

### D-3 アジア縁辺海域帯における海洋健康度の持続的監視・評価手法と国際協力体制の樹立に関する研究

#### (1)海洋健康度の持続的評価手法と関連沿岸国の協力体制樹立に関する研究

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・中村泰男

化学環境研究領域 動態化学研究室 功刀正行

流域管理研究プロジェクト 海洋環境管理研究チーム 木幡邦男

東海大学開発工学部 福島 甫・虎谷充浩

平成 11 年度～13 年度合計予算額 49,989 千円

(うち、平成 13 年度予算額 16,812 千円)

[要旨] 経済成長の著しいアジア各国に隣接する海域では、様々な環境変質が懸念されている。その中の「シリカ欠乏仮説」すなわち、「人為影響によりリン(P)および窒素(N)の負荷が増加し、自然の風化作用によるケイ素(Si)の補給が減少するため、海洋生態系の基盤においてケイ藻類に対する非ケイ藻類植物プランクトンの割合が増加する<sup>1)・5)</sup>」という仮説に基づき、海水の Si 対 N の存在比および植物プランクトン分類群別の存在比を環境健康度の 1 つの指標とする。これらの量は時空間変動が顕著なため、定期航路船舶により反復的な空間分布の計測をする必要がある。本研究では、そのための技術を発展させ、平成 12～13 年度の 2 年間、日本近海～東・南シナ海～マラッカ海峡を定期航行するコンテナ船にモニタリング装置を設置して各 6 測点で 12 回にわたる計測を行った。この結果、東シナ海・南シナ海全体としては各栄養塩濃度は低く、Si よりもむしろ N が枯渇していたが、香港近傍海域および大阪湾で、時期に依存して Si の相対比が小さくなった。また、渦鞭毛藻類などの非ケイ藻植物プランクトンが出現することが確認された。このことは、「シリカ欠乏仮説」と符合する。ただし、栄養塩組成がプランクトン組成を決定するという解釈（ボトムアップコントロール）だけでは説明できず、逆にケイ藻類が Si を吸収してシリカ欠乏に至るという解釈（準トップダウンコントロール）も必要であると考えられる。本研究のうち、シリカ欠乏のプロセス研究部分は、SCOPE 主催によるシリカワークショップの議論への貢献となった。一方、定期航路船舶による海洋健康度評価については、関連沿岸国の研究者を招聘したワークショップを開催し、これらの機関の国際協力のもとに推進することの意義が合意された。また、開発された定期航路利用技術は、欧州フェリーボックス計画および北太平洋科学機構 (PICES) の海洋モニタリング計画推進への貢献となった。

[キーワード] アジア縁辺海域, シリカ欠乏仮説, DSi/DIN 比, ケイ藻類/非ケイ藻類比, 定期航路モニタリング

#### 1. はじめに

1990 年代後半に一時的に落ち込んだとはいえ、東アジア各国の経済成長率は世界で最も高く、これに伴う環境負荷物質の影響は、最終的に各国の沿岸海域およびその外縁にある東シ

ナ海、南シナ海、日本近海などの縁辺海域に及ぶと考えられる。多様な負荷物質のうちリン (P) 窒素 (N) の流入による富栄養化や赤潮の被害が増大してきたことは周知の事柄である。これらに加え、近年「シリカ欠乏仮説 (Silica Deficiency Hypothesis)」に関連した問題が指摘されてきた<sup>11-5)</sup>。すなわち、人為影響で N および P の負荷が増大する一方、自然の風化作用で溶出するケイ素 (Si) の海域への供給は、ダム等による陸上停滞水域の増加のため減少する。このため海洋生態系の基盤が、Si を必須とするケイ藻類から非ケイ藻類植物プランクトンにシフトすることが懸念されるというものがある。有害赤潮は概ね後者のうちの渦鞭毛藻類などに属する。

図 1 は、世界各地の陸水域の溶存無機窒素 (DIN) と溶存ケイ酸 (DSi) の値<sup>6) 12)</sup>を収集し、それぞれ横軸と縦軸にとって図示したものである。これによれば、ヨーロッパなど開発の進んだ集水域を流れる河川はすでに図中の右下部分、すなわち DIN が高く DSi が低い状態 (以後、HNLSi と略称する) にある。東アジア地域は、モンスーンによる降水で DSi の溶出率が高く、しかも日本においてはさらに河川が短いので、この傾向はヨーロッパほどでは顕著ではない。それでも、関東ブロックと近畿ブロックなどの人口密度の高い地域では高度成長期の前から後にかけて HNLSi 化が進行した。また、タイのチャオプラヤ河なども、1950 年代から現代の間に同様の傾向がみられ、経済成長に伴う N, P 負荷増大と陸水域改変の複合効果が HNLSi 化を招いていることが確認できる。

SCOPE(環境汚染特別委員会) はシリカ欠乏仮説に注目し、2 回の「栄養塩・シリカ循環ワークショップ」を開催した (1999 年、スウェーデン、2000 年、ベトナム)。このワークショップにおいては、グループ討論により、シリカ欠乏過程に関する過去のデータの収集と解析を充実させること、今後有効なモニタリングを策定して継続してゆくこと、特にデータや知見の希薄なアジアを対象とすることなどの今後推奨研究の方針がまとめられた。

シリカ欠乏傾向が、海域に影響を及ぼすことが推定されるため、海水の溶存ケイ酸 (DSi) と溶存無機窒素 (DIN) の相対比、およびこの結果と目されるケイ藻類と非ケイ藻類植物プランクトンのバイオマス量の相対比を海洋健康度の指標として定義する意義がある。

DIN, DSi, DIP および植物プランクトン組成は、植物プランクトンのブルーム (大增殖) の時空間スケールで顕著に変化するため、上記の「海洋健康度」を系統的に計るためには通常の観測船では計測頻度および長期性の点で不十分であり、フェリーや商船などの VOS (ボランティア観測船, ship of opportunity という用語も使われる) の利用が有効である。このことは世界的にも認められ、2001 年には EU により「欧州フェリーボックス計画ワークショップ」、2002 年には PICES (北太平洋海洋科学機構) により「VOS モニタリングワークショップ」が開かれ、技術開発に裏付けられた展開の必要性が議論されはじめた。

## 2. 研究の目的

上記の経緯から、アジア縁辺海において VOS を利用して栄養塩組成および植物プランクトンの種組成を海洋健康度指標として監視・評価する。さらに VOS 利用に技術的な進展を加えることを目的とする。国立環境研究所では、1991 年より地球環境研究センターのモニタリング事業として瀬戸内海域や隣接海域を定期航行するフェリー「さんふらわああいぼり」の連続取水系に設置した計測システムによりこのような計測を実施してきた<sup>6)</sup>。本研究課題では、

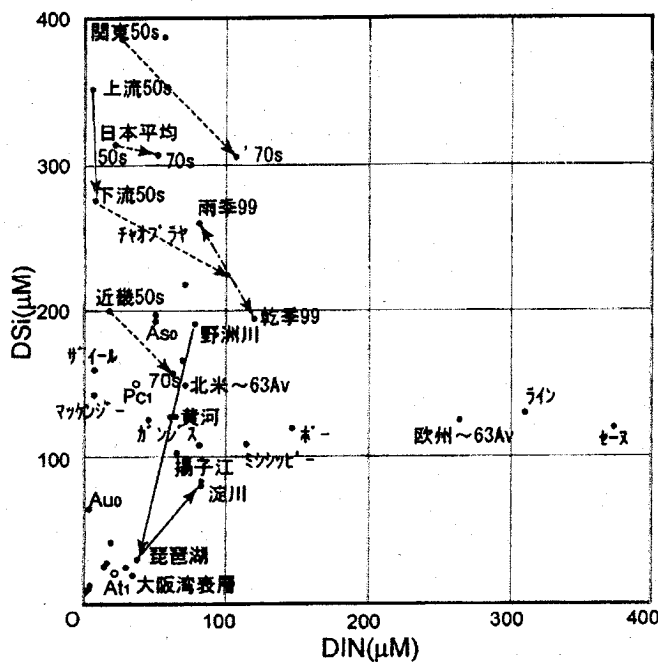


図1. 世界および我国の様々な水域における溶存無機窒素 (DIN, 横軸) と溶存ケイ素 (DSi, 縦軸) の相関。データ源は、文献<sup>7)~13)</sup>等による。

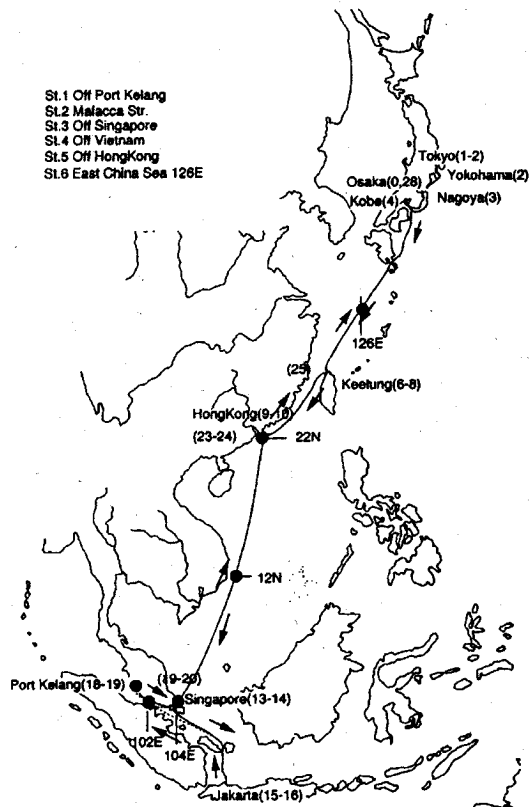


図2. コンテナ船 ACX-LILY (東京船舶株式会社) による海水サンプリング地点、図中の地点略号例 02F6 は 2002 年 February 第 6 地点を示す。

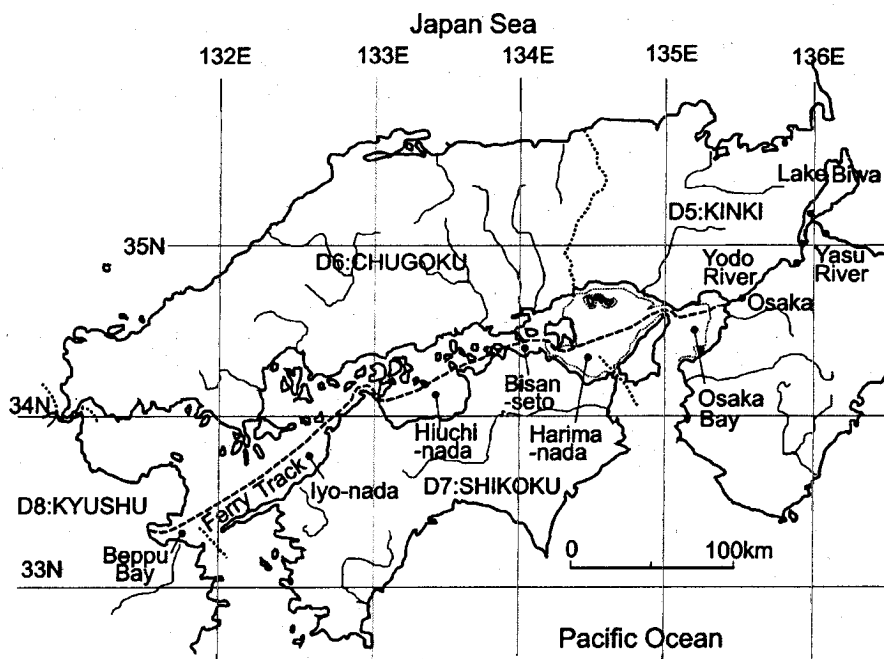


図3. さんふらわあいぼり (関西汽船所属) によるフェリー航路。

その方法論をさらに発展させてアジア縁辺海域を航行するコンテナ船に適用し、この海域の環境評価を行う。また、このような計画を遂行するため、関連各国の研究者との連携関係を樹立することも目的とする。したがって、i)VOSの利用技術の発展、ii)シリカ欠損に関するプロセス研究、iii)国際協力体制の樹立が3本の柱となる。また、VOSによるデータは実測ながらも線上のデータであるため、これを水平2次的に補外するため、衛星データの利用を図る。

### 3. 研究方法

#### (1)コンテナ船航路による海洋健康度の広域計測

アジア海域のDIN, DIP, DSi, ケイ藻類バイオマス量、非ケイ藻類バイオマス量を反復的に計測するために、日本～マレーシア間を往復するコンテナ船ACX-LILY(東京船舶株式会社所属、航路は図2に示す)に海水モニタリングシステムを設置した。「さんふらわああいぼり」に設置したシステムが、図4に示すように、a)マニュアル採水用シンク、b)自動ろ過サンプリング装置、およびc)センサー計測システム(水温、塩分、pH、溶存酸素、クロロフィル蛍光計測用)の3つのユニットからなる船上ラボラトリー型の設計であったのに対し、ACX-LILYではa)のみからなる簡略なものとした(図5)。また、計測システム側で取・排水ポンプはつけず、船側の冷却水取水ポンプの圧力によって、喫水線よりも上に設置したシステムに配水し、計測済みの海水は船側のドレイン管に自然流下させた。

サンプリングとしては、船員に海水サンプルの取得法メニュー(図6)、2Lおよび1Lのプランクトンサンプルボトル、プランクトン固定用試薬、ろ紙フォルダー付きシリンジ(50ml、使い捨て用)、100mLのろ過海水サンプルボトルを預託し、指定した緯度・経度を通過する時刻にa)においてマニュアル採水、ろ過、サンプル固定、冷蔵および冷凍保存を行った。サンプリング地点は、ポートケラン(マレーシア)沖、マラッカ海峡中央部、シンガポール沖、ベトナム沖、香港沖、東シナ海中央部の6点(図2)とし、ほぼ2ヶ月おきに12回(2000年5月下旬、6月下旬、8月下旬、10月中旬、12月中旬、2001年2月上旬、3月下旬、6月下旬、8月中旬、10月中旬、12月中旬、2002年2月上旬)のサンプリングを行うことを依頼した。

シリンジでろ過した海水は、冷凍して回収した後、実験室においてブランルーベ製オートアナライザーにより $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{HNO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-N}$ 、 $\text{Si}(\text{OH})_4$ の値を分析した。前3者の和と後の2者をそれぞれ、溶存態無機窒素(DIN)、溶存態無機リン(DIP)、溶存態無機ケイ素(DSi)とする。

また、2L採水したものは、中性ホルムアルデヒドで固定して冷蔵・回収した後、光学顕微鏡で主に $20\mu\text{m}$ 以上のサイズのプランクトン(マイクロプランクトン)を対象として、同定、サイズ計測、計数を行い、これらの数値をStrathmannの経験式に基づいて炭素バイオマスに換算した。以下、鞭毛藻類と総称する場合には、渦鞭毛藻類、ラフィド藻類、クリプト藻類、

1Lサンプルしたものは、グルタルアルデヒド固定で遮光ビンに保存し、回収した。このサンプルは、 $20\mu\text{m}$ 以下 $1\mu\text{m}$ 内外までの生物粒子(ナノ・ピコプランクトン)の分析を目的とする。また生物粒子が、原核細胞(prokaryotic cell)か真核細胞(eukaryotic cell)かの分別のためにDAPI染色、自己栄養細胞(autotrophic cell)か従属栄養細胞(heterotrophic cell)かの分別のためにFITC染色を行った。これらを、ヌクレオポアフィルタでサイズ分画した後、落

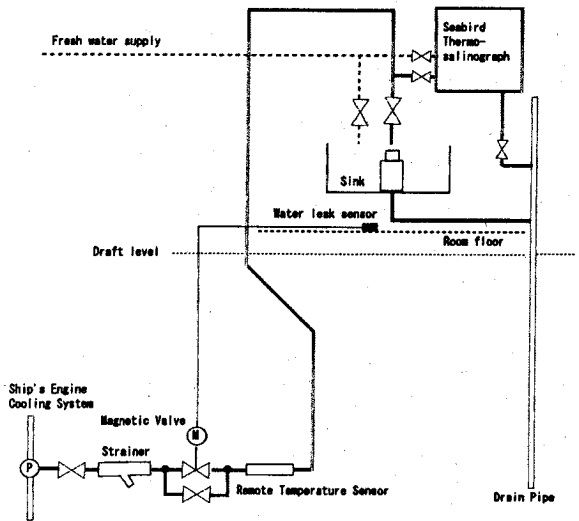
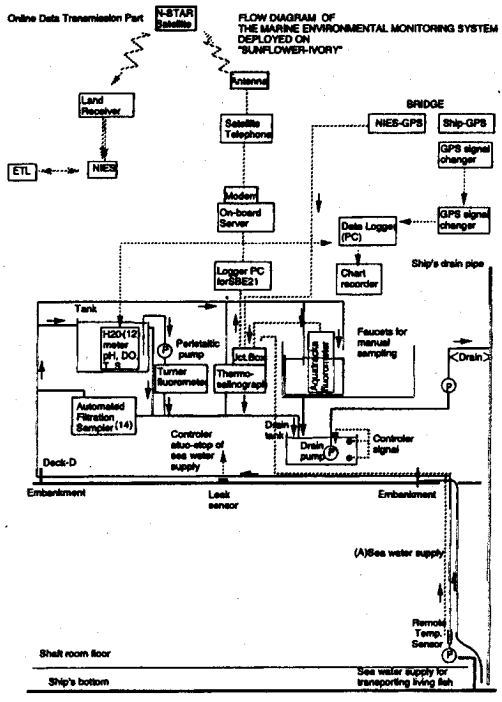
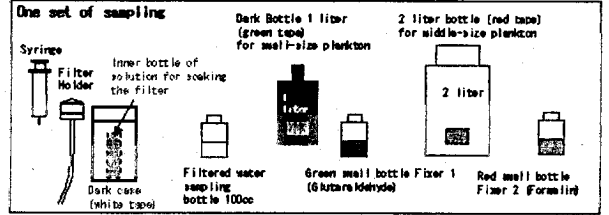
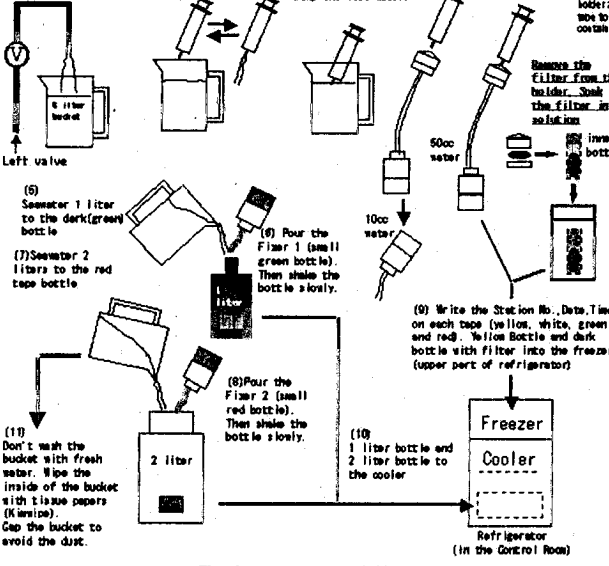


図4(左上) フェリー「さんふらわああいぼり」に設置したモニタリングシステム。従来地球環境研究センターモニタリング予算で設置したものに、オンライン計測部 (SEABIRD-水温塩分計、Aquatracka 蛍光度計、船上データサーバー、ブリッジとの船内データ回線、船舶電話、ブリッジ屋上のデータ送受信アンテナ) は本研究予算により追加設置した。

Method of Sea water sampling



- (1) Push sea water for 10 minutes before sampling. Wash the bucket 3 times by sea water. Then take 5 liters sea water in the bucket and record sampling time.
- (2) Fill the syringe with the sea water. Wash inside 3 times with sea water.
- (3) Take 60cc sea water to the syringes. PUT the Filter holder. Push 10cc into the yellow bottle. Wash the inside of the yellow bottle with 10cc of water. Dump the 10cc water.
- (4) Push 50cc sea water into the syringes. Push 10cc into the yellow bottle. Gap the bottle.



Thank you very much!!

図5 (右上) コンテナ船 ACX-LILY に設置した簡略化したモニタリングシステム

図6 (下左) コンテナ船 ACX-LILY で船員に預託したサンプル取得・処理方法指示プレート

射蛍光顕微鏡で細胞数の計数を行った。

## (2)フェリー航路による高頻度計測

一方、後述のように、より時間分解能の高いデータの併用も必要となった。このため、「さんふらわああいぼり」による2週間に1回の自動ろ過サンプリング ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-N}$ ,  $\text{Si(OH)}_4$  の5項目)を行った。さらに、2001年夏季には、栄養塩の現場自動分析装置による計測 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-N}$ ,  $\text{Si(OH)}_4$  の4項目)を併用した。同船は、別府—大阪間(図3)を片道11時間で2夜で往復する。現場自動分析は、その1時間間隔、すなわち片道ごとにほぼ10地点で行った。また、サブテーマ(2)との共同で、オンラインデータ送受信システムを追加設置し(図4)、陸上でのデータの受信と、センサー計測スケジュール制御の双方向通信を行った。

また、植物プランクトン量の指標としてターナー蛍光光度計によるクロロフィル蛍光を連続的に計測した。さらに自動ろ過サンプリング装置によって得られたろ紙サンプルをHPLC分析にかけて植物プランクトン色素濃度を求めた。これらのうち補助色素(フコキサンチン、ペリディニン等)は、ケイ藻類・渦鞭毛藻類などの組成比を間接的に推定するための補助手段となる。また、水産庁により「瀬戸内海の赤潮」のモニタリング事業のデータが得られており、赤潮構成種の記述から、ケイ藻類・渦鞭毛藻類の別を参照し、DSi/DIN比との関連を考察した。

## (3)衛星データの利用

定期航路船舶で得られるデータは線上あるいは離散点上の値であるという制約がある。これらの数値の二次元面における代表性を吟味するために、ADEOS-OCTS衛星データから導出される植物プランクトン色素量と、フェリー搭載の蛍光光度計によるクロロフィル蛍光信号の比較を行った(図7)。この結果、前者が海面射出光の輝度スペクトル、後者が植物プランクトンから出る蛍光であるという物理量の違いのための不一致は含まれるものの、空間的なプランクトン濃度分布については共通した情報が得られることが確認できた。

また、クロロフィルの他にも衛星データから導出される量の海洋環境の指標としての役割を吟味する。この目的のために、主にSeaStar/SeaWiFS衛星データを利用した。この際、アジア縁辺海域では、黄砂などの地域特有のエアロゾルの要素と、長江河口等の高濁度水の要素から欧米地域用とは異なり、特有の大气補正を行う必要性が生じるため、そのためのアルゴリズムの整備を行った。また、もとのSeaWiFS衛星データの輝度スペクトル値から、(a)クロロフィル-a(植物プランクトンバイオマス濃度の指標)、(b)無機性懸濁物質(SS, 河川から流入する微細懸濁粒子など濃度)および(c)有色溶存有機物(CDOM, 陸での生物分解作用などにより形成されたフミン酸類などの溶存有機物を反映すると考えられる)を同時算出する衛星画像の複合画像の連続自動作成システムを整備し南シナ海および東シナ海の画像時系列を作成した(誌上発表⑱、⑲)。一部を図8に例示した。

(b)と(c)のほか、(a)のクロロフィル-aも栄養塩濃度の流入という形で、陸域影響を反映する。ただし、(a)は、植物プランクトンのブルームという季節変動が顕著であることと、現場の海水湧昇による栄養塩補給などの要素も反映するため、陸域影響の指標として(b)や(c)のほうが妥当であると考えられる。



図7 ADEOS-OCTS 衛星海水色データから導出した植物プランクトン色素分布(上図)および、「フェリーくろしお」で計測したクロロフィル蛍光値と対応位置上の上記衛星データとの比較(下図)。衛星画像は1997年3月2-8日の素データからコンポジット処理して作成した複合画像であり、フェリーデータは3月6-8日の南下航路より得た。詳細は誌上発表⑤参照。

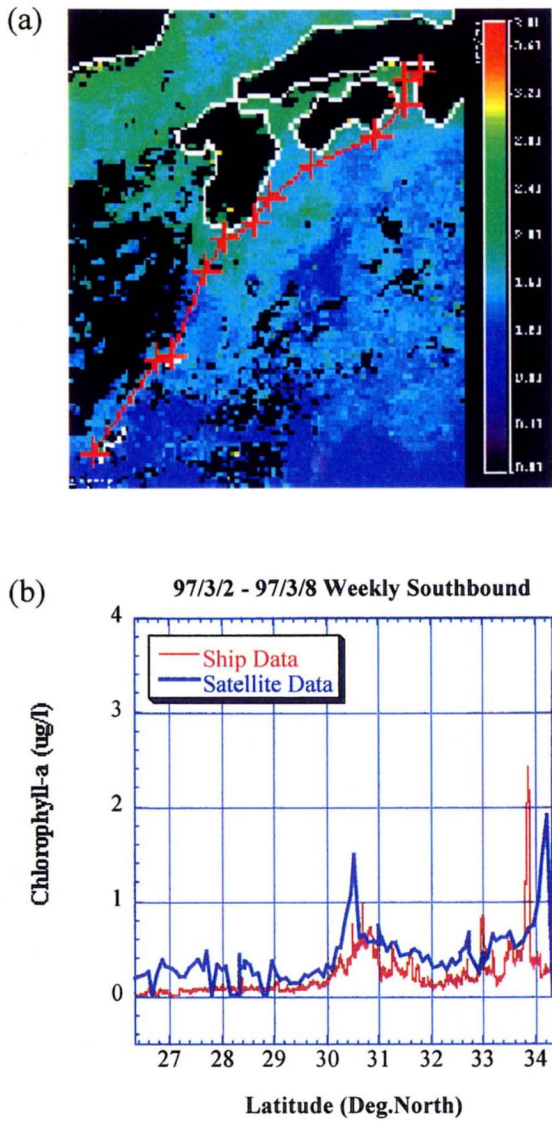
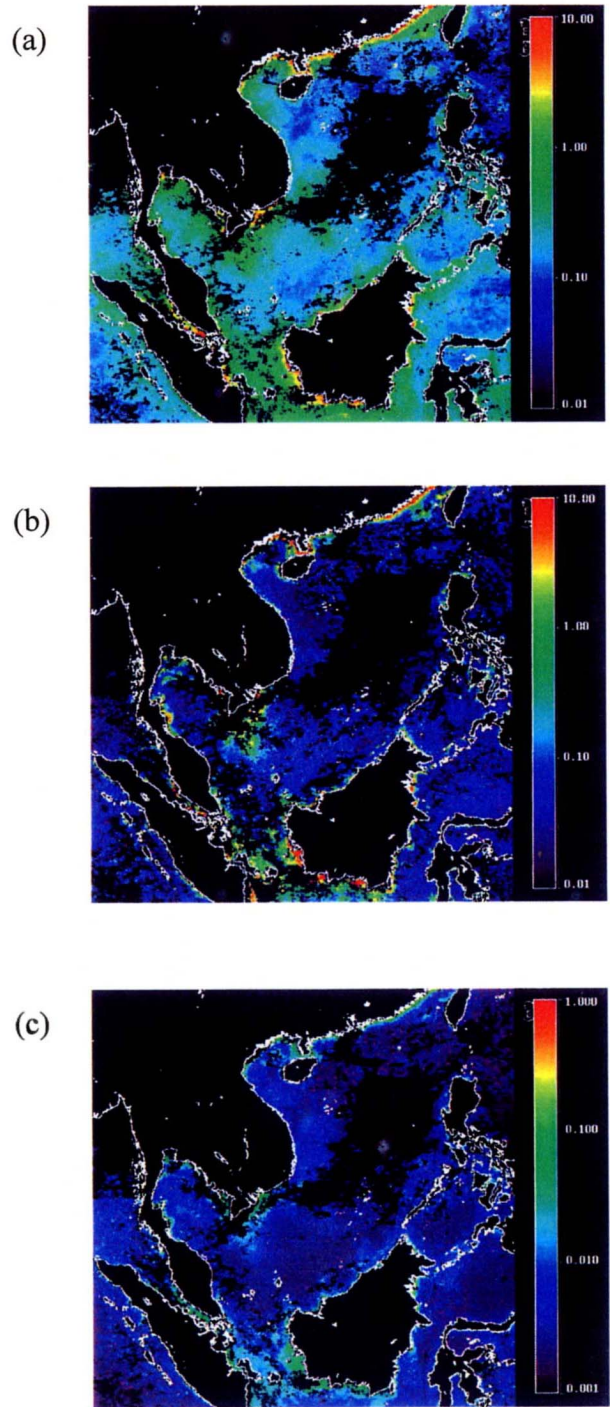


図8 SeaWiFS 衛星データから導出した南シナ海の (a)クロロフィルa (上図), (b)無機性懸濁物質 (中図), (c)有色溶存有機物の分布。いずれも2000年6月中の2週間の複合画像。



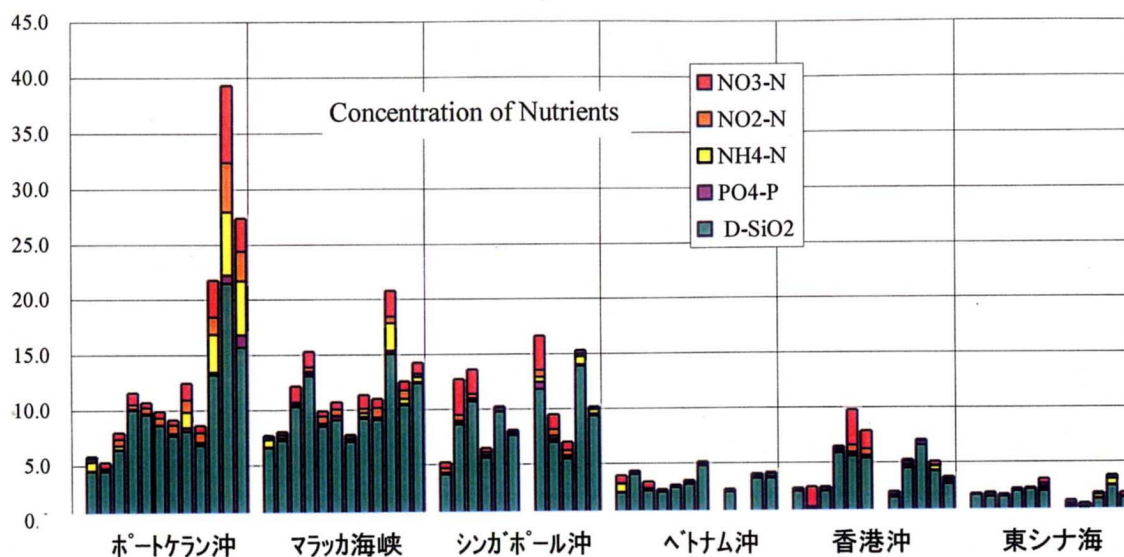


図9 日本-マレーシア航路（東京船舶所属コンテナ船 ACX-LILY の協力による）上の各測点における2年間の栄養塩濃度（単位は $\mu\text{M}$ ）の季節変化。各地点それぞれ、2000年5月、6月、8月、10月、12月、2001年2月、3月、6月、8月、10月、12月、2002年2月の計測値を示す。空欄はデータを示す。

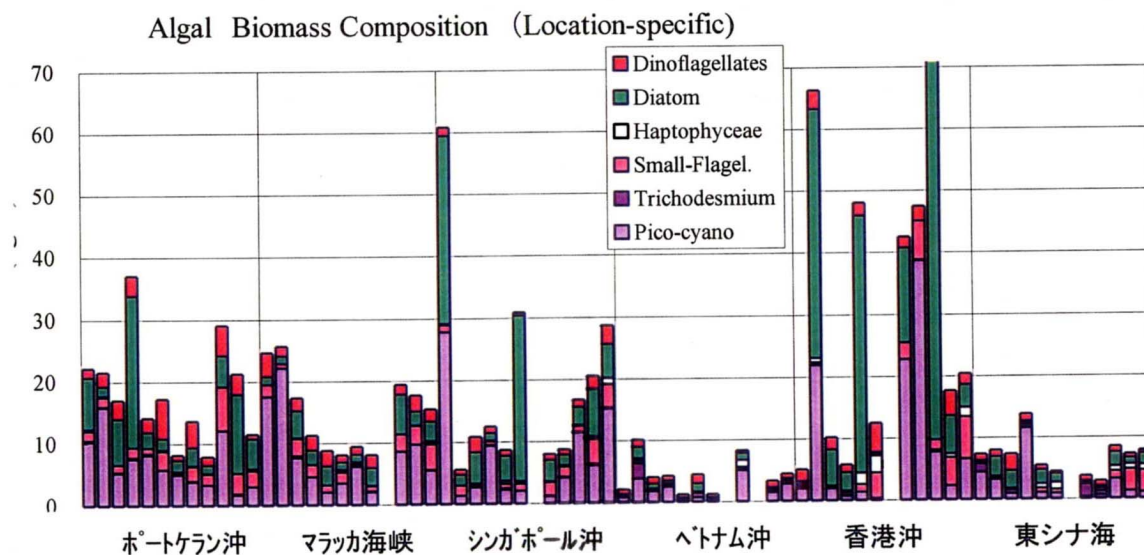


図10 同サンプリング地点における植物プランクトン分類群別（渦鞭毛藻類、ケイ藻類、ハプト藻類、微小鞭毛藻類、トリコデスミウム（糸状シアノバクテリア）、微小球状シアノバクテリア）の炭素換算バイオマス量の2年間の変動（地点、時期は図9に準ずる、単位は $\mu\text{gC/L}$ ）。



## 4 結果

### (1) マレーシア・コンテナ船航路による広域の計測

日本-マレーシア航路中の6地点ごとに、栄養塩各成分の現存量の2000~2001年度の変化を示した(図9)。全般的にこの海域は成層が強く、上層は基本的には貧栄養であり、南シナ海(ベトナム沖)および東シナ海ではDINの枯渇が顕著だった。また、マラッカ海峡およびこれに面したポートケラン沖、シンガポール沖ではDSiの組成比が大きかったが、これは、浅海域のため、底層で分解・無機化したSiが鉛直混合によって上層に戻りやすいことによると考えられる。ところが、香港など人口密集地帯の近傍では、季節依存ではあるがHNLSiの傾向がみられた。

図10には、植物プランクトンの各分類群の炭素量換算バイオマスの組成を示した。東シナ海測点や南シナ海測点(ベトナム沖)では、貧栄養であることを反映して、植物プランクトンの存在量が少なかった。組成としては、再生生産によると思われる微小鞭毛藻やピコシアノバクテリア、窒素固定を行うトリコデスミウムなど、各分類群がほぼ等分に存在した。これに対し、ポートケラン沖、シンガポール沖、香港沖など人口密集域近傍では、バイオマスの時間変動が大きく、陸域期限の栄養塩による新生産によると思われるケイ藻類が増殖し、それ以外の季節にも渦鞭毛藻類などの非ケイ藻類の現存量が高くなった。

以上のように、季節依存ながらも、香港などの人口密集域の近傍海域でSiの相対比が減少し、しかも非ケイ藻類の組成が大きくなることが確認できた。ただし、本計測ではコンテナ船4週間という運行サイクルと予算上の制約から計測頻度を高く設定できず、時間変動のうち捕捉できていない部分もあると思われる。この点の補強のため、瀬戸内海を航行するフェリーによる高頻度・長期間のデータ解析を行った。

### (2) 瀬戸内海フェリー航路による高頻度計測の結果

このフェリー観測は1991~2000年度の間、国立環境研究所地球環境研究センターのモニタリング事業としておこなわれていた。さらに、2000~2001年度に、本地球推進費よりオンラインデータ転送システムの設置を行うとともに、栄養塩現場自動分析で高頻度の計測を試みた。そのうちの1994~2000年度分の栄養塩データを、別府湾から大阪湾まで経度0.2度ごとの区画ごとに7年間の平均を求めて表示した(図11)。計測間隔は概ね2週間であり、各区画には1つの計測航海ごとに1または2個のデータが含まれる。これによれば、DIN, DIP, DSiともに東にゆくほど高くなっており右端の淀川・大和川河口沖で最も高い。相対比で見れば、東にゆくほどHNLSiとなり、DSi/DIN相対比は大阪湾側で1以下となっている。

この理由としてまず考えられるのは流入河川の影響である。前出の図1には、野洲川-琵琶湖-淀川についてプロットしてある。これによれば、野洲川ではDSiが $200\mu\text{M}$ 近くあったものが琵琶湖で1桁小さくなるのがわかる。この原因は、DSiは自然の風化溶出で上流河川に補給されるが、琵琶湖で淡水性ケイ藻がDSiを吸収して沈降してしまうためと考えられる。また、この傾向は琵琶湖自身へのNとPの負荷増大により強まったと考えられる。淀川に入り、他の河川も合流するため下流では $80\sim 100\mu\text{M}$ となり大阪湾に流入する。

栄養塩組成と、出現するケイ藻類/非ケイ藻植物プランクトン組成の関連を考える。後者についての定量的データは限られているが、水産庁により「瀬戸内海の赤潮」<sup>14)</sup>の調査結果が

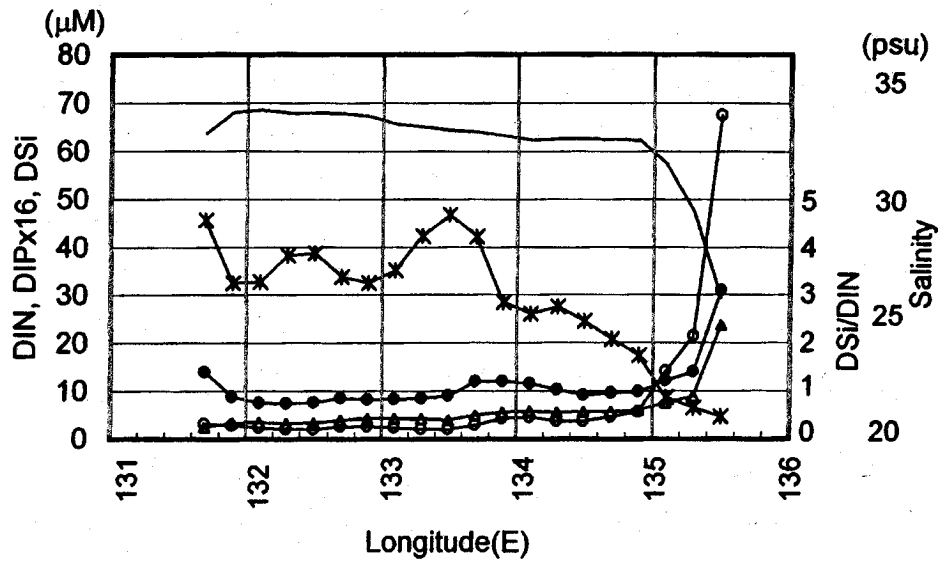


図 1 1 瀬戸内海航路のフェリー「さんふらわああいぼり」で 1994 年 4 月-2000 年 3 月に取得された栄養塩データを、経度 0.2 度間隔ごとに 7 年間の平均をとったもの。記号はそれぞれ、●: DSi, ○: DIN, △: DIP×16(レッドフィールド比を考慮するためのファクターをかけてある),\*: DSi/DIN 比, 直線: 塩分。

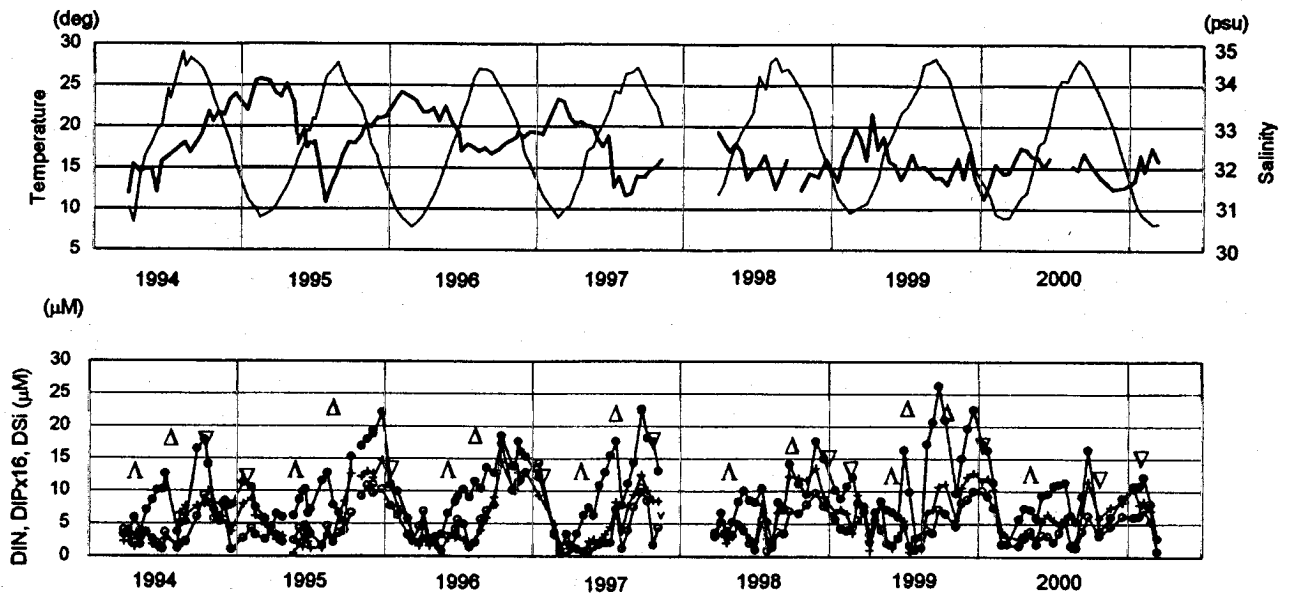


図 1 2 瀬戸内海フェリー航路の播磨灘部分 (東経 134.4~134.6 度) で得られた栄養塩濃度の 1994 年 4 月-2000 年 3 月の時系列。記号はそれぞれ、●: DSi, ○: DIN, △: DIP×16(レッドフィールド比を考慮するためのファクターをかけてある)。付加された記号は、▽: 春季大増殖による栄養塩減少, △: 秋季の海面冷却-鉛直混合による栄養塩増加, △: 夏季の降雨・河川流入による I DIN, DIP 増加を伴わない DSi のみの増加。

発行されており、発生した赤潮発生1件ごとに、時期、場所、種名、面積、細胞数の最高密度が記録されている。これによれば、赤潮の発生件数が多いのは、播磨灘と大阪、すなわち東部瀬戸内海であり、単純に考えると、前述の  $DSi/DIN$  相対比の低い海域と合致しているようである。ただし、灘規模で考慮すると、1994年～2000年の間の、ケイ藻類赤潮の平均発生件数/鞭毛藻類赤潮の平均発生件数は、大阪湾で10.0件/11.1件、播磨灘で2.2件/20.8件となり、 $DSi/DIN$  相対比の低い大阪湾のほうがかえってケイ藻類の寄与が大きかった。すなわち、シリカ欠乏仮説からの単純な推論とは異なる結果となっている。

#### 4. 考察

以上の事例について、総合的考察を加える。

まず、マレーシア航路については、香港近傍で時期依存であるが  $DSi/DIN$  比の低下と非ケイ藻類植物プランクトンのある程度のバイオマスが検知されたことは、陸域影響によるシリカ欠乏仮説を一部うらづける。ただし、衛星の  $CDOM$  指標の画像でみると、南シナ海の場合、陸の影響が及ぶのは沿岸域にとどまるようである。また、従来、植物プランクトンブルームの理論は中・高緯度の外洋域を対象として光補償深度と成層深度に基づいて形成され、その年サイクル(季節変動)としての性格が明らかになっている。ところが、本研究で対象とした亜熱帯・熱帯海域や沿岸(浅海)域ではそれと異なり、季節変動とは別の変動要因が支配していることが取得データよりみてとれる。また、2ヶ月に1回という計測頻度も結果として不十分だったかもしれない。この点で、今後、より計測頻度の高い長期間のモニタリング継続が望まれる。

一方、瀬戸内海のフェリーによるモニタリングでは、ほぼ10年近い継続期間と2週間に1回という計測頻度が確保されたため、前述のような  $DSi/DIN$  の空間分布が捉えられた。しかも図12に示すように、春季ブルームによる表層  $DIN$ ,  $DIP$ ,  $DSi$  の減少(図12中の記号▽で示す)、有機物分解と秋季の鉛直混合による  $DIN$ ,  $DIP$ ,  $DSi$  の回復(同△)などの季節変動が明らかになった。また、「瀬戸内海の赤潮」<sup>14)</sup>などの他の記録も参照でき、ケイ藻類赤潮・鞭毛藻類赤潮の別との比較もできた。この記録では、赤潮と認識される濃度のしきい値が、ケイ藻類においてより高い傾向がある。このため、両者のバイオマス量としての定量的な比較はできないが、指標としては機能する。

ここで、ケイ藻類赤潮と渦鞭毛藻類赤潮を合計した発生件数は瀬戸内海の東部ほど高く、図11と符号する。問題になるのは、瀬戸内海東部のうち大阪湾と播磨灘を比較すると、大阪湾で  $DSi/DIN$  の相対比がより低いにもかかわらず、渦鞭毛藻類による赤潮の割合が少ないことである。実際に播磨灘のほうが水産養殖等への被害額も大きく、両者の実態を反映していると考えられる。

$DSi$  の過程を考慮した議論を以下に示す。大阪湾では、 $DSi/DIN$  の相対比は低いが、淀川から供給される  $DSi$  の絶対値はむしろ海域表層の  $DSi$  濃度よりも高い。このため淀川河口近傍では、 $DSi$  が間断なく補給されていることになる。さらに、大阪湾の東半分では浅海域が広がっているため、鉛直混合が盛んである。このため、海底に多い  $DIN$ ,  $DIP$ ,  $DSi$  がセットになって表層に補給される。このため、ケイ藻類が増殖してしまう。計測された  $DSi/DIN$  の相対比が大阪湾で低いのは、ケイ藻類の増殖で  $DSi$  が収奪されていることの結果でもある。結果と

して鞭毛藻類が増殖できるのはケイ藻類の増殖域を離れた海域で  $DSi/DIN$  比がある程度低い海域、すなわち播磨灘になると考えられる。さらに、播磨灘では、夏季に温度成層および塩分成層が形成され、密度成層を横切って日収鉛直移動を行うことのできる鞭毛藻類に有利に働く。

ここで提出されたパラダイムは、ケイ藻類が増殖して  $DSi$  を吸収しやすいために、他の海域に比べて  $DSi$  の相対比が下がること、すなわち、栄養塩組成が植物プランクトンの状態を決める（ボトムアップコントロール）だけでなく、植物プランクトンの状態が逆に栄養塩組成を決める（一種のトップダウンコントロール）というものである。考えられることは以下である。 $DSi$  が常時補給されている河口域あるいは鉛直混合が盛んな浅海域では常にケイ藻類が存在できる。ところが、灘部のように夏季に温度成層および塩分成層が作られるところでは、春季ブルームでケイ素を使い果たしてしまうとケイ藻類は浮力調節等により自らを沈降させる。そして、夏季の降雨で  $DSi$  が上層に流入しても、上層の海水密度が小さくなっているため（高温・低塩分）に自らの浮力をそれに見合うほどには高められない。ケイ藻類が不在で  $N, P$  が存在する状況で、渦鞭毛藻類などの非ケイ藻類が夏季のブルームを引き起こす条件が形成される。ケイ藻類が下層の栄養塩とともに上層に戻れるのは、秋季の水面冷却—鉛直混合が始まった時である。この後は光の条件等によってケイ藻類による秋季ブルームまたは春季ブルームが起こるのである。

富栄養化の弊害の中で、貧酸素化現象などについては、従来の  $COD$  あるいは  $N$  と  $P$  についての議論で閉じる部分もあるが、水産養殖に被害を及ぼしたり、貝毒をひきおこしたりする「有害赤潮」がほとんど非ケイ藻類のうちの渦鞭毛藻類によるものであることを考えると、ケイ藻類赤潮と非ケイ藻類赤潮の分岐過程を合理的に説明する必要があり、 $DSi$  の過程を考慮することは必須であるといえるだろう。

## 5.本研究により得られた成果

- 1) アジア縁辺海域を対象とし、「シリカ欠乏仮説」に基づいた海洋環境健康度の指標に焦点をあて、定期航行するコンテナ船を観測プラットフォームとした海洋モニタリング手法を確立した。
- 2) 東シナ海・南シナ海は全体としては貧栄養であり、 $DIN, DIP, DSi$  ともに低濃度であり、またレッドフィールド比 ( $DIN: DIP: DSi=16:1:16\sim32$ ) に比べて  $DSi$  の相対比も低くはない。ところが、香港近傍では、時期に依存して  $DSi/DIN$  の相対比が小さくなった。
- 3) 植物プランクトンの存在比については、ほとんどの測点で、各分類群ほぼ等分に微量存在した。ところが、香港近傍やシンガポール近傍では、陸域からの栄養塩の流入に起因すると思われる「上乘せ分」的なケイ藻類および鞭毛藻類が、時期に依存して多量に出現した。
- 4) 瀬戸内海のフェリー航路の船舶に衛星経由のデータ転送装置を設置し、海域現場データを持続的にオンライン監視するための基礎技術を整備した（サブテーマ2との共同）。
- 5) 同フェリーによる栄養塩データから、東部瀬戸内海で  $DSi/DIN$  相対比が低くなっていることがわかった。この一因として、淀川の上流域で琵琶湖が  $DSi$  のシンクとなっていることが推測される。
- 6) 我国の過去の河川水質のデータ収集により、我国の高度成長期に、 $DSi/DIN$  の相対比が、

特に関東ブロックと近畿ブロックで減少したことが確認された。2), 3), 4), 5)の結果と併せ、「シリカ欠乏仮説」を裏付ける。

7) ただし、赤潮出現の記録<sup>14)</sup>と照合すると、非ケイ藻類がケイ藻類よりも卓越してブルームを起こす事例は、これまで提案されていたような、 $DSi/DIN < 1 \sim 2$  あるいは  $DSi < 2 \mu M^3$  の時ばかりでなく、プランクトンの行動様式と海洋物理学的条件の複合によるものと解釈される条件に起こることがとりまとめられる。栄養塩状態と卓越する植物プランクトンの関連については、従来考えられていたような前者が後者を決定する過程（ボトムアップコントロール）のみならず、後者のうち特にケイ藻類の増殖・行動が前者を決定する要素（準トップダウンコントロール）が重要であることが示唆される。

8) 本成果のうち技術開発的側面は、「欧州フェリーボックス計画」および「北太平洋科学機構-VOS モニタリング計画」への知見提供を通じ、今後地球規模の海域で展開されると予想される定期航路利用の海洋環境モニタリングの基礎となった。

9) 本成果のうちプロセス研究的側面は、2回の SCOPE シリカワークショップへの話題提供、議論参加により、今後1つの地球環境問題として認識されると予想される「シリカ欠乏問題」の問題提起に貢献した。

10) アジア縁辺海関連の海洋環境モニタリング関連研究者を招聘して開催した国際ワークショップにより、今後の協力体制の基礎が構築された。

## 6. 引用文献

- 1) Billen, G., Lancelot, C. and Meybeck, M.: N, P, and Si retention along the aquatic continuum from land to ocean, in Mantoura, R.F.C. et al. (eds.) *Ocean Margin Process in Global Change*, 19-44, Wiley (1991).
- 2) Conley, D. L., Schelske, C. L. and Stoermer, E. F., Modification of the biogeochemical cycle of silica with eutrophication, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **101**, 179-192 (1993)
- 3) Ittekkot, V., Humborg, C. and Schäfer, P., Hydrological alterations and marine biogeochemistry: a silicate issue?, *BioScience* **50**, 776-782 (2000).
- 4) Jickells, T. D., Nutrient biogeochemistry of the coastal zone, *Science* **281**, 2179-221 (1998).
- 5) Egge, J. K. and Aksnes, D. L., Silicate as a regulating nutrient in phytoplankton competition, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **83**, 281-289 (1992).
- 6) Harashima, A. et al.: Monitoring algal bloom and related biogeochemical changes by a flow-through system deployed on ferries in the adjacent seas of Japan, in Kahru, M. and Brown, C. B. (eds.) *Monitoring Algal Blooms*, 183-213, (Springer, 1997).
- 7) Livingstone, D. A., Chemical Composition of Rivers and Lakes, *U. S. Geol. Surv. Tech. Paper* **440-G**, 61pp. (1963).
- 8) Justić, D., Rabalais, N. N and Turner, R. E., Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication, *Mar. Pollut. Bull.* **30**, 41-46 (1995).
- 9) 建設省河川局, 「水質年表」 (年刊).
- 10) 小林純, 日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究, *農学研究* **48**, 63-106 (1960).
- 11) 森井ふじ, 水圏無機成分の分析とともに, *海洋化学研究* **5**, 34-52 (1991).

- 12) 小林純, 東南アジア諸国の河川の化学的研究, 農学研究 46, 63-112 (1958).
- 13) Saransuth, W., The change in land-sea silicate fluxes through the Chao Phraya River, *Proc. 5th IOC/WESTPAC Internat'l. Sci. Symp.*, CO05 (IOC, Seoul, 2001).
- 14) 水産庁瀬戸内海漁業調整事務所, 「瀬戸内海の赤潮」(年刊).
- 15) Smetacek, V. S., Role of sinking in diatom life history cycles: ecological, evolutionary and geological significance, *Mar. Biol.* 84, 239-251 (1985).

## 7. 謝辞

本研究課題を実行するにあたり、他のサブテーマ担当機関のほかにも、定期航路船舶による海洋計測システム設置、データサンプリング等のために、関西汽船株式会社、東京船舶株式会社、三菱重工下関造船所に多大な協力をいただいた。また、赤潮発生のデータを提供いただいた水産庁瀬戸内海漁業調整事務所、過去の河川水質データを提供いただいた(財)海洋化学研究所をはじめ、内外の研究機関の方から貴重な知見を提供いただいた。併せて感謝いたします。

### [国際共同研究等の状況]

- 1)マレーシア、シンガポール、ベトナム、フィリピン、中国、韓国からの研究者を招聘し、「アジア縁辺海のモニタリングに向けての会合(2nd Meeting towards Cooperative Marine Environmental Monitoring of the Asian Marginal Seas)」を開催して議論を行い、今後の定期航路船舶の利用による海洋モニタリングを基礎とした協力を推進することの合意をとりまとめた。この講演要旨は口頭発表⑩として示したほか、総合討論議事録と併せ本報告書に Appendix として収録した。
- 2)日韓環境保護協定により、韓国海洋研究所の仁川-済州島間のフェリーモニタリングについて技術的協力を行い、共同発表(口頭③)を行うとともに共著論文を作成した(誌上⑳)。
- 3)EUにより計画されたフェリーボックス計画のワークショップ(2000年5月, Geeschaft, Germany)で招待発表を行い、日本側の知見を提供した。
- 4)北太平洋海洋科学機構(PICES)により計画された定期航路船舶利用のモニタリングのワークショップ(PICES Volunteer Observing Ship (VOS) Workshop, April 2002, Seattle)に招待発表を行い、日本側の知見を提供した。
- 5)SCOPE(環境汚染特別委員会)により主催された2回の「シリカ循環ワークショップ(SCOPE Silica Workshop, at Linköping, Sweden, October 1999 and at Nha Tran, Vietnam, September, 2000)」に参加し、作業グループの議論に参加して、今後のシリカ欠乏問題の推奨研究方針をとりまとめた。

### [研究成果の発表状況]

#### (1) 誌上発表(学術誌・書籍)

- ① A. Harashima, R. Tsuda, Y. Tanaka, T. Kimoto, and T. Hagiwara: in K. Sherman and Q. Tang (eds.) "Large Marine Ecosystem of the Pacific Rim", 363-373, Blackwell (1999),  
"High Resolution biogeochemical monitoring for assessing environmental and ecological



changes in the marginal seas using ferry boats".

- ② 原島 省, 功刀正行(編): 地球環境研究センター CGER M006-2000 180 ページ(2000)  
「フェリー利用による海洋環境モニタリングおよび関連研究に関する総合報告書」(所蔵論文は、原島 省, 功刀正行: CGER M006-2000, 1-28(2000)  
「フェリー利用による海洋環境モニタリングおよび関連研究 一経緯と総合的とりまとめ」の他に以下③~⑮の14篇。
- ③ 原島 省, 若林 孝, 利安忠夫, 太田英介, 坂本重次, 辰田 裕, 古澤一思, 洲崎吉郎, 竹内義治, 萩原富司: CGER M006-2000, 29-38 (2000)  
「フェリー利用による海洋モニタリングのシステム設計・管理方法に関する技術的問題と対策」
- ④ 日夏宗彦, 塚田吉昭, 南 佳成, 原島 省: CGER M006-2000, 39-45 (2000)  
「フェリーによる海水モニタリング用連続取水の深度代表性に関する船体模型実験」
- ⑤ 原島 省, 福島 甫, 野中 智: CGER M006-2000, 46-58 (2000)  
「衛星による海水色データとフェリーによるクロロフィル蛍光データの比較および相互検証」
- ⑥ 飯高 弘, 中野 洋, 齋藤俊幸, 土井卓也, 西山勝男, 佐藤宗純, 藤縄幸雄, 斎藤幸賢, 原島 省: CGER M006-2000, 59-67 (2000)  
「定期航路船舶による海洋環境のオンライン監視とプランクトン認識の高度化に関する研究」
- ⑦ 紀本岳志, 原島 省: CGER M006-2000, 68-84 (2000)  
「高速応答フロースルー型海洋二酸化炭素分圧測定法の開発とフェリー計測への応用」
- ⑧ 原島 省, 紀本岳志, 田中祐志, 若林 孝, 利安忠夫, 太田英介: CGER M006-2000, 85-97 (2000)  
「フェリーにより得られた栄養塩の時空間変動とシリカ欠乏」
- ⑨ 原島 省, 古澤一思, 田中祐志, 津田良平, 紀本岳志: CGER M006-2000, 98-106 (2000)  
「フェリーによる植物プランクトンの分析手法と結果の概要」
- ⑩ 田中祐志, 津田良平, 紀本岳志, 古澤一思, 原島 省: CGER M006-2000, 107-114 (2000)  
「レーザー生物粒子カウンターによる植物プランクトンサイズスペクトルの計測」
- ⑪ 田中 茂, 成田 祥, 原島 省: CGER M006-2000, 115-123(2000)  
「海洋環境中の生物起源硫黄化合物の計測」
- ⑫ 大田啓一, 増澤敏行, 濱 健夫, 寺井久慈, 古谷 研, 佐久川弘, 関根義彦, 木村龍治, 中塚 武, 神田穰太, 高橋正征, 原島 省: CGER M006-2000, 124-136 (2000)  
「フェリーによる台風通過前後の海洋環境の変化の観測」
- ⑬ 功刀正行, 原島 省, 藤森一男, 中野 武 : CGER M006-2000, 137-149 (2000)  
「フェリーを利用した有害化学物質による海洋汚染の観測」
- ⑭ 田尾博明, RAMASWAMY Babu Rajendran, 長縄竜一, 中里哲也, 宮崎 章, 功刀正行, 原島 省: CGER M006-2000, 150-162 (2000)  
「フェリー利用による瀬戸内海海水中の有機スズ化合物のモニタリング」
- ⑮ 武岡英隆: CGER M006-2000, 163-171 (2000)

- 「グローバル変動検知のための瀬戸内海の総合的モニタリング」
- ⑯ 原島 省, 林 美鶴, 柳 哲雄: CGER M006-2000, 172-180 (2000)  
「フェリー取得データに基づく海洋生態系変動短期予測モデルの可能性」
  - ⑰ Y. Kitamura, A. Obata and A. Harashima: CGER'S Supercomputer Activity Report -1999, 8, 29-31(2000)  
"Water and material exchange between the Asian marginal seas and the Pacific Ocean".
  - ⑱ H. Fukushima, M. Toratani, H. Kobayashi, W. Takahashi, A. Tanaka, and B.J. Sohn: Proc. SPIE, 4154, 18-30, (2000)  
"Atmospheric correction algorithm for satellite ocean color data over the Asian waters".
  - ⑲ M. Toratani, A. Tanaka, H. Fukushima, and H. Kobayashi: Proc. PORSEC 2000, 67-70, vol.I, (2000),  
Atmospheric correction scheme for turbid case II waters and its application to East China Sea OCTS data.
  - ⑳ 原島 省, Jae-Ryoung Oh, Sun-Hyung Kahng : 沿岸海洋研究, 38, 80-91 (2001)  
「フェリーによる環境モニタリングの現状と課題」
  - (21) 原島 省: 地球環境研究, 6, 1, 93-104, 国際環境研究協会 (2001)  
「アジア沿岸海域の環境モニタリングと(N,P)/Si 問題」
  - (22) 原島 省: クリーンエネルギー, 10, 11, 57-60 (2001)  
「人間活動による水域環境の変質—N, P, Si の循環に対する人為的影響—」
  - (23) Y. Kitamura, A. Obata and A. Harashima: CGER'S SUPERCOMPUTERS ACTIVITY REPORTS, 9, 3-4, NIES-CGER(2001)  
"International variations of the material exchange between the Asian marginal seas and the Pacific Ocean"
  - (24) A. Harashima: Proceedings of International Workshop on Land-Ocean Nutrient Fluxes: the Silica Cycle, SCOPE (2002)  
"The (N, P)/Si issue in the aquatic continuum"(in print)
- (2) 口頭発表
- ① A. Harashima: International Workshop on the In Situ, Real-Time and Remote Sensing Measurement of Coastal Water Quality, Hong Kong University of Science and Technology June, (1999)  
"Biogeochemical monitoring of the coastal and marginal seas using ships of opportunity"
  - ② A. Harashima: Proc. International Workshop on Marine Environmental Monitoring, 69-92, Incheon, August, (1999)  
"Possibility of the development of marine environmental monitoring by the ship of opportunity based on the international cooperation"
  - ③ 原島 省, 吳 在龍, 姜 聲弦: 日本海洋学会シンポジウム, 東京 (2000)  
「フェリーによる環境モニタリングの現状と課題」
  - ④ 原島 省, 紀本岳志, 田中祐志, 若林 孝, 古澤一思: 日本海洋学会 2000 年度春季講演要旨, 233 (2000)

「瀬戸内海におけるシリカ欠損」

- ⑤ 小畑 淳, 北村佳照, 原島 省: 日本海洋学会 2000 年度秋季講演要旨, 277 (2000)  
「海洋化学物質循環モデルにおけるアジア縁辺海と太平洋の海水、物質交換: 経年変動について」
- ⑥ 中野 洋, 斉藤俊幸, 土井卓也, 飯高 弘, 西山勝男, 佐藤宗純, 藤縄幸雄, 原島 省, 斉藤幸賢: 海洋理工学会平成 12 年度春季大会講演要旨集, 37-38 (2000)  
「定期航路船舶を用いた植物プランクトン顕微鏡画像撮像システムの研究開発」
- ⑦ 斉藤俊幸, 飯高 弘, 中野 洋, 土井卓也, 佐藤宗純, 藤縄幸雄, 原島 省, 斉藤幸賢: 同上要旨集, 39-40 (2000)  
「フロー型レーザー蛍光顕微鏡による植物プランクトンの連続計測法の開発」
- ⑧ 飯高 弘, 土井卓也, 中野 洋, 斉藤俊幸, 佐藤宗純, 西山勝男, 藤縄幸雄, 日下祐三, 原島 省, 斉藤幸賢: 同上要旨集, 41-42 (2000)  
「海洋リモートアクセスステーションの研究開発(2)」
- ⑨ A. Harashima: The 2nd International Workshop on Land-Ocean Nutrient Flux and Silica Cycle, Nha Tran, Vietnam (2000)  
"The (N, P)/Si issue in Japanese coastal waters"
- ⑩ A. Harashima: Proc. Techno-Ocean 2000 International Symposium, 101-104, Kobe, (2000)  
"Marine environmental monitoring system using ships of opportunity"
- ⑪ A. Harashima (ed.): Proceedings of the 2nd Meeting on Cooperative Marine Environmental Monitoring in the Asian Marginal Seas (CoMEMAMS), 28 November, 2000, Tokyo (2001)
- ⑫ A. Harashima, M. Kunugi, K. Furusawa, T. Toshiyasu, E. Ohta, Y. Tanaka, T. Kimoto and H. Fukushima: 1-14(2000)  
"Approach to the marine environmental monitoring by use of ships of opportunity"
- ⑬ H. Nakano, H. Iitaka, T. Doi, T. Saito, S. Sato, Y. Fujinawa, A. Harashima and K. Saito: 51-55(2000)  
"Advancement in the online evaluation of the health of the sea and the detection of plankton using ship of opportunity"
- ⑭ M. Hinatsu, Y. Tsukada, Y. Minami and A. Harashima: 56-61(2000)  
"A model ship experiment on the original depth of the water for monitoring system deployed on the ferry"
- ⑮ A. Harashima: Ferrybox Workshop, Geesthach, Germany, 2001(2001)  
"Results from ferry observations between Japan and Korea"
- ⑯ A. Harashima: Proceedings of Abstract for 5th IOC/WESTPAC International Scientific Symposium, August 2001, Seoul, ( with extended abstract contained in CDROM), 154 (2001)  
"Near real-time monitoring of biochemical parameters in the ocean"
- ⑰ 北村佳, 小畑 淳, 原島 省: 第 9 回スーパーコンピュータによる地球環境研究発表会要旨集.1 (2001)  
「アジア縁辺海と太平洋の物質交換の経年変動」
- ⑱ 山口良隆, 小俣美郁子, 岡田安弘, 田口 昇, 山之内博, 太田英介, 樋富和夫, 山岸 進,

原島 省: 日本本分析化学会第 50 年会(2001)

「広域及び定期計測に向けての海水中含有オイル分析手法の検討」

- ⑱ 原島 省, 紀本岳志, 田中祐志, 若林 孝, 古澤一思: 日本海洋学会 2002 年度春季講演要旨 233 (2002)

「瀬戸内海におけるシリカ欠損(2)」

- ⑳ A. Harashima: Abstracts of PICES Workshop on Marine Monitoring Using Voluntary Observing Ship, Seattle, 2002.4.(2002)

"Marine environmental monitoring system using ships of opportunity"

- (21) 中野 洋, 飯高 弘, 土井卓也, 斎藤俊幸, 原島 省, 齊藤幸賢: 海洋理工学会平成 14 年度春季大会一般講演(2002)

「定期航路船舶を用いた植物プランクトン顕微鏡画像自動撮像システムの運用実験」

- (22) 土井卓也, 飯高 弘, 中野 洋, 斎藤俊幸, 原島 省, 齊藤幸賢: 海洋理工学会平成 14 年度春季大会一般講演(2002)

「顕微鏡撮像のための植物プランクトン濃縮船上実験」

- (23) 飯高 弘, 土井卓也, 中野 洋, 斎藤俊幸, 西山勝男, 葛西直子, 藤縄幸雄, 原島 省, 齊藤幸賢, 青柳 勝: 海洋理工学会平成 14 年度春季大会一般講演(2002)

「海洋リモートアクセスステーションの研究開発(その 4)」

- (24) H. Nakano, H. Iitaka, T. Doi, T. Saito, A. Harashima and K. Saito : Techno Ocean 2002 International Symposium, 2002.11.(2002)

"Automated Image Processing System on Ship of Opportunity"

- (25) T. Doi, H. Iitaka, H. Nakano, T. Saito, A. Harashima and K. Saito : Techno Ocean 2002 International Symposium, 2002.11.(2002)

"Experimental Study on the Phytoplankton concentration for Capturing the Microscopic Image"

- (26) H. Iitaka, T. Doi, H. Nakano, T. Saito, Y. Fujinawa, A. Harashima, K. Saito and M. Aoyagi : Techno Ocean 2002 International Symposium, 2002.11.(2002)

"Research and Development of Ocean Remote Access Station"

- (27) 山口良隆, 山之内博, 柴田俊明, 太田英介, 樋富和夫, 原島 省: 第 11 回環境化学討論会, 東京, 2002(2002)

「フェリー利用のための海水中オイル汚染分析法の検討」

(3) 出願特許 無し

(4) 受賞等 無し

(5) 一般への公表・報道

① SCOPE Silica Workshop Web Site (<http://data.ecology.su.se/scopesi/ScopeSI.htm>)

② 毎日新聞 (2000 年 6 月 19 日夕刊科学欄)

③ Mainichi Interactive 科学環境ニュース (同名ウェブ掲載)

<http://www.mainichi.co.jp/eye/feature/details/science/Bio/200006/19-1.html>

④ 環境 goo (環境ナビゲーターバックナンバー、ウェブ掲載)

[http://eco.goo.ne.jp/bn/index\\_navi.html](http://eco.goo.ne.jp/bn/index_navi.html)

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

①UNEPの北西太平洋地域海行動計画（NOWPAP）の一環として環境省地球環境局が行った「北西太平洋地域海行動計画活動推進事業」の「河口海域等モニタリング調査及び関連調査委員会（座長：原島省、事務局：環日本海環境協力センター）において、河川と沿岸海域における溶存態ケイ素のモニタリングの項目を補強する方針を加え、平成13年度中に試験的に実施した（参照：平成13年度環境省請負業務結果報告書「北西太平洋地域海行動計画活動推進事業」）。