

D-3 グローバル水循環系のリン・窒素負荷増大とシリカ減少による海洋環境変質に関する研究

(3) 海洋生態系へのシリカ減少の影響評価

②N、P、Si依存型の海洋生態系モデルによるシリカ減少の影響評価

九州大学応用力学研究所 力学シミュレーション研究センター

センター長 柳 哲雄

平成14-16年度合計予算額 3,766千円

うち平成16年度予算額 1,253千円

〈研究協力者〉 神戸大学内海環境研究センター 助教授 林 美鶴

〔要旨〕1990年代前半渦鞭毛藻赤潮、1990年代後半珪藻赤潮が卓越した大阪湾奥において窒素、リン、珪素を含んだ海洋生態系モデルを適用し、卓越赤潮種変化の原因を明らかにすることを試みた。計算された珪藻と渦鞭毛藻の濃度割合の経年変動は、赤潮発生件数の割合の経年変動をよく再現した。この海洋生態系モデル計算結果から、大阪湾奥で1990年代前半渦鞭毛藻赤潮が卓越し、1990年代後半珪藻赤潮が卓越した理由は、半飽和定数が珪藻より高い渦鞭毛藻が近年のリン濃度減少のために、以前より増殖しにくくなったことであることが推定された。次に、国立環境研究所のフェリー観測結果から1994-2000年間の平均値を用いて、瀬戸内海内のDIN、DIP、DSiの分布を解析し、灘ごとの栄養塩収支の推定を行った。その結果、DINやDIPが大阪湾で最も高濃度となり瀬戸内海西部で低濃度となるのに対し、DSiは大阪湾、備讃瀬戸、別府湾で高濃度となることがわかった。その理由は、第一にこれらの海域に対する単位容積当たりのDSi流入量が大きいこと、第二に、灘ごとの平均滞留時間が異なることによるためである。さらに、フェリーにより観測された周防灘の栄養塩データと河川からの栄養塩供給データを用いて、1992年冬季における周防灘の栄養塩収支を計算した結果、DIP、DIN、DSiの伊予灘から周防灘への移流・拡散フラックスは河川からの栄養塩負荷フラックスの、それぞれ19、6.7、2.5倍も大きいことが明らかとなった。瀬戸内海の藻類卓越、特にその東部においてはリンの増減への依存性が高いことが結論される。

〔キーワード〕珪藻赤潮、渦鞭毛藻赤潮、DIP、DSi、大阪湾

1. はじめに

沿岸海域の基礎生産を担う重要な植物プランクトンであるケイ藻が、栄養塩として溶存態無機窒素 (Dissolved Inorganic Nitrogen: DIN)、溶存態無機リン (Dissolved Inorganic Phosphorus: DIP) の他、溶存態ケイ素 (Dissolved Silicate; DSi) を必要とすることはよく知られている。しかし、近年の沿岸海域における富栄養化により、DIN、DIP濃度は増加したものの、DSi濃度はダム建設などにより逆に減少したことが指摘されている (サブテーマ(1)報告参照)。そのために沿岸海域では、増殖のためにDSiを必要としない鞭毛藻がケイ藻より卓越するようになって、有害赤潮が発生しやすくなってきたということもたびたび指摘されているが¹⁾、DSiを含む栄養塩データは、小数の総観的調査²⁾、あるいは播磨灘に限定した長期時系列観測³⁾はあるものの、瀬戸内海全体の時系列的観測は国立環境研究所地球環境研究センターによるモニタリング⁴⁾以外には限ら

れている。また、ケイ藻類・渦鞭毛藻類別の時系列データも限られている。さらに、この過程の検証には、生態系モデルによるシミュレーションが有効であるが、NとPに関する解析例やモデル例は多いものの（例えば、林ら^{5)・6)}、DSi過程を陽に扱ったモデル解析例は少ない。

一方、瀬戸内海東部大阪湾では1990年代前半は渦鞭毛藻赤潮が卓越していたものの、1990年代後半は珪藻赤潮が卓越するようになってきた。このような赤潮卓越種の経年変動の原因はいつさ
い明らかにされていない。

また実際の瀬戸内海・周防灘のような沿岸海域でDSiを含む、DIP、DINなどの栄養塩収支も明らかにされていない。

2. 研究目的

本研究の目的は、

- 1) リン・窒素・珪素を含む低次生態系モデルを用いて、1990年代前半から1990年代後半にかけての大阪湾・湾奥における赤潮プランクトンの卓越種の変遷過程（渦鞭毛藻から珪藻へ）を再現し、その理由を明らかにすること、
 - 2) フェリーによる栄養塩観測データと河川からの栄養塩供給量データを用いて、瀬戸内海におけるDIP、DIN、DSi分布の特徴とその要因を明らかにすること、
 - 3) さらに、冬季周防灘のDIP、DIN、DSi収支を明らかにすること、
- の3点である。

3. 研究方法

(1) 生態系モデル

大阪湾奥に、夏季躍層が発達する表層3mのボックスを設定し、毎年赤潮が発生する8月の海況を1990年～2002年の間再現する。対象海域は、図1に示す淀川河口域（この海域で夏季に密度躍層が発達する水深5mまでの層）とする。

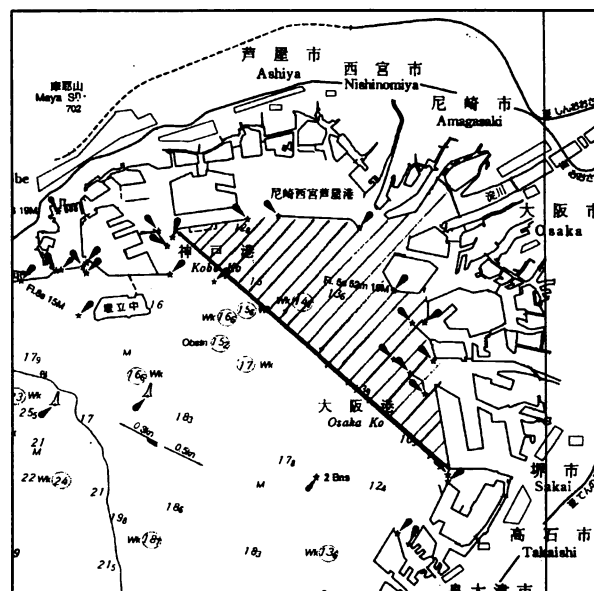


図1 モデル海

計算に必要な境界条件を、フェリーによる観測データを基に整えるとともに、淡水・塩分保存の物理モデルから移流・拡散による栄養塩フラックスを最初に計算した。

ボックスの淡水・塩分保存式は、以下で示される。

$$R + F_s W = U F_u \quad \dots(1)$$

$$S_l W F_s - S_u U F_u + K_v \frac{S_l - S_u}{H} F_s + K_h \frac{S_o - S_u}{L} F_u = 0 \quad \dots(2)$$

ここで、 R は河川流量、 F_s は海域の面積、 F_u は境界線でのボックス断面積、 W 及び U は鉛直及び水平移流流速、 S_u 、 S_l 及び S_o は上層、下層及び対象海域外側の塩分濃度、 K_v 及び K_h は鉛直及び水平拡散係数、 H 及び L は鉛直及び水平測点間距離を表す。また、鉛直拡散は河川流量の変動に反比例、水平移流は比例すると考えられるので、以下のように表せる。

$$K_v = \frac{k}{R/R_m} \quad \dots(3)$$

$$U = m \frac{R}{R_m} \quad \dots(4)$$

ここで、 k 及び m は未知数、 R_m は平均河川流量を表す。(1)式から W は U の式として表せるため、(1)(3)及び(4)式を(2)式に代入すれば、 m 、 k 及び K_h を未知数とする式となる。解析は、データが整っている1990～2002年の8月について行うことから、各年8月のデータを用いて連立方程式を立て、未知数を求めた。

さらに以後の解析では、国土交通省による淀川の河川流量、リン、窒素、珪素濃度データ、大阪府水産試験場による大阪湾奥における水温、塩分、栄養塩、植物プランクトン濃度観測データ、大阪地方気象台における日射量データを用いて、図2に示すようなボックス生態系モデル内の未知数を解いた。

このボックスは栄養塩3種（溶存無機態リン、溶存無機態窒素、珪酸）、植物プランクトン2種（珪藻、渦鞭毛藻）、動物プランクトン、デトリタス、溶存有機態リン・窒素（DOP: Dissolved Organic Phosphorus; DON: Dissolved Organic Nitrogen）をコンパートメントとしているが、渦鞭毛藻に関しては日周鉛直移動を考慮している。式を解く際には、空間変動が時間変動よりはるかに大きいので、各年8月の状態を疑似定常状態と仮定して、定常計算結果を解とした。

今回のモデルの特徴は光合成の項 A_1 で、それは、最大増殖速度 V_{max} と栄養塩濃度、水温及び光量の関数で、(5)式で与えられる。

$$A_1 = V_m \times \text{Min}\left(\frac{DIN}{DIN + k_n}, \frac{DIP}{DIP + k_p}, \frac{DSi}{DSi + k_s}\right) \times \frac{T^2}{T_o} \exp\left(1 - \frac{T^2}{T_o}\right) \times \frac{I^2}{I_o} \exp\left(1 - \frac{I^2}{I_o}\right) \quad (5)$$

ここで、DIN, DIP, DSiは、それぞれ溶存窒素・リン・珪素濃度、 k_n , k_p , k_s は、それぞれ窒素・

リン珪素に対する半飽和定数、 T は水温、 T_0 は最適水温、 I は平均光量、 I_0 は最適光量である。

栄養塩に関する項は、海洋での栄養塩濃度が半飽和定数よりも十分に大きい時に増殖速度が V_{max} で一定となり、低濃度では半飽和定数との比で増殖速度が変化する事を表している。また半飽和定数は種によって異なり、これが小さいほど低栄養塩でも増殖可能であることを示す。本研究で扱っている珪藻と非珪藻の場合、珪藻の方が低濃度で増殖可能であるため、半飽和定数はより小さい値となる。さらに、本モデルでは3種類の栄養塩を含んでいることから、最も制限が厳しい栄養塩を用いて A_1 が決定される。実際に計算に用いた半飽和定数は、DINに対して珪藻は0.2、非珪藻は2.0、DIPに対して珪藻は0.3、非珪藻は0.9、DSiに対して珪藻は1.3である。これらは文献に示されている範囲で、観測値をより再現するように選択した。

数値生態系モデル

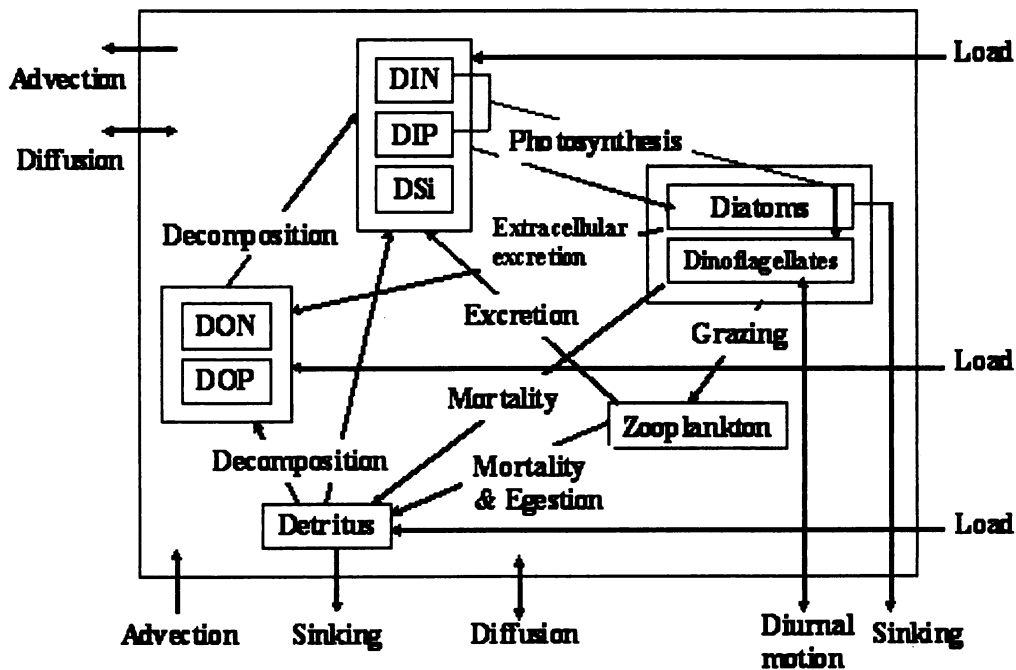


図2 計算に用いたボックス生態系モデル

水温と光量に対しては、 $I=I_0$ 、 $T=T_0$ の時に最も増殖が活発となり、且つ二乗で応答する関数で与えた。 I_0 は、非珪藻の赤潮種について文献に多く記載されており、ここでは $120\text{Em}^2\text{s}^{-1}$ を用いた。珪藻については記載がなかったが、非珪藻に比べ強い光に弱いことから、この期間の最大値である $100\text{Em}^2\text{s}^{-1}$ とした。尚、日射があるのは6時～18時の間とし、18時～6時は光合成しないとした。 T_0 は文献値に幅があるため、珪藻、非珪藻とも期間の最大値である 30.8°C とした。

(2) 瀬戸内海表層の栄養塩収支の解析

1994～2000年、大阪と別府を結ぶフェリー（図3）によって得られた瀬戸内海表層におけるDIP、DIN、DSi濃度観測結果から、冬季の平均値を用いて瀬戸内海におけるDIP、DIN、DSi分布の特徴とその原因を明らかにし、それぞれの栄養塩収支を見積もる。

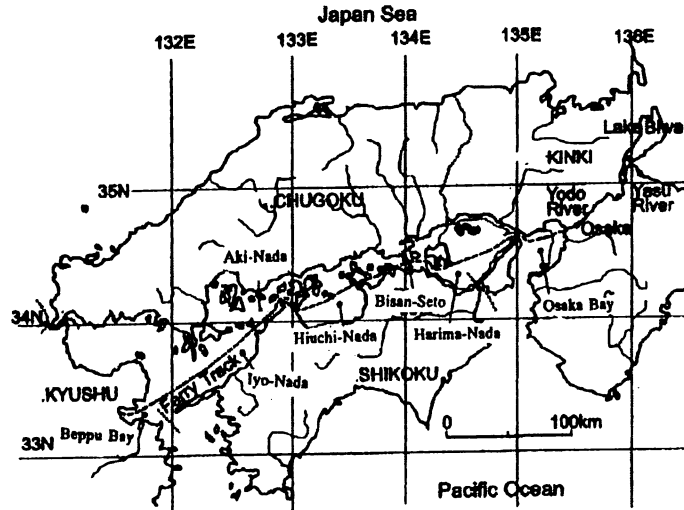


図3 大阪－別府フェリーの航路

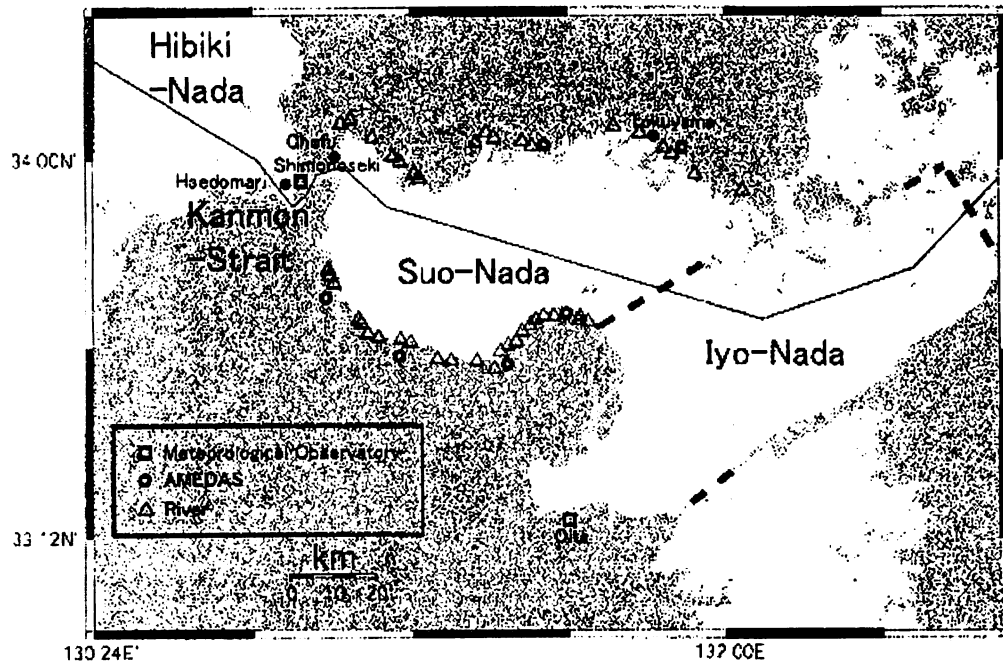


図4 大阪－釜山フェリーの航路と気象・河川データ収集点

(3) 冬季周防灘における栄養塩収支の解析

1992年冬季の周防灘におけるフェリー（大阪－釜山；図4）によるDIP、DIN、DSi観測データと河川からのDIP、DIN、DSi供給データを用いて、冬季周防灘における栄養塩収支を明らかにする。

4. 結果・考察

(1) 生態系モデル

計算された全リン濃度の経年変動は観測結果をよく再現した（図5）。DIP、DIN、DSiの計算値は観測値をほぼ再現している（図6, 7, 8）。さらに、計算されたchl. a濃度は観測値よりやや低めの値となった（図9）。

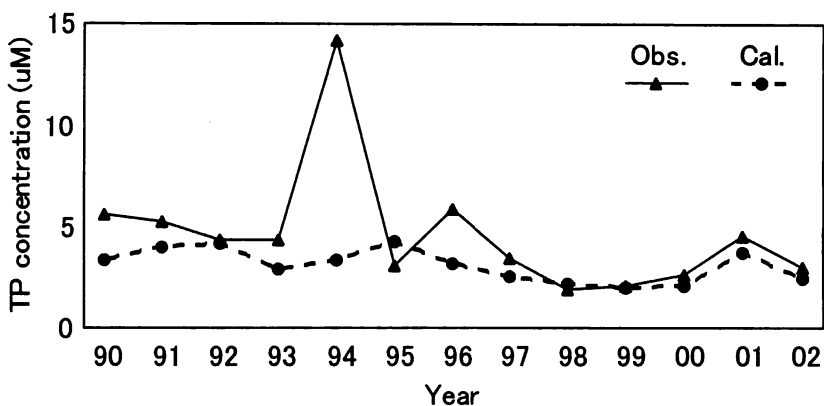


図5 TP観測値（実線）と計算値（破線）

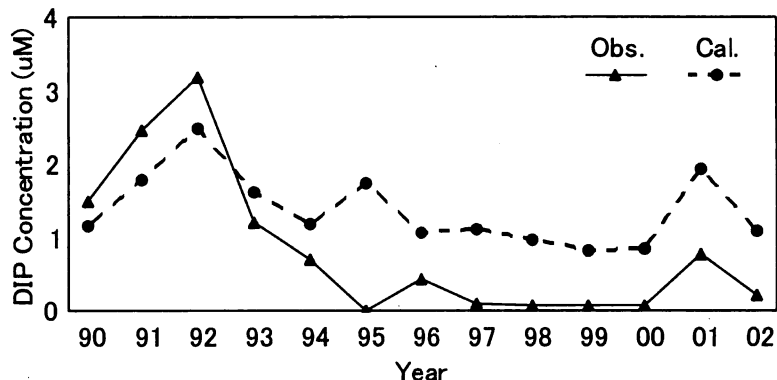


図6 DIP観測値（実線）と計算値（破線）

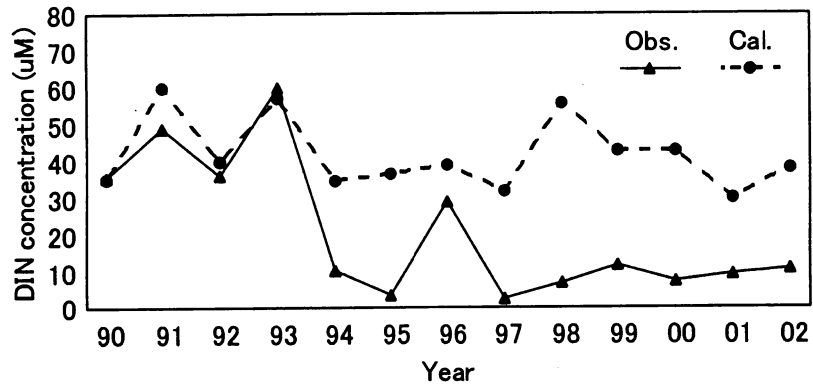


図7 DIN観測値（実線）と計算値（破線）

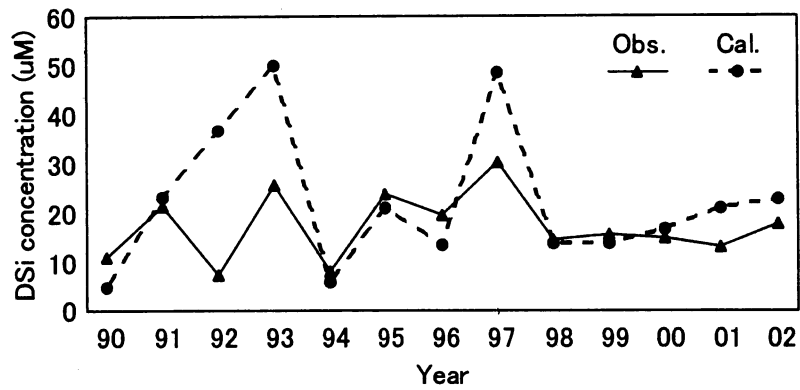


図8 DSi観測値（実線）と計算値（破線）

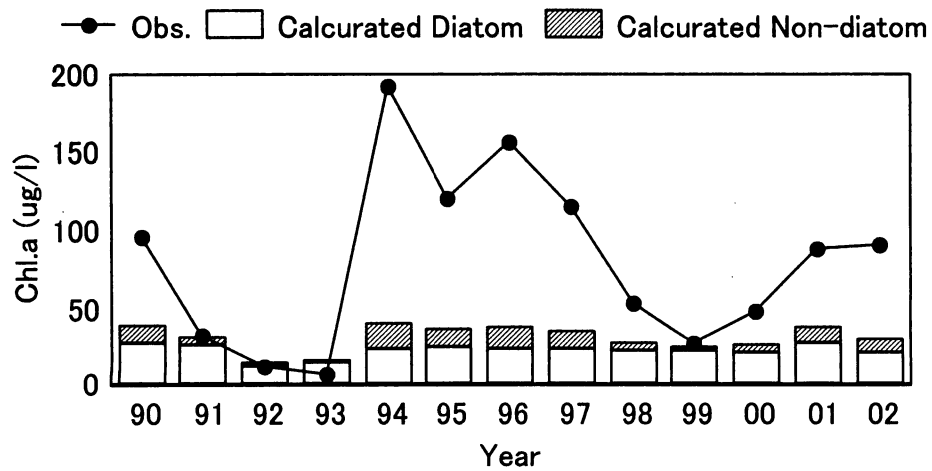


図9 chl.a観測値（実線）と計算値（破線）

しかし、計算された珪藻と渦鞭毛藻の濃度割合の経年変動は、赤潮発生件数の割合の経年変動をよく再現した（図10, 11）。

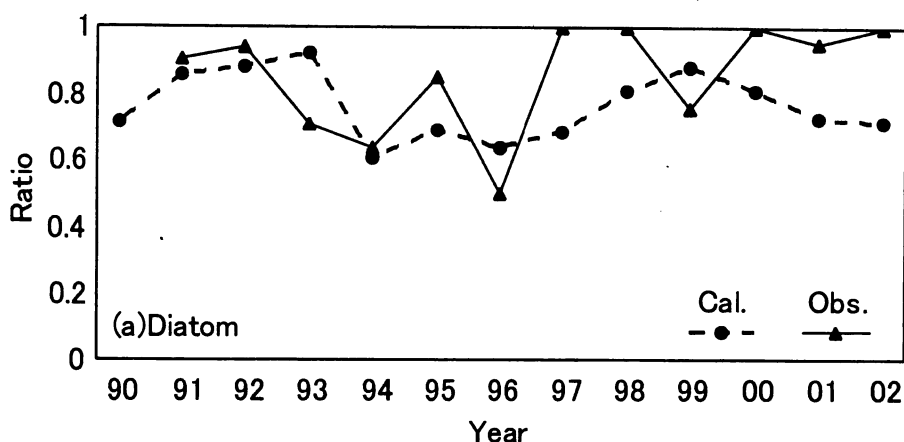


図10 珪藻赤潮出現割合の観測値（実線）と計算値（破線）

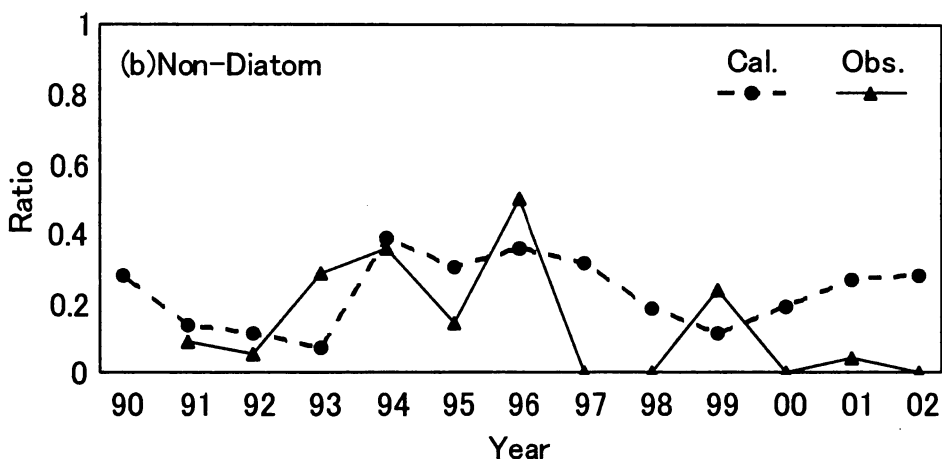


図11 渦鞭毛藻赤潮出現割合の観測値（実線）と計算値（破線）

以上の海洋生態系モデル計算結果から、大阪湾奥で1990年代前半渦鞭毛藻赤潮が卓越し、1990年代後半珪藻赤潮が卓越したのは、半飽和定数が珪藻より高い渦鞭毛藻が、近年の陸上におけるリン使用規制の浸透に起因する海域のリン濃度減少のために、以前より増殖しにくくなったことが、その主な原因であることが推定された。

(2) 瀬戸内海表層の栄養塩収支の解析

別府湾、伊予灘、安芸灘、燧灘、備讃瀬戸、播磨灘、大阪湾の各灘・湾で平均した7年間平均栄養塩濃度の空間分布によると、DIN濃度は別府湾と除くと瀬戸内海西部で低く、東部で高い。特に大阪湾では他海域の7倍以上の高濃度を示す。DIP濃度も同じく瀬戸内海東部で高く、西部で低い。

しかし、大阪湾の濃度は他海域の2-3倍程度である。DSi濃度分布はDIN、DIPとは異なり、別府湾、備讃瀬戸、大阪湾で高く、伊予灘で最も低い（図12a）。

単位容積当たりのTN、TP負荷量は大阪湾で最も大きく、DIN、DIP最高濃度と対応している。単位容積当たりのTN、TP負荷量は播磨灘より備讃瀬戸の方が大きいのに、DIN、DIP濃度は播磨灘の方が備讃瀬戸より高くなっている。これは備讃瀬戸の強い潮流により、備讃瀬戸に負荷されたTN、TPが速やかに播磨灘、燧灘に輸送されると同時に、播磨灘には大阪湾から多量のDIN、DIPが輸送されてくるためである（図12b）。

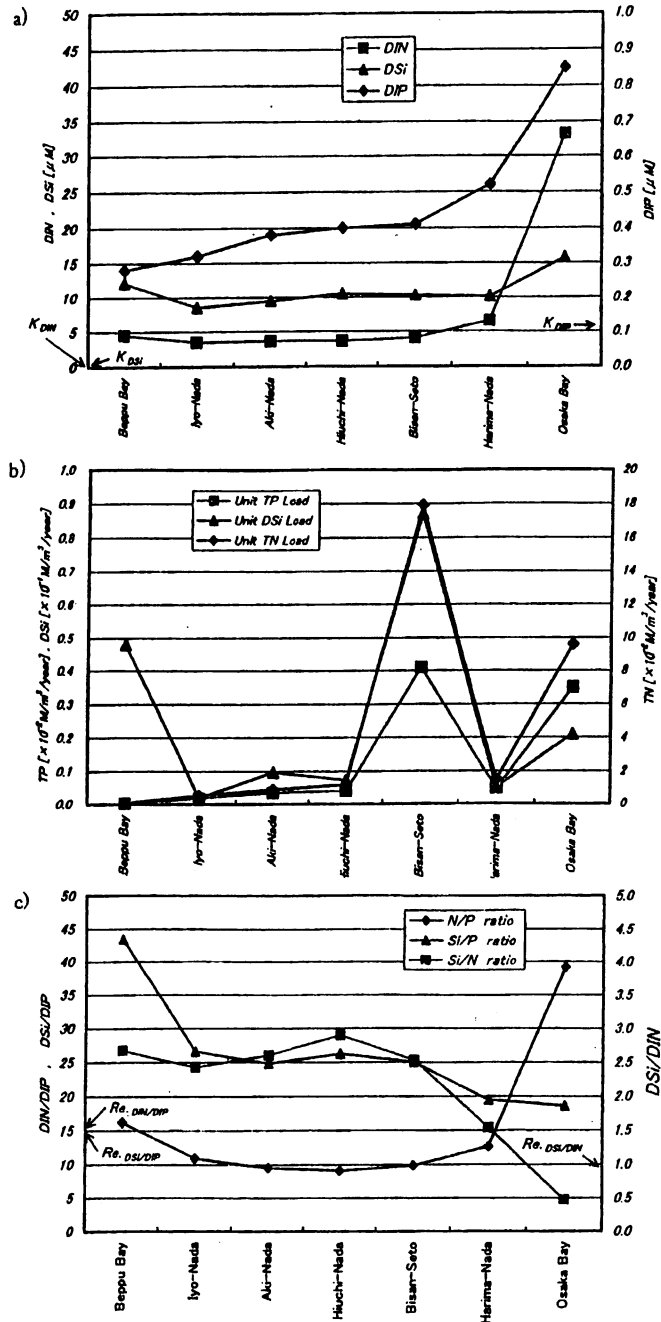


図12 各灘・湾のDIP、DIN、DSi濃度(a)、単位容積当たりの負荷量(b)、N/P、Si/P、Si/N比(c)

また、DSi濃度は、単位容積当たりのDSi負荷量大きい別府湾、備讃瀬戸、大阪湾でいずれも極大値をとっている（図12a, b）。このことはDSiはNやPと比較すると、瀬戸内海の海水中を輸送されにくい性質を持っていることを示唆している。すなわち、DSiは植物プランクトンに取り込まれ懸濁態化したケイ素（BSi）が窒素やリンと比較すると分解されにくいので、DSiが負荷された灘や湾の中に留まる率が高くなる。また、単位容積当たりのDSi負荷量は備讃瀬戸の方が、別府湾や大阪湾より大きいにも関わらず、DSi濃度は別府湾や大阪湾の方が備讃瀬戸より高い理由は、備讃瀬戸の水平輸送能力が大きく、備讃瀬戸でのDSi滞留時間が短いためである。

各灘・湾におけるDIP、DIN、DSi収支は図13に示すようである。

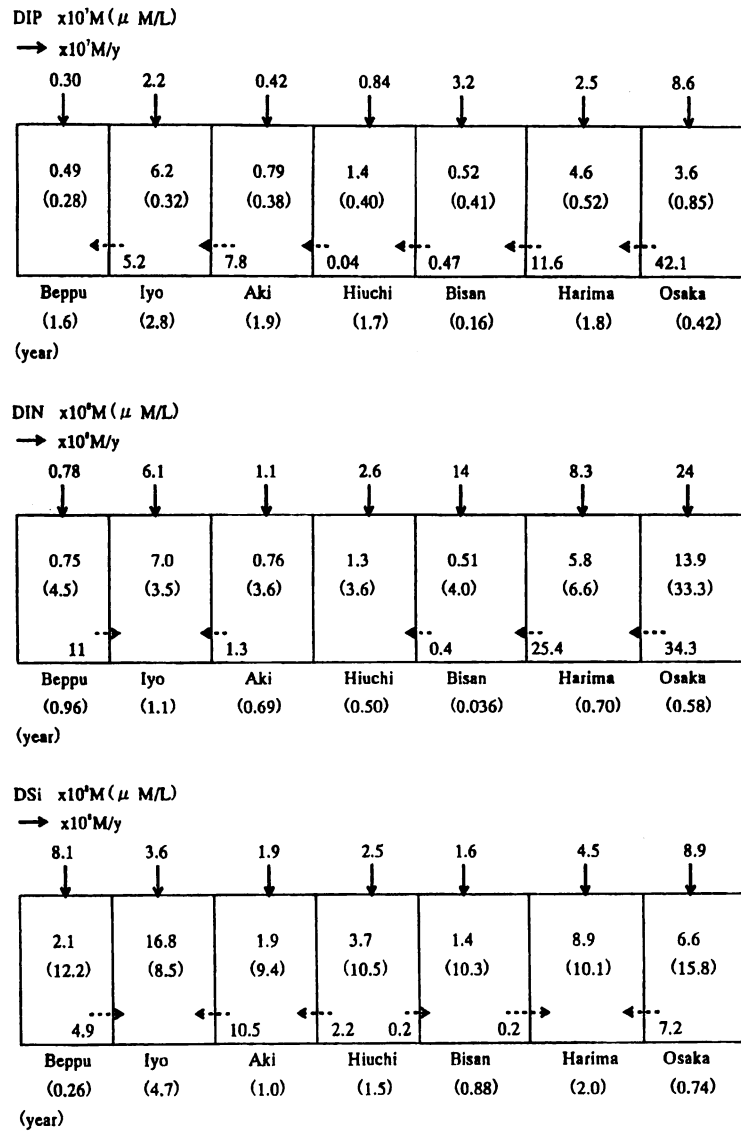


図13 瀬戸内海の各灘・湾のDIP、DIN、DSi

図13のそれぞれの収支図の最下段には各灘・湾における物質存在量を陸からの負荷量で割って得られた平均滞留時間を示した。いずれの物質についても伊予灘で最も長い平均滞留時間、1.1~4.7年が得られている。伊予灘の長い平均滞留時間はDIP、DIN、DSiが豊後水道を通じて外洋から伊予灘に負荷されている可能性を示唆していると考えられるが、今後さらに定量的な研究が必要であろう。

一方、備讃瀬戸における平均滞留時間はどの物質に関しても0.04~0.9年と非常に短く、この海域の強い潮流が陸から負荷された物質をすみやかに隣接海域に輸送していることを示唆している。

(3) 冬季周防灘における栄養塩収支の解析

2002年冬季の響灘、周防灘、伊予灘におけるDIP、DIN、DSi濃度の経月変動は図14に示すようである。

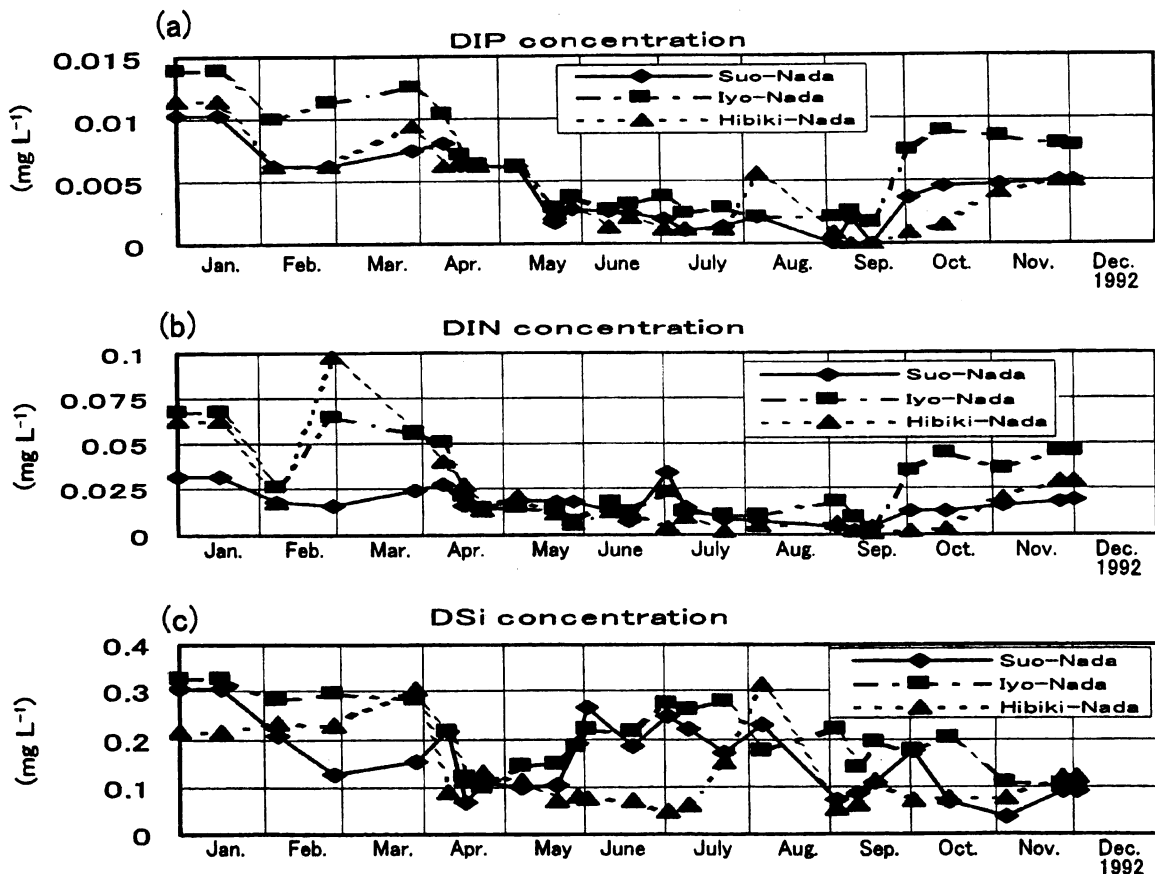


図14 2002年冬季の響灘、周防灘、伊予灘におけるDIP、DIN、DSi濃度の経月変動

図14の濃度水平勾配と経月変動から求めた冬季周防灘に対するDIP、DIN、DSiフラックスの各月の値は図15に示すようである。この図より伊予灘からのDIP、DIN、DSiの移流・拡散フラックスは河川からの負荷フラックスのそれぞれ19、6.7、2.5倍に達することが明らかになった。

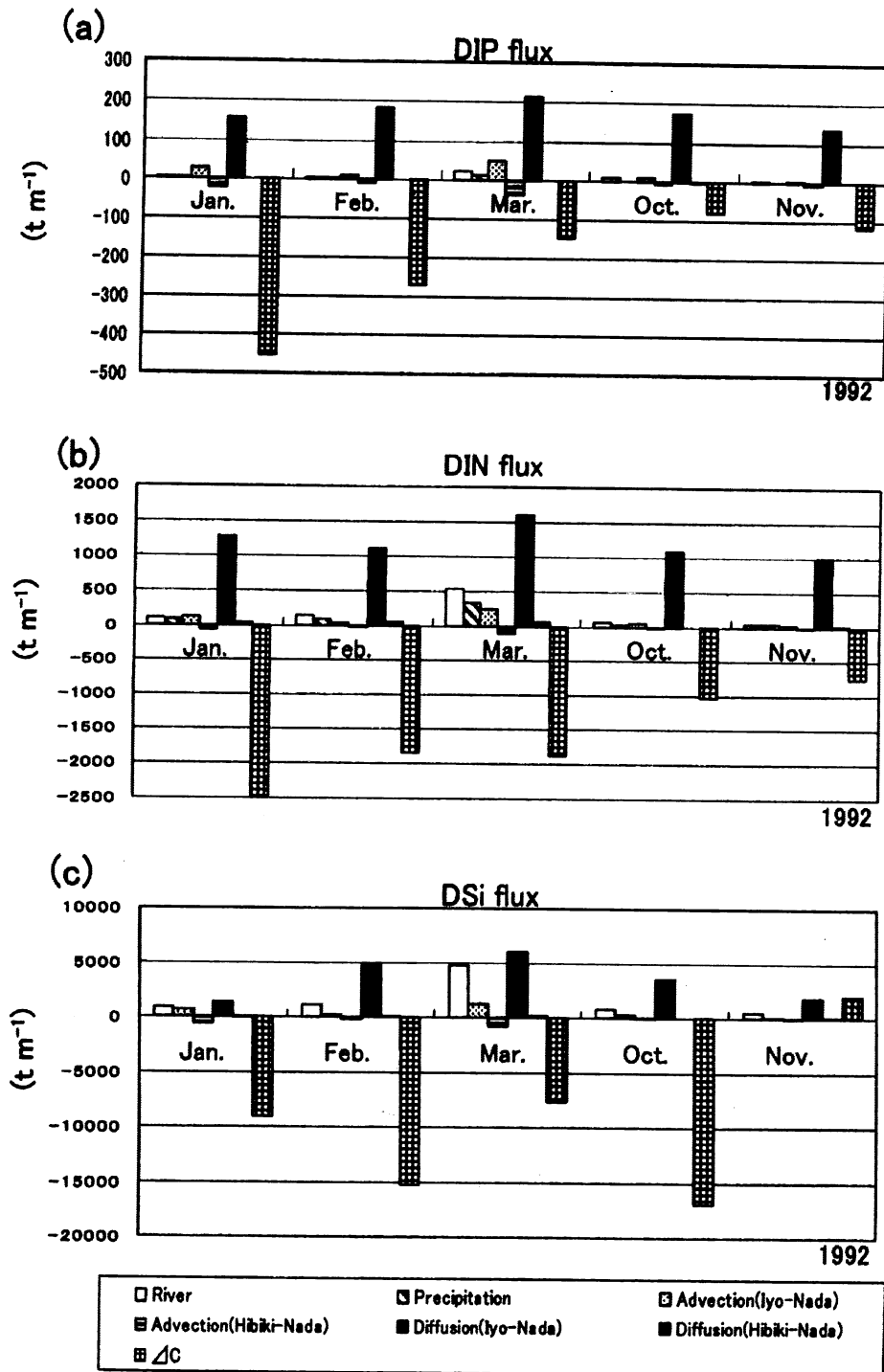


図15 冬季周防灘に対するDIP、DIN、DSiフラックス

5. 本研究により得られた成果

1) 1990年代前半渦鞭毛藻赤潮、1990年代後半珪藻赤潮が卓越した大阪湾・湾奥において窒素、リン、珪素を含んだ海洋生態系モデルを適用し、卓越赤潮種の変化の原因を明らかにすることを試みた。計算された珪藻と渦鞭毛藻の濃度割合の経年変動は、赤潮発生件数の割合の経年変動をよく再現した。以上の海洋生態系モデル計算結果から、大阪湾奥で1990年代前半渦鞭毛藻赤潮が卓越し、1990年代後半珪藻赤潮が卓越したのは、半飽和定数が珪藻より高い渦鞭毛藻が近年のリン濃度減少のために、以前より増殖しにくくなったことがその主な原因であることが推定された。近年のリン濃度の減少は陸上でリンの使用規制が進んだためである。

2) 国立環境研究所のフェリー観測の1994-2000年間の平均値を用いて、瀬戸内海内のDIN、DIP、DSiの分布を解析し、灘ごとの収支の推定を行った。その結果、DINやDIPが大阪湾で最も高濃度となり瀬戸内海西部で低濃度となるのに対し、DSiは大阪湾、備讃瀬戸、別府湾で高濃度となることがわかった。その理由は、第一にこれらの海域に対する単位容積当たりのDSi流入量が大きいこと、第二に、灘ごとの平均滞留時間が異なることによるためである。

3) 冬季周防灘に対する伊予灘からの溶存無機態リン、窒素、珪素の移流・拡散フラックスは河川からの負荷フラックスのそれぞれ19、6.7、2.5倍に達することが明らかになった。

6. 引用文献

- 1) Bodeanu, N. (1993): Microalgal blooms in the Romanian area of the Black Sea and contemporary eutrophication conditions. In "Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea", ed. by Smayda, T. J. and Shimizu, Y. Elsevier, Amsterdam, 203-209.
- 2) 坪田博行, 武岡英隆, 遠藤拓郎 (1986) 瀬戸内海の水の動きと水質、小坂淳夫(編) 瀬戸内海の環境, 50-97, 恒星社厚生閣.
- 3) 真鍋武彦, 反田 實, 堀 豊, 長井 敏, 中村行延 (1994) 播磨灘の漁場環境と植物プランクトンの変動 -20年間のモニタリングの成果-, 沿岸海洋研究ノート, 31, 169-181.
- 4) Harashima, A. *et al.* (1997): Monitoring algal blooms and related biogeochemical changes in the adjacent seas of Japan. In "Monitoring algal blooms", ed. by Kahl, M. and Brown, C. W., 85-111, Springer.
- 5) 林 美鶴, 柳 哲雄, 橋本俊也 (2000) 瀬戸内海における窒素・リンの現存量比率, 海の研究, 9, 83-89.
- 6) 林 美鶴, 柳 哲雄 (2001) 数値生態系モデルによる大阪湾億部のリン循環過程の解析, 海の研究, 10, 203-217.

7. 国際共同研究等の状況

本研究成果をもとに、フィリピン大学の研究者 (Prof. Fernando Siringan, Assoc. Prof. Maria Loudres) と協力して、マニラ湾の赤潮発生機構を明らかにする数値生態系モデルを開発しつつある。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

①柳 哲雄・原島 省：海の研究、12、565-572(2003)

「瀬戸内海における溶存態無機リン・窒素・珪素分布の特徴とその要因」

②柳 哲雄・白木喜章：海の研究、13、197-205(2004)

「冬季周防灘の栄養塩収支」

<その他誌上発表（査読なし）>

なし

(2) 口頭発表（学会）

① M. Hayashi, T. Yanagi, and A. Harashima: EMECS International Symposium, Bangkok (2003)

"Numerical ecosystem model on red tides"

② 柳 哲雄・原島 省：日本海洋学会春季大会(2003)

「瀬戸内海における溶存態無機リン・窒素・珪素分布の特徴とその要因」

③ 林 美鶴・柳 哲雄・原島 省：日本海洋学会春季大会(2004)

「大阪湾の赤潮種交代に関する数値生態系モデル」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

瀬戸内海においてはリン・窒素の総量規制が実施されているが、瀬戸内海におけるリン・窒素濃度の改善傾向が見えず、近年リン・窒素濃度総量規制の有効性を疑う声も出始めている。

総量規制の結果減少したリン負荷量により、大阪湾におけるリン濃度が減少し、卓越赤潮種が有害な非珪藻類から無害な珪藻類に変化したことを定量的に示す今回の数値生態系モデル計算結果は、瀬戸内海におけるリン総量規制の有効性を示したものであり、政策評価に対する寄与が大きい。