

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

① 制御実験系および海域現場観測による海洋生態系へのシリカ減少の影響評価

独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所

生産環境部 環境動態研究室

樽谷賢治・辻野 睦・手塚尚明・岡 慎一郎

平成 14 年度～16 年度合計予算額 20,156 千円

(うち、平成 16 年度予算額 6,564 千円)

[要旨] 世界的な人口増加と消費拡大を背景に窒素やリンの負荷が増大する一方で、大規模ダムの建設等により、ケイ素の負荷量は絶対的、相対的に減少傾向にあることが指摘されている。ケイ素負荷量の減少は、餌料生物として重要な珪藻類の増殖を抑え、卓越群が有害種を数多く含む鞭毛藻類に移行するなど、沿岸・内湾域生態系に多大な影響を及ぼすことが予想される。本報告では、ケイ素負荷量の減少が沿岸・内湾域生態系、特に植物プランクトンを中心とした低次生産機構に及ぼす影響を評価することを目的とし、大阪湾において、周年にわたり、生物態ケイ素(BSi)およびクロロフィル *a* 濃度の分布調査を行った。その結果から、大阪湾では、珪藻類の増殖が栄養塩によって制限を受ける状況はまれで、そのような状況が生じたとしても、ケイ素よりもリンがまず制限因子となるであろうことが示唆された。また、大阪湾におけるケイ素の循環過程の特徴として、湾奥部でケイ素をトラップする機構が働いていること、溶存態ケイ素(DSi)の負荷源として底泥からの溶出が重要な役割を果たしていることなども確認された。一方、リンおよびケイ素の濃度を制御した混合培養実験の結果からは、DSi の負荷量(濃度)が低下すると、珪藻類から鞭毛藻類へ優占種群が遷移するというシリカ欠損仮説の根拠となる理論の正当性が再確認されるとともに、その遷移が 2~3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ の濃度域で起こることを示した。さらに、DSi のみならず、リン酸態リンの負荷量(濃度)が変化しても植物プランクトンの優占種群が変化することを実験的に示し、沿岸・内湾域における植物プランクトンの群集構造を考える上で、単独の栄養塩の負荷量(濃度)に加えて、ケイ素を含めた各栄養塩類間の負荷量(濃度)のバランスを考慮する必要があることを指摘した。

[キーワード] シリカ欠損仮説、珪藻類、鞭毛藻類、溶存態ケイ素、生物態ケイ素

1. はじめに

ケイ素は、海洋における栄養塩元素のひとつであるが、ケイ酸質の殻を持つ珪藻類や一部の鞭毛藻類のみが必要とする点で、窒素やリンとは大きく異なる。また、自然の風化溶出作用によって水域に補給されるため、その負荷量が人為的な影響で増加する可能性は著しく低い。したがって、ダム建設等により停滞水域が増加し、かつ窒素やリンの人為的負荷が強まると、陸水性の珪藻類による DSi の吸収量も増加し、その大部分は陸水域で沈降・堆積する。その結果、DSi の流量が減少し、沿岸域ではケイ素を必要とする珪藻類よりもケイ素を必要としない鞭毛藻類に有利に働くことが予想される(シリカ欠損仮説)^{1),2)}。一般的に、珪藻類は、「海の牧草」と形容されるように、高次の生物の良好な餌料として位置づけられているのに対し、鞭毛藻類は、赤潮形成

種や有毒種の多くを含むことから、珪藻類から鞭毛藻類への優占群の移行は、環境面はもとより、水産上も重要な問題をはらんでいる。

例えば、黒海では、ドナウ河にアイアンゲートダムが建設されたことにより、DSiの負荷量が減少し、鞭毛藻類の発生が増加したことが報告されているなど、特にヨーロッパの河口・沿岸域においては、ケイ素に着目した研究が精力的に行われている¹⁾⁵⁾。一方、ヨーロッパに比べると、日本の河川は短く、流れも速いことから滞留の度合いが少なく、また、DSiの溶出が大きい火成岩や火山性土壌から成ることもあって、「シリカ欠損」が沿岸生態系に深刻な影響を及ぼす可能性は小さいと予想されてきた。したがって、窒素やリンに比べ、研究事例そのものが少ないと言わざるを得ない。その反面、高度経済成長に伴い水系が改変され、窒素やリン負荷量が増大するなど、「シリカ欠損」をもたらす要因が揃っているのも事実である。

2. 研究目的

上記の背景を踏まえたうえで、本課題では、リンおよび窒素負荷量の増加に伴うケイ素負荷量の絶対的・相対的減少が沿岸・内湾域における生態系、特に植物プランクトンを中心とした低次生産機構に及ぼす影響を評価することを目的とする。

具体的には、①大阪湾におけるケイ素の分布と循環過程の把握と②栄養塩の負荷量と植物プランクトンの群集動態の関係把握を柱とし、それぞれ調査船を用いた現場観測・現場実験および人為的に制御した室内培養実験によって取り組む。琵琶湖から淀川を経由し、大阪湾（瀬戸内海）に至る水系は、陸域に琵琶湖という滞留時間の長い停滞水域が存在し、かつ集水域に窒素やリンの負荷源となる大都市を含むことから、本邦において「シリカ欠損仮説」を検証するうえで、最適な水系であると考えられる。

3. 研究方法

(1) 大阪湾におけるケイ素の分布と循環過程

大阪湾は瀬戸内海の最東部に位置し（図1）、その海域面積は約1,450 km²、平均水深は約30 mである。南西部は友ヶ島水道、北西部は明石海峡によって、それぞれ紀伊水道および播磨灘と接しており、活発な海水交換が行われている。また、湾奥部には淀川、大和川、木津川などから多量の河川水が流入しているため、周年を通して密度成層が形成されている。

観測調査は、2003年4月、7月、10月および2004年1月に、大阪湾奥部から紀伊水道にかけて設けた7定点（図1）において実施した。なお、本報告では、定点1～3の属する海域を湾奥部、定点4～6の属する海域を湾中部、定点7の属する海域を湾口部と定義することとする（図1参照）。各定点において、水温・塩分の鉛直分布を測定するとともに（アレック電子製 CHLOROTEC ACL220-PDK）、水深0、2、5、10 m および底泥上1 m 層から海水試料を採取した。試水は船上で速やかに濾過し、栄養塩（アンモニア態窒素 NH₄-N、亜硝酸態窒素 NO₂-N、硝酸態窒素 NO₃-N、リン酸態リン PO₄-P および溶存態ケイ素 Si(OH)₄）、生物態ケイ素 BSi および Chl. *a* 濃度の分析に供した。また、試水の一部を0.5%グルタルアルデヒド（終濃度）で固定し、植物プランクトンの同定・計数に供した。

定点1、3、5 および7においては、KK式柱状採泥器を用いて底泥コアを採取した。採取した底泥試料は、直上水とともに現場水温、暗条件下で12時間培養した。その間、直上水を2～6時間

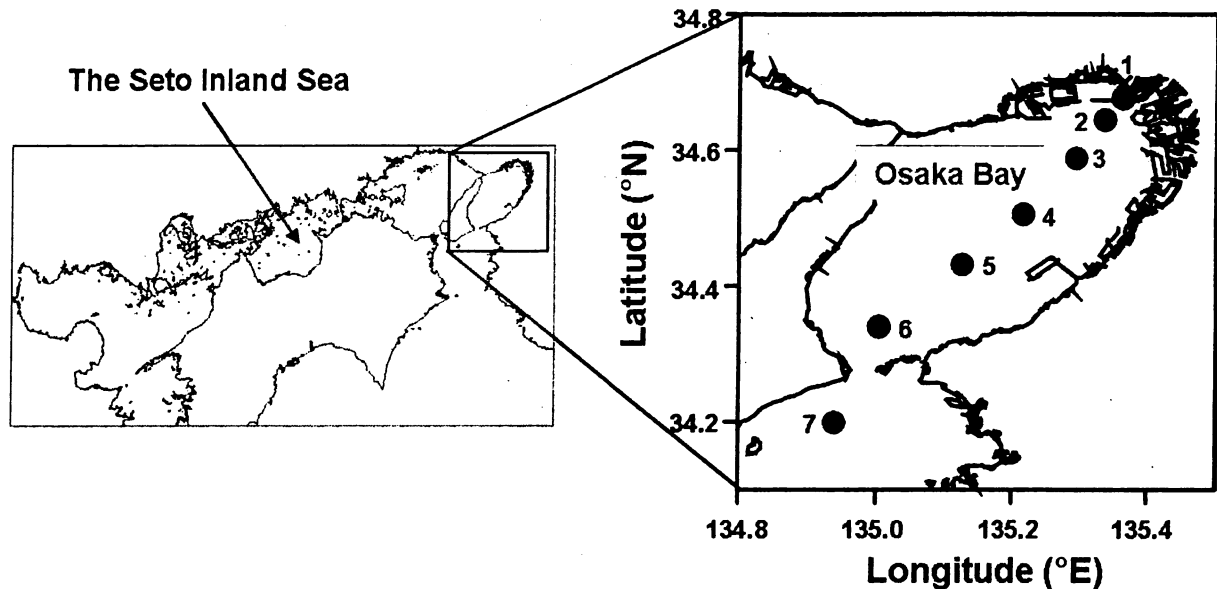


図1 大阪湾における観測地点。

間隔で採取し、DSi 濃度を測定することによって、底泥からの DSi の溶出速度を見積もった。

栄養塩濃度の分析は、TRAACS2000 Auto Analyzer (Bran Lubbe) を用いて比色法により行った。一方、BSi 濃度は、DeMaster⁶⁾の方法に基づき、アルカリ分解 (0.2 N NaOH、85°C) - 比色法によって分析した。また、Chl. *a* 濃度は、ジメチルフォルムアミドで抽出後、蛍光法⁷⁾により測定した。

(2) リンおよびケイ素に対する植物プランクトン群集の増殖応答

① バッチ培養実験

実験には、ともに広島湾から分離した珪藻 *Thalassiosira rotula* およびラフィド藻 *Heterosigma akashiwo* の無菌株を用いた。各培養株を、リン ($\text{NO}_3\text{-N}$ 200 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 、DSi 100 $\mu\text{mol L}^{-1}$) もしくはケイ素 ($\text{NO}_3\text{-N}$ 200 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 10 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 、DSi 15 $\mu\text{mol L}^{-1}$) を増殖制限因子とした L1⁸⁾培地に炭素バイオマスがほぼ等しくなるよう接種し、温度 20±1°C、光強度 100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明暗周期 12 hL: 12 hD の条件下でバッチ培養を行った。接種後、約 12 時間間隔で試料を採取し、細胞数の計数ならびに栄養塩の分析に供した。

② 半連続培養実験

実験には、上記の *T. rotula* および *H. akashiwo* に加えて、珪藻 *Chaetoceros dydimum* およびハプト藻 *Isocrysis galbana* の無菌株を用いた。実験は、希釈率を 0.25 d^{-1} とした半連続培養系で 15 日間にわたり行った。具体的には、 $\text{PO}_4\text{-P}$ および DSi 濃度を調整した L1 培地 240 ml に、栄養塩充分条件下で前培養した各培養株をほぼ炭素バイオマスが等しくなるように接種し、翌日より毎日定時に培養液 60 ml を抜き取り、これと同量の L1 培地を添加した。抜き取った培養液中の各株の細胞密度を連日計数するとともに、環境水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ および DSi 濃度を測定した。リンとケイ素の負荷量については、添加する L1 培地中の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度を 2 もしくは 5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 、DSi 濃度を 5、10、20、50 および 100 $\mu\text{mol L}^{-1}$ に調整することによって、計 10 通りの組み合わせ ($\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度はいずれの

場合も $200 \mu\text{mol L}^{-1}$) を設けた。

4. 結果・考察

(1) 大阪湾におけるケイ素の分布と循環過程

① 大阪湾におけるケイ素の分布と季節変動

淀川河口に近い湾奥部の定点においては、季節により強弱はみられるものの周年にわたり、水深 $2\sim 5\text{ m}$ 層に密度躍層が形成され、特に夏季には湾中央部にまで、その分布域が拡大していた。Chl.a 濃度の分布は、周年にわたり、湾奥部表層で高く、湾中央部で急激に減少する傾向を示し、冬季の定点1表層で最大値 (42 mg m^{-3}) を記録した。植物プランクトンの組成をみると、いずれの定点においても珪藻類が優占しており、その大部分を占めていたのは *Skeletonema costatum* および *Thalassiosira* spp.であった。

観測期間中の DSi 濃度は $0.5\sim 52 \mu\text{mol L}^{-1}$ の範囲にあり、春季から秋季においては、低塩分水塊が存在した湾奥部表層で高く、湾中央部以南で減少する傾向にあった (図2)。また、夏季には、湾

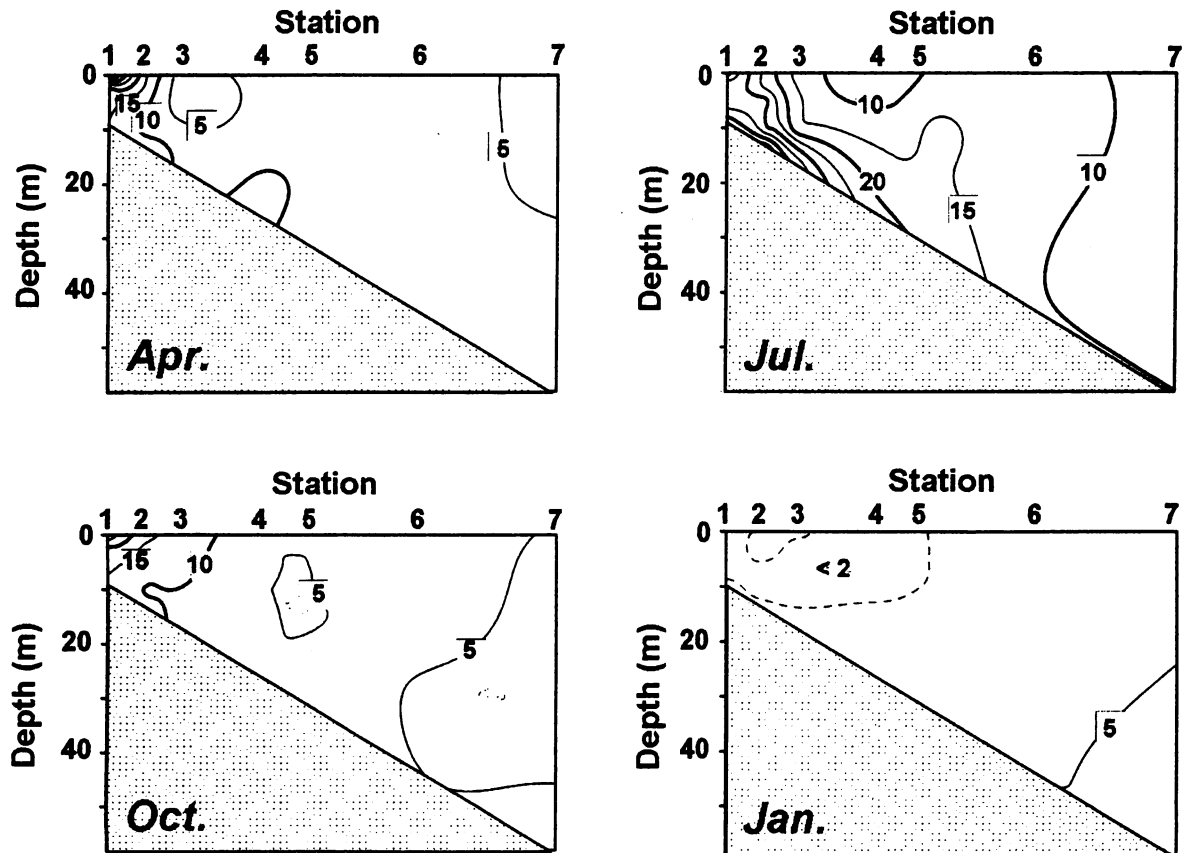


図2 春季(4月)、夏季(7月)、秋季(10月)および冬季(1月)の大阪湾における溶存態ケイ素濃度(単位は $\mu\text{mol L}^{-1}$)の分布。

奥部表層に加えて、全定点の底層においても高濃度の分布域が認められた。一方、冬季の湾奥～

湾中央部においては、植物プランクトン現存量の増加に伴い、表～中層でDSi濃度の著しい低下 ($< 2 \mu\text{mol L}^{-1}$) が見られた。

BSi濃度は、周年を通して、湾奥部で高く湾中央部で減少する傾向にあり、特に $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 濃度が極めて低濃度であった冬季の湾奥部表層においては $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ を超える高濃度で存在した(図3)。また、Chl. *a*濃度との間には有意な正の相関が認められ($N=133, R^2=0.70$)、全データに最小自乗法を適用して得られた直線の傾きは0.33であった(図4)。この値は、過去の報告(C/Chl. *a*重量比=30⁹、Si/Cモル比=0.13¹⁰)をもとに算出した珪藻類のSi/Chl. *a*比(=0.32)と極めてよく一致しており、全調査時とも珪藻類が植物プランクトン群集の大部分を占めていたことと矛盾しない。

珪藻類が良好な増殖を確保するためには、栄養塩類が下限となる濃度以上で存在し、かつそれらの組成比がある一定の値以上であることが望ましい。そこで、本観測期間中に得られた各栄養塩類の濃度をこれまでに報告されている下限濃度(N: $1 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、P: $0.1 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、Si: $2 \mu\text{mol L}^{-1}$)¹¹ および組成比(N:P:Si = 16:1:16)¹⁰と比較することにより、珪藻類の増殖が栄養塩による制限

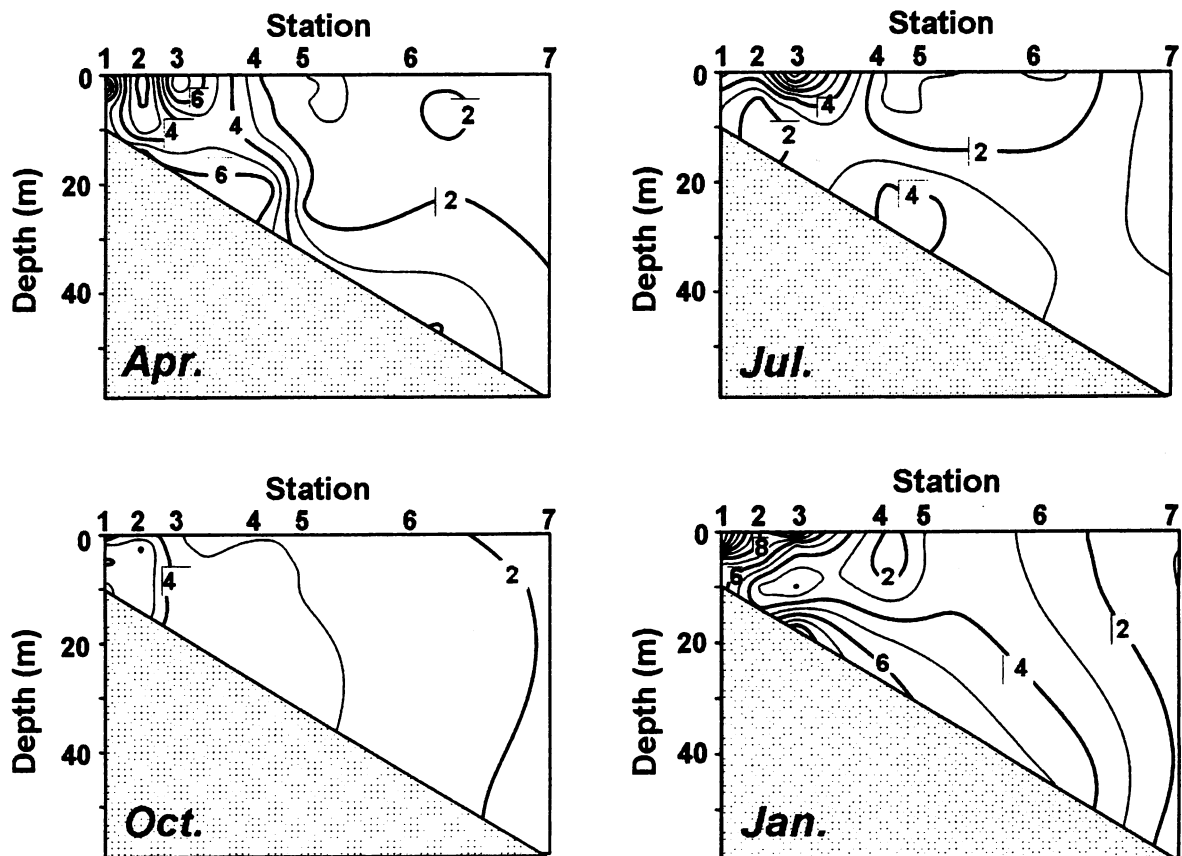


図3 春季(4月)、夏季(7月)、秋季(10月)および冬季(1月)の大阪湾における生物態ケイ素濃度(単位は $\mu\text{mol L}^{-1}$)の分布。

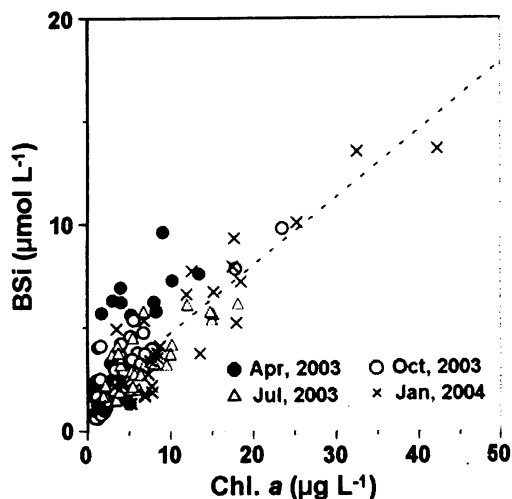


図4 大阪湾における Chl. *a* 濃度と生物態ケイ素 (BSi) 濃度との関係。破線は全データにあてはめた最小自乗直線 ($[BSi] = 0.33 [Chl. a] + 1.54$) を示す。

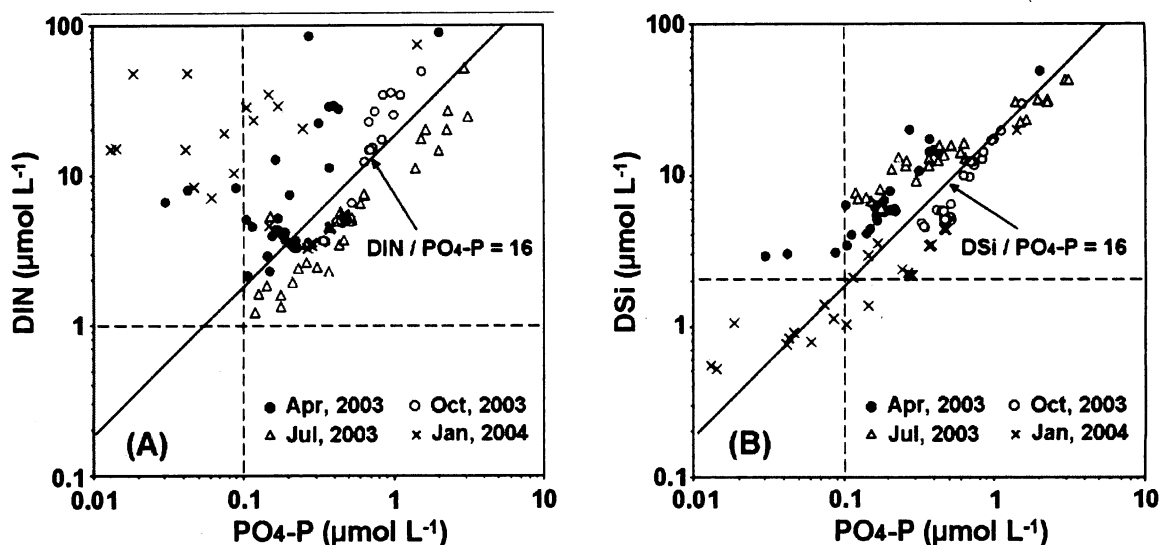


図5 2003年4月～2004年1月の大阪湾(水深10 m以浅)における(A)溶存態無機窒素(DIN)とリン酸態リン($PO_4\text{-P}$)および(B)溶存態ケイ素(DSi)と $PO_4\text{-P}$ 濃度との関係。破線は各栄養塩が珪藻類の増殖を維持するための下限となる濃度、実線は栄養塩充分条件下における組成比を示す。

を受けている可能性について検討した(図5)。その結果、冬季を除くと、各栄養塩はおおむね高濃度で存在していたことから、大阪湾、特に湾奥部において、珪藻類の増殖が栄養塩によって制限を受ける状況はまれで、そのような状況が生じたとしても、ケイ素よりもリンがまず制限因子となるであろうことが示唆された。しかしながら、冬季の事例のように、珪藻類の大増殖時にはDSiがきわめて低濃度にまで減少する場合もあることから、高頻度の時系列データ等、さらなるデータの蓄積が必要である。

② 大阪湾におけるケイ素の循環過程

大阪湾におけるケイ素の循環過程を明らかにするため、珪藻類による DSi の吸収速度 (BSi 生産速度) を同調査時に 4 定点 (定点 1、3、5 および 7) で測定した基礎生産速度から、基礎生産に占める珪藻類の寄与を 100% と仮定し、Si/C 比 0.13¹⁰⁾ を乗することによって推定した。DSi 吸収速度は、概ね湾奥部で高く、湾中部で減少する傾向にあった (表 1)。また、季節的には夏季 (7 月) に高く、特に淀川河口域では 100 mmol Si m⁻² d⁻¹ を超える高い値を記録した。

これまでに得られた DSi および BSi 現存量、DSi 吸収速度と底泥からの DSi 溶出速度をもとに、大阪湾奥部におけるケイ素の循環過程を図 6 にとりまとめた。ここで、淀川からの DSi 負荷量は、サブテーマ (2) -③ で作成されたタンクモデルにより推定値である。春季 (4 月) には、淀川から流入した DSi の 42% が湾奥部において珪藻類に吸収されているものと見積もられた。一方、夏季 (7 月) ~ 冬季 (1 月) の湾奥部においては、いずれの場合も淀川からの流入量を上回る速度で DSi が珪藻類により吸収されているものと推定された。また、夏季および秋季の湾奥部底泥からの DSi 溶出速度は、それぞれ 4.4×10⁶ および 2.6×10⁶ mol Si d⁻¹ と見積もられ、いずれも淀川から流入する DSi 量の 50% 以上に相当した。

表1 大阪湾に設けた各定点における生物態ケイ素の生産速度 (溶存態ケイ素の吸収速度) および底泥からの溶存態ケイ素の溶出速度。ND は、操作上のミスによりデータが得られなかったことを示す。

Month	Station	BSi production rate (mmol Si m ⁻² d ⁻¹)	DSi release rate (mmol Si m ⁻² d ⁻¹)
Apr 2002	1	8.3	ND
	3	6.5	ND
	5	4.0	ND
	7	2.9	ND
Jul 2002	1	115	11.9
	3	36.7	16.2
	5	8.7	8.6
	7	45.4	3.3
Oct 2002	1	25.2	5.2
	3	9.7	11.8
	5	10.4	4.9
	7	17.1	5.2
Jan 2003	1	17.5	ND
	3	3.6	1.6
	5	9.3	4.3
	7	2.3	2.9

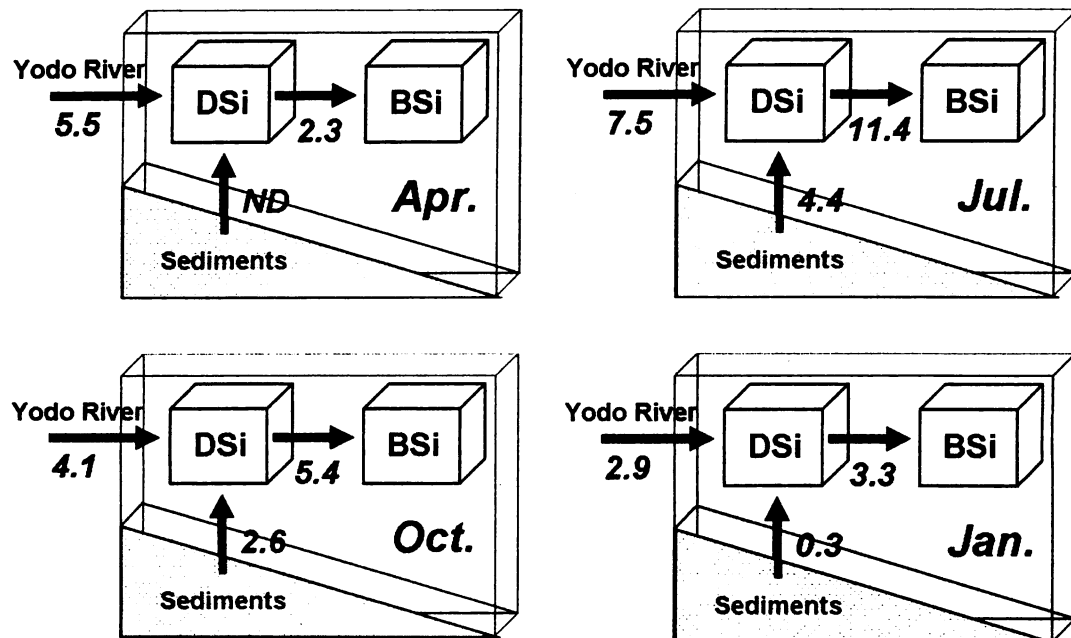


図6 2003年4月～2004年1月の大阪湾湾奥部におけるケイ素の循環過程の模式図。矢印は、それぞれ淀川からの溶存態ケイ素の流入速度、生物態ケイ素の生産速度および底泥からの溶存態ケイ素の溶出速度を示しており、単位は mol Si d⁻¹である。

以上の結果から、淀川から流入した DSi の大部分は、湾奥部表層において珪藻類に吸収され、BSi に形態を変えているであろうことが明らかとなった。その結果、隣接する湾中央部には DSi が比較的低濃度である海水が流入しているものと推定されることから、大阪湾の湾奥部において、ケイ素をトラップする機構が働いていることが示唆される。また、特に夏季～秋季の湾奥部では、底泥中からの溶出が DSi の負荷源として機能していることが明らかとなり、大阪湾におけるケイ素の循環を考える上で重要な役割を果たしているものと考えられる。

(2) リンおよびケイ素に対する植物プランクトン群集の増殖応答

① リンおよびケイ素を増殖制限因子としたバッチ培養における珪藻および鞭毛藻の増殖応答

リン制限条件下における *Thalassiosira rotula* および *Heterosigma akashiwo* の対数増殖期の比増殖速度は、それぞれ 0.058 および 0.035 d⁻¹ と見積もられた (図 7 A、B)。このことを反映して、両種の混合培養における培養初期の細胞密度は、*T. rotula* の方が高く推移した (図 7 C)。しかしながら、*T. rotula* が完全に優占する結果とはならず、逆に環境水中の PO₄-P 濃度が低下すると、*H.*

akashiwo の細胞密度が *T. rotula* を上回った。

ケイ素制限条件下における混合培養においても、培養初期の細胞密度は、*T. rotula* が *H. akashiwo* を上回ったが、環境水中の DSi 濃度が $2 \mu\text{mol L}^{-1}$ 以下に低下すると、*T. rotula* の増殖はほぼ停止し、栄養塩による増殖制限を受けていない *H. akashiwo* の細胞密度が急増した (図 7 D)。

以上の結果から、珪藻類が増殖するために必要とするケイ素要求量には閾値が存在し、環境水中の DSi 濃度が約 $2 \mu\text{mol L}^{-1}$ 以下に低下すると増殖できないことが示唆された。珪藻類のケイ素要求に関して閾値が存在するであろうことは、これまでも報告されており^{12), 13)}、今回得られた値は、Egge & Aksnes¹³⁾がメソコスム実験の結果から報告した値とほぼ一致している。また、リン制限条件下における培養実験結果は、ケイ素のみならず、リン負荷量の減少によっても珪藻類の

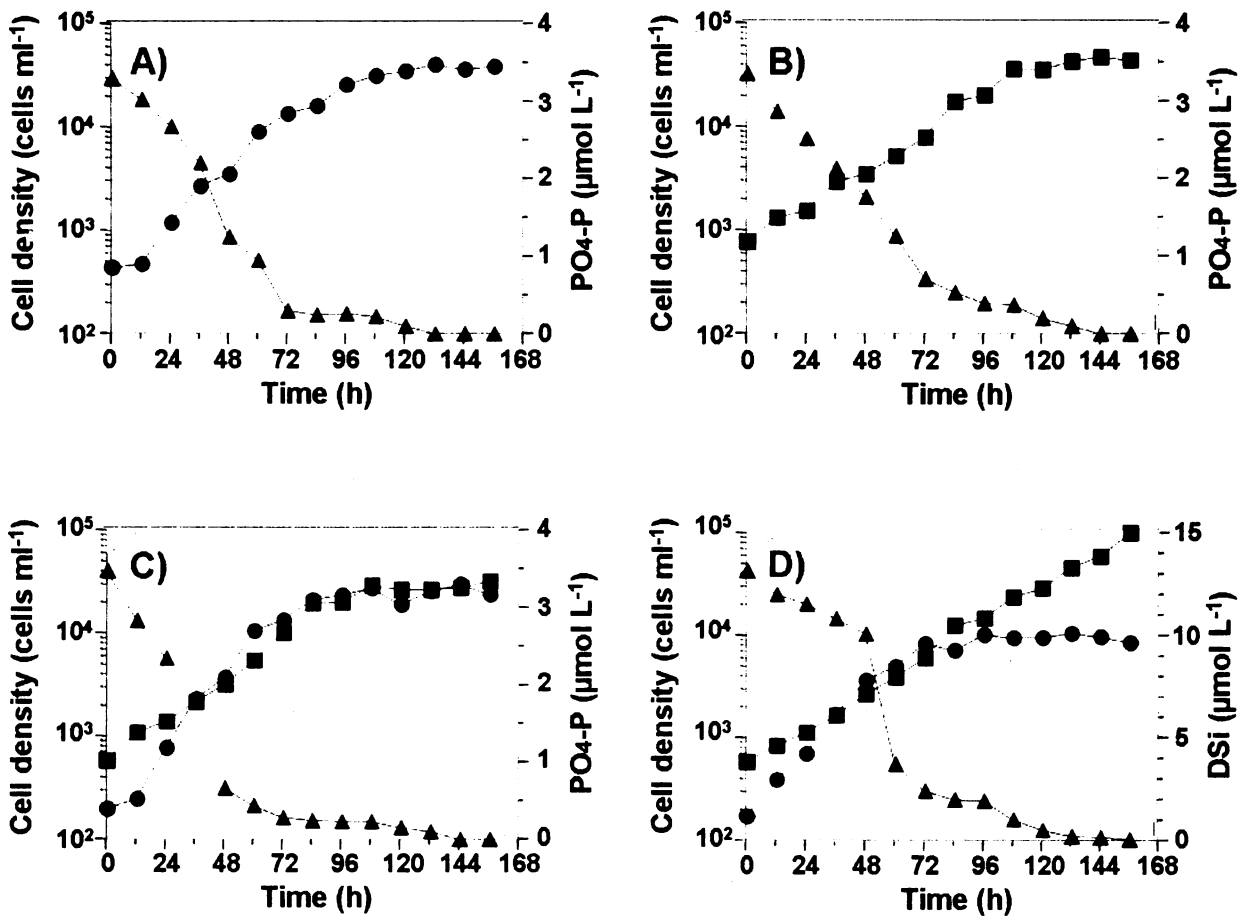


図7 リンおよびケイ素制限条件下における *Thalassiosira rotula* (●) および *Heterosigma akashiwo* (■) の細胞密度とリン酸態リンおよび溶存態ケイ素濃度 (ともに▲) の経時変化。リン制限条件下における A) *T. rotula* の単種培養、B) *H. akashiwo* の単種培養、C) 混合培養、D) ケイ素制限条件下における混合培養。

増殖が抑えられ、鞭毛藻類に有利に働く可能性を示唆するものである。同様の仮説は、現場植物

プランクトン群集を用いたメソコスム実験の結果からも提唱されているところである¹⁴⁾。近年、大河川が流入する内湾・沿岸域における植物プランクトンの増殖・生産がリンによって制限されている可能性が世界各地で指摘されている。したがって、植物プランクトンを中心とした低次生態系に対する河川等陸域負荷の影響を評価するためには、ケイ素とリンおよびこれら両者の相互作用の影響を考慮する必要があるものと考えられる。

② リンおよびケイ素を増殖制限因子とした半連続培養における珪藻および鞭毛藻の増殖応答

PO₄-PおよびDSi濃度を10通りの組み合わせで負荷した時の培養15日後における4種の植物プランクトン(珪藻 *Thalassiosira rotula*、*Chaetoceros dydimum*、ラフィド藻 *Heterosigma akashiwo* およびハプト藻 *Isochrysis galbana*) の種構成比をとりまとめ、図8に示した。PO₄-PおよびDSiの負

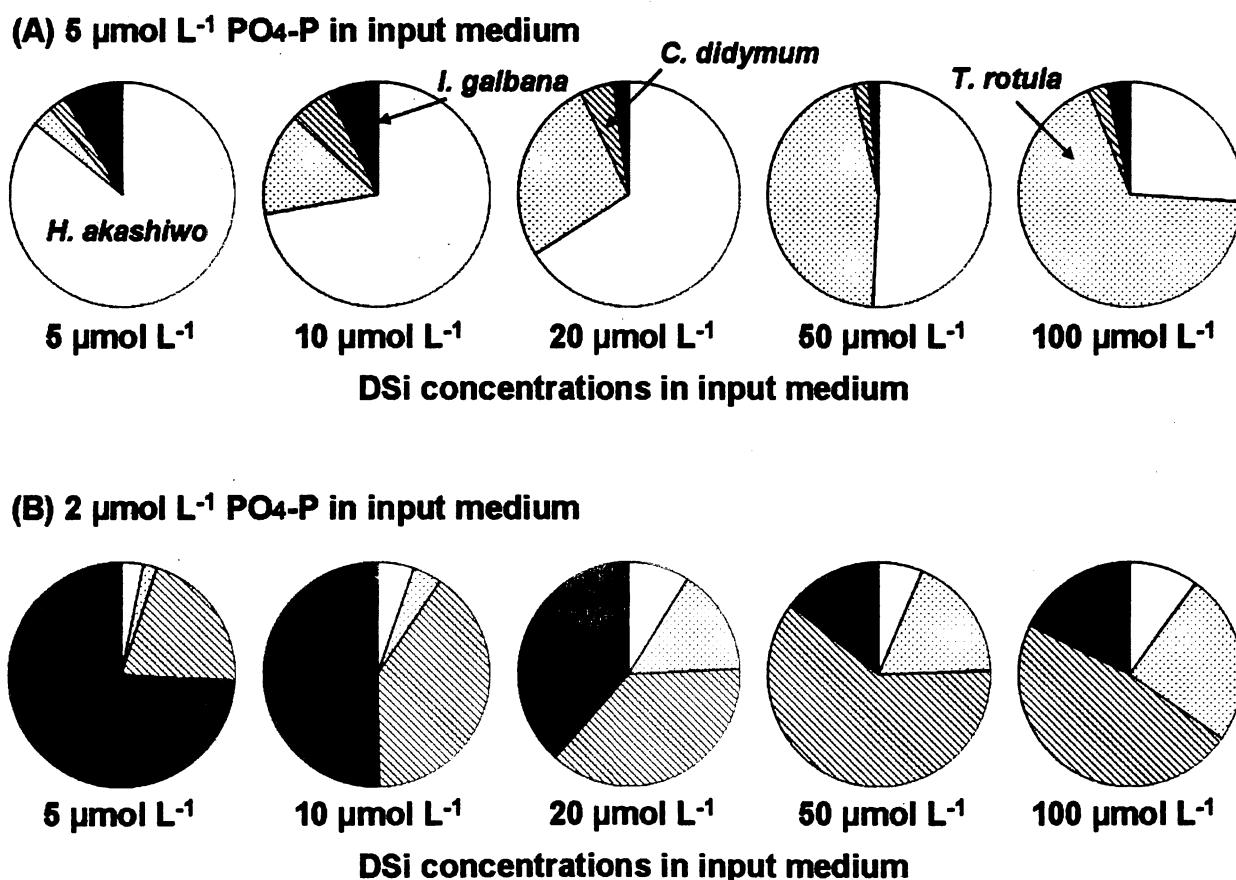


図8 異なるリン酸態リンおよび溶存態ケイ素負荷条件下における培養15日目の各植物プランクトンの種構成比。(A)添加培地中のリン酸態リン濃度が5・mol L⁻¹の場合、(B)添加培地中のリン酸態リン濃度が2・mol L⁻¹の場合。

荷量がともに大きい場合には、珪藻類の *T. rotula* が優占した(図8A)。DSi 負荷量の減少に伴い、

H. akashiwo の占める割合が増加し、添加培地中の DSi 濃度が $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ (添加前の培養液中の DSi 濃度は検出限界以下で希釈率が 0.25 d^{-1} であることから、添加時の培養液中の DSi 濃度は $2.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ となる) 以下になると、*H. akashiwo* が *T. rotula* を凌駕した。

一方、DSi の負荷量が多い場合においても、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の負荷量が低下すると *T. rotula* に替わって *C. dydimum* が優占することが確認された (図 8 B)。また、DSi および $\text{PO}_4\text{-P}$ 負荷量がともに小さい場合には、小型の鞭毛藻である *I. galbana* が優占した。

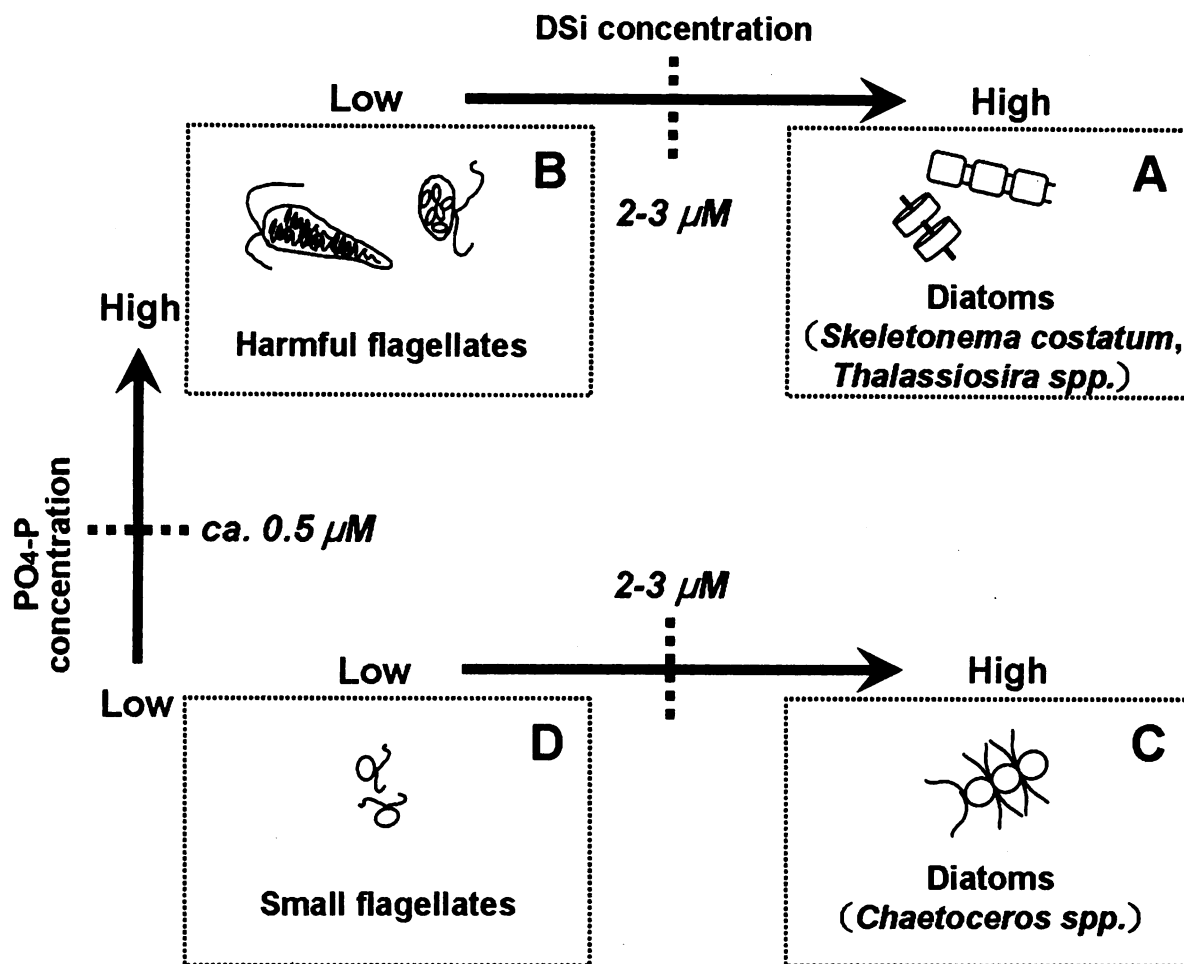


図9 リンおよびケイ素の濃度と植物プランクトンの優占種群との関係を示す模式図。

以上の結果をもとに、 $\text{PO}_4\text{-P}$ および DSi 濃度と植物プランクトンの優占種群との関係を模式的にとりまとめた (図 9)。ここでは、 $\text{PO}_4\text{-P}$ および DSi 濃度の境界をそれぞれ約 $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ および $2 \sim 3 \mu\text{mol L}^{-1}$ に設定することによって 4 つの濃度領域に区分し、それぞれの濃度領域に対応する植物プランクトンの優占種群を以下の通りに示した。

- ① 領域 A ($\text{PO}_4\text{-P} > 0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、 $\text{DSi} > 2-3 \mu\text{mol L}^{-1}$)
高い増殖ポテンシャルを持つ珪藻類 (例えば、*Skeletonema costatum*、*Thalassiosira* spp.)
- ② 領域 B ($\text{PO}_4\text{-P} > 0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、 $\text{DSi} < 2-3 \mu\text{mol L}^{-1}$)
有害赤潮を引き起こす鞭毛藻類 (例えば、*Chattonella* spp.、*Heterosigma akashiwo* など)

- ③ 領域 C ($\text{PO}_4\text{-P} < 0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、 $\text{DSi} > 2\text{-}3 \mu\text{mol L}^{-1}$)
比較的栄養塩による増殖制限に強い珪藻類 (例えば、*Chaetoceros* spp. など)
- ④ 領域 D ($\text{PO}_4\text{-P} < 0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 、 $\text{DSi} < 2\text{-}3 \mu\text{mol L}^{-1}$)
小型の鞭毛藻類

本研究の対象海域である大阪湾で観測された $\text{PO}_4\text{-P}$ および DSi 濃度をこの模式図にあてはめると、ほぼ周年にわたり、領域 A に属する結果となる。実際、大阪湾、特に湾奥部では周年にわたり *S. costatum* や *Thalassiosira* spp. 等の珪藻類が優占しており、現場海域における観測結果とも矛盾していない。

ここで提示した模式図は、わずか 4 種の植物プランクトン培養株を用いて得られた実験結果を沿岸・内湾域の植物プランクトン群集の種組成、種遷移に拡大解釈したものであり、すべての事象を網羅するものではない。しかしながら、沿岸・内湾域における植物プランクトンの群集構造に及ぼす栄養塩類の影響を評価する上で 2 つの重要な概念を含んでいる。ひとつは、 DSi の負荷量 (濃度) が低下すると、珪藻類から鞭毛藻類へ優占種群が遷移するというシリカ欠損仮説の根拠となる理論の正当性を再確認するとともに、その遷移が $2\sim 3 \mu\text{mol L}^{-1}$ の濃度域で起こることを示した点である。さらに、 DSi のみならず、リン酸態リンの負荷量 (濃度) が変化しても植物プランクトンの優占種群が変化することも提示した。以上のことから、沿岸・内湾域における植物プランクトンの群集構造には栄養塩の総負荷量のみならず、各栄養塩のバランスも重要な役割を果たしており、ケイ素を含めた栄養塩類の相互作用を十分に考慮する必要があるものと結論づけられる。

5. 本研究により得られた成果

- 1) 大阪湾、特に湾奥部においては、珪藻類の増殖が栄養塩によって制限を受ける状況はまれで、そのような状況が生じたとしても、ケイ素よりもリンがまず増殖制限因子となるであろうことが示唆された。
- 2) 大阪湾におけるケイ素の分布と循環過程の特徴として、淀川から流入した DSi の大部分は、湾奥部表層で珪藻類に吸収されて BSi に形態を変えており、結果としてケイ素のトラップ機構が機能していること、特に夏季から秋季においては、底泥からの溶出がシリカの負荷源として重要な役割を果たしていることが明らかとなった。
- 3) リンおよびケイ素制限条件下で、珪藻 *Thalassiosira rotula* および鞭毛藻 *Heterosigma akashiwo* の単種ならびに混合培養実験を行ったところ、珪藻類が増殖するために必要とするケイ素要求量には閾値 ($2\sim 3 \mu\text{mol L}^{-1}$) が存在することが確認された。
- 4) リン酸態リンおよび DSi 濃度を複数段階に制御した混合培養実験 (珪藻 *Chaetoceros dydimum*、*T. rotula* および鞭毛藻 *H. akashiwo*、*Isocrysis galbana*) の結果から、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が高濃度で存在する条件下において、 DSi が充分量存在する場合には *T. rotula* が優占するが、その濃度が $2\sim 3 \mu\text{mol L}^{-1}$ 以下に低下すると優占種が *H. akashiwo* に移行すること、一方、一方、 DSi は高濃度で $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が約 $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 以下にまで減少すると *Chaetoceros* spp. 等が優占し、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 DSi がともに低濃度である場合には *I. galbana* が優占することが確認された。
- 5) 上記の結果をもとに、植物プランクトン群集を 4 つのグループに分け、リンおよびケイ素の

濃度と植物プランクトンの優占種群との関係を模式図（概念モデル）の形で表現した。

6. 引用文献

- 1) Humborg, C., Ittekkot, V. and Bodungen, B. (1997) Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature* **386**, 385-388.
- 2) Ittekkot, V., Humborg, C. and Schäfer, P. (2000) Hydrological alterations and marine biogeochemistry: a silicate issue? *BioScience* **50**, 776-782.
- 3) Ragueneau, O., De Blas Varela, E., Tréguer, P., Quéguiner, B. and Del Amo, Y. (1994) Phytoplankton dynamics in relation to the biogeochemical cycle of silicon in a coastal ecosystem of western Europe. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **106**, 157-172.
- 4) Del Amo, Y., Quéguiner, B., Tréguer, P., Breton, H. and Lampert L. (1997) Impacts of high-nitrate freshwater inputs on macrotidal ecosystems. II. Specific role of the silicic acid pump in the year-round dominance of diatoms in the Bay of Brest (France). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **161**, 225-237.
- 5) Ragueneau, O., Chauvaud, L., Leynaert, A., Thouzaud, G., Paulet, Y-M., Bonnet, S., Lorrain, A., Grall, J., Corvaisier, R., Le Hir, M., Jean, F. and Clavier, J. (2002) Direct evidence of a biologically active coastal silicate pump: ecological implications. *Limnol. Oceanogr.* **47**, 1849-1854.
- 6) DeMaster, D. J. (1981) The supply and accumulation of silica in the marine environment. *Geochim. Cosmochim. Acta* **45**, 1715-1732.
- 7) Suzuki, R. and Ishimaru, T. (1990) An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N,N-Dimethyl-formamide. *J. Oceanogr. Soc. Japan* **46**, 190-194.
- 8) Guillard, R. R. L. (1995) Culture methods, in Hallegraeff, G. M., Anderson, D. M. and Cembella, A. D., (eds.) *Manual on Harmful Marine Microalgae*, pp. 45-62, IOC of UNESCO.
- 9) Parsons, T. R., Stephens, K. and Strickland, J. D. H. (1961) On the chemical composition of eleven species of marine phytoplankters. *J. Fish. Res. Bd. Can.* **19**, 1001-1016.
- 10) Brzezinski, M. A. (1985) The Si:C:N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables. *J. Phycol.* **21**, 347-357.
- 11) Justić, D., Rabalais, N. N., Turner, R. E. and Dortch, Q. (1995) Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **40**, 339-356.
- 12) Paasche, E. (1973) Silicon and the ecology of marine plankton diatoms. II. Silicate-uptake kinetics in five diatom species. *Mar. Biol.* **19**, 262-269.
- 13) Egge, J. K. and Aksnes, D. L. (1992) Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **83**, 281-289.
- 14) Egge, J. K. (1998) Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations? *J. Mar. Syst.* **16**, 191-198.

7. 国際共同研究等の状況

なし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<学術誌（査読あり）>

なし

<その他誌上発表（査読なし）>

- ① 樽谷賢治, 井関和夫: 瀬戸内海, 36, 12-17 (2003)
「瀬戸内海における漁業環境の現状と課題」
- ② 樽谷賢治, 井関和夫: 水産海洋研究, 68, 171-172 (2004)
「沿岸海域の富栄養化の問題点と新たなアプローチ」
- ③ 平成 15 年度水産総合研究センター、宇宙航空研究開発機構共同研究発表会成果報告書「衛星観測システムの海洋生態系研究及び水産業の利用のための基盤技術に関する共同研究」, 18-22 (2004)
「2003 年春季および夏季の大阪湾におけるクロロフィル濃度と基礎生産量の分布（樽谷賢治, 手塚尚明, 新村陽子, 花村幸生）」
- ④ 平成 16 年度水産総合研究センター、宇宙航空研究開発機構共同研究発表会成果報告書「衛星観測システムの海洋生態系研究及び水産業の利用のための基盤技術に関する共同研究」, 23-26 (2005)
「大阪湾における基礎生産量の季節変動（樽谷賢治）」

(2) 口頭発表

- ① Yamamoto, T., Hatta, G., Tarutani, K. and Matsuda, O.: EMECS2003, Bangkok, Thailand (2003)
“Proposal of controlling estuarine ecosystem by regulations of discharging water from dams”
- ② 樽谷賢治, 井関和夫: 水産海洋地域研究集会第 6 回広島湾研究集会 (2003)
「沿岸海域の富栄養化の問題点と新たなアプローチ」
- ③ 樽谷賢治, 手塚尚明, 花村幸生: 2004 年度日本海洋学会春季大会シンポジウム (2004)
「培養実験と海域観測によるシリカ減少の影響評価」
- ④ 樽谷賢治, 手塚尚明, 新村陽子, 花村幸生: 2005 年度日本海洋学会春季大会 (2005)
「大阪湾におけるケイ素の分布とトラップ機構」
- ⑤ 樽谷賢治, 新村陽子, 手塚尚明, 花村陽子: 平成 17 年度日本水産学会大会 (2005)
「燧灘における動植物プランクトンの生産量と転送効率」

(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

本研究の成果は、沿岸・内湾域、特に瀬戸内海の水産業に対する適正な栄養塩レベルを決定するなど環境政策および漁場保全政策上で極めて重要な知見となる。これまでに「広島市かき養殖

連絡協議会」主催の研修会において、かき養殖業者を対象に、本研究成果の一部を紹介した。今後も学会活動や漁業者等を対象とした研修会等を通じ、成果の広報・普及に努める。