

課題名 B-0906 東シナ海環境保全に向けた長江デルタ・陸域環境管理手法の開発に関する研究

課題代表者名 越川 海（独立行政法人国立環境研究所地域環境研究センター海洋環境研究室）

研究実施期間 平成21～23年度

累計予算額 154,012千円（うち23年度 51,157千円）
予算額は、間接経費を含む。

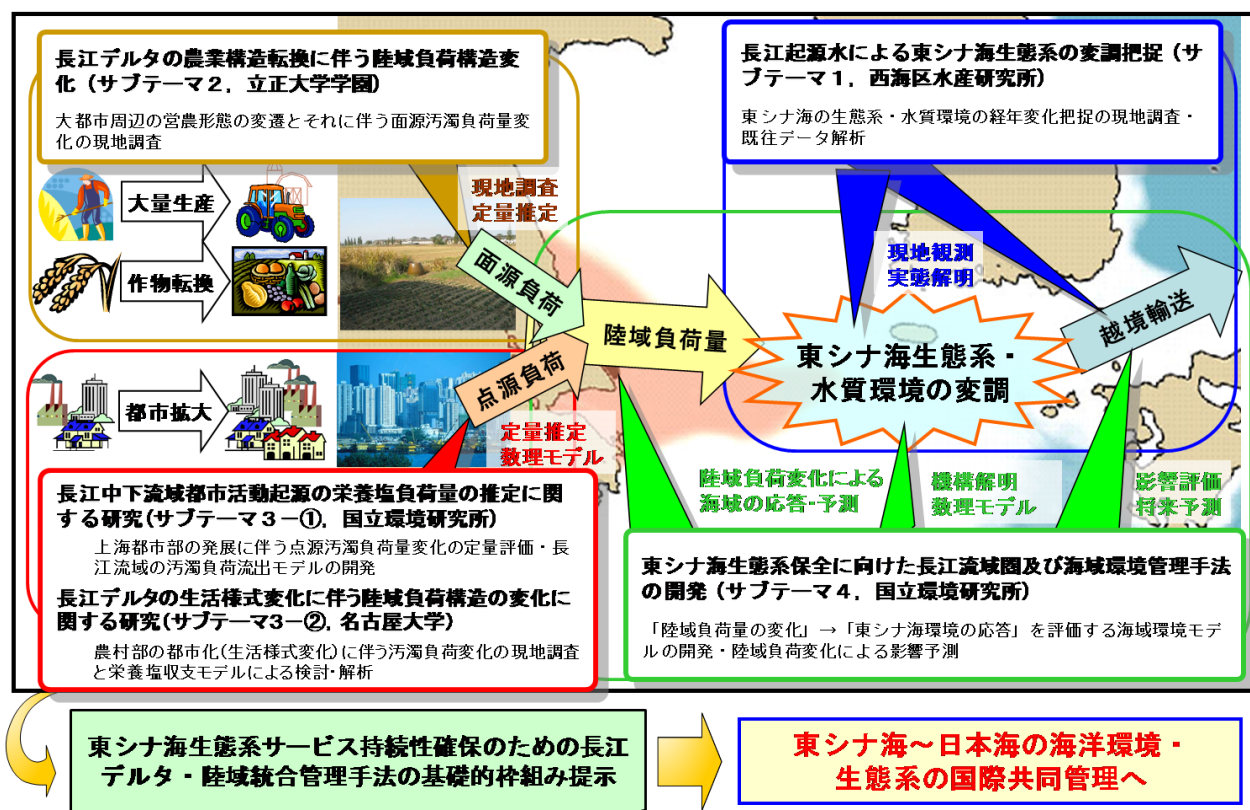
研究体制

- (1) 長江起源水による東シナ海生態系の変調把握に関する研究（（独）水産総合研究センター西海区水産研究所）
- (2) 長江デルタの農業構造転換に伴う陸域負荷構造の変化に関する開発地理学的研究（立正大学）
- (3) 1) 長江中下流域都市活動起源の栄養塩負荷量の推定に関する研究（（独）国立環境研究所）
- (3) 2) 長江デルタの生活様式変化に伴う陸域負荷構造の変化に関する研究（名古屋大学）
- (4) 東シナ海生態系保全に向けた長江流域圏及び海域環境管理手法の開発（（独）国立環境研究所、埼玉県環境科学国際センター）

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

長江デルタ沿岸域では、陸域からの栄養塩の負荷増大に伴って深刻な赤潮発生被害等の環境劣化が報告されている。この生態系環境劣化は、長江デルタ沿岸域に限定されるものではなく、東シナ海に広く及んでいる可能性が高い。我々の東シナ海調査によれば、陸棚域縁辺部において長江起源水の形跡が観測されるのみならず、陸棚中央域では中国沿岸赤潮原因藻類種 *Prorocentrum dentatum* がしばしば高密度に発生し、長江起源と考えられる東シナ海生態系の変調が確認されている。東シナ海は、我が国の水産業にとって重要な漁場海域であるだけでなく、その環境劣化は、海流によってつながる我が国沿岸域生態系に影響を及ぼす懸念がある。長江デルタでは、今後も経済成長および社会構造・生活様式の変化に伴う汚濁負荷の増大が懸念され、長江デルタの社会経済活動と、沿岸生態系の劣化及び東シナ海生態系の変調との関連性を強く意識した陸域～沿岸域～海洋の統合的環境管理が必要である（下図）。



研究の背景とサブテーマの構成図

2. 研究開発目的

本研究の目的は、近年急速に経済発展した長江デルタに代表される新たな負荷発生源が東シナ海の海洋環境に及ぼす影響を評価すること、陸域からの汚濁負荷削減による効果的な海洋環境・生態系サービスの持続性確保のための環境政策オプションを提案すること、また海洋環境に対するこれらの実施効果を事前予測することである。

この目的の達成に向けて、本研究期間においては、1)長江デルタ域からの汚濁負荷流出形態の変化による沿岸域・東シナ海陸棚域の環境劣化の定量評価およびその経年変化と構造解明、2)現実的な陸域負荷量の削減に向けた長江デルタの農村活動、都市活動の歴史的変遷に着目したフィールド調査の実施、3)長江デルタ経済圏からの年間汚濁負荷発生量の推定を行い、それらの研究成果に基づいて長江流域・デルタ経済圏から海域へ流入する栄養塩負荷量が東シナ海の海洋環境・生態系に与える影響を評価する数理モデルの開発を実施する。開発した数理モデルを用いて、近年の陸域汚濁負荷に対する東シナ海海洋環境の関連性・応答性を再現するとともに、2)～3)において取り扱う中国国内の汚濁負荷削減施策の現況と将来動向を参考として、今後の想定される汚濁負荷削減策による東シナ海の環境保全効果を予測し、冒頭の目標として掲げた海洋環境・生態系サービスの持続性確保において効果的な環境政策オプションの提示に向けた礎とする。

3. 研究開発の方法

(1)長江起源水による東シナ海生態系の変調把握に関する研究

東シナ海陸棚域の過去 10 年程度の既往観測データの解析と海洋調査、長江起源水影響水域における現場実験によって、中国沿岸環境の劣化が陸棚域生態系へ及ぼす影響について、そのメカニズム(物質輸送機構)を明らかにし、沿岸～陸棚環境の連続性の評価を目的として、①2009～2011 年度の 6～7 月に水産総合研究センター陽光丸または水産庁照洋丸による調査船調査、ならびに②陸棚域における既往観測データを用いた表層栄養塩環境の変遷解析および渦鞭毛藻 *P. dentatum* の出現状況の解析を行った。調査船調査では CTD 観測、採水試料による栄養塩、植物プランクトン出現量の観測を行った。また 2010 年 6 月の調査では定点において約 30 時間の連続観測を行った。②の栄養塩環境の変遷解析では西海区水産研究所が独自に取得したデータおよび日本海洋データセンターにより公開されているデータに基づき、1970～2011 年までの東シナ海北部大陸棚域における表層栄養塩濃度の年代別比較を行った。*P. dentatum* の出現状況解析は西海区水産研究所が 2004 年以降に採取した植物プランクトン試料の分析結果に基づき行った。

(2)長江デルタの農業構造転換に伴う陸域負荷構造の変化に関する開発地理学的研究

長江デルタは中国社会の歴史的発展過程において重要な食糧基地としての役割を果たしてきた地域である。当地域の開発空間としての最大の特徴は、低湿な土地空間と人間の共生のかたちを象徴するクリーク景観が地域一帯に発達してきたことである。本研究では、開発地理学の観点からデルタの歴史のおよび自然的地域特性ならびに経済改革以降の最近30年間の長江デルタの水環境汚染問題の発生構造を地域的な観点から明らかにすることを目的として、まず社会変容の時期的特性把握のためのマクロスケール分析、長江デルタ内の地域的な差異に着目したメソスケール分析を行った。具体的には統計資料の分析と地図化、文献調査、華東師範大学、嘉興師範学院、蘇州科学技術学院の研究者との交流を通じた情報収集、現地(上海、蘇州、無錫、嘉興、杭州、鎮江など)における広域的な移動観察、行政部門や農家における聞き取り調査を実施した。特に研究過程で近年の地域分化の先端的な位置にあることが明かとなった嘉興市を典型事例として選び、水環境問題の発生要因について解析した。

(3)1)長江中下流域都市活動起源の栄養塩負荷量の推定に関する研究

長江流域から東シナ海への流出汚濁負荷量の推定のため、①長江流域、長江デルタ経済圏および太湖流域の産業・人間活動から発生する COD、T-N および T-P の汚濁負荷量を原単位法で算定し、長江デルタ経済圏の負荷発生のおよび大きさ、太湖流域の占める割合を検討した。②長江デルタより上流域からの汚濁負荷量を評価するためにアメリカで開発されてきた SWAT(Soil and Water Assessment Tool)モデルを長江流域の一支流域である漢江流域での検証・改良し、2000 年代の長江全流域(大通より上流域)を対象とした汚濁負荷動態の再現計算を行った。計算においては、NASA が公開している地形データ、中国科学院南京地理・湖沼研究所から提供を受けた土壌分布データ、中国水利部長江水利委員会及び中国科学院との共同研究で整備した気象・水文データ、MODIS 衛星データにより作成した中国土地利用メッシュデータを用いた。また長江流域の汚濁負荷量に関する将来シナリオを検討するために、長江流域で特に経済規模の大きな長江デルタ(太湖流域)を対象とした水質保全計画の実施状況を調査し、中国における汚濁負荷削減施策の有効性等について考察した。

(3)2) 長江デルタの生活様式変化に伴う陸域負荷構造の変化に関する研究

長江デルタの都市化に伴う人間活動(産業構造、農業生産、日常生活)とその変化が地域の窒素循環や水環境に及ぼす影響を定量的に解明するため、中国長江デルタ地域の都市部と農村部における1,650人を対象とした日常生活アンケート調査を実施し、食物から摂取する窒素の量、排泄物に含まれる窒素の排出ルートおよび生活排水の排出ルートの評価を行った。またメガシティである上海市の1980-2008年間の10年毎の人口や農業生産などの統計データや大気観測データ、産業連関表ならびに本研究で実施した住民日常生活調査結果を用いて、上海市における窒素収支に関するデータベースを構築した。窒素バランスモデルや産業連関分析や統計解析など学際的アプローチにより、農業活動、工業・サービス業部門、家計消費から水域へ流出する窒素負荷量の時系列変化を推定した。

(4) 東シナ海生態系保全に向けた長江流域圏及び海域環境管理手法の開発

陸域負荷に対する東シナ海環境の影響予測が可能な長江流域圏・東シナ海統合環境管理モデルを西海区水産研究所(サブテーマ1)と共同で実施した東シナ海海洋観測ならびに大型培養槽を用いた渦鞭毛藻 *P. dentatum* 培養実験データなどに基づき開発した。東シナ海航海観測では、CTD 観測に加えて光学センサー(Satlantic社 ISUS v3)を用いた硝酸塩の鉛直分布の詳細計測、微細乱流構造プロファイラ(JFEアドバンテック社 TurboMap-9)を用いた乱流強度計測を実施し、東シナ海陸棚域における植物プランクトンへの栄養塩供給動態および *P. dentatum* などの鞭毛藻類の優占化機構について検討した。室内培養実験では、*P. dentatum* の鉛直分布把握のための計測システム構築と陸棚域の密度成層構造を模した実験系において、本種の日周鉛直移動に関する再現を行った。現場観測、室内実験結果に基づき、東シナ海流動生態系モデルの改良を行った。さらにサブテーマ(2)~(3)において推計した長江流域圏からの2000年代の汚濁負荷流出を条件とした東シナ海環境の再現計算ならびに仮想的な負荷削減を与えた場合の東シナ海の応答予測を行った。

4. 結果及び考察

(1) 長江起源水による東シナ海生態系の変調把握に関する研究

2009~2011年の6、7月に東シナ海陸棚域において調査船調査を実施した。このうち5 µg/Lを超える亜表層極大のChl.a濃度を観測した調査点7点は、表面に比較的低塩分の水塊が分布した海域で認められた。これら亜表層極大におけるChl.a濃度は5.1~53 µg/Lであり、*P. dentatum*細胞の優占率は0~98%であった。また、2004年以降の既存データで東シナ海における*P. dentatum*の出現状況を調べた結果、夏季の大陸棚上で高密度出現が複数例確認され、本種の調査毎の最大細胞密度には増加傾向が認められた。2010年6月に亜表層に比較的高い自家蛍光値が認められた調査点(31°45'N、127°15'E)において実施した約30時間の連続観測では、*P. dentatum*が東シナ海陸棚域において日周鉛直移動を行っていたことが示された。日周鉛直移動は昼間は光の豊富な浅い層に、夜間は栄養塩の豊富な深い層に移動することで光と栄養塩の獲得に有利に働くと考えられ、これが東シナ海陸棚域において*P. dentatum*の高密度での発生がしばしば認められることの一因であると考えられた。さらに、1970~2011年の5~10月の観測値に基づき、東シナ海北部大陸棚域表層における栄養塩環境の年代間比較を行った。NO_x濃度は塩分と負の相関があり、長江希釈水の波及による供給が示唆された。DSi濃度は比較的高水準で推移していた。DIP濃度は長江希釈水中で2000年代以降顕著に減少しており、植物プランクトン増殖の制限要因となっている可能性が高い。特に三峡ダムへの蓄水が本格化した2006年以降リン制限傾向が強化されたことが示唆された。出水期の大陸棚域では、生態系のリン律速の強化により、鉛直移動能力を有する渦鞭毛藻類の優占化が進行していることが懸念された。

(2) 長江デルタの農業構造転換に伴う陸域負荷構造の変化に関する開発地理学的研究

長江デルタの汚濁負荷発生と水質悪化は、造盆地構造と歴史的に形成されたクレーク網という土地条件に対する工業化・都市化・経済拡大の矛盾であり、いわば新旧文明の対立的な問題であることが示唆された。また水質汚染問題の発生状況は、長江デルタ内でも農産業構造の変容・再編過程・段階の違いによって地域ごとに異なり、地域変化の方向性に規定されていることが指摘された。上海市、蘇州市、嘉興市を対象として、水質汚染の発生状況と農業関連要素(化学肥料使用量、水産品生産、肉類生産等の地域変動)を比較したところ、水質変化と農業構造変化の地域傾向に明瞭な対応が認められた。特に地域内外から要請を受け工業化・都市化・農畜水産業の同時・複合的な再編が進む嘉興市において水質汚染の発生が著しいことが明らかとなった。したがって将来に向けた環境管理手法を構築する上では、現行の汚染源の特定とその処理対策あるいは規制の強化という側面のみならず、環境負荷をもたらす地域変化のメカニズムの認識と評価が重要なポイントであると考えられた。

(3)1) 長江中下流域都市活動起源の栄養塩負荷量の推定に関する研究

原単位法に基づく長江流域の COD、T-N および T-P の負荷量算定では、長江デルタ経済圏からの汚濁発生負荷量の長江流域全体に対する割合が、COD 11.6%、T-N 10.3%、T-P 15.3%であることが示された。また栄養塩類発生負荷に対する太湖流域の割合はデルタ地域の 80%程度を占めることが明らかになった。太湖流域における都市活動起源の発生源としては工業排水、生活排水および生活ゴミが考えられ、対策の基本は産業構造の転換を含めて、これらの発生源を集中させ、効率的な処理を行う事を大きな特徴としていた。太湖の水質保全計画とその実施状況および汚濁負荷発生量推計の結果から、今後の中国大陸からの栄養塩負荷削減の鍵を握るのは、農業セクターからの排出であり、特に今後の急激な拡大が予想される畜産排水であると推測された。

SWATモデルを用いた長江流域の汚濁負荷動態の再現計算によると、2001～2010年の長江から東シナ海への年平均流出量は9391億トンで、それによって運ばれた有機窒素は17.5万トン、硝酸態窒素は180.9万トン、アンモニア性窒素は16.7万トン、有機リンは0.4万トン、無機態リンは5.2万トンで見積もられた。1980年代と比較すると、2001～2010年の間の硝酸態窒素流出量は約3倍、亜硝酸態窒素は約2倍、アンモニア性窒素は約1.3倍に増加したと計算された。一方、過去10年間での汚濁負荷物質の流出量に顕著な増加傾向は認められなかった。

(3)2) 長江デルタの生活様式変化に伴う陸域負荷構造の変化に関する研究

上海市およびその周辺域の窒素収支時系列解析の結果、(a)農地や農作の減少(域外へのシフト)によって化学肥料由来の河川への窒素負荷が減少していること、(b)自動車の増加により、大気からの窒素沈降量が増加し、地域窒素負荷源が化学肥料から大気沈降へシフトしたこと、(c)製造業からサービスへの産業の構造的変化、工場排水処理技術の改良および工場の外部への移転により、第二次産業からの廃水による窒素負荷は2000年以降劇的に減少したこと、(d)農地からの窒素流出量が減少した反面、地表面や河道がコンクリートなどの人工被覆で不浸透化したことによって都市域から水域への窒素流出量が増加したこと、(e)1980年には上海で生産した肉類や魚は同地域の消費量より多く、一部は域外へ移輸出していたが、2008年になると域外から移輸入することになったことが明らかになった。また、上海という大都市だけを観察した場合には河川への潜在窒素負荷量は2000年以降減少傾向にあり、水質汚染問題は改善されているように見えるが、周辺地域を含む広範囲で考えると問題はむしろ拡大していると言え、新たな環境対策の提案が急務であると考えられた。

(4) 東シナ海生態系保全に向けた長江流域圏及び海域環境管理手法の開発

サブテーマ(1)と共同で実施した海洋観測では、東シナ海陸棚域の生態系変調の兆しと考えられる渦鞭毛藻 *P. dentatum* の出現海域が長江希釈水ならびにその境界海域であり、長江希釈水の陸棚域への水塊輸送と *P. dentatum* 出現の関連性を示唆した。大型培養槽を用いた *P. dentatum* の培養実験では、本種が日周鉛直移動を行う鞭毛藻であり、且つ下降時に密度躍層に集積する特性があることが明らかになった。これらの特性は、表層栄養塩の枯渇した東シナ海陸棚域において、*P. dentatum* が日周鉛直移動能を有しない植物プランクトン種に比べて、密度躍層下の栄養塩を優位に獲得して優占化しうることを示唆した。一方、現場海域における *P. dentatum* の集積はしばしば密度躍層内や直上よりも寧ろ密度躍層下方に観測された。硝酸塩および乱流強度の鉛直プロファイルと *P. dentatum* の出現水深を詳細検討したところ、こうした観測点では密度躍層下の中層に鉛直渦拡散係数の小さな水塊が存在し、密度躍層下の *P. dentatum* 出現水深の直下に硝酸躍層が形成され、底層からの栄養塩供給速度が *P. dentatum* の出現水深に影響を及ぼしていることが示された。

東シナ海の流動・生態系モデルの開発では、培養実験で観測された海水と渦鞭毛藻の密度差による影響を考慮した渦鞭毛藻の鉛直移動式を導きモデルに組み入れたところ、東シナ海の渦鞭毛藻の鉛直分布特性の再現性が向上することが明らかになった。他のサブテーマが推計した長江流域圏からの汚濁負荷流出量を入力条件として東シナ海低次生態系の再現計算を行ったところ、初夏の東シナ海陸棚域の渦鞭毛藻赤潮は、長江河口南部で発生した赤潮が海流によって陸棚域に輸送されることが示された。一方、現在の長江汚濁負荷推計値を基準として仮想的な負荷削減を設定して応答解析を行ったところ、長江河口域や黄海で赤潮抑制効果が現れたが、陸棚域の渦鞭毛藻の出現抑制効果は限定的で、外洋起源の栄養塩供給に対する依存性の高さが示唆された。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

これまで評価が不十分であった長江デルタ地域の汚濁発生量・質の解析を行い、長江本流に対する汚濁負荷源の寄与を明らかにした。また長江本流の汚濁流量を土地利用等の情報をもとに推定するための数理モデル開発により、2000年代の長江水質の変化を明らかにした。長江デルタ地域を中心とする土地利用や産業構造の変遷と中国の汚濁負荷削減政策の解析により、将来の長江流域圏から海域への汚濁負荷動態を議論・予測するための知見が整理された。これらの研究は長江流域圏の人間活動による環境への影響評価、地域の物質循環、都市と農村問題、地域の環境政策および地域の持続可能な発展を検討する上で重要である。

中国陸域負荷に対する東シナ海の応答評価においては、2000年代の低次生態系の変遷解析により東シナ海陸棚域における渦鞭毛藻優占化傾向を明らかにし、また1970年代以降の栄養塩環境の変遷や渦鞭毛藻の日周鉛直移動等の生態特性の解析により、そのメカニズムを提示した。

2000年代の長江および長江デルタからの汚濁負荷推計値ならびに東シナ海の観測データを流動生態系モデルに境界条件あるいは検証データとして与えることにより、2000年代の陸域汚濁負荷に対する東シナ海低次生態系の応答を再現した。さらに中国における汚濁負荷削減政策の解析結果をもとに、2000年代の気象・海況条件下で陸域汚濁負荷削減の効果をシミュレーションしたところ、長江河口域や黄海における赤潮発生の抑制効果が示された。一方、陸棚の渦鞭毛藻への効果は限定的で、外洋起源の栄養塩供給に対する依存性の高さが示唆され、近年の東シナ海の環境の変化、特に陸棚域の生態系変化は、必ずしも陸域汚濁負荷等の人間活動影響のみに帰することができない可能性が指摘された。

(2) 環境政策への貢献

陸域負荷の総量規制を実施する日本国環境省水・大気局と中国環境保護部汚染物排出総量規制局の共同ワーキンググループに本研究課題の分担者が参加した。また国立環境研究所では長江の水質管理を担当する中国長江水利委員会とともに日中の技術交流シンポジウムを過去5回開催した。これらを介して、両国の科学者及び政策担当者に本課題で得られた科学的知見を提供し、両国の環境政策へ貢献した。

東シナ海の生態系は、赤潮発生や大型クラゲの大量出現が観測されるなど、明らかに変調が生じつつある。今後も、課題代表者らが委員を務めるPICES(北太平洋海洋科学機関)、UNEP/NOWPAP(北西太平洋行動計画)のICARM作業部会等を通じアジアの海洋環境政策に科学的知見を提供していくとともに、水産研究分野としても有害生物による漁業被害の防止・軽減を目的として、環境保全対策の検討や東アジア海域における国際的なモニタリング・ネットワークの策定等に貢献していく。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Wang QX, Xiao Q, Liu C, Wang K, Ye M, Lei A, Song X, Kohata K: Journal of the Science of Food and Agriculture, doi: 10.1002/jsfa.4607 (2011)
“Effect of reforestation on nitrogen and phosphorus dynamics in the catchment ecosystems of subtropical China: the example of the Hanjiang River basin”
- 2) 王勤学:水環境学会誌. 35(2), 59-64 (2012)
「長江流域圏からの降水・窒素負荷流出のシミュレーション」
- 3) 劉晨, 王勤学:環境科学会誌, 23(4), 259-267 (2010)
「中国農村地域における窒素フローの変動および水環境への影響評価」
- 4) Liu C, Wang QX, Yang Y, Wang K, Ouyang Z, Li Y, Li Y, Lei A, Yasunari T: Journal of the Science of Food and Agriculture, doi: 10.1002/jsfa.4725 (2011)
“Recent trends of nitrogen flow of typical agro-ecosystems in China — major problems and potential solutions”
- 5) 劉晨・王勤学・李全鵬・石村貞夫:環境科学会誌, accepted (2012)
「中国漢江流域における水環境に関する住民意識の調査—日本との比較検討を通して—」

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) Iseki K, Kiyomoto Y, Okamura K, Harashima A: Workshop on Marine Environment in the East China Sea, Nagoya, Japan (2009)
“Cross-shelf transport of particulate materials in the East China Sea”

- 2) Koshikawa H, Higashi H, Kawachi M, Hasegawa T, Okamura K, Kiyomoto Y, Nishiuchi K, Akiyama H, Kohata K, Murakami S: PICES-2009 annual meeting, Jeju, Korea (2009)
“Predominance of dinoflagellates *Prorocentrum dentatum* on the central continental shelf of East China Sea in Early Summer, 2007”
- 3) 清本容子: 東アジア河口域の環境と資源の保全・回復に関する調査研究シンポジウム, 長崎 (2009)
「長江起源水の海域環境への影響と低次生態系変動との関連」
- 4) Nishiuchi K, Taneda T, Kiyomoto Y: FRA-CAFS-NFRDI Workshop on Impacts of Climate Change of Fisheries and the Environment, and Low Carbon Technology (2010)
“Relationship between plankton, environment and climate change in the East China Sea”
- 5) 水落元之: 2010 年環境技術学会年会 (2010)
「中国太湖の水質保全計画の変遷と特徴に関する考察」
- 6) Wang QX: Hydrology Conference 2010, (2010)
“Development of a system for evaluation of water and material cycles in a catchment ecosystem in East Asia”
- 7) Wang QX: Global Water System Project (GWSP) GCI conference 2010, (2010)
“Development of an evaluation model for water and material cycles in catchments of East Asia”
- 8) Wang QX, Xiao Q, Liu C: The Second International Symposium on Sustainable Agriculture for Subtropical Regions(2010)
“Carbon and nitrogen dynamics in the subtropical agricultural ecosystem in China”
- 9) Liu C, Wang QX: The Second International Symposium on Sustainable Agriculture for Subtropical Regions (ISSASR-2), Changsha (2010)
“Anthropogenic influences on nitrogen flow and water environment in agro-ecosystems of Changjiang River Basin”
- 10) 元木靖: 東北地理学会 2011 年度春季学術大会(2011)
「中国長江デルタ地域における農業特性の転換基調」
- 11) 劉晨: 環境科学会 2011 年会(2011)
「上海市における窒素フローの変動及び富栄養化問題」
- 12) 劉晨, 王勤学, 李全鵬, 叶閔: 環境科学会 2011 年会(2011)
「中国漢江流域における水環境に関する国民意識の調査－日本との比較検討を通して－」
- 13) Liu C: Global COE Program International Symposium “Progress in Clinical Environmental Studies for Asia” (2012)
“Recent Trends of Nitrogen Flow with Urbanization in Mega-city Shanghai”
- 14) Liu C, Wang QX, Wang K, Yang Y, Zhu O, Lin Y, Yan L, Lei A: Planet Under Pressure 2012, London(2012)
“Recent Trends of Nitrogen Flow of Typical Ecosystems in China”
- 15) 東博紀: 名古屋大学地球水循環研究センター共同研究集会 (2010)
「数値トレーサ実験による東シナ海陸棚域の水塊形成に関する考察」
- 16) 越川海: 名古屋大学地球水循環研究センター共同研究集会 (2010)
「初夏の長江起源水域における渦鞭毛藻の出現と定量評価」
- 17) 清本容子、長谷川徹、秋山秀樹、岡村和磨、西内耕、岡慎一郎、五味泰史、佐々木宏明、越川海、東博紀: 2011 年度九州沖縄地区 3 学会合同シンポジウム「東アジア域での大気海洋相互作用と越境汚染研究の現状」(2011)
「東シナ海長江希釈水影響域における低次生態系の変調と長江からの栄養塩負荷変動との関連把握」
- 18) 長谷川徹、清本容子、五味泰史、佐々木宏明、東博紀、越川海: 2012 年度日本海洋学会春季大会 (2012)
「東シナ海の渦鞭毛藻 *Prorocentrum dentatum* の優占化と維持機構: 調査船調査による観測結果の解析」
- 19) 越川海、宮崎紘一、東博紀、長谷川徹、西内耕、清本容子、岡村和磨、河地正伸: 2012 年度日本海洋学会春季大会(2012)
「東シナ海の渦鞭毛藻 *Prorocentrum dentatum* の優占化と維持機構: 大型培養槽による日周鉛直移動の再現実験」

20) 元木靖:東北地理学会 2012 年度春季学術大会(2012)

「経済発展と水環境問題－長江デルタにおける地理学的課題－」(アブストラクト提出済み)

7. 研究者略歴

課題代表者:

木幡 邦男(研究開始～平成 22 年 9 月まで)

1952 年生まれ、東京大学理学系大学院博士課程修了、(独)国立環境研究所水圏環境研究領域領域長、現在、埼玉県環境科学国際センター研究所長

越川 海(平成 22 年 10 月～研究終了まで)

1968 生まれ、東京理科大学大学院工学研究科博士課程修了、現在、国立環境研究所地域環境研究センター主任研究員

研究参画者

(1):秋山 秀樹

1956 年生まれ、東海大学海洋学部卒業、(独)水産総合研究センター中央水産研究所海洋生産部海洋動態研究室長、博士(理学)、現在、(独)水産総合研究センター西海区水産研究所特任部長

(2):元木 靖

1944 年生まれ、東北大学大学院理学研究科博士課程単位取得退学、博士(理学)、埼玉大学名誉教授、現在、(学)立正大学教授、大学院経済学研究科長

(3)1):水落 元之

1956 年生まれ、筑波大学大学院農学研究科博士課程修了、現在、(独)国立環境研究所地域環境研究センター主任研究員

(3)2):劉 晨

1971 年生まれ、京都大学大学院情報学研究科博士課程修了、現在、名古屋大学大学院情報学研究科 COE 特任准教授

(4):木幡 邦男(同上)、越川 海(同上)

B-0906 東シナ海環境保全に向けた長江デルタ・陸域環境管理手法の開発に関する研究

(1) 長江起源水による東シナ海生態系の変調把握に関する研究

(独) 水産総合研究センター西海区水産研究所

特任部長

秋山 秀樹

資源海洋部 資源生態・環境グループ

長谷川 徹・西内 耕

有明海・八代海漁場環境研究センター 環境保全グループ 清本 容子・岡村 和麿・岡 慎一郎

平成21～23年度累計予算額：47,741千円（うち、平成23年度予算額：15,919千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 2009～2011年の6、7月に東シナ海陸棚域において調査船調査を実施した。このうち5 µg/Lを超える亜表層極大のChl.a濃度を観測した調査点7点は、表面に比較的低塩分の水塊が分布した海域で認められた。これら亜表層極大におけるChl.a濃度は5.1～53 µg/Lであり、*Prorocentrum dentatum*細胞の優占率は0～98%であった。また、2004年以降の既存データで東シナ海における*P. dentatum*の出現状況を調べた結果、夏季の大陸棚上で高密度出現が複数例確認され、本種の調査毎の最大細胞密度には増加傾向が認められた。2010年6月に亜表層に比較的高い自家蛍光値が認められた調査点（31°45'N、127°15'E）において実施した約30時間の連続観測では、*P. dentatum*が東シナ海陸棚域において日周鉛直移動を行っていたことが示された。日周鉛直移動は昼間は光の豊富な浅い層に、夜間は栄養塩の豊富な深い層に移動することで光と栄養塩の獲得に有利に働くと考えられ、これが東シナ海陸棚域において*P. dentatum*の高密度での発生がしばしば認められることの一因であると考えられた。さらに、1970～2011年の5～10月の観測値に基づき、東シナ海北部大陸棚域表層における栄養塩環境の年代間比較を行った。NO_x濃度は塩分と負の相関があり、長江希釈水の波及による供給が示唆された。DSi濃度は比較的高水準で推移していた。DIP濃度は長江希釈水中で2000年代以降顕著に減少しており、植物プランクトン増殖の制限要因となっている可能性が高い。特に三峡ダムへの蓄水が本格化した2006年以降リン制限傾向が強化されたことが示唆された。出水期の大陸棚域では、生態系のリン律速の強化により、鉛直移動能力を有する渦鞭毛藻類の優占化が進行していることが懸念される。

[キーワード] 長江、東シナ海、栄養塩、植物プランクトン、*Prorocentrum dentatum* (*donghaiense* Lu)

1. はじめに

長江は、東シナ海及び日本海対馬暖流域への主要な淡水供給源であり、その流出量は夏季に最大となる。また、長江起源の栄養塩は、東シナ海陸棚域の低次生産に大きく寄与している¹⁾。しかし近年、長江流域の開発や温暖化に伴う気候変動が、東シナ海の海洋構造や低次生態系に及ぼす影響が懸念されており、中国沿岸域においては、長江流域からの栄養塩負荷の急激な増加が、海域の富栄養化や赤潮の頻発、貧酸素水塊の発生等の環境悪化の一因となっていることが指摘され

ている²⁾。しかしながら、中国沿岸域環境劣化が陸棚域環境に及ぼす影響に関する知見は乏しい。第一に、東シナ海陸棚域環境が中国沿岸の富栄養化や赤潮が問題となる以前から現在のような状態であったのか、あるいは近年急激に変化したものなのかが不明である（環境変遷の有無）。第二に、近年の沿岸域環境の急激な変化の結果であるならば、その影響がどのように陸棚域に伝播しているのかが不明である（陸棚域への物質輸送循環・生態系維持機構）。さらに、陸棚域の出現藻類の変化が、高次生態系や魚類生息にどのような影響を与えているのかも不明である。海洋観測による実態調査や既存観測データの解析を通じて、陸域負荷と陸棚域環境の関連性の評価を行い、長江起源水による東シナ海海洋生態系の変調の有無を検討することは、陸域からの汚濁負荷削減による効果的な海洋環境・生態系サービスの持続性確保のための環境政策オプション提案及び海洋環境に対するこれらの実施効果の事前予測に必須の事項である。

2. 研究開発目的

長江河口域の生態系環境劣化は必ずしも沿岸部に限定されるものではない。特に、近年の長江デルタ地域の急激かつ極めて大きな社会経済活動の変化により、その影響が陸棚域まで伝播している兆しが現れている³⁾。本サブテーマでは、東シナ海陸棚域の過去10年程度の既往観測データの解析と海洋調査、長江起源水影響水域における現場実験によって、中国沿岸環境の劣化が陸棚域生態系へ及ぼす影響について、そのメカニズム（物質輸送機構）を明らかにし、沿岸～陸棚環境の連続性の評価を目的とした。

3. 研究開発方法

（1）海洋調査・現場実験による沿岸から陸棚域への物質輸送機構の解明

2009～2011年度の6月と7月に、陽光丸または照洋丸による調査船調査を総計170点で実施した。調査点ではバケツまたはニスキンボトルを備えたロゼットシステムにより、各層で栄養塩及びクロロフィルa（以下Chl.a）分析用の採水を、表面と自家蛍光の極大値を示した深度で植物プランクトンサンプル用の採水を行った。水温・塩分・密度・溶存酸素・自家蛍光値の鉛直分布はCTDシステムで連続的に取得した。また、調査海域を含む東シナ海の広域の表面塩分（以下SSS）を海色衛星データを利用して見積もった⁴⁾。

硝酸+亜硝酸（以下NO_x）、溶存無機リン（以下DIP）、ケイ酸（以下DSi）の分析はStrickland & Parsons⁵⁾を基にしてBran+Luebbe TRACCS 2000を用いて行った。Chl.aはTurner Designs 10-AU蛍光光度計にて分析を行なった⁶⁾。植物プランクトンは、500 mLの海水を中性ホルマリン（終濃度2%）で固定し、静置沈澱により濃縮後、全量もしくは一部を生物顕微鏡下で検鏡して種の判別及び計数を行うとともに、渦鞭毛藻*Prorocentrum dentatum* (*donghaiense* Lu)（以下*P. dentatum*）の出現の有無を確認した。

また、2010年6月には約30時間の連続観測を実施した。連続観測は亜表層に比較的高い自家蛍光値が認められた調査点（31°45'N、127°15'E）において実施し、観測期間中には8回のCTD観測を行い、その内3回では採水も行った。

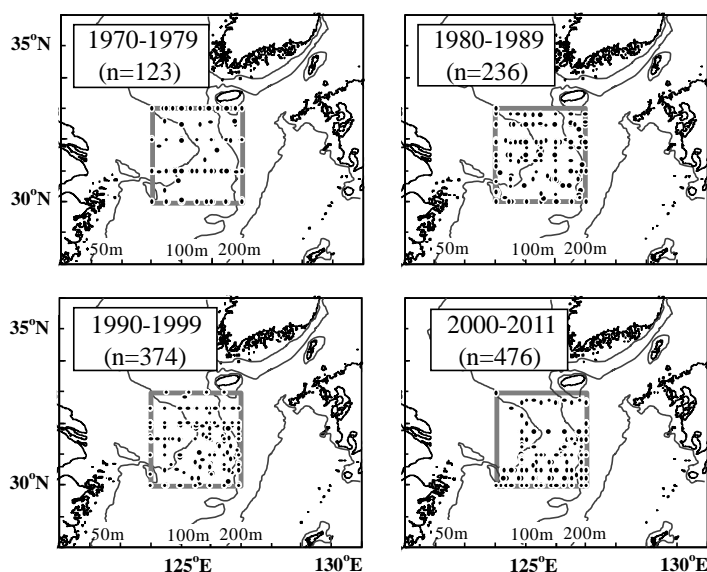
(2) 既往観測データによる陸棚域環境変遷の解析

1) 出水期の北部大陸棚域表層における栄養塩環境の変遷解析

長江出水期にあたる5～10月⁷⁾の東シナ海北部大陸棚域(30～33°N、124～127°E, 図(1)-1)における表層の塩分及び栄養塩(NO_x、DIP、DSi)観測値について、1970～2011年までの期間の年代間比較を行い、近年の長江希釈水中における栄養塩環境の特徴を抽出した。

データの出典は、気象庁等が観測し日本海洋データセンターのJODC Data On-line Service System⁸⁾から公開されているデータセット(1970～2002年)及び西海水研が観測したデータ(1990～2011年)である。西海水研取得データの分析法等は3.(1)に記載の通りである。

また、2006～2007年度及び2009～2010年度に東シナ海で取得した観測データを整理し、サブテーマ4の東シナ海流動生態系モデルの検証及びモデルを用いた陸域環境の変化と海域環境の変化との関連性の評価に供するための基礎資料とした。



図(1)-1 年代別の栄養塩環境解析海域の範囲と観測点配置.

2) 北部大陸棚域における渦鞭毛藻*P. dentatum*の出現状況の把握

西海水研が2004～2010年に東シナ海航海において取得した表層及び自家蛍光極大深度における植物プランクトンデータを用いて、長江河口周辺海域で近年主要な赤潮原因種となっている渦鞭毛藻*P. dentatum*の大陸棚域における出現状況を把握した。植物プランクトンのサンプリング及び分析法等は3.(1)に記載の通りである。なお、自家蛍光値が表層混合層で最大であった場合及び明確な極大層が無かった場合は、表層のみで採水を行った。

4. 結果及び考察

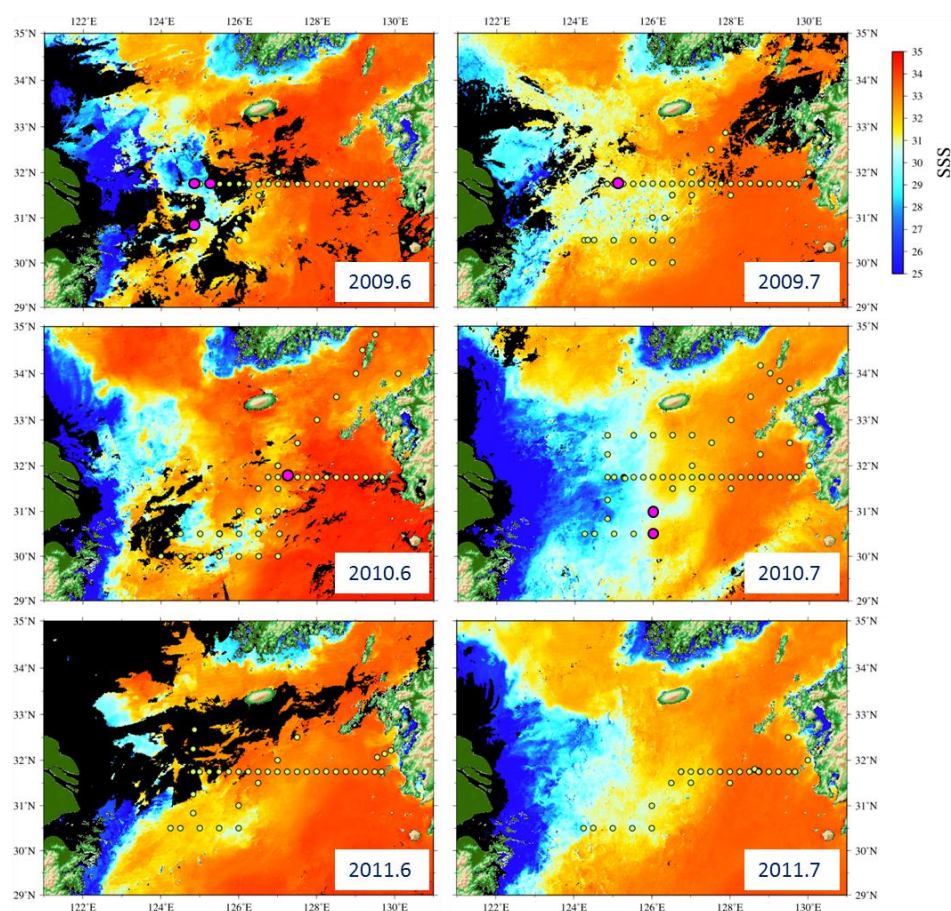
(1) 海洋調査・現場実験による沿岸から陸棚域への物質輸送機構の解明

2009～2011年度の6月と7月に観測を実施した調査海域を図(1)-2に示した。図中右上のカラーバーは衛星データを利用して見積もったSSSを示す。東シナ海西方には低塩分水が分布し、東方には比較的高塩分の水が分布していた。SSS<32で示される長江起源水の分布域は調査航海毎に異なっていた。図中に示した調査点の一部ではCTD観測及び採水を未実施であるが、すべての調査航海において長江起源水分布域での観測が実施された。

本研究の目的は、長江流域からの栄養塩負荷の急激な増加に伴う中国沿岸における赤潮頻発等の環境劣化が陸棚域環境に及ぼす影響の解析であるので、中国沿岸の赤潮の影響を受けていると推察される比較的高濃度のChl.a濃度(Chl.a>5 µg/L)が観測された調査点に限って解析を行った。

5 µg/Lを超えるChl.a濃度を観測した調査点は、CTD観測及び採水を実施した延べ170点のうち、

2009年の4点と2010年の3点の計7点であった（図(1)-2、表(1)-1）。2011年の観測では5 $\mu\text{g/L}$ を超えるChl.a濃度は観測されなかった。



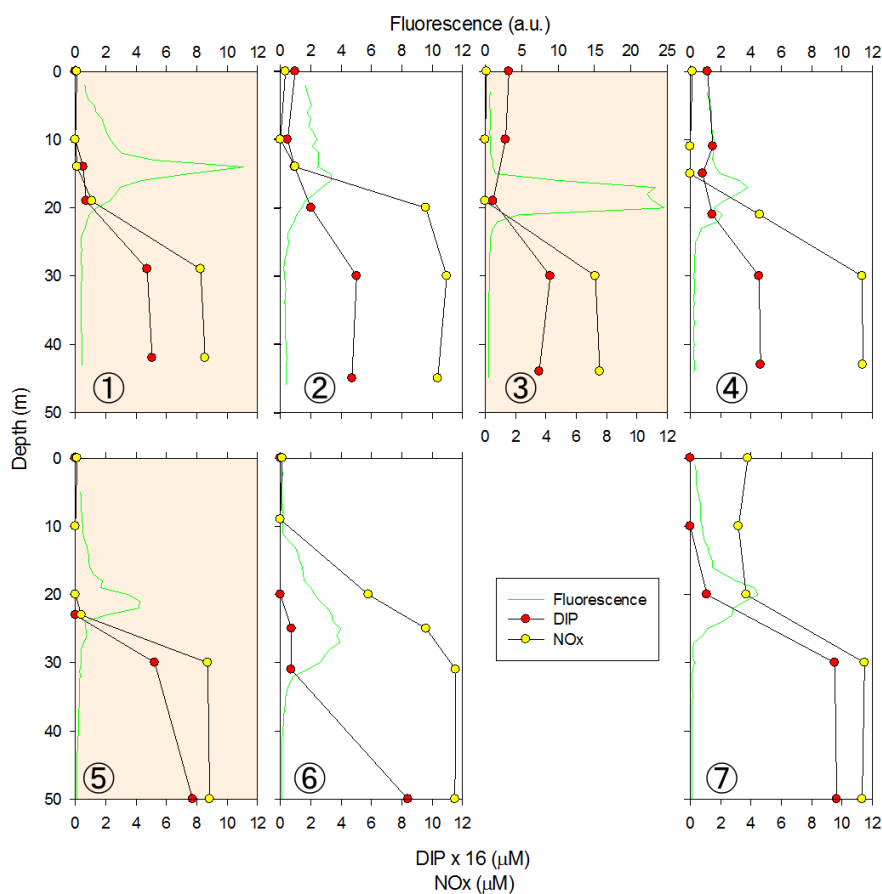
図(1)-2 調査海域及び調査点（黄丸）。右上のカラーバーは衛星データを利用して見積もった表面塩分。一部の調査点ではCTD観測及び採水を未実施。赤丸は亜表層に5 $\mu\text{g/L}$ を超えるChl.a濃度を観測した調査点。

表(1)-1 5 $\mu\text{g/L}$ を超えるChl.a濃度を観測した調査点の位置、表面塩分（SSS）、Chl.a濃度の極大値及び極大層の水深、検鏡による*P. dentatum*細胞の優占率。

観測	観測点ID	位置	SSS	Chl.a極大値 ($\mu\text{g/L}$)	Chl.a極大層 (m)	優占率 (%)
2009.6	①	31°45' N、125°15' E	30.56	11.1	14	67
	②	31°45' N、124°50' E	30.50	5.08	14	26
	③	30°50' N、124°50' E	30.61	52.6	19	98
2009.7	④	31°45' N、124°50' E	29.76	5.33	15	10
2010.6	⑤	31°45' N、127°15' E	32.03	10.7	23	91
2010.7	⑥	30°30' N、126°00' E	30.10	6.46	25	35
	⑦	31°00' N、126°00' E	29.09	5.30	20	0

7つの観測点は概ねSSS<32で示される長江起源水の範囲に分布していた（表(1)-1）。Chl.a極大値は5.08~52.6 $\mu\text{g/L}$ で、すべて水深14~25 mの亜表層に認められた。顕微鏡観察により植物プランクトン細胞を確認したところ*P. dentatum*の優占率は0~98%で、Chl.a濃度で10 $\mu\text{g/L}$ を超える場合には優占率が67~98%と高い値を示した（表(1)-1）。*P. dentatum*の細胞数は非検出~15,000 cells/mLの範囲であった。

これらの7つの観測点の自家蛍光、DIP、NO_x濃度の鉛直分布を図(1)-3に示した。一般に植物プランクトンの窒素とリンの要求比が16:1であることから⁹⁾、DIPの値は16倍して示してある。水深30 m以深では常にNO_x濃度がDIP×16の濃度を上回り、下層から拡散等により有光層に供給される栄養塩がリン律速になっていることが示唆された。一方で自家蛍光の極大層付近の栄養塩濃度は、①、③、④の観測点では僅かながらDIP×16の濃度がNO_x濃度を上回ったのに対し、⑤では僅かに、⑥、⑦では大きくNO_x濃度がDIP×16の濃度を上回っていた。

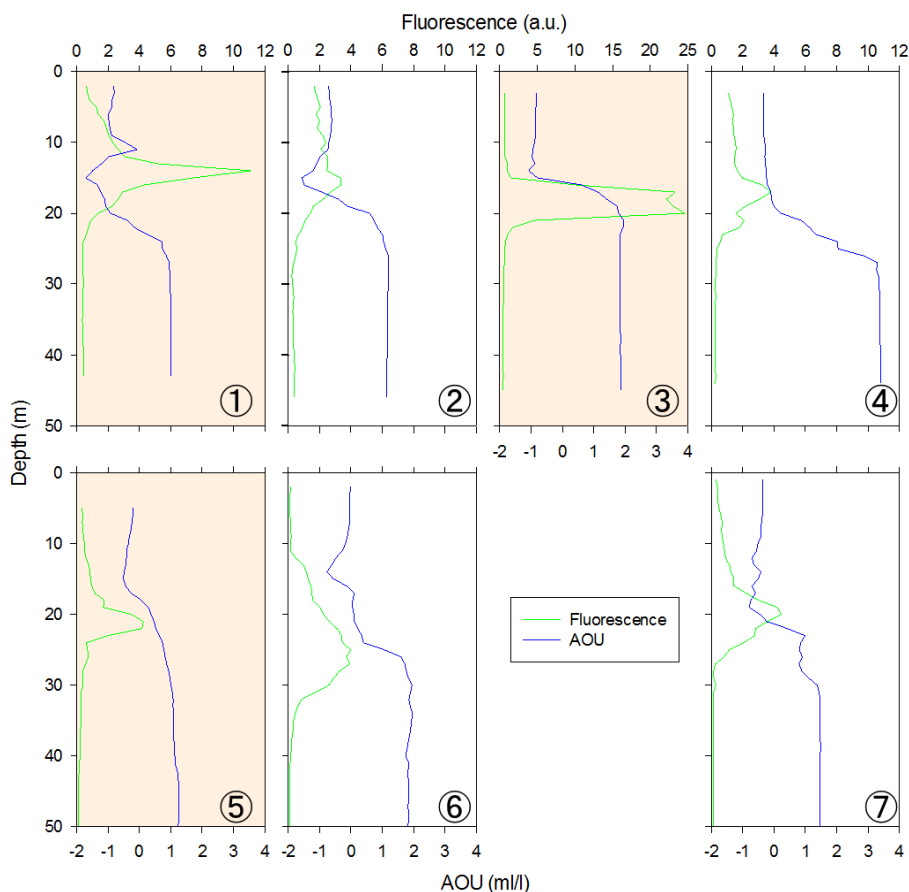


図(1)-3 5 $\mu\text{g/L}$ を超えるChl.a濃度を観測した調査点における自家蛍光値、DIP濃度及びNO_x濃度の鉛直分布。図中の数字は観測点ID。DIP濃度は16倍して表示した。*P. dentatum*細胞の優占率が67%以上の調査点は茶色で表示した。

一般に長江河川水のN:P比は植物プランクトンの要求比に比べてかなり高く¹⁰⁾、長江河川水の影響を受ける海域では植物プランクトンの生産はリン律速になることが予想される。しかしながらこの傾向が表層で明確に認められるのは⑦のみで②、③、④ではむしろ窒素律速を示唆するものであった。また、①、③、⑤では*P. dentatum*の優占率が67~98%と高い値を示したが、これと栄養

塩濃度、栄養塩供給比との関係は明確でなかった。

図(1)-4に7つの観測点の自家蛍光値、見かけの酸素消費量 (AOU) の鉛直分布を示した。①、②、⑦では自家蛍光値の極大値とAOUの極小値の水深がほぼ一致し、この層で活発な光合成が行われていることが示唆された。一方、自家蛍光値及びChl.a濃度の極大値が最も高かった③では(図(1)-4、表(1)-1)、自家蛍光値の極大層付近に明確なAOUの極小値は認められず、ここで優占していた*P. dentatum*の群集は活発に増殖しているというよりは、定常期から死滅期にあることが示唆された。



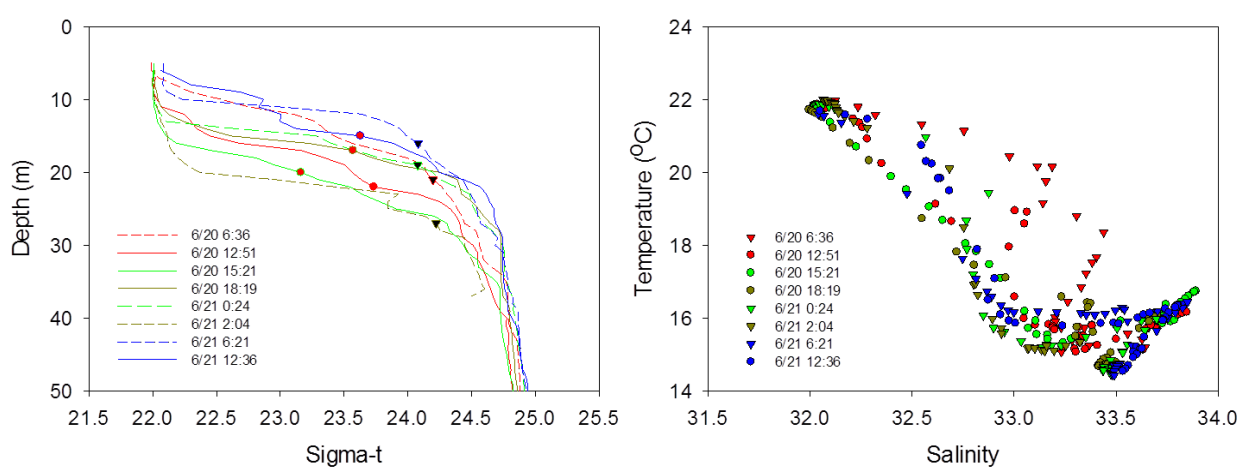
図(1)-4 5 $\mu\text{g/L}$ を超えるChl.a濃度を観測した調査点における自家蛍光値及びみかけの酸素消費量 (AOU) の鉛直分布。図中の数字は観測点ID。 *P. dentatum*細胞の優占率が67%以上の調査点は茶色で表示した。

2010年6月に亜表層に比較的高い自家蛍光値が認められた調査点 (31°45'N、127°15'E) で約30時間実施した定点観測では8回のCTD観測を実施し、内3回において自家蛍光値の亜表層極大の植物プランクトンの群集組成を検鏡により確認したところ *P. dentatum*細胞の優占率が64~91%であった (表(1)-2)。

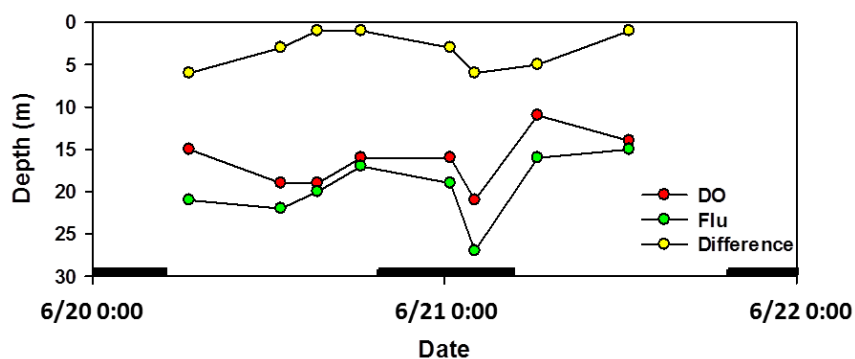
定点観測中に8回実施したCTD観測により得られた密度 (Sigma-t) の鉛直分布及びTSダイアグラムを図(1)-5に示した。どちらのデータも30時間の定点観測中に水塊の入れ替えが起こっていたことを示唆するものであった。しかしながら自家蛍光値の極大層と Sigma-t との関係を見ると昼間の観測では自家蛍光は Sigma-t が23.2~23.7の間に、夜間~明け方にかけては24.1~24.2の間に分布し、 *P. dentatum* が相対的に低密度帯から高密度帯に鉛直移動を行っていることを示唆した。

表(1)-2 2010年6月に実施した定点観測の観測時間、観測内容及び*P. dentatum*細胞の優占率。

観測時間		CTD	栄養塩	検鏡	優占率 (%)
6/20	6:36	○	—	—	—
	12:51	○	○	○	91
	15:21	○	—	—	—
	18:19	○	—	—	—
6/21	0:24	○	○	○	64
	2:04	○	—	—	—
	6:21	○	—	—	—
	12:36	○	○	○	72



図(1)-5 定点観測中の密度 (Sigma-t) の鉛直分布 (左)、及びTSダイアグラム (右)。左図の●及び▼はそれぞれ昼間と夜間～明け方に観測された自家蛍光値の極大層の位置を示す。



図(1)-6 定点観測中の自家蛍光値 (Flu) と溶存酸素濃度 (DO) の極大層の水深 (m) 及びそれらの差 (Difference)。横軸の黒棒は夜間を示す。

また、8回のCTD観測結果について自家蛍光値と溶存酸素濃度の鉛直プロファイルと比較すると、それぞれの極大層の水深が昼間は近づき夜間から明け方にかけて離れる傾向を示した(図(1)-6、図(1)-2)。これは*P. dentatum*が光合成を行う昼間は自家蛍光値と溶存酸素濃度の極大層が比較的よい一致を示し、夜間は*P. dentatum*が下層に移動するために両者の極大層深度の差が大きくなるもの

と解釈された。

上記の2つの結果はいずれも*P. dentatum*が東シナ海陸棚域において日周鉛直移動を行っていたことを示すものである。日周鉛直移動は昼間は光の豊富な浅い層に、夜間は栄養塩の豊富な深い層に移動することで光と栄養塩の獲得に有利に働くと考えられ、これが東シナ海陸棚域において*P. dentatum*の高密度での発生がしばしば認められることの要因であると考えられた。

上海市や集水域の他の都市の急速な経済的発展に伴い、長江からの栄養塩の流入は過去20年間で急激に増加したことが報告されている¹⁾。その結果、中国沿岸域では有害藻類による赤潮が頻発し、赤潮が占める面積が増加傾向にある¹¹⁾。Chenら²⁾は今後も長江からの栄養塩の流入量の増加が見込まれ、有効な手立てが打たれなければ日本、韓国沿岸にも被害が及ぶことを示唆している。

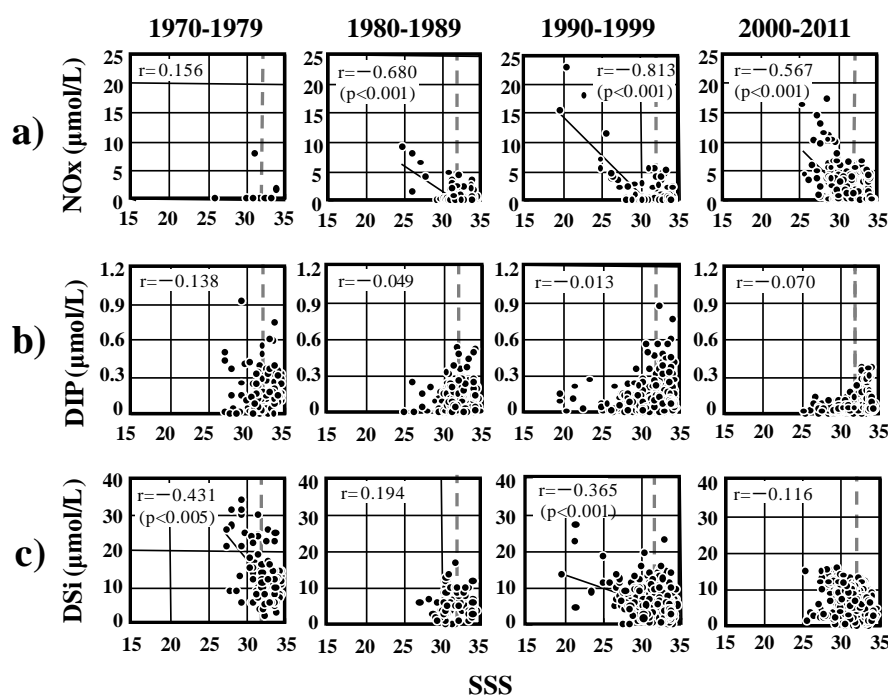
本研究では長江起源水が分布すると考えられる表面塩分32以下の海域及びその近傍で*P. dentatum*細胞数の高い優占率(67~98%)が3例認められた。また、これらの観測海域から考えて、そこに出現した*P. dentatum*は中国沿岸から輸送されてきた可能性が否定できない。しかしながら2009~2011年度の調査結果を合わせて考えると、調査海域において*P. dentatum*細胞が比較的高濃度で優占していたことが認められたのはわずか3例であり、また*P. dentatum*の細胞数が15,000 cells/mlと非常に高濃度で出現した場合も1例認められたが、この群集の増殖活性は高くないことが予想された。この結果は*P. dentatum*が日周鉛直移動により他の植物プランクトンよりも長く群集を維持できたとしても、*P. dentatum*赤潮の被害が直ちに日本沿岸に及ぶ状況にはないことを示唆するものと考えられる。しかしながら、今後も長江からの栄養塩の流入量の増加が続けば、赤潮の輸送距離が増加し、日本沿岸での赤潮被害の原因となることも予想される¹⁰⁾。陸棚域へ輸送されてくる赤潮主要原因プランクトン群集のモニタリング及びその維持機構の把握は陸域からの汚濁負荷削減の効果の事前予測に必須のものである。

(2) 既往観測データによる陸棚域環境変遷の解析

1) 出水期の北部大陸棚域表層における栄養塩環境の変遷

1970~2011年の5~10月(以下出水期)の東シナ海北部大陸棚域表層における塩分及び栄養塩観測値の項目別の濃度範囲及び延べデータ数は、塩分; 19.54~34.74 (n=1211)、NO_x; 0~22.8 μmol L⁻¹ (n=744)、DIP; 0~0.91 μmol L⁻¹ (n=1211)、DSi; 0~54 μmol L⁻¹ (n=981)であった。このうち、長江希釈水に相当する表層塩分32以下¹²⁾のデータ数は、各々NO_x; n=341、DIP; n=564、DSi; n=445で、全データの45~47%を占めた。

長江希釈水表層における年代別のNO_x平均濃度は、1970年代; 1.04±2.74 μmol L⁻¹ (n=8)、1980年代; 1.03±1.90 μmol L⁻¹ (n=60)、1990年代; 1.86±4.12 μmol L⁻¹ (n=74)、2000年以降; 1.88±3.11 μmol L⁻¹ (n=199)であった。表層塩分が32以上の高塩分水中におけるNO_xの平均濃度は、1970年代; 0.64±0.92 μmol L⁻¹ (n=3)、1980年代; 0.90±1.13 μmol L⁻¹ (n=39)、1990年代; 0.98±1.41 μmol L⁻¹ (n=66)、2000年以降; 0.79±1.55 μmol L⁻¹ (n=295)であった(図(1)-7-a)。データ数が少ない1970年代以外の各年代において、長江希釈水中の塩分とNO_x濃度との間に有意な負の相関(p<0.001)が認められた。10 μmol L⁻¹以上の高値は、いずれも、長江流量が季節的に最大となる7月に塩分30未満の低塩分水中で観測された。これらの結果から、少なくとも1980年代以降の出水期には、低塩分の長江希釈水の張り出しに伴い、長江河川水起源のNO_xが東シナ海北部大陸棚域表層に供給されていることが確認された。



図(1)-7 5～10月の北部大陸棚域表層における年代別の栄養塩濃度と塩分の関係. a) NO_x, b) DIP, c) DSi. 点線は塩分32. 相関係数及び相関式は塩分32以下のデータで評価した.

長江希釈水表層における年代別のDIP平均濃度は、1970年代； $0.17 \pm 0.18 \mu\text{mol/L}$ ($n=52$)、1980年代； $0.07 \pm 0.09 \mu\text{mol/L}$ ($n=126$)、1990年代； $0.08 \pm 0.09 \mu\text{mol/L}$ ($n=186$)、2000年以降； $0.04 \pm 0.03 \mu\text{mol/L}$ ($n=200$)であった(図(1)-7- b)。いずれの年代でも、長江希釈水表層のDIP濃度と塩分との間には有意な相関は認められなかった。また、2000年以降の長江希釈水中のDIPの平均濃度は、1990年代以前よりも有意に低下していた ($p < 0.001$)。長江から海域に負荷されるDIPは、ほとんどが河口・沿岸域で消費され、特に近年、北部大陸棚域では長江河川水起源のDIPは枯渇状態となっているものと推察される。一方表層塩分が32以上の高塩分水中におけるDIPの平均濃度は、1970年代； $0.20 \pm 0.15 \mu\text{mol/L}$ ($n=66$)、1980年代； $0.10 \pm 0.12 \mu\text{mol/L}$ ($n=102$)、1990年代； $0.14 \pm 0.14 \mu\text{mol/L}$ ($n=184$)、2000年以降； $0.07 \pm 0.08 \mu\text{mol/L}$ ($n=295$)であった。高塩分側でDIPの濃度が高くなっていることから、長江河川水以外にもDIPの供給源があることが推察される。

長江希釈水表層における年代別のDSi平均濃度は、1970年代； $16.2 \pm 8.4 \mu\text{mol/L}$ ($n=42$)、1980年代； $8.3 \pm 10.9 \mu\text{mol/L}$ ($n=59$)、1990年代； $6.7 \pm 4.3 \mu\text{mol/L}$ ($n=144$)、2000年以降； $7.6 \pm 3.8 \mu\text{mol/L}$ ($n=200$)であった。表層塩分が32以上の高塩分水中におけるDSiの平均濃度は、1970年代； $10.9 \pm 5.1 \mu\text{mol/L}$ ($n=54$)、1980年代； $6.3 \pm 2.9 \mu\text{mol/L}$ ($n=42$)、1990年代； $5.8 \pm 3.8 \mu\text{mol/L}$ ($n=145$)、2000年以降； $5.0 \pm 3.1 \mu\text{mol/L}$ ($n=295$)であった(図(1)-7-c)。1970年代と1990年代では、長江希釈水中の塩分とDSi濃度との間に弱い負の相関関係がみられることから、NO_xほど明瞭ではないものの、DSiでも濃度分布に低塩分水波及の寄与があることがうかがわれる。2000年以降の長江希釈水中のDSiの平均濃度は、1980～1990年代とほぼ同レベルで推移している。

Siswanto *et al.*¹³⁾は、1971～2001年の夏季の長江河口沖合域表層（7～9月、31～32°N、125.5°E以西）におけるNO_x濃度の推移について解析し、1980年代から1990年代にかけてNO_x濃度に上昇傾向が認められること、その理由として中国における窒素肥料使用量の増加及び長江流量増大の影響を指摘している。本研究でも、1980年代（NO_x=-0.882×SSS+28.1, r=-0.680, p<0.001, n=60）と1990年代（NO_x=-1.33×SSS+41.2, r=-0.813, p<0.001, n=74）の長江希积水では、塩分とNO_x濃度の回帰式の傾きに有意な差（p<0.05）が認められ、Siswanto *et al.*¹³⁾と矛盾しない結果であった。一方、2000年以降（NO_x=-1.28×SSS+40.8, r=-0.567, n=199）と他の年代では傾きに有意な差は認められなかった（図(1)-7-a）。このように、近年の北部大陸棚域表層における長江由来のNO_xの寄与には特段の変動傾向が認められなかった一方で、長江希积水のDIP濃度には、2000年以降顕著な濃度低下が認められた（図(1)-7-b）。この結果は、長江希积水によって海域に負荷される栄養塩の組成比が年代により異なるか、もしくは植物プランクトンの栄養塩要求比が年代により異なることを示唆している可能性がある。

2) 北部大陸棚域における渦鞭毛藻*P.*

*dentatum*の出現状況

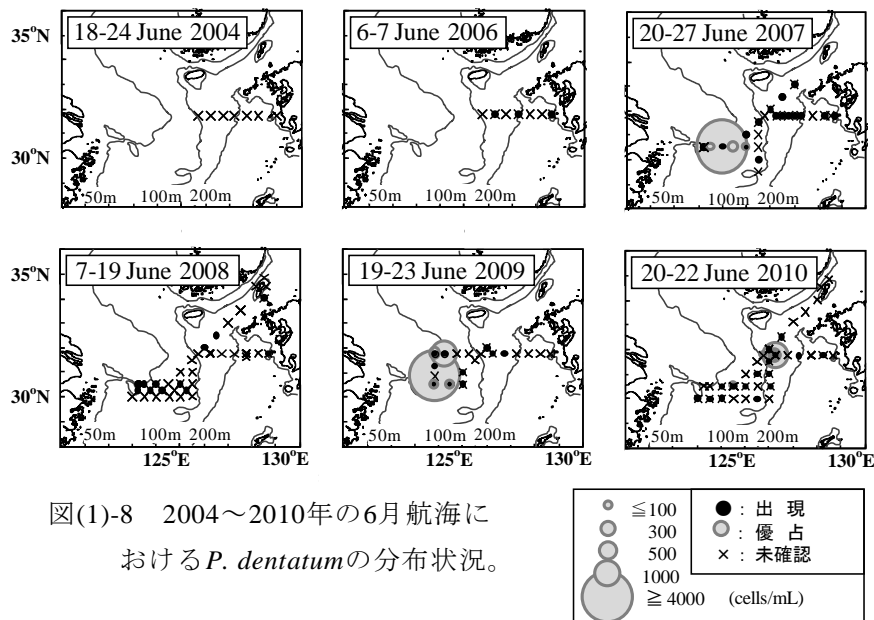
2004～2010年までの7年間に東シナ海の表層もしくは亜表層の自家蛍光極大深度で取得された植物プランクトン試料（延べ39航海、総検体数1500本）のうち、*P. dentatum*の出現が確認されたのは全体の25%にあたる375検体であった。このうち、*P. dentatum*密度が100 cells/mLを超える濃密分布となったのは15例で、いずれも優占種としての出現であった。濃密分布は、うち13例が夏季（6～7月）、2例が春季（4～5月）に、いずれも大陸棚域の観測点（海深47～126 m）で観測された。（表(1)-3、図(1)-8）。一方、九州西岸域及び対馬海峡等の大陸棚以外の海域での出現密度は、最大でも4 cells/mLであった。また、10～3月の観測での出現密度は、いずれも2 cells/mL未満であった。15例の濃密分布のうち10例は、長江希积水の指標である表層塩分32.0以下の観測点で採取された。ただし、濃密分布が見られた深度は、表層が2例、残りの13例は亜表層（10～26 m層）で、濃密分布

表(1)-3 2004～2010年の東シナ海における植物プランクトン試料取得数及び*P. dentatum*の出現頻度と最高密度一覧。

観測年月	植物プランクトン検体数	<i>P. dentatum</i>		
		出現頻度 (%)	最高密度 (cells/mL)	
2004	2	16	0	-
	4	7	0	-
	6	14	0	-
	7	31	26	328
	10	19	37	<0.1
2005	2	11	0	-
	3	40	10	<0.1
	7	21	14	0.3
	10-11	11	0	-
2006	1	17	12	0.2
	3	30	10	0.1
	4	38	76	51
	5-6	40	43	265
	7	45	38	0.2
	10	30	7	<0.1
2007	1	17	6	<0.1
	4	41	46	2
	6	73	55	4281
	7	68	40	716
	10	42	17	0.2
2008	2	12	8	0.1
	3	11	18	0.3
	4	41	2	<0.1
	6	95	21	0.5
	7	67	13	0.8
	10	71	0	-
	2009	2	21	33
3	22	14	<0.1	
4	38	53	15	
6	42	40	15293	
7	64	34	19	
10	62	8	1.8	
2010	2	15	13	<0.1
	3	23	17	0.3
	4	51	41	159
	5	20	20	26
	6	83	29	1065
	7	82	18	198
	10	69	17	0.7

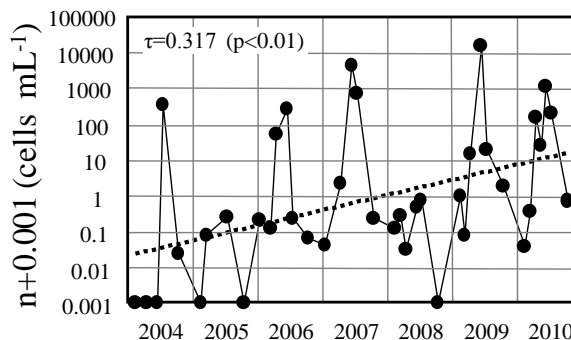
n=1500 25 %

層の塩分は30.7~34.4と比較的広範囲に及んでいた。クロロフィルa濃度は2.8~52.6 $\mu\text{g L}^{-1}$ の範囲であった。濃密分布層の栄養塩濃度は、NOx；検出限界以下~9.6 $\mu\text{mol/L}$ 、DIP；検出限界以下~0.07 $\mu\text{mol/L}$ 、DSi；4.8~13.2 $\mu\text{mol/L}$ で、DIPはいずれの場合も0.1 $\mu\text{mol/L}$ 未満の低濃度であった。



図(1)-8 2004~2010年の6月航海における*P. dentatum*の分布状況。

過去の夏季の植物プランクトン出現特性に関して、Furuya *et al.*¹⁴⁾は、1994年7~8月の東シナ海大陸棚域では珪藻が優占しており、渦鞭毛藻の現存量を大きく上回ったことを報告している。一方、本研究の観測では、夏季を中心に*P. dentatum*が優占種として出現した事例が複数回観測された(図(1)-8)。また、2004年以降の各航海で確認された*P. dentatum*の最大出現密度には増加傾向が認められている(Kendallの順位相関, $\tau=0.317$, $p<0.01$, 図(1)-9)。出水期の大陸棚域での渦鞭毛藻優占化の進行が懸念される。



図(1)-9 2004~2010年の各航海における*P. dentatum*の最大出現密度の推移。

3) 近年の長江希釈水中の栄養塩環境と植物プランクトン生態系及び渦鞭毛藻*P. dentatum*出現との関連

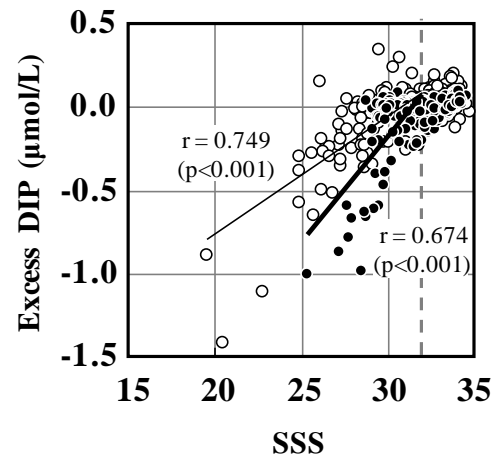
長江希釈水中の栄養塩環境が植物プランクトン増殖の制限因子となり得る状況か否かについて、組成比および濃度の両面から評価を行った。植物プランクトンの栄養塩要求比は種によって異なり、また様々な内的・外的要因によっても変動することが知られているが¹⁵⁾、ここではRedfield-ratio (N : P : Si=16 : 1 : 16)⁹⁾に基づき、NOxの濃度を基準として、以下の式により出水期の北部大陸棚域表層海水中のDIP濃度の過不足について評価を行った。

$$\text{Excess DIP } (\mu\text{mol L}^{-1}) = \text{DIP} - \text{NO}_x/16$$

低塩分水中ではExcess DIPは負の値を取ることが多く、出水期の東シナ海北部大陸棚域表層は、年代を問わず、相対的にはリンが不足しがちな環境であった。また、長江希积水の塩分とExcess DIPの間には有意な正の相関が認められた (Excess DIP = 0.0755 × SSS - 2.35, $r=0.662$, $p<0.001$, $n=335$)。長江河川水のN/P比はRedfield-ratioよりも高く近年では100を超える高値であるため¹⁰⁾、相対的には長江希积水の張り出しが強い時ほどリン不足の傾向が顕著になるものと推察される。さらに、長江希积水の塩分とExcess DIPの関係について年代別に検討した。まず、長江希積水中のリン濃度低下が見られた2000年以降と1990年以前に分けて検討したが、両期間の相関式の傾きには有意な差は認められなかった。一方、直近の2006年以降の回帰式の傾きはこれ以前よりも有意に大きくなっており ($p<0.001$, 図(1)-10)、長江希積水中でのリン不足の傾向が特に2000年代後半以降に強まった可能性が推察された。

次に、長江希積水表層の栄養塩の平均濃度を、珪藻の平均的な K_s 値 ($K_s(\text{N})$; $1.6 \pm 1.9 \mu\text{mol L}^{-1}$, $K_s(\text{P})$; $0.24 \pm 0.29 \mu\text{mol L}^{-1}$, $K_s(\text{Si})$; $3.9 \pm 5.0 \mu\text{mol L}^{-1}$)¹⁶⁾と比較して評価した。1990年代及び2000年以降の長江希積水表層の NO_x 、DIP及びDSiの平均濃度は、各々珪藻の平均的な K_s 値の116%及び118%、32%及び16%、171%及び194%に相当した。長江希積水中の NO_x の平均濃度は、長江からの経年的な窒素流下量増加⁷⁾に対応し、1990年代以降はほぼ珪藻が必要とする濃度レベルを維持していることが推察された。DSiでは、流域開発に伴い長江からの流下量は長期的に減少傾向にあることが指摘されているが⁷⁾、長江希積水中の平均濃度は依然高水準で推移していた。一方DIPでは、長江からのリン流下量が増加傾向にあったと考えられている1990年代^{10),17)}の平均濃度は珪藻の平均的な K_s 値の1/3程度で、珪藻では増殖制限要因となり得るレベルにまで低下していたことが示唆された。2000年代以降はさらに濃度が低下した。その原因として、1980年代後半以降長江河口沖合域で赤潮が増加し沿岸域における赤潮植物プランクトンの栄養塩消費が増加したと考えられること¹⁸⁾に加え、海域に負荷される長江河川水のN/P比が100を超えたこと¹⁰⁾が複合的に作用した結果、大陸棚域において長江希積水中のリン不足傾向が進行してきたと推察される。近年の出水期の北部大陸棚域表層生態系ではリン律速傾向が顕著であり、リン枯渇下にも適応可能な非珪藻プランクトンが優占しやすい環境へ変化していることが懸念される。

中国沿岸域に生息する*P. dentatum*の生態特性については、富栄養環境下で赤潮を形成する一方、DIPの枯渇後も群集を維持可能である¹⁹⁾、広範な塩分範囲で増殖可能である²⁰⁾との報告がある。また一般に、渦鞭毛藻類は、貧栄養塩環境下では鉛直移動により底層の栄養塩を獲得する、獲得したリンを細胞内に蓄積する、溶存有機リン (DOP) を利用する等の能力により、リン制限環境下にも適応可能な種が多いとされている。このため、慢性的にリンが枯渇し易く、かつN/P比が高い環境下では、珪藻類よりも渦鞭毛藻類の赤潮が発生しやすいとの指摘がある²¹⁾。*P. dentatum*は、富栄養化した中国沿岸域のみならず、リン律速が進行した出水期の東シナ海大陸棚域においても、



図(1)-10 2005年以前 (○) 及び2006～2011年 (●) のExcess $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度と塩分の関係。

全政策の実施がSS年流下量の顕著な減少を招いてきたことを指摘するとともに、三峡ダム竣工以降は、少なくとも20年間はSS流下量が低水準で推移するであろうと述べている。現況把握のため、中国の公報²⁴⁾に記載された長江主流の観測点（図(1)-11）における2000～2009年までのデータを解析した。2000年以降の主流域の淡水流量には2000年までの平年値と比較して顕著な変化は認められず（図(1)-12-a）、海域への流下量の指標となる最下流の大通観測点における2000年以降の年間淡水流量は平年値の93±10%で推移していた。一方、三峡ダム直下の宜昌観測点におけるSSの平均濃度及び年流下量は、Yang *et al.*²³⁾が指摘した2003年の低下以降、蓄水が本格化した2006年にもさらに減少しており、ダム開発の影響が顕著であった（図(1)-12-b,c）。大通における2000年以降のSS平均濃度及び年間SS流下量も、各々平年値の46±17%及び44±19%の低水準であった。

SS流下量の減少に伴い長江からのB-BAPの流下量が減少した可能性があることに加え、河川水中のDIP濃度についても、1960年代後半～2000年代前半までは増加傾向であったのに対し^{10),25)}、その後は減少傾向に転じたとの報告もある²⁵⁾。近年の生物が利用可能なリンの流下総量は低水準で推移していると推察され、大陸棚域における長江希積水中のDIP濃度低下にも、沿岸域における赤潮植物プランクトンの消費¹⁸⁾のほか、三峡ダム建設等の流域開発に伴う長江からの物質流下特性の変化が影響している可能性が高い。このため、長江希積水中でリンが枯渇しやすい状況は今後も継続するものと推察される。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

2009～2011年の6、7月に東シナ海陸棚域において調査船調査を実施し、長江起源水域と考えられる表面塩分32以下の海域において、主に*P. dentatum*により構成され濃度が50 µg/Lを超えるChl.*a*の垂表層極大の出現を確認した。2004年以降の既存データの解析でも、*P. dentatum*が、近年夏季の東シナ海大陸棚域において頻繁に高密度で出現していることを確認した。*P. dentatum*は中国沿岸の近年の赤潮原因種であり、中国沿岸から東シナ海陸棚域へ本种群集が輸送されている可能性がある。また30時間の定点観測により*P. dentatum*が日周鉛直移動を行うことを示し、これが*P. dentatum*の優占化機構の一つであることを示唆した。

長江出水期に相当する5～10月の東シナ海北部大陸棚域表層において、過去約40年間の栄養塩環境の変遷を把握した。NO_xについては年代を問わず長江希積水波及による供給がみられた。DSi濃度は比較的高水準で推移していた。一方2000年代以降の長江希積水表層のDIPはほぼ枯渇状態で、植物プランクトン増殖の制限要因となっている可能性が高い。栄養塩組成比からも、近年長江希積水中で生態系のリン律速傾向が強化されていると考えられた。その原因として、中国沿岸域での赤潮植物プランクトンによる消費に加え、三峡ダムへの蓄水等の流域開発に伴い、長江からの物質流下特性が変化したことが影響している可能性が高い。中国沿岸域だけではなく大陸棚域においても、生態系のリン律速の強化により、鉛直移動能力を有する渦鞭毛藻類の優占化が進行していることが懸念される。

(2) 環境政策への貢献

近年東シナ海では赤潮の発生や大型クラゲの大量出現等の異変現象が頻発していることから、

東シナ海生態系に変調が生じつつあることは明らかである。水産研究分野としては、有害生物による漁業被害の防止・軽減に万全を期すためにも、本研究課題の成果を活用し、東シナ海生態系の変調把握に基づく環境保全対策の検討や東アジア海域における国際的なモニタリング・ネットワークの策定等に貢献していきたい。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 越川海、東博紀、河地正伸、長谷川徹、岡村和麿、清本容子：2009年度日本海洋学会春季大会(2009)
「初夏の東シナ海陸棚域における渦鞭毛藻の優占的出現」
- 2) Iseki K, Kiyomoto Y, Okamura K, Harashima A : Workshop on Marine Environment in the East China Sea, Nagoya, Japan (2009)
“Cross-shelf transport of particulate materials in the East China Sea”
- 3) Koshikawa H, Higashi H, Kawachi M, Hasegawa T, Okamura K, Kiyomoto Y, Nishiuchi K, Akiyama H, Kohata K, Murakami S : PICES-2009 annual meeting, Jeju, Korea (2009)
“Predominance of dinoflagellates *Prorocentrum dentatum* on the central continental shelf of East China Sea in Early Summer, 2007”
- 4) 清本容子：東アジア河口域の環境と資源の保全・回復に関する調査研究シンポジウム，長崎(2009)
「長江起源水の海域環境への影響と低次生態系変動との関連」
- 5) Nishiuchi K, Taneda T, Kiyomoto Y: FRA-CAFS-NFRDI Workshop on Impacts of Climate Change of Fisheries and the Environment, and Low Carbon Technology (2010)
“Relationship between plankton, environment and climate change in the East China Sea”
- 6) 清本容子、長谷川徹、秋山秀樹、岡村和麿、西内耕、岡慎一郎、五味泰史、佐々木宏明、越川海、東博紀：2011年度九州沖縄地区3学会合同シンポジウム「東アジア域での大気海洋相互作用と越境汚染研究の現状」(2011)
「東シナ海長江希釈水影響域における低次生態系の変調と長江からの栄養塩負荷変動との関連把握」
- 7) 長谷川徹、清本容子、五味泰史、佐々木宏明、東博紀、越川海：2012年度日本海洋学会春季大会(2012)

「東シナ海の渦鞭毛藻*Prorocentrum dentatum*の優占化と維持機構：調査船調査による観測結果の解析」

- 8) 越川海、宮崎紘一、東博紀、長谷川徹、西内耕、清本容子、岡村和麿、河地正伸：2012年度日本海洋学会春季大会 (2012)

「東シナ海の渦鞭毛藻*Prorocentrum dentatum*の優占化と維持機構：大型培養槽による日周鉛直移動の再現実験」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Li *et al.*: Estuar. Coast. Shelf Sci. 71, 3-12 (2007)
”Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem”
- 2) Chen *et al.*: Geophys. Res. Lett. 30 doi:10.1029/2002GL016391 (2003)
“Physical-biological sources for dense algal blooms near the Changjiang River”
- 3) 越川海、東博紀、岡村和麿：環境技術ノート120, 電気評論2007.9, 72-75 (2007)
「長江経由の栄養塩負荷が東シナ海の海洋生態系に及ぼす影響」
- 4) Sasaki *et al.*: Geophys. Res. Lett. 35, doi: 10.1029/2007GL032637 (2007)
“Mapping the low salinity Changjiang Diluted Water using satellite-retrieved colored dissolved organic matter (CDOM) in the East China Sea during high river flow season”
- 5) Strickland, Parsons: *Fish. Res. Bd. Can. Bul.* 167, 310 (1972)
“A practical handbook of seawater analysis”
- 6) Suzuki, Ishimaru: *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 46, 143-194 (1990)
“An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N, N-Dimethylformamide”
- 7) Li MT, Xu KQ, Watanabe M: Estuar. Coast. Shelf Sci., 71, 3-12 (2007)
“Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem”
- 8) JODC Data On-line Service System (http://www.jodc.go.jp/service_j.htm)

- 9) Redfield AC, Ketchum BH, Richards FA: In *The sea*, Vol 2. Ed. by Hill MN, Interscience Publisher, New York, 26-77 (1963)
 “The influence of organisms on the composition of seawaters”
- 10) Wang B: *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 69, 471-477 (2006)
 “Cultural eutrophication in the Changjiang (Yangtze River) plume: History and perspective”
- 11) Three Gorges Dam project working group: Chinese Academic Science Press, p1126 (1987)
 “Paper collection of the study of the impacts of the Changjiang Three Gorges Dam (TGD) project on the ecosystem and environment”
- 12) Su YS, Weng XC: In *Oceanology of China Seas*, Vol. 1, ed. by Zhou D. *et al.*, Kluwer Acad., Dordrecht, 3-16 (1994)
 “Water Masses in China Seas”
- 13) Siswanto E, Nakata H, Matsuoka Y, Tanaka K, Kiyomoto Y, Okamura K, Zhu J, Ishizaka J: *J. Geophys. Res.*, 113, C10030, doi: 10.1029/2008JC004812 (2008)
 “The long-term freshening and nutrient increases in summer surface water in the northern East China Sea in relation to Changjiang discharge variation”
- 14) Furuya K, Hayashi M, Yabushita Y, Ishikawa A: *Deep-Sea Res. II*, 50, 367-387 (2003)
 “Phytoplankton dynamics in the East China Sea in spring and summer as revealed by HPLC-derived pigment signatures”
- 15) Kudo I: *Marine Biology* 143, 39-46 (2003)
 “Change in the uptake and cellular Si:N ratio in diatoms responding to the ambient Si:N ratio and growth phase”
- 16) Sarthou G, Timmermans KR, Blain S, Tréguer P: *J. Sea Res.*, 53, 25-42 (2005)
 “Growth physiology and fate of diatoms in the ocean: a review”
- 17) Duan S, Liang T, Zhang S, Wang L, Zhang X, Chen X: *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 79, 239-250 (2008):
 “Seasonal changes in nitrogen and phosphorus transport in the lower Changjiang River before the construction of the Three Gorges Dam”
- 18) Zhang Y, Zhu L, Zeng X, Lin Y: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60, 369-379 (2004)
 “The biogeochemical cycling of phosphorus in the upper ocean of the East China Sea”
- 19) Ou L, Wang D, Huang B, Hong H, Qi Y, Lu S: *J. Plankton Res.*, 30(9), 1007-1017 (2008)
 “Comparative study of phosphorus strategies of three typical harmful algae in Chinese coastal waters”
- 20) Xu N, Duan SS, Li AF, Zhang C, Cai Z, Hu Z: *Harmful Algae*, 9, 13-17 (2010)
 “Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the harmful dinoflagellate *Prorocentrum donghaiense* Lu”
- 21) 吳碩津、松山幸彦、山本民次、中島昌紀、高辻英之：沿岸海洋研究 43, 85-95 (2005)
 「近年の瀬戸内海における有害・有毒渦鞭毛藻類の分布拡大とその原因－溶存態有機リンの生態学的重要性」
- 22) Yan W, Zhang S: *Biogeochemistry*, 65, 179-194 (2003)
 “The composition and bioavailability of phosphorus transport through the Changjiang (Yangtze) River during the 1998 flood”

- 23) Yang Z, Wang H, Saito Y, Milliman JD, Xu K, Qiao S, Shi G: *Water Resources Res.*, 42, W04407, doi: 10.1029/2005WR003970 (2006)
“Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: The past 55 years and after the Three Gorges Dam”
- 24) 中华人民共和国水利部: 中国河流泥沙公报 2000-2009 (2001-2010)
- 25) Yao QZ, Yu ZG, Chena HT, Liua PX, Mi TZ: *Applied Geochemistry*, 24, 2186-2194 (2009)
“Phosphorus transport and speciation in the Changjiang (Yangtze River) system”

(2) 長江デルタの農業構造転換に伴う陸域負荷構造の変化に関する開発地理学的研究

立正大学 経済学部 元木 靖

平成21～23年度累計予算額：13,055千円（うち、平成23年度予算額 4,029千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】 長江デルタは中国社会の歴史的発展過程において食糧基地として重要な役割を果たしてきた地域である。当地域の開発空間としての最大の特徴は、低湿な土地空間と人間の共存のかたちを象徴する、クリーク景観が地域一帯に発達してきたことである。しかし、現代化政策の開始以後現在までの約30年の間に急激な工業化と巨大な都市化が進行し、地域社会のしくみや産業構造が激変する一方、水質汚染を主とした環境問題が深刻化して、その影響が飲料水の確保をはじめ多方面に及ぶようになった。本研究では、長江デルタにおけるこうした事態を、①デルタの開発をめぐる「新旧文明の対立」の問題として位置付けるとともに、盆地状の構造を有するデルタの土地条件下において進行した、巨大な工業化・都市化の矛盾の問題という性格が強く表れていることを示唆した。また、②政治経済的には、1990年代初めに上海・浦東地区が国家の重点開発区となったこと、および2001年に中国がWTO加盟を果たしたことを契機として顕在化した、いわば今日のグローバル社会の現象であることを確認した。その上で、③長江デルタの陸域負荷の問題は、デルタ全体における産業構造の変容過程（あるいは再編成の過程）で生じてくる地域問題であり、いわば地域変化の方向性に規定されて、それぞれ異なった地域的意味と構造をともなって発生する現象であることを実証した。例えば、今日、陸域負荷の問題が最も先鋭的に現れている地域では、工業化と都市化、農畜水産業の変容の下で、当該地域内外の要請を受けて同時的・複合的に生じている現象である。したがって将来に向けた環境管理手法を構築するためには、現行の汚染源の特定とその処理対策、あるいは規制の強化という側面への関心のみではなく、環境負荷をもたらす地域変化のメカニズムの認識と評価が重要なポイントになるであろう。

【キーワード】 長江デルタ、クリーク、農業構造転換、陸域負荷構造、歴史的評価

1. はじめに

中国の長江デルタは、いま、アジアで最も著しい経済発展地域として注目されてきた地域である¹⁾。しかし、反面ではデルタを構成し、特徴づける水環境がこの間に急速に悪化し、その影響は海域にもはっきりと現れるようになった。中国環境年鑑2010によれば、中国の沿岸海域の水質は汚染がすすみ、2000—2009年の状況でも大きな改善が見られないまま推移している。しかも海域を渤海、黄海、東海、南海に区分してみた場合、長江デルタの前面にひろがる東海の汚染が突出している。最近6年間（2005—2010年）の傾向は、東海のみが海水の重度汚染域を拡大している。

本研究全体の課題は、中国大陸における急速な経済発展の影響が、日本とも密接に関係する東シナ海の環境に対して及ぼす影響の重大さに鑑み、陸域と海域の環境変化の関連性に関する科学

的な解明を行うことを中心として設計されている。サブテーマ(2)の分担課題は陸域の側から、長江デルタの産業構造の変化と水環境変化(陸域負荷構造)との関係について考察することにある。

長江デルタの経済発展と環境問題については、すでに多方面から調査・研究が行われている。例えば、董(1988)²⁾と水利部太湖流域管理局/中国科学院南京地理与湖泊研究所主编(2000)³⁾は、比較的早い段階で太湖周辺の水汚染問題の実態を明らかにした出色の成果である。いずれも地図を駆使して実態を示しているが、前者は蘇州・無錫・常州等の市域において都市の汚染物質が、デルタ地域を特徴付ける河川網(クリーク)を通して、郊外から農村へと周囲に拡散していく状況について考察している。後者は総合的に長江デルタの汚染状況と背景となった諸指標を駆使してアトラスとしてまとめており、今日の段階から見てもきわめて貴重である。張(2006)⁴⁾と趙(2009)⁵⁾は、デルタの面源汚染問題について体系的に論じており、前者は将来における農業発展地域における変化の方向と、面源汚染の解決手段について言及し、後者は太湖流域の総合的な特性を踏まえ、汚染紛争の解決には行政区をまたぐ形の有効な解決策見出す必要があることを指摘している。また鄭他5名(2009)⁶⁾は太湖の水質汚染問題に対する規制と対策を論じた成果である。その他、概括的ではあるが、孫(2005)⁷⁾と山田(2011)⁸⁾の報告も、長江デルタの水汚染の状況と解決に向けた政策を、丁寧に整理・紹介して、見解を述べており、参考になる。なお、蘇州河の汚染状況とその対策過程を公開している「夢清館」(上海蘇州河展示中心)も長江デルタの水環境問題の解決方式を理解する上で有益である。

以上のように、長江デルタの水環境問題については、汚染源の分析から始まり、国あるいは地域の環境政策を踏まえつつ、その解決に向けた技術的手法や法的規制の必要性と効果、さらには行政域を超えた連携を総合的に図っていく必要性などが喚起されている。しかしながら、内容的に大半の成果は、特定の汚染物質の定量的な観察データの分析にとどまっているか、あるいは政策内容に即した議論にとどまっている観がある。こうした中で砂田(2008)⁹⁾は、「アジアの水問題に対して分析から総合の方向を目指すことが重要であり「総合化の方法論」を獲得することが求められている」、と新たな研究方向を示唆している。筆者も全く同感であるが、そのためには今日の環境問題を地域の問題として、とくに歴史的な環境変化の問題として理解する観点に立つことが必要になる。

2. 研究開発目的

サブテーマ(2)の研究目的は、以上のような研究動向を踏まえ、できるだけ広い視野から、長江デルタにおける経済発展と水環境汚染問題の関係性(およびその変化の方向性)を明らかにすることに重点を置く。農業の構造転換であれ、水環境の変化であれ、それらはよりマクロな社会の仕組みが形成される過程において、地域性をともないつつ、互いに変化する動的な現象である。両者の関係性の中に問題の本質があると考えられる故である。

具体的にはつぎの3点を目的とした。

- (1) 長江デルタの性格を開発地理学的な視点から歴史的に明らかにする。すなわち、長江デルタが自然的にどのような構造を有しており、これに対して人々がどのような対応をしてきたのか、その意義はどのようなことか、さらにデルタの経済環境が急変する前の状況を明確にする。

- (2) 改革開放政策以来の長江デルタの農業構造転換の時・空間的特徴を明らかにする。すなわち、長江デルタにおける産業構造が変化する時期と農業構造の変化の時期との関連を明示すること、およびデルタ内における農業構造変化と水環境汚染との地域的な関係性について明らかにする。
- (3) 農業構造の転換と水環境の負荷構造の変化との関係について作業仮説を提示し、具体事例について検証を行う。

3. 研究開発方法

本研究のためにとった「開発地理学」の手法¹⁰⁾とは、人類史において常に続けられてきた自然と人間とのかかわり合い、特にその実態をいわゆる「地域論」の視点からアプローチすることに意義を見出そうとするものである。

具体的には、長江デルタにおける急速な経済発展に伴って生じた水環境問題がどのような今日の構図のもとに発生しているかを、時代背景と共にデルタの地域特性に即して理解できるような枠組みを設定して年次計画をたてた。その中でデルタ地域を時間的にもより広い観点から位置付けるためのマクロな調査、デルタの内部における地域動向の分析を踏まえたメソスケールの調査、さらにより末端レベルのミクロな調査を実施した。具体的には統計資料、地元発行の文献・資料を利用した。また統計データについては可能な限り地図化し検討資料とした。現地調査では華東師範大学、嘉興師範学院、蘇州科学技術学院において研究交流と情報収集を行った。また上海、蘇州、嘉興、杭州、鎮江等の行政機関と経済開発区および農家での聞き取り調査をすすめ、可能な限りデルタ全体を視野に入れ大局的・総合的な判断ができるように心がけた。

4. 結果及び考察

(1) 開発史上からみた長江デルタの性格

1) 長江デルタの開発史上の意義と課題

a. 今日の全体的性格

長江下流域の江蘇省、浙江省、上海市にまたがる、とくに東シナ海（東）、天目山（西）、杭州湾（南）、長江（北）の範囲（総面積はおおよそ36,750 km²）を、ここでは長江デルタ地域（以下、「長江デルタ」と略称）と定める。長江デルタにおいては、すでに新石器時代後期の段階に、太湖の西南隅に稲作を基調とした初期文明（「良渚文明」）が誕生し、歴史時代に入ってからその開発の波が域内の高位の土地から低地へ、全体としてはその西方から東方へと向かって展開してきた。これに対して上海を起点に展開する今日の工業・都市文明の流れは、逆に東方から西方へと向かい、デルタ地域に大きな構造変化を引き起こしている。

その特徴は、デルタにおける農村―都市間の激しい土地利用の変化であったり、治水・水利の再編成という変化であったり、水資源の再配分であったり、さらには水質汚染等の水環境問題の深刻化という形で現われている。本報告では、これらの事実を踏まえ、長江デルタにおける開発史上の今日の様相を「新旧文明の対立」現象として位置付けた。

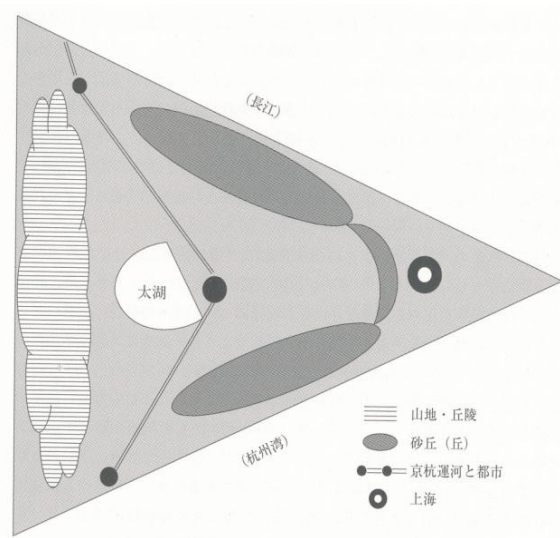
b. 造盆地状のデルタの地形特性

長江デルタの地形は、概略的に見ると西部には海拔10～30m以上の丘陵地区、北部はやや高い平原区(5～7m)、南部(嘉興平原)の杭州湾一帯は4～5m、東部は上海浦西の崗身地帯(4～5m)と浦東の海積平原とつづく。これに対して中央部の湖沼の分布地域は、一部にみられる残丘(200m以下、蘇州の虎山や無錫の恵山)を除き、海拔4～5m以下の低湿地となっている。つまり、このデルタの地形配置は四周が高く中央部が低い、いわば盆地状の構造をしている(図(2)-1)。

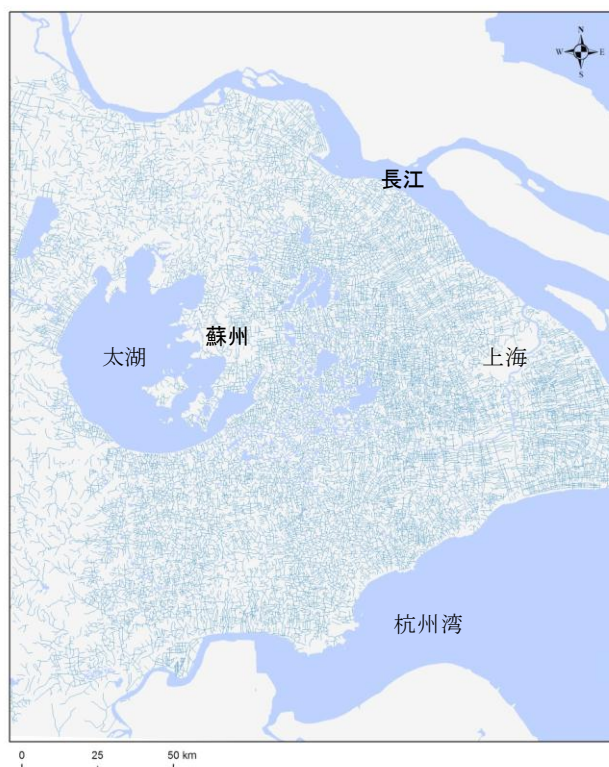
海津(1992)¹¹⁾は、このデルタを洪積台地(低地の北西部、太湖の北岸にあたる常州・無錫付近と南部の杭州湾とに挟まれた地域に広く分布すると、沖積地帯(太湖周辺およびその東側にひろがる湖沼地帯、さらに長江の河岸にひろがる地域)に大別している。同氏によると、長江デルタの中心部に当たる太湖地域および湖沼地域の大部分は洪積台地面が低くなった凹地面であり、この部分に水域が広がるのは後氷期海進にともなう海面高度がほぼ現海面に近づいた約6,000年頃前と推定される。またこのころに台地の東端部を結ぶように砂州(崗身)が形成されはじめ、水域と泥炭地がモザイク状に分布する、現在の湖沼地帯に近い景観が出現したと考えられる。さらに、その後、長江による土砂の堆積にともない崗身地帯の海側に砂質堆積物が付加的に堆積し、現在の上海市域の大部分をのせる沖積地が形成された(図(2)-1参照)。

c. クリークの形成

長江デルタの開発は、以上のような地形環境下において、早くから進められてきたが、その水利工学的な手法は、デルタの水を排除し、利用するためのシステム網を発達させてきたことにある。クリーク網とは、広く解釈するならば河川、運河、溝渠(用水路や排水路)などの、さまざまな機能をもつ水路の総称である。これらのなかには京杭運河や黄浦江のような規模の大きな水路から農業用の例えば水田に付帯して配置された微小なものまでさまざまなレベルがある。図(2)-2はそうしたクリーク網の分布景観である。これは世界の他のデルタとは際だった長江デルタの特徴である。このような造盆地状の地形配置とそこに刻まれたクリーク網を基盤として、その



図(2)-1 長江デルタの地形模式¹²⁾

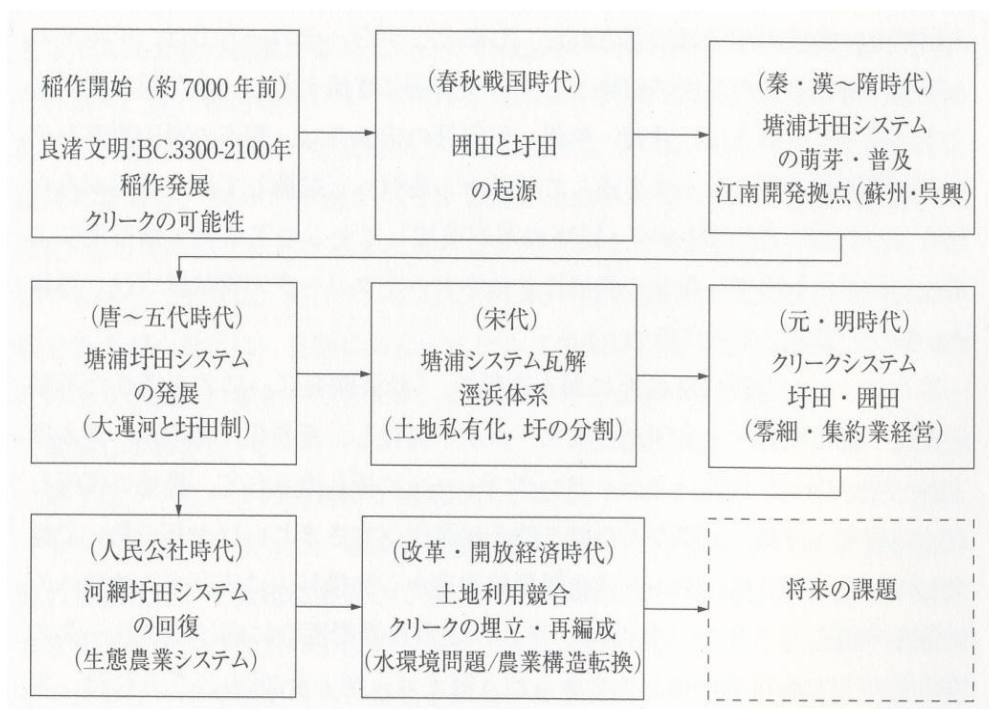


図(2)-2 長江デルタのクリーク網
(中国科学院資料より作成)

上に工業・都市文明が移植され、今日の経済発展が実現している。

2) 改革開放期当初の長江デルタの農業状況

長江デルタにおける稲作文明発生以来の開発史の概略を、クリークシステムの発達と変容に着目して、整理した(図(2)-3)。この図は、長江デルタ西方の山麓の低地において初期の開発が先行し、次いで湿潤限界的な湖水面あるいは過水域を囲い込むような形で、さらに崗身地帯の砂質地にまで人間の居住が展開する過程で、クリーク網が各時代背景のもとで、国家権力あるいは私的に進められてきた経緯を示している。



図(2)-3 長江デルタの開発史(試案)¹²⁾

また、クリークは治水・利水・排水による農地の確保のほかに、交通・輸送路や漁撈の場として多面的な機能を発揮しつつ、クリークを基本とした集落の形成・鎮の発生を促してきたが、人口が増加するにつれて次第にクリークの管理・新規開発が困難になってきたこと、結果として経営単位の細分化がすすみ、稲作以外の多様な土地利用が指向されるようになってきたことを示している。

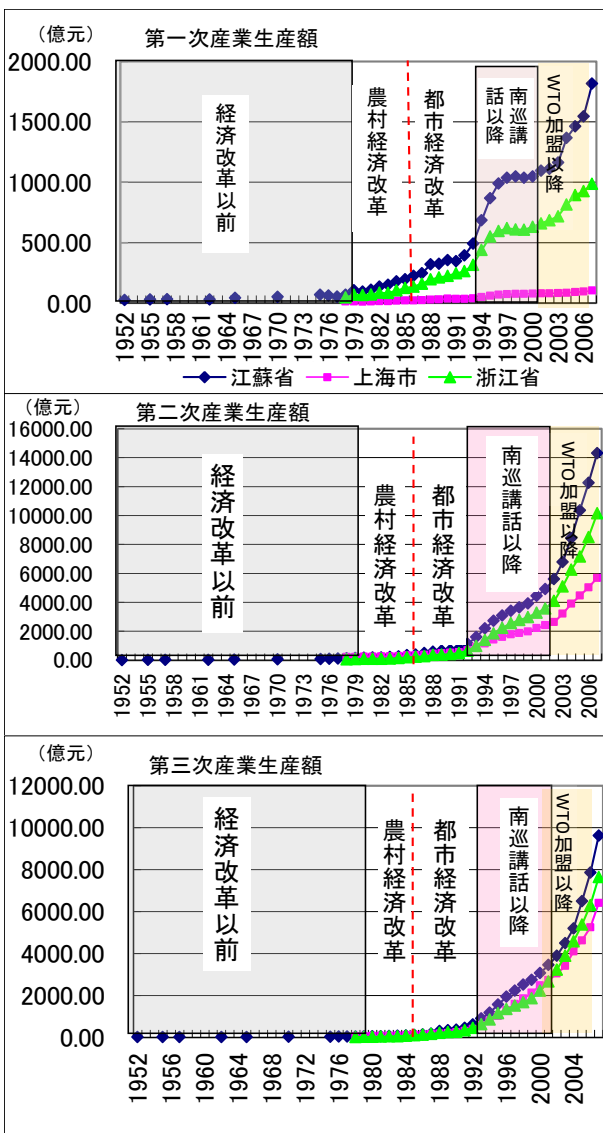
そして1949年の革命後の人民公社時代には、一部に稲作と養魚、畑作、そして繊維工場等を連携させた産業構造が各地に芽生えるようになったが、基本的には集団化による食糧増産に傾斜し、分散化した農地およびクリークの統合が進められた。しかしながら、1979年に始まる改革開放時代に至って、人民公社の集団経営の解体、家族請負制の実施によって、零細経営という状況を再現するようになった。こうした状況下において零細経営のもとで郷鎮企業の発生を見たが、まもなく海(域)外企業の直接投資による急速な工業化と都市化に直面することとなった。

(2) 長江デルタの農業構造転換の時・空間的特徴

1) 中国の経済改革と長江デルタの経済発展

1979年に始まる中国の改革開放政策、すなわち経済改革の中であって、長江デルタはその当初から今日見るような経済発展を遂げてきたわけではない(図(2)-4)。上海市、江蘇省、浙江省の3市省の産業分類別生産額の動向をみると、経済発展がはっきりと確認されるのは1990年代以降のことである。それ以前に改革の影響が認められるのは第一次産業部門に限られている。第一次産業部門は1985年までの農村経済改革期から85年以降の都市経済改革期にかけて、江蘇省や浙江省を中心に成長が確認できる。しかしこの場合でも1990年代以降の生産額の伸びと比較すると大きなものではない。要するに、長江デルタにおいては各産業部門ともに、1990年代以降になって、急速な経済発展を遂げてきたことが分かる。

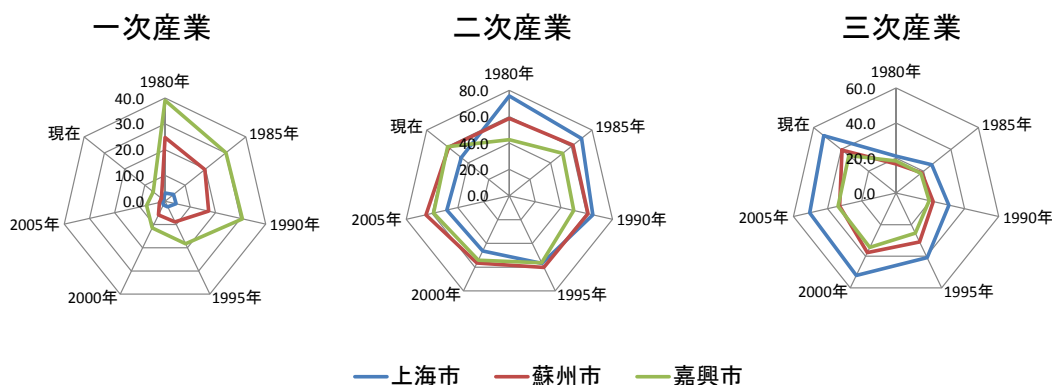
したがって、長江デルタにおける経済改革期以降の経済発展は、1980年代から1990年代前半まで(第Ⅰ期)、1990年代後半から2000年代初頭まで(第Ⅱ期)、そして2000年代初頭から現在まで(第Ⅲ期)に、大きく3期を画してみることが出来る。第Ⅰ段階の経済発展は、第1次産業によって導かれたが、第Ⅱ・Ⅲ段階では第二・三次産業が発展の原動力となった。第Ⅱ段階には鄧小平氏が改革開放政策の継続を再確認した南巡講話(1992年)、第Ⅲ段階では中国のWTO加盟(2001年)があり、これらが産業構造転換の大きな契機となった。このことは経済発展の性格が国家の政治経済政策に加えて、グローバル化する国際社会の枠組みの中でもたらされたことを意味する。



図(2)-4 中国の経済改革と長江デルタ3市省の産業構造変化

2) 長江デルタにおける産業構造変化の方向性と農業・農村構造転換

長江デルタの産業構造変換の地域動向を、産業別生産額構成に着目しデルタ東部の上海市、蘇州市、嘉興市の3市について比較した(図(2)-5)。この図から、1980年には地域間で大きな産業間格差を有していたが、その後その格差は、第二次産業の場合1985年、第三次産業は1990年、第一次産業は2000年頃を契機として大きく変化してきた。農林漁業部門を含む第一次産業の側から見ると、非農業部門の経済的比重が高まるのにあわせて、構造変化が引き起こされてきたことを



図(2)-5 長江デルタ 3 市の産業別生産値構成(%)の年次変動 (各市「統計年鑑」より作成)

表(2)-1 長江デルタにおける産業構造の転換過程と農業・農村の変化

政治経済政策		農村経済改革期	都市経済改革期	南巡講話以降	WTO加盟以降
産業分類別成長率		一次産業先行		第二次・第三次産業主導	
地域間格差 上海・江蘇・浙江	一次産業	微少～漸増(江蘇・浙江対上海)		拡大 顕在化	急速拡大 拡大
	二次産業	微少			
	三次産業	微少		微増	
農業の動向 主要農作物播種面積のピーク (浙江省の例)					
農村の建設事業		極少	微増	急増(前期) 基本建設、新改造、 不動産、集団住宅	急増(後期) 基本建設、不動産、 集団住宅

(図(2)-4、及び上海市統計年鑑、江蘇省統計年鑑、浙江省統計年鑑により作成)

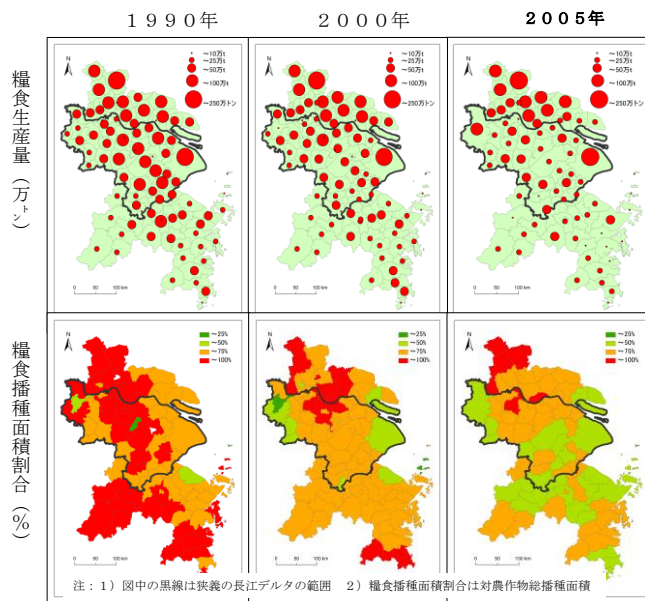
意味するが、地域的にはそうした変化が上海市から蘇州市へ、そして嘉興市へという順序で移行してきたことが推察された。

そこで、長江デルタにおける農業・農村の全体的な転換構造を検討し、表(2)-1のように整理した。この表はその特徴の一面を農作物の作付(播種面積)動向と、農村における住宅建設の変化に着目して要約したものであるが、長江デルタの農業と農村の変化は、第一次産業の成長が先行的にみられた第Ⅰ期ではなく、第二次および第三次産業の成長期(とくにⅢ期)に至って、急速に進んだことが分かる。この期に住宅の新築ブームがすすみ、農作物の交替が顕著な現象となった。

農業に関していえば、(1)で述べたように、歴史的に長江デルタの農業を特徴づけてきた糧食(水稻を中心とした食糧)作物が後退(図(2)-6)し、一方で野菜や果樹生産の成長が伺える。表示

しなかったが、伝統的に商品作物としての役割を担ってきた繭や棉花の生産が減少する一方で、家禽・豚などの肉や卵類の生産、さらに水産物の生産も著しい成長をみせた。

このような部門の成長は、農業の集約化の傾向であり、そのために投入される化学肥料や殺虫剤の利用、家畜使用のための購入飼料の利用、あるいは排泄物の増加などは、その管理の仕方によっては陸域の環境負荷要因となることがよく知られている。しかしながら既述のように、近年の長江デルタにおいては、第一次産業は本質的に第二次および第三次産業の動向に規定されて存在する段階に至っている。したがって、農業構造の転換の動きと陸域(とくに水環境)負荷の問題の関連性を論ずるには、具体的な要素について、より詳細に地域動向を把握しておくことが前提となる。

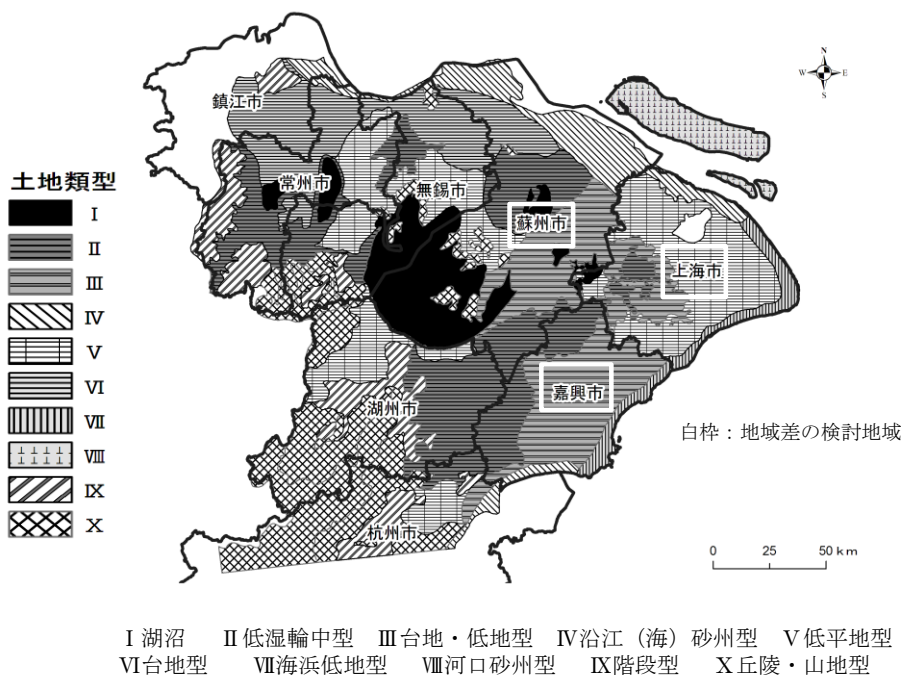


図(2)-6 長江デルタ3市省における糧食生産の後退

3) 長江デルタにおける農業構造の転換と陸域負荷要因の関係

a. 農業構造転換の地域性

長江デルタ内の土地類型を踏まえ、農業構造転換の全体的な傾向を把握するための基本指標として耕地面積を、また陸域に対する負荷要因となる可能性をもつ農業要素として肉類と水産物の



図(2)-7 長江デルタの土地類型

生産量、および化学肥料の使用量を取り上げ、それらの動向にどのような地域性が見られるかについて検討した。検討の単位は上海市と蘇州市、および嘉興市の範囲（図(2)-7参照）とし、この範囲内に含まれる各県のレベルとした。その結果、各市の土地環境による影響はあるものの、傾向としては上述のような産業構造の変化の方向に対応した地域差が認められること、すなわち個々の市域単位ではなく、デルタの広い範囲を対象とした農畜産業の地域分化が発生していることが判明した。

a. 耕地面積と化学肥料

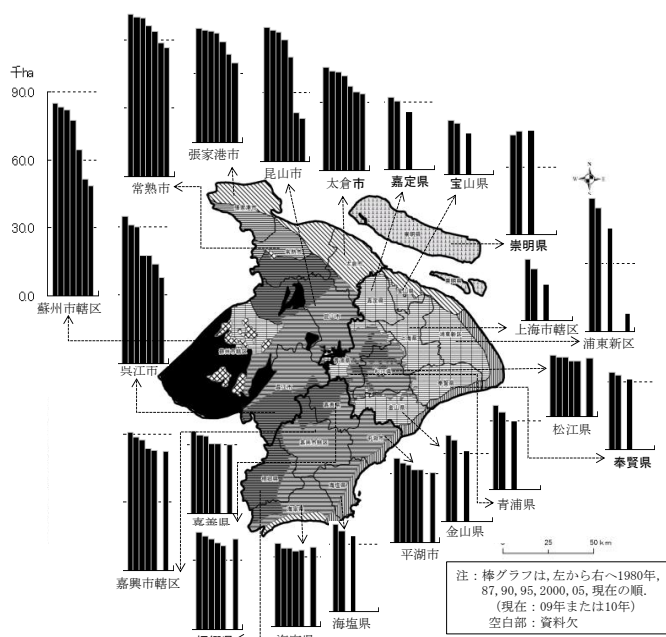
耕地面積の各地区別推移（図(2)-8）をみると、全体に減少傾向にあるが地域差がある。開発区の設置などにより工業化が促進された上海の浦東新区、蘇州の昆山市と蘇州市轄区では近年の耕地の減少が著しい。また減少傾向が明瞭である蘇州市域に対して、杭州湾に面した嘉興市域では減少程度は緩慢であり、停滞的な地区も認められ、南北間での地域差も明瞭に確認できた。

化学肥料使用量の地区別推移（図(2)-9）は、耕地面積の場合とかなり類似している。これは化学肥料の使用量が耕地面積の減少に応じて減っていることを示している。その大半は野菜部門などではなく、水稻栽培を中心とした穀物栽培面積の減少（および播種面積の減少）を反映している。これは蘇州市において明瞭である。

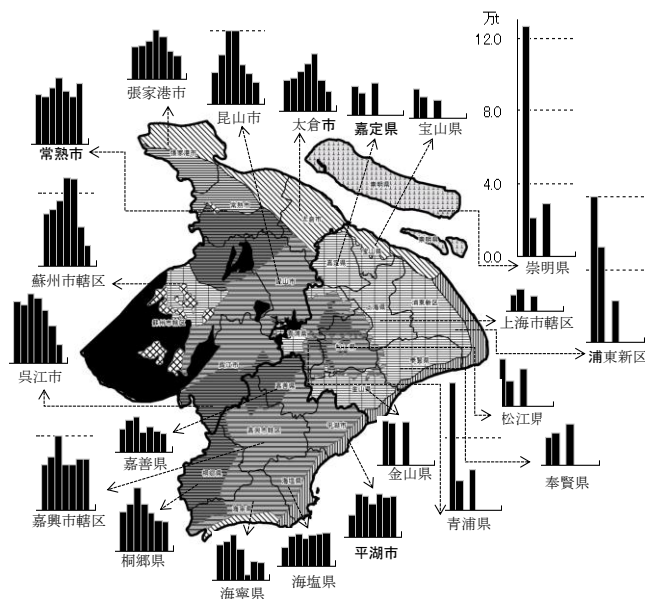
一方、嘉興市の場合、化学肥料の使用量が嘉興市轄区や海塩県、平湖市においては増加傾向も示す。この場合、後述するように多肥を要する蔬菜園芸などの進展を反映した現象であると推定される。

b. 水産物の生産量と肉類の生産量

水産物生産量の地区別推移（図(2)-10）と畜産物生産量の地区別推移（図(2)-11）も、蘇州市域と嘉興市域の間では、明瞭な地域差を伴っている。すなわち、前者では 1980 年以降増加基調にあった水産物の生産量が、最近に至って例外なく減少に転ずる傾向を示している。これに対



図(2)-8 耕地面積

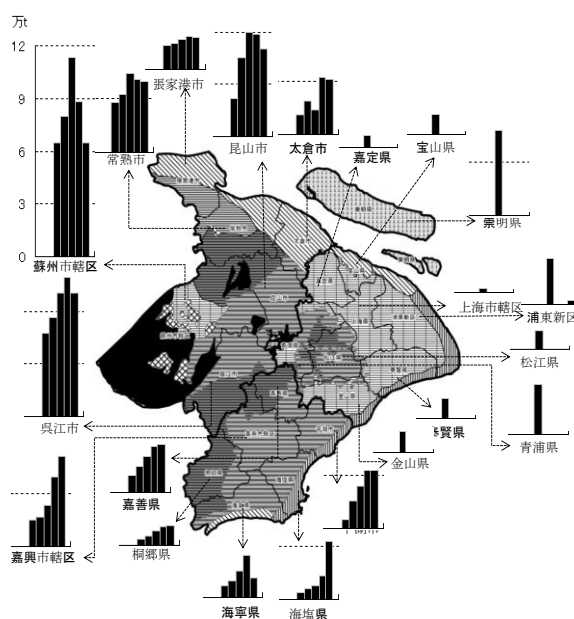


図(2)-9 化学肥料使用量図

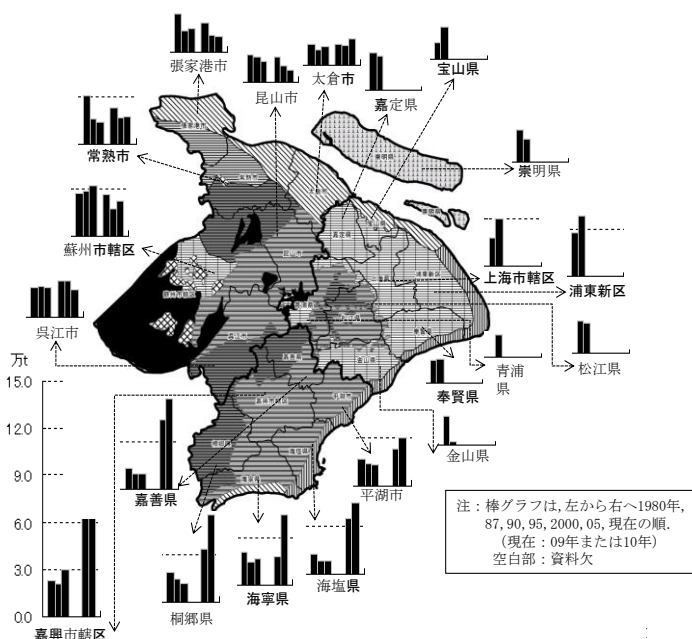
し後者では、一貫して増加傾向を持続している。また、肉（牛、豚、羊）の生産量についても同様の傾向を確認できる。しかも肉の生産は近年急速に増加している。

ところで、以上のような農業要素にみられる推移のパターンと、各地区の土地類型との対応については、明瞭な関係が認められず、むしろ両者の関係を薄める傾向が強い。湖沼地帯を有する蘇州市においては、水産物生産（内水面養殖）が増加を見せてきたが、最近では減少に転じていることもそれを裏付けている。収益性の期待される農漁業部門でも後退が進み始めたことを示している。

ここで、上海市の位置づけが問題となるが、分布図には最近の詳細なデータが欠如している。ただ、上海市の場合、すでに1980年代以前から近郊農業が発達しており¹³⁾、経済改革期には蔬菜生産は、同市の外縁部（崇明島、市域東部）への立地移動が認められる。水稻栽培についても、1980年代までみられた早稲、中稲、晩稲を組み合わせた形態が、1990年代以降急速に晩稲の一期作に変化している。同様の傾向は蘇州市や嘉興市でも認められるが2000年代以降のことである。したがって、3市の農業構造は、より高い収益性を期待できる土地利用形成に向け、上海→蘇州→嘉興の順で変化してきたと言える。しかも、こうした変化がデルタ地域内で単に順送りに拡大してきたというのではなく、長江デルタ地域全体をベースとした土地利用の地域分化を引き起こしつつ展開してきている。上海市に隣接する蘇州市と嘉興市の土地利用変化パターンをみると、蘇州市では多くの土地利用関連要素が近年縮小傾向にあるが、嘉興市では増加基調を示しており、明瞭な地域差が認められる。デルタ地域の農業構造転換と環境問題の発生という意味では、蘇州市は早くから地域分化を経験し環境問題に直面してきたのに対して、嘉興市は地域分化の先端的な位置にあっていわば問題地域をなしている。



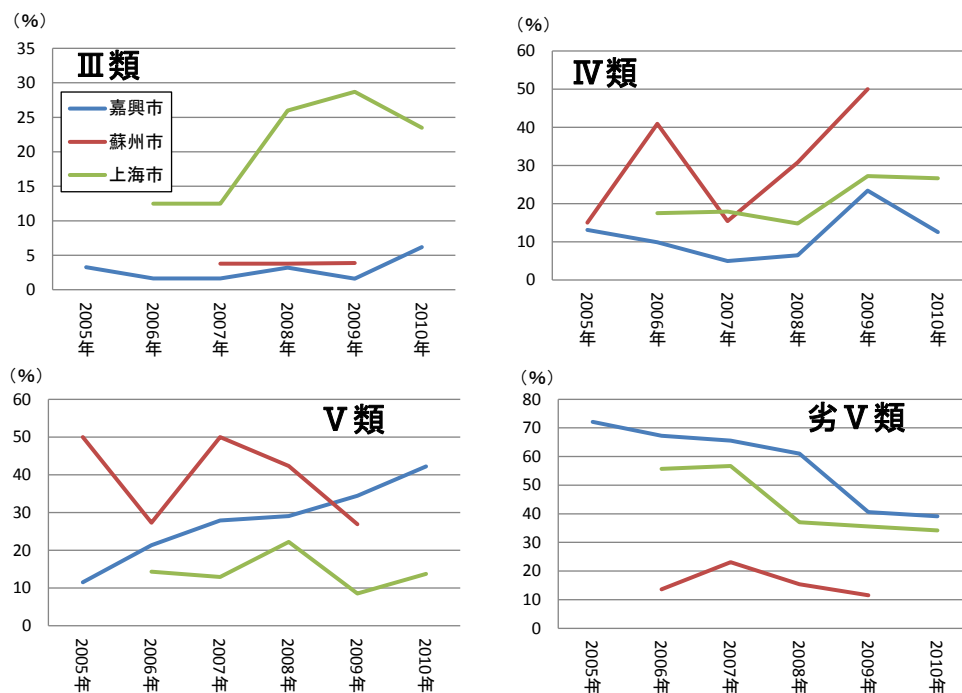
図(2)-10 水産品生産量



図(2)-11 肉(豚、牛、羊)生産量

c. 農業構造の地域変動と水質変化の空間的關係

中国国内の水質状況は、水質濃度・利水目的に対応するⅠ～Ⅴ類の五段階の水質基準類型で示される場合が多い。例えば、水道利用目的であれば、Ⅰ～Ⅲ類が求められ、最も低いⅤ類の利水目的は農業用水及び不快でない景観の確保となる。また、Ⅴ類を超過する劣Ⅴ類は利水が困難と考えられている。そこで、前節までに示した農業構造の変化、とくに水質に対する主要な負荷要因を構成する化学肥料の使用量、水産品生産、及び肉類生産の地域変動の規則性を踏まえ、上海市、蘇州市、嘉興市の水質状況の変化傾向(2005-2010年)をⅢ類から劣Ⅴ類までの類型データ(図(2)-12)により検討した。その結果、農業構造変化の地域傾向と明瞭に対応関係が見られることが判明した。上海市の2005年と蘇州市の2010年のデータが欠如しているが、傾向としてつぎのように指摘できる。第1に、劣Ⅴ類の割合がいずれにおいても低下し、改善傾向が見られる。第2は3市間での水質改善の内容に明瞭な地域差が確認できる。劣Ⅴ類の割合は上海では10%程度に低下しているが、蘇州市と嘉興市では30%台から40%台にある。一方Ⅲ類では、上海は2007年以降その比率を高め以前の10%台から2010年には25%前後に高まっている。これに対し蘇州市と嘉興市では5%前後にとどまっている。第3に、Ⅳ類については蘇州がその割合を高める傾向にあり、またⅤ類については嘉興市のみが2005年から2010年まで一貫してその割合を高めていることが特筆される。嘉興市では2005年で10%であった割合が、2010年には40%台にまで達している。



図(2)-12 長江デルタ3市における水質動向の比較
(上海市、蘇州市、嘉興市環境状況報告より作成)

以上から、3市とも近年水質改善の傾向は認められるものの、全体的には依然として厳しい傾向が続いている。その中において、水質改善の動きは上海市が先行し、次いで蘇州市、そして嘉興市の順となっている。とくに、嘉興市においてはⅤ類と劣Ⅴ類を併せた割合は80%に達しており、近年きわめて深刻な水質環境に直面していることが分かる。

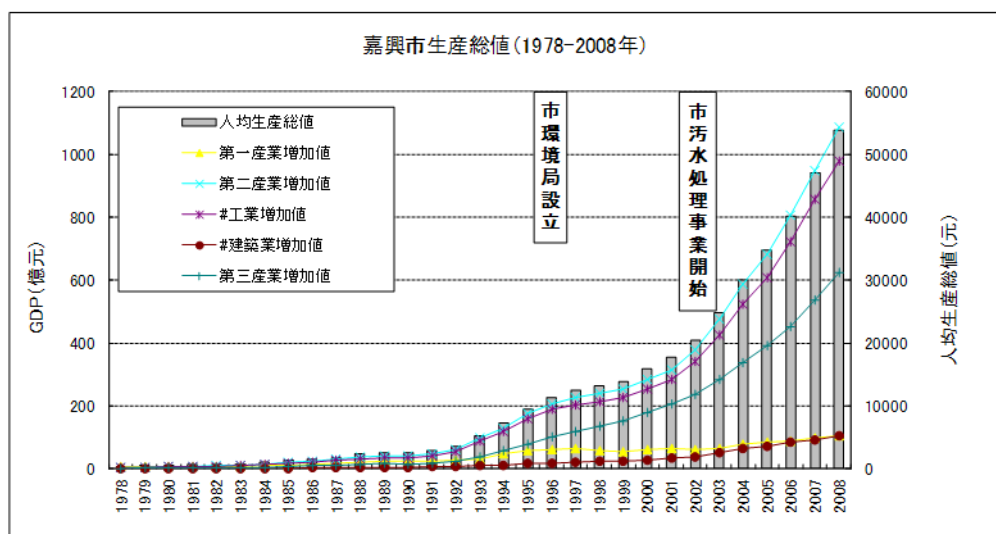
このような状況から判断して、上記のような農業構造の変化と水質環境の変化は地域的に同調していると認められる。しかし、これはあくまで間接的な対応関係が認められることを示すにとどまり、作業仮説としての関係の確認に過ぎない。

(3) 陸域における水環境負荷構造メカニズムの検証—嘉興市を例として

1) 後進性の問題と近年の急速な経済成長

最後に、嘉興市を対象を絞り、水環境問題がなぜ、近年になって深刻な状況を示しているのか、考察した。一般に、経済成長下の汚染源の発生については、工場や都市用水からの排水が未処理のまま流出した場合、農牧畜産業における化学肥料や殺虫剤の使用、家畜や水産物飼育のための購入飼料の利用、その他エネルギー革命がすすむ中での農業廃棄物などが指摘されている。また、長江デルタにおいてはデルタの開発を可能にしてきたクリークの管理がおろそかになり、またクリークの泥溜みや水草の利用がなくなり、水の流れが滞留することも重要な要因として指摘されている。

そこで、さまざまな可能性を予測して、まず嘉興市の全体的な地域変化の傾向について検討する中で、汚染問題の発生について考え、その上で農業構造の変化に基づく影響との関係を考察した。その結果、嘉興市は、工業化の動きと汚染問題が戦前から存在した上海市や、人民公社解体



都市化	行政区再編成	■	→	■	郷政府→鎮政府→村民委員会の順
	都市域の拡張	○	→	○	城鎮区面積
基幹農業	非農業人口率	①	→	②	①15.0%,②20.5%,③30.4%,④38.5%
	転入人口	○	→	○	転入人口(対転出人口)超過傾向拡大
	公園面積	○	→	○	1人あたり用水使用量
	生活用水量	○	→	○	堤防が延長、農地の旱魃・水害への対応
集約農業	農村投入資金	◇	→	◇	近年は消費を拡張が上回り微増傾向
	農牧漁業人口	▲	→	▲	①41万ha,②32万ha,③24万ha,④19万ha
	耕地面積	▲	→	▲	早稲・中稲の急速な減少
	糧食面積	①	→	②	蔬菜が主
集約農業	水稻栽培面積	▲	→	▲	豚肉の生産が主に鶏肉・卵生産も同様
	蔬菜等栽培面積	○	→	○	淡水養殖中心
	肉類生産量	○	→	○	①70万ト、②60万ト、③50万ト
	水産品生産量	○	→	○	
化学肥料使用量	①	→	②		

注: → 緩やかな変化(○) → (増加◎) → (減少▲)

図(2)-13 嘉興市の産業構造の変化と農業・農村の変化過程

に前後して社隊企業を中心とした郷鎮企業が発展し、さらに1990年代以降に海外からの直接投資が先行した蘇南地域に対して、後進的な位置におかれていたが2000年代に入ってから急速に工業化が進展したことが、農業構造の変化と相まって汚染問題を増幅したものと推察された(図(2)-13)。

長江デルタにおけるGDPの増長率(1980-90、1990-2000、2000-2006)は、8.5%(全国7.7%)-14.4%(同8.9%)-14.4%(同9.1%)を示し、対全国比で見ても急速な成長を遂げてきた。実際、嘉興市の経済成長率を1人あたりGDPの成長率の変化(1980-90、1990-2000、2000-2006年)を見ると、デルタに関係する3市省のうちでは前の2期間では11位であったが、2000年以降になって16.8%の成長を示し、蘇州、無錫、舟山に継いで4番目の急成長ぶりを示した。

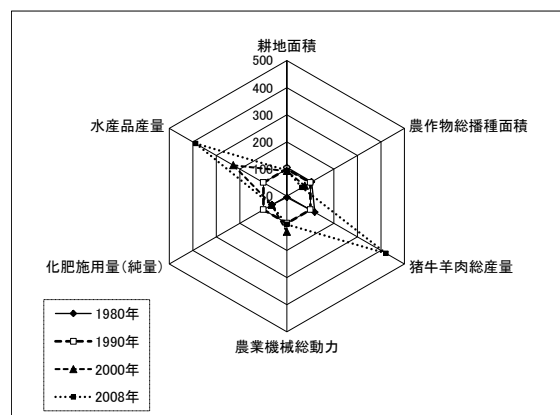
2) 複合的な水質汚染構造

図(2)-14は嘉興市の経済発展にあわせて、地域変化の状況を纏めたものであるが、殆どが2000年以降に大きな変動が起こったことが理解できる。ここに近年水汚染問題が特徴的にあらわれてきた要因がある。ここでは、個々の水質汚染源の要因については言及せず、結論的に検証の結果を要約すれば、工業化や都市化に起因したものに加えて、水環境汚染はきわめて複合的な要因と関連して生じている。水田が減少するとしても、デルタにおいてクリークは治水上も重要な機能を有している。そのようなところに急速な工業化・都市化が展開し、クリークを埋め立て、破壊したりする動きが、水質環境汚染をもたらす背景となっている。

こうした環境変化の中で、農業的な要因がどの程度の割合を占めるかについては定量的な分析はなしえなかった。しかし図(2)-13にも示したように、穀物部門の大幅な後退と単作化の反面で、近年の急速な野菜生産地化、肉や卵などの生産の急増、そして淡水養殖を中心とした水環境に負荷をもたらす可能性のある部門の著しい成長が認められる(図(2)-14、図(2)-15)。

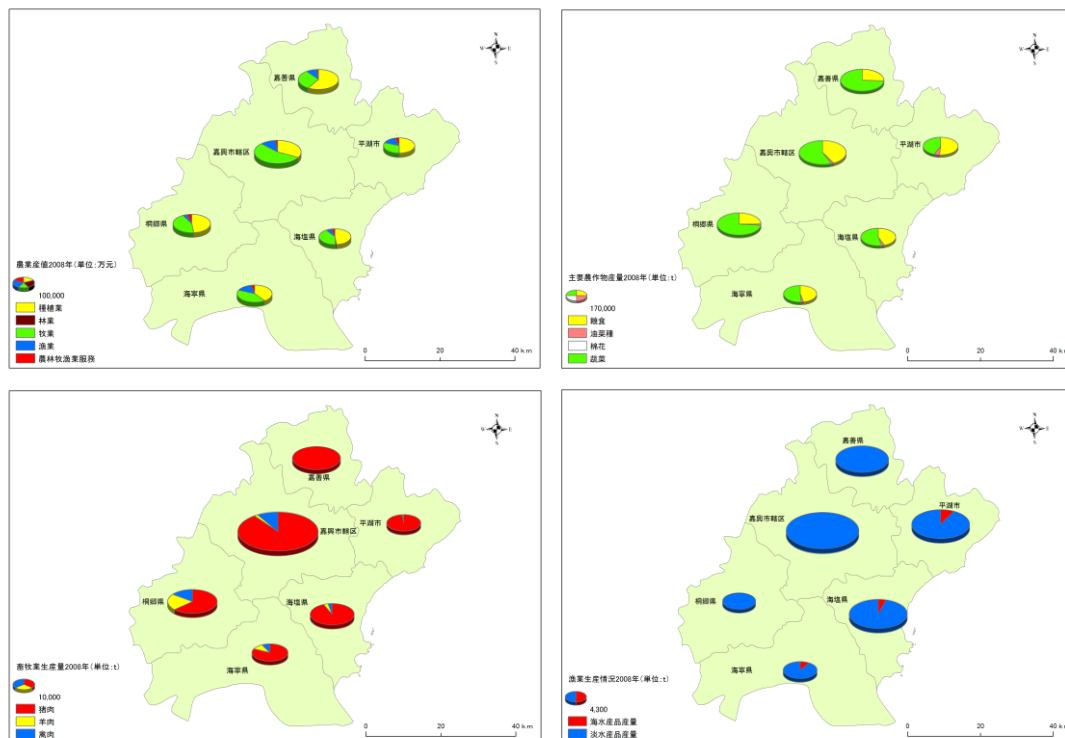
この背景には嘉興市内はもとより、上海や杭州市を初めとした地域における農業の後退を受けて、嘉興市における農畜産物生産への期待、言い換えればそれらの商品化が急速に期待されたことが汚染問題の根底にある。つまりこのような問題は工業化を先行した地域においては、かつては地域内において発現した現象であったが、今日の段階ではデルタの広い枠内で起こり始めたことを示すものである。もちろん、長江デルタ内には嘉興市よりも後進的な位置にあるところもあるが、今後同様のことが起こりうるであろう。一方、上海市内や蘇州市内においても、開発区域に入らなかった地域には部分的に同様の地域がちりばめられており、そのような地域にあっては同様の問題が生じている。

最後に、長江デルタの陸域負荷の問題は、デルタ全体における産業構造の変容過程(あるいは再編成の過程)で生じてくる地域問題であり、いわば地域変化の方向性に規定されて、それぞれ異なった地域的意味と構造をともなって、発生する現象であることが判明した。嘉興市の例で指摘したように今日、陸域負荷の問題が最も先鋭的に現れている地域では、工業化と都市化、農畜水産業の変容の下で、当該地域内外の要請を受けて同時的・複合的に生じている現象である。将来に向け



図(2)-14 嘉興市の農業変化 (1990年=100)

た環境管理手法を構築するためには、現行の汚染源の特定とその処理対策、あるいは規制の強化という側面への関心のみではなく、環境負荷をもたらす地域変化のメカニズムの認識と評価が重要なポイントになるであろう。



図(2)-15 嘉興市における農牧水産業の分布

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、長江デルタにおける汚濁負荷発生の要因について開発地理学的な観点から探求した。その結果、長江デルタの汚濁負荷発生と水質悪化は、造盆地構造と歴史的に形成されたクランク網という土地条件に対する工業化・都市化・経済拡大の矛盾であり、いわば新旧文明の対立的な問題であることが示唆された。また水質汚染問題の発生状況は、長江デルタ内でも農産業構造の変容・再編過程・段階の違いによって地域ごとに異なることが示唆され、地域変化の方向性に規定されていることが示唆された。工業化・都市化・農畜水産業などの地域変化の方向性は、地域内のほか地域外からの要請を受けて進行し、同時・複合的な再編圧力が強まることにより、著しい水質汚濁が発生する傾向が明かとなった。したがって将来に向けた環境管理手法を構築する上では、現行の汚染源の特定とその処理対策あるいは規制の強化という側面のみならず、環境負荷をもたらす地域変化のメカニズムの認識と評価が重要なポイントであると考えられた。今後、本研究において構築したデータベースと考察結果を教育の場及び講演会、学会などを通じて公開し普及に努める。

(2) 環境政策への貢献

将来に向けた環境管理のガバナンスの本質が、汚染源の分析と処理対策のみではなく、地域の

産業構造変化の評価を踏まえるべき点にあることを、学会シンポジウムなどを通じて提起する。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 元木靖：立正大学『経済学季報』，61(1)，25-62 (2011)
「長江流域の環境史(3)－太湖平原良渚遺跡周辺の灌漑水利変容－」
- 2) 元木靖：立正大学『経済学季報』，62(1)，印刷中 (2012)
「農作物から見た中国農業の構造変化－長江デルタと東北地区の比較－」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 元木靖：東北地理学会2011年度春季学術大会，発表要旨：季刊地理学、63(3)，188，(2011)
「中国長江デルタ地域における農業特性の転換基調」
- 2) 元木靖：東北地理学会2012年度春季学術大会，発表予定，(2012)
「経済発展と水環境問題－長江デルタにおける地理学的課題」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 加藤弘之：現代中国経済，名古屋大学出版会 (2003)
「6 地域の発展」
- 2) 董雅文：太湖流域水土資源及農業發展遠景研究，中国科学院南京地理研究所与湖研究所編，科学出版社，161-171 (1988)

「太湖地区城乡发展中的环境问题」

- 3) 水利部太湖流域管理局、中国科学院南京地理与湖泊研究所主编：科学出版社（2000）
「太湖生态环境地图集」
- 4) 张宏艳：经济出版社（2006）
「发达地区农村面源污染的经济学研究」
- 5) 赵来军：复旦大学出版社（2009）
「我国湖泊流域跨行政区水环境协同管理研究-以太湖流域为例」
- 6) 鄭正・柏益堯・錢新・羅興章・崔益武・左玉輝：中国の水環境問題 開発のもたらす水不足，
中尾正義・錢新・鄭躍軍編，勉成出版，89-108（2009）
「流入河川による太湖の水質汚染に対する規制と対策」
- 7) 孫彤：広島経済大学経済研究論集，27(4)，79-94（2005）
「長江デルタにおける環境問題 —太湖を例として—」
- 8) 山田七絵：中国における流域の環境保全・再生に向けたガバナンス—太湖流域へのアプローチ，
アジア経済研究所調査報告書，31-55（2011）
「中国における農村面源汚染問題の現状と対策」
- 9) 砂田憲吾：アジアの流域水問題，技報堂出版株式会社，297-301（2008）
「流域水研究の新しい流れ」
- 10) 元木靖：古今書院（1997）
「現代日本の水田開発—開発地理学的手法の展開—」
- 11) 海津正倫：江南デルタ市鎮研究—歴史学と地理学からの接近—，森正夫編，名古屋大学出版会，
27-56（1992）
「中国江南デルタの地形形成と市鎮の立地」
- 12) 元木靖：立正大学『経済学季報』，61(1)，25-62（2011）
「長江流域の環境史（3）—太湖平原良渚遺跡周辺の灌漑水利変容—」
- 13) 上海师范大学地理系編：上海科学技术出版社（1979）
「上海农业地理」

(3)-1) 長江中下流域都市活動起源の栄養塩負荷量の推定に関する研究

(独) 国立環境研究所

地域環境研究センター 地域環境技術システム研究室 水落 元之・大場 真

地域環境研究センター 主席研究員室 王 勤学

平成21～23年度累計予算額：39,657千円（うち、平成23年度予算額 11,599千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】 サブテーマ(4)で開発する東シナ海流動・生態系モデルへ入力する長江流域から東シナ海への近年の負荷量推定と将来シナリオの検討の両方のため、次の3つの研究を実施した。

1)長江流域、長江デルタ経済圏および太湖流域の産業・人間活動から発生するCOD、T-NおよびT-Pの汚濁負荷量を原単位法で算定し、長江デルタ経済圏の負荷発生の大きさと、太湖流域の占める割合を検討した。その結果、長江デルタ経済圏からの汚濁発生負荷量の長江流域全体に対する割合は、COD 11.6%、T-N 10.3%、T-P 15.3%となった。また、栄養塩類発生負荷に対する太湖流域の割合はデルタ地域の80%程度と試算された。2)長江上流から長江デルタ経済圏への汚濁負荷量を推定するためSWATモデルを適用した。モデルの再現計算結果によると、2001-2010年の平均値で長江の年平均流出量は9391億トンで、それによって長江デルタ経済圏へ運ばれた有機窒素は17.5万トン、NO₃-Nは180.9万トン、NH₄-Nは16.7万トン、有機態りんは0.4万トン、無機態りんは5.2万トンである。既往の研究成果と比べると、この10年間の硝酸態窒素は1980年代の約3倍に、亜硝酸態窒素は約2倍に、そして、NH₄-Nは約1.3倍に増大したことが分かった。3)太湖流域における都市活動起源の発生源としては工業排水、生活排水および生活ゴミが考えられ、対策の基本は産業構造の転換を含めて、これらの発生源を集中させ、効率的な処理を行う事を大きな特徴としていた。太湖の水質保全計画とその実施状況および汚濁負荷発生量推計の結果から今後の中国大陸からの栄養塩負荷削減の鍵を握るのは、農業セクターからの排出であり、特に今後の急激な拡大が予想される畜産排水であると推測された。

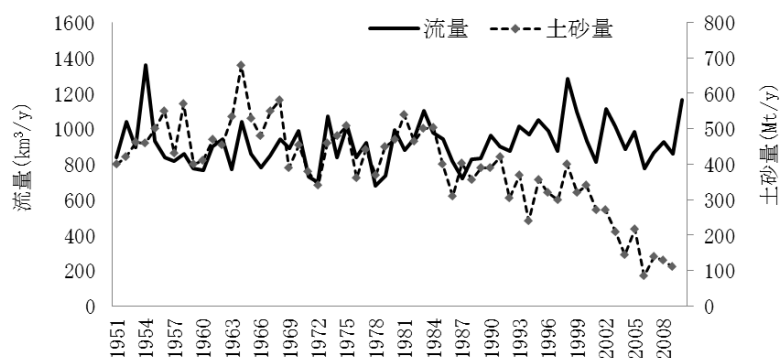
【キーワード】 長江デルタ経済圏、汚濁負荷発生量、SWATモデル、太湖流域、水質保全計画

1. はじめに

長江流域は、中国中・南部の広い範囲を覆っており、流域面積は180.9万km²である。チベット高原の唐古拉山脈から、四川盆地、三峡を経て湖北省宜昌市に至るまでが上流、宜昌から江西省湖口県までが中流、湖口から上海市の河口までが下流にあたる。源流から河口の標高差は5,400mに達し、西部の高原・高山地区、中部の中山・低山地区、および、東部の丘陵・平原地区に大きく分けられる。長江流域には成都、武漢、重慶などの重要な工業都市、上海、南京などの国際商業都市を含む中国の19の省（市、自治区）があり、流域の人口も経済規模も中国の1/3以上を占めている。

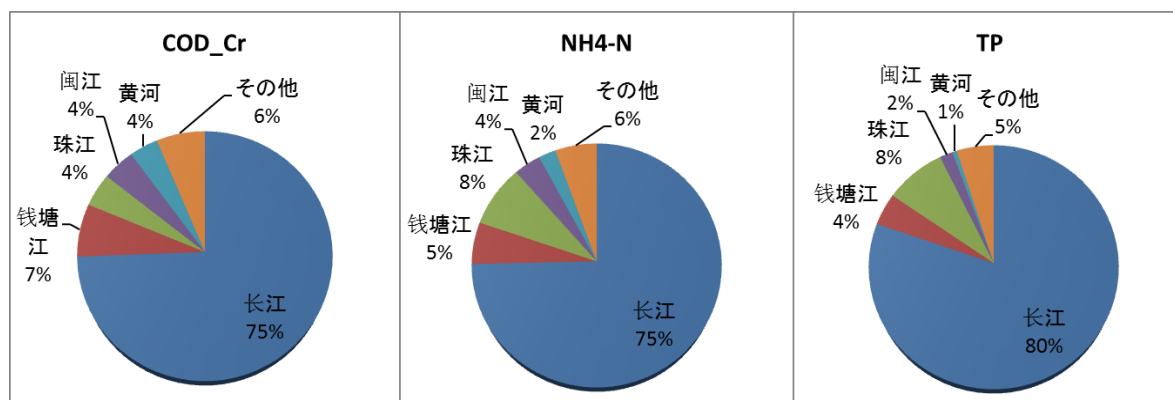
図(3)-1)-1に示したように長江の最下流にある大通水文観測点（河口部より約550km）で観測さ

れた1950年以降の年間総流量の長期的変動は、1954と1998年の $1,200 \text{ km}^3 \cdot \text{y}^{-1}$ 以上の大流量から1972年、1978年と1986年の $800 \text{ km}^3 \cdot \text{y}^{-1}$ 以下の小流量まで変動幅が大きいものの、明確な上昇や低下傾向が見られなかったことを示している。長江は中国大陸から海域への淡水供給量の約70%を担う。しかし、年間の土砂輸送量は30%以下であり、黄河の土砂輸送量約37%より少ない。長江の土砂輸送量は1980年代以降土砂流失の防止措置、退耕還林政策や、多くのダム建設に伴って低下傾向にあり、特に2003年の三峡ダムの一部の湛水し、さらに2006年の完成後は著しく低下した。



図(3)-1)-1 大通観測点で測定した年間河川流量及び年間土砂輸送量の長期的変動
(中国水利部長江水利委員会の観測データに基づく)

急速な経済発展による工業と生活排水及び化学肥料消費量の増大に伴って、長江流域圏からの汚濁負荷量は、上流から下流へ徐々に増えると同時に、海への負荷輸送量が年々増大してきた¹⁾。図(3)-1)-2に示すように中国国家海洋局の調査によると、2010年の長江流域圏からの化学的酸素要求量(COD)とアンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)の負荷量は全国主要河川経由で海へ輸送された総負荷量の75%を占め、全りん(T-P)は総負荷量の80%を占めた。



図(3)-1)-2 中国主要河川経由で海へ輸送された総負荷量の割合
(中国海洋環境状況公報より)

また、既存の研究によると、長江河口附近の海域での硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)と溶存態りん(DP)の平均濃度も増加傾向にあり、1958～1960年の長江河口域及び沿岸海域での $\text{NO}_3\text{-N}$ とDPの平均濃度は $0.124 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ と $0.026 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ であったが、1985年にそれぞれ $0.682 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ と $0.054 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、さらに、2001年に $1.860 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ と $0.062 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ まで増大した。2005～2006年の $\text{NO}_3\text{-N}$ とDPの平均濃

度は2001年と比べて微量に低下したものの、1960年代と比べてそれぞれ6.4倍と1.2倍に上昇した²⁾。

ここで、長江下流域に位置する長江デルタ経済圏は長江の三角州を中心とした上海市、江蘇省南部及び浙江省北部を範囲とする地域である。居住者人口は8千万人程度と中国全人口の6%を占め、GDPは中国全体の21%を占める巨大な経済圏である。また、この経済圏は東シナ海に面しているため、経済圏から発生する汚濁負荷は長江を介すか、あるいは直接的に東シナ海への負荷となり得る。しかし、これまで長江デルタ経済圏からの汚濁負荷動態とその構造に関する知見は非常に乏しいのが現実であった。また、これらの地域は勾配に極めて乏しく、物理的な取り扱いが必要とされる流域に関する流達モデルで取り扱うことが原理的に不可能な地域となっている。したがって、本検討では、長江デルタ経済圏から東シナ海に流入する汚濁負荷を推定するに当たって、長江上中流域から長江デルタ経済圏に流入する負荷構造と、長江デルタ経済圏での発生構造を区別して、それぞれの負荷発生量を推定することとした。前者はこれまでの同様な検討で有効と評価されたSWATモデルを用いた検討とし、後者は積み上げ式の発生負荷量を用いた評価とした。このような段階的な検討により、長江からの海域の負荷を評価することにより、東シナ海への汚濁負荷に対する長江デルタ経済圏の長江流域における相対的な位置づけを明らかにすることができ、陸域負荷削減シナリオ設計においても鍵となる地域と施策が見えてくるものと考えられる。

2. 研究開発目的

これまで述べてきたように、東シナ海への陸域負荷は主として長江を介すると考えられ、GDP割合の大きな長江デルタ経済圏からの負荷は大きいものと予想される。しかしながら前述したように長江デルタ地帯は勾配が極めて小さく、東シナ海への汚濁負荷を流達モデルで表現することは困難である。そこで、まず東シナ海へ流入する長江デルタ経済圏起源の汚濁負荷の規模を推定するため、長江流域全体および長江デルタ経済圏からの汚濁発生負荷量を積み上げ方式により算定した。次に長江デルタ経済圏へ流入する負荷量を推計する流達モデルを開発した。ここでは、気象・地形・土地被覆の条件が互いに影響し合う複雑な過程、相互関係を調査・解析することにより、長江流域全体を一つのシステムとみなし、その中での水・汚濁物質の動態を日・月および年単位という異なった時間スケールで把握し、長江上流域から長江デルタ経済圏へ流入する汚濁物質負荷量の再現計算を目的とした。そのため、地形や土壌、そして土地利用等の空間的な不均一性を反映しつつも降水や汚濁物質の流出過程を組み込んだ流域圏統合評価ツールとして開発されたSWATモデル^{3),4)}の適用を試みた。

また、長江デルタ経済圏には太湖流域が内包されており、汚濁負荷量に係る将来シナリオは太湖水質保全計画の影響を強く受け、さらに発生負荷の一部は太湖に流入することになるため、その「大きさ」を知るために太湖流域についても同様の検討を行い、シナリオ検討のために太湖流域水質保全計画から汚濁負荷削減対策項目を整理した。

3. 研究開発方法

(1) 長江デルタ経済圏での汚濁負荷排出構造について

平成20年度版流域別下水道整備総合計画調査指針と解説⁵⁾に示された流域における汚濁負荷発生量推計手法を用いて、原単位法による長江流域全体および太湖流域における汚濁物質発生負荷量の算定を行った。原単位法は発生負荷量を生活系排水、事業場系排水や農地等の発生源（フレ

ーム)に対して、それぞれに対応した汚濁負荷原単位と対象とする地域における人口、工業生産量や作付面積といった活動量の積から負荷量を求めるもので、その流域圏が持つ汚濁物質発生量の潜在的ポテンシャルが推計される。

ここで対象とした汚濁物質はCOD、全窒素(T-N)およびT-Pであり、フレームの項目は生活排水、産業排水、畜産、養殖および農地等の面源とした。なお、CODは重クロム酸法によるCODであることに留意が必要である。推計年は、昨年度長江デルタ経済圏で同様な試算を行った2008年として、それぞれのフレームに対する原単位については、中国で発表されている文献値を基本的に用いた。また、活動量は中国国内で公開されている統計データを用いた。なお、流域別下水道整備総合計画調査指針では汚濁負荷量を支流(小流域)ごとの積み上げで求めるが、本検討では入手可能な統計データの限界から、検討したそれぞれの流域に一括した領域を設定した。

(2) 長江流域を対象としたSWATモデルの適用性の検討

1980年代から米国農務省で開発が進められてきたSWAT(Soil and Water Assessment Tool)モデルを改良したモデルを長江の支流である金沙江、漢江、贛江、嘉陵江などの流域に適用し、検証を行った。必要なデータセットはArcSWATを用いて構築した。地形データはアメリカ航空宇宙局から公開されている90mメッシュ(標高)データを用いた。土地利用データは中国科学院地理科学・資源研究所と共同でMODIS衛星データを用いて中国の土地利用メッシュデータを作成した。土壌分布データは中国科学院南京地理・湖沼研究所より100万分の一の土壌分布データを入手し、これを再投影したものをを用いた。気象・水文データは中国水利部長江水利委員会及び中国科学院との共同研究で日降水量、気温、相対湿度、日照時間等の各項目についてデータを入手した。

ここで用いたSWATはモデルには流域全体の様々な土地利用や土壌類型からの水・物質循環フラックスを評価するための一連のプロセスが組み込まれている。このモデルは、多様な土壌、土地利用、および土地管理方法が複雑に存在する集水域において、水理量、汚濁物質、そして農業に関わる様々な化学物質の循環に土地利用・管理事業が与える影響を予測するために開発されたものである。このような目的を達成するために、SWATは物理型モデルを採用しており、水文、気象、土壌、植生被覆に関する情報を用いて、流域全体の全メッシュに対して水・物質循環フラックスを評価できる。

(3) 太湖水質保全計画における都市を起源とする発生源に対する対策

公表されている太湖水污染防治第9次5ヶ年計画、10次5ヶ年計画、太湖流域水環境総合治理総体方案および事業実施主体である無錫市の事業計画を基に、これらに示されている都市起源発生源に対する対策を比較検討し、具体的な項目を抽出・整理した。さらに、これまでの事業実施状況を加味して、今後の陸域負荷を取り扱う上での課題を抽出した。

4. 結果及び考察

(1) 長江流域からの汚濁発生負荷量に対する長江デルタ経済圏からの寄与割合

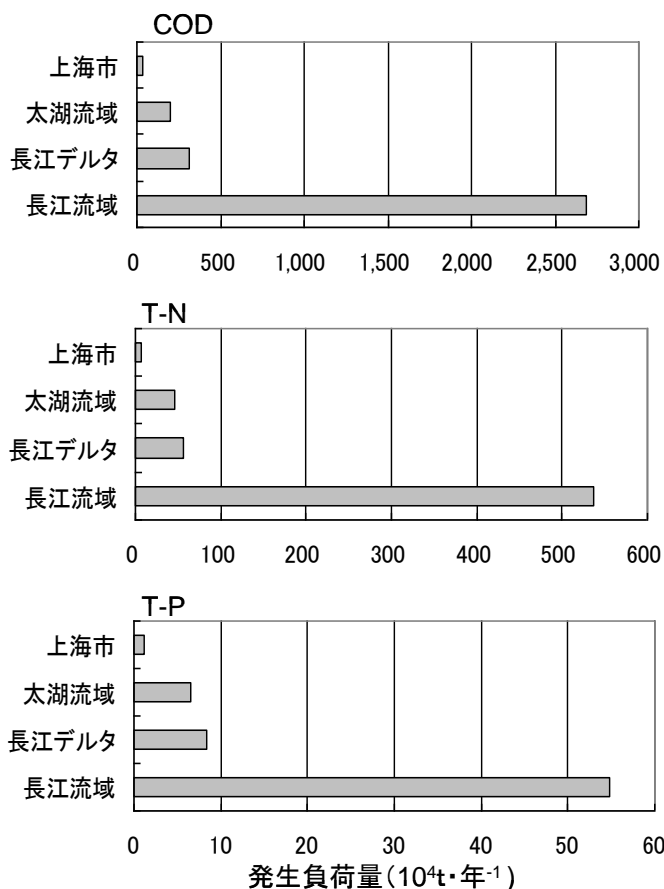
図(3)-1)-3に昨年度の検討結果を含めて、2008年における長江流域、長江デルタ経済圏および太湖流域からのCOD、T-N、T-Pの発生負荷量を示す。2008年における長江デルタ経済圏からのCOD、T-N、T-Pの年間発生負荷量は、COD 312万トン、T-N 55.5万トン、T-P 8.4万トンと推計された。ま

た、長江流域では同様にCOD 2,690万トン、T-N 538万トン、T-P 54.8万トンと推計され、長江デルタ経済圏からの汚濁発生負荷量の長江流域全体に対する割合は、COD 11.6%、T-N 10.3%、T-P 15.3%となった。ここで、長江流域面積全体に占める長江デルタ経済圏の割合は4.3%であり、長江デルタ経済圏における、単位面積あたりの汚濁発生負荷密度は流域全体と比べて2倍程度となった。

一方、長江デルタ経済圏のほぼ中央に位置する太湖流域におけるCOD、T-N、T-Pの年間発生負荷量は、COD 204万トン、T-N 45.6万トン、T-P 6.5万トンと推計され、長江デルタ経済圏からの発生負荷量に対する割合はCOD 65.4%、T-N 82.2%、T-P 77.4%となった。従って、長江デルタ経済圏で発生するT-N、T-Pの約80%は太湖流域からの発生量に由来していることが明らかになった。

ここで、長江流域および長江デルタ経済圏の汚濁発生負荷量のうち、T-NおよびT-Pに対する発生源の割合を検討した。

発生源の区分は上述したように生活排水、工業排水、畜産、水産養殖および農地とした。T-Nの発生源割合は長江流域で、生活排水、工業排水、畜産、水産養殖および農地のそれぞれで、22.8、8.4、15.2、1.0および52.6%となり、同様に長江デルタ経済圏では、37.2、8.0、17.4、2.8および34.4%となった。長江流域に比べ長江デルタ経済圏では、生活排水の割合が大きく、農地の割合が少なくなり、経済発展による都市化の影響が見て取れるが、工業の割合に大きな差は見られなかった。一方、T-Pの発生割合は長江流域で同様に、41.1、8.2、37.0、1.5および12.1%、長江デルタ経済圏で45.5、5.3、39.6、2.8および6.7%となり、T-Nの場合と同様な傾向を示したが、同様に工業の割合は小さくなった。しかしながら、いずれも生活排水の割合は高く、生活排水対策等が重要な位置づけと考えられた。また、T-Nでは農地対策、T-Pでは畜産対策が対策シナリオとして重要と考えられた。



図(3)-1-3 長江流域・長江デルタ経済圏・太湖流域および上海地域からの汚濁発生負荷量の比較 (2008年)

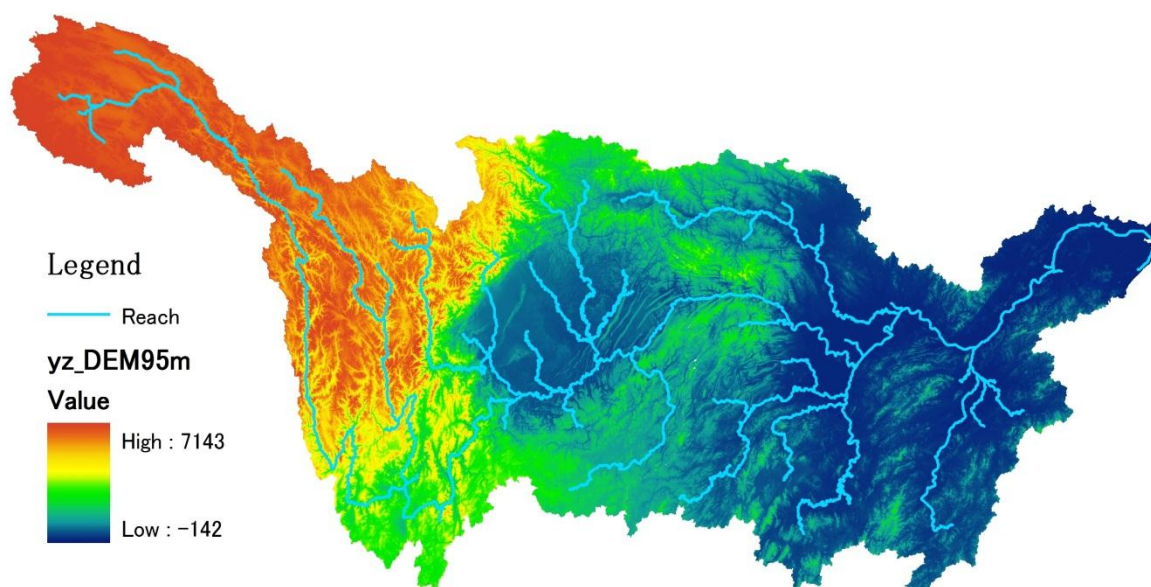
(2) 長江上・中流域を対象としたSWATモデルの適用

1) データベースの構築

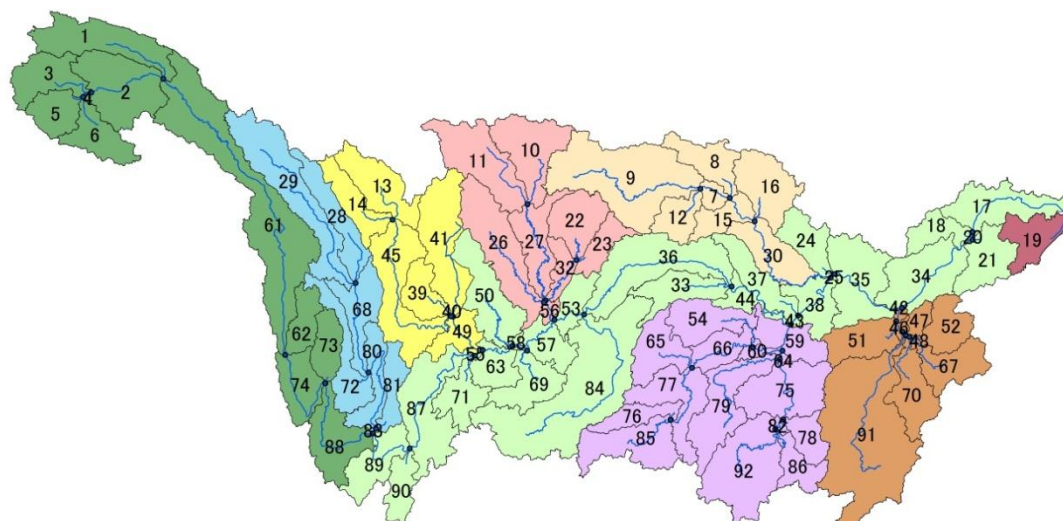
SWATモデルの入力データとして、地形、土地利用、土壌類型と特性などの地理情報データベースが必要となる。また、入力気象データとして、日単位の最大・最小および平均気温、さらに日単位の湿度、降水量、風速、および日射量のデータが必要となる。さらに、モデル再現性の検証

データとして、長江本川及び主要支川の日平均の河川流量や水質観測データも必要となる。これらのデータに関して、下記のように収集・推定した。

①地形・水系データ：アメリカ航空宇宙局から公開された95mメッシュ（標高）データ（図(3)-1)-4)を用いてArcSWATのツールで流域水系図を作成し、合計で91のサブ流域を区分した（図(3)-1)-5)。これらのデータは緯度経度上に記述されているため、SWATで利用するためには直交座標系に投影変換する作業が必要になる。投影変換作業はESRI社製のArcMap9.3.2を用いて行った。



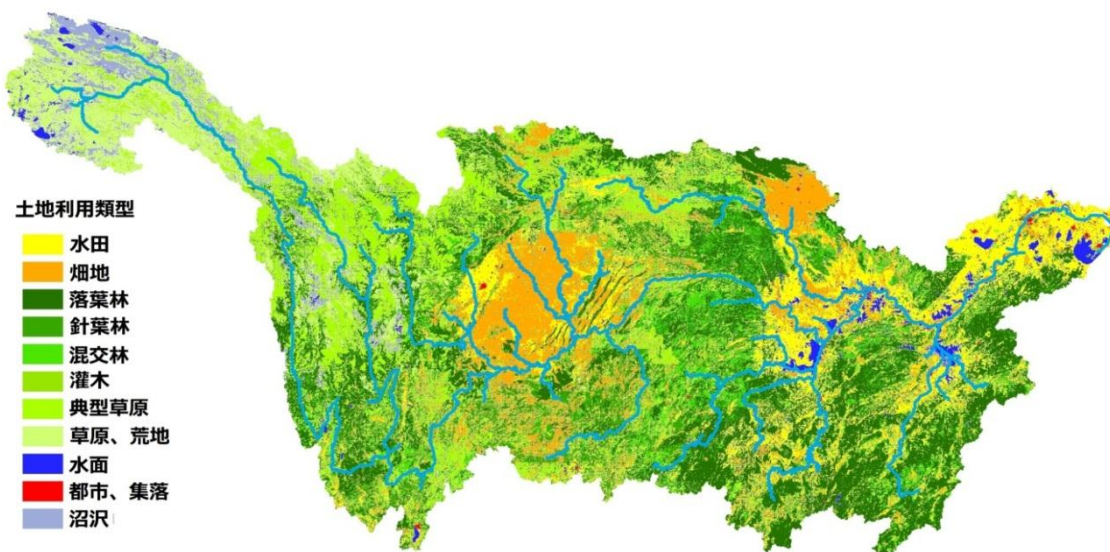
図(3)-1)-4 長江流域のデジタル地形図（NASAの95mメッシュ（標高）データより作成）



図(3)-1)-5 長江流域の地形図に基づいて作成した流域水系図

②土地利用データ：中国科学院地理科学・資源研究所と共同で衛星データを用いて、2005年次の1kmメッシュの土地利用データを作成した。このデータはSWATモデルで利用可能な直交座標系に投影変換を行い、さらに、ArcSWAT自身のデータベースにある土地利用コード、例えば水田であ

ればRICE、水域であればWATR、草原であればPASTといったコードが入力された土地利用GISデータに再変換した（図(3)-1)-6）。



図(3)-1)-6 入力データとして用いた長江流域の土地利用図（2000年）

③土壤分布データ：中国科学院南京地理・湖沼研究所より百万分の一の土壤分布データを入手し、これを再投影したものをを用いた。土壤分布データは土壤の類型を入力されていたポリゴンデータである。SWATでは、土壤の透水係数などの物理特性(空隙率、透水係数、含水率、組成等)を設定する必要がある。しかし、SWAT に組み込まれた米国の土壤のデータベースを確認できるが、中国では利用できないため、新規に土壤名を追加して行く必要がある。本研究では、中国土種誌に書かれた各類型の土壤物性値（鉛直3層）を参考にし、ArcSWATの編集機能を用いて入力した。入力の項目は、SOILTYPES:土壤名、NLAYERS:土壤層、HYDGRP:土壤の透水性、SOL_ZMX:土壤の最大深さ、ANION_EXCL:土壤中のアニオン排除能、SOL_CRK:土壤の空隙率、TEXTURE:土層の土性、SOL_Z:n層目の土壤厚さ、SOL_BD:n層目の土壤の容積湿潤密度、SOL_AWC:n層目の充填可能水量、SOL_CBN:n層目の有機炭素量重量比、SOL_K:n層目の飽和透水係数、CLAY:n層目の土壤の粘土率、SILT:n層目の土壤のシルト率、SAND:n層目の土壤の砂率、ROCK:n層目の土壤の岩石率、SOL_ALB:湿潤アルベド、USLE_K:USLE (Universal Soil Loss Equation)のKファクター、SOL_EC:電気伝導度などである。

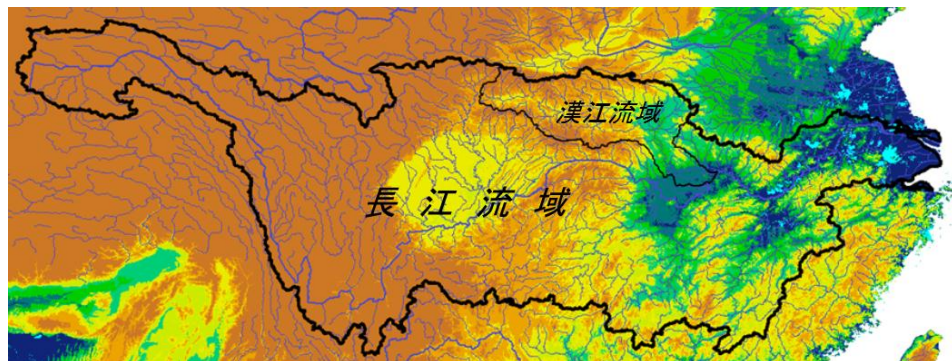
④気象・水文データ：中国水利部長江水利委員会及び中国科学院との共同研究により長江流域における日降水量、気温、相対湿度、日照時間等の気象データや主要な水文観測点での水文・水質測定データを入手した。これらのデータはSWATモデルの入力データと検証データとして利用した。SWATモデルでは日射量を用いるが、気象観測所では日照時間しか得られていない。このため、FAOが推奨した推定法⁹⁾を用いて日照時間から全天日射の日平均値を推定した。

⑤汚濁物質の排出量を推定するのに必要なデータ：長江流域の県レベルの工業や生活排水量、各作物の栽培面積及び生産量、化学肥料使用量などの統計データを入手した。これらのデータ及び

現地調査による人間生活に関するパラメータを利用し、長江流域の年間窒素排出量を推定した。その結果、長江全流域の反応性窒素の総量は2000年には14.25Tg-Nに至り、1990年から約2倍、1980年からは3倍以上に増加した。そのうち、窒素肥料の使用量は急激に増加し、2000年には反応性窒素総量の86%を占め、最も大きな窒素源であった。また、窒素の利用効率（作物による収穫窒素固定量）は1980年には31%、1990年には30%、2000年には23%と年々低下していることが分かった。さらに、1980年の窒素排出源が主に下流域に集中していたのに対し、1990年代には中流域まで、2000年には上、中、下流を中心として、周辺に広く拡大した^{7,8)}。これらの推定結果を年間の日数で割り、日変化モデルの入力データとして利用した。

2) 観測データによるモデルの精度検証

長江の最大支流である漢江流域（図(3)-1-7）の上流から下流までの5地点の流量と水質観測データを用いてモデルのキャリブレーションを行い、最も適切なパラメータを抽出した。検証されたモデルを用いて、数値シミュレーションによって漢江流域において退耕還林の効果を評価した⁹⁾。



図(3)-1-7長江の最大支流である漢江流域の位置分布図

漢江流域でのパラメータリゼーションで得られたパラメータ値を長江全流域へ適用し、モデルの適合性の検証を行った。降水流出過程の再現性では感潮部直上の大通観測点（河口部より約550km）における日平均流量の計算値と観測値を比較し、両者間に相関係数 R^2 で0.94という高い一致をみた。これにより、本川での年間を通じたダイナミックな流量の変動や雨期である夏期の変動まで十分再現されていることが確認された。また、長江本川の観測点である上流域の下流端である宜昌（河口部より約1600km）と中流部の武漢（同約1200km）及び下流域の大通など三地点での月平均流量の計算値と観測値の相関係数 R^2 はそれぞれ0.84、0.81と0.89であり、再現性はいずれも高い水準にあることを示している。

流域全体を対象に行った栄養塩流出量の再現性を検証するため、中国科学院と共同で長江本川の宜昌と武漢での2009と2010の二年間（ $n=36$ ）に渡って、月一回の頻度でT-NとT-P濃度を測定し、その測定濃度と月平均流量とかけ算で月平均の負荷量を求めた¹⁰⁾。T-NとT-Pの月平均の測定負荷量と計算負荷量との比較結果によると、T-Nの再現性は、宜昌 $R^2=0.84$ 、武漢 $R^2=0.81$ で高いが、T-Pの再現性は、宜昌 $R^2=0.75$ 、武漢 $R^2=0.74$ で低く、しかも宜昌の場合、計算値は実測値よりかなり低い結果となった。

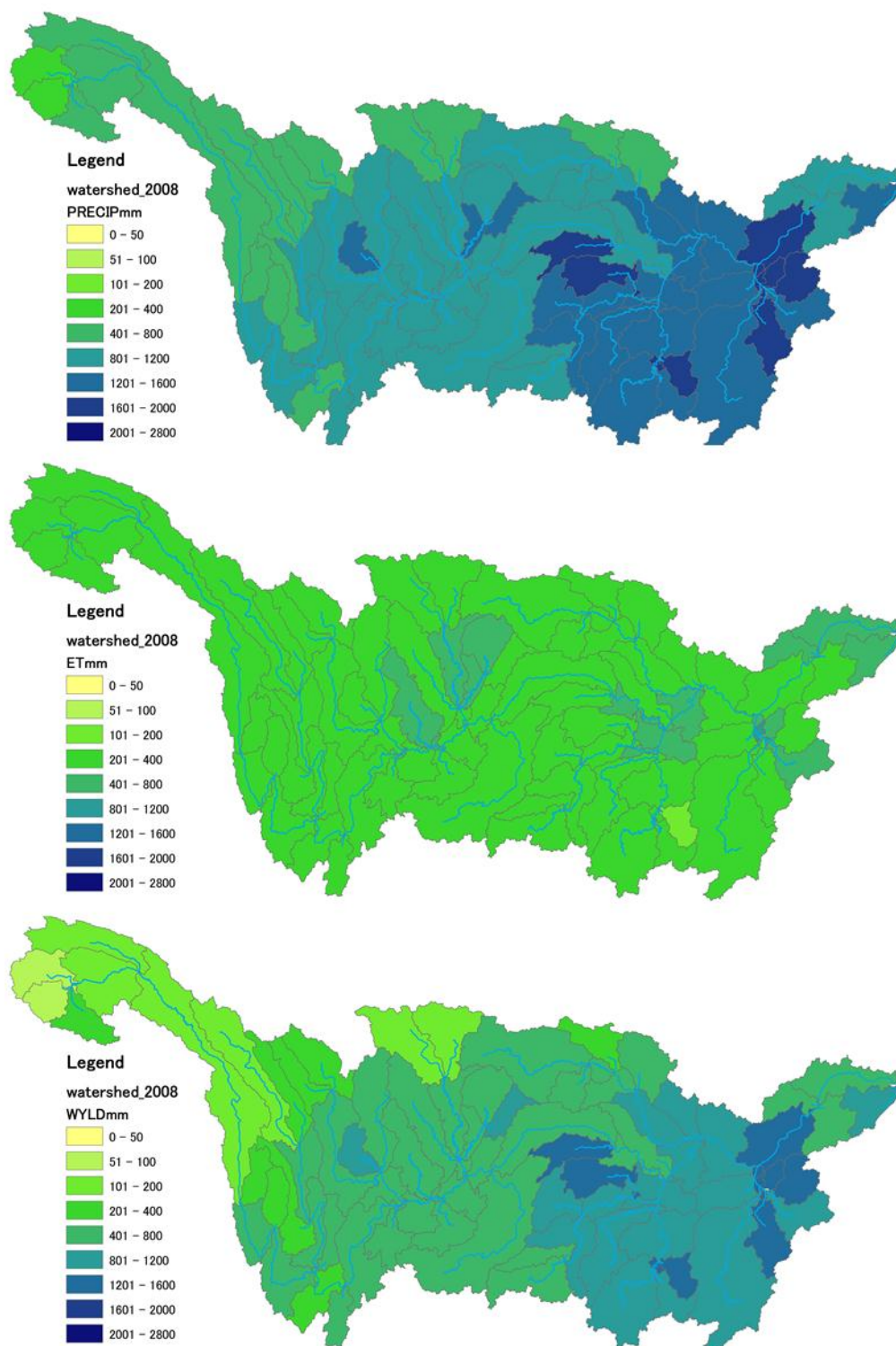
3) 長江全流域への適用と展開

全流域において水量・水質の動態（1991-2010）の日変化をシミュレーションし、年平均値を求めた結果によると、長江全流域平均の年平均降水量（PREC）は1024.0mmであり、全流域平均の年平均蒸発散量（ET）は415.8 mm、年平均地表流出量（SURQ）は293.4mm、年平均地下流出量は232.4 mm、最終的に地表と地下合わせた年平均流出量（WATER YIELD）は571.6mmとなった。一方、全流域の平均流出土砂量（SED YIELD）は2.28トン/haであった。また、長江全流域における窒素負荷発生量の年間平均値は、有機態窒素（ORGANIC N）は6.75kg・ha⁻¹であり、無機態窒素である硝酸態窒素の表面流出発生量（NO₃ YIELD SQ）、地中（NO₃ YIELD SSQ）及び地下（NO₃ YIELD GWQ）は、それぞれ2.55kg・ha⁻¹、0.48kg・ha⁻¹、9.19kg・ha⁻¹となっていた。

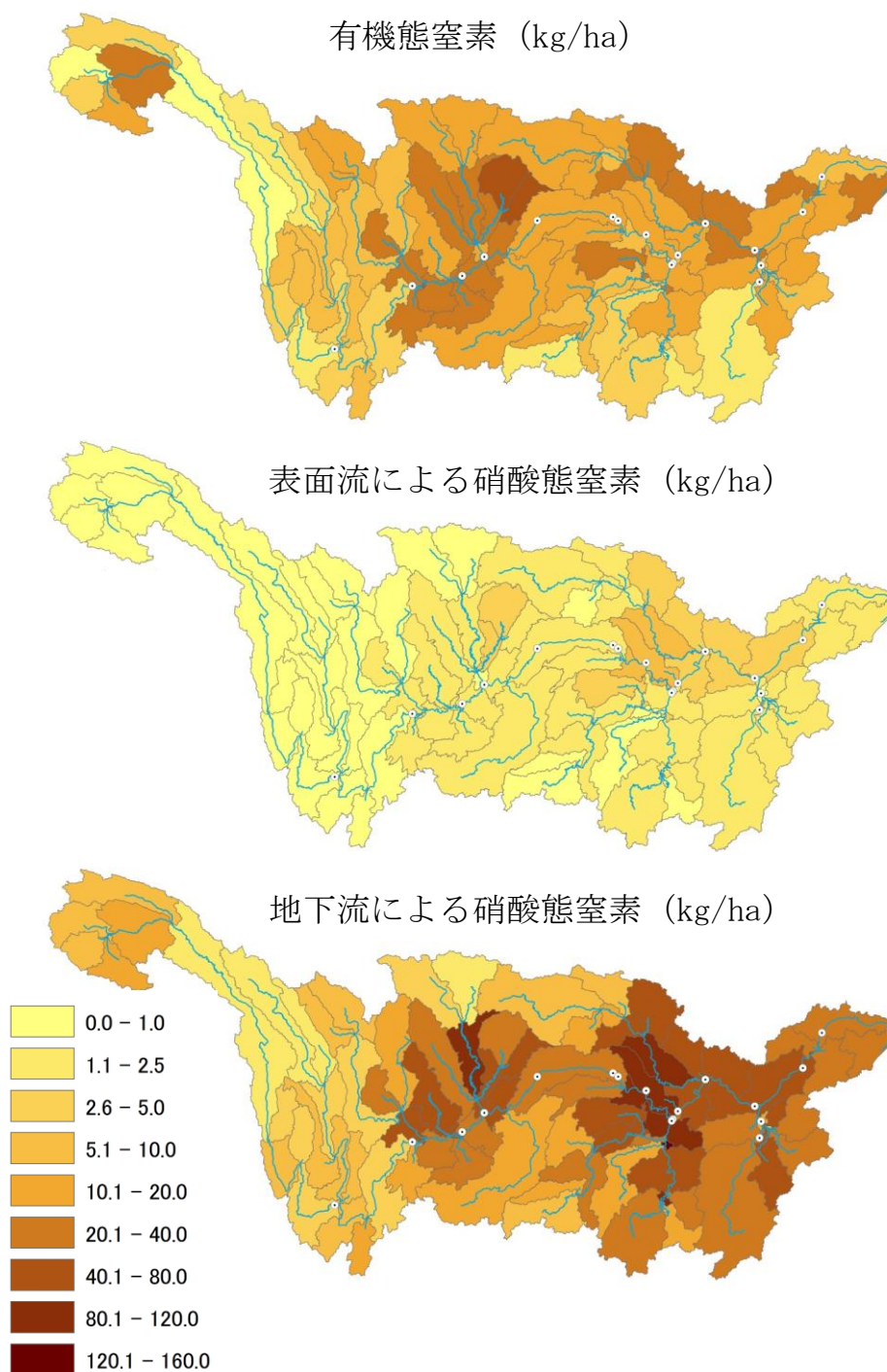
本研究で構築されたモデルを用いた最終的な計算結果について、図(3-1)-8に2008年における降水量（PRECIP）、蒸発散量（ET）と流出量（WYLD）分布状況の結果を、図(3-1)-9に各支流域での窒素負荷流出量の再現結果を示した。それによると、有機窒素について、上流域下流段の丘陵地区では年間発生量が大きく、その次に、中流域の漢江流域でも発生量が大きい。降水量の多い東南地域では、逆に有機窒素の流出発生量が小さい。硝酸態窒素の流出は主に四川盆地や中、下流平野で発生しており、それは広範囲に分布している農地による面源負荷と強く関係していることが言える。また、地表流による負荷量よりも地下流による負荷量が大きいという計算結果となった。また、2001-2010年の平均値を見ると、長江デルタ経済圏へ流入する長江の年平均流出量（FLOW）は9391億トンで、それによって運ばれた有機窒素は17.5万トン、NO₃-Nは180.9万トン、NH₄-Nは16.7万トン、有機りんは0.4万トン、無機態りんは5.2万トンである（表(3-1)-1）。既往の研究成果と比べると、この10年間のNO₃-Nは1980年代の約3倍に、亜硝酸態窒素（NO₂-N）は約2倍に、そして、NH₄-Nは約1.3に増大したことが分かった。

表(3-1)-1 河口域での水量と汚濁物質の年間総流出量の計算結果

年次	流出量	有機窒素	有機りん	NO ₃ -N	NH ₄ -N	NO ₂ -N
	億トン	万トン				
2001	8136	15.2	0.3	172.5	15.6	5.0
2002	11107	23.1	0.6	209.2	21.0	6.6
2003	10133	17.6	0.4	181.7	16.6	5.2
2004	8836	11.8	0.3	161.6	12.0	4.0
2005	9814	20.2	0.5	198.0	18.4	5.7
2006	7764	16.5	0.3	152.3	15.2	4.7
2007	8669	12.7	0.3	166.3	13.1	4.4
2008	9265	15.5	0.4	169.6	15.4	4.8
2009	8590	12.4	0.3	169.5	13.2	4.4
2010	11643	30.5	0.5	228.6	26.6	8.5
平均	9391	17.5	0.4	180.9	16.7	5.3



図(3)-1)-8 長江の各支流域における降水量 (PRECIP)、蒸発散量 (ET) と流出量 (WYLD) 分布状況の再現結果 (2008年)



図(3)-1)-9 各支流域における窒素負荷流出量の再現結果(2008年)

(3) 太湖水質保全計画における都市を起源とする発生源に対する対策

上述したように長江デルタ経済圏で発生するT-NおよびT-Pの80%程度は太湖流域から発生している。従って、将来の発生負荷シナリオを検討する上で、太湖流域の水質保全計画を整理する必要がある。太湖では1996年に最初となる5ヶ年の水質保全計画（太湖九五計画）が開始され、2001

年から第2期計画（太湖十五計画）が開始された。2006年には第3期となる太湖水污染防治第11次5ヶ年計画（太湖十一五計画）が開始されたが、この計画が一般に公示される2007年5月から6月にかけて、アオコの大発生による大規模な水道供給障害が無錫市を中心に起きた。その結果、この5ヶ年計画は廃棄され、現在は2008年を開始年度とした太湖流域水環境総合治理総体方案（太湖総体方案）が2012年までの予定で実施されている。

1) 太湖という湖

太湖は上海市から西方に100km程度に位置し、平坦地に出来た浅く広大な水たまりを想像させ、成因は違うが日本の霞ヶ浦に類似している。湖の本体は江蘇省と浙江省の省境に位置し、集水域は江蘇省、浙江省、安徽省及び上海市に跨っている。

水面面積は2,338km²で霞ヶ浦の約10倍の広さであるが、流域面積は約30倍の36,900km²と広大である。平均水深は1.9mと非常に浅いのが特徴である。また、流域には0.5km²以上の湖沼が189カ所存在する水郷地帯でもある。2009年末における総貯水量は50.5億m³であった。また、年平均降水量は1200mm程度である。

一方、社会状況では、2009年の流域総人口は5,176万人と全国の人口の3.8%を占めているが、GDPの流域総額は36,364億元と全国の11%を占めている。1人あたりでは7.0万元と、全国平均の約3倍となり、太湖流域が経済活動の活発な地域であることが分かる。

太湖総体方案によると2005年の流域総人口、GDPの流域総額および1人あたりのGDPは、それぞれ4,533万人、21,221億元および4.7万元であり、この4年間での増加率（2009年／2004年）はそれぞれ、1.14、1.71および1.49となり、急ピッチでの経済成長が窺える。

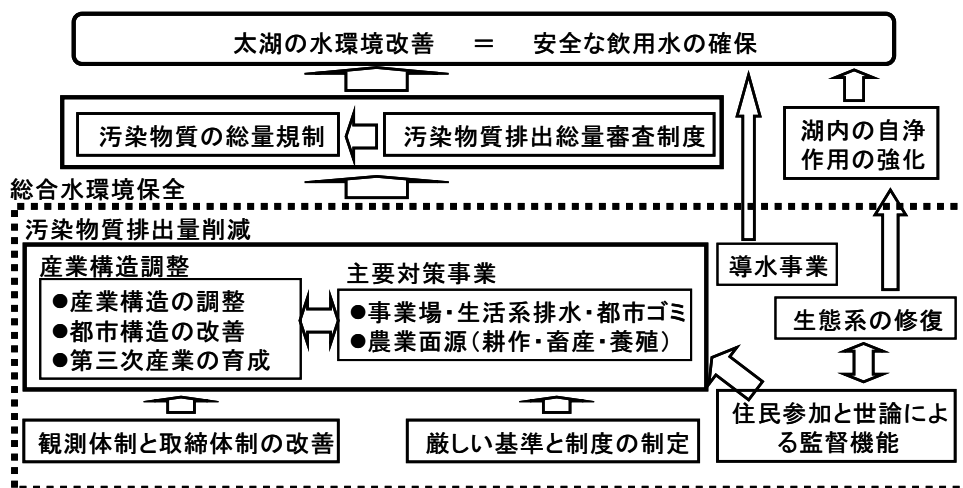
ここで、太湖の発生源対策を行うべき行政的な流域範囲は「太湖流域水環境総合治理区（総合治理区）」と定義され、これらの範囲は対策実施を目標とした行政界から決められているが、地理学的な集水域から上海の主要部分を外した範囲である。この総合治理区は、対策対象区域の中で汚染源が相対的に集中し、水環境への影響が大きな地域である「太湖流域水環境重点治理区（重点治理区）」およびその他の治理区から構成されている。

2) 現行保全計画（太湖総体方案）の構造

太湖総体方案に示された保全計画の構造を図(3)-1)-9に示す。図に示したように排出削減に関する主要な対策事業の項目は太湖九五・十五計画から大きな変化が無く、太湖総体方案においても継続される。しかしながら、その対策事業の効果をより高めるために、産業構造調整の必要性が示されている。太湖九五・十五計画の基本的な考え方では、実施すべき対策事業が中心に示されていたが、10ヶ年の事業実施経験を経て、「点源汚染、面源汚染及び生態系修復による自浄能力の強化」という基本的な考え方に変化は無いが、総体方案では事業の実効性を担保する「管理・監督責任」、「検証」についての考え方が中心に示されている。特に重要な点は、①総量規制を徹底するための「濃度審査」、②事業実施に対して上位から下位の行政単位（省・市・県）それぞれの責任を明確化し、審査及び問責制度に言及している事、③排出権取引などの市場原理及び公衆参加を促し、世論による監督機能を活用することが明示された事である。

3) 太湖総体方案における都市起源の点源対策

ここで、都市を起源とする点発生源としては工業排水による工業系および、生活排水や生活ゴミによる生活系が考えられる。太湖総体方案における工業系、生活系発生源に対する対策の基本は、これらの発生源を集中させ、効率的な処理を行うにあるが、以下に太湖総体方案に示されている具体的な項目を示す。



図(3)-1)-10 太湖総体方案に示された太湖水質保全計画の構造

①工業系

- ✓ 排出基準の遵守を厳格にし、未達成事業所の操業停止、小規模な特定の事業場（製紙、デンプン製造、アルコール製造など）の廃止
- ✓ 重点監視事業所に対するオンライン測定装置の設置および汚染排出許可制度実施状況の監督と審査の強化
- ✓ 湖内における動力船の非汚染化および重点船舶（危険品運搬船・客船・観光船）の動態監視
- ✓ 排出基準の強化

②生活系

- ✓ 2012年の都市下水道普及率目標 80%、市の下の行政単位である鎮の普及率 60%および既存の下水処理場に高度処理の義務付けと太湖への直接放流の禁止
- ✓ 処理場建設に対応した分流式下水管路整備の推進
- ✓ 有りん洗剤の禁止
- ✓ 都市下水処理場における汚泥無害化処理の推進
- ✓ 2012年の都市ゴミ処理率目標 75%
- ✓ ゴミ埋立場の管理強化と侵出水浸透防止策の推進
- ✓ 都市生活における節水の推進

太湖九五計画の主体は工業排水対策であり、改革開放を担った中小規模の郷鎮重化学工業工場

の閉鎖を含めて整理・統合し、厳しい排水規制に耐える産業構造調整を行った。太湖十五計画では生活排水対策として都市下水整備に外資を含めた集中的な投資を行い、総体方案では、これらを受けて、排水規制の強化と監督に重点を置きつつある。

これらの施策群は十分に実行可能な内容ではあり、負荷削減に向けた有効な内容と考えられるが、規制側と規制を受ける企業側の主従関係が強調されており、実効性の担保には両者の協調あるいは協働関係の構築が必要となる。一方、生活排水対策では下水道整備が主体となるが、並行して既存処理場の高度処理化も必要となる。ここで、工業排水と違い生活排水対策は公共セクターの責任となるため、事業実施において、資金調達が大きな課題となる。これまでは規模の大きな下水道整備が中心であり、公共が民間事業者に収益事業として運転業務の権利を譲渡する代替として施設の建設を行わせて、一定期間後に施設及び運転業務を公共へ返還するBOT方式等による資金調達が可能であったが、今後は小規模な下水道整備の必要性が高まることから、代替方策の検討が必要となり、並行して公共主体としての技術的ガイドラインの策定も必要となる。また、運転管理に関しても早急なガイドライン化を図る必要がある。このように太湖流域の負荷削減に係る施策群を整理した結果、負荷を削減させる直接的な対策内容については、これまでの経験の積み重ねによる収斂が見られるが、実効性を支えるソフト面での対応が充分では無く、この側面から我が国の経験を投入する有効性が示唆された。

4) 今後の陸域負荷削減動向

中国では、国の主要政策を「国家経済五ヶ年計画」を基本として推進している。したがって中国陸域からの将来的な負荷量を検討する上で、この5ヶ年計画の動向を知ることは非常に重要である。事実、2001年から開始された第10次5ヶ年計画（国家十五計画）では、水質汚濁防止に関連して化学的酸素要求量（COD）を国家十五計画終了時の2005年には2000年比で10%削減する目標を掲げたが、僅か2.1%の削減に止まった。このような状況に危機感を募らせた中国政府は2006年から開始した第11次5ヶ年計画（国家十一五計画）では再度、2005年比で10%削減することを、「拘束性」目標として掲げた。ここで拘束性とは国家十一五計画ではじめて示された概念であり、地方政府に割り当てられた削減目標達成について幹部人事あるいは地域開発への制限などで削減に責任を取らせるものである。その結果、国家十一五計画が終了した2010年末では、2005年比の削減率は12.45%となり、削減目標は達成された。この目標達成の影響は中国の主要河川の水質状況の経年変化に見て取れる。

中国水域の水質状況は、利水目的別にⅠ～Ⅴ類の五段階に分類された水質基準類型で公表される場合が多い。例えば、利水目的が水道利用であれば、Ⅲ類以上が必要となり、最も低いⅤ類の利水目的は農業用水及び不快でない景観の確保となる。また、Ⅴ類を超過する劣Ⅴ類は利水が困難と考えられている。2001年の水質状況はⅠ～Ⅲ類が29.5%、Ⅳ～Ⅴ類が26.5%および劣Ⅴ類が44%であった。国家十五計画の終了年である2005年の状況は同様に、41%、32%および27%、国家十一五計画の終了年である2010年ではⅠ～Ⅲ類が59.9%、Ⅳ～Ⅴ類が23.7%およびⅤ類以下（劣Ⅴ類）が16.4%となり、国家十五計画に比べて顕著な改善傾向が見られる。特に、水道利用を目的とするⅠ～Ⅲ類については、国家十五計画期間に比べて国家十一五計画期間における改善傾向が大きなものとなった。

このように、中国における排出源対策による陸域負荷の削減は国家十一五計画で採用された拘束性指標の考え方に大きく影響され、現行の第12次5ヶ年計画（国家十二五計画）においても水質に関連して、CODおよびNH₄-Nに対してそれぞれ8%と10%の目標が科せられている。したがって、今後の汚濁負荷発生量の推測を行う上では、国家の最上位目標である国家経済5ヶ年計画の動向を検討することが必須である。このような中国に特異な状況を鑑み、今後の動向、特に次期の5ヶ年計画である第13次5ヶ年計画（国家十三五計画）について環境政策の策定に大きな影響を持つ清華大学環境学院環境管理・政策研究所で聞き取り調査を行い、以下の知見を得た。

- ・総量規制手法は水環境改善に有効であり、今後も同様に推進される。
- ・これまでの計画に沿って、目標とする環境質に対して合理的な削減率を策定する。
- ・目標とする環境質はこれまでの水質目標に加えて、住民が満足する環境質という視点から検討を進める必要がある。
- ・負荷削減の効果を明確に示す必要がある。
- ・基盤インフラ整備における都市と農村の格差を解消する必要があり、水環境の関連では下水道インフラの整備を都市から農村に向けて進捗させる。
- ・工業に係る排出負荷削減について、今次の国家十二五計画において工業団地や工業園といった集中を行い、効率化が推進される。

このように中国では国家十一五計画におけるCOD削減が成功裏に終了したことを受けて、今後の負荷削減についても強力な中央主導による地域への削減量割り当てを基本とした政策を主としていくと考えられる。ここで国家十二五計画では当初、これまで実施してきたCOD排出削減に加えて、T-NおよびT-Pの目標設定が検討されたが、最終的にはNH₄-Nの削減目標設定に止まった。詳細な理由は不明であるが、国家十三五計画では再度検討される可能性が高い。したがって、中国からの陸域負荷の将来予測では、このような政策誘導の側面を十分に検討する必要がある。

5) 点源としての畜産排水の重要性

4. (1) に上述したように、T-Pで考えれば主要な排出源は畜産である。上述した太湖総体方策では畜産排水に対する対策として、産業構造の転換による農業の大規模集約化が進められていると考えられる。つまり、旧来は分散的かつ小規模で面源の負荷発生源であった畜産を一定規模に集約することで、排水処理の効率化と管理性を高め、集約化の本来目的である生産効率向上と環境対策の強化を狙うものである。このような政策を受けて太湖流域では処理手法として、中小規模の集約された畜産場に対して高床式発酵床技術の導入が計画されている。この手法はおがくず等を敷き詰めた上で、豚などを飼育し、排出される糞尿をおがくず内に分散させ、おがくずに付着した微生物の発酵作用により分解処理するものである。処理の原理はコンポストを生産する場合と同一であり、おがくずはコンポストへ変換される。糞尿の大部分は生物分解され、一部がおがくず内に残留するが、定期的に一定割合を有機肥料（コンポスト）として取り出し、新たなおがくずが投入される。また、豚もこの発酵床を食べるため、飼料の減量に繋がる。しかしながら、おがくずの確保、大量に発生する有機肥料、発酵床の適正管理（主として水分およびNH₄-N濃度）など、管理としては従来の飼育手法と比べて煩雑になる傾向があり、不適正な管理下にお

いては大きな汚染源となる可能性がある。また、大規模に集約された畜産場においては、エネルギー創成の観点からメタン発酵処理が推奨されているが、発酵残渣の後処理も含めて処理技術に応じた運転管理レベルの確保が重要であり、不十分な場合は大きな排出負荷源となる可能性を有している。このように、技術的練度あるいは収斂度が高いと考えられる工業排水あるいは下水対策と技術的に発展途上である畜産排水対策などでは、将来的な排出量を推計する上で処理効率などの技術的な検討は必要であり、栄養塩については都市型の負荷よりも、むしろ農業（面源）負荷について具体的な事例検討を含めて推進する必要がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

東シナ海への陸域負荷についてはこれまで知見が少なく、東シナ海の低次生態系変遷を論じる上での隘路となっていた。今回は長江デルタ経済圏の上流部における長江の汚濁物質移送量を現地調査で補完した流出モデルにより検討し、長江デルタ経済圏からの汚濁発生負荷量のポテンシャルを原単位法で推定し、東シナ海への陸域負荷に対する経済圏の影響を明らかにした。さらに、長江デルタ経済圏からの栄養塩発生負荷量の80%程度を占め、湖沼保全計画の内容が公表されている太湖流域における対策事業について整理を行った点は、今後の対策シナリオ検討を含めて、当該分野研究における道筋を付けたものと考えられる。

(2) 環境政策への貢献

環境省水・大気局と中国環境保護部汚染物排出総量規制局は、共同でワーキンググループを持ち、総量規制制度について検討を行っており、本研究の研究分担者が参加してきた。また、国立環境研究所では、運営交付金による所内の重点研究プログラム等により、長江の管理を担当する中国長江水利委員会との日中技術交流シンポジウムを2006年度から行っている。この中で、2009年度からは本研究で得られた長江流域圏における陸域負荷とその構造についての知見も含めて情報交換を行い日中の環境政策へ貢献している。

6. 国際共同研究等の状況

本サブテーマはサブテーマ(2)およびサブテーマ(3)-2)の分担研究者、ならびに長江流域やデルタ経済圏の自然科学あるいは社会科学研究を推進している中国長江水利委員会、中国科学院、中国上海華東師範大学等と共同で、長江デルタおよび周辺地域の現地調査を実施した。本研究の主なカウンターパートは以下の通りである。

中国長江水利委員会・長江水資源保護研究所	雷阿林（所長）、葉閩（教授）
中国上海華東師範大学・生命科学学院	邹春静（助教授）
中国科学院・地理科学与資源研究所	宋献方（教授）

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

1) Wang QX, Xiao Q, Liu C, Wang K, Ye M, Lei A, Song X, Kohata K: Journal of the Science of Food and

Agriculture, doi: 10.1002/jsfa.4607 (2011)

“Effect of reforestation on nitrogen and phosphorus dynamics in the catchment ecosystems of subtropical China: the example of the Hanjiang River basin”

2) 王勤学: 水環境学会誌, 35(2), 59-64 (2012)

「長江流域圏からの降水・窒素負荷流出のシミュレーション」

<その他誌上発表（査読なし）>

1) 水落元之（共著）: 中国の水環境保全とガバナンス —太湖流域における制度構築に向けて—, 研究双書No.588, アジア経済研究所 35-79 (2010)

「太湖流域の水環境保全計画の展開と課題（第1章）」

2) 水落元之、久山哲雄、小柳秀明: 環境技術, 40, 746-750 (2011)

「中国の水環境および下水処理場の現況について」

（2）口頭発表（学会）

1) 水落元之: 2010年環境技術学会年会 (2010)

「中国太湖の水質保全計画の変遷と特徴に関する考察」

2) Wang QX: Hydrology Conference 2010 (2010)

“Development of a system for evaluation of water and material cycles in a catchment ecosystem in East Asia”

3) Wang QX: Global Water System Project (GWSP) GCI conference 2010 (2010)

“Development of an evaluation model for water and material cycles in catchments of East Asia”

4) Wang QX, Xiao Q, Liu C: The Second International Symposium on Sustainable Agriculture for Subtropical Regions (2010)

“Carbon and nitrogen dynamics in the subtropical agricultural ecosystem in China”

（3）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（4）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

（5）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（6）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

1) Liu C, Watanabe M, Wang QX: Nutr.Cycl.Agroecosyst, 80(1), 19-37 (2008)

“Changes in nitrogen budgets and nitrogen use efficiency in the agro-ecosystems of the Changjiang River basin between 1980 and 2000”

- 2) 孟伟, 刘志刚, 王丽平: 中国海洋学会赤潮研究与防治学术研讨会论文集. 北京: 海洋出版社, (2007)
「长江口及其邻近海域营养盐特征及其对初级生产力的影响」
- 3) Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR: J. American Water Resour. Assoc. 34(1), 73-89 (1998)
“Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model Development”
- 4) Arnold JG, Fohrer N: Hydrol. Process, 19(3), 563-572 (2005)
“SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling”
- 5) 流域別下水道整備総合計画制度設計会議編: (社)日本下水道協会 (2008)
「流域別下水道整備総合計画調査指針と解説」
- 6) Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M: FAO Irrigation and drainage paper 56, Rome (1998)
“Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements”
- 7) 劉晨、王勤学: 環境科学会誌, 23 (4), 259-267 (2010)
「中国農村地域における窒素フローの変動および水環境への影響評価」
- 8) (独)国立環境研究所: SR-85-2008, 96p (2008)
「アジア自然共生研究プログラム (中間報告) 平成18年～19年度」
- 9) Wang QX, Xiao QA, Liu C, Wang KL, Ye M, Lei AL, Song XF, Kohata K: J Sci Food Agr, 09/2011; DOI: 10.1002/jsfa.4607 (2011)
“Effect of reforestation on nitrogen and phosphorus dynamics in the catchment ecosystems of subtropical China: the example of the Hanjiang River basin”
- 10) 王勤学: 水環境学会誌, 35(2), 59-64 (2012)
「長江流域圏からの降水・窒素負荷流出のシミュレーション」

(3)-2) 長江デルタの生活様式変化に伴う陸域負荷構造の変化に関する研究

名古屋大学 環境学研究科 劉 晨

平成21～23年度累計予算額：5,990千円（うち、平成23年度予算額 2,995千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】 近年、長江デルタ地域では急速な都市化と経済発展が進行しており、それにとまなう産業構造やライフスタイルの急速な変化は地域の炭素・窒素などの物質循環のバランスを崩し、環境資源へ大きな影響を与える可能性がある。本研究は都市化に伴う人間活動およびその変化がどれくらい地域の窒素循環や水環境に影響を及ぼしているかを定量的に解明することを目的とした。そのため、まず、中国長江デルタ地域の都市部と農村部における1,650人を対象に、日常生活アンケート調査を実施し、食物から摂取する窒素の量、排泄物に含まれる窒素の排出ルートおよび生活排水の排出ルートを明らかにした。そして、メガシティである上海市を一例として取り上げ、窒素バランスモデルや産業連関分析、統計解析などの学際的アプローチによって、農業活動、工業部門、家計消費から水域へ流出する窒素負荷量の時系列変化を推定した。その結果、(1)農地や農作の減少（域外へのシフト）によって化学肥料由来の河川への窒素負荷が減少していること；(2)自動車の増加により、大気からの窒素沈降量が増加し、地域窒素負荷源が化学肥料から大気沈降へシフトしたこと；(3) 製造業からサービスへの産業の構造的変化、工場排水処理技術の改良および工場の外部への移転により、第二産業からの廃水による窒素負荷は2000年以降劇的に減少したこと；(4) 農地からの窒素流出量が減少した反面、地表面や河道がコンクリートなど人工被覆で不透透化したことによって都市域から水域への窒素流出量が増加したこと；(5)1980年には上海で生産した肉類や魚は同地域の消費量より多く、一部は域外へ移輸出していたが、2008年になると域外から移輸入することになったことが明らかとなった。また、上海という大都市だけを観察した場合には河川への潜在窒素負荷量は2000年以降減少傾向にあり、水質汚染問題は改善されているように見えるが、周辺地域を含む広範囲で考えると問題はむしろ拡大していると言え、新たな環境対策の提案が急務である。

【キーワード】 窒素フロー、現地調査、人為活動、都市化、水環境問題

1. はじめに

SCOPE (the Scientific Committee on Problems of the Environment) が21世紀における主要な環境問題として認めたように、窒素は人間活動が環境に与える影響力の重要な指標である。中国では、化学肥料使用量の急増により、中国長江流域の農業生態系から河川に輸送された潜在窒素負荷量が2000年には450万tに達し、1980年の2.3倍に増加した¹⁾。また、長江下流にある大通水文観測ステーションの経年観測によると、観測された硝酸塩の濃度は1968-1997年の間に約10倍に増加した²⁾。さらに、湖やダム貯水池などでのアオコの異常増殖や沿岸域での赤潮が頻繁に発生し、人の健康

への悪影響や環境問題などを引き起こしている³⁾。農業活動だけでなく都市の活動も、河川や沿岸水域に対し、数々の人間の健康や環境問題を引き起こす窒素負荷の一因となる。例えば、地域が都市化されたとき、多くの植生や表土は道路、駐車場、歩道などのような不浸透性の表面で置き換えられるので、雨に含まれている窒素や、屋根、道路、地表に蓄積された窒素は排水路、下水道（雨水の排水管）や地下水を通過して、最終的には河川、湖沼、貯水池、海に流される。また、都市化に伴い、食生活は穀物を中心とした食事から肉食を中心とするものに移りつつあり、肉類蛋白質の摂取量の増加によって、人間の排泄物に含まれる窒素含有量が増加している。しかし、下水処理施設の未整備や処理不十分であるため、大部分の生活用水は処理せずに直接河川へ放出されており、それに伴う窒素汚染が懸念される。また、肉類の生産は作物よりもエネルギーの転換効率が低く、その生産には大量の穀物を必要とする。さらに、家畜飼養規模の拡大により、家畜の排泄物が増加し、河川の窒素負荷量を増加させる原因となる。したがって、生活パターンの変化が地域の炭素・窒素などの物質循環のバランスを崩し、環境資源へ大きな影響を与える可能性が考えられる。しかし、既存の統計資料では、人間生活（食物消費状況や排泄物の排出ルールなど）の変化について地域ベースの信頼性の高い統計データが得られないため、窒素循環モデルにおける各パラメータ（例えば、一人当たり窒素消費量、人間の排泄物による環境への窒素負荷量など）は決定できず、生活パターンおよびその変化を窒素フローに反映することができない。一方、中国の都市化は1949年の10.6%から2009年には46.59%、前例のない水準で急速に増加している。都市の数は、1949年初頭の132から2009年の655まで増加した。さらに、2009年の中国都市開発報告書によると、中国人口の約50%は2020年までに都市に住み、その割合は2050年までに75%になるだろうと予測している。より多くの人々が都市部で生活するようになるので、都市部での活動は地域の物質フローにどのような影響を与えるかのよりよい理解を得る必要がある。このような状況下で都市化に伴う人々の日常生活の変化をリアルタイムに把握し、モデリングすることにより、人間活動による窒素負荷量の変動及びそれが環境に与える影響を評価し、現場に相応しい対策の立案を検討して将来のシナリオ予測できる研究開発を行うことは極めて重要だと考える。

2. 研究開発目的

都市化に伴う人間活動（産業構造、農業生産、日常生活）とその変化がどれほど地域の窒素循環や水環境に影響を及ぼしているかを定量的に解明することが本研究の目的である。そのため、まず、中国長江デルタ地域の都市部と農村部における1,650人を対象に、日常生活アンケート調査を実施し、食物から摂取する窒素の量、排泄物に含まれる窒素の排出ルートおよび生活排水の排出ルートを明らかにした。そして、メガシティである上海市を一例として取り上げ、1980-2008年の10年毎の人口や農業生産などの統計データや大気観測データや産業連関表や住民日常生活調査を元に、上海市における窒素収支に関するデータベースを構築し、窒素バランスモデルや産業連関分析や統計解析など学際的アプローチによって、農業活動、工業・サービス業部門、家計消費から水域へ流出する窒素負荷量の時系列変化を推定した。

3. 研究開発方法

(1) 日常生活現地調査

日常生活現地調査は2009年10月-2010年3月に、上海華東師範大学の協力により、以下の3省11地域（図(3)-2)-1）在住の18歳以上の成人、それぞれ150人（計1650人）を対象にアンケート調査と聞き取り調査を実施した。調査先の詳細は以下の通りである。

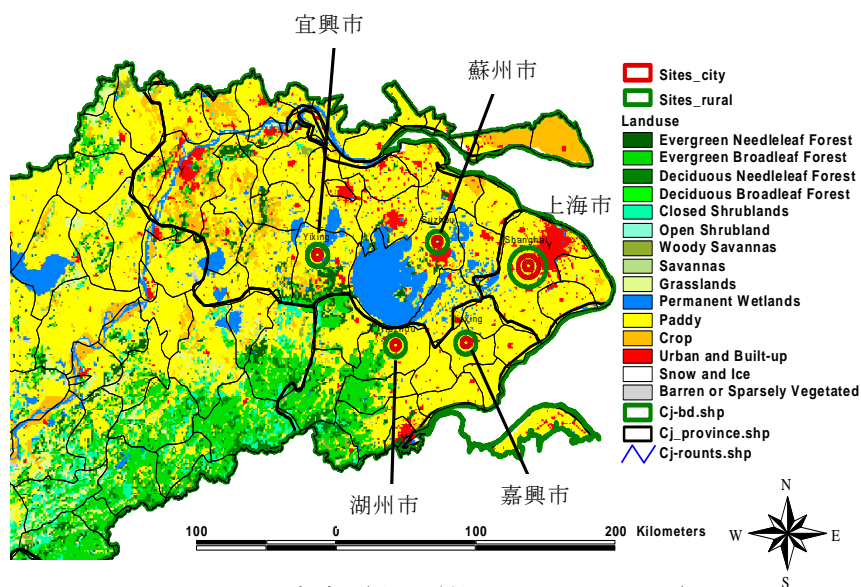
■上海市（メガシティの代表として；内環・外環・農村）

- ・内環状線以内（市区）：普陀区、卢湾区，杨浦区，静安区
- ・外環状線（新区）：浦东新区，闵行区
- ・農村：崇明县

■江蘇省：蘇州市（平野地域；都市・農村）、宜興市（丘陵地域あり；都市・農村）

■浙江省：嘉興市（平野地域；都市・農村）、湖州市（丘陵地域あり；都市・農村）

調査の内容は主に以下の4項目からなる。1項目目は被調査対象の基礎情報である。例えば、調査対象者の性別、身長、体重、職業、収入、戸籍性質（都市戸籍/農村戸籍）、教育レベル、日常生活強度などである。2項目目は食生活の現状及びその変化についてである。ここでは、まず中国食物成分表の分類によって主な食物を9種類47項目に分類し、調査票を作成した。そして24時間思い出し法によって調査の前日（朝、昼、晩）に摂取したすべての食物およびその量を調査対象者に思い出してもらい、調査票に記入してもらった。また、調査対象者に10年前と比べて、消費構造の変化、食生活の現状に満足しているかどうか、食卓について今後の希望などを尋ねた。3項目目では家庭排水の処理状況について下水道整備の状況、生活排水（洗濯、皿洗いなど）の排出方法及び自家用トイレの仕様、排出ルート、満足度などを尋ねた。4項目目では日常生活に関連する洗剤使用の現状及び10年前の状況について今回の調査対象者に尋ね、それらの状況変化を解析した。



図(3)-2)-1 調査先（土地利用図はAPEISより）

(2) 産業連関表による工業・サービス業からの河川窒素負荷量の推定

まず、国家統計局投入産出調査室によって公表された1997年、2002年、2007年の中国産業連関

表および中国環境統計年鑑を用いて、二次産業・サービス業のセクター毎の廃水・水質汚染物質（TN）排出強度（単位GDP当たりの排水・水質汚染物質の量）を計算した。そして、上海国家統計局投入産出調査室によって公表された1997年、2002年、2007年の上海産業連関表を用いて、二次産業・サービス業のセクター毎の廃水・水質汚染物質排出（TN）の量を計算した。また、本研究においてI-O表分類およびデータアクセシビリティの限界を考慮し、17の産業セクター（鉱業、食品製造業、繊維製造、皮革&毛皮製品、紙製紙業、石油製油、化学、非金属&金属製品、金属加工、金属製品、機械&電気&通信設備、電気&ガス&水の製品およびその提供、そのほかの製造業、建築業、運送&通信業、卸売&小売業、ほかの第三次産業）に分割して計算を行った。

（3）データベースの構築

産業連関表や現地調査データ以外に、本研究に用いた主な統計、観測データおよびその出典を表(3)-2-1に示す。窒素のソースとシンクの空間的パターンを分析するため、長江デルタ地域に対して1980-2008年の10年毎の農業統計データや気象観測ステーション等の観測データを地理情報システムと結合し、窒素収支に関する時空間データベースを構築した。

表(3)-2-1 本研究で用いた基礎データ

項目	単位	出典	
農業統計データ 穀物、豆類、油料作物、コットン、糖料作物、 野菜、果物、肉類(豚肉、牛肉、羊肉、鶏肉 など)、卵、乳、水産品の生産量 作物面積、水田面積、畑面積、耕地面積 家畜(豚、牛、羊、鶏など)年末頭数 年間1人当たり各食物消費量 窒素肥料使用量	t ha head kg t	<i>Shanghai Statistics Yearbook</i> , 1981 ⁴⁾ , 1991 ⁵⁾ , 2001 ⁶⁾ and 2009 ⁷⁾	
人口	都市人口、農村人口	person	<i>Shanghai Statistics Yearbook</i> , 1981, 1991, 2001 and 2009
大気沈降	年間降水量、雨水中TN濃度	mm	Shanghai Meteorological Information Center, Shanghai Meteorology Bureau
土地利用	水田、畑、森林、草地、都市用地などの面積	km ²	Liu et al. 2003 ⁸⁾ .

4. 結果及び考察

（1）アンケート調査の回収状況

調査員による面接調査であったため、回収率は9割以上であった（表(3)-2-2）。

表(3)-2-2 アンケート調査の回収状況

	上海 市区	上海 新区	崇明 島	蘇州 市	蘇州 村	宜興 市	宜興 村	嘉興 市	嘉興 村	湖州 市	湖州 村
調査数	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
回収数	140	140	135	145	143	147	142	140	137	145	135
有効回答数	120	120	124	139	133	143	125	119	119	120	129

(2) 被調査者の属性

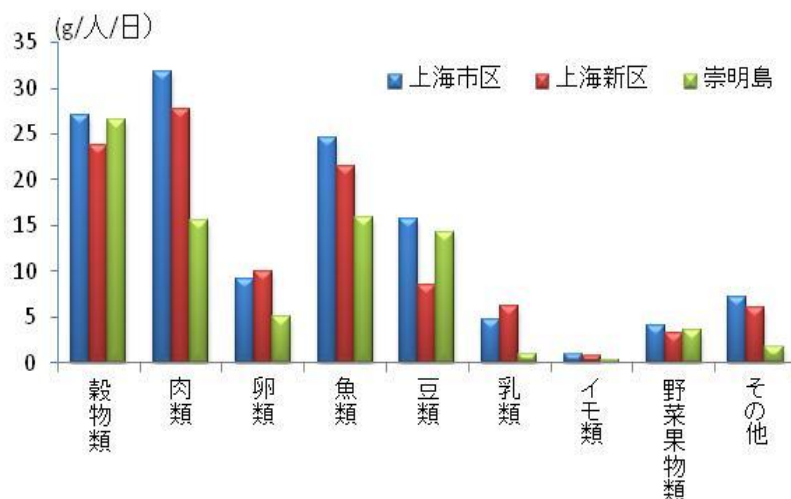
被調査者の属性を表(3)-2)-3に示す。

表(3)-2)-3 被調査者の属性

	上海 市区	上海 新区	崇明 島	蘇州 市	蘇州 村	宜興 市	宜興 村	嘉興 市	嘉興 村	湖州 市	湖州 村	
性別	男性	58	41	44	25	80	68	83	57	58	58	80
	女性	62	79	80	114	53	75	41	62	61	62	49
	無回答							1				
年齢	18～20歳		3				5	1	1			1
	20～30歳	19	37	14	11	22	19	2	20	9	25	14
	30～40歳	50	45	17	61	28	59	23	25	31	45	25
	40～50歳	39	26	45	54	70	44	36	42	53	35	53
	50～60歳	11	6	32	9	13	9	34	22	20	12	19
	60～70歳	1	3	10	3		5	22	5	3	3	14
	70歳以上 無回答			6	1		2	6	4	3		3
戸籍	農村戸籍	7	20	116	9	111	28	120	22	116	24	118
	非農村戸籍	111	96	8	115	14	114	4	97	3	92	9
	無回答	2	4		15	8	1	1			4	2
教育 レベル	小学校卒		11	18		21	1	34	10	47	3	35
	中学校卒	7	24	74	17	41	25	61	31	58	44	61
	高校卒	24	23	19	44	32	59	28	41	13	47	22
	大学以上卒	89	60	4	71	28	58		37		24	5
	未就学			9		1		1		1		1
	無回答		2		7	10		1			2	5
世帯 人数	1人	7	5	2	1			5	3		4	1
	2人	22	19	24	10	2	14	16	19	2	6	10
	3人	61	64	66	85	57	99	39	58	23	60	48
	4人	13	14	16	30	37	17	20	25	23	27	39
	5人	12	16	15	13	28	13	35	11	36	18	27
	5人以上	3	2	1	0	9	0	9	3	35	4	4
	無回答	2						1			1	
家庭 年間 収入	1万元以下	1		30	1	6	2	9	9		5	9
	1～2万元	9	11	36	10	28	8	29	12	6	13	46
	2～5万元	13	37	39	46	53	37	63	26	45	55	50
	5～10万元	32	27	17	52	30	51	17	48	44	33	17
	10万元以上	65	43	2	25	10	45	6	24	24	11	4
	無回答		2		5	6		1			3	3

(3) 食物から摂取する窒素の量

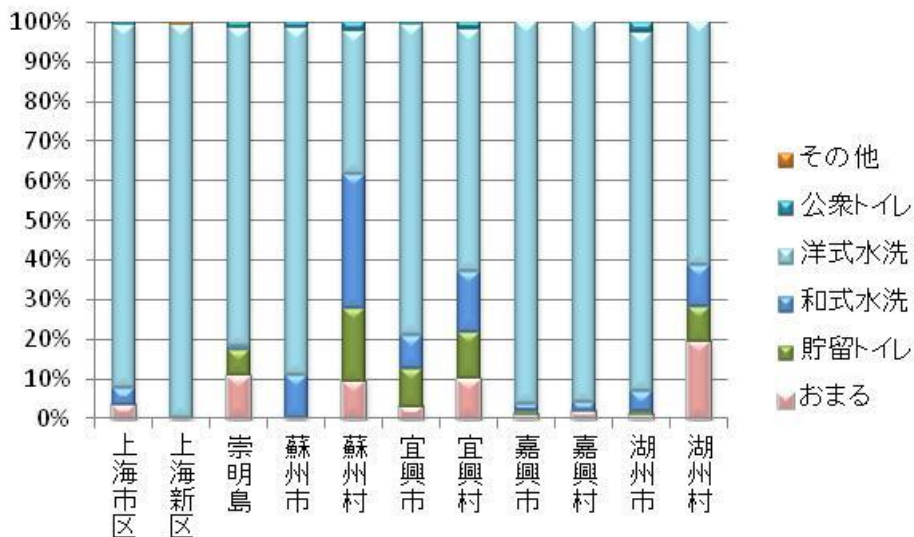
上海市を例として食物から摂取する蛋白質の量を図(3)-2)-2に示す。1人あたり1日蛋白質摂取量は上海市市区では98.57g、上海市新区では84.61g、崇明島では68.14gであった。市区と新区では肉類から摂取する蛋白質が最も多く、25%以上を占めていた。穀物から摂取する蛋白質は両地域とも22%であった。一方、崇明島では、穀物から摂取する蛋白質は最も多く、32%であり、肉類からは18%であった。上海市は水産品や海産品が豊富な地域でもあり、魚類から摂取する蛋白質は中国全国平均（1割）より圧倒的に多く、すべての地域において、約2割となっていた。



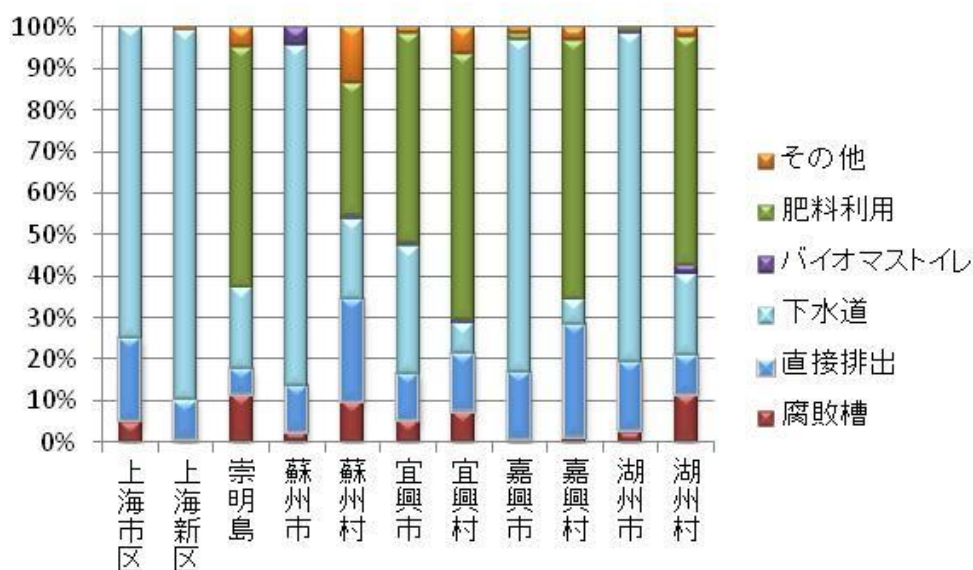
図(3)-2-2 上海市における各食物から摂取するタンパク質の量

(4) 人間排泄物の排出ルート

家庭トイレ様式についての調査結果を図(3)-2-3に、排泄物の排出ルートを図(3)-2-4に示す。水洗トイレはすべての地域に普及していた。宜興市以外の都市部では下水道の普及により、ほとんどの人間排泄物が肥料として利用されずに、下水道に流されていた。一方農村部では、約5割の人間排泄物が肥料として利用されていることがわかった。



図(3)-2-3 家庭トイレの様式

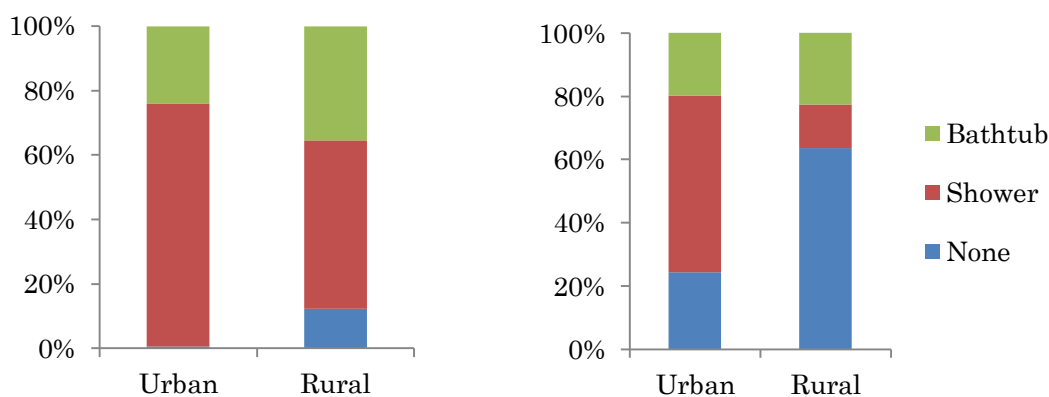


図(3)-2-4 排泄物の排出ルート

(5) 日常生活に関連する洗剤使用状況及びその変化

1) 入浴設備・入浴頻度・入浴用洗剤使用状況及びその変化

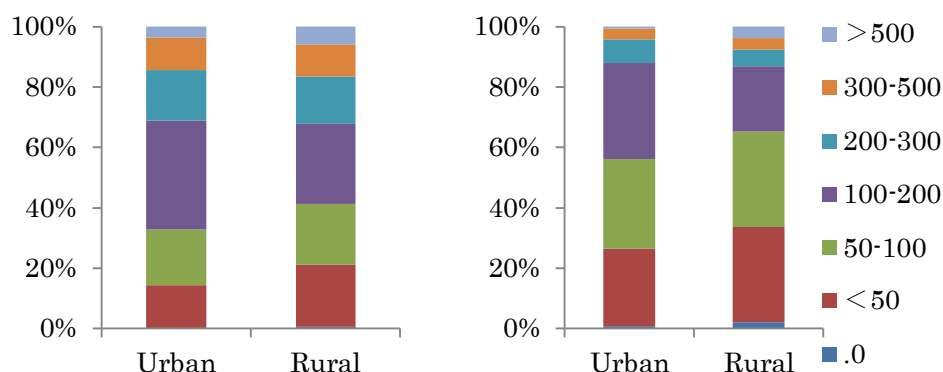
入浴設備・入浴頻度・入浴用洗剤(シャンプー、リンス、ボディソープを含む)使用状況及びその変化について、都市部と農村部における現在と10年前の状況に関する調査結果を図(3)-2-5に示す。



図(3)-2-5 都市部と農村部の入浴設備の種類及びその変化(左:現在、右:10年前)

入浴設備の種類については10年間で都市部と農村部の入浴設備に有意な差が見られた。都市部でのシャワー所有者の割合は10年間で55.7%から75.4パーセントへと急速に増加した。また、農村部でのシャワー所有者の割合は、10年前の13.9%から52.2%に、都市部よりもさらに大きく増加した。また、10年前も現在も農村部での入浴設備所有者の割合は都市部より上回ることがわかった。これは、農村部の居住面積は都市部より広いことに関係していると思われる。なお、農村部では入浴設備のない割合はまだ10%以上あり、生活水準の改善により、今後さらに増える可能性があると考えられる。

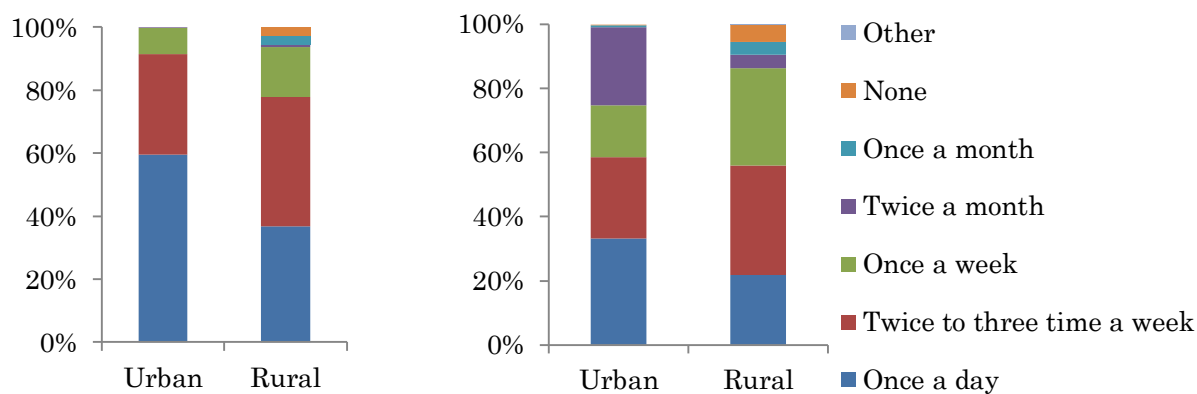
また、図(3)-2-6は、都市部と農村部における10年間の液体洗剤使用量の変化を示す。



図(3)-2)-6 都市部と農村部におけるシャワーや入浴での液体洗剤使用量の変化
(左:現在、右:10年前;単位:ml/月/世帯)

図(3)-2)-6によると、都市部と農村部においては、入浴用液体洗剤の使用量が100ml/月/世帯以下の割合は減少し、100ml/月/世帯以上の割合は急増していた。100ml/月/世帯以上の割合は都市部では10年前の43.8%から現在の67.2%となり、農村部では、10年前の34.8%から現在の58.6%となった。また、農村部の500ml/月/世帯以上の割合は都市部より大きいことがわかった。これは農村部の一世帯あたりの人数が多いことが原因として考えられる。

図(3)-2)-7に調査したシャワーや入浴の利用頻度の結果を示した。



図(3)-2)-7 都市部と農村部のシャワーや入浴の利用頻度の変化
(左:現在、右:10年前)

図(3)-2)-7に示しているように、シャワーや入浴頻度が大きく変化したことがわかった。「1日1回」と「週2-3回」の入浴割合はこの10年間で急速に増加する一方で、「週1回」、「月2回」、「月1回」の入浴割合は減っていることがわかった。都市部では「1日1回」と「1日2-3回」の合計が、10年前の51.8%から、76.4%となり、農村部では10年前の52.5%から84.2%となった。

2) 洗濯方法・頻度・洗剤およびその変化

現地調査により、洗濯用洗剤の種類、洗濯方法と洗濯頻度について、以下のことがわかった。

①洗濯用洗剤の種類について

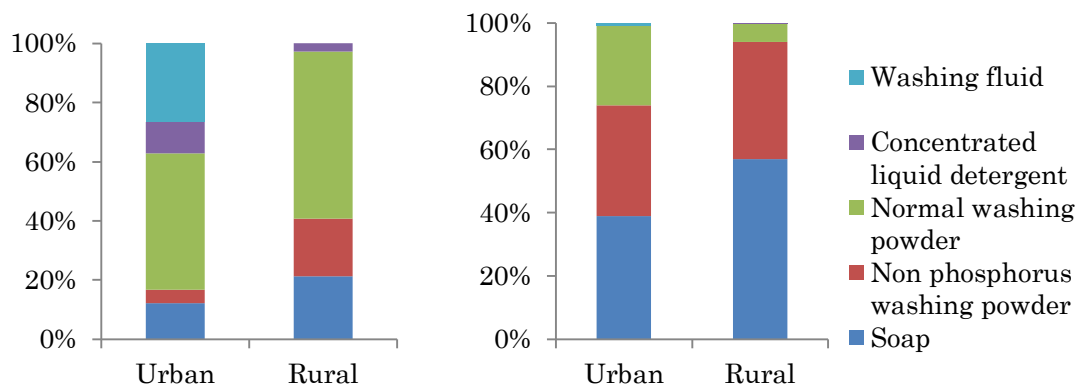
図(3-2)-8に示すように、10年前では洗濯用洗剤使用量のうち、石鹼の割合はもともと大きく、都市部と農村部ではそれぞれの割合は38.9%と56.9%であった。現在では一般粉末洗剤の使用割合が大きく、都市部で46.2%、農村部で56.4%であった。また、都市部では、一般液体洗剤や濃縮液体洗剤の使用割合が10年前より大きく増加していることがわかった。10年前には一般液体洗剤や濃縮液体洗剤の使用はほとんどなかったが、最近では使用割合が4割弱を占めるようになった。さらに、10年前の非リン系洗剤の使用割合は現在よりも高かったことが注目される。

②洗濯方法について

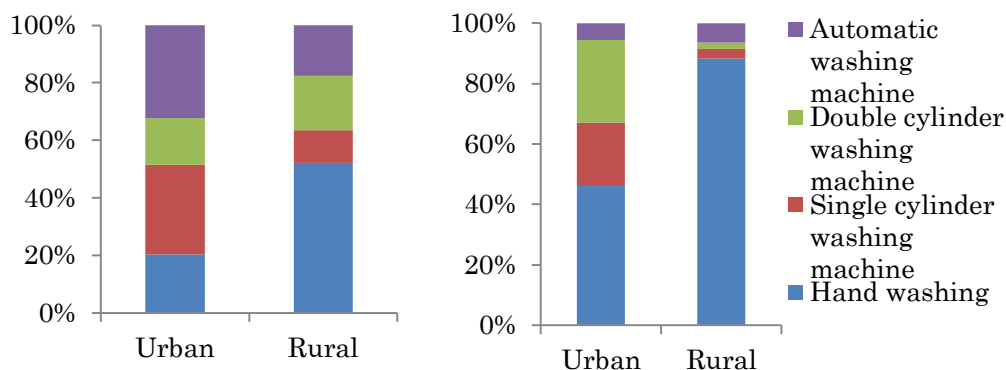
図(3-2)-9からわかるように、10年前は都市部でも農村部でも手洗いが主な方法で、都市部で46.2%、農村部で88.4%であった。生活水準の向上に伴い、手洗いの割合が減少し、洗濯機、特に全自動洗濯機の利用が多くなった。都市部での洗濯機の使用は80%程度であり、農村部では約50%である。全自動洗濯機の使用割合については、都市部では約32.1%であり、農村部では約17.5%であった。農村地域では手洗いによる割合はまだ5割となっており、今後所得の増加に伴って、洗濯機の利用はさらに増えていくであろう。

③洗濯頻度について

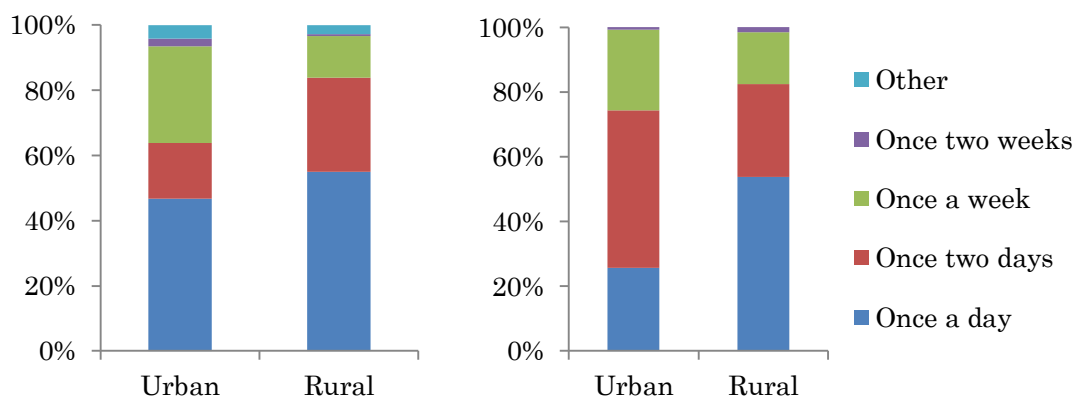
図(3-2)-10は都市部と農村部の洗濯頻度及びその変化を示している。農村部の洗濯頻度は、過去10年間にあまり変化していなかったが、都市部では大きく変化した。「1日1回」及び「週に1度」の割合は過去10年間で増加している一方、「2日に1回」は急速に減少した。都市部のライフスタイルの変化を表しているものの、原因を追究するためには、より詳細な調査が必要だと考えられる。



図(3-2)-8 都市部と農村部の洗濯用洗剤の種類及びその変化(左:現在、右:10年前)



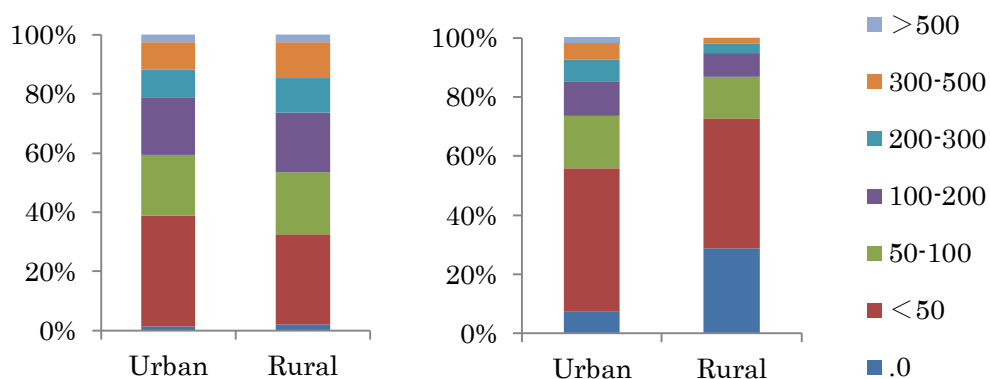
図(3)-2)-9 都市部と農村部の洗濯機の種類及びその変化(左:現在、右:10年前)



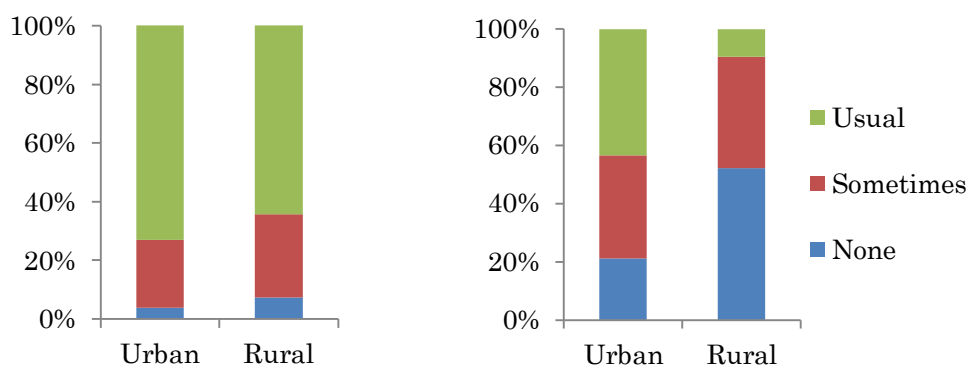
図(3)-2)-10 都市部と農村部の洗濯頻度及びその変化(左:現在、右:10年前)

3) キッチン洗剤使用量、使用頻度及びその変化

図(3)-2)-11と図(3)-2)-12に都市部と農村部のキッチン洗剤使用量と洗剤使用頻度及びそれらの変化を示した。



図(3)-2)-11 都市部と農村部のキッチン洗剤使用量及びその変化
現在(左)、10年前(右)単位: ml/月/世帯



図(3)-2)-12 都市部と農村部のキッチン洗剤使用頻度及びその変化
現在(左)、10年前(右)

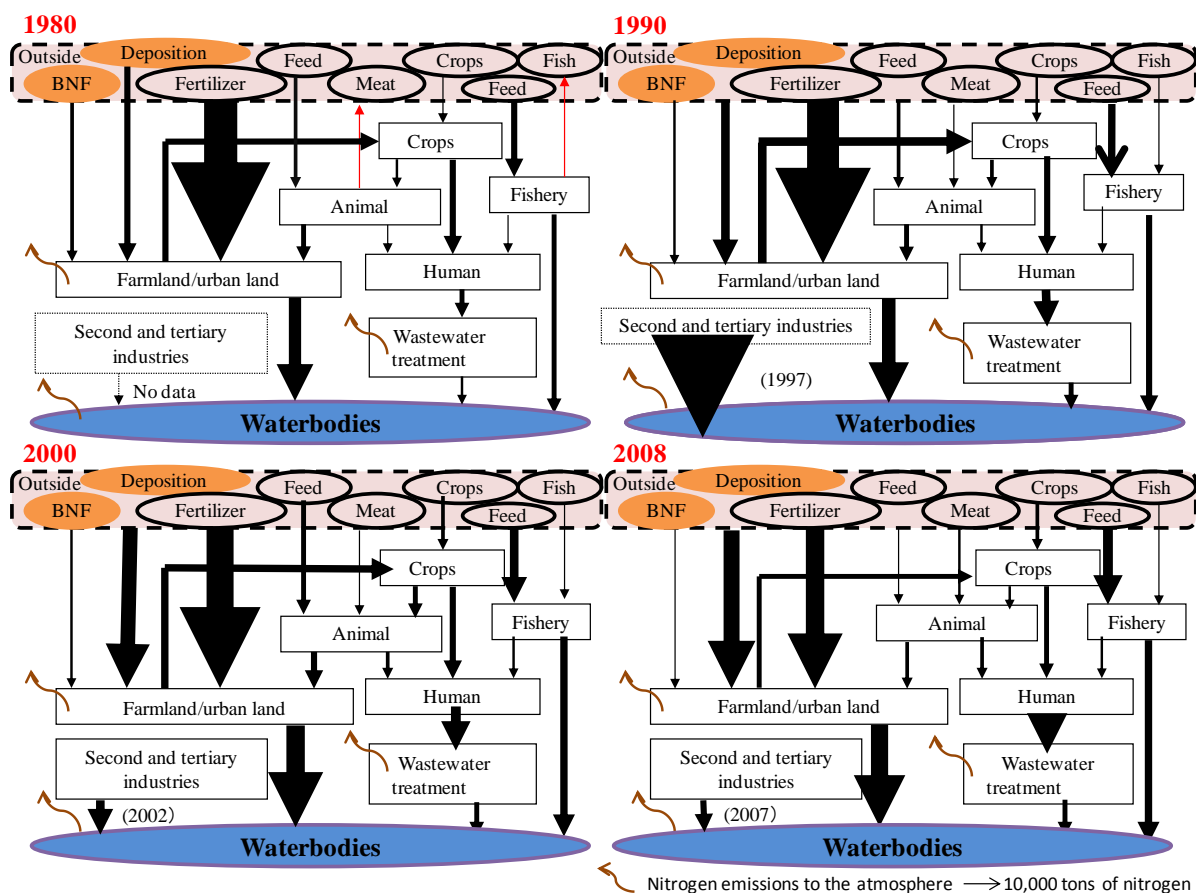
図(3)-2)-11は、過去10年間のキッチン洗剤使用量の変化を示している。都市部と農村部の両方とも、キッチン洗剤の使用量は増加し、10年前にはそれぞれの平均値は110ml/月/世帯、57 ml/月/世帯だったが、現在ではそれぞれ154/月/世帯、171 ml/月/世帯となっている。都市部の1.4倍の増加に対して、農村部は3倍の増加となっている。また、「<50ml」洗剤使用量の割合は減少して、「>50ml」洗剤使用量の割合は急増していた。また、農村部においては「>100ml」洗剤使用量の割合は都市部より高いことがわかった。

キッチン洗剤使用頻度及びその変化を図(3)-2)-12に示している。「使用しない」また「時々使用」の割合は減少している一方で、「いつも使用」の割合は急激に増加した。今後、特に農村地域において、経済の発展、世帯所得の増加、都市生活型への変化などから、キッチン洗剤使用はさらに増加するであろう。

(6) 上海市における生活様式変化に伴う陸域窒素負荷構造の変化

1980年から2008年までの10年毎の農業・工業・生活などの人間活動による上海水域への潜在窒素負荷量を図(3)-2)-13に示す。その特性は、次のように要約できる。

- 1) 人為的反応窒素（すなわち、化学肥料、大気沈降、生物による窒素固定および輸入飼料と食糧）の平均合計投入は、1980年の 3.18×10^6 t-Nから、1990年には 3.48×10^6 t-Nに、2000年には 3.88×10^6 t-Nに増加したが、2008年には 3.23×10^6 t-Nに減少した。化学肥料窒素は、窒素負荷の最大要因であったが、1980年には 2.04×10^6 t-Nに、1990年には 1.98×10^6 t-Nに、2000年には 1.62×10^6 t-Nに、そして2008年に 1.10×10^6 t-Nに減少した。その一方で、大気沈降による窒素投入量は、1980年の 3.98×10^5 t-Nから、1990年には 4.97×10^5 t-Nに、2000年には 8.95×10^5 t-Nに、2008年には 9.94×10^5 t-Nに増加している。大気沈降量の増加は車の使用量の増加によるものと考えられているのに対し、化学肥料窒素の減少の主な要因は都市面積の拡大による農地面積・農業生産の縮小によるものである。
- 2) 産業連関分析によると、工業、特に紙と紙製品の製造からの排水廃水による窒素は1997年の 21.2×10^5 t-Nから、2000年には 5.0×10^5 t-Nに、2007年には 3.64×10^5 t-Nへと劇的に減少した。その減少は製造業からサービスへの産業の構造的変化、工場排水処理技術の改良および工場の外部への移転によるものである。

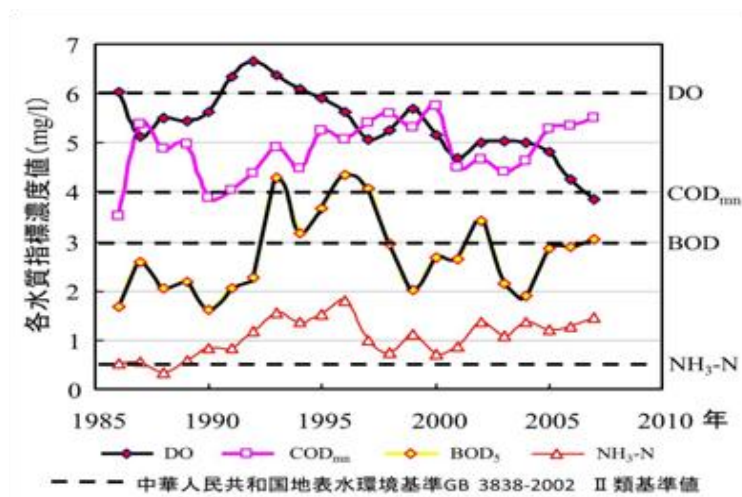


図(3)-2)-13 上海市における窒素フローの変動

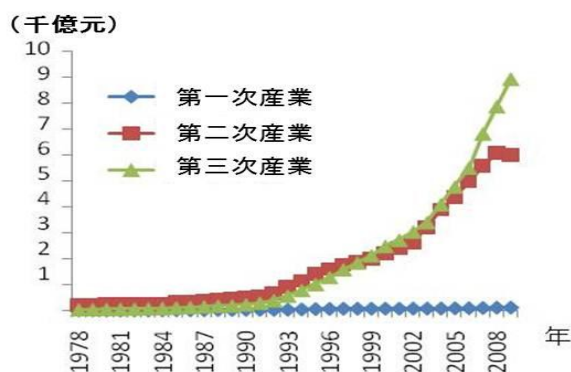
- 3) 2009年の日常生活のアンケート調査によると、一人当たりの食品からの一日の窒素摂取量は都市部で18.69 g-N、農村部で13.46 g-Nであり、有意な差があった。この値から、食生活による河川への直接的潜在窒素負荷量は、毎年およそ、都市部で一人当たり6.62 kg-N、農村部で一人当たり1.33 kg-Nと算出された。また、都市部の回答者は農村部の回答者より、肉、卵、魚、乳製品の消費が多かったが、穀物、豆類、野菜、果物の消費は少なかった。また、都市部の回答者の食事は、農村部の回答者の食事よりも、はるかに多様であることがわかった。ただし、総人口の89.3%は都市人口であり、農村人口は残りの10.7%であった。
- 4) 農地からの窒素流出量が減少した反面、都市地域から地面や河川のコンクリートなど人工物被覆によって水域への窒素流出量が増加した。
- 5) 輸入飼料や食品は増加しており、それは上海で消費される窒素は他の地域に、より由来するようになってきていることを意味している。また、窒素負荷量の多い家畜飼養のほとんどは、近年上海市農村地域から他地域へ移転される傾向にあり、それに伴い、窒素負荷量の移転も発生していると考えられる。
- 6) 急速な人口増加と生活水準向上によって、家庭排水からの窒素負荷量が増加している。
- 7) 漁業も一つの大きな窒素負荷源となっている。
- 8) 河川への潜在窒素負荷量は2000年以降減少傾向にある。

1986-2007年の「上海市環境質量報告書」に発表された黄浦江上流水源地の水質状況(図(3)-2)-14)

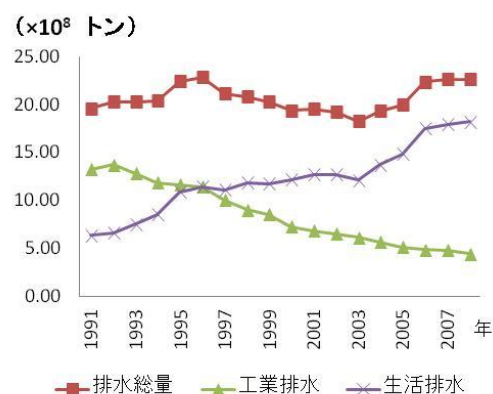
によると、1990年以降はCOD（化学的酸素要求量）などの各指標は悪化傾向にあり、特にDO（溶存酸素、数値が低いほど水質が悪い）は低下傾向で、2005年以降は環境基準IV類にまで悪化した。COD_{Mn}（過マンガン酸カリウムによるCOD）、BOD（生物化学的酸素要求量）、NH₃-Nは90年代後半に一度ピークに達した後、一旦は減少傾向になったが、2000年前半から再び増加傾向となり、2007年には、COD_{Mn}とBODは環境基準III類に分類され、富栄養化の原因となるNH₃-NはIV類となった。いずれにしても上海市の生活用水の水源地の水質として望ましくない状況である。また、上海市統計年鑑によると、1999年以降、総GDPに占めるサービス業の割合は第二次産業を追い抜き、2008年には約6割を占めるようになった（図(3)-2)-15）。さらに、1996年以降、生活排水量は工業排水量を上回り、2008年には総排水量の80%を占めるに至っている（図(3)-2)-16）。つまり上海市では産業構造の変化により、「工業汚染」から人口集中・大量消費に基づいた「都市型汚染」へ変化しているといえる。なお、上海市にある集中型・分散型下水処理施設にて調査した結果では、窒素の除去率が50-70%、リンの除去率が70-80%となっており、中国国内では高い水準だが、富栄養化の防止には更なる改善が不可欠である。



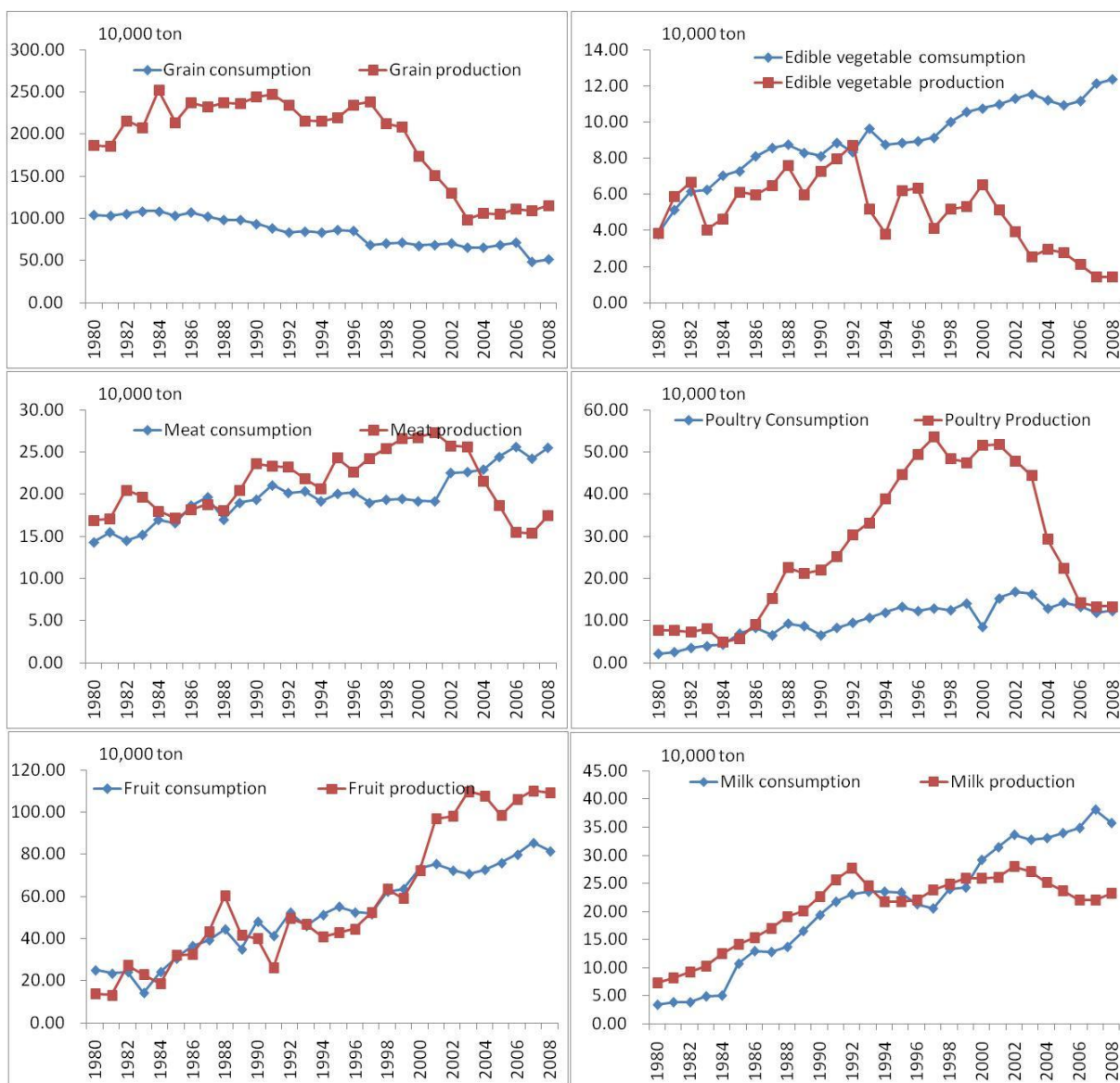
図(3)-2)-14 上海市黄浦江上流水源地の水質の経年変化



図(3)-2)-15 上海市GDP構成の経年変化



図(3)-2)-16 上海市污水排出量の経年変化



図(3)-2)-17 上海市における各農生産物生産量・消費量

さらに、一部で汚染の深刻な工業（製紙業、化学工業など）は賃金高騰、上海市の汚染源抑制政策や産業構造変化などの影響を受け、周辺の中小都市、農村または域外へ移転している。また第二次産業だけではなく、食料も地元で生産せず、域外から移輸入する状況へと変化しつつあり（図(3)-2)-17）、窒素の負荷が大都市から中小都市、農村へ移転する「汚染転移」が発生していることがわかった。したがって、上海という大都市だけを観察した場合には、一見水質汚染問題は改善されているように見えるが、周辺地域を含む広範囲で考えると問題はむしろ拡大していると言える。

これらにより、この地域の新たな環境対策としては、(1)総合型流域管理、(2)点源汚染については下水の窒素・リンの高度除去処理や市民参加・節水社会の形成、(3)面源汚染については農村地域の「循環型社会」の形成が急務である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

人間活動が農生態系窒素フローに及ぼす影響を定量的に解明することによって、さまざまな流域モデルについて現地に即したパラメータを用いた推定が可能となった。

(2) 環境政策への貢献

これらの研究は環境への影響評価だけではなく、地域の物質バランス、地域の環境政策および地域の持続可能な発展を検討するのにも極めて重要である。本研究の成果である河川への窒素負荷量の算出によって、生活環境の改善に深く関わる河川、湖沼、海等の富栄養化や水質汚濁などの原因解明及び対策の構築に応用できる。また、温室効果ガス (N₂O) の排出量を算定することによって、地球温暖化の影響評価にも応用できる。さらに、低窒素と低炭素は、本質的には同じ概念であり、地域の低窒素社会への検討は、「低炭素社会の構築」にも貢献できる。一部の成果を環境科学会やPlanet Under Pressure国際会議で発表した。今後さらに本研究の成果を学会発表や国際シンポジウムを通じて、社会に向けて発信する予定である。

6. 国際共同研究等の状況

中国上海華東師範大学生命科学学院 (カウンターパート: Zou Chunjing) との共同研究により、現地調査を行った。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) 劉晨、王勤学: 環境科学会誌, 23(4), 259-267 (2010)

「中国農村地域における窒素フローの変動および水環境への影響評価」

- 2) Liu C, Wang QX, Yang Y, Wang K, Ouyang Z, Li Y, Li Y, Lei A, Yasunari T: Journal of the Science of Food and Agriculture, doi: 10.1002/jsfa.4725 (2011)

“Recent Trends and Problems of Nitrogen Flow in Agro-Ecosystems of China”

- 3) Wang QX, Xiao Q, Liu C, Wang K, Ye M, Lei A, Song X, Kohata K: Journal of the Science of Food and Agriculture, doi: 10.1002/jsfa.4607 (2011)

“Effect of reforestation on nitrogen and phosphorus dynamics in the catchment ecosystems of subtropical China: the example of the Hanjiang River basin”

- 4) 劉晨、王勤学、李全鵬、石村貞夫: 環境科学会誌, accepted (2012)

「中国漢江流域における水環境に関する住民意識の調査—日本との比較検討を通して—」.

<その他誌上発表 (査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) Liu C, Wang QX: The Second International Symposium on Sustainable Agriculture for Subtropical

Regions (ISSASR-2), ABSTRACTS 97-98, 15-18, Changsha, China (2010)

“Anthropogenic influences on nitrogen flow and water environment in agro-ecosystems of Changjiang River Basin”

2) 劉晨：環境科学会2011年会，44（2011）

「上海市における窒素フローの変動及び富栄養化問題」

3) 劉晨、王勤学、李全鵬、叶関：環境科学会2011年会，44（2011）

「中国漢江流域における水環境に関する国民意識の調査－日本との比較検討を通して－」

4) Liu C: Global COE Program International Symposium "Progress in Clinical Environmental Studies for Asia", Nagoya, Japan (2012)

“Recent Trends of Nitrogen Flow with Urbanization in Mega-city Shanghai”

5) Liu C, Wang QX, Wang K, Yang Y, Ouyang Z, Lin Y, Li Y, Lei A: Planet Under Pressure 2012, London, UK (2012)

“Recent Trends of Nitrogen Flow of Typical Ecosystems in China”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

1) Liu C, Watanabe M, Wang QX: Changes in Nitrogen Budgets and Nitrogen Use Efficiency in the Agroecosystems of the Changjiang River Basin between 1980 and 2000. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 80, 19–37 (2008)

2) Yan W, Zhang S, Sun P, Seitzinger SP: How do nitrogen inputs to the Changjiang basin impact the Changjiang River nitrate: a temporal analysis for 1968–1997. *Global Biogeochem Cycles* 17:2–9 (2003)

3) Zhang J, Zhang ZF, Liu SM et al: Human impacts on the large world rivers: would Changjiang (Yangtze River) be an illustration? *Global Biogeochem Cycles* 13:1099–1105 (1999)

4) 上海市統計局：中国統計出版社（1981）

「上海統計年鑑1981」

5) 上海市統計局：中国統計出版社（1991）

「上海統計年鑑1991」

6) 上海市統計局：中国統計出版社（2001）

「上海統計年鑑2001」

7) 上海市統計局：中国統計出版社 (2009)

「上海統計年鑑2009」

8) Liu J, Liu M, Zhuang D: Science in China Series D-Earth Sciences, 46, 373-384 (2003)

“Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995-2000”

(4) 東シナ海生態系保全に向けた長江流域圏及び海域環境管理手法の開発

(独) 国立環境研究所

地域環境研究センター 海洋環境研究室

越川 海・東 博紀

生物・生態系保全環境研究センター 生物資源保存研究推進室

河地 正伸

埼玉県環境科学国際センター

木幡 邦男

平成21～23年度累計予算額：47,569千円（うち、平成23年度予算額：16,615千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 東シナ海の環境・生態系の持続性確保のためには中国陸域からの栄養塩負荷量適正化が求められる。本サブテーマではこうした施策検討に必要な科学的知見を提供するため、海洋観測、室内実験に基づいた東シナ海流動・生態系モデルの開発を行った。海洋観測では、東シナ海陸棚域の生態系変調の兆しと考えられる渦鞭毛藻*Prorocentrum dentatum*の出現海域が長江希积水ならびにその境界海域であり、長江希积水の陸棚域への水塊輸送と*P. dentatum*出現の関連性を示唆した。大型培養槽を用いた*P. dentatum*の培養実験では、本種が日周鉛直移動を行う鞭毛藻であり、且つ下降時に密度躍層に集積する特性があることが明かとなった。これらの特性は、表層栄養塩の枯渇した東シナ海陸棚域において、*P. dentatum*が日周鉛直移動能を有しない植物プランクトン種に比べて、密度躍層下の栄養塩を優位に獲得して優占化しうることを示唆する。一方、現場海域における*P. dentatum*の集積はしばしば密度躍層内や直上よりもむしろ密度躍層下方に観測された。光学センサーによる硝酸塩ならびに剪断応力センサーによる乱流強度・鉛直渦拡散係数の鉛直プロファイルと*P. dentatum*の出現水深を詳細検討したところ、こうした観測点では密度躍層下の中層に鉛直渦拡散係数の小さな水塊が存在し、密度躍層下の*P. dentatum*出現水深の直下に硝酸躍層が形成され、底層からの栄養塩が*P. dentatum*の出現水深に影響を及ぼしていることが考えられた。東シナ海の流動・生態系モデルの開発では、培養実験で観測された海水と渦鞭毛藻の密度差による影響を考慮した渦鞭毛藻の鉛直移動式を導きモデルに導入したところ、東シナ海の渦鞭毛藻の鉛直分布特性の再現性が向上することが明かとなった。サブテーマ(3)-1)、(3)-2)、(2)により解析・推計された長江流域圏からの汚濁負荷流出量を設定し、東シナ海低次生態系の応答再現計算を行った。その結果、初夏の東シナ海陸棚域の渦鞭毛藻赤潮は、春季の長江河口南部における赤潮が海流の季節変動により輸送されることが示された。現在の長江汚濁負荷推計値を根拠として仮想的な負荷削減を与えたところ、長江河口域や黄海で赤潮抑制効果が現れた。一方、陸棚の渦鞭毛藻への効果は限定的で、外洋起源の栄養塩供給に対する依存性の高さが示唆された。

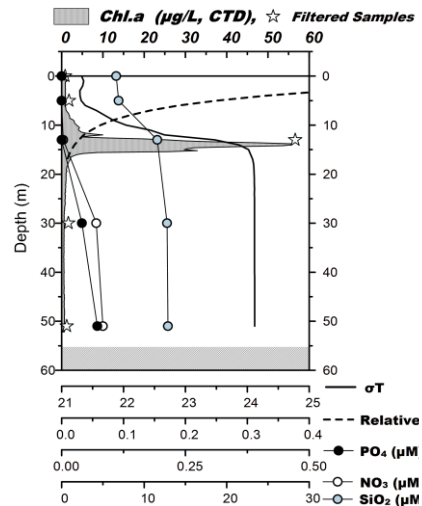
[キーワード] 東シナ海、汚濁負荷、低次生態系、渦鞭毛藻赤潮、流動・生態系モデル

1. はじめに

近年、東シナ海の中国沿岸では赤潮発生が慢性化している。この原因として、1990年代以降の

中国経済の急速な発展に伴う陸域負荷増大が第一に疑われ、中国沿岸の環境劣化のみならず、日中韓の国際海域である東シナ海陸棚域への影響も危惧される。実際、我々グループがこれまでに実施した陸棚域海洋環境調査では、5～6月の季節に中国沿岸域の赤潮主要種である渦鞭毛藻（*Prorocentrum dentatum*）がクロロフィル *a* (以下、Chl.*a*)として高濃度（～50 $\mu\text{g/L}$ ）で観測された(図(4)-1)。陸棚域中央部における同種の高濃度発生の報告はこれまで皆無であり、我々の観測した現象は近年の東シナ海生態系変調の兆しである可能性が高い。

仮に東シナ海生態系の変調が生じており、またその第一の原因が中国陸域からの負荷であるとするならば、水産海洋資源を初めとする生態系サービスの持続性確保のためには、中国陸域負荷削減の必要性を国際的な認識として共有し、また施策の提案を行っていくことが求められる。しかしながら、東シナ海環境・生態系に影響を及ぼす要因は、中国陸域からの汚濁負荷増大の他、中国沿岸における大規模養殖、近海および陸棚域における水産資源乱獲、近年の水温上昇や陸棚縁辺を流れる黒潮の蛇行など人為的なものから自然現象に至るまで幅広く、各々の事象について科学的知見に基づき、その因果関係を明確にしなければならない。



図(4)-1 陸棚域における高密度 *P. dentatum* 観測例 (2007年6月・測点31)

2. 研究開発目的

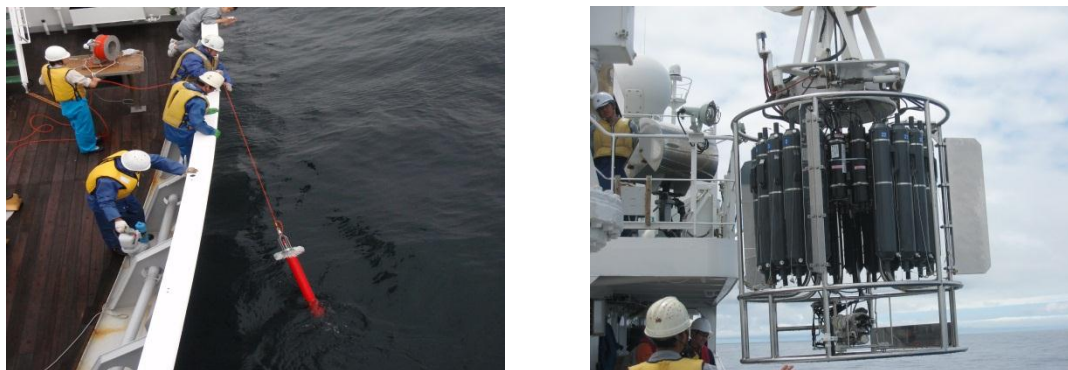
本サブテーマでは、陸棚域の低次生態系の変調、特に渦鞭毛藻 *P. dentatum* の優占化と陸域負荷の関連性を、観測データと観測した物理・生物素過程から構築した数理モデルに基づき解明することで、陸域負荷に対する東シナ海環境の影響予測が可能な長江流域圏・東シナ海統合環境管理モデルを開発し、国際的な枠組みにおいて陸域負荷削減対策等を提案するための科学的知見を提供することを目的とし、以下の研究を実施した。

- (1) 陸棚域における硝酸濃度・乱流強度の鉛直プロファイル観測による *P. dentatum* 群集への栄養塩供給動態の把握
- (2) 陸棚域における *P. dentatum* のバイオマスの定量評価、出現水域・環境特定
- (3) 大型培養槽を用いた *P. dentatum* の日周鉛直移動特性の把握
- (4) 東シナ海の流動・水質・底質モデルの開発・検証と陸域負荷変動の影響予測

3. 研究開発方法

(1) 陸棚域における硝酸濃度・乱流強度の鉛直プロファイル観測による *P. dentatum* 群集への栄養塩供給動態の把握

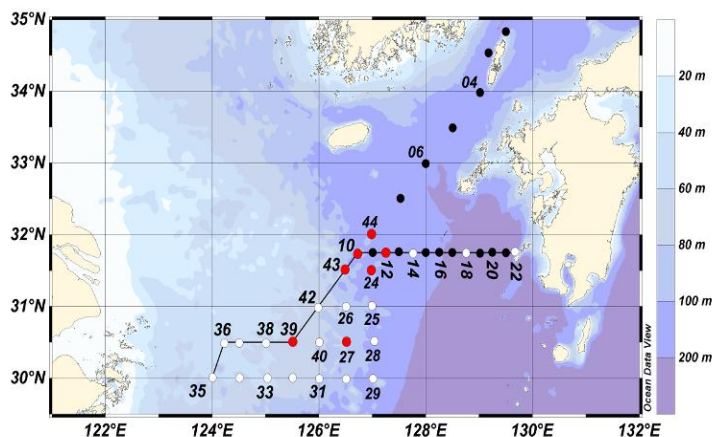
本研究期間内(2009～2011年)において本サブテーマでは、毎年6月に東シナ海の航海調査をサブテーマ(1)と共同で実施した。調査では水温・塩分・蛍光光度の鉛直プロファイル(CTDデータ)や多層採水による栄養塩濃度や植物プランクトン等の化学・生物データの取得に加え、藻類の増殖・集積に関与する乱流強度の詳細鉛直分布を明らかにするための微細乱流プロファイラ Turbo



写真(4)-1 SY10航海における微細乱流プロファイラ(TurboMap-9、写真左)と硝酸塩鉛直プロファイラ(ISUS v3、写真右)観測

MAP-9 (JFEアドバンテック社製。以下、「TM」と称す。)による観測を実施した。また2010年以降の調査では硝酸塩鉛直プロファイラISUS v3 (Satlantic社製、以下「ISUS」と略す)を導入し、栄養塩の鉛直構造を詳細に把握することにより、植物プランクトンへの栄養塩供給動態の把握を試みた(写真(4)-1)。ISUS導入以降の調査のうち、本研究で着目する*P. dentatum*の出現が顕著であったのは2010年6月18日～30日にかけて実施した水産庁照洋丸第1次航海(以下「SY10」と称す。)である。このため本報告では2010年に取得したデータ解析結果について記述する。

SY10では、図(4)-2に示す44の観測点(測点01～測点44)を設定した。なお、これらの測点のうち、測点12、18、39では、それぞれ数日前あるいは数日後に24時間以上の定点観測を実施した。定点観測時の測点名は、順に09、23、41である。ISUSは約1秒間隔のサンプリングレートでの計測であるため調査終了後にCTDデータとの時間同期を行い、さらに採水試料分析に基づく出力信号の校正を行った。出力信号は、採水試料の硝酸濃度変化に対してほぼ一定の傾き(CV=±6%以内)であったが、オフセット(切片)が紫外吸収スペクトル測定のための重水素ランプの累積点灯時間に対して対数的に変化する特性があることが明らかとなった。累積点灯時間を変数とする校正式を導出し、観測点の硝酸鉛直プロファイルを得た。



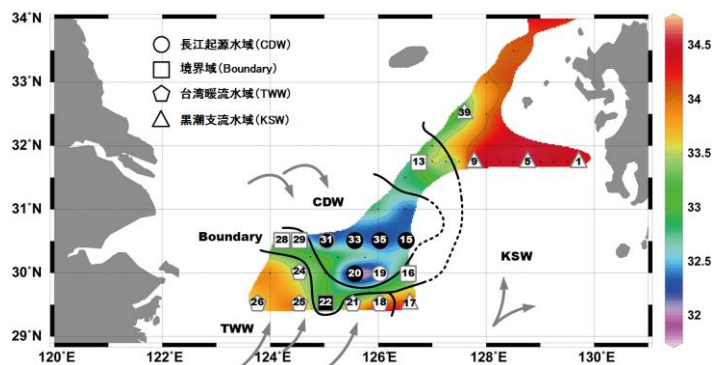
図(4)-2 SY10航海調査測点

●:*P. dentatum*の優占出現点、○:*P. dentatum*以外の藻類優占点、●藻類組成データなし・CTD観測等のみ実施点である。詳細については結果の節を参照。

TM観測は測器を海面より約0.4m/sで自由降下させ、海底面より5～15m程度までの鉛直プロファイルデータを取得した。TMの観測項目は乱流シア(サンプリングレート512Hz)、水温、塩分、蛍光光度、濁度およびDO(256Hz、2011年の観測に導入)であり、乱流シアを除く項目についてはCTDデータとクロスチェックを行った。乱流シアデータより、乱流エネルギー散逸率(ϵ)をスペクトル解析で求め、鉛直渦拡散係数(K_z)をOakey(1982)¹⁾の方法で算定した。

(2) 陸棚域における渦鞭毛藻(*P. dentatum*)のバイオマスの定量評価、出現水域・環境特定

陸棚域における*P. dentatum*の優占化の定量評価・解析は、2007年6月18～30日に水産庁照洋丸の東シナ海航海調査(図(4)-3。以下、「SY07」と称す。)で取得したデータを用いた。全52測点のCTD観測と半数以上の測点で鉛直多層採水を行い、多層採水試料から溶存態試料(栄養塩)、懸濁態試料(蛍光光度法およびHPLC-PDA法によるChl.*a*および補助色素)、植物プランクトン固定試料(種同定・細胞体積計測)を得た。明期観測点



図(4)-3 表層10m塩分、観測点、各測点の水塊分類
黒塗の測点で*P. dentatum*が優占藻類として観察された。

においてはPAR照度観測を実施し、1%光補償深度(Z_e)を求めた。暗期観測点の Z_e は、Chl.*a*濃度、濁度などの水質から光消散係数と光補償深度を推定するモデルを構築して求めた。

HPLCによる補助色素用の懸濁態試料は、17測点の表層、Chl.*a*極大層および中間層から取得し、色素構成の因子解析を行って(CHEMTAX解析²⁾: 鞍点法により|S-CF|を最小化するFおよびCの組み合わせの決定。S、C、F:それぞれ色素濃度行列(分析値)、植物プランクトン濃度行列(推定値)、補助色素/Chl.*a*行列(推定値))、Chl.*a*に対する各植物プランクトン綱の寄与率(R_A)を求めた。

以上のChl.*a*鉛直分布、 Z_e 、 R_A から綱毎の有光層Chl.*a*バイオマス($Chl_{A,E}$)を得た。渦鞭毛藻および珪藻は固定試料を用いて細胞体積を計測し、Montagnes et al.(1994)³⁾の換算係数により種毎のChl.*a*に変換した。CHEMTAX解析と結合させることで調査海域の*P. dentatum*由来の $Chl_{A,E}$ を評価した。

(3) 大型培養槽を用いた*P. dentatum*の日周鉛直移動特性の把握

東シナ海での*P. dentatum*優占化のメカニズムの一つとして予想された*P. dentatum*の日周鉛直移動能力の有無ならびに特性を評価するために、国立環境研究所設置の藻類大型培養槽(海水培地量1000L、水位約1200mm)に*P. dentatum*の槽内鉛直分布を計測するシステム(Chl.*a*蛍光検出器自動昇降システム)を構築し、本研究期間内に4回の培養実験を行った。本報告では2011年11月に実施した温度・塩分密度躍層条件における*P. dentatum*の日周鉛直移動について記述する。

藻類大型培養槽の上部2/3容積に95%黒潮表層海水(初期条件:水温=22°C、塩分=32.0、 $NO_3-N=7.6\mu M$ 、 $PO_4-P=0.24\mu M$)、下部1/3容積に100%海水で調整したMNK培地(初期条件:水温17°C、塩分=33.7、 $NO_3-N=80.0\mu M$ 、 $PO_4-P=2.78\mu M$)を導入し、密度躍層を構築した(密度差 $\Delta \sigma T=2.56$ 、培養槽底面から350mm高)。上層に東シナ海で単離した*P. dentatum*を初期濃度 2.5×10^2 cells/mLで導入し、明暗12時間周期で培養を開始した(明期時刻0600~1800、明期表層照度 $50\mu E/m^2/sec$)。

毎日0900に鉛直5層から栄養塩、抽出Chl.*a*、検鏡用の試料を採取すると共に、培養槽内を約40mm/分で自動昇降する蛍光検出器(Turner Designs、Cyclops)によりChl.*a*の鉛直分布を連続的に計測した。培養は増殖停滞期に至るまでの18日間行った。また5日目1200に槽内水温を上層20°C、下層19°Cに変化させ、8日目1200に初期条件に戻した。

(4) 東シナ海の流動・水質・底質モデルの開発・検証と陸域負荷変動の影響予測

1) 流動・水質・底質モデルの概要

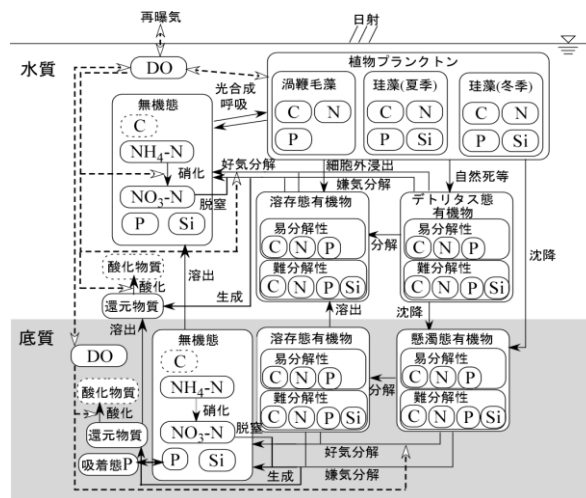
本研究の流動モデルは一般によく用いられる連続式、静水圧・ブシネスク近似の運動方程式、及び塩分・熱輸送方程式で構成された準3次元解析モデルである。数値解法にはレベル座標(デカルト座標)系の有限差分法を用い、移流スキームには保存保証型のセミラグランジュ解法であるRCIP-CSL2 (Nakamura et al., 2001)⁴⁾、鉛直混合スキームにはMellor(2001)⁵⁾のレベル2.5クロージャーモデル、海面フラックスの算定にはKondo(1975)⁶⁾の手法、自由水面の追跡にはVOF法(Hirt and Nichols, 1981)⁷⁾を採用している。また、寒候期の気象条件によっては渤海の一部は結氷するため、本研究では海面の結氷・解氷過程をモデル化し、大気-海洋間における熱交換量を補正した。

水質・底質モデルは水中および底泥中におけるC-N-P-O循環を解析する構造(図(4)-4)になっており、低次水界生態系による一次生産、有機物の好気・嫌気分解、水質-底質の物質交換などの素過程が考慮されている。本モデルにおける植物プランクトンは、*P. dentatum*を想定した渦鞭毛藻、暖候期・寒候期それぞれにおいて優占化しやすい特性を有する珪藻の3種に大別されている。渦鞭毛藻については、後述の海水マイクロコズムで明らかになった渦鞭毛藻の密度躍層への集積特性に基づいて、海水と渦鞭毛藻の密度差による影響(浮力・抵抗力と重力の釣り合い)を考慮した鉛直移動式(Stokes' law)を導き、モデルに組込んだ。また本モデルには、陸棚域の水塊・水質形成に長江希積水がどの程度寄与しているかを明らかにするため、上記物質の他に数値トレーサを導入した。数値トレーサは水中における生成・消滅および沈降等が一切生じない仮想物質とした。

2) 数値シミュレーション条件

解析対象領域は東経117~131度、北緯24~41度の海域とし、解析対象期間は2004~2010年とした。水平解像度は25×25分(概ね東西方向27km、南北方向28km)、鉛直方向は可変格子で22層(層厚2~250m)とした。海底地形のデータはJTOPO30 (MIRC)を使用し、渤海の一部については海図より読み取った水深を与えた。気象条件は2004年についてはJRA-25 (気象庁・電力中央研究所提供)および2005~2010年はJCDAS (気象庁提供)のT106ガウス格子の6時間値を使用した。水平方向の境界条件として、台湾暖流(流入条件、台湾海峡)、黒潮(流入条件、台湾島~西表島間)、黒潮(流出条件、薩摩半島~種子島間)、対馬海流(流出条件、対馬海峡)にそれぞれ1.1、11.0、9.3、2.8Svを与え、水温・塩分および各種水質については日本海洋データセンター(JODC)にて収録・公表されている1990年以降の各層測定データの統計値(水温・塩分は月別統計値)を与えた。数値トレーサについては、長江希積水(CDW)、黒潮(KSW)、台湾暖流(TWW)の3つの流入水塊のトレーサ濃度を1に設定した。

長江流域からの汚濁負荷流出量に対する東シナ海の水質・生態系の応答を明らかにするため、長江流域からの窒素・リン負荷量を次のとおり設定した。まず再現計算(CTL)では、サブテーマ3-1)



図(4)-4 水質・底質モデルの構造

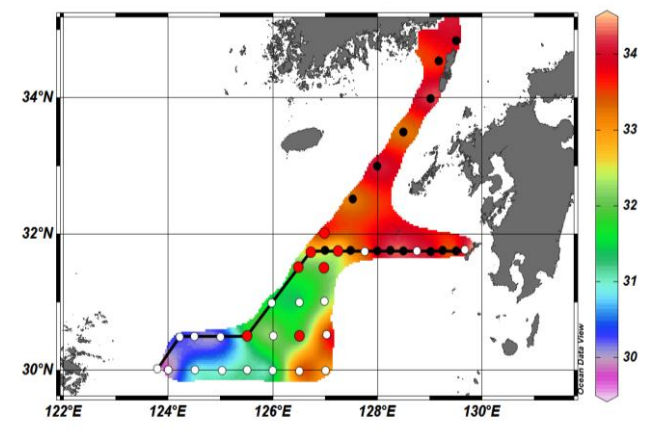
で算定された大通水文観測点より上流域からの流出量と長江河口・デルタからの流出量、すなわちSWATによる日別計算値と原単位法による汚濁負荷流出推定値(年間値、汚濁負荷発生量より流出率0.5を仮定して算出)を併せた値を汚濁負荷流出量とした。これを基準として、1980年代中頃のN負荷量を想定して、窒素・リンの負荷量を50%削減した条件の計算(NP50)、および窒素のみ負荷量を50%削減した条件の計算(N50)を実施した。

4. 結果及び考察

(1) 陸棚域における硝酸濃度・乱流強度の鉛直プロファイル観測による*P. dentatum*群集への栄養塩供給動態の把握

SY10航海の全44測点(測点01~44)のうち、本研究で着目する*P. dentatum*が優占・準優占的に出現したのは陸棚中部と縁辺に位置する測点08、10、12(測点09)、24、27、39(測点41)、43の合計7測点(図(4)-2の赤丸で表示)であった。ここで優占・準優占的出現の分類は、Chl.*a*極大層試料の*P. dentatum*細胞数が植物プランクトン総細胞数の30%以上であることを条件とした。

水深10mの塩分水平分布を図(4)-5に示す。調査最西端の測点35は塩分30以下で長江淡水の影響が顕著であった。塩分は、東に向かって徐々に上昇し外洋水(黒潮分岐流)の存在する東経128度以東で34以上に達した。*P. dentatum*出現海域の水深10m塩分は概ね31~33で、SY07の解析結果と同様に長江起原水と外洋表層水の境界海域であった。



図(4)-5 SY10航海10m水深の塩分分布

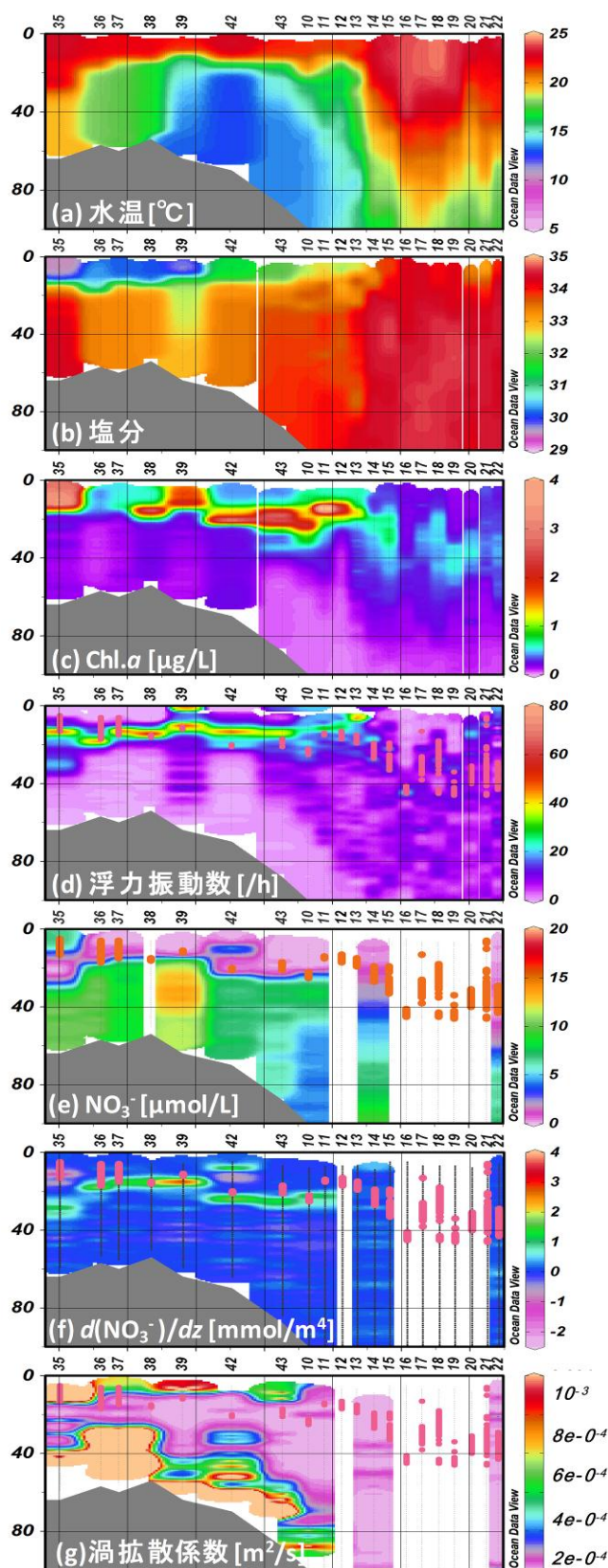
最西端の測点35から最東端の測点22までの測線(図(4)-2)の水温(a)、塩分(b)、Chl.*a*濃度(c)、浮力振動数 N (d)、硝酸濃度 NO_3^- (e)、鉛直方向の硝酸濃度の勾配 $d(\text{NO}_3^-)/dz$ (f)、鉛直渦拡散係数 K_z (g)の分布断面を図(4)-6に示す。浮力振動数は密度躍層の強さを表す物理量で水温・塩分から求めた。また図(4)-6の(d)~(g)では、Chl.*a*鉛直分布を測点毎に0~1の数値に規格化し、各測点の最大Chl.*a*の80%以上が存在した水深に印(図中の赤丸)を付した。この印は高Chl.*a*水の水深を示すと共に、Chl.*a*ピーク幅の特徴を表す。例えば、測点42では水深20~21mにChl.*a*が集中し、且つ幅の狭い鋭いピークであることを示す。一方測点18では、水深18~33m間に相対的に高い濃度でChl.*a*が存在するが、その分布は幅広いことを意味する。

最西端の測点35から陸棚縁辺の測点13間では、水深20m以浅に浮力振動数の極大が見られ、強い密度躍層を形成していた。高Chl.*a*水深は、長江淡水の影響が最も強い測点35では密度躍層上の混合層内に出現したが、*P. dentatum*の出現頻度が高い測点39~12間では密度躍層の下方であった。密度躍層の弱い測点14以東の測点ではChl.*a*分布水深は深くなり、また鉛直方向の分布幅が広がる傾向が見られた。

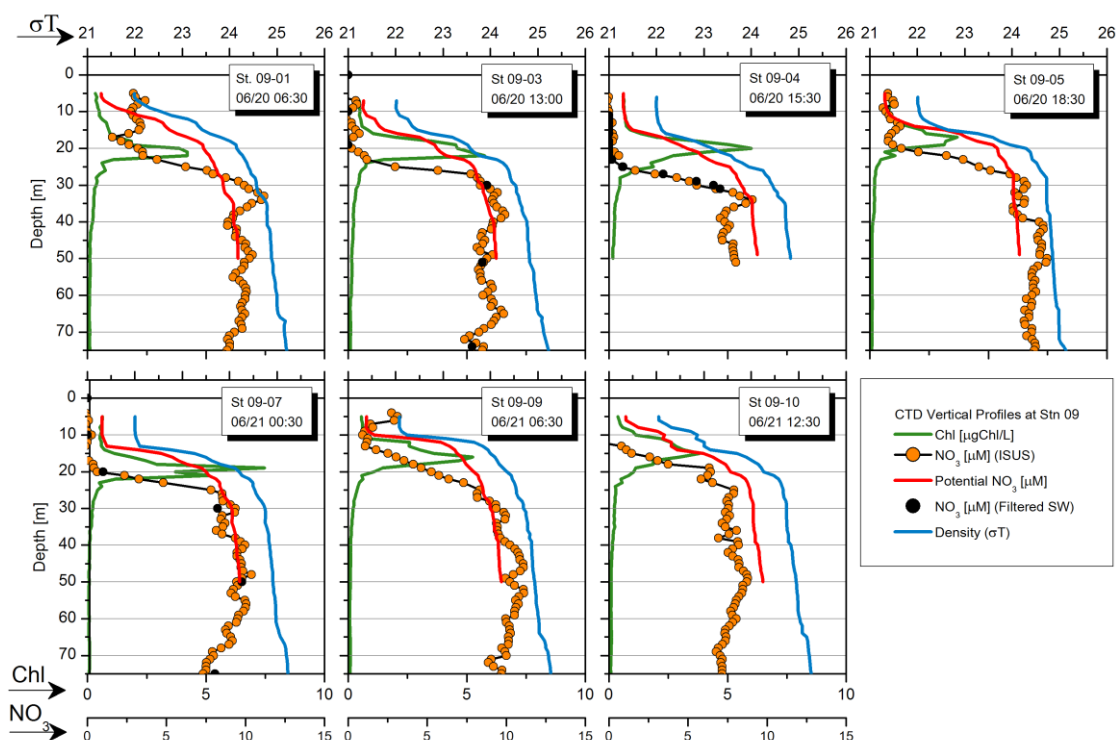
測点35などの長江淡水の影響が強い海域では混合層内に長江淡水を直接的な起源とする硝酸(最大 $6\mu\text{mol/L}$ 程度)が存在し、混合層内の植物プランクトン(測点35では珪藻が優占)への硝酸供給を担っていたと考えられる。一方、長江淡水の影響が弱まる測点39~12間の陸棚中部・縁辺

では混合層内の硝酸は全域に亘ってほぼ枯渇しており、植物プランクトンは長江淡水起源の栄養塩では維持されない。したがって、測点39~12の海域の*P. dentatum*をはじめとする植物プランクトンは、躍層下に5~15 $\mu\text{mol/L}$ 濃度で存在する硝酸に依存していると考えられる。ただし、図(4)-6の(e)に示すように、硝酸の豊富な底層水は、密度躍層やその下の高Chl.a水深よりもさらに下方に存在し、*P. dentatum*のChl.aピークは、 $>1\text{mmol/m}^4$ の濃度勾配を有する硝酸躍層内あるいは直上に分布している。乱流シアーなどの実測値から求めた鉛直渦拡散係数は、高Chl.a水深の直下や硝酸躍層形成水深において他の水深（陸棚表層や底層に比べて小さな値（ $<2 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ ）が得られており、穏やかな混合過程が進む水深で植物プランクトン群が栄養塩を消費することにより、密度躍層とは異なる水深に硝酸躍層を形成させる原因となっていると考えられる。植物プランクトンの硝酸消費による濃度勾配の形成は鉛直上方への硝酸フラックスに対して正の効果を及ぼす一方、数 $\mu\text{gChl.a/L}$ 程度の植物プランクトンの存在により硝酸躍層形成が観測されるのは、硝酸躍層水深の渦拡散係数が非常に小さく、硝酸濃度勾配形成による硝酸フラックス増加よりも、その水深における弱い混合が植物プランクトンへの硝酸供給の制限因子となっていることが示唆された。

密度躍層と硝酸躍層の間に高Chl.a水深が形成される現象に関連して、*P. dentatum*が優占的に出現した定点観測点（測点09-01~09-10）のデータを用い、窒素収支の解析を行った。この定点観測は図(4)-6の東西断面図の測点12と同じ緯度・経度において、6月20日から21日にかけて約30時間に亘って実施した。最大Chl.aは測点09-03の鉛直プロファイルで得られた水深23.5mにおける7.2 $\mu\text{gChl.a/L}$ である。このChl.aピークに含ま



図(4)-6 SY10航海・測点35~22観測線断面図

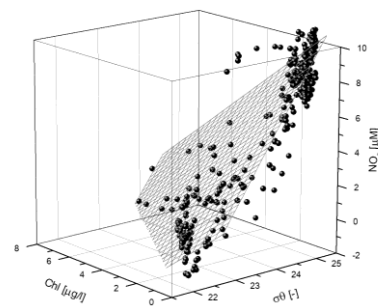


図(4)-7 SY10航海、連続観測点09-01～09-10におけるChl.a、NO₃⁻、密度 (σ_T) 鉛直プロファイルの変化

れる植物プランクトン細胞の約90%が*P. dentatum*であった (細胞濃度=760 cells/mL)。

測点09-01～09-10のChl.a、海水密度 (σ_T)、硝酸濃度 (ISUSおよび採水試料分析値) の鉛直プロファイルを図(4)-7に示す。硝酸は下層で高く (>10μM) 表層で枯渇 (検出限界以下) している。硝酸濃度が物理的な海水混合によってのみ支配されている条件では、硝酸濃度の変化する水深は海水密度の変化する水深と一致すると考えられるが、東西測線の断面など (測点39～測点12間) でも示されているように密度躍層と硝酸躍層水深には5～10mの差が存在した。Chl.aピークは、躍層下の硝酸枯渇層もしくは硝酸濃度が急激に変化する水深に存在した。東西測線で考察したように、これは*P. dentatum*を優占種とする植物プランクトン群による硝酸取り込み速度が下方からの拡散供給速度を上回っていたことを示唆する。

ここで、測点09では定点観測中に栄養塩躍層下の栄養塩濃度が一定で且つ表層では硝酸濃度が0であると仮定し、植物プランクトン現存量を示すChl.aおよび海水密度 (σ_T) を独立変数、硝酸濃度を従属変数として重回帰分析を行った (図(4)-8)。その結果、観測された硝酸濃度はこれらの従属変数によって良く説明され ($R^2=0.85$)、測点09においては1.0μgChl.aの植物プランクトンあたり1.15μmolの硝酸除去に関与していたと示唆される。一方、測点09の植物プランクトンを中心とする懸濁物質 (GF/Fフィルター上の分画) のN/Chl.a比は、約0.63 μmol/μgChl.a (Chl.a極大層の採水試料分析に基づく) であり、実際の除去量 (1.15 μmol/μgChl.a)



$$\text{NO}_3 = 2.99(\sigma_T) - 1.15(\text{Chl.a}) - 64.9$$

$$R^2 = 0.85, n = 349$$

図(4)-8 連続観測点09におけるNO₃⁻濃度のChl.aおよびσ_Tに対する回帰平面

よりも少ない。差分 ($0.52 \mu\text{mol}/\mu\text{gChl.a}$) は、この水柱での懸濁物沈降等による系外除去の履歴を意味するのかもしれない。

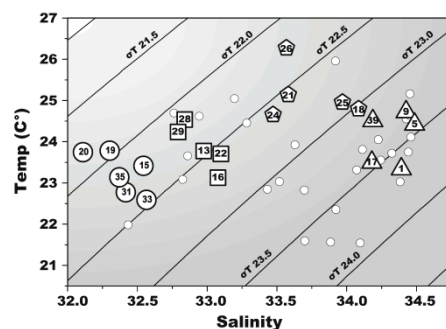
以上の解析から、*P. dentatum*が優占的に出現する6月前後の東シナ海陸棚中部ならびに縁辺海域では、1) 植物プランクトンへの硝酸供給源は、混合層の水塊として存在する長江希积水ではなく、多くの場合、密度躍層下の底層水であること、2) ただし、植物プランクトンは密度躍層よりもやや深い水深を中心として分布することが多く、この植物プランクトン群集による硝酸消費によって密度躍層よりも深い水深に硝酸躍層が形成されること、3) 硝酸躍層は密度躍層下の中層水深での弱い鉛直渦拡散によって持続され、また弱い鉛直渦拡散が密度躍層下の植物プランクトンへの硝酸供給を制御している可能性があることが示唆された。

(2) 陸棚域における渦鞭毛藻(*P. dentatum*)のバイオマスの定量評価、出現水域・環境特定

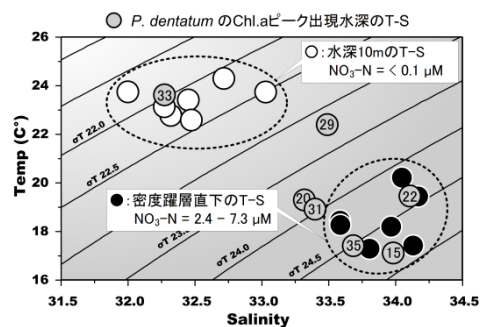
2007年調査(SY10)の水深10mのT-Sダイアグラム解析により表層水の水塊分類を行ったところ、塩分が32~33の長江希积水影響域(CDW)、高温の台湾暖流水(TWW)、さらに高塩分の黒潮亜表層水(KSW)に区分された(図(4)-3、図(4)-9)。CDWと他の水塊の間は境界域(Boundary)と区分した。

渦鞭毛藻*P. dentatum*は、植物プランクトン固定試料を採取した21測点(以下、解析対象測点と呼ぶ)のうち、図1で示した測点31を含め、7測点で優占した(図(4)-3)。これら7測点は表層水塊区分でCDWおよびBoundary海域と一致した。各測点の*P. dentatum*のChl.aピークは、7測点中5測点がT-Sダイアグラム上、表層のCDW水塊ではなく底層水塊に現れ、密度躍層の直下に出現していた(図(4)-10)。また*P. dentatum*ピークおよび表層の栄養塩($\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$)は検出限界以下の枯渇状態(e.g. $\text{NO}_3\text{-N} < 0.1 \mu\text{M}$)、Chl.aの下方では $\text{NO}_3\text{-N}$ で $2.4 \sim 7.3 \mu\text{M}$ 存在していた。表層混合層あるいは密度躍層内にChl.aピークが形成された測点33、29を除けば、*P. dentatum*の出現水深や栄養塩の鉛直構造はSY10と類似していた。

解析対象測点の出現植物プランクトンは、渦鞭毛藻綱(Dinophyceae)、珪藻綱(Bacillariophyceae)など9種類の綱が確認された。これらの植物プランクトン綱に特徴的に含まれる10種類の補助色素(Peridinin、Fucoxanthin等)を選択しCHEMTAX解析に用いた。全ての試料に対して共通の補助色素/Chl.a比行列(F)を求めたところ、行列内に異常な要素値が得られ顕微鏡観察から予想される組成と明らかに異なる結果を得た。これは様々な環境から採取した試料には同一綱であっても異なる補助色素/Chl.aを有する場合があるためと考えられた。このため規格化した色素分析値のデータセットにクラスター解析(WARD法)を適用し、ユークリッド距離に基づき相同性の高い3グループに分類してFを求めた。その結果、各グループで優占した植物プランクトンの行列要素が既報値に近い値を得た。また各グループを2つのサブグループに分割して求めたFと上位グループのFを比較したところ、少な



図(4)-9 解析対象測点のT-Sダイアグラム



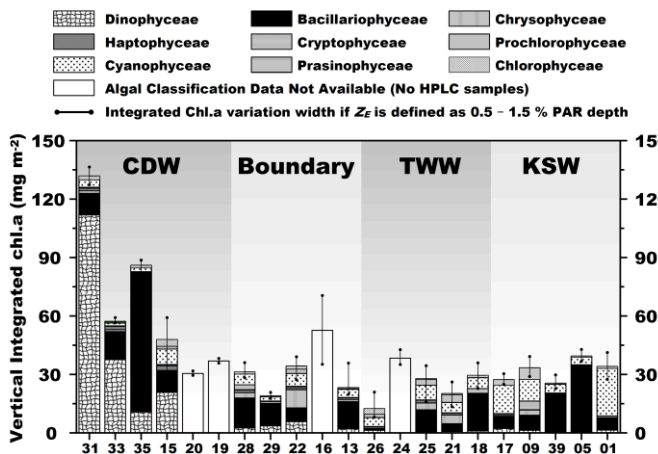
図(4)-10 *P. dentatum* Chl.aピークのT-S特性

くとも優占種に関する行列要素の変動は小さかったため上位3グループの分割で得られるFを各グループの適用行列とした。

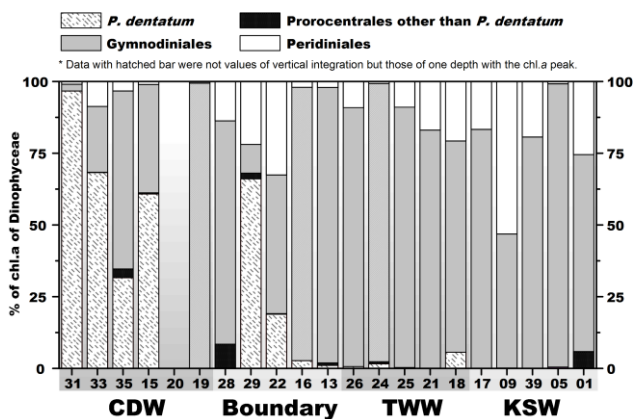
解析対象測点の各網のChl_{A,E}合計 (Σ Chl_{A,E}) は、132 (測点31) ~12.5 (測点26) mg/m²であり、CDW海域で顕著に高く、その他の海域間では大きな差は見られなかった (図(4)-11)。またCDW海域では渦鞭毛藻の寄与が高く (>50%)、他の海域では珪藻や藍藻が優占的であった。

植物プランクトン固定試料の画像解析による渦鞭毛藻のChl.a寄与率評価では、CDW海域の渦鞭毛藻は*P. dentatum*に由来することが示された (図(4)-12)。また各層試料のCHEMTAX解析および画像解析から得られる渦鞭毛藻Chl.aを比較したところ両者に高い相関が示された (図(4)-13)。CHEMTAX解析と画像解析の結果を結合しΣ Chl_{A,E}に占める*P. dentatum*の割合を求めたところ、CDW海域では、Σ Chl_{A,E}の46.5%が*P. dentatum*に由来することが明かになった (図(4)-14)。

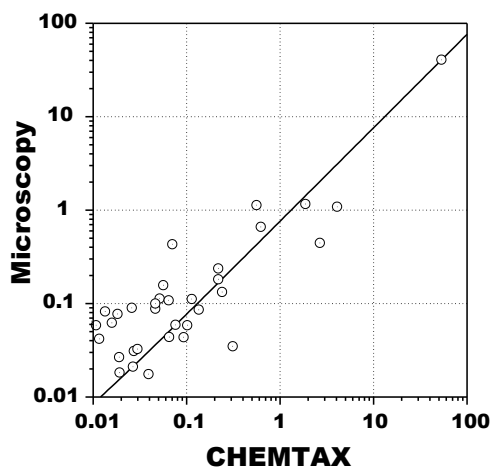
以上のように2007年6月の東シナ海における*P. dentatum*の現存量あるいは優占率は長江淡水の影響を強く受ける海域 (CDWおよびBoundary海域) で極めて高かったことが明かとなり、陸棚における*P. dentatum*の出現と長江沿岸水のCDWを通じた輸送に密接な関連があることが示唆する。一方、前節で記述したSY10航海の解析



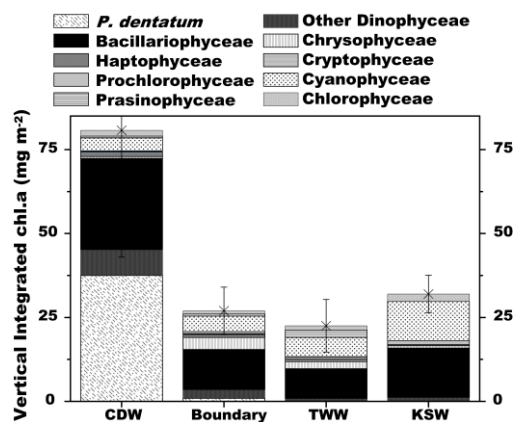
図(4)-11 各測点の有光層Chl.aと植物プランクトン網組成



図(4)-12 各測点の渦鞭毛藻Chl.a組成 (画像解析)



図(4)-13 渦鞭毛藻Chl.a推定値の比較

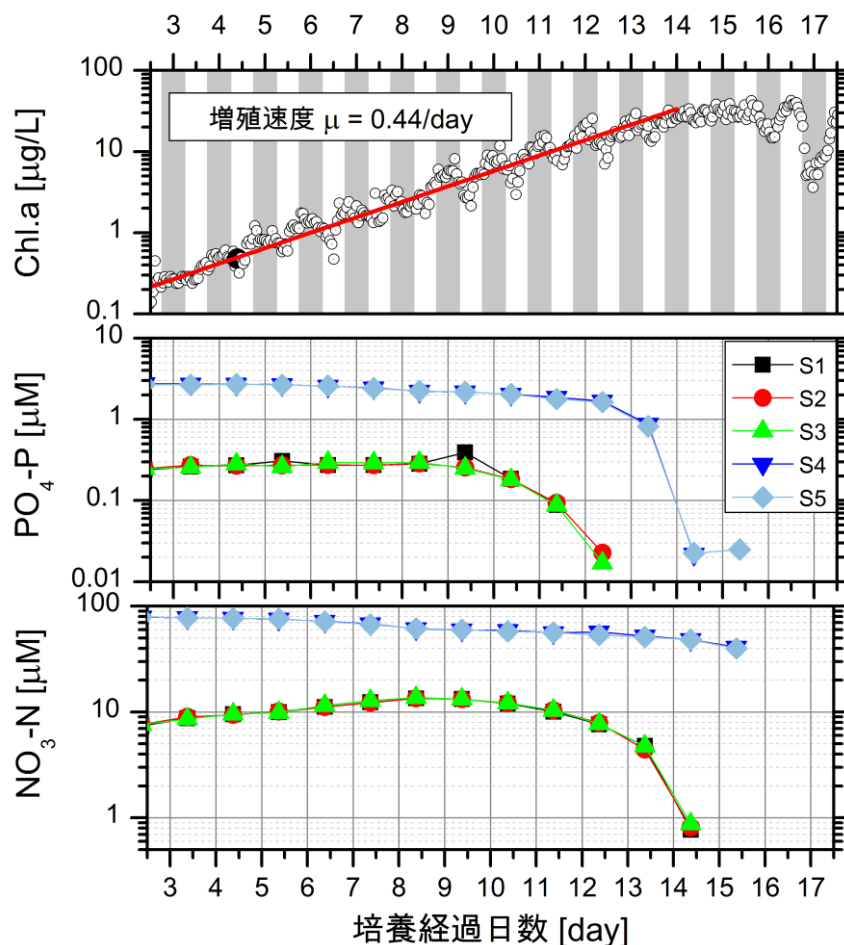


図(4)-14 各水域の植物プランクトン網組成と*P. dentatum*の優占率

結果と同様に、*P. dentatum*出現海域のCDWやBoundary海域の表層水の栄養塩（ $\text{NO}_3\text{-N}$ や $\text{PO}_4\text{-P}$ ）は枯渇状態で、且つ*P. dentatum*の出現水深は表層混合層よりもむしろ密度躍層下に見られることが多い。したがって、長江希釈水は長江河口沿岸から陸棚中部や縁辺域への*P. dentatum*の輸送に関与するが、*P. dentatum*群集拡大や維持は底層水からの栄養塩に強く依存していると結論される。

(3) 大型培養槽を用いた*P. dentatum*の日周鉛直移動特性の把握

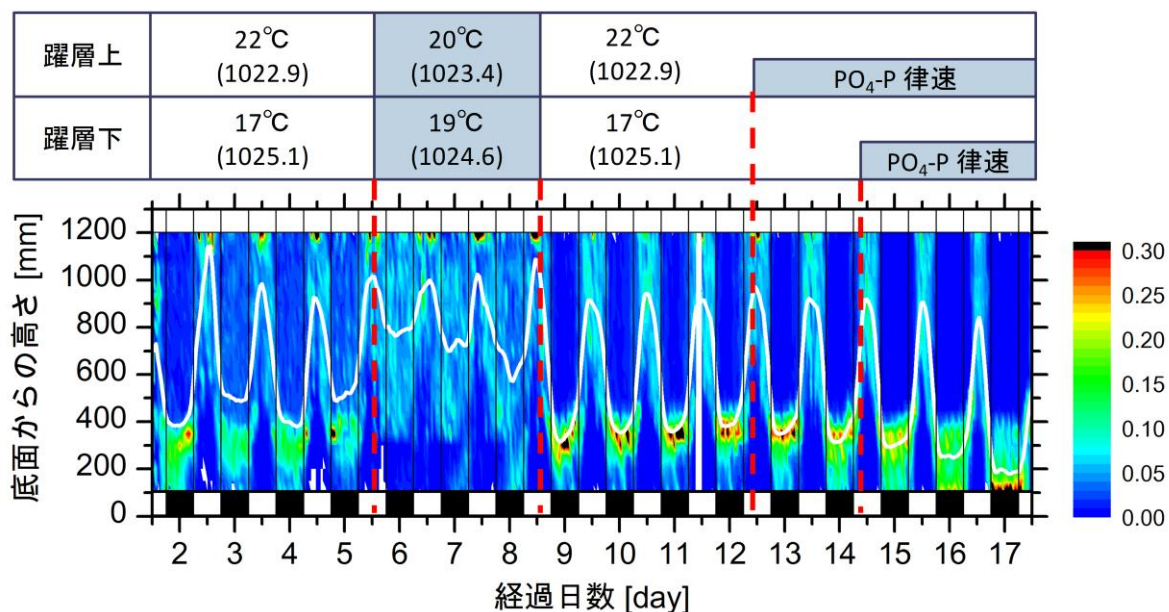
図(4)-15にChl.a蛍光検出器自動昇降システムで計測した*P. dentatum*の鉛直平均Chl.a濃度（1鉛直プロファイル毎の培養槽内平均値）、培養槽の鉛直5層（約300mm間隔）から採取した試水の栄養塩濃度（ $\text{PO}_4\text{-P}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ ）の経時変化を示す。栄養塩試料のS1～S3は水面～密度躍層直上の試料、S4～S5は密度躍層直下～培養槽底の試料である。密度躍層上層（S1～S3）の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は培養開始から9日目までほぼ一定で、その後対数的に減少して12日目に $< 0.02\mu\text{M}$ に至った。密度躍層下層（S4～S5）の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は12日目以降に急激に低下し、14日目以降、 $0.02\mu\text{M}$ 前後に至った。密度躍層下層（S4～S5）に $\text{PO}_4\text{-P}$ に対して過剰に添加した $\text{NO}_3\text{-N}$ （初期NP比=約29）の濃度は、15日目までに初期の $80\mu\text{M}$ から $40\mu\text{M}$ まで低下した。密度躍層上（S1～S3）における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の低下は9日目以降に認められ、14日目には $1\mu\text{M}$ 以下に至った。鉛直平均Chl.a濃度は培養初期から14日目まで対数的な増加、それ以降は鈍化した。14日目までの増殖速度 μ は $0.44(\text{day})^{-1}$ と見積もられた。対数



図(4)-15 大型培養槽を用いた*P. dentatum*培養実験における槽内Chl.a鉛直平均値($\mu\text{gChl.a/L}$)ならびに鉛直5層の $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度(μM)の経時変化

増殖の停止は14日目の密度躍層下の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の低下と同調しており、P律速により増殖が停止したと考えられる。また密度躍層上の $\text{PO}_4\text{-P}$ は12日目に枯渇しており、少なくとも12~14日目の*P. dentatum*への $\text{PO}_4\text{-P}$ 供給は密度躍層下からの供給に依存していたと考えられる。

図(4)-16に*P. dentatum*の槽内鉛直分布の経時変化を鉛直プロファイル毎の相対分布として示す。図中の白線はChl.aの鉛直累積値の中央水深(分布中心)である。14日目までの対数増殖期間では、分布中心は明期に水面近くまで上昇し、暗期に培養槽350mm付近(密度躍層形成水深)に下降し、且つ培養槽底面まで下降することはなかった。全層に亘って $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が増殖律速濃度に至った14日目以降の分布中心の経時変化は、実験終了まで一部の細胞が日周鉛直移動を継続したが、密度躍層下まで沈降し滞留・沈積する細胞が増加した。また暗期の密度躍層形成水深への集積傾向は、密度差 $\Delta\sigma_T=2.2$ (躍層上 22°C 、躍層下 17°C の水温条件)を設定した培養初期~5日目間および8~14日目間において特に顕著であったのに対し、躍層上下の水温をそれぞれ 20°C 、 19°C に変更した5~8日目では、分布中心の経時変化は継続的な日周鉛直移動を示唆するが、躍層水深付近への集積傾向は、前後の期間・水温条件の場合と比較して弱かった。



図(4)-16 Chl.a蛍光を指標とした大型培養槽内の*P. dentatum*鉛直分布(鉛直積算値に対する相対分布)の経時変化。図中の白線はChl.aの鉛直累積値の分布中心。底面から350mm高付近に水温・塩分の密度躍層を形成し、実験5日目、8日目の1200に躍層上下の水温変更により海水比重を変化させた。本系では $\text{PO}_4\text{-P}$ が増殖制限栄養塩であり、12日目に躍層上で、14日目に全層に亘って増殖律速に達した。

これらのことから、対数増殖過程にある*P. dentatum*は日周鉛直移動動作を行い、且つ密度躍層が細胞の下降・沈降範囲を制限していることが明かとなった。また5~8日目の水温条件変更に伴う*P. dentatum*の躍層への集積傾向の抑制現象は、細胞と細胞外海水の比重差が本種の日周鉛直移動の挙動に大きな影響を及ぼしていることを示唆すると考えられる。5日目の水温条件の変更による上層の海水比重の変化は、 1022.9kg/m^3 から 1023.4kg/m^3 までの 0.5kg/m^3 増である。海水比重の増大に伴って*P. dentatum*細胞に作用する浮力が急激に増加し、その結果、下方への沈降・密度躍層への集積抑制がもたらされたと考えられる。また実験5日目までおよび8~14日目までの密度躍層への集

積現象に関しても、*P. dentatum*の増殖層が主に比重 1022.9 kg/m^3 の上層であり、上層で増殖した*P. dentatum*が下降・沈降した際に、比重 1025.1 kg/m^3 の下層あるいは密度躍層において強い浮力を受け、細胞が集積するメカニズムの存在が推定される。

東シナ海で*P. dentatum*が優占的に出現する海域では表層混合層の栄養塩が枯渇状態にあり、群集維持のためには底層栄養塩を獲得する必要がある。本実験で得られた日周鉛直移動の再現結果は、混合層内の*P. dentatum*が昼間に混合層の上部で光を獲得し、夜間に密度躍層水深まで下降することによって、日周鉛直移動をしない植物プランクトン群と比べて光と栄養塩を優位に獲得するポテンシャルがあることを示唆する。サブテーマ1では、2010年6月の*P. dentatum*優占海域（測点9）において、夜間におけるChl.a極大層が溶存酸素濃度極大層よりも深い水深に存在する傾向を明らかにした。この結果は、本再現実験で確認された*P. dentatum*の日周鉛直移動が現場海域においても生じている可能性を支持する。さらに現場観測においてしばしば観測されてきた密度躍層水深近傍の*P. dentatum*のChl.a極大層の形成は、本種と海水比重との相互関係によって説明されるかもしれない。

一方、前節までに記述したように、SY10やSY07調査における*P. dentatum*は、密度躍層の下方に分布中心をもつことも多く、必ずしも密度躍層内や直上に分布していない。この事実は、現場に於いてスナップショットとして観測される*P. dentatum*の垂表層集積などの鉛直分布が、海水密度変化以外の要因、例えば光条件、密度躍層と栄養塩躍層水深の乖離、*P. dentatum*群集形成に至る環境履歴（*P. dentatum*群集が観測される前に存在していた海水比重などの環境履歴）や生理状態（対数増殖中の細胞か、栄養塩制限などによって停滞期にある細胞か等）などによっても強く影響を受けることを示唆している。

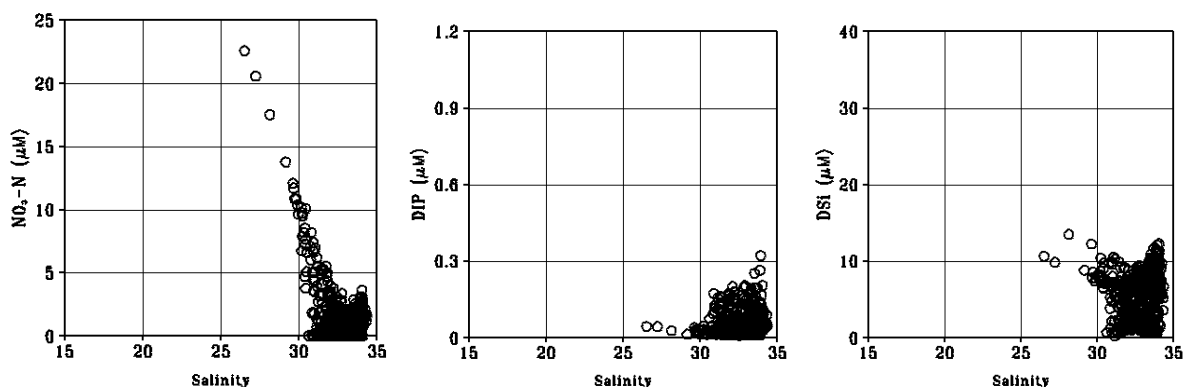
（4）東シナ海の流動・水質・底質モデルの開発・検証と陸域負荷変動の影響予測

1）モデルの観測値再現精度

流動・水質・底質モデルは、検証データが充実している国内フィールド（東京湾および伊勢湾）においてモデルパラメータの調整・再現精度の確認を行った後、東シナ海に適用した。図(4)-17に、サブテーマ1の図(1)-1に示された東シナ海北部大陸棚域（ $30\sim 33^\circ\text{N}$, $124\sim 127^\circ\text{E}$ ）におけるCTL計算で得られた表層の塩分と硝酸($\text{NO}_3\text{-N}$)、溶存無機リン(DIP)、ケイ酸(DSi)の関係を示す。図(1)-7の2000～2011年における観測値と比較すると、表層塩分と $\text{NO}_3\text{-N}$ の負の相関関係が見られること、DIPとDSiについては表層塩分と明確な関係が見出せないことなど、本モデルの表層における計算値は観測値の特徴を良好に再現しているといえる。

SY10航海(図(4)-2)における 30.5°N の東西ライン(Stn 36-41, 27, 28)および 30.0°N の東西ライン(Stn 29-35)における観測値と計算値の鉛直断面の比較を図(4)-18、19にそれぞれ示す。まず、図(4)-18、19(a)を見ると、計算では長江希釈水の浸入が過小評価されたため、CTD観測値に見られる30を下回る表層の低塩分層において計算値と大きな差が見られるが、両者の塩分躍層の位置は概ね一致している。CTD観測値のChl.aのピークはその塩分躍層周辺に見られるが、計算値はその傾向をよく再現している。ただし、東端の陸棚縁辺域においては塩分躍層の位置が計算値と観測値で差が見られるため、Chl.aピークの位置もうまく再現できていない。

次に図(4)-18、19(b)の硝酸濃度を見ると、躍層より上層で枯渇・下層で高濃度といったISUSの観測値に見られる概ねの傾向については計算でも再現されているが、躍層より下層の硝酸濃度の



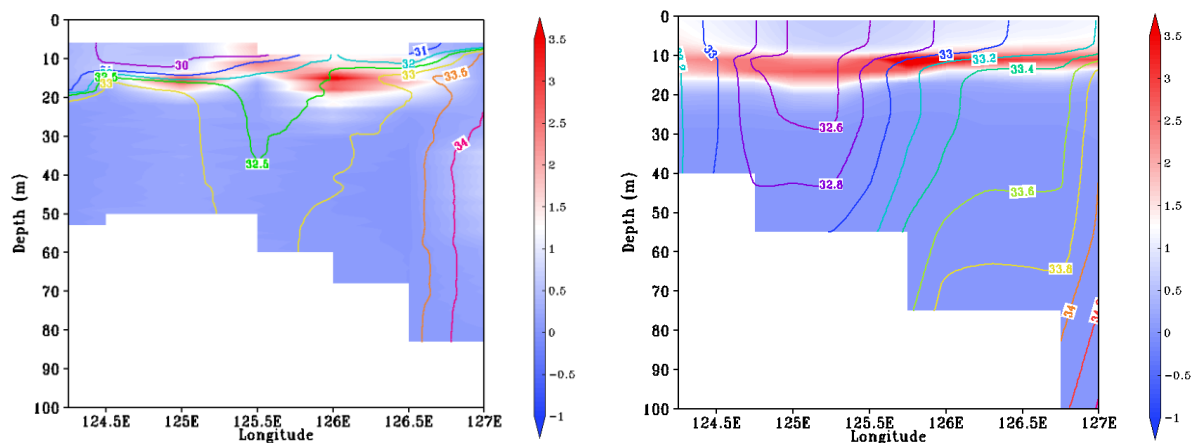
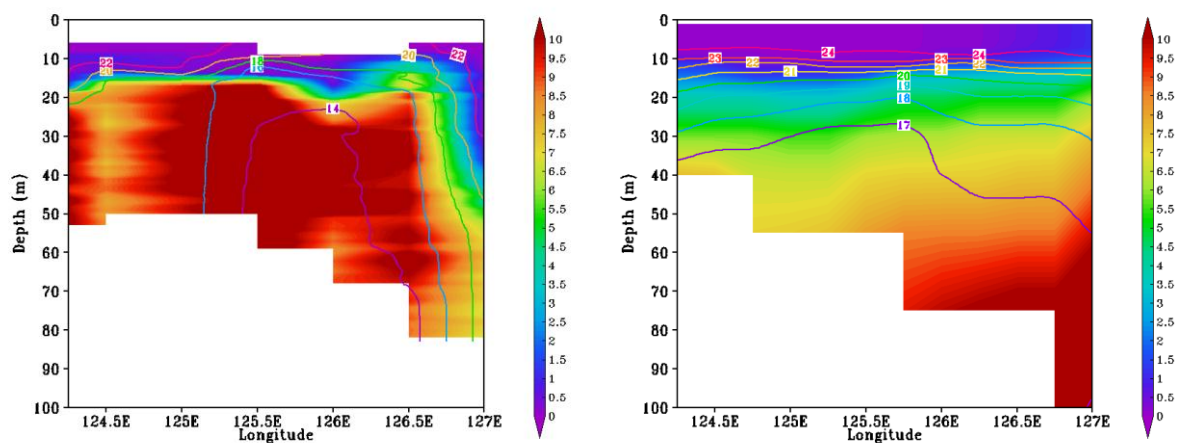
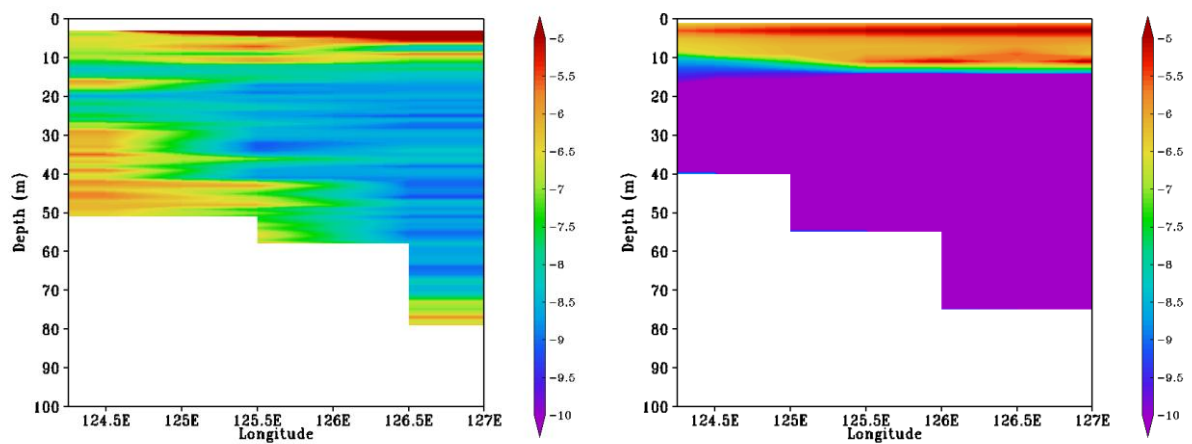
図(4)-17 5～10月における東シナ海北部大陸棚域の表層塩分－栄養塩濃度関係の再現結果(位置は図(1)-1、観測値は図(1)-7参照。計算値は2006年5～10月の各月1及び15日の結果を抽出。)

分布に観測値と計算値で大きな差が見られる。とくに、観測値では躍層より下層はほぼ均一の硝酸濃度であるのに対し、計算値の方は深くなるにつれて硝酸濃度が高くなる傾向にある。それに加え、ISUS観測値は図(4)-19の南側ラインより図(4)-18の北側ラインの方が下層の硝酸濃度が顕著に高いが、計算値にはその傾向はあまり見られない。

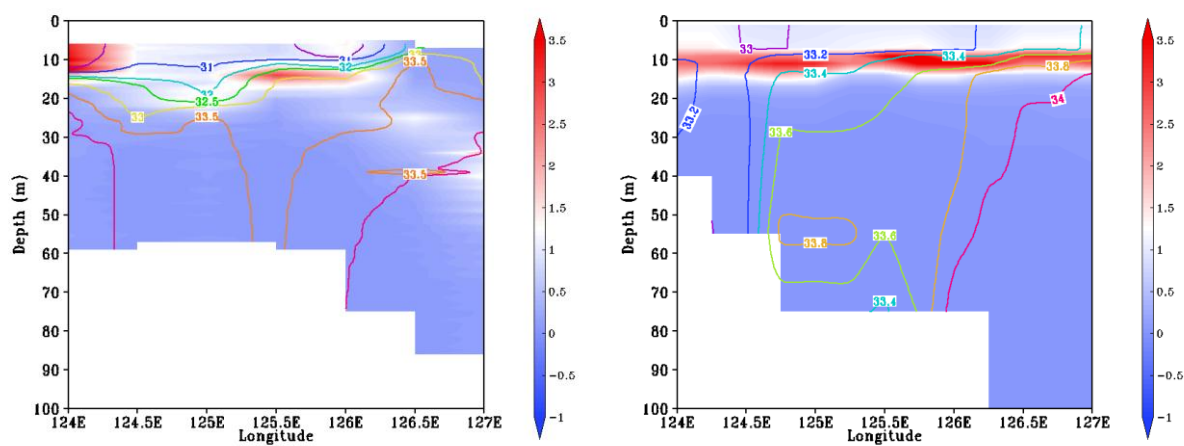
下層の硝酸濃度の観測値と計算値に大きな差が現れる原因として次の2つが考えられる。まず一つ目の原因として、陸棚域における海底混合層の再現性が不十分であることが挙げられる。図(4)-18、19(c)のTMで得られた観測値と計算値の乱流エネルギー散逸率を比較すると、表層混合層では両者の値のオーダー並びに混合層の厚さは概ね一致しているが、下層については観測値の方は表層混合層に匹敵する乱流エネルギー散逸率があるのに対し、計算値ではほぼ鉛直混合が発生していない状況である。その結果が図(4)-18、19(a)(b)の躍層より下層における塩分・水温・硝酸濃度に現れており、これらの計算値の鉛直変化量は観測値よりも大きくなっている。海底混合層は主として海底摩擦による流速シアーによって発達するが、本モデルでは潮汐を考慮しておらず、海底摩擦の乱流エネルギーの生成が過小評価されていると考えられる。下層の再現精度を向上させるためには、流動モデルに潮汐を導入する、あるいは鉛直混合スキームに潮汐の影響をパラメタライズ化して与えるなどといったことが必要と考えられる。

二つ目の原因としては、下層における水平(南北)方向に周辺とは異なる水塊の流入が疑われる。図(4)-18(b)の観測値の水温を見ると、下層の125.5-126.5Eにかけて水温が顕著に低い水塊が存在し、その水塊では硝酸濃度が周辺よりも高いことが分かる。図(4)-19(b)の南側ラインについても、北側ラインより顕著ではないが、同様の水温の低い水塊が見られる。これについては黄海底層冷水の浸入が疑われるが、現時点では断定できない。本モデルにおいてこの水平方向の底層水の浸入は図(4)-18、19(a)(b)の水温・塩分の等値線よりその形跡が若干見出せるが、観測値ほど顕著ではなく、十分に再現できているとはいえない。

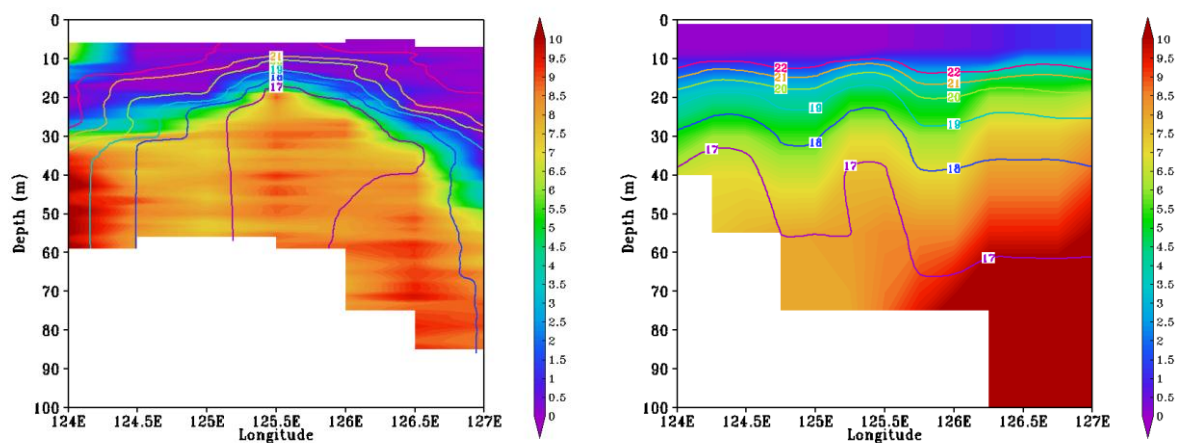
本モデルのCTL計算では上記に加え、2007年および2009年の初夏に陸棚域で観測された50 $\mu\text{g/L}$ を超える渦鞭毛藻赤潮についても十分に再現できていない。上述の海底混合層ならびに多量の硝酸が含まれる水塊の浸入が本モデルで再現できていないことを踏まえると、その原因には下層から上層に向かう栄養塩の供給が実際より過小評価されているためと考えられる。本モデルの再現精度を向上させるためには、これら2点についての改善が不可欠であり、今後の課題である。

(a) Chl.*a* (段彩、 mg/m^3)と塩分(等値線)(b) 硝酸濃度 (段彩、 mmol/m^3)と水温(等値線、 $^{\circ}\text{C}$)(c) 乱流エネルギー散逸率 (段彩、 m^2/s^3)

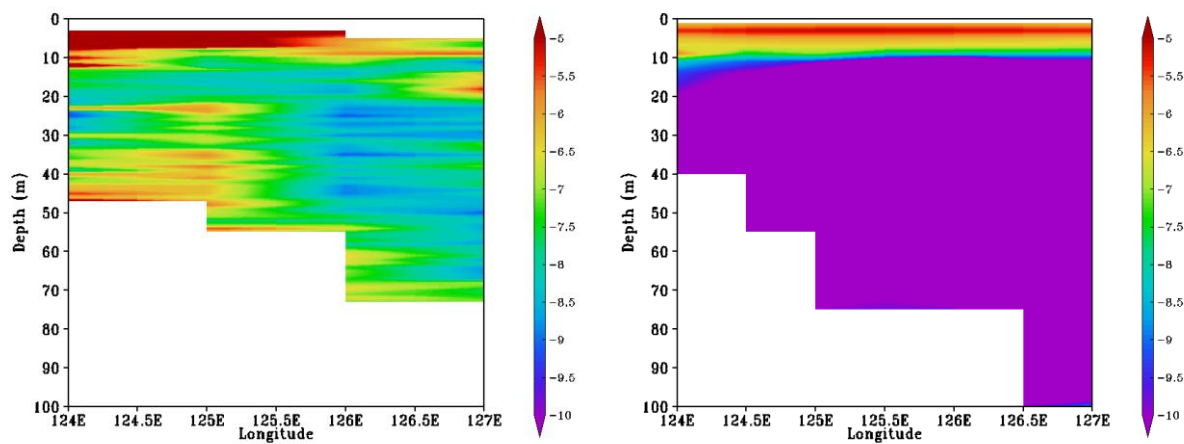
図(4)-18 2010年6月における 30.5°N ライン鉛直断面の観測値(左段、SY10)と計算値(右段、2010年6月26日)の比較



(a) Chl.a (段彩、 mg/m^3)と塩分(等値線)



(b) 硝酸濃度 (段彩、 mmol/m^3)と水温(等値線、 $^{\circ}\text{C}$)



(c) 乱流エネルギー散逸率 (段彩、 m^2/s^3)

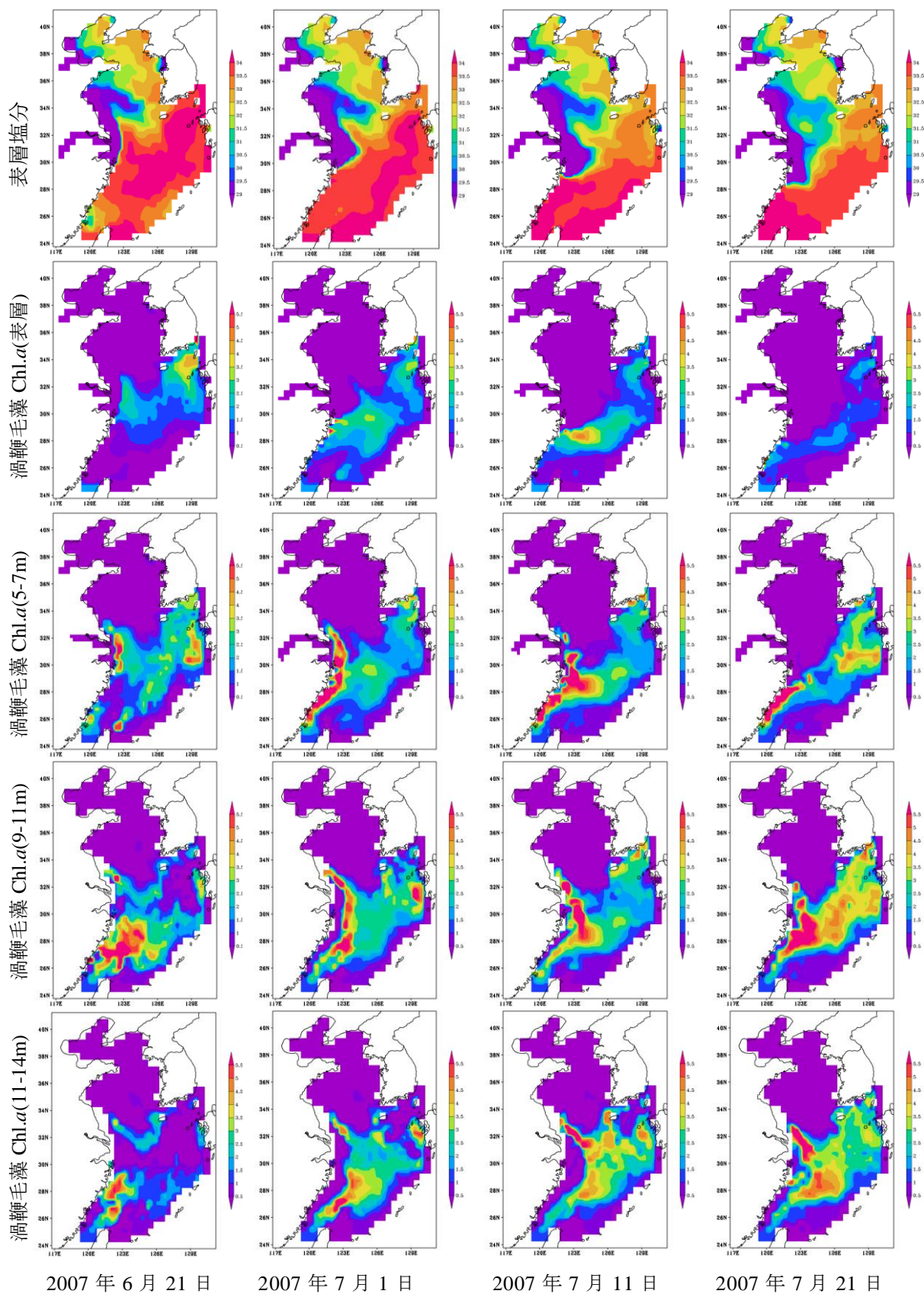
図(4)-19 2010年6月における 30.0°N ライン鉛直断面の観測値(左段、SY10)と計算値(右段、2010年6月26日)の比較

2) 初夏の陸棚域における渦鞭毛藻の発生に関する考察

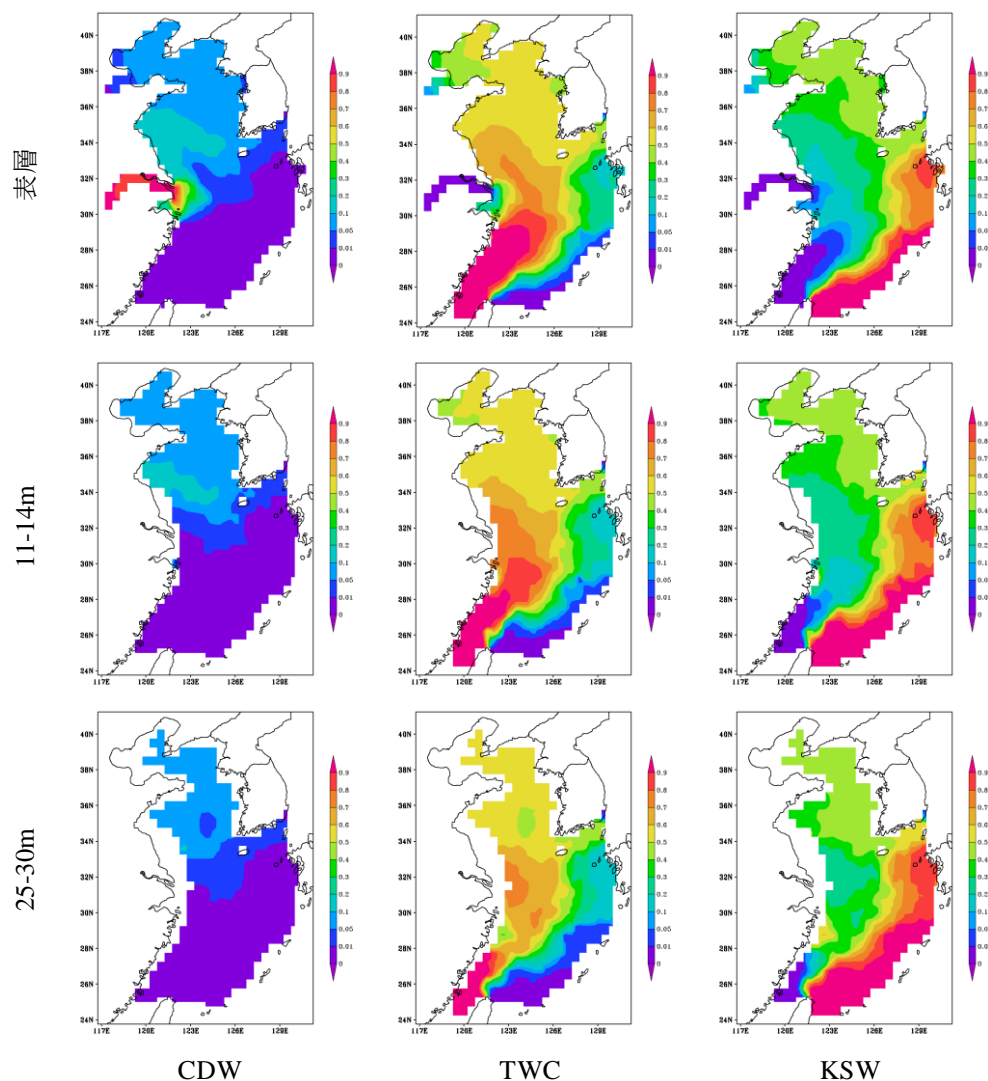
図(4)-20に2007年6月21日、7月1日、7月11日、7月21日における表層塩分および表層、深さ5-7m、9-11m、11-14mの渦鞭毛藻Chl.aの計算結果を示す。表層塩分を見ると、6月21日に長江河口およびその北側にある長江希积水は時間が進むにつれて南・東方向に広がっている様子がわかる。6月21日には、長江河口域の深さ5-7mおよび長江河口より南側の沿岸部の9-11m、11-14mにおいて渦鞭毛藻の集積が見られるが、7月1日にはそれらが繋がって長江河口より南側の大陸沿岸部全体で比較的高濃度のChl.aになっている。その後、長江希积水の南・東進に伴い、その高濃度領域は次第に陸棚中央に移動・拡散していることが分かる。

我々がこれまでに渦鞭毛藻の高密度発生を観測した陸棚中央部(124°-126°E、30°-32°Nあたり)における渦鞭毛藻の発生・供給源を図(4)-20より考察すると、長江河口部の比較的深いところ(深さ11-14m)と、長江河口より南側の大陸沿岸部の比較的浅いところ(深さ5-7m)の2箇所が考えられる。初夏の陸棚中央部は、前者の南東進と後者の北東進が交差する位置にあたり、大陸沿岸部で発生した渦鞭毛藻が比較的通過・集積しやすい場であると考えられる。

図(4)-21に2010年7月1日における数値トレーサ実験の結果を示す。陸棚中央部の水塊はいずれの深さも台湾暖流の影響を強く受ける海域であることが分かる。長江希积水の影響は表層でも高々10%程度であり、一見すると陸棚中央部の水塊形成に寄与しないように見えるが、本結果は長江希积水、台湾暖流、黒潮いずれも流入点におけるトレーサ濃度を同じ1に設定したものであり、長江希积水に含まれる栄養塩濃度は他の2者に比べて数十倍高いことに注意を要する。しかし、上記2箇所の渦鞭毛藻の発生・供給源の水塊に着目すると、南側の大陸沿岸部は当然であるが、長江河口部の深さ11-14mにおいても長江希积水の影響はほとんどなく(1%以下)、台湾暖流が支配的な領域であることが分かる。1)で述べたように本モデルにはいまだ改善すべき点、とくに海底混合層の再現性に問題が残されているため断定はできないが、渦鞭毛藻の長江河口・大陸沿岸域の発生、および陸棚中央部における高密度出現には台湾暖流による外洋起源の栄養塩供給に大きく関与していることが示唆される。



図(4)-20 2007年初夏の渦鞭毛藻 Chl.a(mg/m³)と表層塩分の経時変化

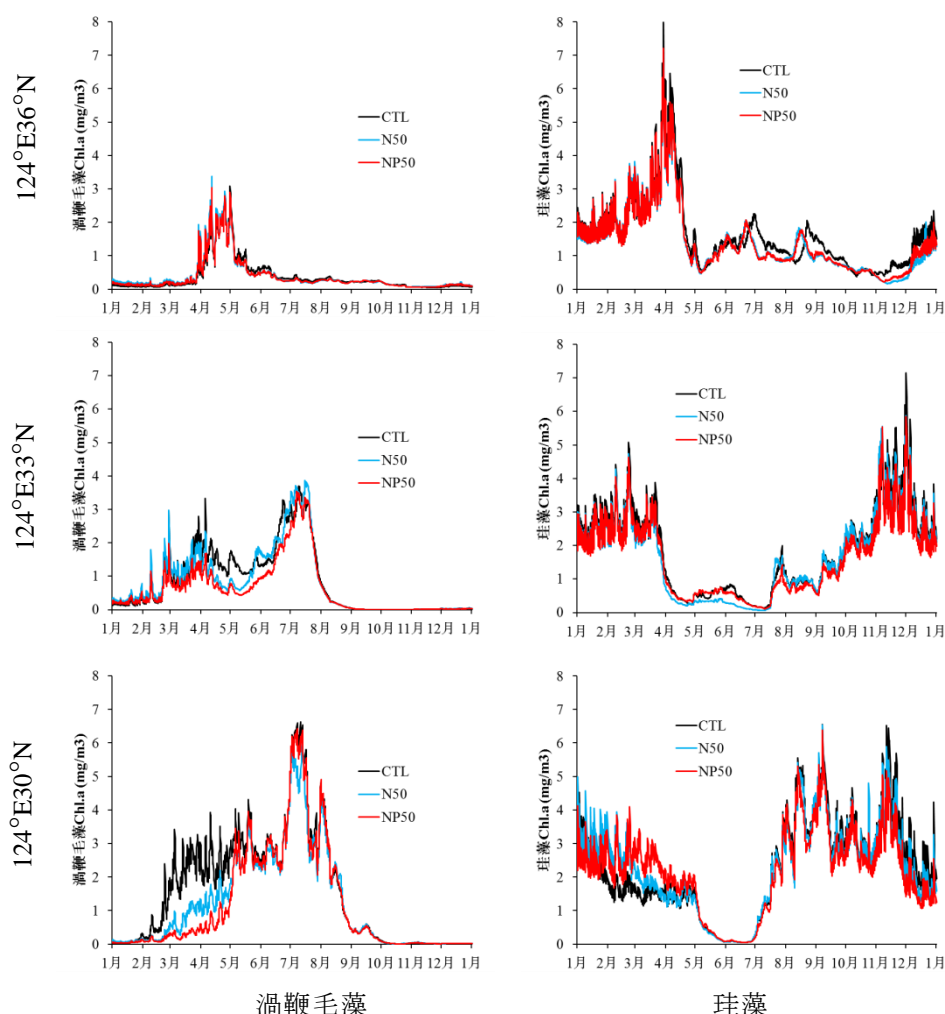


図(4)-21 2007年7月1日の数値トレーサ濃度の分布

3) 陸域負荷量削減に対する陸棚域の植物プランクトンへの影響評価

長江流域・河口デルタからのNP負荷量を変化させて行ったNP50およびN50、およびCTLシミュレーションの結果を比較し、陸域負荷量削減に対する陸棚域の植物プランクトンへの影響を考察する。図(4)-22に $124^{\circ}\text{E}36^{\circ}\text{N}$ 、 $124^{\circ}\text{E}33^{\circ}\text{N}$ 、および $124^{\circ}\text{E}30^{\circ}\text{N}$ の3点における渦鞭毛藻および珪藻Chl.a極大値の2010年の経時変化を示す。また、表(4)-1に図(4)-22に示した各計算結果の年平均値・最大値、6-7月平均値・最大値を示す。

初夏6-7月における図(4)-22のCTL、N50、NP50の計算結果を比較すると、NP負荷量を大幅に削減したにも関わらず、いずれの地点も渦鞭毛藻・珪藻ともに顕著な差が見られないことが分かる。表(4)-1によると6-7月の陸棚中央部($124^{\circ}\text{E}30^{\circ}\text{N}$)では、N50の渦鞭毛藻Chl.aの平均・最大値がCTLに対して10~11%、NP50の珪藻Chl.a平均値が11%程度の減少しか見られない。この結果は、前節で図(4)-21より明らかにされたように、初夏の陸棚中央部は台湾暖流の影響を強く受ける海域であるため、長江流域・河口デルタの流出負荷量の変動に対しての応答は当然小さいと考えられる。



図(4)-22 陸域負荷量削減に対する Chl.a 極大値の経時変化 (2010 年)

表(4)-1において、比較的Chl.aの年平均値と年最大値の減少がともに大きいところは、124°E36°Nと124°E33°Nの珪藻である。図(4)-22の珪藻Chl.aを見ると、124°E36°Nでは3月下旬～4月上旬に、124°E33°Nでは11月に高い値を示しているが、減少が顕著な時期は特に見せず、年間を通じて平均的にChl.aが減少していることが分かる。124°E30°Nにおける珪藻の減少量は小さいことを踏まえると、両地点は長江希积水の影響が高い海域にある(図(4)-21)ため、124°E30°Nとは逆に長江流域・河口デルタの流出負荷量の影響を受けやすい海域であると考えられる。

124°E30°Nの渦鞭毛藻Chl.aは、前述のように初夏は陸域負荷量の影響をあまり受けなかったが、年平均値では有意に減少している。図(4)-22を見ると明らかであるが、その陸域負荷量の影響は春先にとくに顕著であることが分かる。一方、同時期の珪藻Chl.aを見ると、陸域負荷を削減したとき(N50・NP50)の値はCTLのときよりも大きい。これらの結果は、陸域負荷量を削減したことによって植物プランクトンの優占種が変化したことを示しており、逆にいえば、近年の陸域負荷量の増大によって東シナ海の植物プランクトン種の変化が生じた可能性があるといえる。また、陸域負荷の質の変化についても影響は大きく、陸域負荷削減形態が異なるN50とNP50の結果を比較すると、陸棚中央部における渦鞭毛藻Chl.a平均値・最大値のCTLに対する減少量は窒素・リンの両

表(4)-1 陸域負荷量削減に対するChl.a極大層の平均値・最大値の変化
(括弧内の百分率はそれぞれCTLの値に対する比率)

(a) 年平均値

位置	渦鞭毛藻 Chl.a (mg/m ³)			珪藻 Chl.a (mg/m ³)		
	CTL	N50	NP50	CTL	N50	NP50
124°E36°N	0.37 (100%)	0.38 (102%)	0.36 (98%)	1.58 (100%)	1.39 (88%)	1.41 (89%)
124°E33°N	0.82 (100%)	0.79 (96%)	0.62 (75%)	1.78 (100%)	1.62 (91%)	1.59 (89%)
124°E30°N	1.55 (100%)	1.20 (77%)	1.15 (74%)	2.23 (100%)	2.23 (100%)	2.16 (97%)

(b) 年最大値

位置	渦鞭毛藻 Chl.a (mg/m ³)			珪藻 Chl.a (mg/m ³)		
	CTL	N50	NP50	CTL	N50	NP50
124°E36°N	3.09 (100%)	3.38 (110%)	3.04 (99%)	8.11 (100%)	7.11 (88%)	7.22 (89%)
124°E33°N	3.70 (100%)	3.87 (105%)	3.55 (96%)	7.15 (100%)	5.87 (82%)	5.85 (82%)
124°E30°N	6.64 (100%)	6.00 (90%)	6.42 (97%)	6.56 (100%)	6.54 (100%)	6.38 (97%)

(c) 6-7月平均値

位置	渦鞭毛藻 Chl.a (mg/m ³)			珪藻 Chl.a (mg/m ³)		
	CTL	N50	NP50	CTL	N50	NP50
124°E36°N	0.37 (100%)	0.30 (81%)	0.30 (81%)	1.45 (100%)	1.21 (84%)	1.19 (82%)
124°E33°N	2.32 (100%)	2.41 (104%)	2.02 (87%)	0.58 (100%)	0.41 (71%)	0.45 (77%)
124°E30°N	3.87 (100%)	3.44 (89%)	3.74 (97%)	0.94 (100%)	0.93 (99%)	0.84 (89%)

(d) 6-7月最大値

位置	渦鞭毛藻 Chl.a (mg/m ³)			珪藻 Chl.a (mg/m ³)		
	CTL	N50	NP50	CTL	N50	NP50
124°E36°N	0.71 (100%)	0.57 (80%)	0.56 (79%)	2.26 (100%)	2.07 (92%)	2.07 (91%)
124°E33°N	3.70 (100%)	3.87 (105%)	3.55 (96%)	2.00 (100%)	1.70 (85%)	1.43 (71%)
124°E30°N	6.64 (100%)	6.00 (90%)	6.42 (97%)	3.95 (100%)	3.88 (98%)	3.87 (98%)

方を削減したNP50のときよりも窒素のみを削減したN50の方が大きいことが分かる。サブテーマ(1)及び(3)-1の結果によると、近年の長江流域からの負荷量はNが増加、Pが減少傾向であり、N/P比の増加が渦鞭毛藻優占化に関与している可能性が指摘されているが、本シミュレーションで得られた傾向はそれを裏付けた結果といえる。本モデルにおける植物プランクトンの種交代についての検証は現時点では十分とはいえないが、N負荷量の抑制とP負荷量の適切な管理が東シナ海の環境保全に重要であると考えられる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

東シナ海陸棚域における植物プランクトン組成に関する既往文献は必ずしも豊富ではなく、近年の東シナ海生態系の変調の兆しと考えられる*P. dentatum*の優占化についても知見は限定的であった。本サブテーマでは2007年6月の東シナ海海域について水塊分布と植物プランクトンの網別出現量を有光層内のChl.*a*基準で評価することにより、*P. dentatum*が長江希积水影響域を中心として分布し、且つ長江希积水影響域における*P. dentatum*の優占率が50%近いことを明らかにした。さらに2010年の航海調査では、光学センサーによる硝酸塩濃度ならびに微細乱流プロファイラによる鉛直シアー分布を観測することで、陸棚域における植物プランクトンへの栄養塩供給が密度躍層下方における硝酸躍層（栄養塩躍層）によって影響を受けている可能性を明らかにした。東シナ海で単離した*P. dentatum*の培養実験では、本種が日周鉛直移動能を有する渦鞭毛藻であること、また下降動作では密度躍層に集積する特徴があることを明らかにした。本サブテーマで開発した流動生態系モデルでは、これらの海洋観測・室内実験結果に基づく素過程モデルを構築することで、既存の流動生態系モデルに比較して、鞭毛藻類の亜表層集積・鉛直分布特性の再現性が大幅に向上することが明らかとなった。サブテーマ(2)、(3)-1が行った長江流域圏から東シナ海への汚濁負荷流出量（日変化データ）を本サブテーマで開発した流動生態系モデルに与えることにより、2000年代の東シナ海低次生態系の再現計算を行った。その結果、春季の長江河口南部における赤潮が海流の季節変動により初夏の東シナ海陸棚域に輸送され、初夏の陸棚域における渦鞭毛藻*P. dentatum*の優占化を引き起こす可能性が示唆された。一方、現在の長江汚濁負荷推計値を基準として仮想的な負荷削減を設定したところ、長江河口域や黄海で赤潮発生の抑制効果が現れたが、陸棚の渦鞭毛藻への効果は限定的で、陸棚域中央部の渦鞭毛藻の消長は長江や長江河口付近の直接的な汚濁負荷よりも外洋水起源の栄養塩に強く依存していることが示唆された。

本サブテーマで開発した東シナ海流動生態系モデルは既存の類似モデルに比較して東シナ海低次生態系を特徴付ける鞭毛藻の出現に関してより高い再現性を有する。しかしながら、本研究期間においては室内実験系で検証された日周鉛直移動は素過程モデル構築のための知見が不十分であり導入していない。また現場観測で得られた陸棚における乱流構造・栄養塩の鉛直分布の再現性が十分とは言えず、これらの点が長江負荷削減に対する低次生態系応答の計算結果に大きな影響を及ぼしている可能性が考えられる。今後、本研究で得られた成果を学術論文として取りまとめると共に、現在考慮が不十分な素過程に関する検討を行い、より信頼性の高い東シナ海流動生態系モデルを構築することで、将来の中国陸域負荷動向に対する東シナ海環境の予測に貢献していくことを本課題終了後の方針として掲げたい。

(2) 環境政策への貢献

本サブテーマの担当研究者が委員を務めるPICES（北太平洋海洋科学機関：日・米・中・韓・露・カナダ政府間機関）やUNEP/NOWPAP（北西太平洋行動計画：日・中・韓・露参加）のPOMRACのICARM（流域圏－沿岸域環境統合管理）作業部会等を通じて本研究の成果の広報・普及に努め、東シナ海をはじめとするアジアの国際的な海洋環境政策に科学的知見を提供していく予定である。

6. 国際共同研究等の状況

中国浙江海洋学院とのMOU「東シナ海の海洋生態系環境及び生物資源の順応的管理技術開発研究に関する国際共同研究」に基づき中国沿岸環境変遷について共同で情報収集を行った。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 越川海、東博紀、河地正伸、長谷川徹、岡村和麿、清本容子：2009年度日本海洋学会春季大会（2009）
「初夏の東シナ海陸棚域における渦鞭毛藻の優占的出現」
- 2) Koshikawa H, Higashi H, Kawachi M, Hasegawa T, Okamura K, Kiyomoto Y, Nishiuchi K, Akiyama H, Kohata K, Murakami S: PICES-2009 annual meeting, Jeju, Korea (2009)
“Predominance of dinoflagellates *Prorocentrum dentatum* on the central continental shelf of East China Sea in Early Summer, 2007”
- 3) 東博紀：名古屋大学地球水循環研究センター共同研究集会（2010）
「数値トレーサ実験による東シナ海陸棚域の水塊形成に関する考察」
- 4) 越川海：名古屋大学地球水循環研究センター共同研究集会（2010）
「初夏の長江起源水域における渦鞭毛藻の出現と定量評価」
- 5) 清本容子、長谷川徹、秋山秀樹、岡村和麿、西内耕、岡慎一郎、五味泰史、佐々木宏明、越川海、東博紀：2011年度九州沖縄地区3学会合同シンポジウム「東アジア域での大気海洋相互作用と越境汚染研究の現状」（2011）
「東シナ海長江希釈水影響域における低次生態系の変調と長江からの栄養塩負荷変動との関連把握」
- 6) 長谷川徹、清本容子、五味泰史、佐々木宏明、東博紀、越川海：2012年度日本海洋学会春季大会（2012）
「東シナ海の渦鞭毛藻*Prorocentrum dentatum*の優占化と維持機構：調査船調査による観測結果の解析」
- 7) 越川海、宮崎紘一、東博紀、長谷川徹、西内耕、清本容子、岡村和麿、河地正伸：2012年度

日本海洋学会春季大会(2012)

「東シナ海の渦鞭毛藻*Prorocentrum dentatum*の優占化と維持機構：大型培養槽による日周鉛直移動の再現実験」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Oakey NS: J. Phys. Oceanogr., 12, 256-271 (1982)
“Determination of the rate of dissipation of turbulent energy from simultaneous temperature and velocity shear microstructure measurements”
- 2) Mackey MD, Mackey DJ, Higgins HW, Wright SW: Mar. Ecol. Prog. Ser., 144, 265-283 (1996)
“CHEMTAX - A program for estimating class abundances from chemical markers: Application to HPLC measurements of phytoplankton”
- 3) Montagnes DJS, Berges JA, Harrison PJ, Taylor FJR: Limnol. Oceanogr., 39, 1044-1060 (1994)
“Estimating carbon, nitrogen, protein, and chlorophyll-a from volume in marine-phytoplankton”
- 4) Nakamura T, Tanaka R, Yabe T, Takizawa K: J. Comput. Phys., 174, 171-207 (2001)
“Exactly conservative semi- Lagrangian scheme for multi-dimensional hyperbolic equations with directional splitting technique”
- 5) Mellor GL: J. Phys. Oceanogr., 31(3), 790-809 (2001)
“One-dimensional, ocean surface layer modeling: A problem and a solution”
- 6) Kondo J: Bound.-Layer Meteor., 9, 91-112 (1975)
“Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions”
- 7) Hirt CW, Nichols BD: J. Comput. Phys., 39, 201-225 (1981)
“Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries”

Development of Integrated Environment Management Method for Changjiang River Basin to Conserve Sound Environmental Conditions in East China Sea

Principal Investigator: Hiroshi KOSHIKAWA

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)

Onogawa 16-2, Tsukuba, Ibaraki 305-8506 Japan

Tel: +81-29-850-2505 Fax: +81-29-850-2569

E-mail: koshikaw@nies.go.jp

Cooperated by: Seikai National Fisheries Research Institute, Rissho University, Nagoya University, Center for Environmental Science in Saitama

Key Words: Changjiang River Basin, East China Sea, Nitrogen, Phosphorus, Marine ecosystem

[Abstract]

Environmental pollution in the Changjiang River Basin (CRB) and the subsequent impacts on the East China Sea (ECS) are poorly understood. We assessed the impact of pollutant-loading from the CRB on the coastal waters of the ECS. Using statistical and field data we quantified nitrogen/phosphorous emissions in the CRB to elucidate potential changes in the marine environment and the response of the marine ecosystem on the continental shelf during the last decade. We analyzed changes in the types of emissions (i.e. agricultural, urban, and lifestyle), especially in the Changjiang River delta (CRD). We developed numerical models for water and pollutant movement from the CRB to the ECS. The parameters for the models included: hydrologic-hydrodynamic and biogeochemical processes, simulated rain discharge, pollutant loading from the CRB and the ECS current.

The simulations indicated a three-fold increase of nitrate discharge from the CRB (excluding CRD) when compared to data from the 1980s. However, this increase in nitrate discharge was non-significant over the last decade. Our estimates of nitrate emissions from the CRD were ~ 10– 15 % of the entire CRB. Shanghai's nitrogen emissions have reduced since 2000, where pollution control measures have been implemented and emission sources from within Shanghai city have been relocated to the surrounding area.

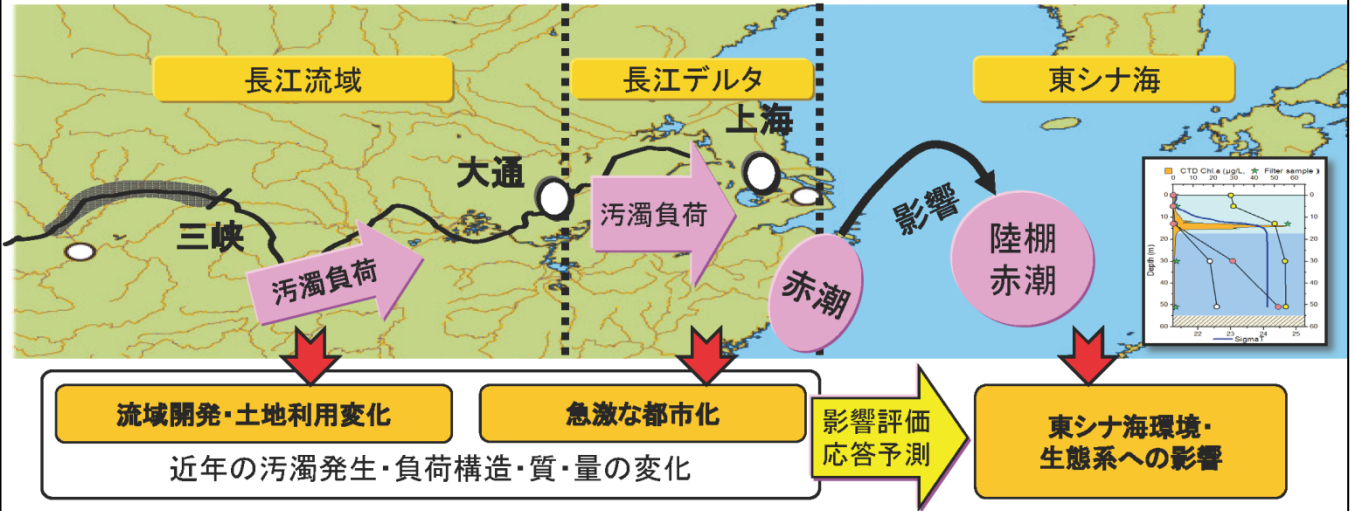
Our fieldwork indicated that the dinoflagellate, *Prorocentrum dentatum*, is one of the dominant phytoplankton species that occur on the continental shelf during early summer. Experimental data indicated that *P. dentatum* is capable of diurnal vertical migration. Therefore, we expect that *P. dentatum* probably uses available nutrients below the pycnoclines in the ECS. Analysis of historical nutrient concentration data, collected during the ECS flood season, suggested that nitrate concentrations increased. In contrast, phosphate concentration decreased during the early part of the new millennium. These results imply that *P. dentatum* can tolerate low-phosphate/high-nitrate conditions, allowing *P. dentatum* to dominant the ECS.

Our simulation models of the ECS current during spring/early-summer suggested the water mass

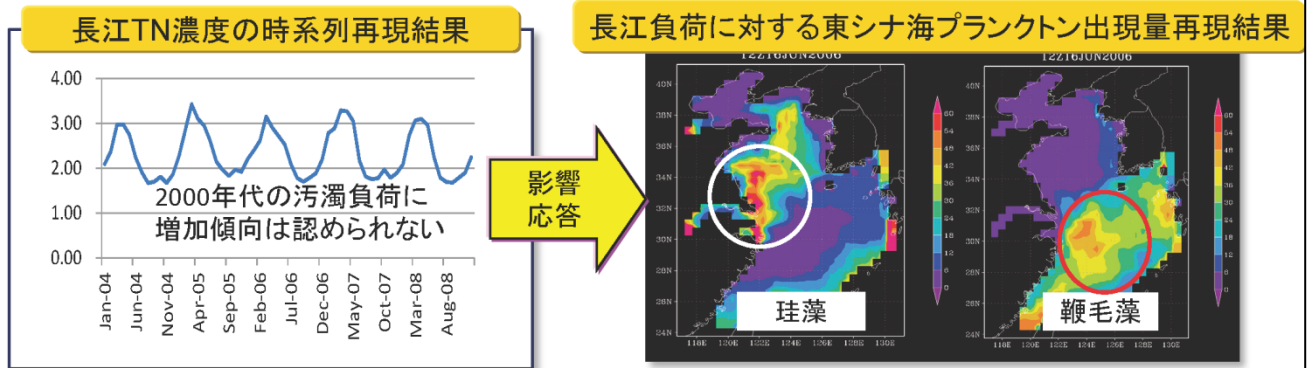
moved from the southern part of the Changjiang estuary to the central ECS. This implies that some phytoplankton in the central ECS originated from the Changjiang estuary. The simulation models using reduced pollutant-loadings indicated the decrease in occurrences of algal blooms in the Changjiang estuary and the Yellow Sea, with only moderate reductions dinoflagellate biomass in the central ECS. Our results suggest that the ECS ecosystem is highly dependent on the oceanic nutrient supply.

【B-0906】「東シナ海環境保全に向けた長江デルタ・陸域環境管理手法の開発に関する研究」の主な成果

1. 東シナ海環境保全推進のためには、長江流域汚濁負荷と東シナ海環境との関連性の科学的説明が必要

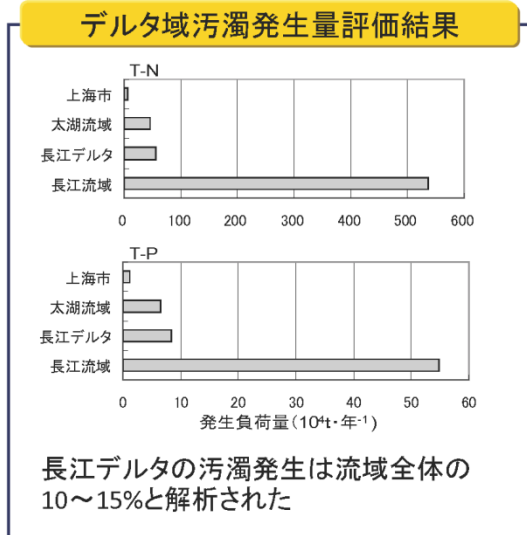


2. 陸域水物質循環モデル(SWAT)と3次元流動・生態系モデルの統合化により、陸域負荷に対する東シナ海生態系の応答特性を評価した。



長江負荷は河口・黄海の珪藻出現に影響が大きい。

3. 長江デルタのフィールド調査・統計情報整理により、デルタ地域の汚濁発生動態を解明した。



4. 海洋観測・過去観測データの解析により、東シナ海環境の変遷、陸棚赤潮の発生機構を解明した。

