

D-061 流下栄養塩組成の人為的变化による東アジア縁辺海域の生態系変質の評価研究

(1) N、P、Si流下比変化による海洋生態系変質の総合解析

独立行政法人 国立環境研究所

水圏環境研究領域

海洋環境研究室

原島 省

平成18年度～20年度合計予算額 55,541千円

(うち、平成20年度予算額 17,099千円)

※上記の合計予算額には間接経費 12,173千円を含む

[要旨] 河川経由の栄養塩流下組成とクラゲ・非ケイ藻類植物プランクトン増加などの生態系変質の間の因果関係を主に「拡大シリカ欠損仮説」を作業仮説とし、モデル、モニタリング、レビューに基づいて検証・考察する。長江のエスチャリー（河口隣接海域）を対象とした2ボックス型の生態系モデルを構築し、エスチャリーから流出する各栄養段階の物質からエスチャリー外で生態系上位生物（クラゲ+魚）のバイオマスに転化される量を「栄養物質移出指数（N.E.I.）」として定義した。この指数は、長江の DIN（溶存無機窒素）が増加し、DSi（溶存ケイ酸）が減少するほど増加する、すなわちエスチャリー外で、クラゲ+魚のバイオマス増加につながることを推定できた。さらに、レビュー結果に基づいた、魚よりもクラゲを有利にする複数要素を考慮すると、増加分が魚よりクラゲに転化される可能性が高いと考察できる。また、モデル、観測結果、レビュー事例が整合するためには、ケイ藻が、春季大增殖の終期に栄養塩枯渇、特に Si の枯渇を感知して自律沈降を起こすことが重要であることが推定できた。この自律沈降でケイ藻が上層で希薄になった時点以降（夏季）では、Si に依存せずしかも沈降しにくい非ケイ藻類が増殖し、夏季上層の食物網を肥大化させ、これが N.E.I.を増加させると考えられる。このように、Si 枯渇→ケイ藻増殖の相対的低下→非ケイ藻類卓越、という従来の「シリカ欠損仮説」よりも、Si 枯渇→ケイ藻の自律沈降→ケイ藻不在による上層の栄養物質残留という「拡大シリカ欠損仮説」が妥当であることが考えられる。これらの事柄から、Si を欠損させるダムなどの流域改変増加や N、P 負荷増大に対するチェックなどの環境管理が必要となることが提言できる。

[キーワード] N:P:Si比、拡大シリカ欠損仮説、ケイ藻自律沈降、栄養物質移出指数、クラゲ

1. はじめに

近年、東アジアの沿岸・縁辺海域において有害赤潮（主に非ケイ藻類植物プランクトンからなる）やクラゲの増加などの生態系変質が報告されている。これらの問題は、各国の閉鎖性海域～半閉鎖性海域～縁辺海域に共通し、この20～30年の間に急激に増加したことからすると、なんらかの人間活動の増大に起因しているとの推定は難くない。想定可能な因果関係のフローをまとめると図1のように表現できる。

これらのうち、物質循環への人為介入に起因するのが炭素（C）と同様の親生物元素である、窒素（N）、リン（P）の動態であり、地域的な問題についてはすでに「富栄養化問題」として議論されているが、国際的な環境政策が必要となりつつある。さらに新規の問題として考慮されはじめ

たのがケイ素（Si）減少の問題である¹⁾。Siは自然の風化溶出によりDSi（溶存ケイ酸、シリカとも呼称）の形で河川に補給されるが、NおよびP負荷の加わる大規模ダムなどの陸上停滞陸水域で淡水ケイ藻がDSiを吸収してBSi（生物態シリカ、シリカ殻）として沈降してしまうため、海域に流下するDSiが減少する。このため、海域でSiを必要とし良好な生態系の基盤であるケイ藻類よりも、Siを必要とせず渦鞭毛藻などの有害赤潮種を含む非ケイ藻類植物プランクトンのほうが有利になることが懸念されている（シリカ欠損仮説）。

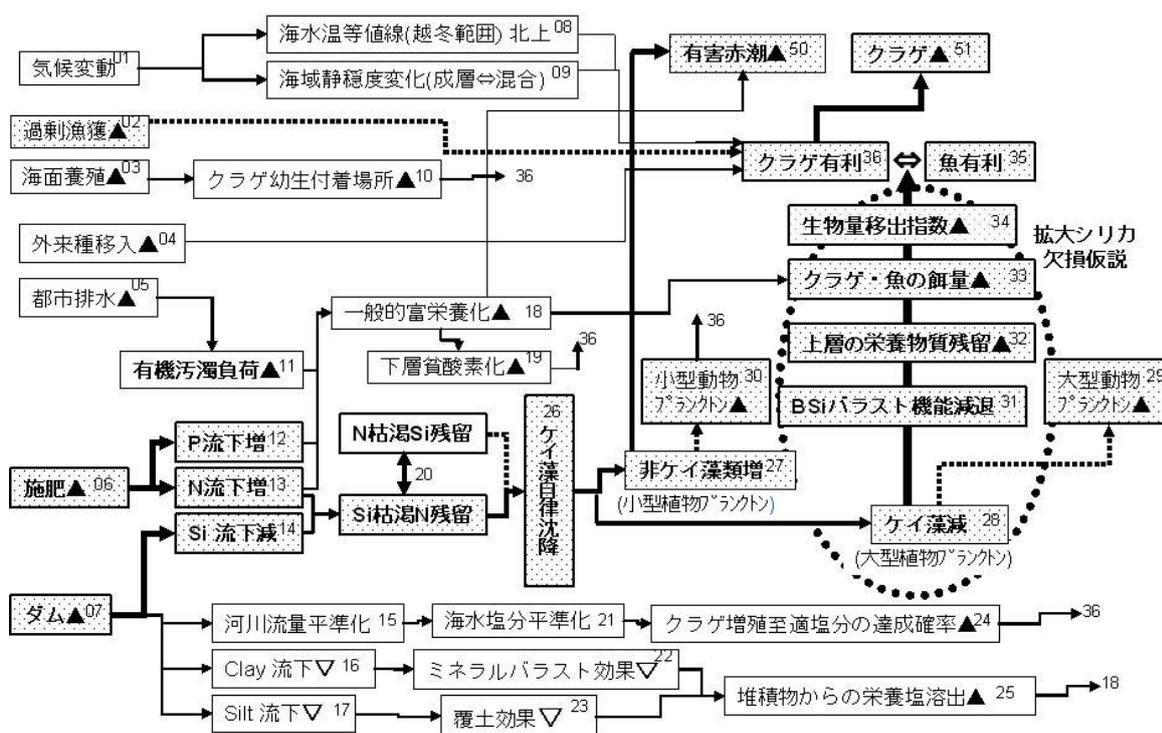


図1.人為影響要因（左側縦列）と有害赤潮やクラゲの増加などの環境変質（右上）の間の推定因果関係。本研究課題では、特に薄墨色部分について観測、既存データ、モデルに基づいた検証を行う。それら以外についても広汎なレビューをおこない、包括的な検証に努める。各項目中の記号▲、▽はそれぞれ増大、減衰のトレンドを示し、各事象の番号nnおよび事象間因果の番号nn-mmについては、本文中の引用に使う。

このような問題の重要性から、2007年にICSU（国際学術連合）傘下のSCOPE（環境科学委員会）、SCOR（海洋科学委員会）、IUGG（国際測地学連合）の共催による「半閉鎖性海域のダイナミックスー栄養塩・懸濁粒子状物質の流入」に関する国際シンポジウムで、環境政策への提言も視野にいたれたグループ討論が行われ、その結果が刊行された²⁾。当課題代表はそのうちの第5章の共著に加わっており³⁾、その趣旨は、統合型モデル、フェリーなどによる海域モニタリング・科学的研究結果を総合化することである。

本研究課題に先行したD-3課題では、主に琵琶湖（仮想定大ダム湖）-淀川-瀬戸内海の水系について「シリカ欠損仮説」を適用し、本来的にシリカ溶出の大きい地質的特性をもつ我国においても、ケイ藻赤潮/非ケイ藻赤潮の別がSiを考慮しないと説明できないことを明らかにした⁴⁾。その反面、Si要求性の相違によるケイ藻/非ケイ藻類の増殖特性だけでは説明できない事象も明らかにな

った。また、すでに推定されていたSi欠損→非ケイ藻植物プランクトン増加→微小動物プランクトン増加→クラゲ増加という因果関係の他に、より適用度の広い推定メカニズムの科学的解明も必要になっている。

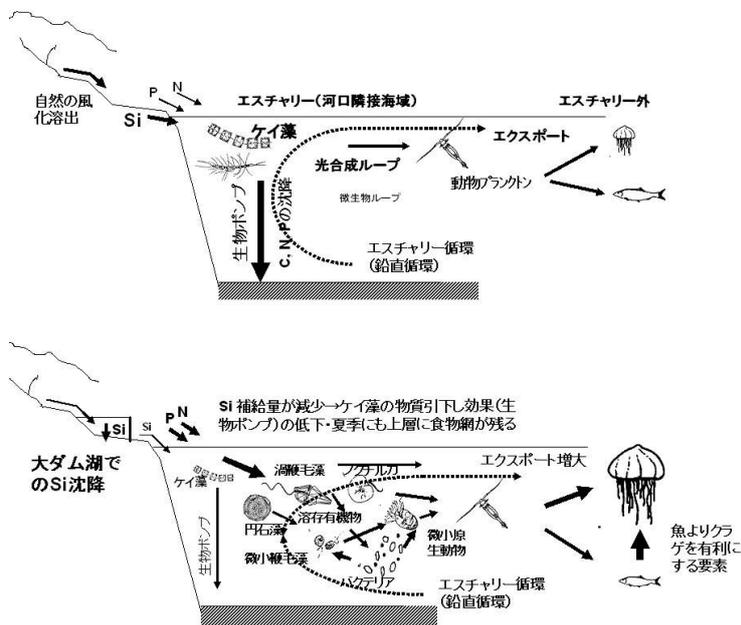


図2. 拡大シリカ欠損仮説の模式図。自然循環型(上)では、シリカ殻のバラスト作用によってケイ藻が上層の栄養物質を引き下ろしていたが、人為影響でN、P流入が増えSi流入が減るとこの機能が減退し、夏季上層に栄養物質が残りやすくなる。

2. 研究目的

上記経緯から、ケイ藻の生物的挙動も含めた議論を進める。ケイ藻は春季大增殖の際にC、N、Pなどの溶存物質を有機化・粒子状化して効率よく下層に引きおろす（生物ポンプ）のに対し、非ケイ藻類はその機能が弱い。このため、上層では、N、P栄養塩およびそれから派生する有機物質（以後、栄養物質と呼ぶ）が残留しやすくなり、これらが河口隣接海域（エスチャリー）から放出されることによって外側の海域で、生態系の上位に位置する肉食生物（クラゲ、魚など）のバイオマス増加につながる可能性がある（図2）この考えを新たに「拡大シリカ欠損仮説」と呼ぶことにする。すなわち「シリカ欠損仮説」に生物ポンプ機能の減退を考慮したものが「拡大シリカ欠損仮説」である。

本研究課題においては、この考えを中心的な作業仮説とし、陸から流入する栄養塩組成比の変化とクラゲ増大や有害赤潮増大などの生態系変質の関連を検証することを目的とする。前節に示すように、因果関係は多岐にわたるため、レビュー、モニタリング、モデルを三位一体とした研究を行う。モニタリングは、単発の詳細な調査よりも、時系列変化と空間的变化を系統的に観測・評価することに重点を置き、フェリーなどの定期航路を利用した長期観測を行う。レビューでは、シリカ欠損関連事象のみならず、図1で示される他の推定因果関係フローについても、一定の検討を行い、包括的な考察・評価を行う。また、モデルでは、各部の表現方式・パラメータ値を順次調整しながら計算結果を観測結果と比較し、推定メカニズムの確度を高めてゆく。モデル設定

を調整したときに計算結果がどう変わるか、観測結果との整合性がとれるかを確認しながらモデルの妥当性を高める。一般的に、モデルにおいて各素過程を逐一動態表現するほどシミュレーションとしての確度は向上するが、その反面、モデルの各部分の自由度が大きくなりすぎて結果の解釈がしにくくなるという難点がある。そこで、ここでは本質的な過程以外は簡略化して取り扱い、さらに通常のPC上で稼働でき、他者との共有も可能なモデルの構築を目指す。本研究におけるモデルは、各栄養塩比 (stoichiometry) を考慮し、植物プランクトンについて2つの機能型 (functional type、ここではケイ素を取り込むか否か) を考慮したことから、Marine Stoichiometric, Functional Type Modelとし、MSFTMと略称することにする。

なお、対象水域として、(a)長江-三峡ダム-東シナ海を主とするが、(b)ドナウ川-アイアンゲートダム-黒海、(c)琵琶湖-淀川-瀬戸内海、(d)黄河-断流-黄海の3水系についても比較考察を行い、科学的不確実性を順次低減してゆくことに努める。

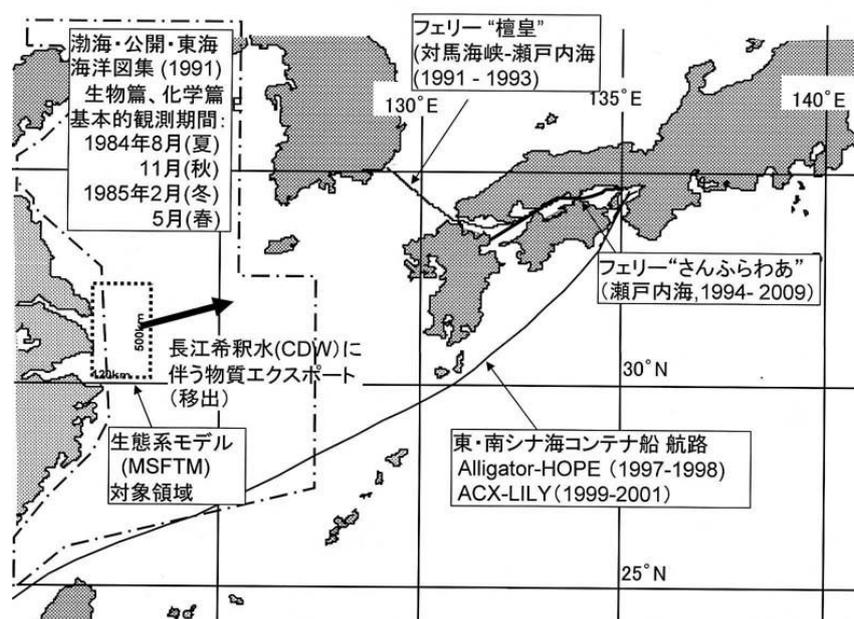


図3. 研究対象海域と、定期航路観測の航路の模式図。点線、一点鎖線にそれぞれ囲まれた部分は本サブテーマの生態系モデル (長江エスチャリー)、および中国側出版による「渤海・黄海・東海海洋図」の対象海域である。

3. 研究方法

(1) レビュー

主に2000年以降の査読論文を中心とし、さらに他の報告書類や過去も含めた文献のレビュー作業を行った。平成18年度のレビュー結果は、同年度報告書に、1) N、P、Siの流下に関するグローバル見積り、2) 栄養塩組成・絶対濃度の評価にかかわるクライテリア、3) シリカ欠損仮説にかかわる科学的不確実性、4) 拡大シリカ欠損仮説に係る既存知見、5) 4水系の比較解析、6) プランクトン機能型と生態系モデルの節構成で記載するとともに、別途レビュー論文⁵⁾として公表した。本報告書では、その部分については簡略化し、平成19および20年度作業分を加え、図1中の各事象の付番を併記しながら、4.結果・考察(1)に記載した。

(2) モデル

基本的な制御パラメータ（独立変数）を長江のN、P、Si各栄養塩濃度とし、これらの変化が、エスチャリー内の生態系構成要素の季節変化、および、栄養物質のエスチャリー外流出量にどのような影響を与えるかを考察する。

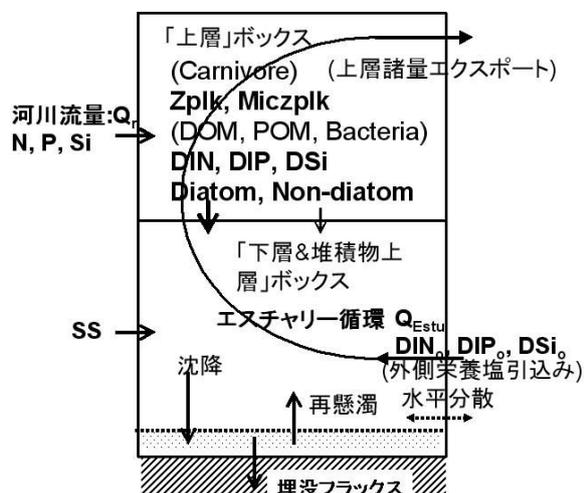


図4. 生態系モデルMSFTMの模式図。
エスチャリー（河口隣接海域）を対象とした上・下層の2ボックスを設ける。河川水が沖合い下層の海水と混合し、「長江希釈水」となって沖合い上層に流出する。

レビューおよびモニタリングの結果、河口隣接海域（エスチャリー）とそれ以外の陸棚域が、流動物理的および生態学的に特性が異なることが認識できた。東シナ海においては長江河口隣接海域の数百キロの規模の海域がこのエスチャリー部分にあたる（図3）。これにもとづき、モデルの複雑化・巨大化を回避するため、主に長江のエスチャリーを表現する東西120km×南北500kmの上下2ボックスに簡略化した領域を考える（図3、図4）。そして、エスチャリー海底への粒子沈降や堆積、溶出も最低限表現しつつ、ボックス内での生態系の挙動をシミュレートする。さらにエスチャリー上層から流出する物質がエスチャリー外でクラゲや魚など生態系上位生物の餌料になり、それらが日本近海まで流達するという考えでモデル化を進める。

生態系モデルとしては基本的に[N]-[P]-[Z]-[D]型、すなわち栄養塩、植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタスの4つの栄養段階を表現し、さらに[Z]を捕食する肉食者[C]を簡略化して取り扱う。[N]レベルでは、DIN、DIP、DSiの3種栄養塩を、[P]レベルでは、ケイ素（DSi）に依存するケイ藻（Diatom）とそれ以外の植物プランクトン（Non-diatom）の2種を考える。本来の生態系フラックスは、食物連鎖よりもむしろ食物網といわれるような複雑なものであるが、これを

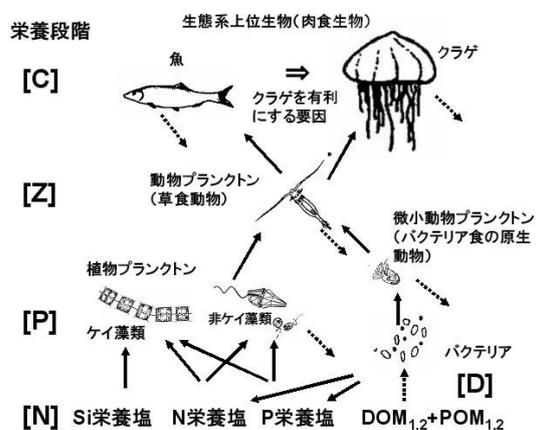


図5 MSFTMで定義した生態系フラックス。動物プランクトンがケイ藻、非ケイ藻類、微小動物プランクトンを捕食する際の嗜好性や、微小動物プランクトン→クラゲの直接経路は考えない。エスチャリー内で[N]→[Z]の動態をシミュレートし、それらがエスチャリー外に流出して、肉食生物[C]（クラゲ+魚）のバイオマスに転化するとする。

簡略化し、ケイ藻類、非ケイ藻類および微小動物プランクトンを、動物プランクトンが嗜好選択なく捕食するものとする（図5）。また、[C]はクラゲと魚を合わせて取り扱い、これが動物プランクトンのみを捕食すると考える。エスチャリー内では、[C]の増殖は陽には計算せず、被捕食者の死亡量の一部が[C]に転換されると考える。また、エスチャリー外では、流出してくる[N]、[P]、[Z]の各量に、栄養段階が1段あがるごとの転送効率を乗じた量の総和が[C]に転換されるとする。問題となるクラゲのバイオマス量はエスチャリー外の[C]に相当させる。

各過程のサブモデル化（季節性、物理的流動、生物過程、栄養塩等の化学的過程、SS輸送等）については、結果のあらましの後の考察の一部として簡略に説明し、フロー図をAppendixに示した。また、シミュレーションプログラムは、パーソナルコンピュータ上で稼働でき、世界的に多数のユーザーを擁してモデルの開示・共有が可能なことから、システム力学モデル開発用ソフトウェアStellaを使用し、その機能を使ってフロー図の作成・表示、基本方程式の自動生成、基礎データ入力、シミュレーション計算および結果のグラフ出力、数値出力、感度解析を行う。単位時間を[day]、単位体積を[m³]とする。

（3） 海域モニタリング・既存データ解析

1) 定期航路船舶による海域環境の時系列計測

問題の性質上、生物・化学量の長期変化と季節性が重要であるため、単発の詳細な調査結果よりも組織的・系統的な調査で時空間変動が認識できることが求められる。ただし、このようなデータは非常に限られているため、本課題および先行する歴代D-3課題において、フェリーなどの定期航路の連続取水系における継続観測を行ってきた⁶⁾（図3）。長江エスチャリーについては、この方法はとれなかったが、モデルの裏づけの際に瀬戸内海フェリーによる1994年度から2008年度までの栄養塩の時系列データを代替的に使う。長江エスチャリーから陸棚側に移出する生物化学量の裏づけとして、日韓フェリー航路（1991-1992）および日本-東南アジア航路のコンテナ船航路（1997-2001）のデータも参考とした（図3）。

2) プランクトン検鏡結果とそのデータベース化

プランクトンについては、栄養塩ほどには時系列的なデータ取得は行わなかったが、図5に示す各航路において随時サンプリングを行い、光学顕微鏡および落射蛍光顕微鏡によって植物プランクトンの同定、計数、サイズ計測を行った。また、2006年夏、冬、および2007年夏には、大阪湾と播磨灘で、植物プランクトンのほか、バクテリアおよび動物プランクトンについても検鏡を行い、モデルの構築の参考データとした（後述の図12）。同定結果は、栄養段階（自己栄養-従属栄養）、ケイ藻-非ケイ藻類の区別、サイズ段階等によってグループに分け、栄養段階が高くなるほど大きくなるような順に付番した。生態系モデルにおける各生物量の単位に合わせ、検鏡データの単位にも炭素重量濃度（mgCm⁻³）をもちいる。この算出のため、分類群ごとに定義されたサイズ→粒子当たりの炭素量値の経験式によって炭素重量濃度に変換した（表1）。

これらの検鏡データは、1サンプル中の生物種ごとに1レコードを定義し、それがExcelファイルの1行となるような形でデータベース化した。概ね1サンプルが20～30行（レコード）になり、全航路から得られた総サンプル数が1000ほどになるため、データ全体としては約23,000行のエクセルファイルとなる。各レコードの記載項目（フィールド）は、連番、調査名ごとの元表通番号、分類群、種類名、生態機能型、栄養段階付番、細胞形状、サイズ下限、サイズ上限、サンプリン

グ船名/航路名、調査の年、月、日、時刻、北緯、東経、測点名、個体数計数値、平均体積、細胞サイズ (ESD: 平均有効径)、C量・N量への換算式番号、1細胞あたりのC量、同N量、1サンプル中の該当種の総C量、同総N量、同時サンプルの海水でクロロフィルなどの色素濃度値、栄養塩濃度値が得られている場合のそれら参考データからなる。

これらのデータは、横軸に細胞サイズ、縦軸に栄養段階をとったバブルチャート形式のグラフ上、各分画ごとの生物粒子群の炭素バイオマス量を表示した (後述の図12)。

表1 フェリーによって採取したプランクトン粒子の栄養段階分類、および、各生物グループごとに定義されている炭素換算量の経験式。

No.	分類群	種類	炭素量換算式
1	バクテリア	バクテリオプランクトン	$fgCW=30.2 (\text{cell}^{-1})$
2	シアバクテリア	シネココッカス等 (2 μm 以下) 等	$fgCW=250 (\text{cell}^{-1})$
3	鞭毛藻類	トリコデスミウム プラシノ藻, クリプト藻, ハプト藻, ミドリムシ藻, 緑藻等ナノ植物プランクトン	$\log \text{pgCW}=0.8631\log CV(\mu\text{m}^3)-0.363$
4	渦鞭毛藻類	渦鞭毛藻 (光合成色素有り)	$\log \text{pgCW}=0.8641\log CV(\mu\text{m}^3)-0.353$
5	渦鞭毛虫類	渦鞭毛虫 (光合成色素無し)	(固定試料)
6		夜光虫 (<i>Noctiluca scintillans</i>)	$\text{pgCW}=0.003CV(\mu\text{m}^3)$
7	珪藻類	珪藻 (細胞容積 3000 μm^3 以下)	$\log \text{pgCW}=0.8111\log CV(\mu\text{m}^3)-0.541$
8		珪藻 (細胞容積 3000 μm^3 以上)	$\log \text{pgCW}=0.8811\log CV(\mu\text{m}^3)-0.933$
9		無殻の鞭毛虫、アメーバ等	$\text{pgCW}=0.22CV(\mu\text{m}^3)$ (固定試料)
10	肉質鞭毛虫類	有殻のアメーバ、有孔虫等	$\text{pgCW}=0.089CV(\mu\text{m}^3)$
11		放散虫等	$\text{pgCW}=0.0026CV(\mu\text{m}^3)$
12	繊毛虫類	有鐘繊毛虫	$\text{pgCW}=0.053LV(\mu\text{m}^3)+444.5$
13		無殻の繊毛虫、少毛繊毛虫	$\text{pgCW}=0.14CV(\mu\text{m}^3)$ (ホタル固定)
14	輪虫類	Rotatoria	$\mu\text{gCW}=1.05*10^{-9}*BL(\mu\text{m})^3$
15	二枚貝類	二枚貝のD型幼生	$\text{pgCW}=0.16*0.4CV(\mu\text{m}^3)$
16		二枚貝類 アンボ期幼生	$\mu\text{gCW}=3.53*10^{-4}*SL(\mu\text{m})^{1.47}$
17	橈脚類	橈脚類 ノープリウス幼生	$\log \text{ngCW}=2.941\log BL(\mu\text{m})-4.821$
18		橈脚類 卵	$\mu\text{gCW}=3.38*10^{-8}*D(\mu\text{m})^3$

CW: 炭素重量, CV: 細胞容積, LV: ロリカ容積, BL: 体長, D: 有効直径

3) 既存データの利用

レビューした論文から数値を引用したほか、論文中にグラフのみが表示されている場合には、スキャナーで画像化してから数値化ソフトウェア (Unscan-it) によりデジタル化した。

中国で出版された「渤海・黄海・東海海洋図集」に、1984-85年当時の四季別の栄養塩、動・植物プランクトンの平面・鉛直断面分布図、1979年当時の長江エスチャリー海域の動植物プランクトンの月別分布図、長江エスチャリーの水温・塩分月別変化図等が掲載されており^{7),8),9)}、組織性、系統性、中国の研究者との共通性の点で、これらをモデル構築の参考にした。

4) 衛星データによるケイ藻・非ケイ藻植物プランクトンの面的把握

ケイ藻ブルームと非ケイ藻ブルームの出現率を季節的・面的に把握・評価するため、海水色センサーデータを収集し処理した。ケイ藻も大半の非ケイ藻類も、それらの光合成色素から放射される可視光波長構成はあまり変わらないため、衛星による把握は容易ではない。ただし非ケイ藻類のうち円石藻は白色のカルシウム殻を持つことから、ケイ藻の信号とは区別され、その検出アルゴリズムも開発されている。したがって、光学的に円石藻ブルームと推定される事象 (以後「推定円石藻ブルーム」と簡略標記する) を非ケイ藻類ブルームの1つの代表的指標と考え、黒海、

東シナ海を含む日本近海、南シナ海について、月別の画像を作成し、メッシュごとにクロロフィルの濃度および推定される円石藻ブルームの出現頻度を求めた。これらの結果は総合考察の節に記す。

4. 結果・考察

(1) レビュー

平成18年度のレビュー作業の結果はすでに一部レビュー論文として公表済みであり、平成19および20年度作業分と併せて別途公表の予定であるが、ここでは3年間のレビュー作業の結果を簡略に述べる。

1) N、P、Si栄養塩流下のグローバル見積り (図1中の事象06、07、12、13、14)

世界の人口、食糧生産、エネルギー消費はこの50年間に、それぞれ2.5倍、3倍、5倍になったといわれる。その海域への影響評価の目的としてMeybeckら¹⁰⁾、Smithら¹¹⁾、Treguerら¹²⁾によってN、P、Siの流下量を見積る試みが行われた。さらに最近になって、Global-NEWS (Nutrient Export from Watersheds) 計画により、河川流量・土地利用形態・人口などを独立変数としたモデルに基づいて、溶存-粒子状、有機態-無機態別、流域別のN、P流下量が算出されており¹³⁾、また流域ごとの地質特性をモデルとりいれたSiの面源風化溶出量の算出が行われている (Si-WEBS計画)¹⁴⁾。

Treguer¹²⁾によれば、平均的な河川のDSi濃度は約150 μ Mで、世界的に減少傾向にある。Si流下が減少する原因として、増加するダム湖でのDSiからBSiに転換した分が沈降して湖底に保留されることが考えられる¹⁾。これに関連して、全河川水の陸上貯留時間がダム建設のため自然状態の7倍になったとの見積りがある¹⁵⁾。

これらのグローバル見積りからは、DIN: DIP: DSiの流下量比はほぼ18: 1: 66程度となる。この比は海産ケイ藻の元素吸収比率 (レッドフィールド比すなわち C:N:P:Si=106: 16: 1: 15) に比べてはるかにSi相対比が高く、基本的にはケイ藻にとってSi不足になるとは考えにくい。ただし、SiがBSiから溶出する率は、C、N、Pがそれぞれ有機物から生物分解によって溶出 (無機態回帰) する率に比べて小さいので、この差異がDSi不足の方向に働く可能性も否定できない。

Si流下量については、ダムの有無以上に、流域の地質学的特性、降雨量、気温等が影響する。本研究課題では、前述のSi-WEBS計画の一環として、日本のデータ¹⁶⁾とダルムシュタット工科大学のモデルからなる研究協力により、1950-60年代の日本の陸域DSi溶出率が、世界平均の6倍にも達することが確認できた¹⁷⁾。このような高いDSi溶出率のもとでも、海域のブルーム直後にはDSiがケイ藻の増殖制限値近くまで下がり、さらにケイ藻赤潮/非ケイ藻類赤潮の件数比がSi/N相対比に依存することが注目される⁴⁾。

2) 長江流域のN、P、Si、水、SS流下の長期変化 (事象07、15、16、17)

2000年代にはいって中国側からの長江流域の長期変化に関する論文が続出し、以下のような長期的な傾向が明らかになってきた。まず、人口増加と消費増大をまかなうためNとPの化学肥量の使用が増大し、その結果長江のDINとDIPの濃度が増大した (図6(a)、(b)¹⁸⁾)。これに対し、DSi濃度は長期的に減少する傾向にあり特に1960年代中葉に支流の丹江口のダム建設が建設されたことの影響が見られる^{19)、20)}。ただし、降水量の変動や森林伐採の影響のほか三峡ダム湛水開始前の大洪水でSiの可動性が増したこともあるのでダムの影響だけを抽出するのは難しいという慎重な考えもある (図6(b)²¹⁾)。

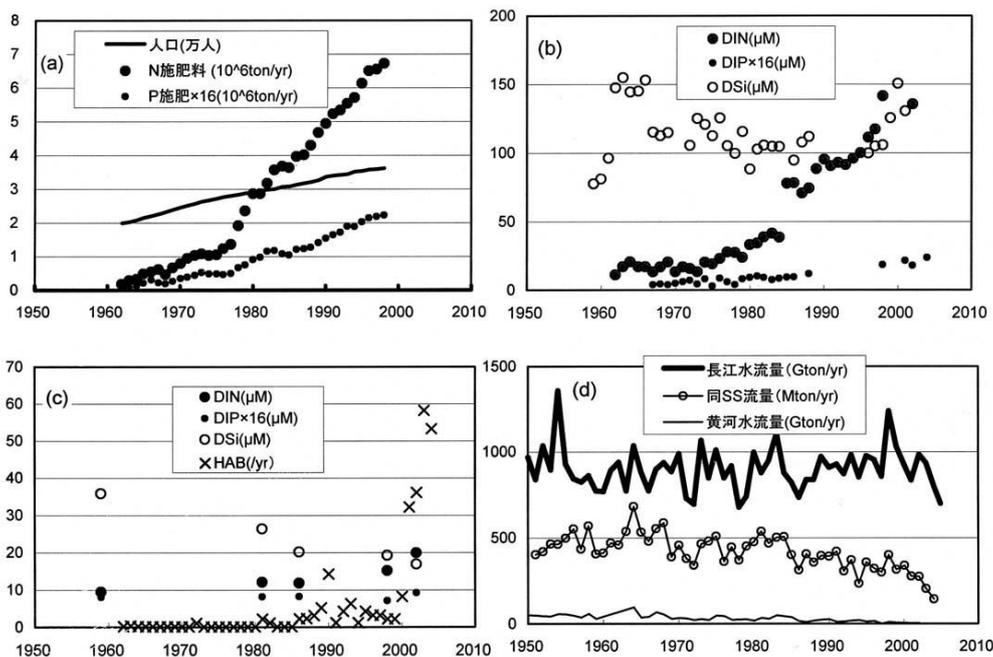


図6 長江流域-同江エスチャリーの長期的環境変化傾向。(a)流域人口、NおよびP年間施肥量¹⁸⁾、(b)長江河川水のN、P栄養塩濃度¹⁸⁾およびSi栄養塩濃度²¹⁾。(c) 長江エスチャリーのN、P、Si各栄養塩の長期変化と有害赤潮(HAB)発生件数の長期変化¹⁹⁾、(d) 長江水の水流量およびSS流量、黄河水流量²⁴⁾。レッドフィールド比を考慮して各元素の寄与の度合を比較するため、P施肥量およびDIP濃度には16を乗じた。

これらの河川流下変質の長期的影響として、長江エスチャリー海水中のDIN濃度は増加、DIP濃度は最近になって増加、DSiは減少の傾向が検知されている、さらに有害赤潮(HAB: Harmful Algal Blooms)の件数が増えたといわれる¹⁸⁾ (図6(c))。すなわち「シリカ欠損仮説」を支持するような傾向を示唆している。また、三峡ダム建設後に長江エスチャリーの基礎生産が低下したという報告がある²¹⁾。ただし、海域の栄養塩濃度は植物プランクトンの大増殖(ブルーム)で吸収されて初夏には枯渇し、秋の鉛直混合で再び増加するというような季節変動が大きいいため、後述するフェリー観測のような季節性を分解できる高頻度の時系列データに基づいて評価する必要があるだろう。

3) 長江流域の水流量、SS流下の長期変化(事象07、15、16、17、21)

Siが大ダム湖でトラップされるのと同様に、無機懸濁粒子(SS)もトラップされるため、河川経路のSS流下が世界的に減少しつつあることが報告され²²⁾、特に長江においてその傾向が顕著である^{23)、24)、25)}。前出図の水流量そのものの変化に注目すると(図6(d))、気候変動サイクルによる数年規模の変動はあるものの長期的な変化は顕著でない。ところが、SS(シルトや粘土鉱物などの懸濁粒子状物質)は長期的に減少するとともに、この傾向が2000年代以降さらに顕著になっており、ダムがSSをトラップすることがはっきりしている。

一方、黄河の水流量は、「断流」の頻発に象徴されるように顕著に減っている。今後は三峡ダム湛水の進行と「南水北調」により、黄河の断流のほうは幾分か緩和されるが長江の水流量はさ

らに減ると予測される。また、ピーク流量がカットされるために河川流量が平準化され、河口域の塩分の平準化および高塩分化が起こる可能性がある。また、DSi相対比の低下だけでなく、河川水量の絶対量減少にともなうDSi流下絶対量の減少も予測される。黄海に面し大規模河川の流入のない膠州湾でSiが制限要因になっている報告はこのような将来予測を裏づける²⁶⁾（事象15→21）。

4) SS 流下量変化が海洋生態系に与える影響

ケイ藻以外の浮遊有機粒子はケイ素殻などのバラストを欠くために、本来単体での沈降率は小さい。また、SSのうち粒径の小さい粘土鉱物部分も顕著に沈降しない。ところが、粘土鉱物と浮遊有機粒子が凝集すると沈降が顕著になる、すなわち上層から富栄養化物質を除去することになる。この効果は「ミネラルバラスト効果」と呼ばれ、外洋の中深部での植物プランクトン粒子について指摘・検討されはじめた^{27), 28), 29)}。基礎生産とSS流下の双方が大きい長江エスチャリー海域では、この効果が大きいと考えられるが³⁰⁾、SSの流下減少はそれらを低下させ、上層の富栄養化を助長させる方向に働く可能性がある。（事象22、25）。

また、海底に堆積した有機物粒子は一部は永久埋没し、そのほかは生物分解されて無機栄養塩に戻る。長江から流下するSS量の40%がその河口域に堆積するといわれ³¹⁾、その量は世界的にみても大きい。したがって有機物が埋没する率も高い海域であるといえるが、SSの流下減少はその効果を低下させる可能性がある。（覆土効果、事象23、25）。

5) シリカ欠損とケイ藻卓越／非ケイ藻類卓越

1つの焦点は、Si減少の影響がケイ藻卓越と非ケイ藻類卓越の分岐にとって有意かどうかという問題である。一般的な判定条件として、レッドフィールド比 N: P: Si=16:1:15 を基にして、DSi/DIN 相対比が概ね1より大か小かが問題になる。また Eggeら³²⁾がメゾコズム（隔離水塊）実験により導いたように、DSi絶対濃度が2 μ Mよりも大きいかどうかも基準となる。

ただし、このような判別条件は、フェリー観測、モデル、既存データ、レビューの結果を総合してみると、両判別条件にそのままでは適用できない事例が出てきた⁴⁾。例えば、瀬戸内海の各海域ごとに栄養塩の長期平均値をとってみると、DSi/DIN比は播磨灘よりも大阪湾で低いが、大阪湾では「ケイ藻赤潮」が卓越し、渦鞭毛藻などによる「非ケイ藻類赤潮」が卓越するのはむしろ播磨灘である。また、瀬戸内海で渦鞭毛藻類による赤潮の被害が多いのは夏季であるが、ケイ藻の春季ブルームで各栄養塩が減少した後、夏季にはDSiがDINやDIPより先に回復することがフェリー観測で明らかになっている。すなわち、DSi相対比が高い海域で非ケイ藻赤潮が出現しているという、一見「シリカ欠損仮説」に相反する認識となる。

このような事例も含めて、Siとケイ藻卓越・減少に関わるメカニズムの解明を深める必要がある。ここで、参考のため、Si過程以外の要素に基づいた判別条件を2種あげる。

Li-Y.B.らは、観測データと数値モデルにより、ケイ藻類が有利になる条件として、第1に高照度、次にDIN/DIP比が低いこと、高DSi/DIN比が高いこと、全般的に栄養塩濃度が高いことをあげた³³⁾。この照度条件説によれば、長江河口の高SS濃度は低照度に直結するからケイ藻に有利になるはずであるが、上述のように長江のSS流下は長期的に減少しつつあるので、渦鞭毛藻赤潮の増加は説明できない。

Wong-K.T.M.らは、鉛直方向の物理過程に着目し、混合・沈降・増殖パラメータに簡略な競合モデルを呈示した。すなわち、適度の鉛直混合は遊泳しないケイ藻類に有利であり、その逆の鉛直成層は鉛直日周運動により上層の光と下層の栄養塩の双方を享受できる渦鞭毛藻に有利になる³⁴⁾。

ただし、成層条件は人為影響で大きく変化しないので、渦鞭毛藻赤潮の増加は説明できない。

ここで、N:P:Si 比が文字通りに藻類卓越に発現しないかの議論に戻る。Tett ら³⁵⁾によれば、植物プランクトンのレッドフィールド比には幅があり、鉄(Fe)も含め、N: P: Si: Fe = 16: (0.3-1.0): (4-32): (10^{-4} - 10^{-3})が想定範囲である。すなわち、P については寡の側、Si については多寡両側の許容幅が広い。また、植物プランクトンは、栄養塩を潤沢時に多めに吸収して細胞内クォータとして細胞内にプールし(luxuary uptake)、栄養塩枯渇時にはそれで生存するという適応戦略を有している。この効果は N、P、Si のうちレッドフィールド比で一番小さな相対比の P について最も効果的であると考えられる。

従来のシリカ欠損仮説は、ケイ藻と非ケイ藻類が同一の時空間的で、栄養塩濃度に「受動的に」依存しながら競合しているという前提に基づくものであった。そこで、この前提をどのようにモデルファイすればSi過程が有意であるのかという視点に立ってみよう。

6) 拡大シリカ欠損仮説

Wassmannらは、メゾコズム実験において、Si制限下の状態にDSiを添加したところ、生物粒子の沈降フラックスが増加したという結果を示した³⁶⁾。Robertsらはやはりメゾコズム実験において、DSi相対比が低い場合とコントロールについて、攪拌を行いながら微生物組成の変化を追ったところ、後者のケースではケイ藻バイオマスが維持されたが、前のケースでは10日後にケイ藻バイオマスが減り、反対にバクテリア、従属栄養性の微小鞭毛藻類などが増加した³⁷⁾。このことから、海水中にDSiが存在すればケイ藻がそれらを吸収して上層から物質を引きおろす機能(生物ポンプ機能)を発揮でき、また逆にDSiが枯渇するとケイ藻の吸収・引き下ろし機能が弱まり、他の生物からなる食物網が肥大することがわかる。すなわち本研究で「拡大シリカ欠損仮説」と名づけた過程が推定される。

7) ケイ藻の自律沈降

前節では、DSiが潤沢時にケイ藻の沈降が非ケイ藻類にくらべて大きいことを示したものであるが、これとは別にBienfangらは、栄養塩、特にDSiが枯渇すると、何種かのケイ藻は通常の沈降速度をさらに大きくし、その後に栄養塩を添加しても枯渇前には戻らないことを明らかにした³⁸⁾。DIPの枯渇ではこのような傾向ははっきりしなかった。また、RichardsonはDIN枯渇もケイ藻沈降のトリガーになるとした³⁹⁾。さらに、Kahlは、春季ブルーム後半頃から栄養塩枯渇などの環境ストレスが引き金となって細胞外に有機物を分泌し、これによって細胞が互いに付着しあった後、沈降が顕著になることを示した⁴⁰⁾。物理的には、相互付着で実効粒径が大きくなることでストークス沈降速度が大きくなることに対応する。この点で、ケイ藻のサイズが比較的大きいことも沈降速度を大きくする方向に働く。

このようなことから、Si枯渇後は上層ではケイ藻、すなわち生物ポンプの担い手が希薄になることになる。N枯渇の場合も同じことが起こる可能性があるが、このような状態は人為影響が小さい場合に起こることであり問題にならない。

ここで、ケイ藻のシリカ殻形成の意味を再考する。シリカ殻が捕食に対する防御となることは間違いないが⁴¹⁾、Ravenはむしろ環境が不向きになってきたときに、受光という要素を犠牲にして自律的に浮力を減らして沈む(下方に逃避する)ためのバラストであると考えた⁴²⁾。すなわち、上層の栄養塩が枯渇した場合には、低照度であるが栄養塩の豊富な下層に下降する、あるいは休眠胞子となる、さらにはウイルスに感染した不健康な細胞を振り落とすという生存戦略である。

上述のミネラルバラスト効果も沈降過程の一端をなす。この効果は、実際に我国の沿岸海域で「赤潮駆除」として実用化が試みられている。その事例からは、モンモリロナイトなどの粘土鉱物を数百ppmの濃度で懸濁させて渦鞭毛藻赤潮発生海域に散布すると、それらの濃度が数時間のうちに数%まで減るというものである。その過程を本研究でのモデルに反映させることを試みた。ただし、本来的にこの現象の非線形性が強く（粒子が沈降はじめるとさらに他の粒子を凝集させやすくなる等）モデル化の確度は高いとはいえない。おおまかな結果からは、本来沈降しにくい非ケイ藻類には有意であるが、ケイ藻については自律沈降のほうがミネラルバラスト効果よりも沈降促進にとって本質的に働くことが推定された。

8) 世界的なクラゲ増加

近年、世界の海域で種類や形態は多様であるがクラゲの増加が顕著に報告されるようになり、その原因についていくつかの個別報告や総説⁴³⁾が提出されている（図1）。アメリカ科学財団（NSF）は、クラゲ増加問題を重要視して2008年12月にプレスリリースを行った⁴⁴⁾。特に、日本近海・日本海に漂着するエチゼンクラゲの増加は注目を浴びている⁴⁵⁾。

これらの報告では、気候変動（事象01、08、09）、過剰漁獲（10）、天敵が不在の海域への移入種の問題（04）、一般的な富栄養化⁴⁶⁾→植物プランクトンの増加→動物プランクトンの増加→クラゲの増加という因果関係等が主要因として挙げられている（18→33）。また、この他に、Siが関連する可能性も考察されている⁴⁷⁾。すなわち、Siが潤沢であればケイ藻（比較的サイズが大きい）が卓越し、動物プランクトンレベルではカイアシ類（比較的サイズが大きい）から魚に至る食物連鎖が成り立つ。Siが枯渇して非ケイ藻類（比較的小サイズ）→微小原生動物の食物連鎖に遷移し、これがクラゲの捕食対象になりやすいという考察である（事象30→36）。

東シナ海・黄海について、Yoonら⁴⁸⁾は、長江希积水海域でエチゼンクラゲが多いことを指摘した。一方、長江河口においては、食用種のクラゲの減少と南シナ海に生息していた有害種のクラゲの増加がみられ、その原因は三峡ダムの湛水が始まった後に河川流量が平準化または長江河口域の塩分が高くなったことと推定されている⁴⁹⁾（事象15→21→24）。

塩分との関連については、さらに東シナ海のエチゼンクラゲ以外のクラゲ2種の増減に対しては塩分濃度が最大の決定要因であることが報告されている⁵⁰⁾。黄海の塩分はわずかながら長期的に上昇を示し^{51),52)}、これが黄河の流量減少によるらしいことが示されているので一考の価値がある。

ミズクラゲ（*Aurelia aurita*）は、世界中の広い水温・塩分各範囲で現存量が大きいのが、各地域ではそれぞれの至適塩分範囲をもっている⁵³⁾。魚が塩分変化などに対抗して体液の浸透圧を一定に保つ osmo-regulator（浸透圧制御生物）であるのに対し、クラゲは osmo-conformer（浸透圧馴致生物）であるため、一定の時間が経過すれば異なる塩分濃度の変化にも対応できるが、河口域に特有な塩分の急激な変動が、浸透圧と比重の両面で影響を与えていることは考えられる。

このようにダムによる淡水流下の平準化は、クラゲに有利に働くといえるだろう。また、シルトの覆土効果は付着期のクラゲ幼生にマイナスに働くと推定されるが、ダムによるSS流下の減少は、このマイナス要因を減らすことで、やはりクラゲに有利な方向に働くと考えられる。

クラゲの付着幼生期の重要性についても議論されている^{54),55)}。動物プランクトンのうち、節足動物の増殖がケイ藻の春季ブルームの後に規則的に起こるのに対し、クラゲのようなゼラチン質動物の増減は不規則であり、人為的影響が希薄だった過去にも大発生の報告があるため、要因が

複数でそれらがそろったとき大発生にいたる。特に、付着期を持つ種類（Meroplanktonic）は、概ね沿岸性であって付着期に無性生殖を行うこともあり、生活史として浮遊期と付着期が等分に重要であり、付着場所の環境変化が問題になる。

Loらは、台湾の小湾で養殖筏が撤去された直後にミズクラゲが激減したことから、ポリプ期幼生の付着場所の有無が要因として考えられるとしている⁵⁶⁾。海面養殖が東シナ海・黄海沿岸域で増加しつつあるためこの要因は無視できない。同様の要因として、前述のNSFのプレスリリースでは、石油採掘リグの増加をあげている。また、Condonらはクラゲのポリプ期の貧酸素耐性が（魚などに比べて）高いことを示した⁵⁷⁾。長江河口域の底層では貧酸素化が進行しているため⁵⁸⁾、付着幼生期の過程と複合作用は重要であると考えられる。

前述のNSFプレスリリースでは、「ダムは、淡水と栄養塩の流下を減らすことにより、他の環境ストレスとある条件のもとで、クラゲに適した条件を促進する可能性がある。科学者達は、日本海に漂流する巨大クラゲ群が、三峡ダムおよび他の環境ストレスに影響された中国の沿岸海域から来るのではないかと考えている」と表現している。この「淡水流下減少」は前述のXianの論文⁴⁷⁾、「栄養塩流下減少～巨大クラゲ増加」は当研究課題の趣旨を紹介した英字紙報道にもとづいてのプレス報道と考えられる。以上のレビュー結果を参考にしながら、次節では生態系モデルの構築および結果の分析を行う。

（２）生態系モデルにより得られた結果

1) N、P、Si各栄養塩とケイ藻、非ケイ藻類の季節変化

前述のようなモデル設定のもとに、早春（N、P、Si各栄養塩とも潤沢だがプランクトン濃度は低い、想定3月1日を第1日目とする）から、夏季を経て、海面冷却による鉛直混合が始まる秋季（想定10月30日の180日目）までのシミュレーションを行う。河川のN、P、Si各栄養塩濃度は一定とし、長江下流部のデータより得られた河川流量の変化により季節性を与える。このほか外的要因として長江エスチャリーの上層流出・下層流入となる鉛直循環量、生物活性に影響する水温、基礎生産を支配する海面太陽光入射量と海中照度にもデータに基づいた季節性を与える。

シミュレーションの結果として得られた、エスチャリー上層の各栄養塩濃度（DIN、DIP×16、DSi）、および、ケイ藻、非ケイ藻類、動物プランクトン濃度の変化を図7 a-1およびa-2に示す（DIPの乗数16はレッドフィールド比に準拠して各元素の寄与の度合をそろえるためである）。

春季には初期に潤沢だった栄養塩を使って両藻類が増加する。特にケイ藻の増殖が顕著であり、春季ブルームとして認識できる。ケイ藻増殖による吸収のため、栄養塩のうち、DIN、DIP、DSiのいずれかが晩春に枯渇するとケイ藻の増殖は弱まり、それに代わって非ケイ藻類が多くなる。夏季には非ケイ藻植物プランクトンが卓越するが、ケイ藻もやや回復し、夏季にはケイ藻、非ケイ藻類ともある程度の基礎生産が持続する。この結果は、概ね多くの沿岸海域において、春にはケイ藻が増加し、夏季に渦鞭毛藻などによる有害赤潮が起こるといった観測報告と合致する。春季の大増殖は初期栄養塩のストックによって起こり、夏季の基礎生産は、主に河川経由の栄養塩とエスチャリー循環で湧昇してくる栄養塩によって維持されている。

ここで重要なのは、晩春にケイ藻類が急に減少して非ケイ藻類に遷移することである。そして、ケイ藻の減少にともなってDSiが一時的に回復することである（原因→結果の方向が、栄養塩→ケイ藻ではなくて、ケイ藻→栄養塩）。DSiの一時的増加は、後述のように、フェリー観測で裏づけ

られる。すなわち、有機物分解にともなうN、P、Siの溶出速度の差異よりも、あくまでもケイ藻の主体的な増減が原因となる。

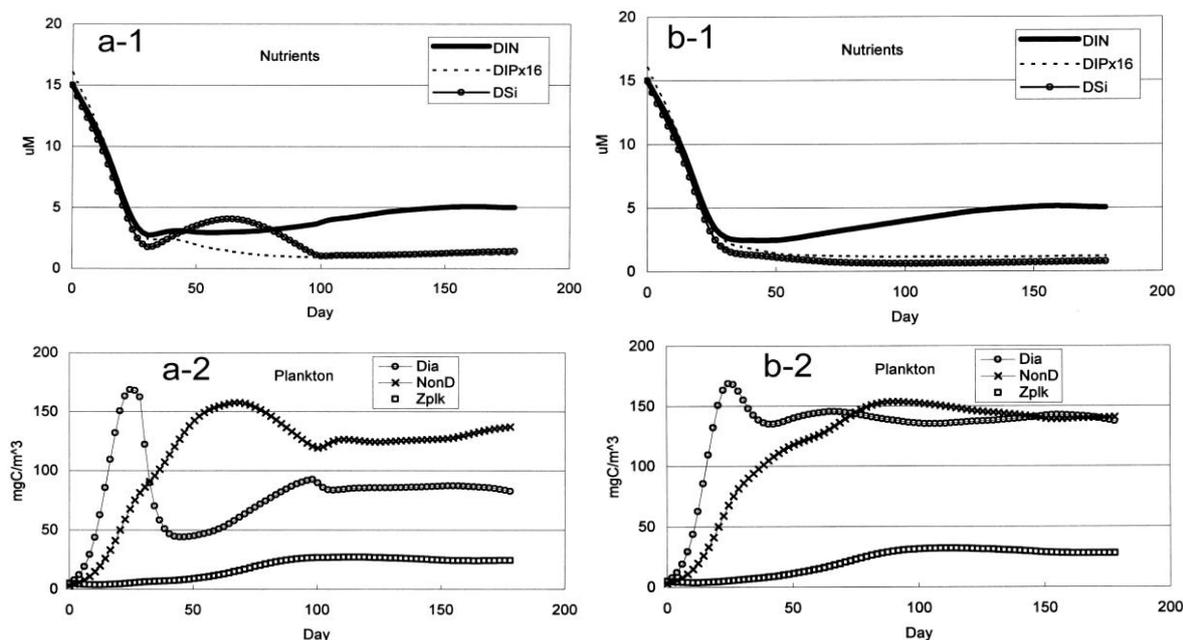


図7. 生態系モデルによる、早春から晩夏までを想定した180日間のシミュレーション結果から上層の各栄養塩と各プランクトンの季節変化を示す。左側 (a) は、ケイ藻の自律沈降率を考慮してDSi枯渇時に沈降率を大きくしたケース。上図 (a-1) にはDIN (太線)、DIP×16 (点線) およびDSi (○) などの栄養塩、下図 (a-2) にはケイ藻 (○)、非ケイ藻類 (×) および動物プランクトン (□) の季節変化を示す。右側 (b) は、ケイ藻の自律沈降を考慮しないケース (表示はaと同様)。aでは初夏に顕著なケイ藻→非ケイ藻類への遷移とDSiの一時回復が起こり、フェリー観測に合致するが、bでは起こらない。

このシミュレーションでは、栄養塩潤沢時にケイ藻の沈降率を非ケイ藻類に比べてある程度大きくし、(1日あたり前者は現存量の2%、後者は0.2%が上層から沈降するとした)、またBienfang³⁸⁾らやKahl⁴⁰⁾を参考にして、DSiが枯渇した時点以降 (半飽和定数を下回った時点以降) はケイ藻がさらに顕著に沈降する (1日あたり上層現存量の20%が沈降) とした。

ケイ藻の自律的な沈降拡大を組み込まなかったケースのシミュレーション結果では、ケイ藻→非ケイ藻類への遷移も、DSiの一時的増加も顕著にならなかった (図7 b-1、b-2)。すなわち、Si枯渇時にケイ藻の増殖率が低下するだけではこのような変化は起こらない。

ケイ藻がDSi枯渇によって自律沈降した後は、上層ではケイ藻が希薄になるため、ケイ藻による物質引き下し効果 (生物ポンプ機能) は低下する。すなわち、上層に物質が残留しやすくなる。前述のように、DIN枯渇もケイ藻沈降を大きくするの引き金になるが³⁹⁾、DINが枯渇してDSiが残留する場合は人為影響が小さいケースにあたり、ノリ色落ち問題などを除けば環境面での問題は小さいと評価できる。

ケイ藻と非ケイ藻類量の時間変化に対して、基礎生産による増加、被捕食、自然死、エスチャリー外への流出、ミネラルバラスト効果による減少の各効果を比較した。ケイ藻の減少について

は沈降、特に Si 枯渇時の沈降加速の効果が大きく、非ケイ藻類については、通常の沈降速度が小さいので、むしろミネラルバラスト沈降が有意になった。さらに、渦鞭毛藻などのように鉛直日周運動で上方に遊泳することもあるので、沈降とは逆の事態も起こりうる。

2) 栄養物質のエスチャリー外への放出

上記で定義された鉛直循環流は河川流入量の増加を反映して夏季に強く、河川と湧昇海水との混合海水（長江希釈水）となってエスチャリー外に放出された後に日本近海に達する⁵⁹⁾。この流れに帯同して、エスチャリー上層の物質も放出されるが、放出後、生態系上位生物（肉食者、具体的にはクラゲ+魚）のバイオマスに転換される量を考える。

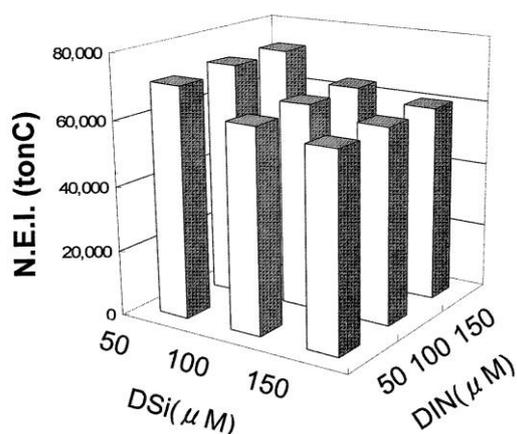


図8. 生態系モデルにより予測された長江エスチャリーからの栄養物質移出指数の変化（縦軸に示したN.E.I.）。長江のDSi濃度（x軸）が減少するほど、DIN濃度（y軸）が増大するほどこの指数が増大する。すなわち「クラゲ+魚」に転換される栄養物質の流出が増大する量が増えると推定される。

直接肉食者の餌となる動物プランクトンのほか、流出希釈水中に残留している栄養塩も植物プランクトンを経由して、ある転送効率を乗じた上で動物プランクトンに転換される。そのほか、易分解性の溶存および粒子状有機物はバクテリアに、バクテリアは微小動物プランクトン経由で動物プランクトンに転換されるから、栄養段階が一段あがるごとに、転送効率を乗じた上で総和をとればおおまかな見積りになるだろう。この総和にエスチャリー循環量を乗じて春～夏の間積分した量を、栄養物質移出指数(Nutritions Export Index: 略称 N.E.I.) と定義する。秋から冬にかけては、逆方向の季節風や、海面冷却によって下層経由で陸棚外に出てゆく流れ（文献⁶⁰⁾およびサブテーマ(3)で示される Continental Shelf Pump 参照）が主になるので、N.E.I.の算出には含めない。

長江河川水の栄養塩濃度変化がこの指数にどのような影響を与えるかを、DIP=1 μM のもとで DIN と DSi をそれぞれ 50, 100, 150 μM に変え図8に示した。まず、N.E.I.値は炭素重量にして季節を通じて数万トンCとなり、Dengら²⁵⁾による東シナ海からのPOC流出見積もり（25万トンC/年）の数分の1程度にあたることから、見当違いの値ではないと思われる。重要なことは河川のDIN濃度が高く、DSi濃度が低いほど大きくなる。特にDSiが100 μMを切るとN.E.I.は増大する。

このような結果が得られた要因は以下の2点である。春季ブルーム後にDSi枯渇によってケイ藻が沈降してしまい²⁵⁾、それ以降は、ケイ藻が果たしていた上層物質を落とす機能（生物ポンプ）が小さくなり、そのため上層の栄養物質が残留してエスチャリー外に放出されやすくなることである。また、水柱におけるDSiの分解回帰率をDINの分解回帰率よりも小さくしたため、SiとN

の流入量が同様であればNのほうが制限因子になりにくいことも作用する。また、モデルでは沈降した有機物粒子のうちのN、P、Siが永久埋没する率を、長江エスチャリーのSS堆積速度³¹⁾×堆積物コアサンプルのPON、PP、BSi含有率^{61),62)}の積で与えたが、レッドフィールド比に比べると、堆積物中のBSi含有率がPOC、PON、PP各含有率に比べて大きい。すなわちSiが底質中に埋没する率が高い。このことも同様に働く。

なお、N.E.I.の増大がクラゲと魚のどちらの増加に寄与するかについては、このモデルの予測対象としなかったが、このモデルで示されたような結果がベースラインになり、その上で、表1に示したクラゲを有利にする諸要因が働いてクラゲの増加につながっていることが考察される。

(3) フェリー観測および既存データの解析結果とモデル結果の整合性

長江エスチャリーでの季節性を備えたデータは十分とはいえないが、中国海洋図に1978～1979年代、すなわち中国の経済発展以前における、ケイ藻と渦鞭毛藻の細胞数濃度、動物プランクトン総量の各月ごとの分布図が含まれていた。これからおおまかな数値を読み取ってグラフにした(図9)。

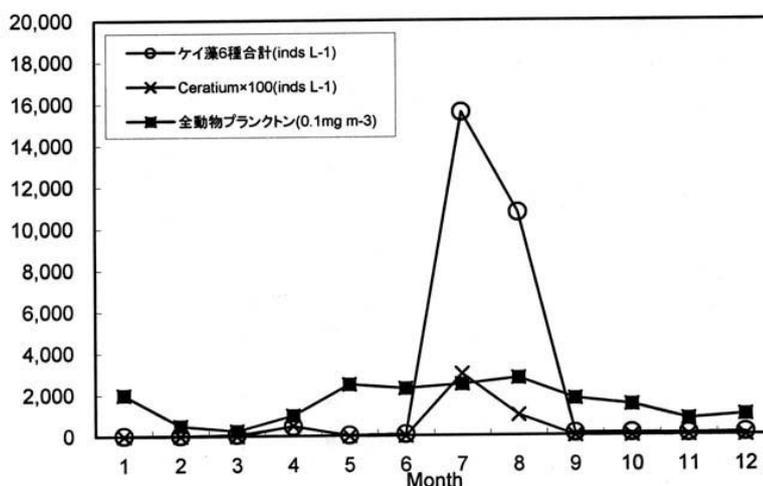


図9 長江エスチャリーにおけるプランクトン量の1978-1979年の月別変化(「渤海・黄海・東海海洋図 生物篇⁹⁾」から読み取ったもの)。渦鞭毛藻Ceratiumの個体数濃度には100が乗じてある。

この資料では、ケイ藻については数種が記載されていたのに対し、渦鞭毛藻がCeratium 1種だけなので単純な比較はできないが、すくなくとも当時はケイ藻にくらべて渦鞭毛藻が格段に少なかったといえる。季節性で重要なのは、3～4月に多少なりとも増殖したケイ藻がすべての種で5月に減少したことである。同時に動物プランクトン量も増加しているのので、捕食も1つの原因と考えられるが、6～7月にケイ藻が再度増加したときには動物プランクトンの増加は顕著ではない。考えられるのは、前述のように春季ブルーム終了時(栄養塩枯渇時)にケイ藻が自律沈降したことである。この中国海洋図では栄養塩については四季別で季節性についての把握は十分でなかった。そこで、瀬戸内海のフェリーデータを以下のように代替的に扱う。

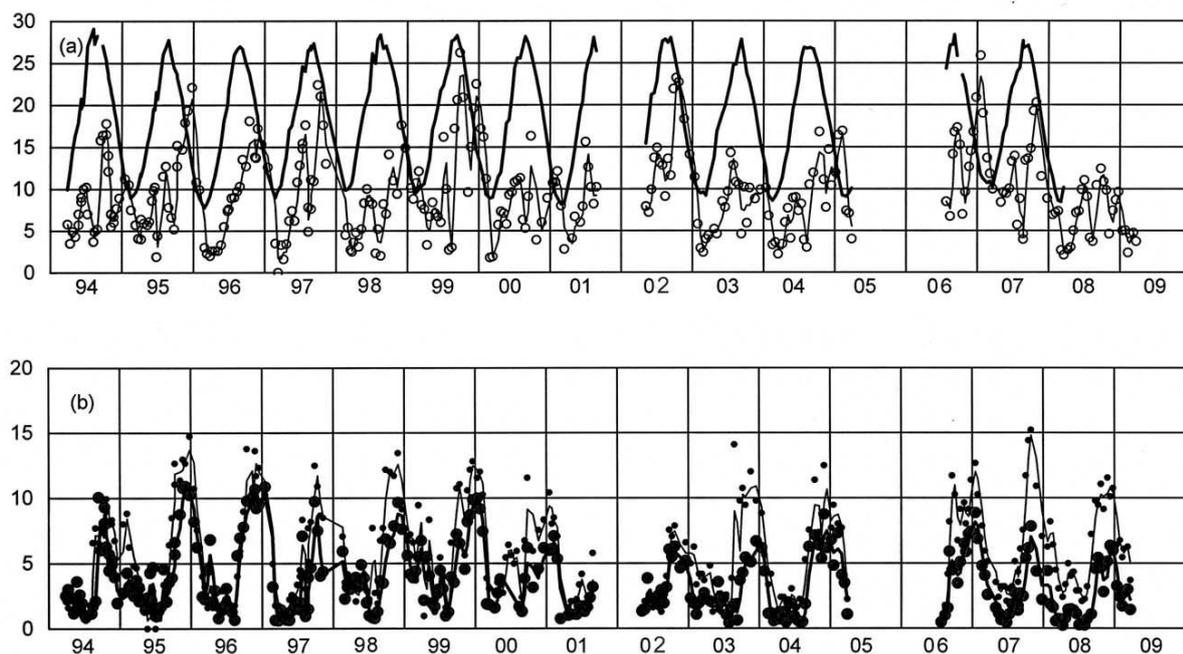


図10. フェリー計測データより抽出した、播磨灘表層海水における(a)水温（線）とDSi（○）、(b)DIN（●）とDIP（・）の時系列変動。3種栄養塩はともにケイ藻の春季大増殖で吸収されて減少するが、下層で分解してできた栄養塩が秋～冬の鉛直混合で上層に戻るため回復する。春季大増殖終了後（初夏）にDIN、DIP、DSiのうちどれが枯渇してどれが残留するかが重要である。

図10は、1994年から2009年3月までのフェリーデータから、播磨灘中央部のN、P、Si各栄養塩値を抜粋した時系列表示したものである。冬季には栄養塩は豊富であるが早春（2月～3月）には、ケイ藻の大増殖で吸収されて減少し、秋の鉛直混合によって下層の生物分解により無機栄養塩にもどったものが上がってくるため表層の栄養塩値が上昇（回復）する。

ここで注目されるのは、DSiの回復がDINやDIPの回復より早く、夏のうちに起こることである。これをより詳しく見るため、a.1996年当時とb.2007年における年サイクルにつき、1. 前年晩秋～春（春季ブルームによる栄養塩減少期）、2. 夏の成層期、3. 秋の混合開始期の3期間にわけてDINとDSiの相関を示す（図11）。

1.ではDINとDSiの双方が相関よく減少する。これは明らかにケイ藻の吸収によるものである。さらにDSiとDINの減少比が2以上に達しており、栄養塩が潤沢な時にはケイ藻はレッドフィールド比N:Si=16:15を越えてDSiを吸収することがわかる。逆にいえば、初期にDINに比べてDSiが多くてもDSiが枯渇する可能性は否定できない。

2.では、DSiのみが回復し、DINは変化しない（本来BSi→DSiの溶出速度のほうがPON→DINの分解速度より遅いことに反する）。考えられる理由は、DSiを吸収するケイ藻が希薄になっているためと断定できる。すなわち、モデルの項で述べた、栄養塩枯渇でケイ藻が自律沈降してしまったことを裏づける。

3.では秋の海面冷却による鉛直混合で下層のDINとDSiが上がってきたことを示す。この場合

の DSi と DIN の増加比はケイ藻ブルームの際の減少比より小さく、BSi→DSi の溶出が PON→DIN の分解よりも遅いことをそのとおりに反映しているようである。

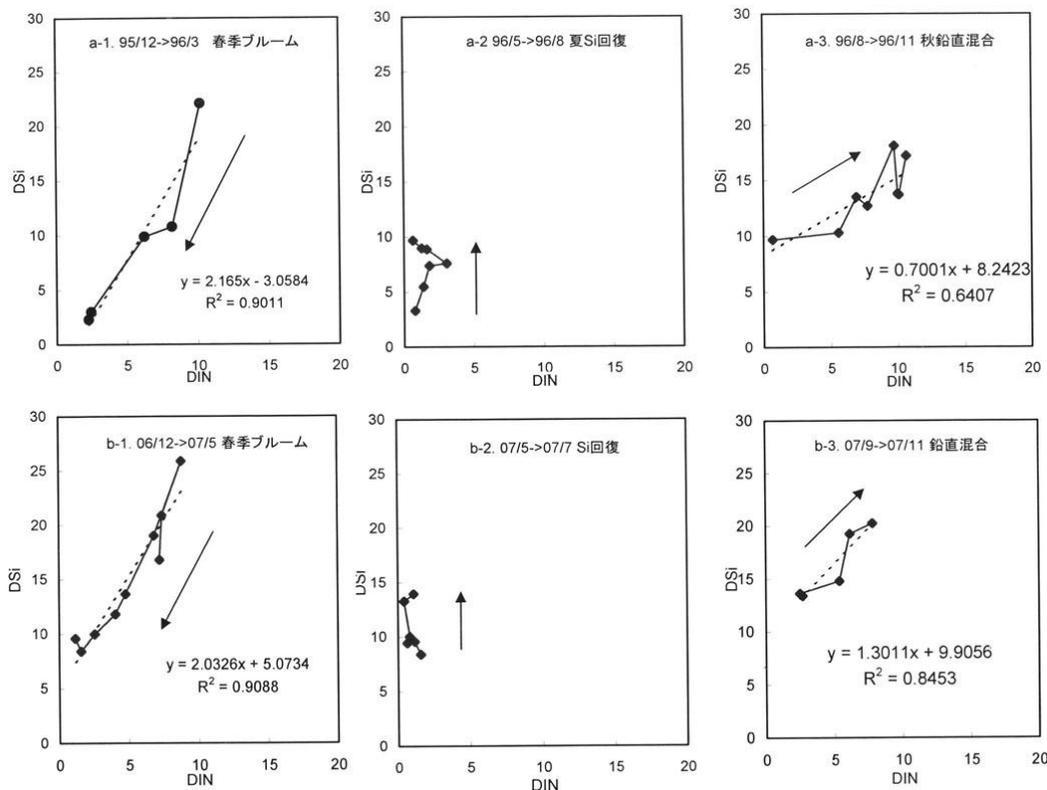


図11. 1996年当時（上段、a）および2007年（下段、b）にフェリーで得られたDINとDSiの相関の季節変化。それぞれ左側図（a-1およびb-1）には春季ブルーム時にDINとDSiともに減少すること、中央図（a-2およびb-2）には上層にケイ藻が希薄なために夏季にDSiのみが上昇すること、右側図（a-3およびb-3）には、鉛直混合でDINとDSiともに回復することが現れている。1996年当時は春季ブルーム終了時にDIN切片が現れた（残った）のに対し、2007年ではDSi切片が現れたことが特徴的である。

ここで、1.のフェーズの切片から春季ブルームの過程で栄養塩のうちのどれが枯渇してどれが過剰に残るかを見る。a-1. では、DIN切片が正、すなわち1996年頃には、DSiが枯渇してDINが残る傾向があった。b-1. では切片はDSi側にあり、DINが枯渇した際にDSiが6~7 μ M残る勘定になる。このことから、1970年代に赤潮が頻発した頃にくらべて、瀬戸内海ではSiのベースラインが徐々に上昇し、シリカ欠損に関しては環境が回復の傾向になっていることが推定できる。これがN、Pの削減の効果なのかは即断できないが、このような効果を推定するためにはこのような時系列データが鍵になる。

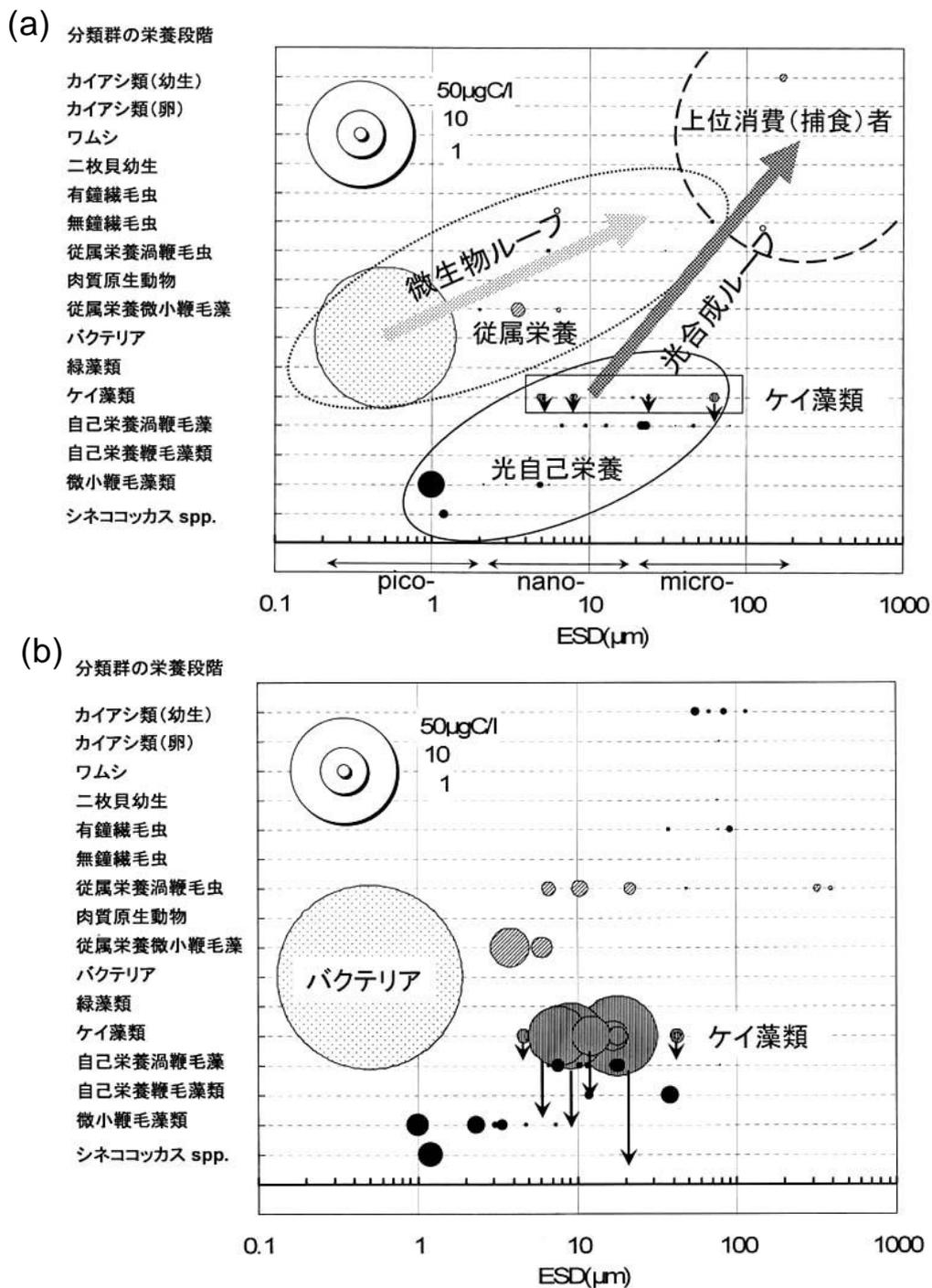


図12. 夏季の(a)播磨灘と(b)大阪湾の表層海水における浮遊生物粒子現存量を円の大小で示したもの。横軸は粒子サイズ分画，縦軸は栄養段階分画（縦軸）を示し，一次生産者を下，従属栄養者，捕食者を上方とした。(a)の実線楕円が自己栄養生物グループ、点線楕円が従属栄養のグループにあたる。バクテリアを起点とする「微生物ループ」，ケイ藻を起点とする両グループとも上位消費者の栄養源となるが，ケイ藻のみが↓で示したように，沈降で上層の栄養物質を取り除いていることになる。

植物プランクトンの季節性についても、フェリーで採取したサンプルにもとづいて考察する。2007年夏季の播磨灘および大阪湾における浮遊粒子生物の組成を図12(a)および(b)に示した。別の観測で、春季にはケイ藻バイオマスは数十 μgC に達することが確認されているが、夏季の播磨灘においてはケイ藻が希薄になっており、バクテリアなど従属栄養生物による「微生物ループ」が主体になっている。同時期の大阪湾ではある程度のケイ藻バイオマスが維持されている。この相違は、播磨灘では冬季の栄養塩が使い尽くされるのに対して、大阪湾では淀川からSiが間断なく補給されているため、播磨灘ではケイ藻の自律沈降が顕著だったが、大阪湾では顕著でなかったと解釈できる。

(4) 全般を通しての考察

序で提起した問題に対し、このサブテーマで結果を総合すると、以下のようなシナリオにまとめられるだろう。

長江流域では、人口×消費増大に伴ってNとP施肥量が増加し、長江のNおよびP栄養塩が増加した。一方で過去からのダム建設累積効果で（三峡ダムだけでなく）Si栄養塩濃度が減少し、今後さらに流下量減少が予測される。従来の「シリカ欠損仮説」によれば、このため長江エスチャリーでケイ藻→非ケイ藻類への遷移が進行し、有害赤潮が増加するとともにと考えられる。さらに、小サイズ非ケイ藻類植物プランクトン→微小動物プランクトン→クラゲという食物連鎖によるクラゲ増加の説明も成立するだろう。ただし、瀬戸内海域でのフェリーによる栄養塩時系列と水産庁のケイ藻・非ケイ藻類別赤潮記録を照合・精査すると、この仮説が単純に適用できない事例が出てきた（Harashima et al., 2006⁴⁾ および本報告10ページ、）。

この事例を合理的に説明するには、「栄養塩環境が植物プランクトン増殖を支配する」という方向の因果関係とは逆に、「栄養塩環境に応じたケイ藻が栄養塩環境を決定する」という方向の因果関係を考える必要がある。ここで Bienfang の実験による「DSiが枯渇するとケイ藻の沈降が強まる」というメカニズムに注目する。このメカニズムは海域での実証例に限られたままになっていたが、本研究の結果からは、生態系モデルにこのメカニズムを組み込んだ場合の結果がフェリー観測と赤潮記録と整合した。すなわち、冬季のDINとDSiの両栄養塩が潤沢な状態から、ケイ藻の春季ブルームが進行してDSiが枯渇すると、ケイ藻は沈降してしまう。その結果、夏季上層ではDSiを吸収する生物が希薄になるため、DSiは一時的に増加する。このDSiが増えた夏季に渦鞭毛藻の赤潮が出現することが多いため、一見「シリカ欠損仮説」が適用できないようにみえる。しかし事実的には、冬季に存在するDSiがDINよりも潤沢であるか、河川からDSiが安定供給されていれば、ケイ藻は上層に存在しつづけるのだから、N、P負荷を増大させ、Siを欠損させる人間活動に着目することは重要であるだろう。

フェリーの栄養塩季節変化データからは、春季ブルーム期間中のDSi減率/DIN減率の比が2以上あり、（沿岸海域性の）ケイ藻類は従来のレッドフィールド比（C:N:P:Si=106:16:1:15）よりもSiを多めに摂取することもわかった。すなわちSiがNの2倍程度現存あるいは供給されてもSiが枯渇状態に至る可能性は否定できない。

フェリーの栄養塩データからは、1990年代には春季ブルーム後にDINが残る状態であったのが、2007年にはDSiが残る状態であったことが確認できた。有害赤潮が顕著だった1970年代には、DINの残留がより大きかったと推定される。

実は、陸水の影響を受ける沿岸海域では P が制限要因になることが多い。ただし、Bienfang の実験では P 枯渇の状態でのケイ藻沈降加速ははっきりしなかった。これは Tett³⁵⁾が考察しているように、細胞内プールするメカニズムが、レッドフィールド比において小さい P についてもっとも有効に働くことによるのかもしれない。このようなことから、本生態系モデルでは P 枯渇による沈降加速は含めなかった。

これまでの議論から、「Si 欠損→(自律沈降で)ケイ藻が上層で希薄になる→生物ポンプの減退→栄養物質の上層残留」という「拡大シリカ欠損仮説」の趣旨が概ね検証されたといつてよいだろう。なお、動物プランクトンが植物プランクトンを捕食することも春季ブルームを終わらせる要因になるから、(自律沈降で)の部分是非限定的であってもよい。ただし、捕食後に糞粒(フイーカルペレット)を排出する際、非ケイ藻類起源の糞粒がくずれやすいため沈みにくく、海水中で無機栄養塩に回帰しやすいのに対し、ケイ藻起源の糞粒はしまっていて比重が大きく、海底に沈みやすい。(サブテーマ(3)および Tuner(1994)⁶³⁾参照)。この場合にも、比重を大きくしているのはシリカの殻(BSi)なのであるから、やはり Si の多寡が要因になる。

プランクトンの沈降については、粘土鉱物が付着することによって沈降が加速されること(ミネラルバラスト効果)も関わり、すでにモンモリロナイトなどの粘土鉱物の散布が「赤潮駆除剤」として実用化されていることと整合する。この過程は非常に非線形が強くモデルに組み込むことが難しいが、簡略に取り扱ったからは、本来沈みにくい渦鞭毛藻類についてはこの効果が有意となる可能性があるが、ケイ藻については自律沈降に比肩しないようである。

また、モデル構造についても簡略化に努めたが、各生物の生理学的パラメータなど一意的に決められないものを多く含んでいる。これらについては文献から妥当と思われる値を宛てたが、さらに感度解析を進める余地はある。ただし、Si がかわれば基本的に比重を大きくし、ケイ藻であれば概ねサイズが大きく、ともにストークス沈降速度を大きくするというように、物理的にも裏づけられた相違をもたらす要素はそれほど多くない。この要素以外のパラメータの精密化を図っても、生物種が多様なので際限がないともいえるだろう。

瀬戸内海で Si/N 比率が回復しつつあるのに対し、長江エスチャリーについては、三峡ダムの完全湛水によって長江の Si 濃度がさらに減ることと、将来的には「南水北調」によって水流量が華北に向けられる事から Si 流下絶対量が減少するため、今後もさらに。モデル検証のためのデータについては、近年中国側から論文が多く出したが、海域の時系列的なデータが充分ではない。本モデルの適用にあたり、同海域では SS 濃度が高いため、第一の制限要因は光であって栄養塩ではないという議論は重要である。ただし、長江自身の SS 濃度はダム影響で減っているのに(図 6(d)、渦鞭毛藻類(ケイ藻よりも光不足に強いとされる)の赤潮が増加しているので、やはり栄養塩の要素は重要であるだろう。

また、本モデルについては、「栄養物質移出指数」という形でクラゲのバイオマスに転換される量を簡略化して表現し、Si および N 流下量と関連づけた。これはあくまでもベースラインであって、図 1 に示したような他の要素についての研究の重要性は強まるだろう。特に、エチゼンクラゲ漂着量が年によって一定でないことから、様々な事象の非線形結合的な要素が考えられ、これらについても解明を待つ要素が大きい。

(5) 謝辞 定期航路船舶による観測に協力いただいた関西汽船株式会社、アドバイザーボード

委員として有益な助言をいただいた広島大学上真一教授ならびに岡山大学大久保賢治教授に深謝いたします。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- 1) 従来の海洋環境問題の議論で、NとPが中心であったのに対して、新たに「拡大シリカ欠損仮説」を提起してSiの重要性を検証した。特に、DSi枯渇時にケイ藻の自律沈降が起こることを海域データの上から検証し、上記仮説を裏づけた。
- 2) 長江のDSi濃度が低下し、DIN濃度が上昇するほど栄養物質のエスチャリー外への流出が増え、これがクラゲ増加につながることをモデル上で予測した。
- 3) フェリー観測に基づいて「春季ブルーム期」と「夏季ケイ藻希薄期」を分けて解析することにより、栄養塩環境が植物プランクトン増殖を支配するだけではなく、逆にケイ藻動態（Si枯渇時の自律沈降等）が栄養塩環境を支配して環境決定要因となることを明らかにした。
- 4) 「春季ブルーム期」の播磨灘のDSi-DIN相関から、栄養塩潤沢時にはケイ藻が従来のレッドフィールド比よりも2倍ほどの対N比でSiを吸収すること、すなわち初期にDSiがDINがの2倍ほどあってもDSiが枯渇する可能性があることが示された。また、1990年代には、ブルーム終了時にNが残留していたが2000年代後半にはSiが残留するようになった。すなわち、瀬戸内海は環境回復傾向にあることが確認できた。
- 5) 東アジア縁辺海の環境変質は、陸域からのN、P、Si流入組成変化だけで説明できるものではないが、本課題では広汎なレビューの結果も併せて、このベースライン上に他の複数要因が重なったことによるものと推定できることをとりまとめた。

(2) 地球環境政策への貢献

従来の海洋環境施策はリンと窒素が中心だったが、ケイ素も重要な要素であることを明らかにし、以下のような国際的な枠組みでの提言に含めた。

- 1) UNEP-NOWPAP/3-WG2（国連環境計画-北西太平洋地域海行動計画/共同モニタリング-第2作業グループ「河川経路および直接負荷による海洋汚染」）の専門委員として資料提供、議論を行い、国別報告書⁶⁴⁾、よびNOWPAP地域の河川経路・直接負荷汚染概括報告書⁶⁵⁾、海洋環境統合報告書⁶⁶⁾の作成に加わるとともに、シリカ欠損過程の重要性を記載に含めた。
- 2) ICSU-SCOPE（国際学術連合-環境問題特別委員会）が2007年に主催したシンポジウム「閉鎖性海域のダイナミクス-栄養塩・堆積質の流入」のグループ討論に加わった。その報告にはSi/N比の問題も含まれ、政策提言を視野にいたした「流域・内湾・半閉鎖性海域-その科学と管理」として2008年に出版された²⁾。
- 3) フェリー観測に関して、2008年にサウザンプトン海洋研究センターで“Ferrybox and Ship of Opportunity Meeting”が開かれ、本課題代表も参加した。会合全体の報告内容が「... 日本、韓国を含む世界の海域で成果を上げつつある...」としてScience誌に掲載された⁶⁷⁾。欧州フェリーボックスが2000年開始なのに対し、国立環境研究所のフェリー観測は1991年開始であり、その先見性が評価されている。
- 4) NSF（米科学財団）がクラゲ増加問題についてプレスリリースを行い⁴⁴⁾、本課題の「ダムが栄養

塩流下を妨げることがクラゲ増加につながる可能性」が無記名ながらも紹介され、今後この関連の研究発展が予想される。

6. 引用文献

- 1) Ittekkot, V. et al. (eds.) (2006): *The silicon cycle*, Island Press.
- 2) Urban, E. et al. (eds., 2008): *Watersheds, Bays, and Bounded Seas -The Science and Management of Semi-Enclosed Marine Systems*, Island Press.
- 3) Kroeze, C., Middelburg, J., Leemans, R., Fennel, W., Glaser, M., Harashima, A., Liu, K. K. and Meybeck, M. (2008): Integrating tools to assess changes in semi-enclosed marine systems, in Urban, E. et al. (2008)²⁾, pp77-96.
- 4) Harashima, A. et al. (2006): Verification of the silica deficiency hypothesis based on biogeochemical trends in the aquatic continuum of Lake Biwa - Yodo River - Seto Inland Sea, Japan, *Ambio* 35, 185-204.
- 5) 原島省、樽谷賢治、井関和夫 (2007): 流入栄養塩比の変化による内湾・陸棚域の生態系変質の可能性、*海洋気象学会誌「海と空」*82、61-71.
- 6) Harashima, A. *et al.* (1997): Monitoring algal bloom and related biogeochemical changes by a flow-through system deployed on ferries in the adjacent seas of Japan, in Kahru, M. et al. (eds.), *Monitoring Algal Blooms*, 183-213, Springer.
- 7) 海洋図集編委会[編] (1992): 渤海・黄海・東海海洋図集 水文, 524pages, 海洋出版社, 北京.
- 8) 海洋図集編委会[編] (1991): 同上 化学, 257pages, 同上.
- 9) 海洋図集編委会[編] (1991): 同上 生物, 250pages, 同上.
- 10) Meybeck, M. (1982): Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers, *American Journal of Science* 282, 401-450.
- 11) Smith, S. V. *et al.* (2003), Humans, hydrology, and the distribution of inorganic nutrient loading to the ocean, *BioScience* 50, 776-782.
- 12) Treguer, P. *et al.* (1995): The silica balance in the world ocean: A reestimate, *Science* 268, 375-379.
- 13) Seitzinger, S. P. *et al.* (2005): Sources and delivery of carbon, nitrogen, and phosphorus to the coastal zone: An overview of Global Nutrient Export from Watersheds (NEWS) models and their application, *Global Biogeochem. Cycles* 19, GB4S01, doi:10.1029/2005GB002606.
- 14) Dürr, H. et al. (2005): Lithologic composition of the Earth's continental surfaces derived from a new digital map emphasizing riverine material transfer, *Global Biogeochem. Cycles* 19, GB4S10.
- 15) Vörösmarty, C. J. *et al.* (1997) The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world. *Ambio* 26, 210-219.
- 16) Kobayashi, J. (1960): A chemical study of the average quality and characteristics of river waters of Japan. *Ber. Ohara Inst. Landwirtschaft Biol.* 11, 313-358.
- 17) Hartmann, J., Jansen, N., Dürr, H., Harashima, A., Okubo, K., Kempe, S. (2009): Predicting riverine dissolved silica fluxes into coastal zones from a hyperactive region and analysis of their first-order controls, *Int J Earth Sci*, DOI 10.1007/s00531-008-0381-5 (2009)
- 18) Duan, S. et al. (2008): Seasonal changes in nitrogen and phosphorus transport in the lower

- Changjiang River before the construction of the Three Gorges Dam , *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 79, 239–250.
- 19) Wang, B. (2006): Cultural eutrophication in the Changjiang (Yangtze River) plume: History and perspective, *Estuarine Coastal and Shelf Science* 71, 3-12.
 - 20) Gong, G. et al. (2006): Reduction of primary production and changing of nutrient ratio in the East China Sea: Effect of the Three Gorges Dam?, *Geophys. Res. Let.* 33, L07610.
 - 21) Zhang, J. *et al.* (2006): Dissolved silica in the Changjiang (Yangtze River) and adjacent coastal waters of the East China Sea, in Ref²⁾, pp. 71-80.
 - 22) Syvitski, J. P. M. et al. (2006): Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean, *Science* 308, 376-380.
 - 23) Yang, S.-L. et al. (2003): Delta response to decline in sediment supply from the Yangtze River: evidence of the recent four decades and expectations for the next half-century, *Estuarine Coastal and Shelf Science* 57, 689-699.
 - 24) Yang, Z. et al. (2005): Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: The past 55 years and after the Three Gorges Dam, *Water Resour. Res.* 42, W04407.
 - 25) Deng, B. et al. (2006): Recent sediment accumulation and carbon burial in the East China Sea, *Global Biogeochem. Cycles* 20, GB3014, doi:10.1029/2005GB002559, 2006
 - 26) Yang, D., et al. (2003): Examination of silicate limitation of primary production in the Jiaozhou Bay North China, Silicate being a limiting factor of phytoplankton primary production, *Chin. J. Oceanol. Limnol.* 20, 208-225.
 - 27) Armstrong, R. A. et al. (2002): A new, mechanistic model for organic carbon fluxes in the ocean based on the quantitative association of POC with ballast minerals, *Deep Sea Res. II* 49, 219-236.
 - 28) Hamm, C. E. (2002): Interactive aggregation and sedimentation of diatoms and clay-sized lithogenic material, *Limnol.Oceanogr.* 47, 1790-1795.
 - 29) Passow, U. and De La Rocha, C. L. (2006): Accumulation of mineral ballast on organic aggregates, *Global Biogeochem. Cycles* 20, GB1013, doi:10.1029, 37-43.
 - 30) Ittekkot, V. (1992): Organic carbon removal from the sea, continental connection, *London Geol. Soc. Pub l. No.64*, 167-176.
 - 31) Milliman, J. D. et al. (1985): Transport and deposition of river sediments in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf, *Continental Shelf Research* 4,37-45.
 - 32) Egge, J. K. and Aksnes, D. L. (1992): Silicate as a regulating nutrient in phytoplankton competition. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 83, 281–289.
 - 33) Li, Y.B. et al. (2008): An ecosystem model of the phytoplankton competition in the East China Sea, as based on field experiments, *Hydrobiologia* 600, 283–296.
 - 34) Wong, K.T.M. et al.(2007): A simple model for forecast of coastal algal blooms, *Estuarine Coastal and Shelf Science* 74 175 – 196.
 - 35) Tett, P. et al. (2003): Influence of nutrient biogeochemistry on the ecology of northwest European shelf seas, in Black, K. D. and Shimmielid, G. B. (eds.): *Biogeochemistry of Marine Systems*, 293-363, Blackwell.

- 36) Wassmann, P. et al. (1996): Influence of dissolved silicate on vertical flux of particulate biogenic matter, *Mar. Pollut. Bull.* 33, 10-21.
- 37) Roberts, E. C. et al. (2003): Response of temperate microplankton communities to N:Si ratio perturbation, *J. Plankton Res.* 25, 1485–1495
- 38) Bienfang, P. K. et al. (1982): Sinking rate response to depletion of nitrate, phosphate and silicate in four marine diatoms. *Mar. Biol.* 67, 295–302.
- 39) Richardson, T. L. and Cullen, J. J. (1995): Changes in buoyancy and chemical composition during growth of a coastal marine diatom: ecological and biogeochemical consequences, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 128, 77–90.
- 40) Kahl, L.A. et al. (2008): Effects of phytoplankton physiology on export flux, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 354: 3–19
- 41) Smetacek, V. (1999): Revolution in the ocean, *Nature* 401, 647.
- 42) Raven, J. A. and Waite, A. M. (2004): The evolution of silicification in diatoms: inescapable sinking and sinking as escape? *New Phytologist* 162, 45–61.
- 43) Purcell, J. E., et al. (2007): Anthropogenic causes of jellyfish blooms and their direct consequences for humans: a review, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 350, 153–174.
- 44) National Science Foundation: Press Release 08-216, Dec 12, 2008
(http://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=112797&org=NSF&from=news).
- 45) Kawahara, M. et al. (2006): Unusual population explosion of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* (Scyphozoa: Rhizostomeae) in East Asian waters, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 30, 161-173.
- 46) Arai, M. N. (2001): Pelagic coelenterates and eutrophication: a review, *Hydrobiologia* 451, 69–87.
- 47) Sommer, U. et al. (2002): Pelagic food web configurations at different levels of nutrient richness and their implications for the ratio fish production: primary production, *Hydrobiologia* 484, 11-20.
- 48) Yoon, W. D. et al. (2008): Physical processes influencing the occurrence of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* (Scyphozoa: Rhizostomeae) around Jeju Island, Korea, *J. Plankton Res.* 30, 251-260.
- 49) Xian, W.-W. et al. (2006): Jellyfish blooms in the Yangtze estuary, *Science* 307, 41.
- 50) 徐兆礼 (2006): 東海水母類豐度の動力学特征, *動物学報* 52, 854 - 861 (in Chinese with English abstract).
- 51) Lin, C.-L. et al. (2001): Long-term variations of temperature and salinity of the Bohai Sea and their influence on its ecosystem, *Progress In Oceanography* 49, 7-19.
- 52) Lin, C. et al. (2005): Environmental changes and the responses of the ecosystems of the Yellow Sea during 1976–2000, *J. Marine Systems* 55, 223-234.
- 53) Graham, W. M. et al. (2001): A physical context for gelatinous zooplankton aggregations: a review, *Hydrobiologia* 451, 199–212.
- 54) Lucas, C. H. (2001): Reproduction and life history strategies of the common jellyfish, *Aurelia aurita*, in relation to its ambient environment, *Hydrobiologia* 451, 229–246.
- 55) Boero, F. et al. (2008): Gelatinous plankton: irregularities rule the world (sometimes), *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 356: 299–310.

- 56) Lo, W.T. et al. (2008): Enhancement of jellyfish (*Aurelia aurita*) populations by extensive aquaculture rafts in a coastal lagoon in Taiwan, *ICES Journal of Marine Science* 65, 453-461.
- 57) Condon, R. H. et al. (2001): Effects of low dissolved oxygen on survival and asexual reproduction of scyphozoan polyps (*Chrysaora quinquecirrha*), *Hydrobiologia* 451, 89-95.
- 58) Li, D. and Daler, D. (2004): Ocean pollution from land-based sources: East China Sea China, *Ambio* 33, 30-39.
- 59) Chang, P.-H. and, Isobe, A. (2003): Laboratory Experiments on the Steady Gravitational Circulation Excited by Cooling of the Water Surface, *J. Geophys. Res.*, 108(C9), 3299, doi:10.1029/2002JC001749.
- 60) Harashima, A.(1986): Laboratory Experiments on the Steady Gravitational Circulation Excited by Cooling of the Water Surface, *J. Geophys. Res.*, 91(C11), 13,056–13,064.
- 61) Liu, S. M., Zhang, J. and Li, R. X. (2005): Ecological significance of biogenic silica in the East China Sea, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 290, 15–26.
- 62) Fang, T. H. et al. (2007): Sedimentary phosphorus species and sedimentation flux in the East China Sea, *Continental Shelf Research* 27, 1465–1476.
- 63) Turner R. E. and Rabalais, N. N.(1994): Coastal eutrophication near the Mississippi River delta, *Nature* 368, 619–621.
- 64) UNEP-NOWPAP-POMRAC (Pollution Monitoring Regional Activity Center) (2006): National Reports on River and Direct Inputs of Contaminants into the Marine and Coastal Environment in NOWPAP Region, POMRAC, Vladivostok, 256pages.
- 65) UNEP-NOWPAP-POMRAC (2006): REGIONAL OVERVIEW on River and Direct Inputs of Contaminants into the Marine and Coastal Environment in NOWPAP Region, 256pages.
- 66) UNEP-NOWPAP-POMRAC (2007): State of the Marine Environment in the NOWPAP Region, POMRAC, Vladivostok, 84pages.
- 67) Ainsworth, C. (2008): Ferryboxes begin to make waves, *Science* 322, 1627–1629.

7. 国際共同研究等の状況

国立環境研究所、岡山大学が日本の全河川の溶存ケイ酸データを数値処理し、ダルムシュタット工科大学(独)がシリカ流出モデルを担当して共同研究を行い、Hartmann et al.(2009)¹⁷⁾ の論文発表を行った(学術誌の項参照)。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表(学術誌・書籍)

<学術誌(査読あり)>

1) A. Harashima.: *J. Environmental Science for Sustainable Society*, 1, 33-38 (2007)

"Evaluating the effects of change in input ratio of N: P: Si to coastal marine ecosystem".

2) 原島省、井関和夫、樽谷賢治: *海洋気象学会誌「海と空」*、82、61-71 (2007)

「流入栄養塩比の変化による内湾・陸棚域の生態系変質の可能性」

3) 小林志保、藤原建紀、原島省: *沿岸海洋研究*、44、165-175 (2007)

「瀬戸内海における溶存態無機窒素の季節・経年変動とその要因」

- 4) 原島 省: 環境バイオテクノロジー学会誌、8、9-15 (2008)
海洋生態系におけるケイ藻とシリカの役割
- 5) 浅野和仁、高橋 理、石原靖文、原島 省: 海洋理工学会論文集、55-58 (2008)
「システムダイナミクスツールによる海洋生態系モデルの構築」
- 6) C. Kroeze, J. Middelburg, R. Leemans, E. Escobar-Briones, W. Fennel, M. Glaser, A. Harashima, K.-K. Liu, M. Meybeck, in E. R. Urban, Jr. et al. (eds.), Watersheds, Bays, and Bounded Seas -The Science and Management of Semi-Enclosed Marine Systems, pp.77-96 (2008)
"Integrating Tools to Assess Changes in Semi-Enclosed Marine Systems"
- 7) J. Hartmann, N. Jansen, H.s Dürr, A. Harashima, K. Okubo, S. Kempe, Int J Earth Sci, DOI 10.1007/s00531-008-0381-5 (2009)
"Predicting riverine dissolved silica fluxes into coastal zones from a hyperactive region and analysis of their first-order controls"
- 8) 小林志保、藤原 建紀、原島省: 沿岸海洋研究、46、79-85 (2009)
「瀬戸内海における溶存無機態リン・ケイ素の季節・経年変動」

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 原島 省: 計測と自動制御 45、866-870 (2006)
「定期航路利用による海洋環境変動の高頻度モニタリング」
- 2) 原島 省: 月刊海洋 454、362-367 (2008)
「珪藻-ケイ素結合系の変動」

(2) 口頭発表

- 1) Akira Harashima, International Session of The Science and Technology on the Sustainable Society, Okayama, (2007)
"Silica deficiency causing ecosystem changes in the downstream".
- 2) 原島 省、浅野和仁、高橋 理、石原靖文: 日本海洋学会2007年度春季大会講演要旨386 (2007)
「拡大シリカ欠損に関するモデル解析」
- 3) 浅野和仁、高橋 理、石原靖文、原島 省: 海洋理工学会2007年度講演要旨、京都 (2007)
「システムダイナミクスツールによる海洋生態系モデルの構築」
- 4) 原島 省、井関和夫、浅野和仁、高橋 理、石原靖文: 日本海洋学会2008年度春季大会講演要旨集 317、東京 (2008)
「沿岸・縁辺海域におけるミネラルバラスト効果のモデル解析」
- 5) 井関和夫、清本容子、岡村和麿、原島 省: 日本海洋学会2007年度秋季大会講演要旨集386、那覇 (2007)
「沖縄舟状海盆における植物プランクトンフラックスの周年変動と物質輸送の推定」
- 6) 原島 省: 日本農芸化学会シンポジウム 講演要旨集4SY07-5、名古屋 (2008)
「海洋生態系におけるシリカの役割」
- 7) 原島 省: 第23回全国環境研究所交流シンポジウム講演要旨、20-24、つくば (2008)

「定期航路利用による海洋の長期・高頻度モニタリング」

8) A. Harashima, A. (2009): FerryBox and Ship of Opportunity Meeting, Southampton, UK 2009)

"Variation of N,P, Si nutrients and HAB outbreaks revealed by marine monitoring using ferries "

9) 原島 省、樽谷賢治、井関和夫、浅野和仁、高橋 理、三木周: 日本海洋学会2009年度春季大会講演
要旨集、361、東京 (2009)

「長江エスチャリーからの生態系要素エクスポートの評価」

10) 井関和夫、清本容子、岡村和麿、原島 省、矢野朝美: 日本海洋学会2009年度春季大会講演要
旨集386、東京 (2009)

「沖縄舟状海盆における植物プランクトンフラックスの周年変動と物質輸送の推定」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

1) 毎日新聞 (2006年6月10日夕刊)

2) 読売新聞 (2006年6月24日朝刊)

3) Mainichi Daily News (2006年6月12日)

4) 日本経済新聞 (2006年8月27日朝刊)

5) 毎日新聞 (2006年12月18日滋賀県版)

6) 朝日新聞 (2008年2月13日夕刊科学欄)

7) バンクーバー水族館ウェブサイト(<http://www.vanaqua.org/aquanew/fullnews.php?id=2089>)

8) 米国科学財団 (NSF) プレスリリース08-216 (2008年12月12日)

9) Science (2008年12月12日, Vol.322, 1627-1629)

10) Trends in Ecology and Evolution (doi:10.1016/j.tree.2009.01.010, 312-322)

(6) 受賞等

なし