

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

(3) 東シナ海の海洋環境予測統合モデルの開発に関する研究

④ 東シナ海における海洋生態系モデル開発に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

水圏環境領域	領域長	渡辺正孝
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
	流域環境管理研究チーム	徐 開欽・中山忠暢
<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	52,061千円
(うち、平成16年度予算額)	12,951千円)

[要旨] 長江からの供給される大量の汚濁物質を含む長江希釈水、栄養塩豊富な黒潮系水、低栄養塩の黄海系水及び暖流系沿岸水が複雑に絡み合っており、東シナ海の海洋構造を形成している。この結果、栄養塩分布はこの海洋構造に規定され、藻類分布は栄養塩分布と海洋構造に強く支配されていることが判明した。長江からの淡水及び土砂供給量の正確な把握、衛星TRMMを用いた東シナ海海面への降雨量推定、大気大循環モデル (ECMWF) 結果を用いて東シナ海海面上での風による応力と気温・日射量・湿度分布を与え、東シナ海での長期海洋流動シミュレーションを行った。計算結果は東シナ海において起源の異なる水塊が複雑に分布する海洋構造を再現していることが観測結果との検証により判明した。

三峡ダム建設や南水北調計画のスタート、及び上海周辺での経済発展に伴う工場立地の増加は長江からの取水量を飛躍的に増加させる可能性があり、これらを総合すると約3000m³/sの水資源が長江から取水されることが推定された。本研究においては長江からの淡水供給量の正確な把握をもとに、長期海洋流動計算結果を境界条件としてネスティングを行い、長江での小領域における塩分遡上再現計算と今後の水資源需要増加に伴う塩分遡上シナリオ計算を行った。シナリオ計算結果は、長江河川流量が最小となる渇水期 (11-4月) での塩分遡上は非常に大きく (最大15%)、上海市の生活用水・工業用水・農業用水に大きな影響を与えることが示唆された。長期海洋流動計算結果と連立して、物質循環モデルを開発し東シナ海に適用した。計算されたクロロフィル濃度分布は衛星画像で観測されている濃度分布を定性的に説明しているものの、長江以外の河川からの汚濁負荷の精度向上が不可欠であることが判明した。

[キーワード] 東シナ海、長江、南水北調、三峡ダム、海洋生態系モデル

1. はじめに

長江の淡水供給量は年間約9800億m³に上り、長江からの豊富な栄養塩類を含む淡水供給によって長江河口域や東シナ海の一次生産を基礎とする豊かな海洋生態系が維持され、また海洋環境そのものが強く長江に依存している。長江河口域とその陸棚域は、長江以外に北から黄海沿岸水や南から台湾暖流、東から黒潮などの影響を受ける複雑な海域である。したがって長江由来の汚

濁負荷が東シナ海海洋生態系に及ぼす影響を評価するためには、長江河口域、陸棚域及び縁辺海域の水塊構造のモデル検証を行うことが海洋生態系モデルの精度向上に不可欠である。

長江流域での急増する経済活動により、長江からの淡水取水量および汚濁負荷発生量は今後飛躍的に増加することが予測されている。特に中国南部の豊富な水資源を北京・天津や華北平原など北部の水不足地区へ導水する「南水北調」計画、及び洪水制御・電力開発を目的とした三峡ダムは下流域での流量に大きく影響を与え、結果として長江河口域での環境を大きく変化させることが懸念されている。特に長江河川流量が最小となる渇水期（1-3月）での塩水遡上は上海市の生活用水・工業用水・農業用水に与える影響評価が早急に求められている。

一方汚濁負荷発生量の増加の主要因は農業生産増加に伴う化学肥料に由来するものと、工業排水及び生活排水の増加に由来するものがある。長江流域では化学肥料に由来するものが圧倒的に多く、長江流域から流出するシリカ負荷量の減少と相まって、海域への窒素・リン・シリカ比の変動が海洋生態系に与える影響、特に赤潮発生増加、が懸念されている。このことから東シナ海における海域生態系変化予測の必要性が強く求められている。

2. 研究目的

本研究は、長江河口域から東シナ海陸棚域までを対象とし、東シナ海における長江起源水とそれ以外の水塊（表層では暖流系沿岸水、黄海混合水、黒潮系表層水、底層では黄海底層冷水、黒潮系底層水、暖流系陸棚底層水）が形成する海洋構造を三次元モデルにより明らかにする。また海洋生態系構造及び生物群集の生息域・現存量に決定的な影響を与えている海洋構造と連立した、海洋生態系のモデル化を行うことを目的とする。本研究期間中に行われた長江沖の陸棚域における海洋調査結果をもとに、観測された水塊構造を3次元モデルにより再現するとともに、長江河口域での計算結果を外力条件として入力し、三峡ダムや南水北調による流量減少に伴う渇水期での長江における塩分遡上分布予測を行う。流動モデルと連立して海域生態系モデルを適用し、長江河口域での栄養塩及び藻類分布の検証を行う。

3. 研究方法

(1) 流動モデル

計算領域は、東シナ海と日本沿岸を含む北緯24度0分～42度0分、東経115度0分～133度0分の範囲における対象海域の潮汐観測地点の位置により、東シナ海全域に対して潮汐条件を与えられる範囲とした。流入河川は、月別平均流量がある主要河川とし、河川上流最大50～150kmまでを基本的な計算範囲とした。格子間隔は緯度方向5分、経度方向5分とし、水平方向の格子数は南北方向231メッシュ、東西方向220メッシュ、鉛直方向の格子数は10層とした。海底地形の条件は、NGDCの世界標高（水深）データ（ETOPO5）の水深データファイルより、計算範囲内における経緯度5分×5分メッシュの平均水深を求めた（図1）。小領域境界線における大領域計算結果をすべて記憶させ、小領域計算の境界値データとして

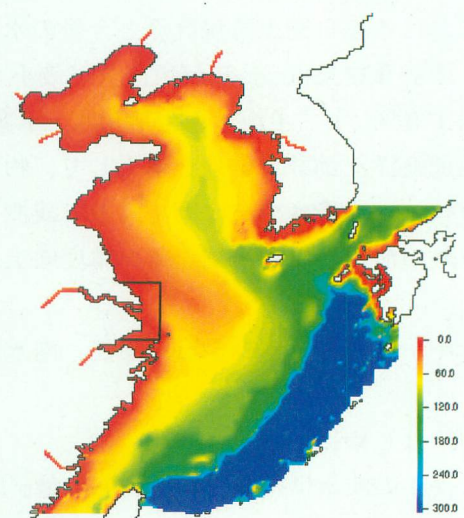


図1. 東シナ海と計算領域

ネスティングさせた。小領域計算は北緯30度50分、北緯32度50分、東経122度50分で囲まれる長

江河口域で、長江をさかのぼり東経119度17分までの領域を塩分遡上計算領域とした。長江河川底地形は水深データファイルより1 km X 1 kmメッシュの平均水深を求め、格子間隔は緯度方向1分、経度方向1分とした。本計算領域に対して、潮汐流、吹送流及び塩分・水温・濁度に基づく密度流により駆動される流れを再現する3次元流動モデルを適用した（渡辺ら、1998）。

開境界に与える潮汐条件は、日本沿岸潮汐調和常数表と朝鮮半島、台湾、中国における海上保安庁水路部所有の潮汐調和常数表をもとに、潮汐観測地点より選定した19観測所における調和常数（主要4分潮：M2、S2、O1、K2）より潮位を境界条件として与えた。

河川流量は8河川（Min、Qianfang、Yellow、Hai、Liao、Yaliu、Hangang）については対象計算期間における月平均流量を用いて設定した。Changjiang（長江）については、大通（最下流観測点）での日平均流量観測値（m³/日）を与えた（図2）。また三峡ダム操作、南水北調による長江からの取水及び大通より下流地域での産業用水・生活用水・農業用水などによる将来用水需要を約3000 m³/sと推定し、年間を通して同量取水されるとして小領域シミュレーションを行った。



図2 主要河川流量

対象海域の境界である台湾海峡、対馬海峡及び黒潮の流入出量は、各境界格子における流速値と断面積から設定した。各境界格子における流速値は、JODC（日本海洋データセンター）所有の海流観測データ資料における1953年～1993年の40年間の観測値から年平均流速値を求めた。すなわち台湾海峡から流入 $1,048 \times 10^3 \text{ ton/sec}$ 、黒潮流入域から流入 $11,049 \times 10^3 \text{ ton/sec}$ 、黒潮流出域から流出 $9,314 \times 10^3 \text{ ton/sec}$ 、対馬海峡から流出 $2,789 \times 10^3 \text{ ton/sec}$ とした。

水温（熱量）の計算に必要な気象条件は、GCMモデルECMWF（The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）の計算結果より気温、湿度は12時間ごと、日射量、風向・風速、雲量については6時間ごとに $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ の分布データとして与えた。また海表面での風の応力は6時間ごとの風向・風速データを用いて東西成分、南北成分を設定した。大気経由で海面に供給

される降雨量は東シナ海での塩分収支に大きな影響を与える。TRMM（熱帯降雨観測衛星）の降雨レーダーによる観測値から日平均降雨量を与えた。

計算範囲内の水温塩分の初期分布は、NOAA所有の水温・塩分統計値（経緯度1度格子、24層）の春季平均分布値を用いて、対象海域の表層と底層までの各格子毎に初期値を設定した。河川境界の水温・塩分は隣接する気象観測所における計算期間内の月平均気温、塩分はすべての河川で0.1‰と設定した。開境界での水温・塩分は海上保安庁水路部（日本海洋データセンター）所有の各層観測データ（1906年～1993年）、STD観測データ（1997年～1993年）、CTD観測データ（1983年～1993年）、及び統合水温観測データ（1906年～1993年）、1950年～1993年の観測値を基に、40年間月平均値を求め、計算範囲の境界条件として設定した。

1996年5月1日～1999年12月31日の3年8ヶ月を計算期間とした。計算開始後1年経過すれば初期値の影響も消滅し、流入河川や気象条件に対して定常的な応答状態に達していると考えられる。

1998年-1999年の2年間の計算結果を解析に用いた。

(2) 生態系モデル

生態系モデルの基本構造は、すべての物質について流入・流出、物理的輸送・拡散、及び生物・化学過程による変化等の諸過程に対して物質保存則が成立することである。物質保存則にもとづく基礎方程式は次式のように与えられる。

(物質保存式)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[E_x \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[E_y \frac{\partial c}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[E_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] - U_x \frac{\partial c}{\partial x} - U_y \frac{\partial c}{\partial y} - U_z \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial S(x, y, z, t)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial W(x, y, z, t)}{\partial z} \quad (1)$$

生態系を構成している独立変数は以下の物を考慮した。①植物プランクトン carbon (mg-C/L), ③溶存有機態リン (DOP; mg-P/L), ④粒子状リン(POP; mg-P/L), ⑤溶存無機態リン(DIP; mg-P/L), ⑥溶存有機態窒素(DON; mg-N/L), ⑦粒子状窒素(PON; mg-N/L), ⑧アンモニア(NH₃; mg-N/L), ⑨硝酸+亜硝酸(NO₃+NO₂; mg-N/L), ⑩塩分(‰)、⑪生物的酸素要求量(CBOD; mg-O₂/L), ⑫溶存酸素(DO; mg-O₂/L)。この生態系モデルで、物質循環を駆動しているのは、植物プランクトンによる光合成であり、窒素・リンの摂取と、有機物の分解・回帰により循環している。

① 植物プランクトン

$$S_1 = \left\{ G_{1\max}(T) \cdot G(I) \cdot G(N) - k_{1R} \theta_{1R}^{T-20} - \frac{V_{s1}}{H} - k_{1D} \right\} [P_c] \quad (2)$$

ここで、植物プランクトンの増殖 G_{1j} は、最適条件での最大増殖速度を $G_{1\max}$ として、照度(I)・温度(T)・栄養塩濃度(M)の関数として次式で与えられる。

$$G_{1j} = G_{1\max}(T) \cdot G(I) \cdot G(N) \quad (3)$$

植物プランクトン増殖の温度、照度依存性は、次式を用いた。

$$G_{1\max}(T) = G_{1\max} \theta_1^{T-20} \quad (4)$$

$$G(I) = \frac{ef}{k_e z} (e^{-\alpha_1} - e^{-\alpha_0}) \quad (5)$$

$$\alpha_1 = \frac{I_0}{I_s} e^{-k_e z_m}, \quad \alpha_0 = \frac{I_0}{I_s}, \quad k_e = k_e' + k_e a_{\text{chl}} P_c$$

植物プランクトンの増殖に及ぼす栄養塩の影響は以下のようにMichaelis-Menten タイプの式の掛け合わせで表現した。

$$G(N) = \frac{[\text{DIN}]}{k_{mN} + [\text{DIN}]} \cdot \frac{[\text{DIP}]}{k_{mP} + [\text{DIP}]} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} [\text{DIN}] &= \text{dissolved inorganic nitrogen} \\ &= [\text{NH}_3 - \text{N}] + [\text{NO}_{2,3} - \text{N}] \end{aligned}$$

生物生産量当りの窒素・リン摂取量は植物プランクトン種組成によりこの値は大きく変動することが知られているが、本モデルにおいては constant stoichiometry を前提とした。すなわち窒素／炭素比 (mgN/mgC) = 0.18及びリン／炭素比 (mgP/mgC) = 0.02と一定値を与えた。これにより以下に示すようにリン・窒素に対して物質保存則を適用することが可能となる。

③ Dissolved Organic Phosphorus (DOP)

$$S_{3j} = a_{\text{PC}} f_{\text{DOP}} (k_{1R} \theta_{1R}^{T-20} + k_{1D}) [P_c] - k_{35} \theta_{35}^{T-20} [\text{DOP}] \frac{[P_c]}{k_{mPc} + [P_c]} \quad (7)$$

④ Particulate Organic Phosphorus (POP)

$$S_{4j} = a_{\text{PC}} f_{\text{POP}} (k_{1R} \theta_{1R}^{T-20} + k_{1D}) [P_c] - k_{45} \theta_{45}^{T-20} [\text{POP}] \frac{[P_c]}{k_{mPc} + [P_c]} \quad (8)$$

⑤ Dissolved Inorganic Phosphorus (DIP)

$$\begin{aligned} S_{5j} &= a_{\text{PC}} f_{\text{DIP}} (k_{1R} \theta_{1R}^{T-20} + k_{1D}) [P_c] + k_{35} \theta_{35}^{T-20} [\text{DOP}] \frac{[P_c]}{k_{mPc} + [P_c]} \\ &+ k_{45} \theta_{45}^{T-20} [\text{POP}] \frac{[P_c]}{k_{mPc} + [P_c]} - a_{\text{PC}} (G_{1j}) [P_c] + \text{PO}_4 \text{FLX} / H \end{aligned} \quad (9)$$

また、同様に植物プランクトンを取り巻く窒素の循環は以下の式で表現した。

⑥ Dissolved Organic Nitrogen (DON)

$$S_{6j} = a_{\text{NC}} f_{\text{DON}} (k_{1R} \theta_{1R}^{T-20} + k_{1D}) [P_c] - k_{68} \theta_{68}^{T-20} [\text{DON}] \frac{[P_c]}{k_{mPc} + [P_c]} \quad (10)$$

⑦ Particulate Organic Nitrogen (PON)

$$S_{7j} = a_{\text{NC}} f_{\text{PON}} (k_{1\text{R}} \theta_{1\text{R}}^{T-20} + k_{1\text{D}}) [P_c] - k_{78} \theta_{78}^{T-20} [\text{PON}] \frac{[P_c]}{k_{\text{mPc}} + [P_c]} \quad (11)$$

⑧ Ammonia Nitrogen (NH_3)

$$S_{8j} = a_{\text{NC}} f_{\text{NH}_3} (k_{1\text{R}} \theta_{1\text{R}}^{T-20} + k_{1\text{D}}) [P_c] + k_{68} \theta_{68}^{T-20} [\text{DON}] \frac{[P_c]}{k_{\text{mPc}} + [P_c]} \\ + k_{78} \theta_{78}^{T-20} [\text{PON}] \frac{[P_c]}{k_{\text{mPc}} + [P_c]} - k_{89} \theta_{89}^{T-20} [\text{NH}_3] \frac{[\text{DO}]}{k_{\text{nit}} + [\text{DO}]} \quad (12)$$

⑨ Nitrite/Nitrate Nitrogen ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$)

$$S_{9j} = k_{89} \theta_{89}^{T-20} [\text{NH}_3] \frac{[\text{DO}]}{k_{\text{nit}} + [\text{DO}]} - k_{90} \theta_{90}^{T-20} [\text{NO}_{2,3}] \frac{k_{\text{NO}_{2,3}}}{k_{\text{NO}_{2,3}} + [\text{DO}]} \quad (13)$$

アンモニア態窒素と硝酸態窒素が同時に利用可能な場合、植物プランクトンはアンモニア態窒素をより好んで摂取する。このため次式で定義されるアンモニア態窒素選択係数 α を用いて、選択的な摂取を表した。

$$\alpha_{\text{NH}_3} = [\text{NH}_3] \frac{[\text{NO}_{2,3}]}{(k_{\text{mN}} + [\text{NH}_3])(k_{\text{mN}} + [\text{NO}_{2,3}])} + [\text{NH}_3] \frac{k_{\text{mN}}}{([\text{NH}_3] + [\text{NO}_{2,3}])(k_{\text{mN}} + [\text{NO}_{2,3}])} \quad (14)$$

溶存酸素は、光合成による炭素固定の結果増加する。また、溶存酸素が、飽和溶存酸素以下となれば大気から海へ酸素移動が生じるが、その飽和溶存酸素は水温と塩分の関数で次式のように与えられる。

$$\text{DO}_{\text{sat}} = 14.6244 - 0.367134T + 0.0044972T^2 - 0.0966S + 0.00205ST + 0.0002739S^2 \quad (15)$$

溶存酸素は、呼吸、硝化、C B O D分解、底泥による酸素要求で消費される。酸素要求物質である有機炭素の指標としてここではCBOD₅を用いている。このCBOD₅の供給源としては人為的負荷に加えて植物プランクトンの増殖・死滅の結果としてもたらされる粒子態炭素が挙げられる。一方CBOD₅の消費としては有機物質の酸化及び硝化がある。

底泥の酸素要求(SOD)は底泥表面上の粒子態有機炭素の分解に必要な海水から底泥への酸素消費を示している。このSODは生物過程を経由した反応(例えばメタン生成・消費)や無機反応(例えば硫化物の酸化)を通して行われる。もしこのSODが海水中のDOを完全に消費しつくす量以上あった場合は、余分のSODはCBODの溶出という形で海水中へ放出される。

⑩ Carbonaceous 5-day Biochemical Oxygen Demand (CBOD₅)

$$S_{1ij} = a_{OC} k_{1D} [P_c] / BOD_{U5} - k_d \theta_{BOD}^{T-20} [CBOD_5] \frac{[DO]}{k_{BOD} + [DO]} - \frac{5}{4} a_{ON} k_{90} \theta_{90}^{T-20} [NO_{2,3}] \frac{k_{NO_{2,3}}}{k_{NO_{2,3}} + [DO]} / BOD_{U5} - SOD \theta_{SOD}^{T-20} \left(1 - \frac{[DO]}{k_{SOD} + [DO]} \right) / BOD_{U5} \quad (16)$$

⑫ Dissolved Oxygen (DO)

$$S_{12j} = \alpha_{NH_3} a_{OC} G_{ij} [P_c] + a_{NO_3C} (1 - \alpha_{NH_3}) G_{ij} [P_c] + k_a \theta_a^{T-20} (DO_{sat} - [DO]) - a_{OC} k_{1R} \theta_{1R}^{T-20} [P_c] - 2a_{ON} k_{89} \theta_{89}^{T-20} [NH_3] \frac{[DO]}{k_{nit} + [DO]} - SOD \theta_{SOD}^{T-20} \frac{[DO]}{k_{SOD} + [DO]} - k_d \theta_{BOD}^{T-20} [CBOD_5] \frac{[DO]}{k_{BOD} + [DO]} \quad (17)$$

本モデルにおいては、有機炭素 (TOC) と CBOD との関係を次式で与えた。

$$TOC = P_c + 1/a_{OC} CBOD_5 \cdot BOD_{U5} \quad (18)$$

ここで a_{OC} = 酸素/炭素比 (mg-O₂/mg-C)、 P_c = 植物プランクトンバイオマス (mg-C/L)、 $CBOD_5$ = モデル内部での計算された5-day CBOD、 BOD_{U5} = ultimate CBOD/5-day CBOD = 3.0
本研究の生態系モデルで使用した係数、パラメータの値を表1～表4にまとめた。
主な係数、パラメータは、Chesapeake湾⁴⁾及び東京湾⁷⁾での設定値について報告されている値を用いた。

表1 植物プランクトン増殖に関連した係数

定数	記号	単位	値
最大増殖速度 (20℃)	G_{1max}	1/day	2.0
温度関数	θ_1	—	1.068
窒素の半飽和定数	k_{mN}	mg-N/L	0.05
リンの半飽和定数	k_{mP}	mg-P/L	0.005
呼吸速度 (20℃)	k_{1R}	1/day	0.12
温度係数	θ_{1R}	—	1.045
植物プランクトンの沈降速度	V_s	m/day	0.5
死亡率	k_{1D}	1/day	0.1
増殖最適光量	I_s	y/day	350.0
水の光消散係数	k_e	1/m	0.8
植物プランクトンの自己消散係数	k_c	m ² /mg-Chl	0.017
日照率	F	—	0.59
炭素/クロロフィル a の比	a_{CCh}	mg-C/mg-Chl	60.0

表2 リン循環に関連した係数

定数	記号	単位	値
リン/炭素比	a_{PC}	mg-P/mg-C	0.02
DOP分解速度(20°C)	k_{35}	1/day	0.03
温度係数	θ_{35}	—	1.08
POP分解速度(20°C)	k_{45}	1/day	0.03
温度係数	—	—	1.08
植物プランクトンからDOPへの回帰率	f_{DOP}	—	0.15
植物プランクトンからPOPへの回帰率	f_{POP}	—	0.35
植物プランクトンからDIPへの回帰率	f_{DIP}	—	0.50
分解における植物プランクトンの半飽和定数	k_{mPc}	mg-C	0.05
POPの沈降速度	V_{s4}	m/day	0.5
DIPの底泥からの溶出	PO4-FLX	mg-P/m ² /day	底質フラックスモデル

表3 窒素循環に関連した係数

定数	記号	単位	値
窒素/炭素比	a_{NC}	mg-N/mg-C	0.18
DON分解速度(20°C)	—	1/day	0.03
温度係数	θ_{35}	—	1.08
PON分解速度(20°C)	—	1/day	0.03
温度係数	θ_{35}	—	1.08
NH ₃ 硝化速度(20°C)	—	1/day	0.05
温度係数	θ_{35}	—	1.08
硝化における溶存酸素の半飽和定数	—	mg-O ₂ /L	1.5
NO ₃ のガス化速度(20°C)	—	1/day	0.09
温度係数	θ_{35}	—	1.045
NO ₃ のガス化に対するミハエリス定数	k_{NO3}	mg-O ₂ /L	0.5
植物プランクトンからDONへの回帰率	f_{DON}	—	0.40
植物プランクトンからPONへの回帰率	f_{PON}	—	0.10
植物プランクトンからNH ₃ への回帰率	f_{NH3}	—	0.50
アンモニア態窒素の底泥からの溶出率	NH ₃ -FLX	mg-N/m ² /day	底質フラックスモデル
PONの沈降速度	V_{s7}	m/day	0.5

表4 溶存酸素・有機物循環に関連した係数

定数	記号	単位	値
酸素/炭素比	a_{OC}	Mg-O ₂ /mg-C	32/12
CBOD ₀ /CBOD ₅ 比	BOD ₀₅	—	3.0
CBOD分解速度(20°C)	k_d	1/day	0.08
温度係数	θ_d	—	1.047
酸化過程の溶存酸素の半飽和定数	k_{BOD}	Mg-O ₂ /L	0.5
酸素/窒素比	a_{ON}	Mg-O ₂ /mg-N	32/14
硝酸摂取における酸素/炭素比	a_{NO3}	Mg-O ₂ /	(48/14)
堆積物酸素要求速度	SOD	mg-N Mg-O ₂ /m ² /day	a_{NC} 1600~2260
温度係数	θ_{SOD}	—	1.068
堆積物酸素要求量の半飽和定数	k_{SOD}	Mg-O ₂ /L	3.0

長江からの汚濁負荷は流量の関数として次式のように与えられている（徐ら、2000年）。

$$SS=1.7632 \cdot 10^{-4} Q^{1.3705} \quad (19)$$

$$COD=0.7487 Q^{0.1089} \quad (20)$$

$$DIN=0.1501 Q^{0.1708} \quad (21)$$

$$TP=1.5869 \cdot 10^{-7} Q^{1.3705} + 0.0115 \quad (22)$$

$$TN=0.2259 Q^{0.1708} - 0.2132 \quad (23)$$

ここに、SS, COD, DIN, TP, TNの単位はmg/l (g/m³)、Qの単位は(m³/s)である。

長江以外の河川の汚濁負荷は現在入手不可能であることから本式を仮定した。また生態系に用いられる独立変数に変換するため、長江における観測値をもとに、以下のような配分を行った。

DOP=0.15・Tp、POP=0.35・Tp、DIP=0.5・Tp、DON=0.4・Tn、PON=0.1・Tn、NO3=0.25・Tn、NH4=0.25・Tn、CBOD=0.89・COD。台湾海峡、対馬海峡、太平洋開境界における水質値はそれぞれ、山口県水産振興課観測データ、福岡県水産海洋技術センター観測データ、熊本県水産研究センター観測データ、鹿児島県水産振興課調査データ、日本海洋データセンター各層観測データを基に設定した。

4. 結果・考察

(1) 流動計算結果

- a) 長江希釈水：長江大通流量観測点での過去の流量データによると最大流量92,600m³/s (1954年8月1日)、最小流量4,620m³/s (1979年1月31日)、年間平均流量は26,800m³/sとなっている。このように季節によって流量は大きく変動するが、夏季6月は通常30,000~40,000m³/s、程度の淡水が長江希釈水となって最初は南東方向に流入し、その後東経123°付近で北東に向きを変え東経126°の済洲島（韓国）付近まで達することが海表面水平塩分分布結果（図5-a）からわかる。この計算結果は従来の多くの観測結果（例えば Proc. Int. Workshop on sediment transport and storage in coasted sea-ocean system, 1999）と非常によく一致する。また東西測線での塩分計算結果（図8-b）から長江希釈水は表層5~6mの厚さで強い塩分成層を形成して東シナ海を横切っていることがわかる。
- b) 黄海底層冷水：今回の観測結果から東西測線東経126°付近の底層にまわりの海水より冷たい水塊が存在することが判明した（図3-a）。高塩分・高温である黒潮の一部は黄海に入り黄海暖流系となって済洲島から黄海の朝鮮半島沿岸を北上することが水深40mの水平塩分・水温分布結果（図5-c、図6-c）から明らかとなった。塩分・水温に駆動された密度流は底層を黄海から渤海まで朝鮮半島沿いに進入している。その後一部は渤海で海表面へ到達して表層を南下している（図6-a）。また一部は水深20m層で水平に循環流を形成して遼東半島沿いに中国沿岸を黄海底層冷水となって南下することが水深20mでの水平水温分布結果（図6-b）から判明した。この黄海底層冷水は南下を続け長江付近にまで到達していることがわかる。東西測線での水温計算値鉛直分布（図8-a）によれば東経126°付近の水深20mの底層にまわりの海水から明らかに水温の低い冷水塊が存在しており、この冷水塊は黄海底層冷水を起源としていることが明らかとなった。
- c) 暖流系沿岸水：南シナ海からの暖流は台湾海峡を通過後台湾暖流系として北上する。珉江からの淡水は中国沿岸域を北緯28°付近まで暖流系沿岸水として北上し、ここで向きを東

- に方向転換し東シナ海を横切っている(図5-b,c)。南北測線での鉛直塩分分布結果(図7-b)よりより長江希釈水と暖流系沿岸水が平行して東シナ海を横切っている様子が表現されている。
- d) 浮遊懸濁物分布の計算結果：長江から供給された浮遊懸濁物(0~1 μ m)は鉛直に混合しながらも表層を東に長江希釈水によって運ばれている(図7-c, 図8-c)。粘土(1~4 μ m)は長江河口域に流入後底層に沿って東に長江希釈水に運ばれている(図7-d, 図8-d)。しかし東経125° 30' 付近で底層から離れ水深30m位を水平に東へ分布しているのがわかる(図8-d)。これは東西測線での観測されたSS濃度の鉛直断面図(図3-c)と非常によく一致する。一方珉江由来のシルトは水深30m付近を東に運ばれていることがわかる(図7-d)。シルト・砂(4 μ m以上)は長江河口域に流入後底層に沿って長江希釈水によって東に運ばれていくことがわかる(図7-e, 図8-e)。これは従来観測されている夏期(6月)の北緯31° Nにおけるtotal suspended matter(mg/l)の鉛直濃度分布(例えばYang等、1998)の観測値と非常によく一致している。
- e) 1998年は長江の記録上では第二番目の洪水被害が発生した年であり、最大流量86,000 m³/s程度の流量であったと推定されている。6月から9月にかけて長期間洪水が発生し(図2)、少なくとも6度の洪水波が長江を伝播し、長江河口域から東シナ海に流出した。洪水波に伴う大量の淡水は東シナ海にパルスとして次々と進入しており、高濁度淡水のジェット噴流がパルス状に海水の東シナ海に貫入していったことが衛星画像に観測されている。一つのパルスが貫入した後、次のパルスが来るまでは流量は急速に減少するため、貫入した高濁度淡水は大きな水塊を形成するとともに、周りの海水に拡散していく。
- 1998年7月28日から8月6日にかけて洪水流量80,000 m³/s以上が続き、8月11日から8月16日にかけて大きな低塩分水塊が東シナ海の中央部に形成されているのが計算結果からわかる(図9)。同様に高濁度水塊が8月6日に長江河口域から東シナ海に放出され、8月11日には独立した高濁度水塊が形成され、8月16日には高濁度水塊が周りの海水に拡散・混合していく様子が明確に計算されている(図10)。このようなパルス状のジェット噴流が東シナ海中央部まで貫入することにより、日本の太平洋沿岸および日本海にそれら水塊が到達する。従来長江河川水が日本領海に直接到達するという知見を証明するものではなく、今回の計算結果により初めてそのことが強く示唆された。

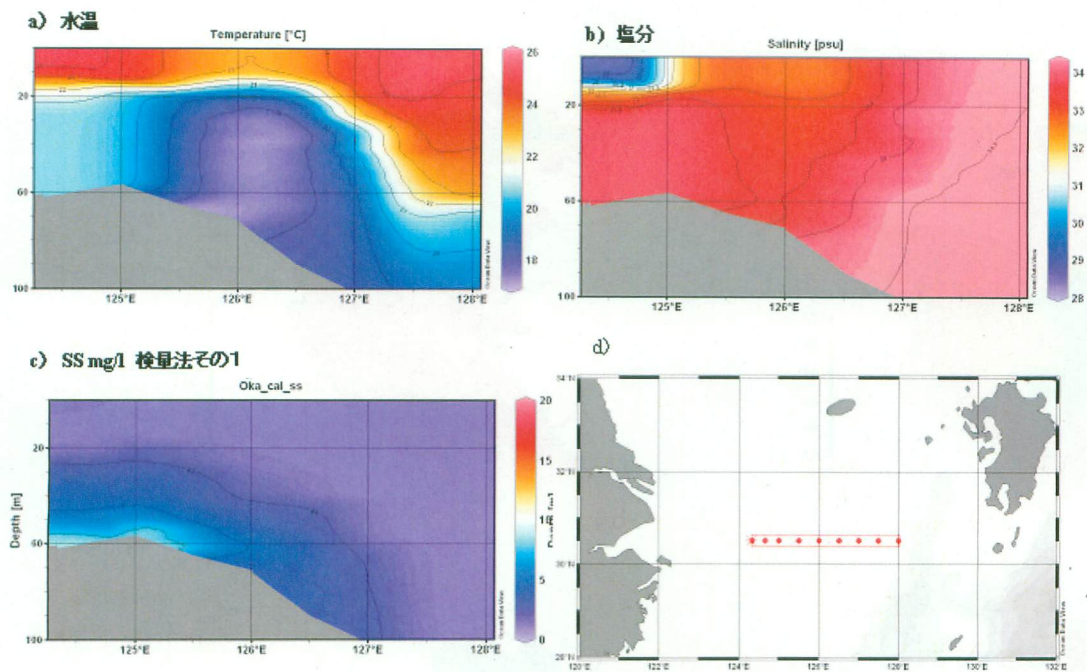


図 3. 東西測線における水温・塩分・SS濃度測定値(2002年6月)の鉛直断面図
 a) 水温、b) 塩分、c) SS濃度、d) 東西測点

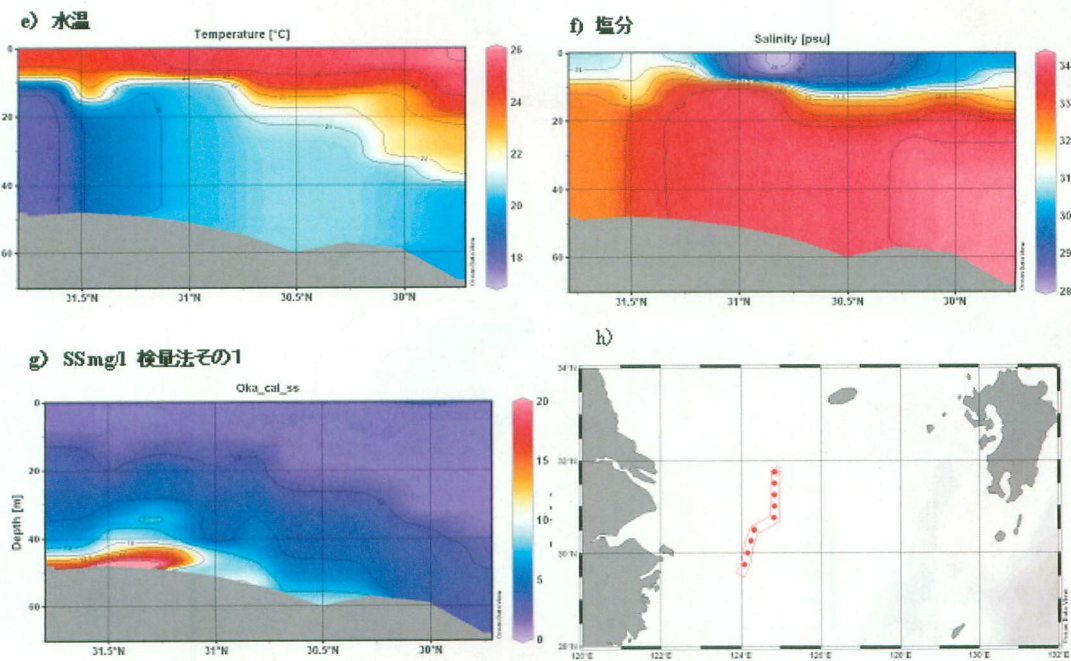


図 4. 南北測線における水温・塩分・SS濃度測定値(2002年6月)の鉛直断面図
 a) 水温、b) 塩分、c) SS濃度、d) 南北測点

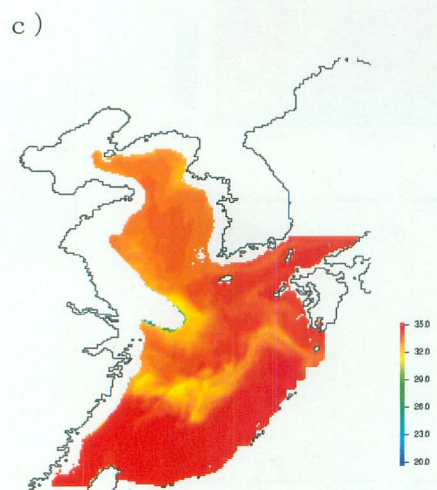
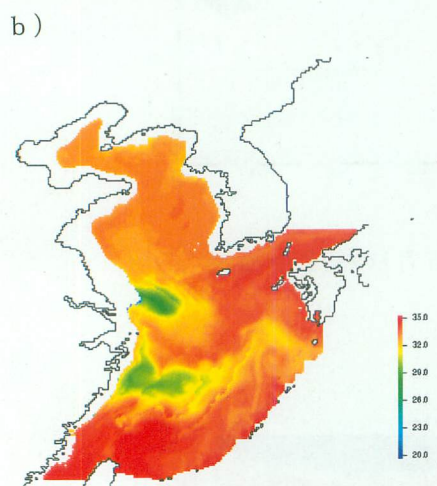
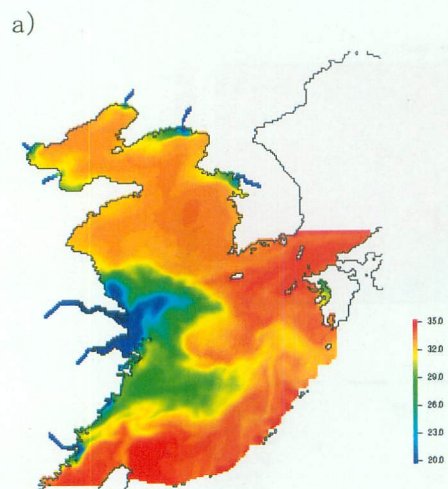


図5. 塩分計算値の水平分布
a) 表層、b) 水深20m、c) 水深40m

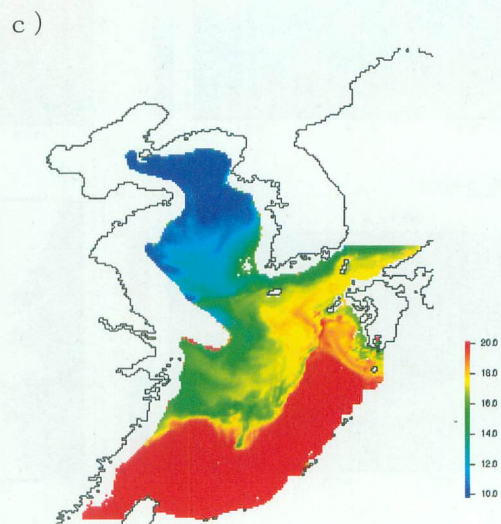
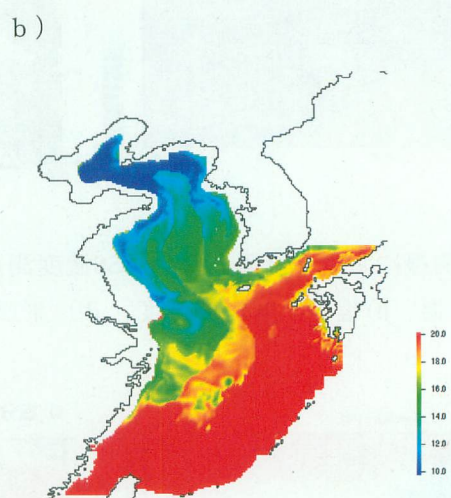
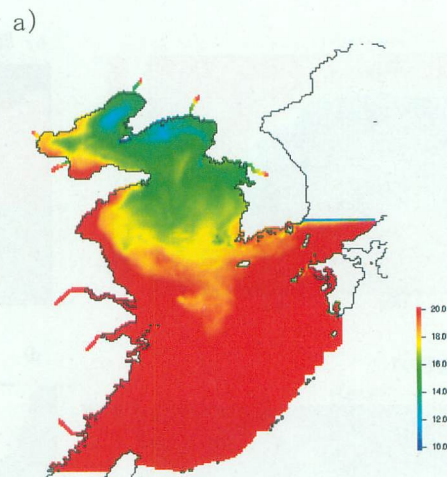


図6. 水温計算値の水平分布
a) 表層、b) 水深20m、c) 水深40m

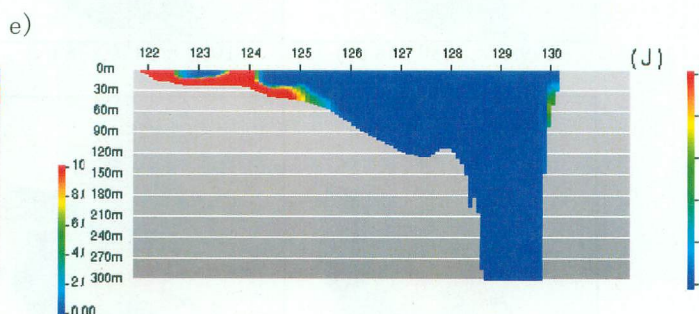
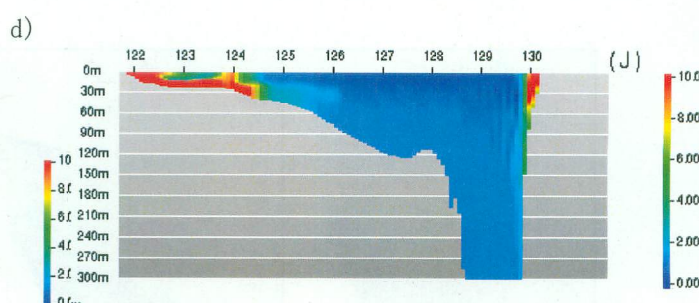
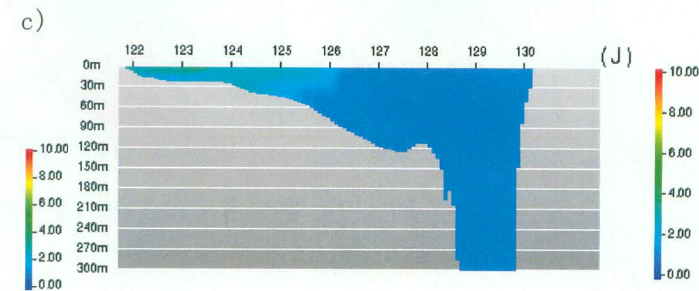
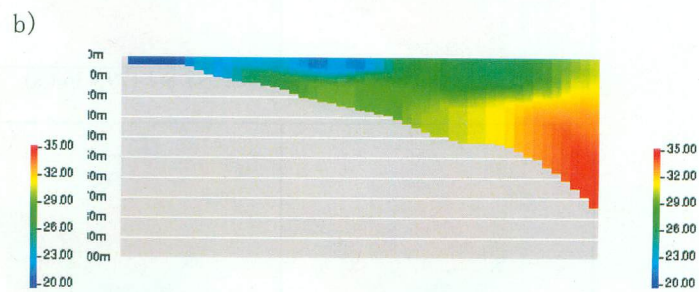
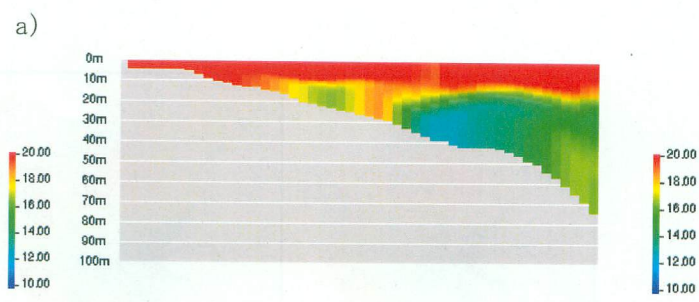
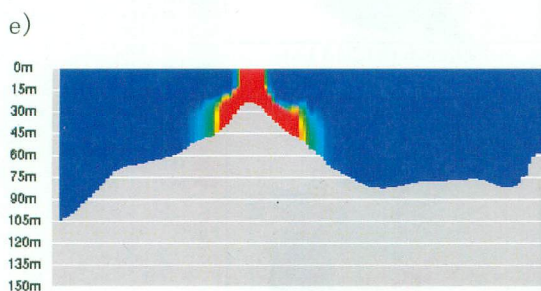
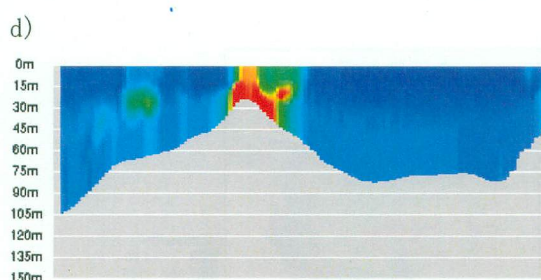
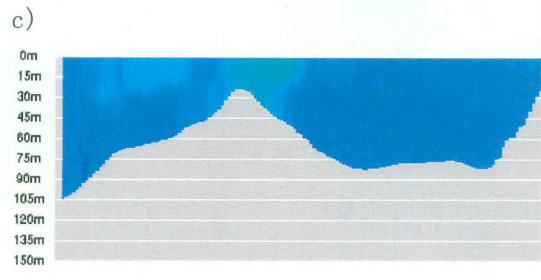
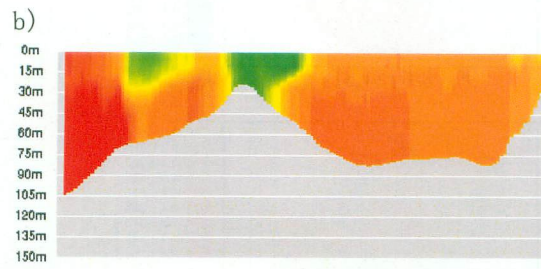
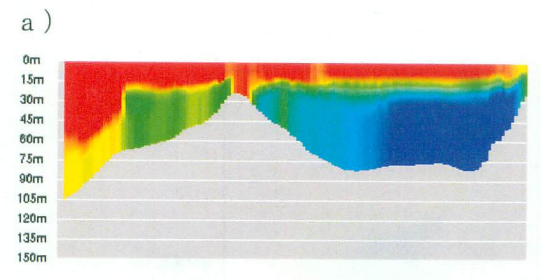


図7. 南北測線での計算値鉛直分布 a) 水温 b) 塩分、c) 浮遊物、d) 粘土、e) シルト・砂

図8. 東西測線での計算値鉛直分布 a) 水温 b) 塩分、c) 浮遊物、d) 粘土、e) シルト・砂

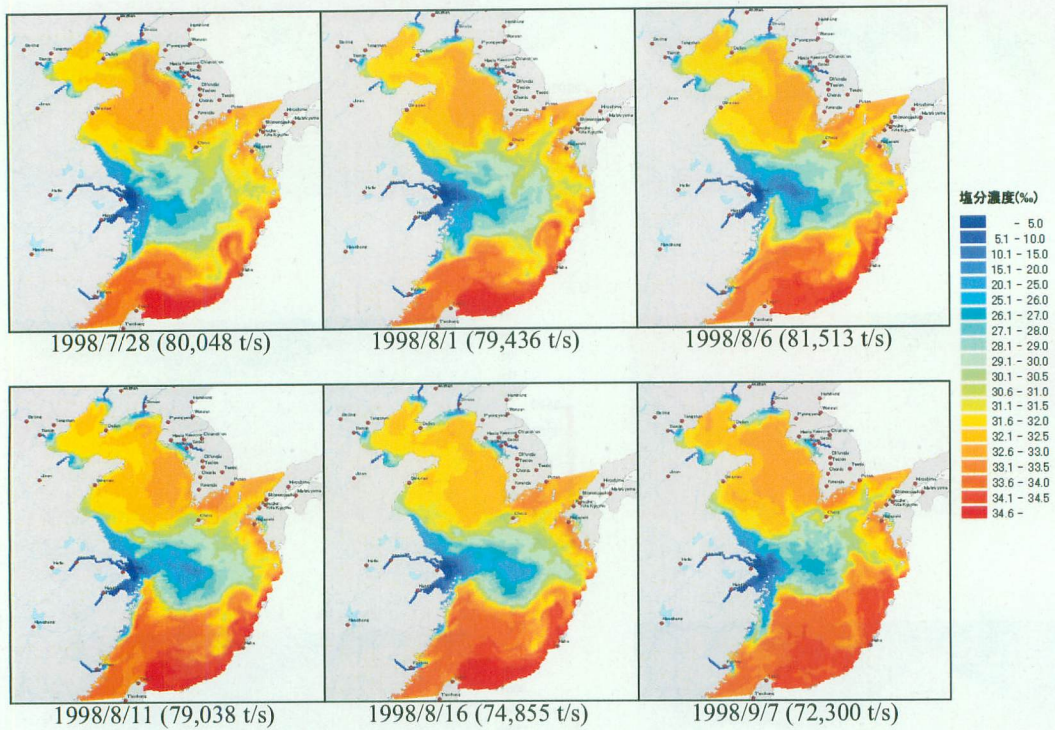


図-9 塩分濃度の変化 (カッコ内は長江河川流量)

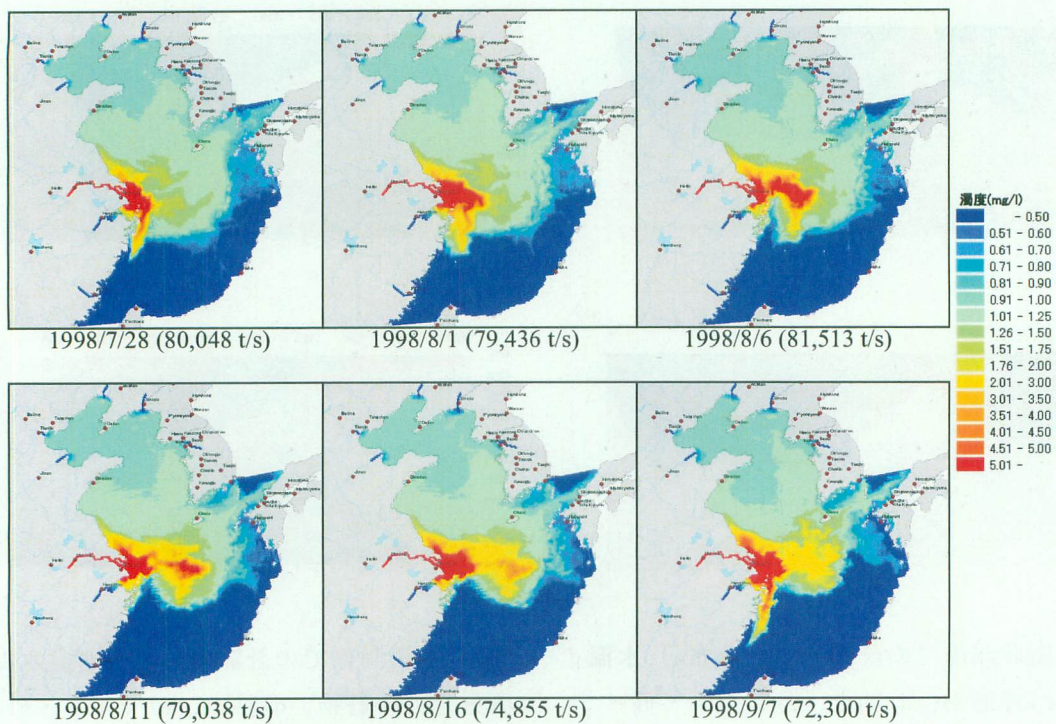


図-10 濁度の変化 (カッコ内は長江河川流量)

(2) 塩分遡上計算結果

長江の年平均流量は約 $30,000\text{m}^3/\text{s}$ であり、洪水期(5-10月)に年間流量の約72%、渇水期(11-4月)に約28%が流出する。長江河口域は平均潮位変動が2.66m、最大4.62mであり、河川水と潮汐流が相互に関連し複雑な流れを形成している。長江は崇明島により北支流(st. 9,10)と南支流(st. 7,8)に分かれ、st. 6が分岐点となっている(図11-a,b)。長江河川流量が多い(年平均流量以上)時期では河口域は淡水が支配的で塩分濃度はゼロに近い値を示す。しかし流量が減少し約 $10,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度以下になると潮汐による流れが河川流より卓

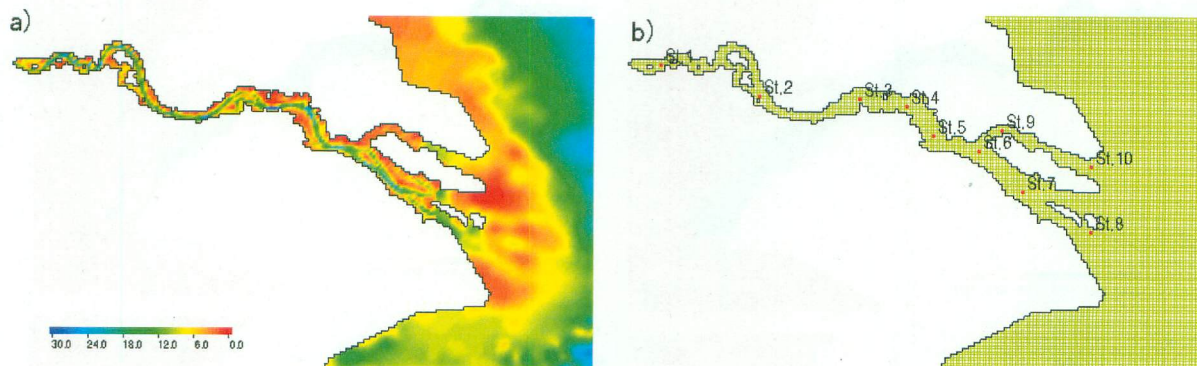


図11. 長江河口域と計算小領域：長江河川底地形(1 kmメッシュデータ)、計算グリッド(1分)

越するようになり、高塩分濃度の海水が北支流から浸入し、st. 6の分岐点を越えて南支流に進入する。長江流量が最小になる2月27日には進入量が最大になり、長江河川水と混合し南支流を崇明島に沿って流下する様子が計算されている(図12)。さらに長江本流は長興島の南側を上海に沿って流下し長江河口域へと流入していることがわかる。

1998年-1999年にかけてのシミュレーションの時系列結果から、st. 10,9(北支流)の塩分濃度がst. 8(南支流)の塩分濃度よりはるかに高いことから塩分遡上が北支流を通じて起こることを示している。またst. 9の塩分濃度は1999年3月5日-3月15日にかけて最大(5-7%)になることから、この時期に塩分遡上がもっとも高くなることが判明した。また北支流での塩分成分層は弱いものの底層を高塩分層が侵入する結果が得られている。1999年4月4日の塩分水平分布(図12-c)は、逆に長江本流から北分流に向けて長江河川水が流れ込む様子が示されており、塩分遡上は後退しつつあることを示している。また長江本流も一部は長興島の北側を流下するものの、主に長興島の南側を流下し長江河口域へと流入している。これら計算結果は従来発表されている流動・塩分分布の観測結果を良く再現していることが判明した(Mao Z., et al., 2001)。

(3) 長江流域での経済発展に伴う水資源需要量の増大を約 $3000\text{m}^3/\text{s}$ 程度と推定しており、長江河川流量からこの分を差し引いた流量で同様のシミュレーション計算を行った。この結果北支流を通しての塩分遡上は飛躍的に増加し、st. 9の塩分濃度は1999年3月15日には表層・底層とも最大(15%)と約3倍に増加した。また北支流を通じて長江本流に流入した海水は河川水と混合し長江本流をさらに上流へと遡上し、st. 5まで達していることが判明した(図13-a,b)。淡水と海水の密度差による塩分成分層が強く発達し、底層塩分濃度が表層塩分濃度に比べて高く、密度の大きい底層水が長江内部に遡上する様子が計算結果から得られた。しかし

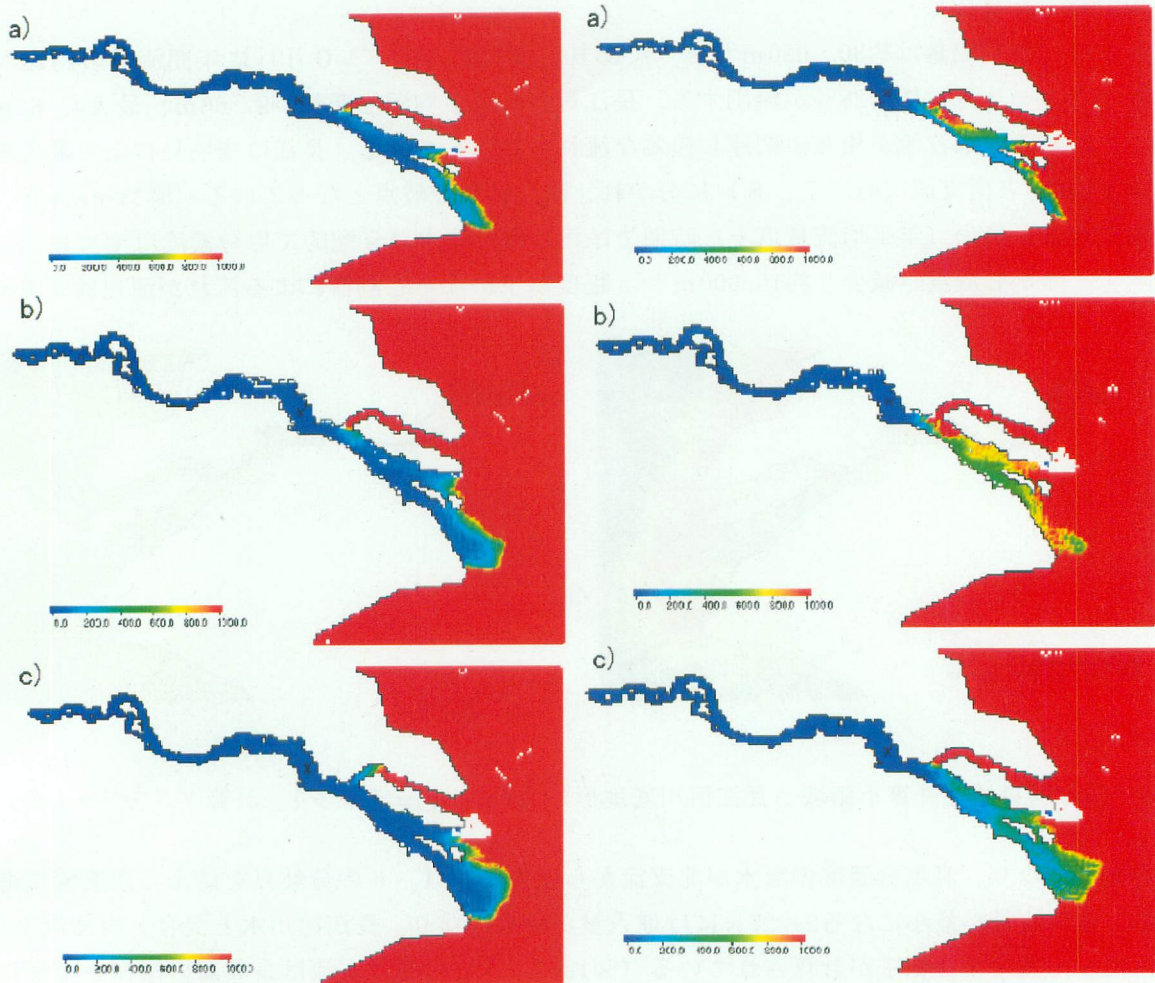


図12. 塩分再現計算結果 a) 1999年1月18日
b) 1999年2月27日、c) 1999年4月4日

図13. 塩分シナリオ計算結果、a) 1999年1月18日
b) 1999年2月27日、c) 1999年4月4日

長江河川水が増加する4月4日には長江本流から北支流に流入が始まっており塩分遡上の後退が起こっていることが示された。またst. 4とst. 5の間のx印の点での塩分濃度は渇水期にはボイラーの取水基準値（塩分濃度50ppm）を超過することが判明しており、この周辺に立地する工場群での操業に大きな影響を与えるリスクが示唆された。

このような長江での塩分遡上の可能性についての計算結果は初めてのものであり、長江河川底の地形データが高精度であることと、3次元モデルの精度が高いことが本計算を可能にした。

(3) 生態系計算結果

長江河口域・東シナ海における広域的な水質・クロロフィル分布の実測データは現在のところ得られていない。衛星画像SeaWiFS によって広域のクロロフィル分布が得られているが(図14)、東シナ海はアジア・モンスーン地域に属するため、夏期は雲に覆われていることが多い。また衛星画像SeaWiFSでは高濁度領域における正確なクロロフィル濃度測定は不可能であり、長江河口域は高濁度であることから、欠測領域となっている(図14)。しかし衛星画像において長江河口域付近で断片的に得られているクロロフィル濃度と計算結果(1998年9月15日)を比較してみると、ほぼ同程度の最大クロロフィル濃度(約10 mg/m³)が得られており、藻類増殖がほぼ再現されていることを示唆している。しかし長江河口域での高濁度領域でのクロロフィル濃度計算結果は過大評価となっており、濁度による水中照度減衰係数が過小であることをうかがわせる。また渤海におけるクロロフィル濃度が衛星画像から得られている結果より過小評価となっており、黄河や天津から流入する河川での汚濁負荷推定値が過小であることを示唆している。窒素・リン計算結果(図16, 17)については観測結果がなく、今後従来得られている観測結果の収集を待たなければならない。

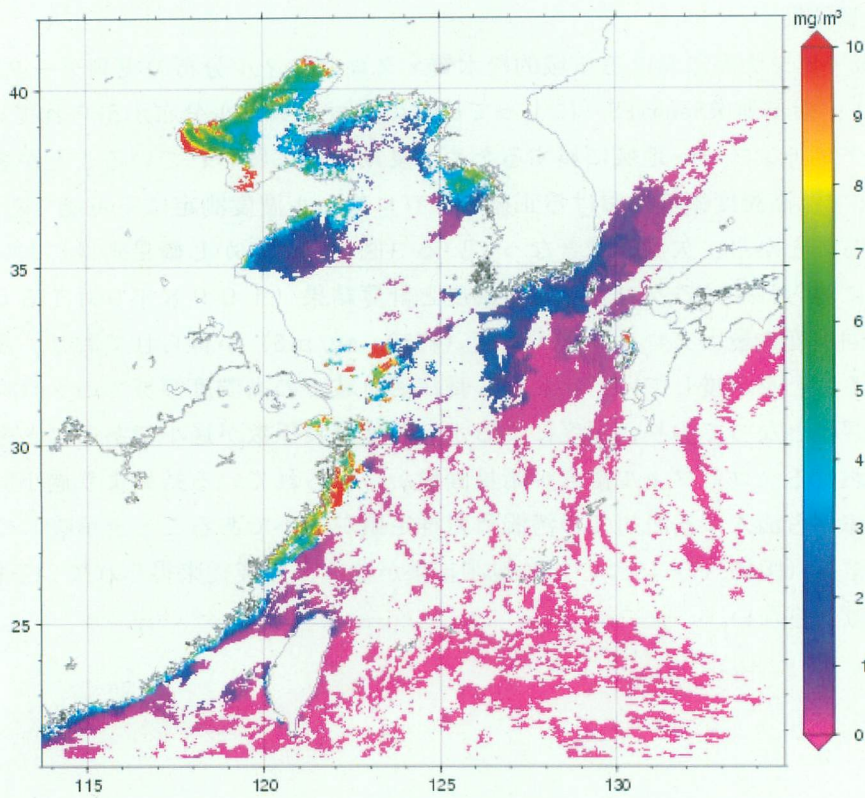


図-14 クロロフィル衛星観測 (1998年9月15日)

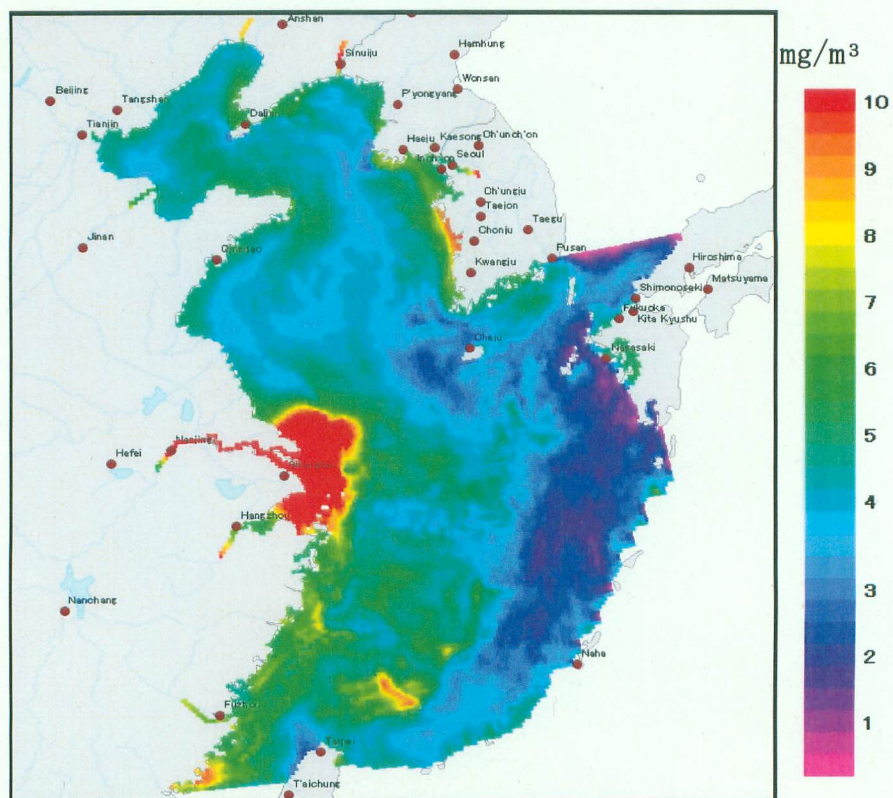


図-15 クロロフィル計算結果 (1998年9月15日)

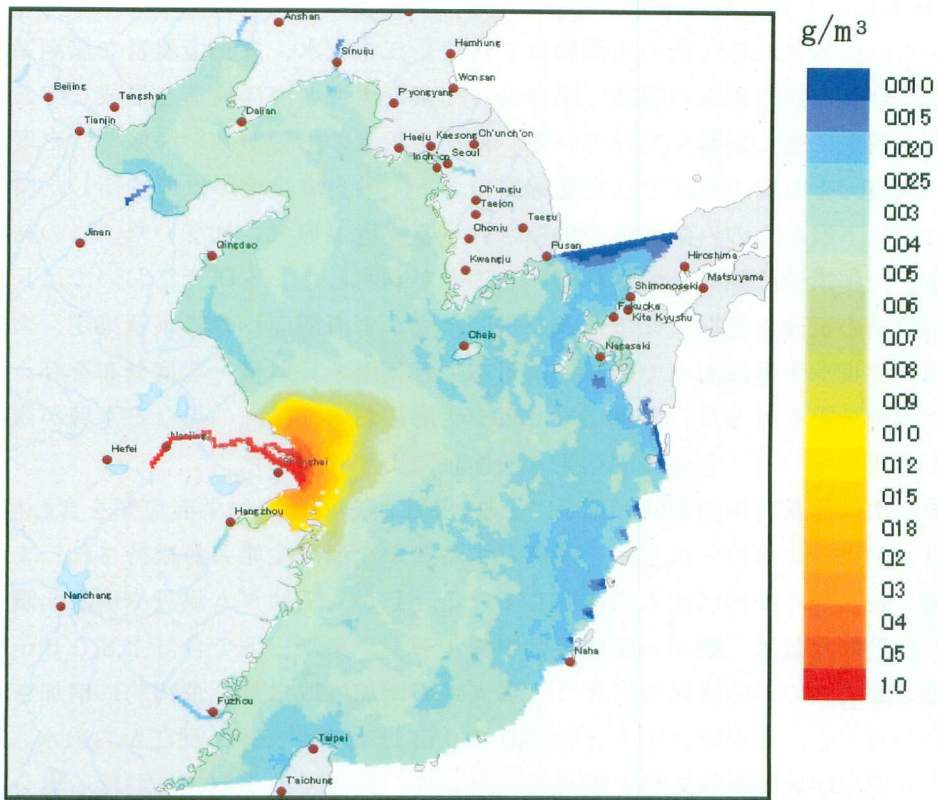


図-16 リン計算結果 (1998年9月15日)

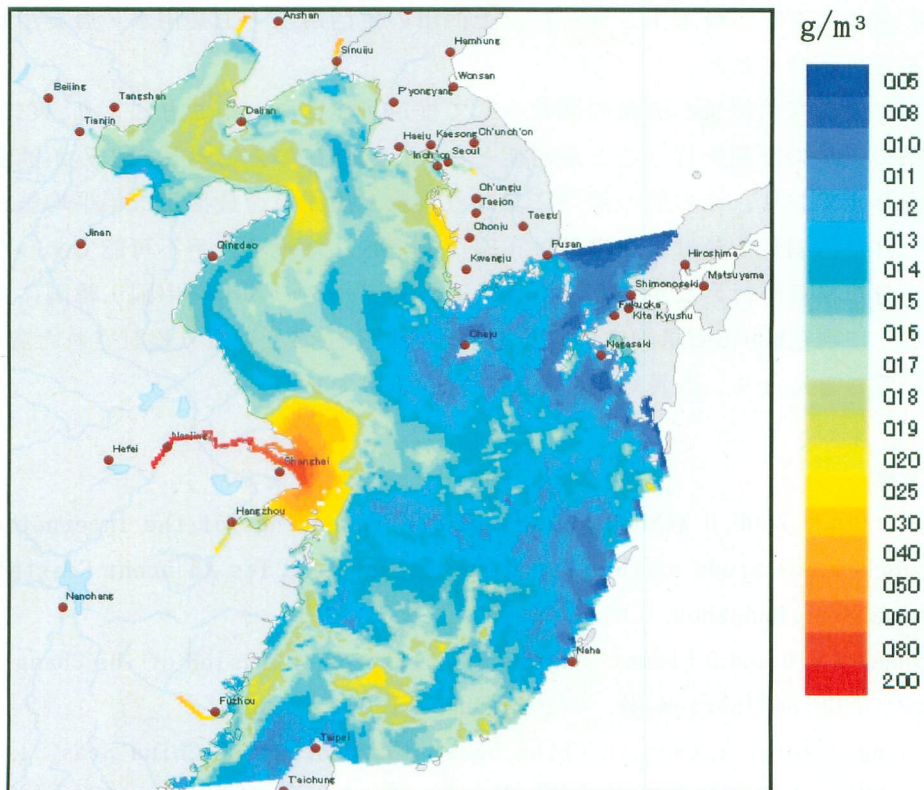


図-17 窒素計算結果 (1998年9月15日)

5. 本研究により得られた成果

長江からの供給される大量の汚濁物質を含む長江希釈水、栄養塩豊富な黒潮系水、低栄養塩の黄海系水及び暖流系沿岸水が複雑に絡み合っ東シナ海の海洋構造を形成しており、栄養塩分布はこの海洋構造に強く影響を受けている。長江希釈水の影響が強い海域では密度躍層上層で栄養塩が高い環境、その周辺海域では密度躍層の上下で栄養塩濃度がほぼ均衡した環境、東経125度よりも東方では下層からのみ栄養塩が供給される環境が形成されていた。この結果藻類分布は栄養塩分布と海洋構造に強く支配されていることが判明した。本研究においては長江からの淡水及び土砂供給量の正確な把握、衛星TRMMを用いた東シナ海海面への降雨量推定、大気大循環モデル結果を用いて東シナ海海面上での風による応力と気温・日射量・湿度分布を与え、東シナ海での長期海洋流動計算を行った。計算結果は東シナ海において起源の異なる水塊が複雑に分布する海洋構造を再現していることが観測結果との検証により判明した。

長江の淡水供給量は年間約9800億 m^3 に上り、長江からの豊富な栄養塩類を含む淡水供給によって長江河口域や東シナ海の一次生産を基礎とする豊かな海洋生態系が維持され、また海洋環境そのものが強く長江からの河川流入に依存している。しかし三峡ダム建設や南水北調計画のスタートにより、設計取水量は三峡ダム完成後は中央ルート、東ルートで合計1800 m^3/s となっている。一方上海周辺での経済発展に伴う工場立地の増加は取水量を飛躍的に増加させており、南水北調を合わせてこれらを総合すると約3000 m^3/s の水資源が長江から取水されることが推定された。長期海洋流動計算結果を境界条件として、長江での小領域における塩分遡上再現計算と今後の水資源需要増加に伴う塩分遡上シナリオ計算を行った。シナリオ計算結果は、長江河川流量が最小となる渇水期（11-4月）での塩分遡上を定量的に求めることが可能となった。また塩分遡上は非常に大きく（最大15%）、上海市の生活用水・工業用水・農業用水に大きな影響を与えることが示唆された。

長江からの栄養塩供給量が流量の関数として推定可能になったことにより、東シナ海における海洋生態系モデルの計算を行うことが可能となった。現在のところ長江のみが流量・汚濁負荷の日平均値を与えており、その他の河川における流量・汚濁負荷量推定は年平均値として与えた。今回用いられた汚濁負荷量は長江以外は正確な検証された値は入手不可能であったので、その計算結果の十分な検証が行えなかったが、今後それらデータの入手を中国・韓国に求めていく予定である。さらに現在MODIS衛星画像の収集・整理を行っており、より検証された雲の少ない衛星データを用いることにより、計算結果の検証を行う予定である。

6. 引用文献

- G YU, J. M. Martin, J ZHOU, H WINDOM and R DAWSON: Proceedings of the International Symposium on Biogeochemical Study of the Changjiang Estuary and Its Adjacent Coastal Waters of the East China Sea , Hangzhou, China. 1988,
- Z Mao, H Shen, J Liu and D Eisma: "Types of saltwater intrusion of the Changjiang Estuary" Science in China, (Series B), vol. 44 Supp. 150-157, 2001.
- Y SU, X Weng: "Water masses in China Seas", Oceanology of China Seas, 1, 3-16. 1994.
- H SHEN: "Material flux and land-and-ocean interactions in the Changjiang(Yangtze) estuary", Proc. of an international workshop on sediment transport and storage in coastal

- sea-ocean system. 1-7, Tsukuba, 1999.
- D HU: "Material fluxes in the East China Sea I: Fine sediment flux", Proc. of an international workshop on sediment transport and storage in coastal sea-ocean system. 8-12, Tsukuba, 1999.
- 徐開欽、張繼群、渡辺正孝: 中国長江流域の水環境問題(6) - 南水北調プロジェクトの導水ルートとその環境影響一、用水と廃水、Vol.43、No.3、45-52、2001.
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor: "Diagnostic and prognostic numerical circulation studies in the South Atlantic Bight". *Journal of Geophysical Research*, **88**, 4479-4592, 1983.
- Mellor, G. L. and T. Yamada: "Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems". *Review of Geophysics and Space Physics*, **20**, 851-875, 1982.
- Smagorinski, J.: "General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment". *Monthly Weather Review*, **91**, 99-164, 1963.
- U.S Environmental Protection Agency: "A Steady-state Coupled Hydrodynamic/Water Quality Model of the Eutrophication and Anoxia Process in Chesapeake Bay", 1987.
- Blumberg, A. F., and D. M. Goodrich: "Modeling of wind-induced destratification in Chesapeake Bay", *Estuaries*, **13**, 236-249.
- Fofonoff, N. P.: "Physical properties of sea-water", p.3-30. In *The Sea*, Vol.1. Interscience, New York, 1962.
- 渡辺正孝・天野邦彦・石川裕二・木幡邦男: 秋期の東京湾奥部における風による成層破壊と底層の無酸素水塊の湧昇過程、土木学会論文集、No.608/VII-9, 13-29, 1998.
- Oey, L. Y.: "Simulation of mesoscale variability in the Gulf of Mexico: Sensitivity studies, comparison with observations, and trapped wave propagation". *Journal of Physical Oceanography*, **26**, 145-175, 1996.
- 環境省地球環境研究総合推進費終了研究報告書: "(1) 長江経由の汚染・汚濁物質の負荷量把握に関する研究", 「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.
- Y SU, X Weng: "Water masses in China Seas", *Oceanology of China Seas*, **1**, 3-16, 1994.
- Y SAITO: "Sedimentary Environment and Budget in the East China Sea", *Bull. Coastal Oceano.* **43-58**, 1998.
- Z YANG, Z GUO, C PANG, Y QU and K LEI: "Transport of suspended matter from the East China Sea to its Eastern Deeper Waters", *Prod. Japan-China Joint Symposium on CSSCS*, 265-275, 1998.
- P Franks and C Chen: "A 3-D prognostic numerical model study of the Georges bank ecosystem. Part II: biological-physical model" *Deep-Sea Research II* **48**, 457-482, 2001.

7. 国際共同研究等の状況

本研究課題は、国立環境研究所と中国科学院地理科学与資源研究所・中国水利部長江水利委員会・中国華東師範大学との間で交わされた共同研究計画に基づき遂行されている。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表(学術誌・書籍)

<学術誌(査読あり)>

- ① D Kim, M. Watanabe, Y. Nakayasu and K. Kohata: "Changes in O₂- and H₂O₂ production by *Chattonella antiqua* during diel vertical migration under nutrient stratification", *Aquatic Microbial Ecology*, vol. 39:183-191, 2005.
- ② D. Kim, M. Watanabe, Y. Nakayasu and K. Kohata: "Production of superoxide anion and hydrogen peroxide associated with cell growth of *Chattonella antiqua*", *Aquatic Microbial Ecology*, vol. 35:57-64, 2004.
- ③ 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.
- ④ Kaiqin XU, Jiqun Zhang, Seiji Hyashi, Shogo Murakami, Hediaki Maki, Baohua XU and Masataka Watanabe: Characteristic of Water Quality in the Changjiang River Basin: Observations between NIES and CWRC conducted in 1998 and 1999, *Acta Geographica Sinica*, 59(1), 118-124, 2004
- ⑤ Kaiqin Xu, Jiqun Zhang, Masataka Watanabe, and Chunpeng Sun: Estimating River Discharge from Very-High-Resolution Satellite Data: A Case Study in the Yangtze River, China, *Hydrological Processes*, in press 2004
- ⑥ 徐開欽、張継群、渡辺正孝: 中国における水資源の需給現状およびその利用動向の分析(2)、*資源環境対策*、Vol. 39, No. 1, 187-199, 2003
- ⑦ 徐開欽、張継群、村上正吾、陳中原、渡辺正孝: 長江流域における土砂堆積の動向分析-2000年長江土砂公報より、*用水と廃水*、45(3) 247-253, 2003
- ⑧ 徐開欽: 三峡ダム湖が貯水開始-世界最大級の水力発電所が発電開始へ---用水と廃水、45(10) 908-911, 2003
- ⑨ 徐開欽・張継群・陳中原・渡辺正孝: 三峡ダム区域における水質汚濁の現状とその防止対策、*資源環境対策*、Vol. 40, No. 2, 89-98, 2004.
- ⑩ Q Wang, M Watanabe, S Hayashi and S Murakami: "Using NOAA AVHRR data to assess flood damage in China", *Environmental Monitoring and Assessment*, 82:119-148, 2003.
- ⑪ 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.
- ⑫ 志々目・渡辺・土井: 「堆積物コア中の¹³⁷Cs濃度分布のモデル化に関する研究」, *海岸工学論文集*、vol. 49, 966-970, 2002.

<学術誌(査読なし)>

なし

<書籍>

なし

<報告書類等>

- ① Watanabe, M., K. Amano and K. Kohata (1999): Three-dimensional circulation model driven by wind, density, and tidal force for ecosystem analysis of coastal seas, CGER's Supercomputer Monograph Report Vol.5, National Institute for Environmental Studies, pp. 47

(2) 口頭発表

- ① M. Watanabe: “Impact of large variations in the Changjiang river flux on environmental properties in the estuary and the East China Sea”, Second IAG Yangtze Fluvial Conference, 2004.
- ② K. Xu, J. Zhang, M. Watanabe, S. Hayashi and Z. Chen: “Estimation of sediment and nutrient fluxes from the Changjiang river into the East China Sea”, Second IAG Yangtze Fluvial Conference, 2004.
- ③ M. Watanabe: “Integrated Environmental Monitoring of APEIS as Scientific Infrastructure for Sustainable Development”, CSD-12 Conference, New York, 2004.
- ④ Kaiqin XU, Jiqun ZHANG and Masataka WATANABE: “Estimation of freshwater discharge and pollutant loads from Yangtze River to the East China sea using satellite data”, the 6th International Conference on the Environmental Management of Enclosed Coastal Seas, Bangkok, Thailand, 2003.

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

天山賞受賞：中国新疆自治政府から授与。2003年

(5) 一般への公表・報道等

国際協力銀行での講演 2003年12月10日

CSD12での講演 2003年5月

エコアジアでの講演 2003年、2004年

水フォーラムでの講演 2004年

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

東シナ海は豊かな生物生産を持つ世界有数の大陸棚であり、海洋環境保全のためにUNEPの地域海計画や日中韓環境大臣会合における陸域から海域への汚濁負荷削減など国際的な政策立案を行うことが求められている。またUNEPが推進しているミレニアム・エコシステム・アセスメント(MA)のなかのサブグローバル・アセスメントの一環として「西部開発に伴う長江及び東シナ海への環境影響評価」を行うことが求められている。これらの成果はチャイナ・カウンシルの中の流域タスクフォースの提言に反映させ、中国政府へ提出された。

本研究課題により、海洋環境保全のための陸域に対する環境政策オプションと海洋環境の将来予測に必要な定量的な海洋観測データを得ることができた。今後はエコアジア環境大臣会合、APFED, 日中韓環境大臣会合等を通じて、アジアの国際的な海洋環境政策イニシャティブに貢献されうる。