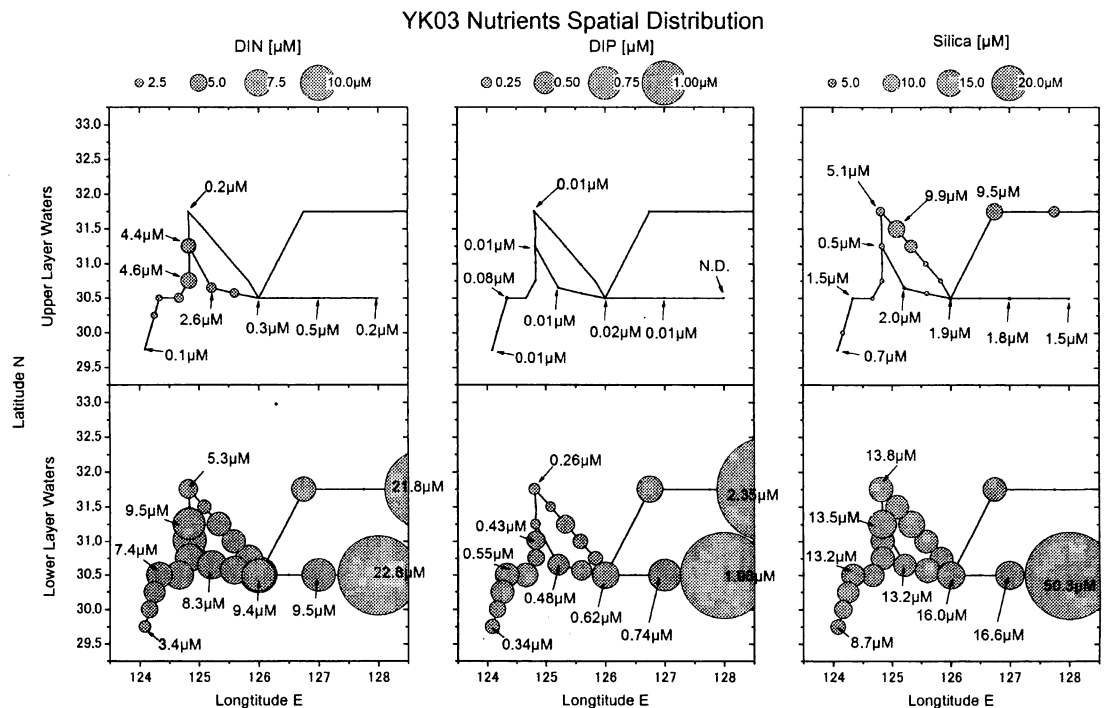


図9 2003年陸棚域調査 (YK03) における躍層上・下水塊の栄養塩の水平分布

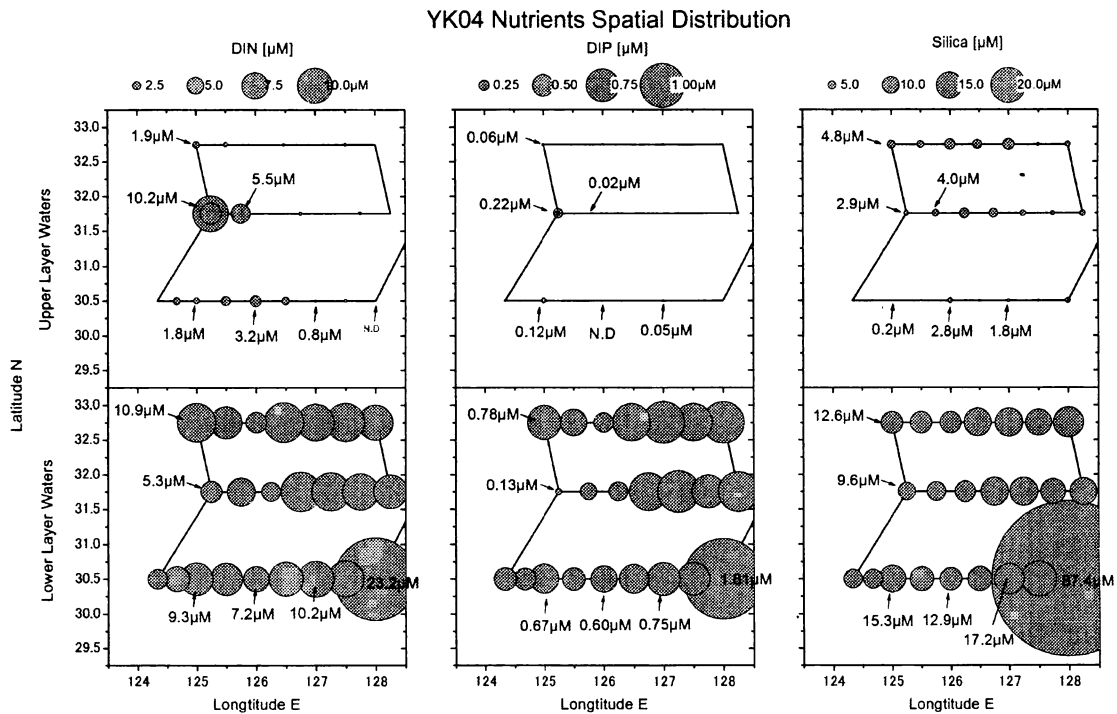


図10 2004年陸棚域調査 (YK04) における躍層上・下水塊の栄養塩の水平分布

ば枯渇した状態であった。一方、下層の栄養塩は、黒潮亜表層水塊 (YK02 Stn24、YK03 Stn27、YK04 Stn02) でのDIN、DIP、シリカ濃度は両年とも高濃度でほぼ同じ濃度を示したが、陸棚全域での分布はYK02とYK03、04では明らかに異なる傾向を示した。6月に調査を行ったYK02では、黒潮亜表層水と暖流系陸棚底層水との接触を遮るように北方から張り出した黄海底層冷水に沿ってDIN、DIPが低い海域が形成された。一方、8月に調査を行ったYK03およびYK04においては、そのような低栄養塩水塊は、YK03のStn09 (北緯31度45分、東経124度50分) 周辺、YK04のStn11 (北緯31度45分、東経125度15分) 周辺の水深がやや浅い領域にのみ観察され、全体としては、高濃度の栄養塩を含む黒潮亜表層水と相対的に濃度の低い暖流系陸棚底層水との混合希釈を通じて、東方から西方に向かって栄養塩濃度が減少する傾向が見受けられた。またYK03では表層で長江希積水の卓越する測点 (YK03 Stn11など) の直下で、比較的高いDIN、DIP濃度が観測され、長江希積水中で増殖した藻類等の沈降を通じて、下層において栄養塩が再生している可能性が示唆された。

以上の3ヶ年の栄養塩水平分布を比較すると、6月から8月にかけての長江流量の増大は、長江希積水の影響範囲を拡大し、長江希積水に含まれるDINをより沖合まで輸送する。また6月から8月への季節変化は、密度躍層下に存在する黄海底層冷水の後退、暖流系陸棚底層水および黒潮亜表層水の勢力増大などを引き起こし、6月には栄養塩濃度の低い陸棚浅海域 (中国大陸から東経126度付近まで) に、8月には豊富な栄養塩を含む水塊が侵入することが考えられた。

(4) 藻類の分布と水塊構造の関係

① 長江洪水期前の藻類分布

長江洪水期前のYK02航海において最も長江希積水の影響を受けた測点はStn09であり、その表層

水塊におけるDINおよびシリカは高い濃度が計測された。しかしながら、Stn09からStn18、20、22、24と東方に移るにしたがって暖流系陸棚沿岸水、黄海混合水が順次卓越して栄養環境はほぼ枯渇した状態になっていた。躍層下の栄養塩は、Stn09および18までは暖流系陸棚底層水（DINで $3\mu\text{M}$ 、シリカで $8\sim 10\mu\text{M}$ ）からの供給が中心であった。Stn20では黄海底層冷水で遮られながらも黒潮亜表層水（DINで $7\mu\text{M}$ 、シリカで $10\mu\text{M}$ 程度）が入り込んでいた。これらの条件によって、Stn09では底層より表層において窒素・珪酸の濃度が高い環境、Stn18では表層・底層の濃度がほぼ均衡した環境、Stn20では底層からのみ栄養塩が供給される環境が形成されていた。

Stn09のChl. aは、長江希釈水のある表層から暖流系陸棚底層水の存在する補償深度直上（水深約20m）まで鋭いピークを持たずに $2\sim 4\mu\text{g/L}$ 存在し（図11）、表層中の栄養塩を利用して藻類が維持されていることが推定された。色素組成の因子解析に基づくと、Chl. a（以下、DV Chl. a含む）の構成は、珪藻31%、渦鞭毛藻11%、ピコプランクトン41%であった。フローサイトメータ分析によるとピコプランクトンのほとんどが高栄養塩環境の近海で卓越する⁸⁾ *Synechococcus* sp. で、Fmx層での細胞濃度は 9.4×10^4 cells/mlに達し、他測点の5倍以上であった。珪藻は、塩分躍層上のSufで *Chaetoceros* spp.、躍層直下のFmxで *Minidiscus comicus*がそれぞれ優占し、また *Thalassiosira* spp. や渦鞭毛藻の *Prorocentrum minimum*など多数の沿岸種が観察された（図13の電子顕微鏡像参照）。測点09の有光層下の懸濁粒子濃度は 5mg/l 以上と高く、長江希釈水の豊富なDIN、シリカに加えて底層からの PO_4 供給が推察される。

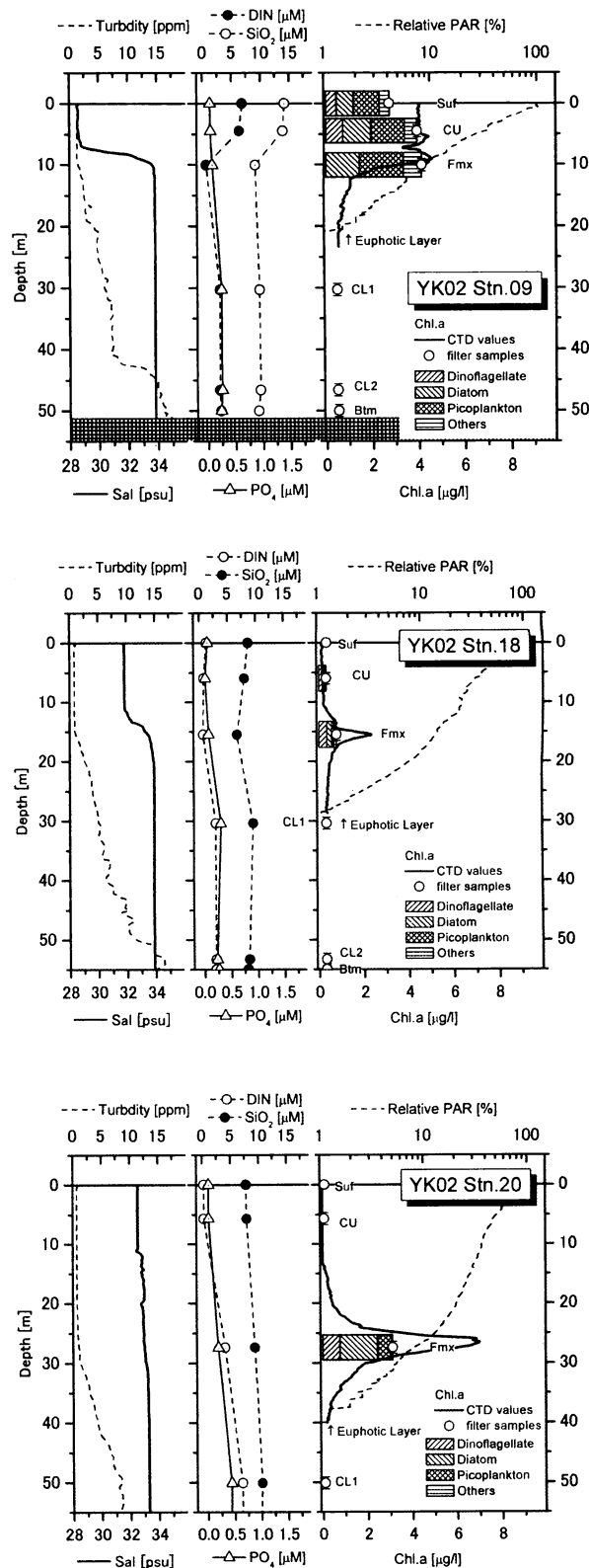


図11 YK02航海、東西3測点における水温、塩分、濁度、栄養塩、相対照度、Chl. a、藻類組成の鉛直分布

Stn18では、表層よりも塩分躍層下の暖流系陸棚底層水塊に藻類が集まる傾向が見られ、また測点09で観測された厚いChl. a層も存在しなかった（図11）。本測点は長江希積水の寄与が小さく、陸棚底層水塊からの栄養塩供給に依存する為であると考えられる。水深15m付近に観測された小さなChl. aピークは、渦鞭毛藻（約40%、*Prorocentrum minimum*）、多様な珪藻（約30%）に由来していた。

Stn20では、表層から水深15mまでChl. a濃度は $0.1 \mu\text{g/L}$ 以下であった。Chl. a極大は、TS線図上で黒潮系底層水と黄海底層冷水の混合した水深27mに認められ、約 $7 \mu\text{g/L}$ に達した。またChl. aの極大層下端は、有光層深度直上（約40m深）まで至っていた（図11）。本測点の底層栄養塩濃度が測点18のそれと大差ないにも関わらず本測点で高いChl. a濃度が観測されたのは、本測点の底層水が豊富な栄養塩を含む黒潮系底層水塊の影響を潜在的に受けているためであると考えられた。藻類は珪藻（50%以上）、及びピコプランクトンの*Prochlorococcus* (5.0×10^3 cells/ml) や*Synechococcus* (1.9×10^4 cells/ml) が優占した。また従属栄養性ナノ鞭毛虫で珪酸質外骨格を有する襟鞭毛虫（choanoflagellateの1種）が非常に多く観察された。さらに試料中には外洋性の円石藻の残骸と泥が混じり、黒潮系底層水塊侵入の痕跡が見られた。

測点22は、測点20より更に深い水深45m層にChl. a極大が見られTS線図上では黒潮系底層水塊に属した。最優占種は円石藻（*Emiliana huxleyi*など）で、また*Prochlorococcus*は、本調査測点中で最大濃度（ 1.6×10^4 cells/ml）が観察され、種組成は明らかに外洋特有のものであった。

② 長江洪水期の藻類分布

長江洪水期に実施したYK03航海では、長江希積水がStn11の表層を貫き、且つ他の表層水塊と比較して高濃度のDINが含まれているのが観測された。これはYK02航海のStn09で観測された環境と類似している。しかしながら、密度躍層下の水塊に着目すると、YK03のStn11とYK02のStn09の栄養塩環境は全く異なる状況におかれていることが指摘される。YK02のStn09では表層の長江希積水に含まれる栄養塩濃度が密度躍層下の濃度よりも高い（図10）のに対し、YK03のStn11では表層水塊よりも躍層下の水塊の方が豊富な栄養塩を含んでいる（図11）。これは長江洪水期である夏季の底層水は、相対的に貧栄養な黄海底層冷水が北上し、代わって暖流系陸棚底層水や黒潮亜表層水の勢力が強まったこと、あるいは春季から夏季にかけて増殖・沈降した藻類等の有機物の分解・再生によるものと推定される。こうした栄養塩環境の差異は藻類の分布特性に大きな影響を与えた。栄養塩が表層水塊に集中したYK02のStn09では、クロロフィルが表層0m深から塩分躍層の発達している10m深まで厚い分布を示している。一方、塩分躍層下に高濃度の栄養塩を含む水塊が存在するYK03のStn11では、塩分躍層中に鋭いピーク（Fmx層）を示した。Stn11のFmx層の藻類種構成は、補助色素の因子解析に基づくと、総Chl. a（ $8.2 \mu\text{g/L}$ ）の68%が*Chaetoceros* sp. を優占種とする珪藻類、8%が*Prorocentrum balticum*を中心とする渦鞭毛藻、16%が*Synechococcus* sp. を主とするピコプランクトンであり、極めて沿岸性の特徴を有する藻類構成であった。またFmx層の上層に位置するSuf層（Chl. a= $1.9 \mu\text{g/L}$ ）およびCU層（Chl. a= $2.6 \mu\text{g/L}$ ）も*Chaetoceros* sp. を優占種とする珪藻が総Chl. aの60%以上を占め、藻類構成はFmx層とほぼ同じであった。上3層の藻類構成がほぼ等しいことから、長江希積水中（Suf層、CU層）で維持・輸送されてきた藻類が、より増殖に適した環境や豊富な栄養塩を求めて塩分躍層直上に集積したと考えられる（図11）。

また東西測線上のStn23およびStn25の表層には低塩分水が存在し長江希積水の影響が及んでい

た。しかしながら表層の栄養塩はほぼ枯渇状態にあり、Suf層および水深5m程度のCU層のChl. a濃度は、Stn23では $0.7 \mu\text{g/L}$ 以下、Stn25では $0.2 \mu\text{g/L}$ 以下と非常に低い。これらの測点におけるChl. aピーク (Fmx層)は、Stn23では水深20m付近 ($26.7 \mu\text{g/L}$ 、Stn25では水深35m付近 ($3.3 \mu\text{g/L}$) であり、ほぼ有光層の下端に観測された。これらFmx層の藻類構成は、補助色素の解析および顕微鏡観察によれば非常に高濃度のChl. aを観測したStn23では*Prorocentrum balticum*を中心とする渦鞭毛藻がChl. aの約94%を、Stn25では*Pseudonitzschia* sp.を主要種とする珪藻がChl. aの76%を占めており、何れの測点においても沿岸性の藻類が主要種であった。

その他の測点についても、藻類濃度が低いStn17及びStn27を除けば、ほぼ全域に亘って沿岸性の珪藻 (*Chaetoceros*、*Pseudonitzschia*、*Thalassiosira*) あるいは渦鞭毛藻 (*Prorocentrum*) が優占種であった。真核藻類のうち外洋性に分類されるハプト藻 (円石藻) も広く分布していたが、何れの測点においても低い割合を占めるに過ぎなかった。フローサイトメータの分析によれば、ほぼ全域に亘ってピコプランクトンは*Synechococcus*に占められ (90%以上)、Stn27のCU、Fmx層においてのみ*Prochlorococcus*の割合が50%以上まで増大し外洋性水塊の性質を示した。

長江洪水期前のYK02航海では、東西測線上の藻類はハプト藻や渦鞭毛虫などの外洋性の生物で構成されていた。これに対して長江洪水期のYK03航海においては、広く沿岸性の珪藻、渦鞭毛藻が優占種として存在していた。長江洪水期には長江希釈水は東経126度より東方まで影響を及ぼすが、長江希釈水によって供給される栄養塩は東経126度よりも西側で消費され尽くすと考えられる。しかしながら、長江希釈水を介し

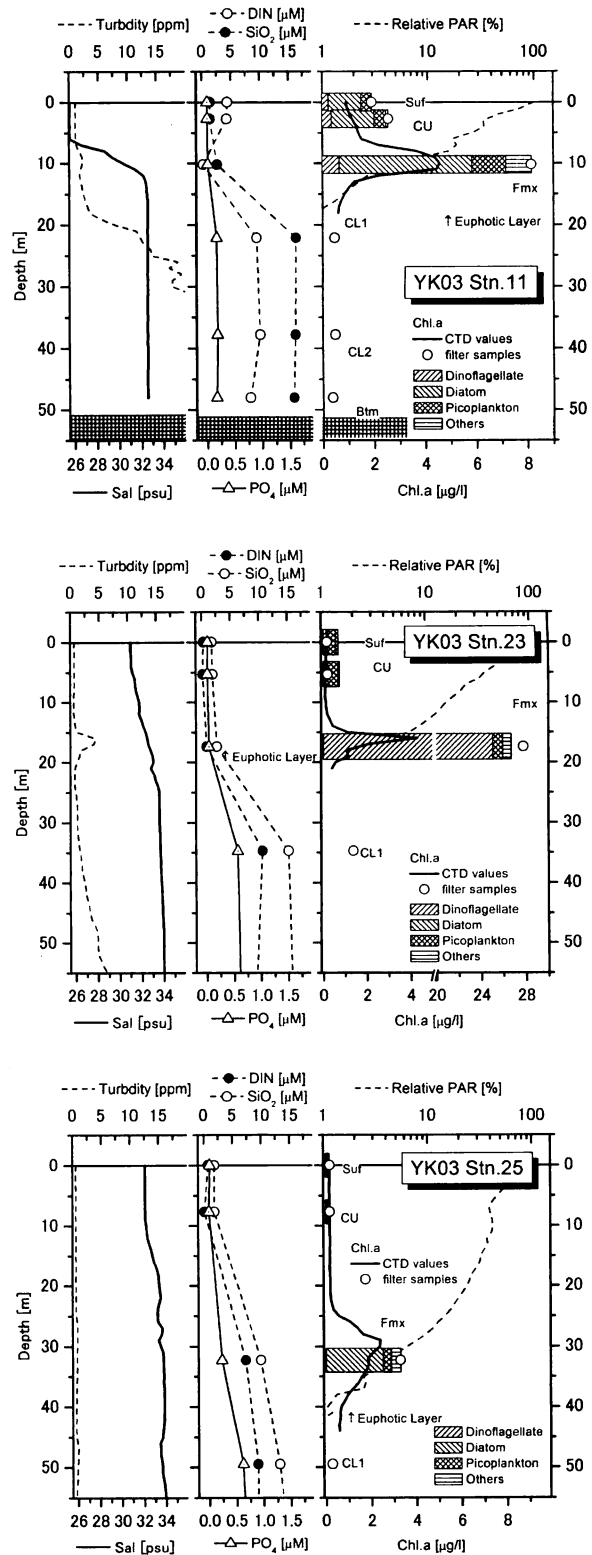


図11 YK03航海、東西3測点における水温、塩分、濁度、栄養塩、相対照度、Chl. a、藻類組成の鉛直分布

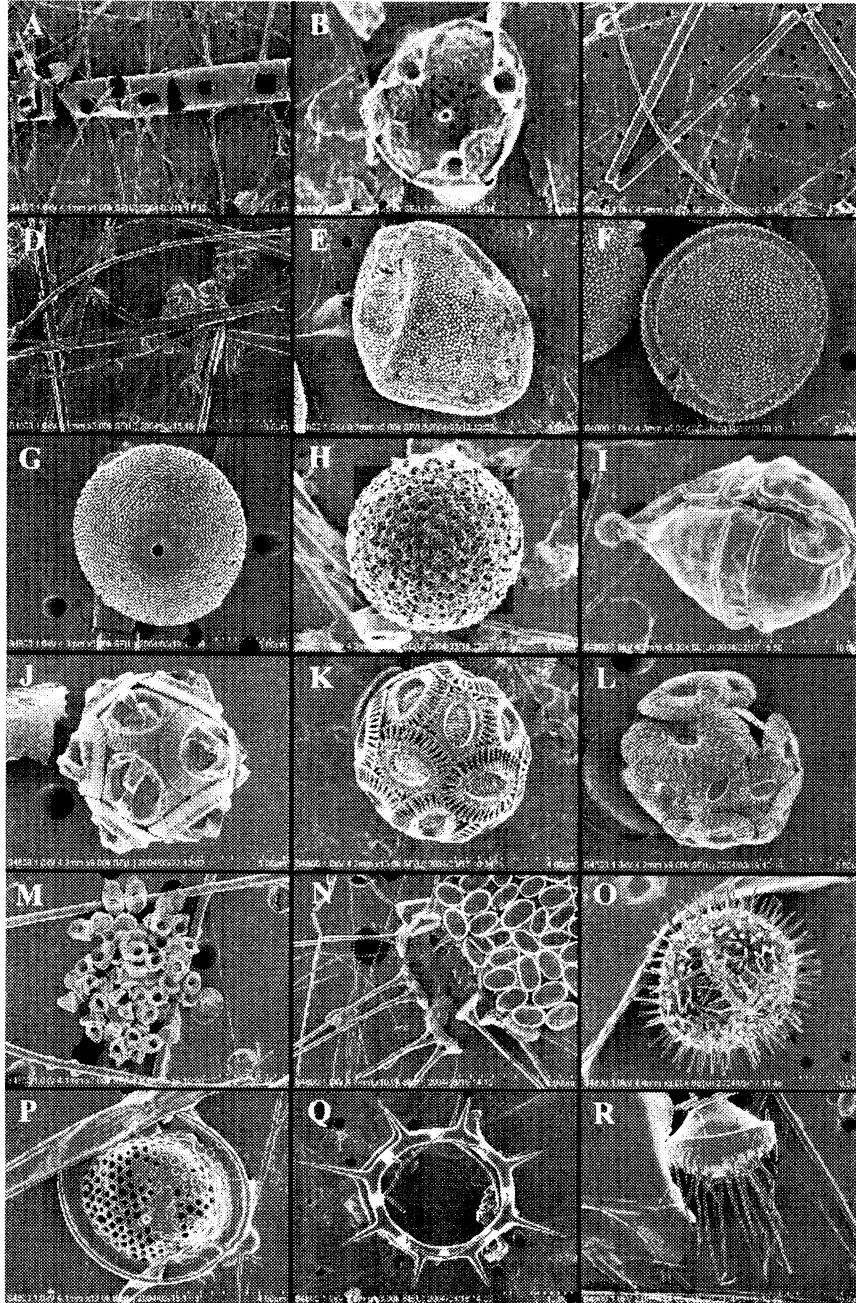


図12 YK02およびYK03航海における代表的な藻類の走査型電子顕微鏡像

A. *Chaetoceros* sp., B. *Minidiscus comicus*, C. *Thalassionema* sp., D. *Pseudonitzschia* sp., E. *Prorocentrum dentatum*, F. *Prorocentrum balticum*, G. *Mesoporos perforatus*, H. *Thoracosphaera heimii*, I. *Scrippsiella* sp., J. *Gephyrocapsa oceanica*, K. *Emiliana huxleyi*, L. *Umbellosphaera tenuis*, M. *Homozygosphaera* sp., N. *Calciopappus rigidus*, O. unknown species, P. *Hyalochrysis neolepis*, Q. *Dictyocha speculum*, R. diatom cyst

て輸送される沿岸性の藻類は、表層栄養塩の枯渇と共に直ちに衰退することではなく、躍層直上に集積することによって黒潮亜表層水起源の栄養塩を効率よく摂取し群集を維持することが示唆された。

③ 陸棚域におけるピコプランクトンとナノプランクトン分布の特徴

図13に、YK02からYK04までの3航海においてフローサイトメータを用いて計測したピコプランクトンのうち、*Synechococcus*の鉛直3層（Suf、CU、Fmx）の現存量平均値を示す。長江洪水期前のYK02および長江洪水期に相当するYK03航海を比較する限りにおいては、共に長江希釈水の特徴を示す水塊（YK02ではStn09、YK03ではStn11）において高濃度の*Synechococcus*が観察され、*Synechococcus*現存量は長江希釈水がもたらす高栄養塩環境に依存すると考えられた。しかし、YK04では長江希釈水が貫入するStn11のみならず、水深50~100m前後の陸棚浅海域全体に高濃度で分布した。長江洪水期にあたるYK03およびYK04の水塊構造は、長江希釈水の調査海域への侵入緯度に多少の差異が認められるものの、図5、6の水塊横断面図や図7のTS線図などから判断すると、黄海底層冷水の後退、暖流系陸棚底層水や黒潮垂表層水の分布などは非常に類似している。したがって調査海域における*Synechococcus*の分布は、必ずしも水塊構造やそれに依存する栄養塩の供給動態などの生息環境のみでは解釈できず、種遷移など時系列の観測、解析が必要であると考えられた。

また、懸濁態試料の補助色素の解析によれば、*Synechococcus*の属するシアノバクテリア類の全

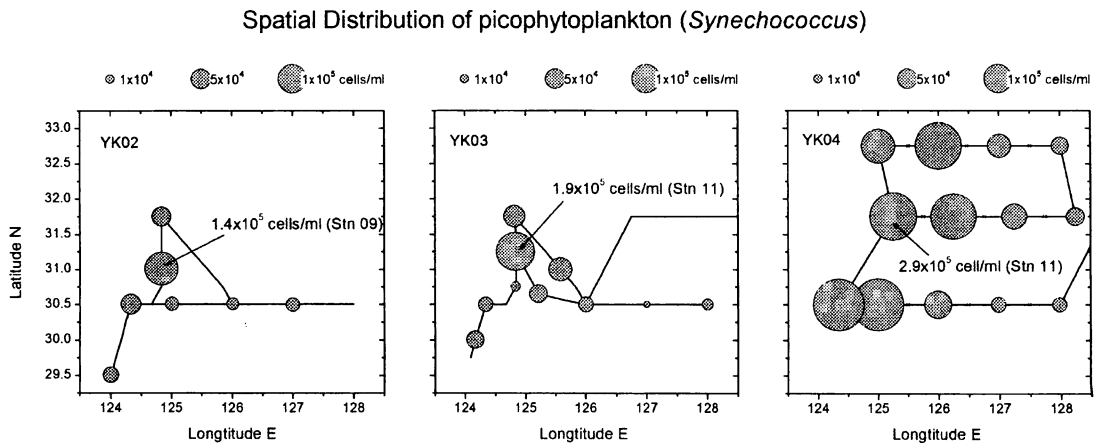


図13 YK02、03、04航海における*Synechococcus*の水平分布

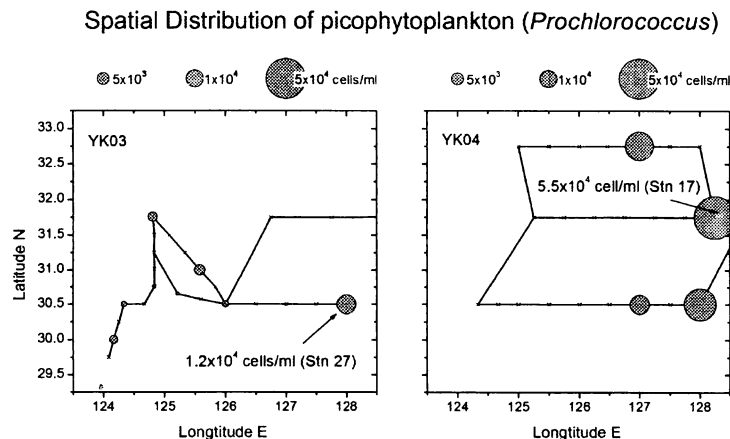


図14 YK03、04航海における*Prochlorococcus*現存量の水平分布

Chl. aに占める割合は、YK03航海（平均Chl. a濃度=1.3 μ g/l n=48）では、平均17.4%、中央値10.0%であったのに対し、YK04航海（平均Chl. a濃度=1.5 μ g/l n=63）では平均59.5%、中央値61.5%と圧倒的な優占率を示した。さらに*Synechococcus*の細胞あたりの炭素含量を250fgC/cellと仮定⁹⁾すれば、SufからFmx層までの*Synechococcus*細胞炭素が懸濁態有機炭素に占める割合は、YK03では平均5.7%足らずであったのに対し、YK04では25.2%と見積もられた。このようにYK04航海において広域で観察された*Synechococcus*群集は、全藻類群集の中で定量的に無視できない存在であった。

図14に、YK03およびYK04航海において観測されたピコプランクトンのうち、*Prochlorococcus*の鉛直3層（Suf、CU、Fmx）の現存量の平均値を示す。*Prochlorococcus*は、黒潮表層、亜表層水が優勢な水塊に多く観察され、陸棚域に広く分布する*Synechococcus*群集の生息海域とは明確に区別された。

YK04航海において試験的に導入したイメージングフローサイトメータ（FlowCAM）により、ナノサイズ以上の真核性植物プランクトンの分布について解析することができた。通常の方法だと試料を固定して保存しておき、後日観察・計数することになるが、FlowCAMの場合、船上でサンプルを採取直後に直接解析することが可能である。2~20 μ mのサイズを解析対象として、フローサイトメータの解析結果を補完するデータを収集した結果、調査した全ての地点でナノプランクトンの存在が確認され、特にStn11、

13、20、22、24において数、種類数ともに卓越することが判明した（図15、図16）。ナノプランクトンは植物プランクトンに加えて、鞭毛虫、繊毛虫など多様なグループで構成されており、バイオマスの点でも大きく貢献することが知られている。しかし固定処理により細胞が変形したり、破裂する種が存在するため、定量・定性的な把握が困難なグループでもある。FlowCAMによる解析ではこうした生物群を対象とすることができた。YK04航海において調査した16地点は大きく次の4つに大別できた。1) 陸棚域の長江希釈水の影響を強く受ける海域で、クリプト藻、渦鞭毛藻、ハプト藻、プラシノ藻を中心とする多種多様なナノプランクトンが卓越し、細胞数が1,000-2,500 cells/mLに達する、Stn11、13、22、24の海域。

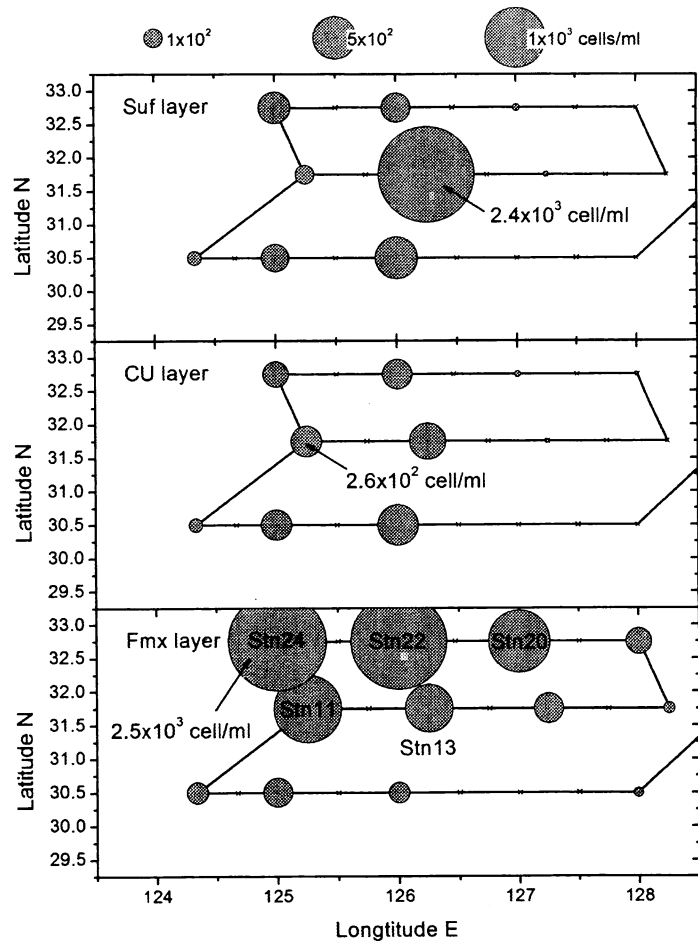


図15 FlowCAMで計数されたナノプランクトン（2~20 μ m）の層別（Suf、CU、Fmx）の水平分布

また当該海域は*Synechococcus*が高密度に分布しており、ナノプランクトン以下の微小プランクトンが生物量の大部分を占めていると考えられる。2)陸棚域の南側に位置する海域で、ナノプランクトンはごく僅か、沿岸性珪藻の*Rhizosolenia* sp.が優占するStn08、10の海域、3) 黒潮の影響を強く受ける海域で、円石藻(ハプト藻)や*Trichodesmium*などが特徴的な外洋性藻類が優占する、Stn02、04、17、18の海域、4) 長江希釈水の影響下にある海域と黒潮影響下にある海域の境界に位置するStn06、15、20の測点。両海域に見られるナノプランクトンが生息する一方で、ある特定の種群が優占するのが確認された。Stn06では大型のプランクトンである*Chattonella*と*Dictyocha*が優占し、Stn15では細胞数は少ないが*Dictyocha*に加えて混合栄養を行う*Chrysochromulina*や*Pseudonitzschia*といった生物群が特徴的に生息した。そしてStn20には微小サイズの*Thalassionema*が優占していた。

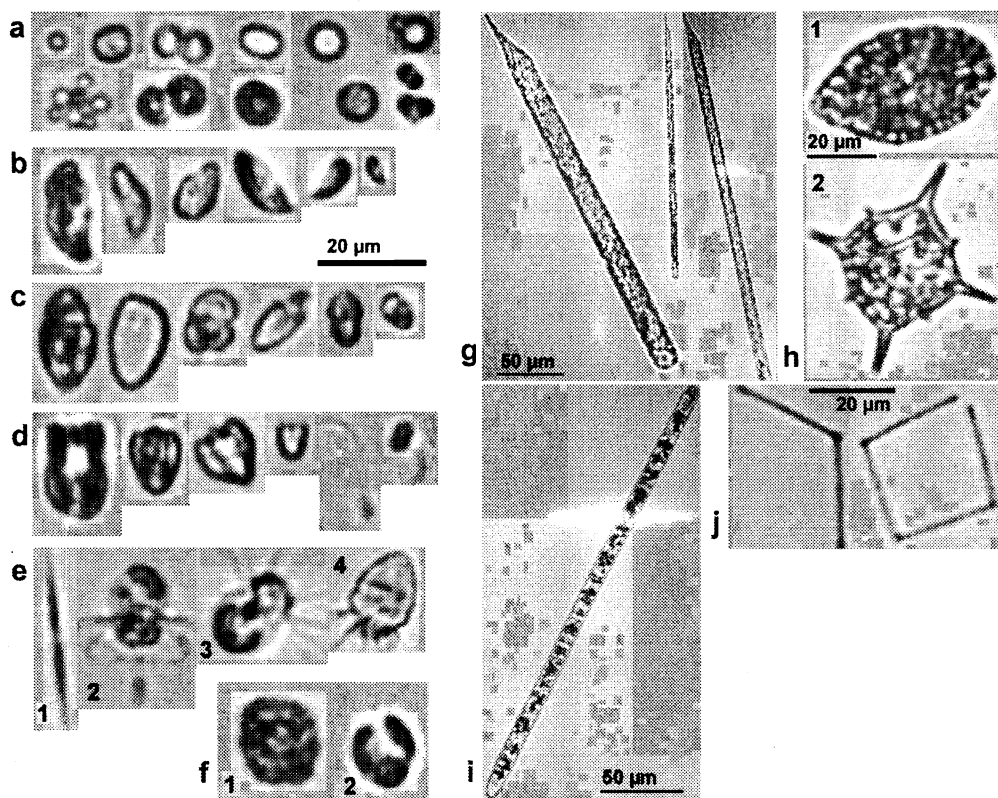


図16. 各種プランクトンのFlowCAM像

a-e. Stn11, 13, 20, 22, 24において観察されたナノプランクトン。 a. 様々なサイズ、形状の不動性植物プランクトン。 b. 様々な種類のクリプト藻。 c. 様々な種類の渦鞭毛藻。 d. 様々な種類のプラシノ藻。 e. *Pseudonitzschia* (1), choanoflagellate (2), *Mesodinium* (3), *ciliate* (4)。 f. Stn02で優占していた円石藻 (1), Stn15に特徴的な混合栄養を行う*Chrysochromulina* (2)。 g. Stn08とStn10で優占していた*Rhizosolenia* sp. h. Stn06で優占していた*Chattonella* (1)と*Dictyocha* (2)。 i. Stn02の表層で優占していた*Trichodesmium*。 j. Stn20で優占していた*Thalassionema* sp..

5. 本研究により得られた成果

東シナ海への長江河川水の流入が陸棚域生態系に及ぼす影響を評価するために、2002年6月、2003年8月ならびに2004年8月に東経124~128度、北緯29度30分~32度45分の海域において海洋観測を実施した。何れの航海においても、東経124~125度上の測点表層に高濃度の溶存態無機窒素

を含む長江希釈水プルームが捉えられたが、低塩分水の東方への延伸範囲や藻類分布への影響は、長江洪水期前の6月の調査（2002年）と洪水期にあたる8月の調査（2003、2004年）では大きく異なった。6月の調査で東経124度50分の表層に観測された密度躍層上の長江希釈水には、*Chaetoceros*、*Minidiscus comicus*等の沿岸性珪藻や高栄養塩環境を好む*Synechococcus*が観察されたが、それよりも東方の測点では暖流系沿岸水および黄海混合水が順次卓越し、藻類は表層よりも密度躍層下・有光層直上に分布が移り、また東経126度を境に外洋性種（円石藻等）へと変化した。一方、長江流量が増大する8月の調査では、長江起源の栄養塩の表層水塊への供給範囲に拡大は認められなかったものの、長江河川水の影響を受けた低塩分水塊の範囲が拡大し、北緯30度30分の測線上では東経127度まで達した。また6月から8月にかけては、季節的な水塊構造の変化と考えられる黒潮亜表層水の縁辺部から陸棚域への迫り上がりの増進や暖流系陸棚底層水の勢力の増大、黄海底層冷水の衰えがみられた。それらの水塊のバランスの変化にともなって、密度躍層下には黒潮亜表層水の影響を強く受け栄養塩を豊富に含む水塊が形成された。8月の調査における藻類分布は、6月の調査では分布範囲が長江希釈水の影響を受けた海域に限定された、沿岸性の藻類（2003年の調査では*Chaetoceros*、*Pseudonitzschia*、*Thalassiosira*などの珪藻と*Prorocentrum balticum*などの渦鞭毛藻、2004年の調査では*Synechococcus*）が陸棚全域にわたって優占し、且つ各測点で躍層直上に集積していたことが特徴的であった。長江希釈水による栄養塩の供給は限定的であるものの、長江希釈水によって沿岸から輸送される藻類が、陸棚域では、外洋から供給される密度躍層下の栄養塩を摂取して群集を維持していたことが示唆された。

6. 引用文献

- ① 環境省地球環境研究総合推進費終了研究報告書「東シナ海における長江経由の汚染・汚濁物質の動態と生態系影響に関する研究（平成11～13年度）」7-16、(2002)
「（1）長江経由の汚染・汚濁物質の負荷量把握に関する研究（執筆担当：徐開欽）」
- ② 鄒景忠：中国海洋科学研究及開発、青島出版社、284-287（1992）
「赤潮生物与赤潮災害研究」
- ③ D Lu, J Goebel, Y Qi, J Zou, Y Gao: Harmful Algae News, 23, 1-5(2002)
“*Prorocentrum donghaiense*-a high biomass bloom -forming species in the East China Sea”
- ④ 環境省地球環境研究総合推進費終了研究報告書「東シナ海における長江経由の汚染・汚濁物質の動態と生態系影響に関する研究（平成11～13年度）」75-88、(2002)
「（4）長江経由の汚染・汚濁物質が海洋生態系に与える影響予測に関する研究（執筆担当：渡辺正孝）」
- ⑤ H Shen, D Pan: Turbidity maximum in the Changjiang estuary (2001)
- ⑥ MD Mackey, DJ Mackey, HW Higgins, SW Wright: Marine Ecology Progress Series, 144, 265-283 (1996)
“CHEMTAX- a program for estimating class abundances from chemical markers: application to HPLC measurements of phytoplankton.”
- ⑦ Y SU, X Weng: Oceanology of China Seas, 1, 3-16. (1994)
“Water masses in China Seas”
- ⑧ NZ Jiao, YH Yang, H Koshikawa, M Watanabe: Aquatic Microbial Ecology, 30, 37-48

(2002)

"Influence of hydrographic conditions on picoplankton distribution in the East China Sea. "

- ⑨ KR Buck, FP Chavez, L Campbell: Aquatic Microbial Ecology, 10, 283-298 (1996)

"Basin-wide distributions of living carbon components and the inverted trophic pyramid of the central gyre of the north Atlantic Ocean, summer 1993. "

7. 国際共同研究等の状況

独立行政法人国立環境研究所が中国科学院地理科学与資源研究所（機関代表者：劉紀遠所長）と締結した「環境資源関連分野における国際共同研究に関する総括協議書 研究課題その2」に基づき、実施機関の一つである中国華東師範大学（陳中原教授）と「水域生態系共同研究の覚書」を交わし、独立行政法人水産総合研究センター所属の「陽光丸」を用いて日中双方の研究者が乗船し韓国排他的経済水域を含む東シナ海陸棚域において共同調査を行った。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

※発表年順（古→新）に並べて下さい。雑誌名は正確に、欧文誌の場合は雑誌の正式な略称で記載して下さい。IF等の検索の際、支障をきたします。記載するのは掲載されたか、確実に掲載されるもの（in pressの場合は、その旨必ず記載）に止め、投稿中のものは記載しないで下さい。

<論文（査読あり）>

- ① Z Wang, Z Chen, K Okamura, J Gao, K Xu, H Koshikawa and M Watanabe: "Anomalous current recorded at lower low water off the Changjiang River mouth, China", Geo-Marine Letters, 24: 252-258, 2004.
- ② J Zhang, K Xu, M Watanabe, Y Yang and X Chen: "Estimation of river discharge from non-trapezoidal open channel using QuickBird-2 satellite imagery", Hydrological Sciences Journal, 49:247-260, 2004.
- ③ K Xu, J Zhang, M Watanabe, and C Sun: "Estimating River Discharge from Very-High-Resolution Satellite Data: A Case Study in the Yangtze River, China", Hydrological Processes, 18:1927-1939, 2004.
- ④ N Jiao, Y Yang, N Hong, Y Ma, S Harada, H Koshikawa and M Watanabe: "Dynamics of autotrophic picoplankton and heterotrophic bacteria in the East China Sea", Continental Shelf Research, 25: 1159-1301, 2005.

<その他誌上発表（査読なし）>

なし

(2) 口頭発表（学会）

- ① 岡村和麿、越川海、横内克巳、清本容子：2003年度日本海洋学会秋季大会（2003）
「2002年夏季の東シナ海陸棚域において観測されたクロロフィル極大の特性」

- ② 河地正伸、越川海、岡村和麿、渡邊信：日本藻類学会第28回大会（2003）
「東シナ海から分離された円石藻*Reticulofenestra sessilis*の形態、系統、生活史」
- ③ K XU, J ZHANG and M WATANABE: the 6th International Conference on the Environmental Management of Enclosed Coastal Seas, Bangkok, Thailand (2003) “Estimation of freshwater discharge and pollutant loads from Yangtze River to the East China sea using satellite data”
- ④ K Xu, J Zhang, M Watanabe, S Hayashi and Z Chen: Second IAG Yangtze Fluvial Conference (2004) “Estimation of sediment and nutrient fluxes from the Changjiang river into the East China Sea”
- ⑤ 岡村和麿、松野健、越川海、清本容子：2004年度日本海洋学会秋季大会（2004）
「有機炭素安定同位体比からみた東シナ海陸棚域の懸濁粒子の輸送」
- ⑥ 越川海、岡村和麿、河地正伸、関口博之、越川昌美、広木幹也、徐開欽、木幡邦男、渡辺正孝：2004年度日本海洋学会秋季大会（2004）
「長江希釈水が東シナ海陸棚域の栄養塩と藻類分布に及ぼす影響」

（3）出願特許

特になし

（4）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特になし

（5）マスコミ等への公表・報道等

- ① 日本経済新聞（2002年5月3日）

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、学会誌等への投稿を進め、成果の広報・普及に努める。