HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	瀬戸内海の生物生産に果たす陸起源のリン・窒素の役割(シンポジウム:沿岸海域に存在する外洋起源のリン・窒素)
Author(s)	門谷, 茂
Citation	沿岸海洋研究, 43(2), 151-155
Issue Date	2006-02-28
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56490
Type	journal article
File Information	116)montani-engankaiyo-43-151.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

The Oceanographic Society of Japan (OSJ)

沿岸海洋研究、第43巻，第2号，151-155，2006
Bulletin on Coastal Oceanography, Vol. 43, No. 2, 151-155, 2006

瀬戸内海の生物生産に果たす陸起源のリン・窒素の役割*

門　谷　　茂**

The Role of Land Derived Phosphorus and Nitrogen in Marine Biological Production in the Seto Inland Sea

Shigeru Montani

瀬戸内海では，他の人口集中沿岸海域と同様に1950年代以降，流入する河川の栄養塩濃度(とりわけ，リン・窒素)は，上昇を続けその結果として，海域の栄養塩濃度を急上昇させた．とりわけ，60年代後半から赤潮の発生が頻繁に起こるようになり，1976年には年間299回を数えるまでになった．富栄養化は基礎生産の増大をもたらすだけでなく，光合成によって作られた膨大な有機物の多くが水柱内で消費されることなく海底に沈積し，そこで微生物分解されることにより溶存酸素濃度を減少させ，貧酸素水塊を作り出すことにも繋がった．この間の瀬戸内海における富栄養化を進行させてきたのは，陸からもたらされた窒素やリンであることは種々の環境モニター結果から明らかである．瀬戸内海の生物過程において決定的な役割を演じているのは，やはり陸上からの栄養塩負荷であった．一方，近年重要視されてきた外洋起源と言われる窒素やリンが，瀬戸内海の生物生産にどのように寄与しているかについての答えを得ることは，今後の環境行政を考える上でも，沿岸域の生物生産構造を理解する上でも極めて重要である．今後は，溶存無機態の窒素やリンがどのようなタイミングでどこからどれだけ流入しているのかについて，詳細に明らかにする必要がある．

The 20th century was one of Eutrophication of coastal waters. After the 1950s, the density of nutrients in rivers flowing into enclosed coastal seas kept rising; as a result, the densities of nutrients in enclosed coastal seas rapidly elevated. This nutrient load is very closely related to the amount of the fertilizer used in the hinterland region and to population increases in coastal areas. In the sea areas receiving loads of excessive nutrient, increases of phytoplankton occurred on the sea surface; the result of primary production increasing by several fold from levels found before the 1950s. These events occurred in parallel to the generation of red tides, which became frequent in the latter half of the 1960s, indeed occurring 299 times in 1976 in the Seto Inland Sea. Eutrophication connected with primary production not only increased, but also consumed many of the organisms resulting from photosynthesis in seawater, and created a poverty of oxygen in the water with its production. On the other hand, recently there has been active discussion regarding the influence of phosphorus and nitrogen, not only in the nutrient loads from the land but also in those of Pacific Ocean origin, on processes of living organisms in the Seto Inland Sea. It is the nitrogen and phosphorus coming from the land that has caused Eutrophication in the Inland Sea. The nutrient loads from the land have had a definite in the biological processes occurring in the Seto Inland Sea. It is extremely important to understand the structure of biological production of coastal areas; it is also important for future environmental administration to understand how nitrogen and phosphorus of Pacific Ocean origin contributes to the biological production in the Seto Inland Sea. Therefore, it will be necessary to clarify the details of how much and from where nitrogen and phosphorus flows into the Seto Inland Sea.

キーワード：リン，窒素，富栄養化，赤潮，基礎生産

1. はじめに

20世紀は，沿岸海域の富栄養化の世紀でもあった．1950年代以降，洋の東西を問わず沿岸海域に流入する河川の栄養塩濃度（とりわけ，リン・窒素）は，上昇を続けその結果として，沿岸海域の栄養塩濃度を急上昇させた（Nixon, 1995)[1]．この栄養塩負荷は，陸域における肥料使用量や沿岸部の人口増加ときわめて密接に関連している（Moreau et al., 1998)[2]．海域への過度の栄養塩の負荷は，沿岸海域表層の植物プランクトン群集生物量の増大をもたらし，基礎生産量も50年代以前の数倍に達している海域も珍しくはない．この事象は，もちろん瀬戸内海においても同様に生起し，60年代後半から赤潮の発生が頻繁に起こるようになり，1976年には年間299回を数えるまでになった．富栄養化は基礎生産の増大をもたらすだけでなく，光合成によって作られた膨大な有機

* 2005年12月29日受領，2006年1月25日受理
** 北海道大学大学院水産科学研究院・環境科学院
連絡先：門谷　茂，北海道大学大学院水産科学研究院・環境科学院
〒060-0813 札幌市北区北13条西8丁目
E-mail: montani@fish.hokudai.ac.jp

NII-Electronic Library Service

The Oceanographic Society of Japan (OSJ)

物の多くが水柱内で消費されることなく海底に沈積し，そこで微生物分解されることにより溶存酸素濃度を減少させ，貧酸素水塊を作り出すことにも繋がった（門谷，1996)[3]．

一方，近年陸域からの栄養塩負荷ではなく，太平洋起源のリン・窒素が瀬戸内海の生物過程に大きな影響を及ぼしているのではないかという議論が盛んになってきた（藤原ら，1997[4]；武岡ら，2002[5]；石井・柳，2004[6]；Yanagi and Ishii，2004[7]など)．

海水中には，地球上に存在するすべての元素がさまざまな形態・濃度で存在している．海洋生物の体内にも，実に多種・多様な元素が含まれている．近年急速に発展した分析技術をもってすれば，１兆分の１グラム以下の量でも検出が可能であり，今後，海水中に存在しているすべての元素が生物の体内から見つかるものと思われる．しかしながら，これらの元素がすべて生物の生命活動にとって必要不可欠というわけではない．

生命活動に必要不可欠な元素の内のいくつかを，海洋学では特別に栄養塩あるいは栄養塩類と呼んでいる．この栄養塩は，海洋における生物生産の第一段階を担っている植物プランクトンが成長するときに，大量に必要とされ,その生産量をコントロールする,つまり増殖の制限因子となっている物質のうち，窒素・リンおよびケイ素の無機塩類を示す言葉である．植物プランクトンの光合成過程における基本的な原材料は，陸上植物と同じように水と二酸化炭素であるが，海洋ではこれらが不足して光合成活性が抑えられることは無い．それゆえ，酸素や炭素などを栄養塩とは呼ばない(例えば，門谷，1996)[3]．

また，よく使われる「富栄養化」という用語は，人類活動の急激な増大に伴い，閉鎖性海域などへの栄養塩類の負荷量が著しく増加し，その結果として植物プランクトンなどが大増殖したため引き起こされる水質の悪化現象として認識されている．このように，「富栄養化」はいわばプロセスを示す言葉であり，状態を示してはいない．状態を示す用語としては，貧栄養，中栄養，富栄養及び過栄養段階（状態）があり，厳密な定義はないが，湖沼では無機態窒素濃度としてそれぞれ，貧栄養：0.2 mg N/L 以下，中栄養：0.2−0.4 mg N/L，富栄養：0.4 mg N/L 以上とされている（Whittaker，1975)[8]．

本稿では，これらとは別の視点から，前述した富栄養化プロセスの主役を担った陸起源のリン・窒素の役割を，海底堆積物に残された記録を読み解くことを中心に外洋由来のリン・窒素のダイナミクスと対比して議論したい．

2.　陸起源リン・窒素の形態と海域での振る舞い

瀬戸内海に河川などを通して陸からもたらされるリン・窒素は，最も多い時期には，それぞれ日量35および500トンにも上っていた．大阪湾をモデル海域として，陸域からもたらされた窒素の動態をみてみると，門谷ら（1991)[9]にまとめられているように，日量180トンが淀川などの河川を通じて，約８トンが降雨によって大阪湾

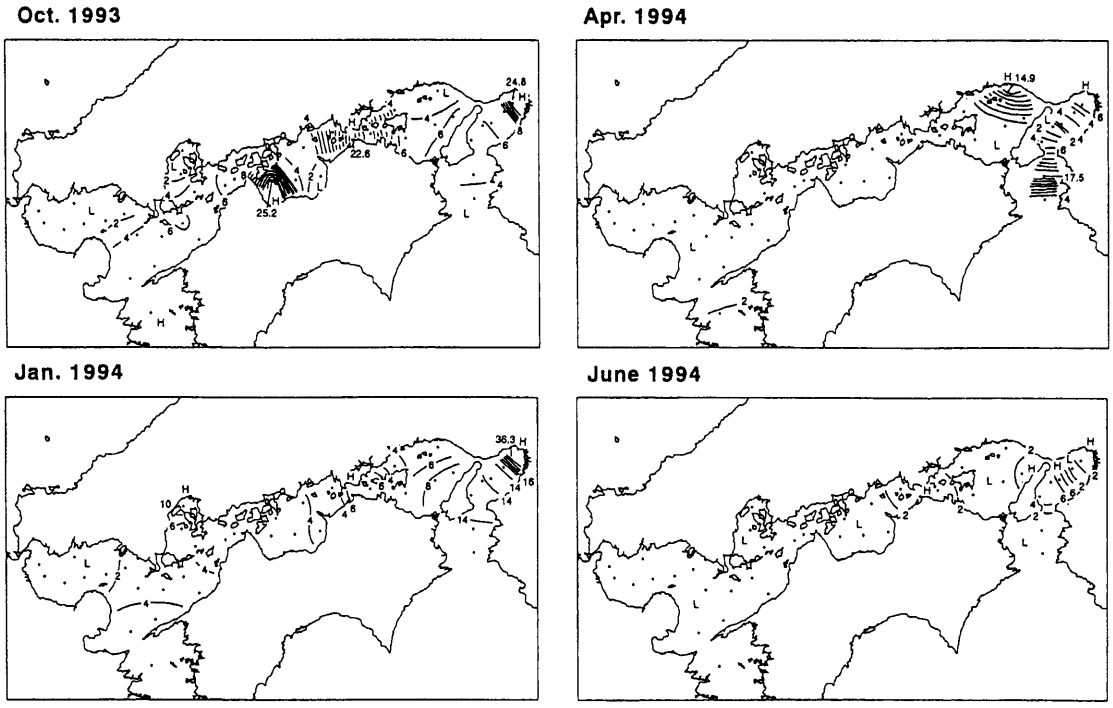


Fig. 1　Horizontal distribution of dissolved inorganic nitrogen in surface waters of the Seto Inlan Sea（Hashimoto et al., 1996).

NII-Electronic Library Service

The Oceanographic Society of Japan (OSJ)

にもたらされる．富栄養化が始まる前（陸域からの負荷が小さかった1950年代）には，河川を通じての負荷が50トン以下であったことから考えると，約3.5倍にも増加したことになる．基礎生産量は，日量760トンであり，植物プランクトンの現存量は1,602トンと見積もられた．動物プランクトンの現存量は242トンほどで，毎日植物プランクトンを111トン摂食している．その内，成長に回されるのは29トンで，残りは排泄で40トン，排糞の形で42トンが捨てられる．デトライタスなどの沈降もあるので，海底に到達する窒素量は67トンに増加する．この内の７割に相当する47トンが再生栄養塩の形で海水中に回帰し，残余の16トンが海底堆積物中に保存される．漁獲による陸上回帰量は約５トンであり，溶存しているもの，懸濁しているもの，動・植物プランクトンなどの体を構成しているものなどを合計すると，窒素の全現存量は約12,000トンになる．陸起源の窒素は現存量の約1.5%相当量を毎日添加していることになる．しかも，これらのほとんどは，硝酸態やアンモニア態といった無機栄養塩として表層部にもたらされる．瀬戸内海表層の溶存態窒素濃度の分布（Fig. 1）をみても，大河川の河口付近の海域の濃度が極めて高いことがわかる．

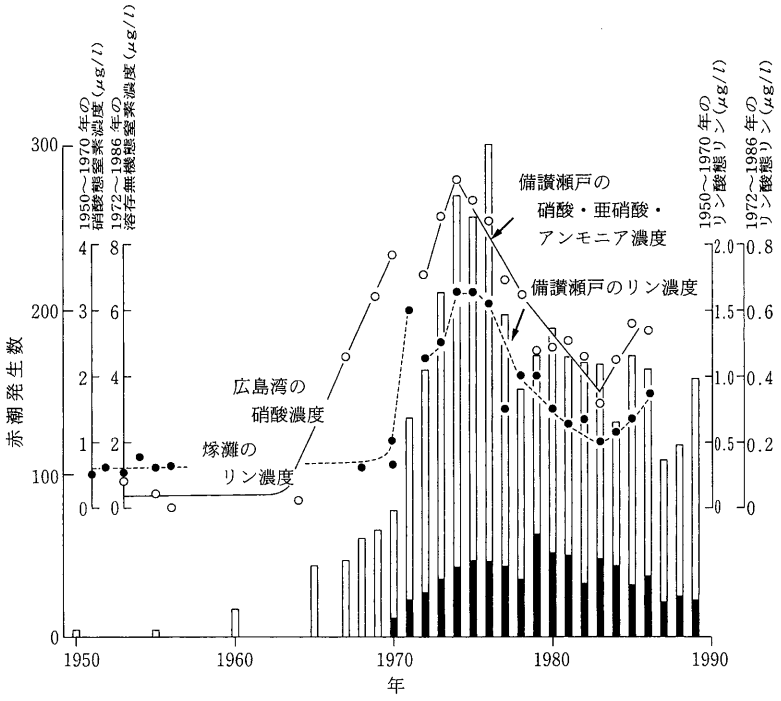
さて，海域にもたらされた栄養塩は植物プランクトンに取り込まれることにより，海洋生態系内をめぐる旅に出る．リンや窒素は何度か生物と非生物の間を行き来した後，一部は先に述べたように海底に堆積し，残りの多くは最終的に系外（この場合には，紀伊水道と播磨灘）に流出する．

大阪湾で見積もられた系外に流出する数値は，日量165トン窒素であった（門谷ら，1991）[9]．つまり，陸域から海域に負荷された栄養塩のほとんどは，海域内に堆積することなく，外部に漏出し外洋域に施肥しているということである．

3. 栄養塩濃度の時系列記録

1950年代から栄養塩濃度のモニターをしているヨーロッパやアメリカなどのいくつかの海域（Vollenweider, 1976[10]；Kratzer and Shelton, 1998[11]；Le Pape et al., 1996[12]；Harding and Perry, 1997[13]など）とは異なり，我が国では議論に耐えるだけの時系列データがそろうのは，1970年代に入ってからである．しかしながら，1950～60年代にもごく一部の海域で，時折栄養塩類の測定がなされていたことがあり，それらと近年の時系列データをつなぎ合わせることにより，瀬戸内海の栄養塩濃度がどのような推移をしたのかを跡づけることができる（Honjo, 1993）[14]．これによると，1960年代までの栄養塩濃度は，赤潮が頻発した1970年代から1980年代にかけての値に比べると１桁も低いことがわかる（Fig. 2）．

さて，海域にもたらされた過剰のリン・窒素は，先に見たように海域の富栄養化，すなわち基礎生産者（光合成生物）の増大をもたらす．大阪湾の例で見たようにそれらのある部分は，最終的に海底に沈積し保存される．この海底に堆積したリン・窒素の濃度について時系列的



瀬戸内海における赤潮の発生と栄養塩流入負荷の増加との関係（1950～1980年）．□：赤潮発生数，■：赤潮発生数（ヘテロシグマ・アカシオによる），○：窒素濃度，●：リン濃度．

Fig. 2 Relationship between red tide outbreaks and nutrient inflow loads in the Seto Inland Sea (Honjo, 1993)[14].

NII-Electronic Library Service

The Oceanographic Society of Japan (OSJ)

に解析すれば，富栄養化の進行具合が評価できるはずである．堆積したリン・窒素を含む有機物は，バクテリア等によって分解を受けるが，その分解過程は一次反応的であると考えられるので，水柱からの有機物負荷量が一定である場合，その鉛直分布は堆積物表層から深度とともに指数関数的に減少するはずである．しかしながら，播磨灘で我々のグループが採取した柱状堆積物に含まれる有機物量の鉛直分布は，堆積物表層から直線的に減少していた．この傾向は全有機態炭素，全有機態窒素，全リンとも同様であったため，播磨灘の3定点における全有機態炭素含量の鉛直分布を例としてFig. 3 cに示した．これから明らかなように，堆積後に分解して失われたと考えられる量を差し引いても，全有機態炭素が直線的に表層に向かって増加している理由は，堆積する期間に水柱から海底への有機物負荷量が増加したためと考えるのが妥当である．しかしながら，堆積物極表層部の有機物分布を説明するには，近年，水柱から海底への有機物負荷量が減少したためとするのが妥当である．また，堆積物の年代測定から，有機物負荷量の増加が始まったのは，およそ今から100年前の1900年前後と見積もることができた（一見ら，2005）[15]．

前述したように，瀬戸内海では1970年代より赤潮が頻発し，*Chattonella* 属及び *Gymnodinium* 属によって膨大な漁業被害を被ってきた．漁業被害を与える赤潮は，鞭毛藻類によるものがほとんどであるが，これら有害プランクトンの増加と海域での窒素，リン濃度の増加には高い相関関係が見られる．富栄養化の進行と共に，これまでには見られなかった種がその海域において観察されるようになる，あるいはこれまでに一度も高密度にはならなかった種が突然優占種となった事例が，世界各地の海域で観察されている．したがって，海域の富栄養化の過程とこれら有害プランクトンの卓越との関わりを明らかにすることは，今後これら有害プランクトンによる被害を防止するうえでも大変重要である．しかしこれまでに，我が国において過去数10年に渡るプランクトン相の遷移及び海域環境の変遷を継続的に観察してきた例は極めて少なく，さらにこれらプランクトンが注目される以前の知見についてはほとんど皆無といえる（門谷，2003）[16]．

しかしながら，幸いなことに海底の堆積物中には，過去から現在に至るまでの様々な環境情報が含まれており，これを分析観察することによって，おおよその海域環境及び生物相の変遷を知ることが出来る．植物プランクトンの中にはシスト（休眠胞子）を形成する種が多数存在するが，鞭毛藻類のシストは遊泳細胞時の形態とは全く異なり，シスト壁と呼ばれる難分解質の外殻を有している．シストが死滅した後，あるいはシストから遊泳細胞が発芽した後にも，このようにシストが難分解質の外殻を持つことから，その外殻は長期に渡って堆積物中に残存している．したがって，少なくともシストを形成する種については，堆積物中に残されたシストから，海域における出現時期，また過去の生物量等をおおよそで予想することが可能と思われる（一見ら，2005）[15]．

Chattonella 赤潮の発生でよく知られる，播磨灘の引田沖の定点における堆積物の化学分析の結果，1900年前後から堆積物中における全有機態炭素，全窒素及び全リン含量の増加が認められ，この海域では明治維新以降から富栄養化が進行してきたと推察された（Fig. 3）．また堆積物中の生物起源シリカ含量から，珪藻類は富栄養化

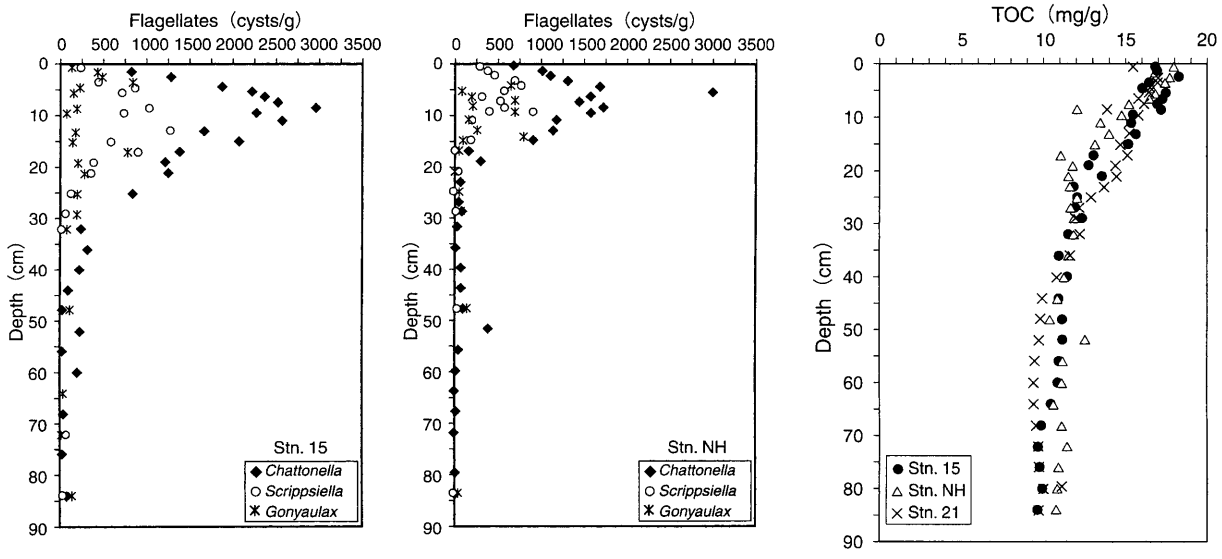


Fig. 3　Vertical distribution of total organic carbon and flagellates cysts in a sediment core from Harima-Nada (Ichimi et al., 2005).

NII-Electronic Library Service

The Oceanographic Society of Japan (OSJ)

が大きく進行した後も，その生物量はほとんど変化していないと予想された．鞭毛藻類のシストもまた1900年前後から増加しており，とりわけ *Chattonella*，*Alexandrium* 及び *Scrippsiella* の3属のシストは，明らかに富栄養化の進行と共に増加していた．したがって，これらの有害赤潮鞭毛藻は富栄養化の進行と共に，急激にその生物量を増大させた生物群であるといえる．また，*Chattonella*，*Alexandrium* 及び *Scrippsiella* 属のシスト数には，それぞれ1960～80年の同時期に明確なピーク時が認められた（Fig. 3）．このことは，赤潮が社会問題となった当時の播磨灘が，これらの鞭毛藻類にとって最も増殖に適した環境下にあったことを示唆するものである．また，*Chattonella* や *Alexandrium* 属といった有害種の生物量は，堆積物の表層付近でシスト数が減少していることから，現在漸減傾向にあることが示唆される（一見ら，2005)[15](Fig. 3）．

これらの事実は，環境保全が喫緊の問題となった1970年代後半以降の積極的な窒素，リンの排出規制が功を奏し海域への陸域からの負荷が減少したことの，海洋生物の直接的な応答と言うことができる．

4. 全リン・全窒素は何を表現しているのか？

現在，太平洋起源のリン・窒素を評価するのに使われているのは，全リン，全窒素という概念である．これは海水中に溶けているものや粒子状のものを区別せず，一定量の未濾過海水を分解してすべてを同じ化学形態にしてから分析定量している．全リンや全窒素濃度が同じだとしても，生物生産に関与できるか，無関係の化学形態のものなのかが，表記の議論の重要な条件となる．外洋域からの窒素，リンの負荷（流入）が粒子態や溶存有機態のものであれば，内湾域の富栄養化，生物生産の増大には直接的に結びつかない．外洋起源と言われる窒素やリンが，瀬戸内海の生物生産にどのように寄与しているかについての答えを得ることは，今後の環境行政を考える上でも，沿岸域の生物生産構造を理解する上でも極めて重要である．今後は，溶存無機態の窒素やリンがどのようなタイミングでどこからどれだけ流入しているのかについて，詳細に明らかにする必要がある．

参 考 文 献

1) Nixon, S. W. (1995) : Coastal marine eutrophication : a definition, social causes, and future concerns. Ophelia, **41**, 199-219.
2) Moreau, S. et al. (1998) : Seasonal and spatial trends of nitorgen and phosphorus loads to the upper catchment of the river Vilaine (Brittany) : relationships with land use. Hydrobiologia, 373/374, 247-258.
3) 門谷　茂（1996）：瀬戸内海の環境と漁業の関わり，瀬戸内海の生物資源と環境，岡市友利他編，1-40，恒星社厚生閣．
4) 藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本　亘（1997）：外洋から瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量，海岸工学論文集，**44**，1061-1065.
5) 武岡英隆・菊池隆展・速水祐一・榊原哲郎（2002）：瀬戸内海における外洋起源の栄養物質，月刊海洋，**34**，406-411.
6) 石井大輔・柳　哲雄（2004）：瀬戸内海各灘・湾における全リン・全窒素の起源と濃度変動機構，海の研究，**13**，389-401.
7) Yanagi, T. and Ishii, D. (2004) : Open ocean originated phosphorus and nitrogen in the Seto Inland Sea, Japan, J. Oceanogr., **60**, 1001-1005.
8) Whittaker, R. (1975) : Communities and Ecosystems, Macmillan, New York.
9) 門谷　茂・三島康史・岡市友利（1991）：大阪湾の富栄養化の現状と生物によるNとPの循環，沿岸海洋研究ノート，**29**，13-27.
10) Vollenweider, R. A. (1976) : Advances in defining critical loading levels of phosphorus in lake eutrophication. Mem. Ist. Ital. Idrobiol., **33**, 53-83.
11) Kratzer, C. R. and Shelton, J. L. (1998) : Water quality assesment of the San Joaquim-Tulare Basins, California : analysis of availabel data on nutrients and suspended sediment in surface water, 1972-1990. US Geological Survey Professional Paper 1587, US Geological Survey, Reston, VA.
12) Le Pape, O. et al. (1996) : Resistance of a coastal ecosystem to increasing eutrophic conditions : the Bay of Brest (France), a semi-enclosed zone of Western Europe. Cont. Shelf Res., **16**, 1885-1907.
13) Harding, L. W. Jr and Perry, E. S. (1997) : Long-term increase of phytoplankton biomass in Chesapeake Bay, 1950-94. Mar. Ecol. Prog. Ser., **157**, 39-52.
14) Honjo, T. (1993) : Overview on bloom dynamics and physiological ecology of *Heterosigma akasiwo*. In Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea, T. J. Smayda & Y. Shimizu eds.), Elsevier, 33-41.
15) 一見和彦・多田邦尚・門谷　茂（2005）：瀬戸内海の植物プランクトン量の過去と現在，海洋と生物，**27**，214-221.
16) 門谷　茂（2003）：富栄養化と海洋生態系の危機，生物の科学遺伝，**57**，64-69.

NII-Electronic Library Service