

河川水の流入が的矢湾の植物プランクトン現存量に及ぼす影響

今井 直¹, 谷村 篤¹, 太原英生², 河村章人¹

Influence of River Discharge to the Phytoplankton Biomass in Matoya Bay, Central Japan

Tadashi IMAI¹, Atsushi TANIMURA¹, Hideo TAHARA² and Akito KAWAMURA¹

To clarify the influence of river discharge on the phytoplankton biomass in Matoya Bay, physicochemical parameters, i.e. salinity, water temperature, dissolved oxygen content, transparency and concentrations of $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$ and chlorophyll *a* were investigated from July 1996 to September 1997 in the bay and in main inflow rivers. In Matoya Bay, the phytoplankton biomass based on chlorophyll *a* increased in summer and autumn. $\text{NO}_3\text{-N}$ was mainly supplied from the inflow rivers and the concentration increased in summer and autumn in the bay. On the other hand, $\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$ were mainly supplied through regeneration from the bottom at the interior bay, and the active regeneration of $\text{PO}_4\text{-P}$ occurred in summer and autumn. The main source of $\text{SiO}_2\text{-Si}$ in the bay was the inflow rivers, but it also influenced by regeneration from the bottom at the interior bay in summer and autumn. Redfield ratio and half saturation constants were indicated that phytoplankton biomass in the bay was usually limited by nitrogen, and occasionally, by phosphorus when river flow was higher in summer and autumn. Therefore, it was suggested that loading nitrogen from the inflow rivers and active regeneration of $\text{PO}_4\text{-P}$ from the bottom at the interior bay triggered the increase of phytoplankton biomass in summer and autumn in Matoya Bay.

Key words: Matoya Bay, phytoplankton biomass, nutrients, inflow rivers, regeneration

はじめに

近年、漁業者の間では内湾域の環境保全や漁業生産に対する森林や河川などの陸上環境の重要性が注目されている(今井ほか, 1998)。特に、河川は陸上で発生した多量の栄養塩類を沿岸域へ負荷するために、内湾域の植物プランクトンに与える影響は直接的で大きいと考えられる。実際に、広島湾(山口ほか, 1994)や富山湾(長田・奈倉, 1993)では河川水が流入する湾奥部で植物プランクトンの現存量が多いことや、伊勢湾(太田, 1991)と三河湾(山本ほか, 1997)における赤潮の発生には河川水の流入が関与していることが指摘されている。また、都市・工場排水の流入は養殖漁場の生産性を低下させる一要因であることから(本間, 1998)、内湾域を養殖漁場として高度利用するためには河川水の流入が湾内の水質や植物プランクトンに及ぼす

影響を明らかにする必要がある。特に、二枚貝類を対象とした無給餌養殖が盛んな内湾域においては養殖生物の餌料となる植物プランクトンの変動要因を明らかにすることは重要である。

三重県の志摩半島に位置する的矢湾は湾奥部に主要流入河川を有するリアス式内湾で(Fig. 1)、カキと真珠の優良養殖漁場として知られている(佐藤, 1958)。しかしながら、的矢湾とその流入河川の栄養塩濃度および植物プランクトン現存量に関する研究例は極めて少ない。前報(今井・河村, 2000)では、的矢湾の硝酸態窒素とケイ酸態ケイ素の濃度および季節変動は人為的影響が比較的小さい野川と池田川の影響を強く受けているが、亜硝酸態窒素とリン酸態リンは植物プランクトンによる消費や湾底土からの再生などの影響も大きいことが示唆された。したがって、本報では的矢湾の植物プランクトン現存量に影響を与える栄養塩類を推定し、河川水の流入と湾内の植物プランクトン現存量との関係を検討することを目的とした。

調査地の概要

的矢湾は総面積12.7km²の内湾で、その地形的特徴によって湾奥部、水道部、湾部に区分されている(佐藤, 1958)。

2000年8月11日受付, 2000年10月3日受理

¹ 三重大学生物資源学部

Faculty of Bioresources, Mie University, 1515 Kamihama-cho, Tsu, Mie 514-8507, Japan

² 的矢湾養殖研究所

Matoya Oyster Research Laboratory, Matoya, Isobe-cho, Mie 517-0204, Japan

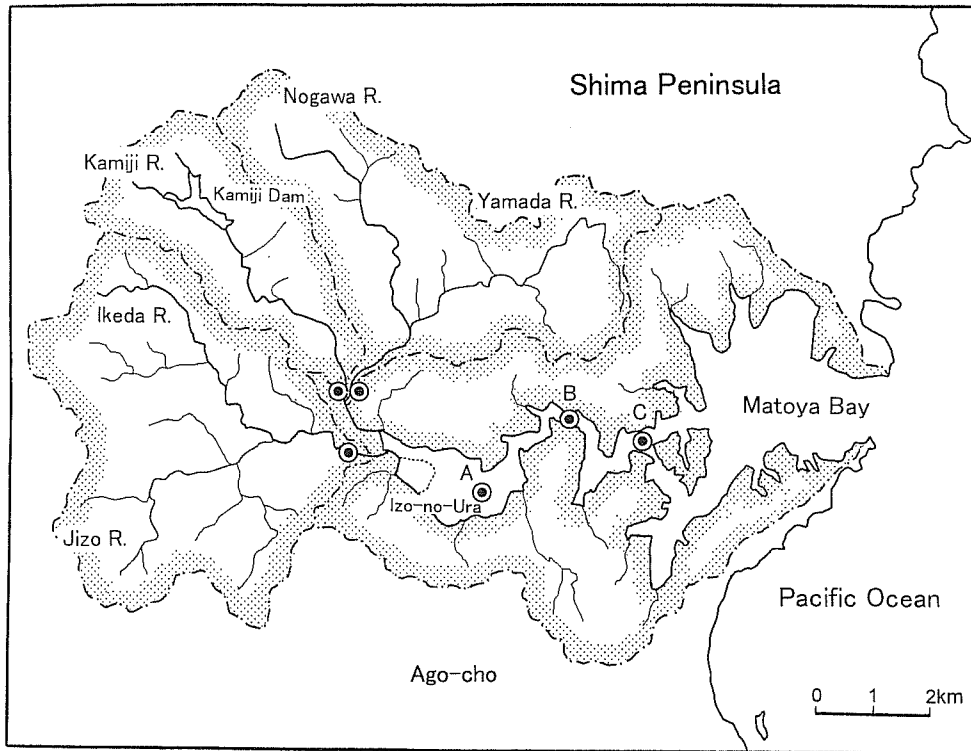


Figure 1. Study area and location of sampling stations in three inflow rivers (Nogawa, Kamiji and Ikeda Rivers) and Matoya Bay. Yamada and Jizo Rivers are tributaries of Nogawa and Ikeda Rivers, respectively. The generic name for Nogawa, Kamiji and Ikeda Rivers is Isobe River. Circle with dot indicates sampling station.

これら3区域のうち、水道部は生産性の高い水域であることが経験的に知られており（佐藤，1958），養殖漁場として最も多く利用されている。また，湾奥部の伊雑ノ浦には主要流入河川である野川，神路川，池田川が流入しており（Fig. 1），湾内に流入する陸水の78%はこれら3河川によって供給されている（佐藤，1968）。なお，三重県の河川系統図では野川，神路川，池田川を合わせて磯部川水系としていることから，本研究ではこれら3河川を総称して磯部川と定義した。

調査・分析方法

1. 湾内調査

1996年7月から97年9月にかけて，毎月約2回（合計32回）の観測調査を行った。観測点は湾奥部から水道部に設けた3地点（Sts. A, B, C）の3層（0.5m, 2.0m, 4.0m層）とした（Fig. 1）。なお，調査時の平均水深はSt. Aが 5.8 ± 0.5 m (average \pm SD), St. Bが 6.3 ± 0.4 m, St. Cが 8.6 ± 0.5 mであった。

調査項目は水温，塩分，透明度，水深，溶存酸素量（DO），クロロフィルa濃度（Chl. a濃度），硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ），亜硝酸態窒素（ $\text{NO}_2\text{-N}$ ），リン酸態リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）およびケイ酸態ケイ素（ $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ）である。アンモニア態窒

素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）は一般に河川水中には少ないとされているので測定は行わなかった。また，試水はバンドン採水器で採取し，栄養塩分析用サンプルは濾過処理をせずに -20°C 以下で冷凍保存した。

水温と塩分はポータブルCSTメーター（アレック電子ACT20-D2），DOはデジタルDOメーター（YSI model 58），透明度はセッキ板を用いて現場で測定した。 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ はオートアナライザー（Technicon Auto Analyzer II）で測定し， $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{SiO}_2\text{-Si}$ はParsons *et al.* (1984)に従って測定した。Chl. a濃度はガラス繊維濾紙（Whatman GF/F filter）で試水を濾過した後に N,N -ジメチルホルムアミド溶液で色素を抽出し（Suzuki and Ishimaru, 1990），ターナー・デザイン蛍光光度計で測定した。また，有光層は表層の光量が1%となる水深と定義し，Poole and Atkins (1929)の経験式 $k=1.7/D$ に従って透明度（D）から消散係数（k）を求めて $I_z=I_0e^{-kz}$ から算出した（ I_z : 距離（z）を透過した光強度， I_0 : 海表面の光量）。

2. 河川調査

主要流入河川である野川，神路川，池田川の観測調査は湾内調査と同日に行った。調査地点は各河川の下流域1地点とし，橋上から河川中央の表層水をバケツで採取した。調査項目は水温，Chl. a濃度， $\text{NO}_3\text{-N}$ ， $\text{NO}_2\text{-N}$ ， $\text{PO}_4\text{-P}$ およ

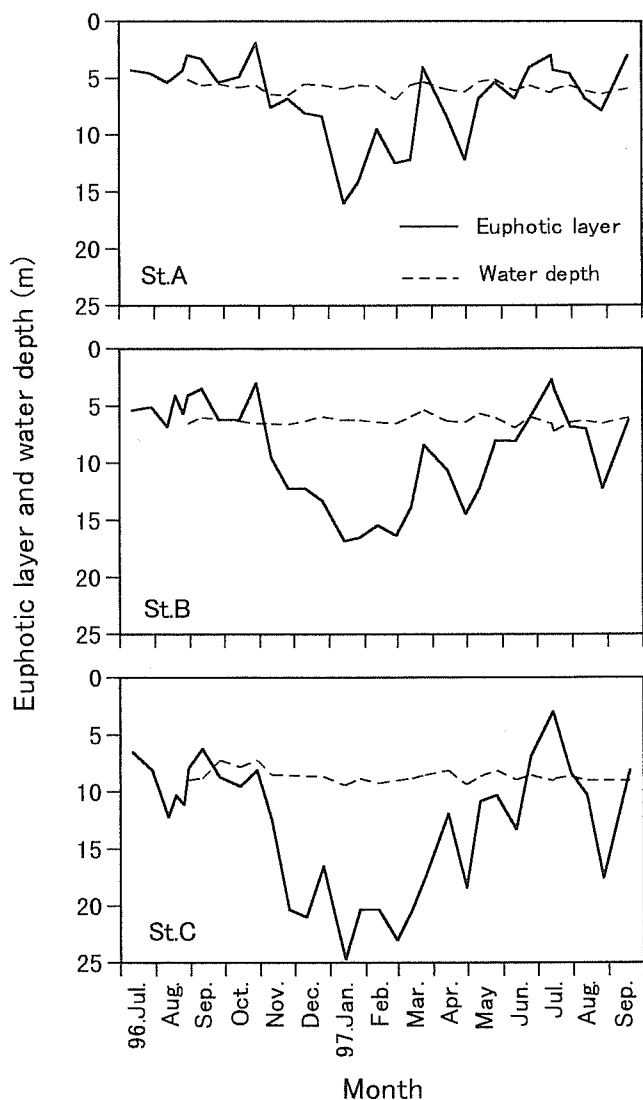


Figure 2. Seasonal variations of euphotic layer and water depth at the three stations in Matoya Bay.

び $\text{SiO}_2\text{-Si}$ である。

水温は棒温度計を用いて現場で測定し、湾内の値と比較するためにポータブルCSTメーターの値に補正した。栄養塩類とChl. a濃度は湾内調査と同様に測定した。また、河川流量は先行降雨指数と実測流量の回帰式(今井・河村, 2000)から推定した。

結果

1. 光環境要因

各地点の水深と有光層の季節変動をFig. 2に示す。水深の変動範囲はSt.Aが5.1~6.9m, St. Bが5.3~7.2m, St. Cが7.2~9.4mであった。これに対し、有光層の変動範囲はSt. Aが1.9~16.0m, St. Bが3.0~16.3m, St. Cが6.2~24.7mで、河口に近い地点ほど浅くなる傾向が認められた。また、有

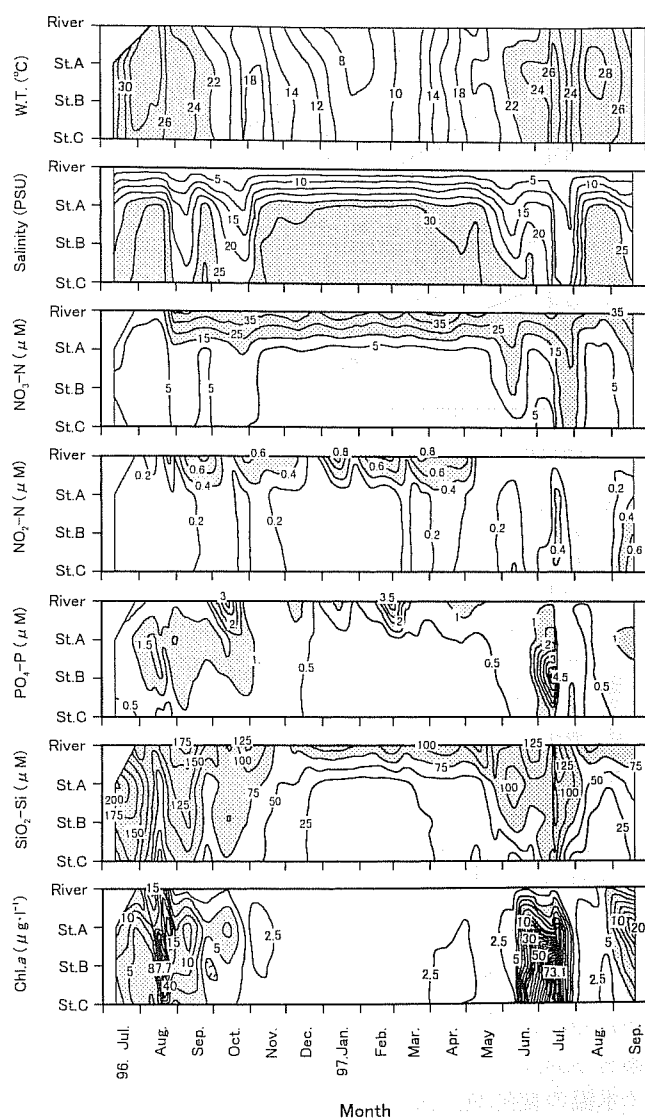


Figure 3. Time-series horizontal distributions of physicochemical parameters (water temperature, salinity, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}$ and Chl. *a*) at surface waters in Matoya Bay including Isobe River. Shaded portion indicates relative high measurements. The data for Isobe River is flow-weighted average of the three inflow rivers. Flow rates were estimated from the regression models (Imai and Kawamura, 2000).

光層は3地点ともに春季(3~5月)から夏季(6~8月)にかけて浅くなるが、秋季(9~11月)から冬季(12~2月)の有光層は水深よりも深くなる傾向が認められた。

2. 物理化学的環境要因とChl. a濃度

的矢湾において河川水の影響は塩分躍層の1.5~2.0m層以浅で顕著である(今井ほか, 1999)。したがって、ここでは磯部川と湾表層における各環境要因の時空間変動について検討した(Fig. 3)。ただし、磯部川の値は3河川を流量で加重平均したもので、塩分は0とした。

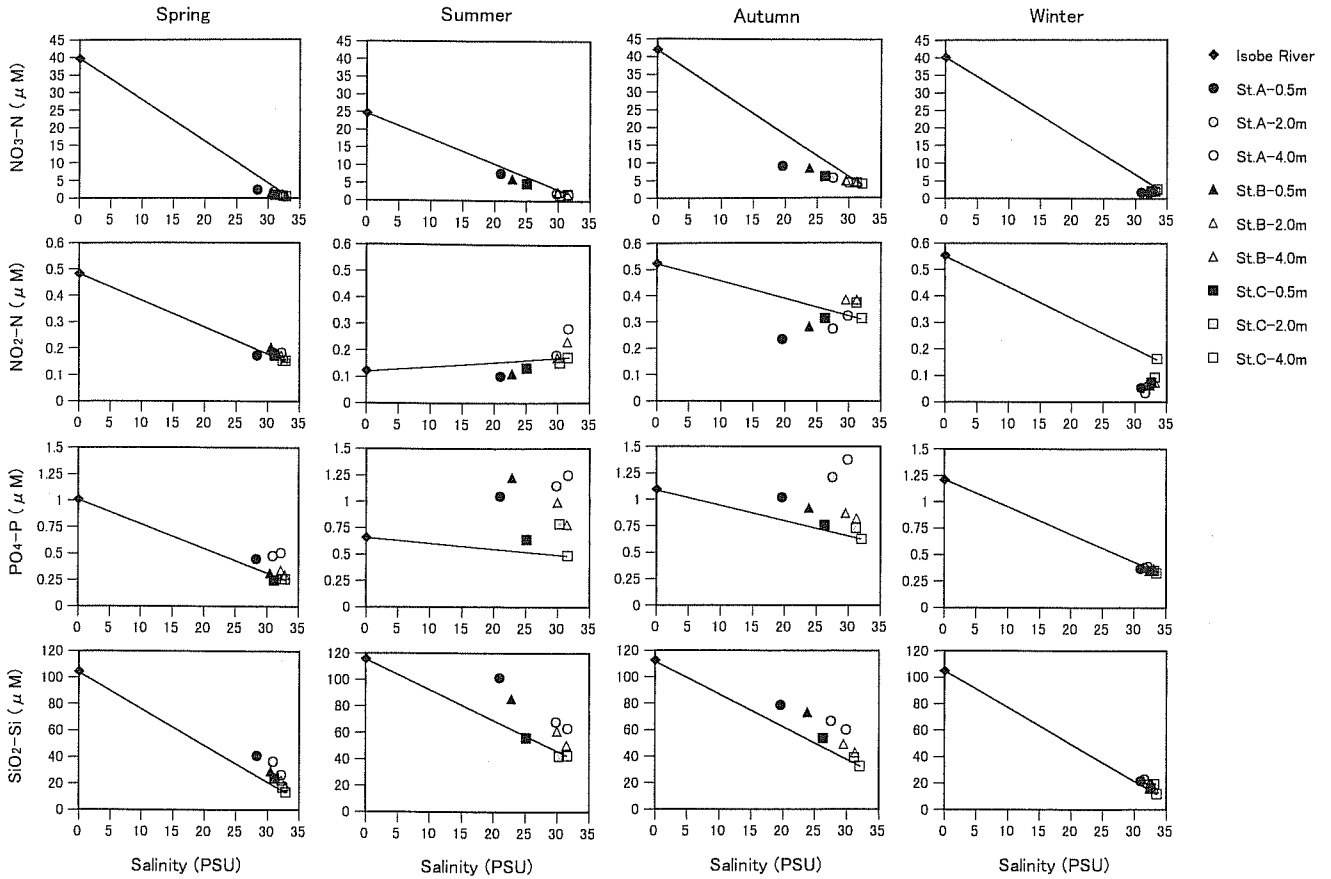


Figure 4. Mixing diagrams of nutrients at spring (March to May), summer (June to August), autumn (September to November) and winter (December to February) in Matoya Bay. Data of salinity and nutrients shown at each symbol are the average at each season, respectively. Solid line is linked two points; Isobe River and 4.0 m layer at St. C.

水温の変動範囲は河川が6~30°C, 湾内が7~30°Cで両者は類似した季節変動を示した。また, 夏季から冬季の水温は河口に近づくに従って低くなる傾向が認められた。塩分は湾内において4.4~33.1 PSUの範囲で大きな季節変動を示した。また, 河川流量の少ない冬季と春季の塩分は25 PSU以上であるが, 河川増水期の夏季と秋季には河口から最も離れたSt. Cにおいても20 PSU以下になる場合が認められた。

$\text{NO}_3\text{-N}$ の変動範囲は河川が5.9~48.2 μM , 湾内が0~26.5 μM で, 河口に近づくに従って高くなる傾向が認められた。また, 湾内の $\text{NO}_3\text{-N}$ は夏季と秋季に5 μM 以上にまで高くなり, 低塩分時に高濃度を示す時空間変動を示した。 $\text{NO}_2\text{-N}$ の変動範囲は河川が0~0.9 μM , 湾内が0~0.8 μM で, 湾内では夏季と秋季に高くなる季節変動を示した。しかしながら, $\text{NO}_2\text{-N}$ は97年の夏季と秋季の低塩分時において河川よりも湾内で高濃度を示し, 塩分と明確な対応は認められなかった。 $\text{PO}_4\text{-P}$ の変動範囲は河川が0.2~3.3 μM , 湾内が0.1~1.9 μM で, 湾内では夏季と秋季に高くなる季節

変動を示した。しかしながら, $\text{PO}_4\text{-P}$ は夏季と秋季になると河川よりも湾内で高濃度を示し, 塩分と明確な対応は認められなかった。 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ の変動範囲は河川が64~189 μM , 湾内が4.2~234 μM で, 夏季と秋季に高くなる季節変動を示した。また, $\text{NO}_3\text{-N}$ ほど明確ではないが湾内の $\text{SiO}_2\text{-Si}$ は低塩分時に高濃度を示す時空間変動を示し, 河口に近づくに従って高くなる傾向が認められた。

Chl. *a*濃度の変動範囲は河川が0.3~15.4 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$, 湾内が0.7~87.4 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ で, 湾内では夏季と秋季に高くなる季節変動を示した。また, 湾内のChl. *a*濃度は96年8月のSt. B (87.7 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$), 97年7月のSt. B (73.1 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$), 97年9月のSt. A (25.7 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$)に高濃度が認められ, これらピークの出現した時期と水域は $\text{PO}_4\text{-P}$ のピークと類似していた。

3. 栄養塩類の挙動

湾内における栄養塩類の挙動について成分相関図を用いて季節別に検討した (Fig. 4)。ここでは便宜上, 磯部川の値と湾外の水質に最も近いと考えられるSt. Cの4.0 m層の値を結んだ直線を理論希釈直線と定義し, この直線の値より

Table 1. Correlation coefficient between Apparent Oxygen Utilization (AOU) and concentration of nutrients at 4.0 m layer for the three stations in Matoya Bay.

	St.A (n=32)	St.B (n=32)	St.C (n=32)
NO ₃ -N	0.18	0.47*	0.41*
NO ₂ -N	0.29	0.35*	0.26
PO ₄ -P	0.81*	0.63*	0.60*
SiO ₂ -Si	0.58*	0.53*	0.35*

n: Number of data. * $p < 0.05$.

も高い場合には河川以外に由来する栄養塩の付加（以後、付加作用とする）、低い場合には生物化学的な栄養塩の除去（以後、除去作用とする）があったものと判断した。

春季のNO₃-NはSt. Aの0.5 m層において若干の除去作用が認められたが、NO₂-Nは付加・除去作用がともに認められなかった。PO₄-PとSiO₂-SiはSt. Aにおいて若干の付加作用が認められた。

夏季のNO₃-Nは3地点の0.5 m層において若干の除去作用が認められたが、ほぼ直線に近い値を示した。NO₂-Nは3地点の0.5 m層で除去作用、Sts. A, Bの4.0 m層で付加作用が若干認められた。PO₄-PとSiO₂-SiはSts. A, Bにおいて顕著な付加作用が認められた。

秋季のNO₃-Nは3地点の0.5 m層において除去作用が認められ、特にSt. Aの0.5 m層で顕著であった。NO₂-NはSts. A, Bの0.5 m層において除去作用が認められた。PO₄-PはSt. Aの2.0 m, 4.0 m層で顕著な付加作用が認められた。SiO₂-SiはPO₄-PほどではないがSt. Aにおいて付加作用が認められた。

冬季のNO₃-NとNO₂-Nはすべての地点において若干の除去作用が認められたが、PO₄-PとSiO₂-Siは直線に近い値を示した。

4. 栄養塩類とAOUの関係

各地点の4.0 m層の栄養塩濃度とAOU (Apparent Oxygen Utilization) の関係について検討した (Table 1)。その結果、3地点ともにPO₄-PはAOUと強い相関を示し ($r \geq 0.60$)、相関係数 (r) はSt. Aで最大値を示した。また、SiO₂-SiもSts. A, BにおいてAOUと比較的強い相関が認められた ($r > 0.50$)。一方、NO₃-NはSts. B, C, NO₂-NはSt. BにおいてAOUと有意な相関が認められたが、相関係数は小さかった ($r < 0.50$)。

5. Chl. *a*濃度と物理化学的環境要因の関係

河川水の影響を強く受ける0.5 m層について、Chl. *a*濃度と物理化学的環境要因（水温、塩分、栄養塩類）の関係をスピアマンの順位相関を用いて季節別に検討した (Table 2)。その結果、Chl. *a*濃度は秋季においてNO₂-N以外の環境要因と有意な相関が認められたが、その他の季節ではす

Table 2. Spearman's rank correlation coefficient between concentration of Chl. *a* and physicochemical parameters (water temperature, salinity, NO₃-N, NO₂-N, PO₄-P and SiO₂-Si) at 0.5 m layer for the three stations in Matoya Bay.

	Spring (Mar.-May) n=18	Summer (Jun.-Aug.) n=39	Autumn (Sep.-Nov.) n=21	Winter (Dec.-Feb.) n=18
W.T.	0.46	0.04	0.83*	0.21
Salinity	-0.38	-0.10	-0.63*	-0.39
NO ₃ -N	0.38	-0.01	0.50*	-0.27
NO ₂ -N	0.06	0.20	0.23	-0.22
PO ₄ -P	0.06	0.21	0.62*	-0.06
SiO ₂ -Si	0.32	0.22	0.47*	0.00

n: Number of data. * $p < 0.05$.

べての環境要因と有意な相関は認められなかった。秋季についてみると、Chl. *a*濃度と最も強い相関を示したのは水温であった（順位相関係数： $r_s=0.83$ ）。また、栄養塩類のなかではPO₄-PがChl. *a*濃度と最も強い相関を示した ($r_s=0.62$)。

考 察

1. 湾表層における栄養塩類の供給源

湾内においてNO₃-Nは低塩分時に高濃度を示した (Fig. 3)。また、NO₃-Nはすべての季節において河川以外の付加は認められないことから (Fig. 4)、的矢湾におけるNO₃-Nの主な供給源は流入河川であると考えられる。

PO₄-Pは河川が増水する夏季から秋季に高くなるが、この時期のPO₄-Pは河川よりも湾内で高濃度を示していた (Fig. 3)。また、PO₄-PはSt. Aの4.0 m層においてAOUと強い相関を示すことから (Table 1)、伊雑ノ浦底土での再生が盛んであることが考えられる。さらに、AOUは7月から10月に高くなることから (Fig. 5)、伊雑ノ浦底土におけるPO₄-Pの再生は夏季から秋季に大きくなることが示唆された。実際に、成分相関図から判断しても夏季と秋季のSt. Aでは河川以外のPO₄-Pの付加が顕著であった (Fig. 4)。したがって、的矢湾におけるPO₄-Pの主な供給源は伊雑ノ浦の底土であり、その寄与は夏季から秋季に大きいことが考えられる。

SiO₂-SiはNO₃-Nほど明確ではないが低塩分時に高濃度を示すことから (Fig. 3)、流入河川が主な供給源と考えられる。しかしながら、SiO₂-SiはSt. Aの4.0 m層においてAOUと比較的強い相関を示し (Table 1)、夏季と秋季のSt. Aで河川以外の付加が認められた (Fig. 4)。したがって、的矢湾のSiO₂-Siの主な供給源は流入河川であるが、AOUが高くなる夏季から秋季 (Fig. 5) には伊雑ノ浦底土における再生も寄与することが考えられる。

NO₂-Nは4.0 m層においてAOUと強い相関が認められな

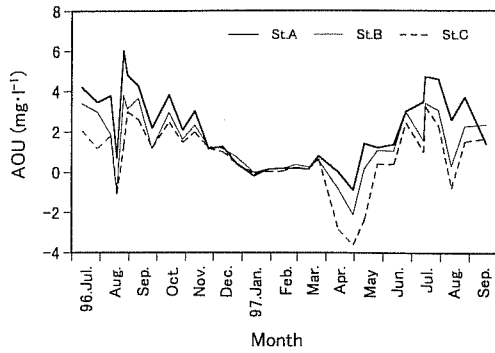


Figure 5. Seasonal variation of Apparent Oxygen Utilization (AOU) at 4.0 m layer for the three stations in Matoya Bay.

いことから (Table 1), 湾底土での再生が小さいと考えられる。しかしながら, 磯部川の $\text{NO}_2\text{-N}$ は高流量時に低濃度を示す特性があることから (今井・河村, 2000), 夏季と秋季における河川の増水は湾内の $\text{NO}_2\text{-N}$ を減少させることが考えられる。また, 湾内の $\text{NO}_2\text{-N}$ は夏季と秋季の低塩分時に河川よりも高濃度を示すことから (Fig. 3), 夏季から秋季における $\text{NO}_2\text{-N}$ の主な供給源は湾底土であり, 磯部川の $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度が高くなる冬季と春季の主な供給源は流入河川であると考えられる。

2. 河川流量と鉛直循環流量の関係

水深が浅く河口に近い伊雑ノ浦では, エスチュアリー循環流による鉛直混合 (藤原ほか, 1996) が卓越することが考えられる。そこで, St. Aにおける鉛直循環流量 (Q) を宇野木 (1998) のモデル式 $Q=R \cdot S_1 / (S_4 - S_1)$ から求めて, 河川流量 (R) との関係を検討した (S_1 : St. Aの0.5m層の塩分, S_4 : St. Cの4.0m層の塩分)。その結果, 両者間には有意な負の相関が認められたこと ($r_s = -0.46, p < 0.05$), また, 河川流量が増加する夏季から秋季の鉛直循環流量は高流量時に減少する傾向を示すことから (Fig. 6), 河川の増水はエスチュアリー循環よりも成層構造を強めて湾内の鉛直混合を妨げると考えられる。つまり, 夏季から秋季に伊雑ノ浦底土で再生された $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{SiO}_2\text{-Si}$ は, 河川平水時に潮汐や風などが引き起こした鉛直混合によって湾表層に供給されると考えられる。

3. 植物プランクトンの制限要因

植物プランクトンの生長に対して相対的に不足する栄養塩類を推定する手段として, レッドフィールド比 (N:P:Si=16:1:15) が用いられている (例えば長田, 1994; Del Amo *et al.*, 1997)。ここでは, Del Amo *et al.* (1997) と同様にN:P比とSi:N比の散布図から植物プランクトンの生長を制限する栄養塩類を検討した。その結果, すべての季節において栄養塩類はN→P→Siの順で制限要因となる場合が多いことがわかった (Fig. 7)。

また, 植物プランクトンの制限要因を判断するには栄養塩類の絶対量についても検討する必要がある。半飽和定数

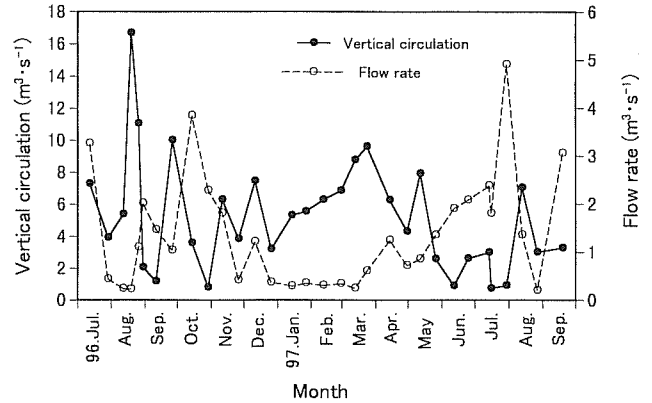


Figure 6. Seasonal variations of vertical circulation at St. A in Matoya Bay and flow rate in Ise River. Vertical circulation was quantified using a formula (Unoki, 1998).

(K_s) は植物プランクトンの生育可能な最低栄養塩濃度を示している (Parsons *et al.*, 1977)。したがって, 現場の栄養塩濃度が K_s 以下であればその栄養塩類は植物プランクトンの制限要因であると考えられる。ここでは Lalli and Parsons (1997) が示した K_s の中央値 ($\text{NO}_3\text{-N}=5.0 \mu\text{M}$, $\text{PO}_4\text{-P}=0.26 \mu\text{M}$, $\text{SiO}_2\text{-Si}=2.75 \mu\text{M}$) を便宜的に的矢湾の植物プランクトンの K_s として検討した (Table 3)。その結果, K_s 以下であった調査回数はどの季節においても $\text{NO}_3\text{-N}$ が最も多かった。したがって, レッドフィールド比と K_s の両者から判断して不足する場合の多かった窒素が, 的矢湾における植物プランクトンの主な制限要因であると考えられる。

しかしながら, 夏季の0.5m層ではP→N→Siの順で栄養塩類が相対的に不足する場合もあること (Fig. 7), また, $\text{PO}_4\text{-P}$ も K_s 以下になる場合があることから (Table 3), 場合によってはリンもまた制限要因となる可能性が考えられる。そこで, N:P比の季節変動に注目すると, N:P比は低塩分時に高くなりその傾向は0.5m層で顕著であった (Fig. 8)。このことは, 河川水の流入により湾内の栄養塩条件は窒素不足からリン不足に移行することを意味している。つまり, 的矢湾の植物プランクトンは通常, 窒素によって制限されているが, 河川が増水する夏季から秋季にはリンが制限要因になる場合もあることが示唆された。実際に, 夏季と秋季におけるChl. *a*濃度のピークは $\text{PO}_4\text{-P}$ が高濃度を示す時期と地点で認められた (Fig. 3)。さらに, 秋季のChl. *a*濃度は $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ と有意な相関を示すことから (Table 2), 河川からの窒素とリンの負荷にともなう植物プランクトン現存量の増加は秋季に顕著であることが考えられる。

一方, $\text{SiO}_2\text{-Si}$ はすべての季節において K_s 以下になる場合は認められず (Table 3), レッドフィールド比から判断しても $\text{SiO}_2\text{-Si}$ が制限要因となるのは夏季の1回のみであっ

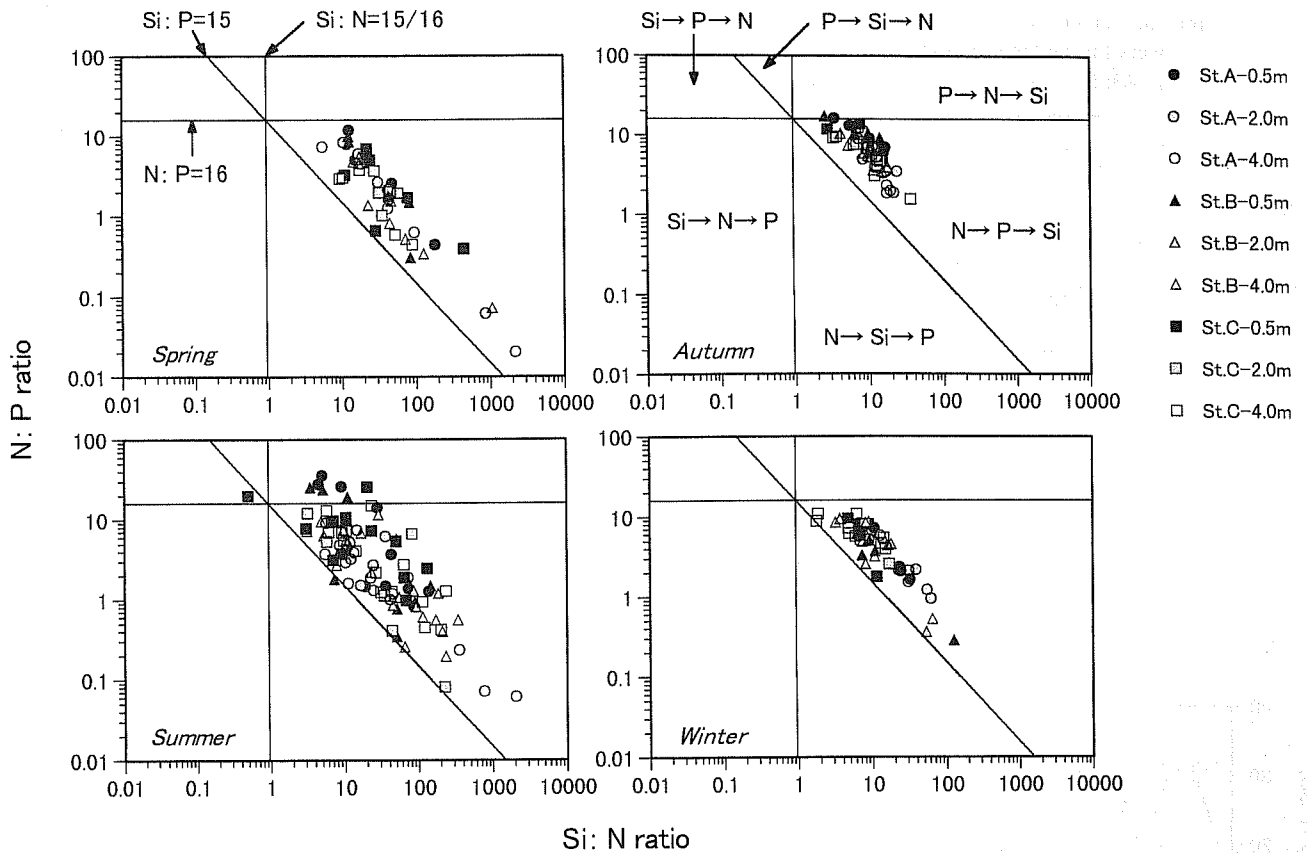


Figure 7. Synthetic graphs of N:P:Si ratios at the three stations in Matoya Bay. The six areas were delimited by Redfield ratio (N:P:Si=16:1:15). Each area indicates the rank of potential limiting nutrients. N:P ratio indicates $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} : \text{PO}_4\text{-P}$ ratio and Si:N ratio is $\text{SiO}_2\text{-Si} : \text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N}$ ratio.

た (Fig. 7). このことから、的矢湾では $\text{SiO}_2\text{-Si}$ が植物プランクトンの制限要因になる可能性は非常に低いといえる。したがって、秋季において Chl. *a* 濃度と $\text{SiO}_2\text{-Si}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の主な供給源がともに流入河川であるために類似した季節変動を示すこと (Fig. 3) が理由と考えられる。

植物プランクトンは栄養塩類のほかにも光や水温、塩分の影響も受ける。光環境を有光層から判断すると、冬季から春季は水中全体を通して十分な光条件下にあるが、夏季から秋季の中層以深では光不足になることが考えられる (Fig. 2)。水温 (Ichimura, 1967; Shibata and Aruga, 1982) と塩分 (Shibata and Aruga, 1982) については、東京湾において植物プランクトン現存量に影響していることが指摘されている。本研究においても秋季の水温と Chl. *a* 濃度の間には正の相関が認められたことから (Table 2)、秋季の植物プランクトン現存量は水温の影響を受けている可能性が示唆された。一方、塩分もまた秋季において Chl. *a* 濃度と負の相関が認められた (Table 2)。しかしながら、栄養塩類の中では第1の制限要因と考えられる $\text{NO}_3\text{-N}$ が低塩分時に高濃度になることから (Fig. 3)、Chl. *a* 濃度が塩分と負の相関を

示したのは河川による $\text{NO}_3\text{-N}$ の供給が原因とも考えられ、塩分の植物プランクトン現存量への影響は明確ではなかった。

以上をまとめると、夏季から秋季における的矢湾表層の植物プランクトン現存量は、流入河川に由来する窒素と伊雑ノ浦底土で再生されたリンによって増加すると考えられる。また、河川水の流入は窒素不足を解消する一方で、湾内の塩分躍層を発達させるために伊雑ノ浦底土で再生されたリンが表層へ輸送されることを妨げる。したがって、河川増水期の夏季から秋季における湾表層の植物プランクトン現存量は伊雑ノ浦における鉛直混合の強さ、もしくは流入河川水のリン濃度に左右されると考えられる。

謝辞

三重大学の関口秀夫教授には本研究を進めるにあたり多くのご助言をいただいた。的矢湾養殖研究所元研究員の結城勝久氏と三重大学生物資源学部海洋生態学研究室の方々には観測調査にご協力をいただいた。三重大学の田口和典博士には化学分析に関してご指導をいただいた。三重大学の石川輝博士と生物海洋学研究室の方々には化学分析にご協

Table 3. Frequency of samples with nutrient concentration lower than the half saturation constant (Ks) at the three layers for the three stations in Matoya Bay. Ks were defined as a median of the range based on Lalli and Parsons (1997); NO₃-N=6.0 μM, PO₄-P=0.26 μM, SiO₂-Si=2.75 μM.

		Spring (Mar.-May) n=6			Summer (Jun.-Aug.) n=13			Autumn (Sep.-Nov.) n=7			Winter (Dec.-Feb.) n=6		
		St.A	St.B	St.C	St.A	St.B	St.C	St.A	St.B	St.C	St.A	St.B	St.C
0.5m	NO ₃ -N	5	6	6	7	9	9	3	3	4	6	6	6
	PO ₄ -P	0	1	4	0	0	1	0	0	0	2	2	0
	SiO ₂ -Si	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0m	NO ₃ -N	6	6	6	11	10	12	5	6	6	6	6	6
	PO ₄ -P	0	1	3	0	0	3	0	0	0	1	0	2
	SiO ₂ -Si	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.0m	NO ₃ -N	6	6	6	13	12	11	6	6	7	6	6	6
	PO ₄ -P	0	2	2	0	0	2	0	0	0	1	1	1
	SiO ₂ -Si	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

n: Number of data.

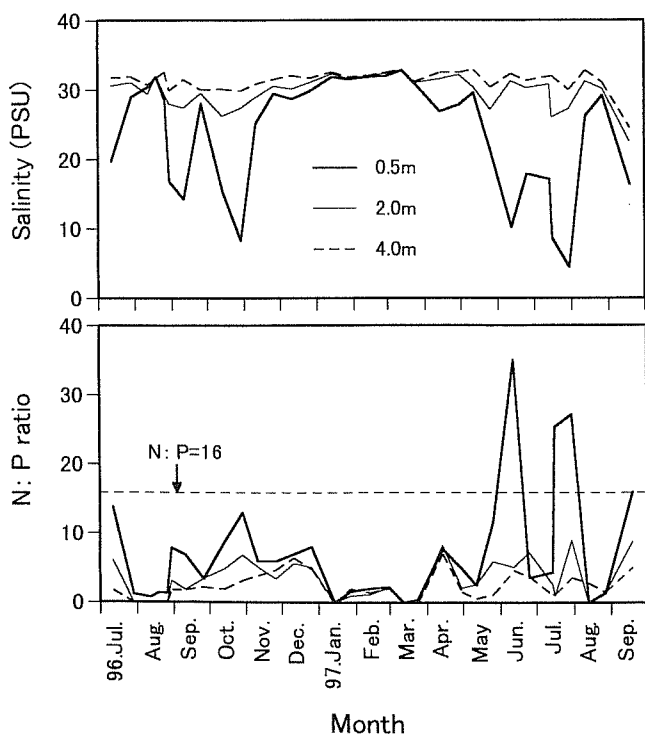


Figure 8. Seasonal variations of salinity and N: P ratio (NO₃-N+NO₂-N: PO₄-P) at St. A in Matoya Bay. The same variations were shown at Sts. B and C.

力をいただいた。三重大大学の岩城俊昭博士には観測機器を貸与していただいた。上記の皆様へ深く感謝の意を表します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金(課題番号 10660177)により行われたものである。

引用文献

Del Amo, Y., Le Pape, O., P. Tréguer, B. Quéguiner, A. Ménesguen and A. Aminot (1997) Impacts of high-nitrate freshwater inputs on macrotidal ecosystems. I—Seasonal evolution of nutrient limitation for the diatom-dominated phytoplankton of the Bay of Brest (France). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **161**, 213–224.

藤原建紀・福井真吾・杉山陽一 (1996) 伊勢湾の成層とエスチュアリー循環の季節変動, *海の研究*, **5**, 235–244.

本間昭郎 (1998) 無給餌養殖場, 沿岸の環境圏 (平野敏行監修), *フジ・テクノシステム*, 東京, pp.651–661.

Ichimura, S. (1967) Environmental gradient and its relation to primary productivity in Tokyo Bay. *Rec. Oceanogr. Wks. in Japan.* **9**, 115–128.

今井 直・河村章人 (2000) 的矢湾における主要流入河川の環境特性と湾内の栄養塩濃度への影響, *水産海洋研究*, **64**, 144–154.

今井 直・須田有輔・町井紀之 (1998) 沿岸漁業生産における湿地環境の重要性に対する漁業者の認識, *日本沿岸域学会論文集*, **10**, 53–63.

今井 直・太原英生・河村章人 (1999) 養殖漁場としての的矢湾の低次生産環境特性, *三重生物資源学紀要*, **23**, 1–12.

Lalli, C. M. and T. R. Parsons (1997) *Biological Oceanography An Introduction* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann, Oxford, 314 pp.

長田 宏 (1994) 新潟沿岸域における河川水起源の栄養塩分布の季節変動, *水産海洋研究*, **58**, 1–9.

長田 宏・奈倉 昇 (1993) 富山湾における河川水の流入とクロロフィルa濃度の季節変動, *日本研報告*, **43**, 55–68.

太田立男 (1991) 伊勢湾の赤潮予察, 用水と廃水, **33**, 459–462.

Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli (1984) *A manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, Oxford, 173 pp.

Parsons, T. R., M. Takahashi and B. Hargrave (1977) *Biological Oceanographic Processes* (2nd ed.). Pergamon Press, Oxford, 332 pp.

Poole, H.H. and W.R.G. Atkins (1929) Photo-electric measurements of submarine illumination throughout the year. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.*, **16**, 297–324.

佐藤忠勇 (1958) 的矢湾養蠔研究所研究報告—的矢湾における真珠

- 養殖の実態、特に仕上漁場としての海況について— 的矢湾養殖研究所, **1**, 72 pp.
- 佐藤忠勇 (1968) 的矢湾養殖研究所—その歴史及び現在、並に的矢湾の海洋学的特性について—, 日本プランクトン学会報, **15**, 20-37.
- Shibata, Y. and Y. Aruga (1982) Variations of chlorophyll *a* concentration and photosynthetic activity of phytoplankton in Tokyo Bay. *La mer*, **20**, 75-92.
- Suzuki, R. and T. Ishimaru (1990) An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N,N-Dimethylformamide. *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, **46**, 190-194.
- 宇野木早苗 (1998) 内湾の鉛直循環流量と河川流量の関係, 海の研究, **7**, 283-292.
- 山口峰生・今井一郎・松尾 豊 (1994) 広島湾における植物プランクトンの現存量と光合成速度の季節変化, 南西水研報, **28**, 63-72.
- 山本民次・岡井 満・竹下邦明・橋本俊也 (1997) 三河湾における赤潮多発年の気象の特徴, 水産海洋研究, **61**, 114-122.