

# 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

長 田 宏\*

## Seasonal Changes in Distribution of Nutrients Supplied by River Water in the Coastal Area off Niigata, Southeastern Japan Sea

Hiroshi NAGATA\*

### Abstract

The present paper reports seasonal changes in distribution of inorganic nutrients and phytoplankton pigment in the vicinity of estuaries of the Shinano River and the Agano River. Plots of nitrite plus nitrate and dissolved silicon against salinity at the surface revealed an almost linear negative relationship in November, indicating simple dilution of discharged water. On the other hand, the non-linear negative relations were observed in May and July, when the biological processes might be prevailing. Comparing the observed elemental atomic ratio to the Redfield ratio, depletion of phosphorus and especially nitrogen was significant. This suggests that nitrogen is a major limiting factor controlling primary productivity in the study area.

### 1. はじめに

新潟沿岸域における低次生物生産は、沖合を流れる対馬暖流の消長、冷水域の接岸の程度、さらに流入する河川水によって大きな影響を受けている(板野, 1978)。特に信濃川, 阿賀野川は年間の平均流量が各々563および342  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ と、日本の河川中、第1位および第5位を占めており(国立天文台, 1992)、両河川から供給される大量の栄養塩は、この海域の生物生産に大きく貢献していると考えられる。

新潟沿岸域における低次生物生産環境について、永原(1984)および檜山・永原(1987)は栄養塩、クロロフィル *a* 濃度等の水平・鉛直分布の季節変動を調査し、河川から沿岸域に供給される栄養塩量を見積もっている。しかし、この海域における河川水と海水の混合に伴う栄養塩濃度の変動、植物プランクトンによる栄養塩の消費等に関する知見は、いまだ不十分である。

本報では、信濃川, 阿賀野川から供給された栄養塩の、沿岸域における除去過程の季節変動に焦点を絞り、

新潟沿岸の植物プランクトンに対する栄養環境について考察した結果を報告する。

### 2. 資料と方法

観測は日本海区水産研究所所属の調査船みずほ丸(150.44トン)により、1991年5月10~13日、7月19~22日および1992年11月9日に信濃川, 阿賀野川の河口域を中心とした新潟沿岸域で実施した(Fig. 1)。各定点では表面水をバケツで採水し、水温は棒状温度計で、塩分はサリノメーターでそれぞれ測定した。採水した海水は凍結して持ち帰り、解凍後、STRICKLAND and PARSONS (1968) に準じて亜硝酸塩と硝酸塩の合計量(以下、単に硝酸塩と呼ぶ)、溶存珪素、燐酸塩をオートアナライザーII型を用いて分析した。信濃川, 阿賀野川の河川水中に含まれるアンモニア態窒素は、溶存無機窒素全体の10%前後にとどまっている(檜山・永原, 1987) ので、本研究では、窒素源としては亜硝酸塩と硝酸塩のみを考え、アンモニア態窒素は分析しなかった。

クロロフィル *a* については、船上で0.2~0.5 lの試水を濾過した後、凍結保存した濾紙(ワットマンGF/F)から、N-Nジメチルホルムアミド抽出による蛍光

1993年9月24日受理

日本海区水産研究所業績B第9303号

\* 日本海区水産研究所 Japan Sea National Fisheries Research Institute, Suido-cho, Niigata 951, Japan.

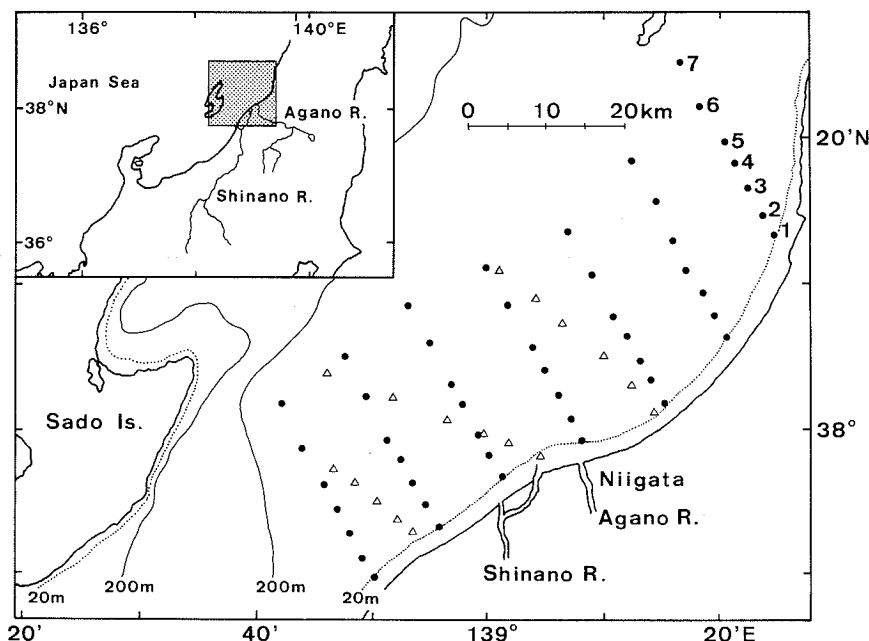


Fig. 1. Study area off Niigata and location of the sampling stations. Open triangles: May 10-13, 1991, solid circles: July 19-22, 1991 and Nov. 9, 1992.

法で分析した。

### 3. 結 果

#### 3.1. 栄養塩, クロロフィル a の分布

1991年5月10~13日の観測 (Fig. 2A-F) では, 後の2回の観測に比べて, 定点の数が少なく, また観測範囲も狭いものの, 低塩分で指標される河川水ブルームが, 信濃川, 阿賀野川の河口から北東に, 海岸線に沿って延びていることが明らかになった。河川水ブルーム内では, 水温は周辺の水のそれに比べて1~2°C高く, 硝酸塩, 溶存珪素も低塩分域ほど高濃度である。クロロフィル a も, 河川ブルーム水では, 高濃度の傾向がみられる。しかし, 磷酸塩濃度は, 信濃川, 阿賀野川の河口付近で, 0.1 μM を越えているが, 河川水ブルーム内外での濃度差は小さい。一方, 河川水の影響が小さいと考えられる沖合では, 硝酸塩, 溶存珪素濃度は低く, 特に硝酸塩については, 大部分の観測点で検出限界を下回っている。また, クロロフィル a も, 河川水ブルーム内より, ブルーム外で, やや低濃度である。

1991年7月19~22日 (Fig. 3A-F) にも, 5月の観測と同様, 低塩な河川水ブルームが海岸線に沿って北

東に延びている。しかし, このブルームは周囲より1~2°C 低水温であった点は, 5月と異なっている。さらに阿賀野川河口から北東30 km, 距岸10 km付近には, 水温では周囲と区別できないものの, 塩分が26.8の低塩分水が, 半ば孤立して存在している。これは信濃川, 阿賀野川の河川排水の一部が分離して形成されたと考えられる。海岸線に沿った河川水ブルーム内では, 硝酸塩, 溶存珪素, クロロフィル a 濃度が高く, 5月と同様の傾向がみられるが, クロロフィル a は5月と比べて3~4倍, 高濃度であり, 植物プランクトンの増殖, すなわち栄養塩の消費もそれだけ大きいことを示している。このような特徴は, 上述の半孤立低塩分水についても認められる。しかし, 磷酸塩についても信濃川, 阿賀野川河口付近等に0.3 μM 以上のやや高濃度域が認められるのみで, 半孤立低塩分水内でも, 周囲との濃度差はみられない。一方, 沖合では, 硝酸塩, 溶存珪素, クロロフィル a は, 河川水ブルーム内よりも低濃度であり, 5月と同様, 硝酸塩は検出限界以下である。

1992年11月9日 (Fig. 4A-F) には, 低塩分の河川水ブルームは, 周囲よりも1~2°C 低温であり, この点は7月と同様であるが, 拡延方向は, 河口から北ない

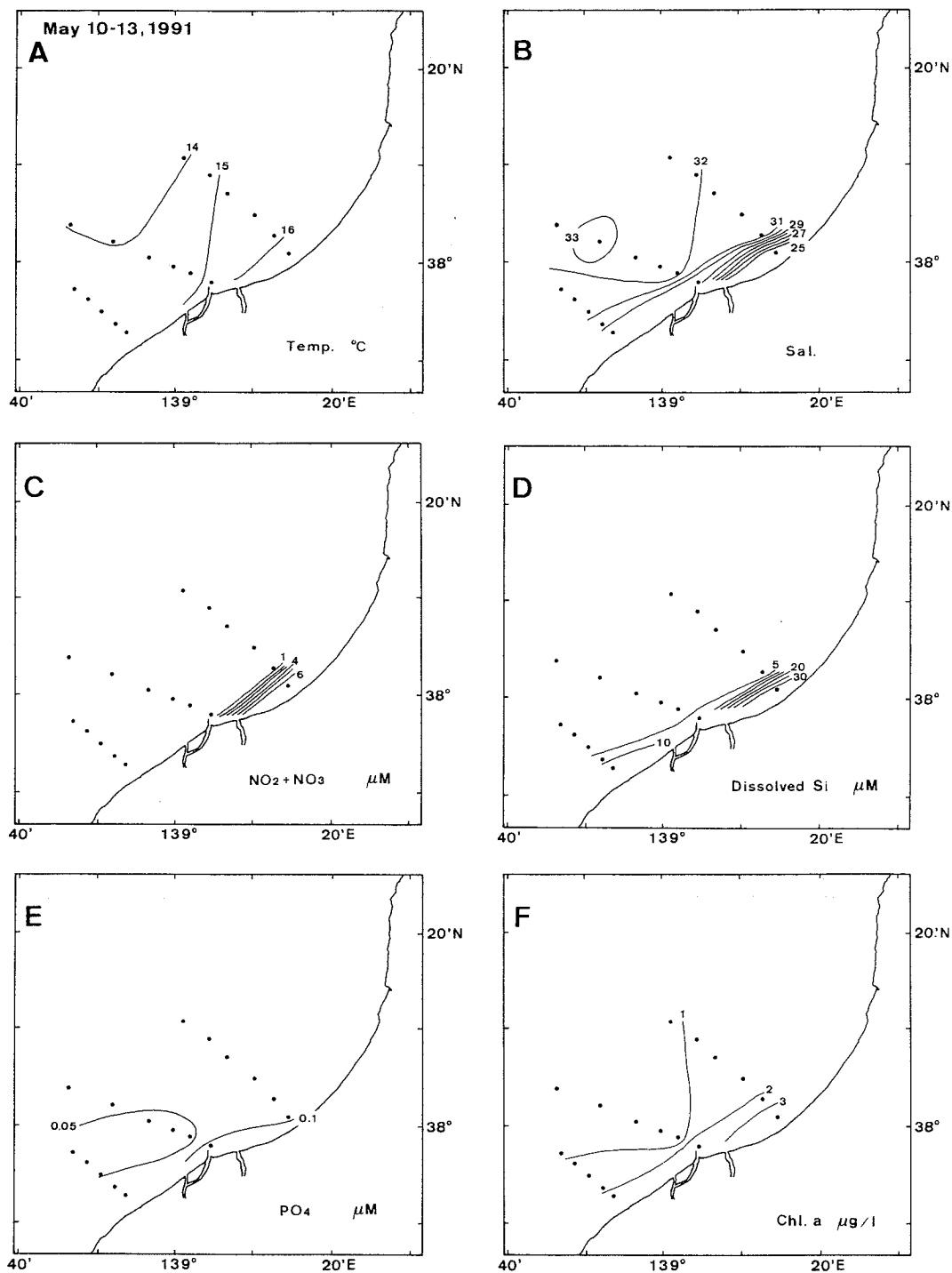


Fig. 2. Horizontal distributions of (A) temperature, (B) salinity, (C) nitrite plus nitrate, (D) dissolved silicon, (E) phosphate and (F) chlorophyll *a* at the surface off Niigata on May 10-13, 1991.

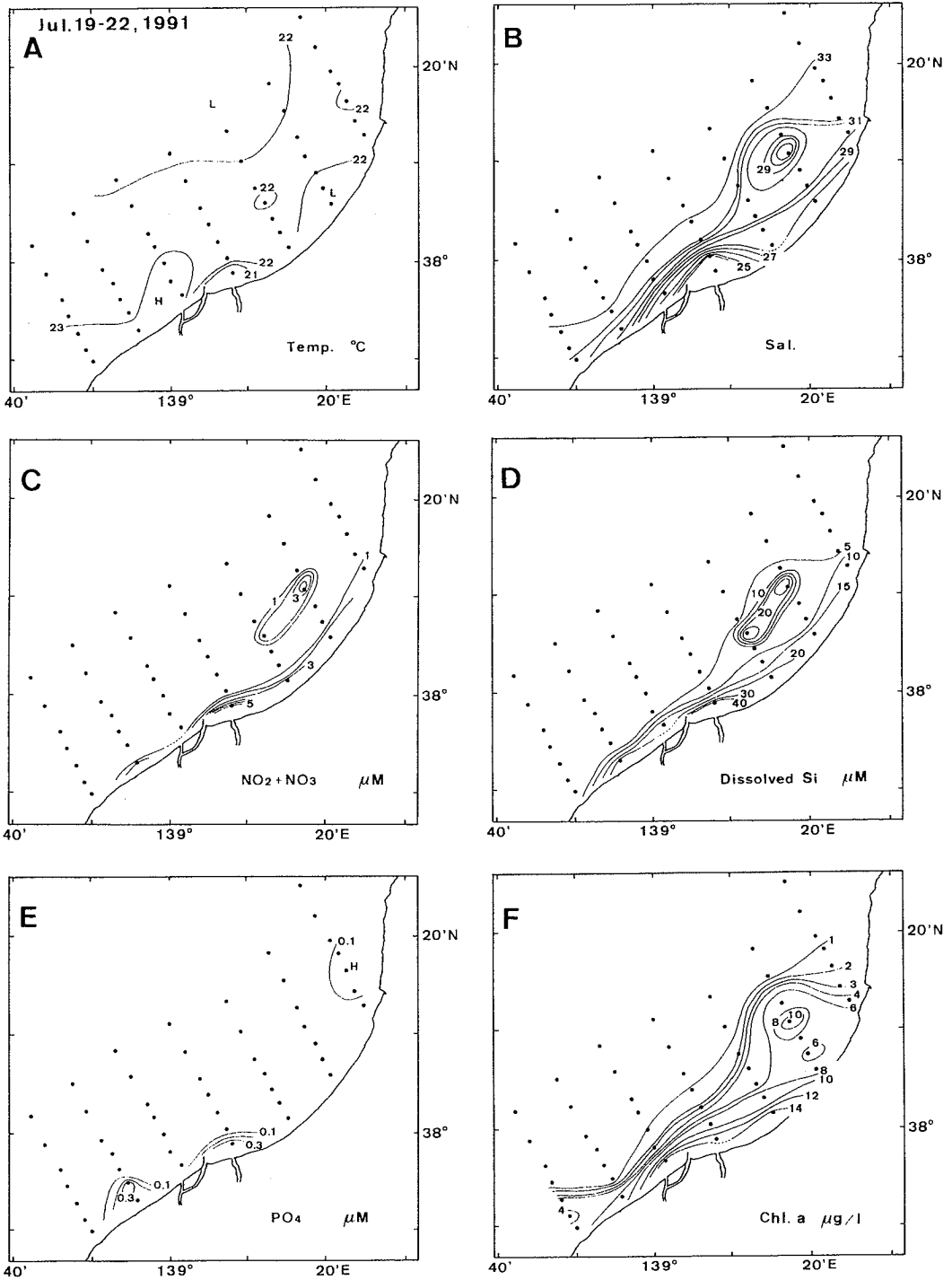


Fig. 3. Horizontal distributions of (A) temperature, (B) salinity, (C) nitrite plus nitrate, (D) dissolved silicon, (E) phosphate and (F) chlorophyll *a* at the surface off Niigata on July 19-22, 1991.

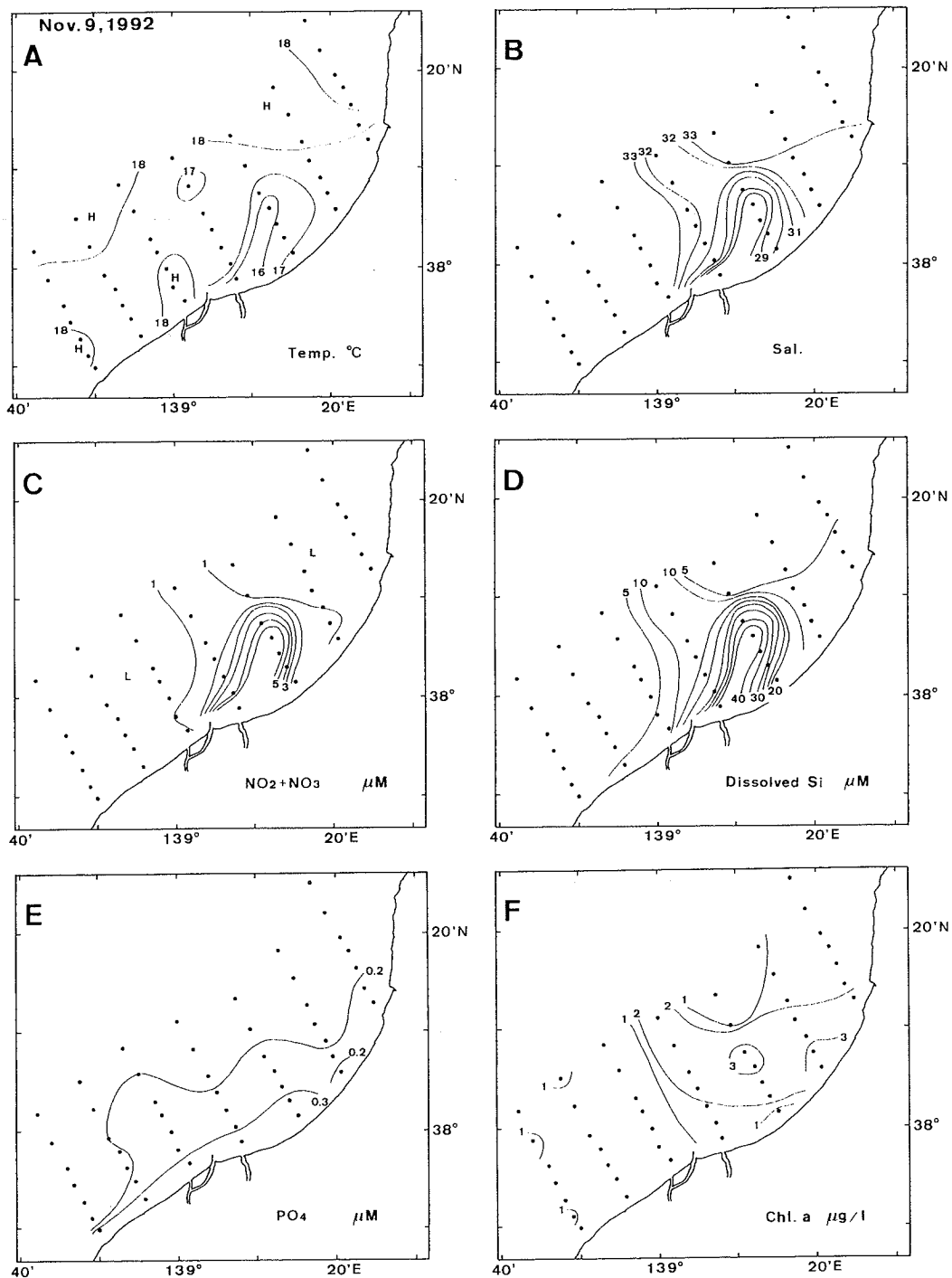


Fig. 4. Horizontal distributions of (A) temperature, (B) salinity, (C) nitrite plus nitrate, (D) dissolved silicon, (E) phosphate and (F) chlorophyll *a* at the surface off Niigata on Nov. 9, 1992.

し北東方向であり、海岸線に沿って延びていた5月、7月の場合とは異なっている。河川水ブルーム内における硝酸塩、溶存珪素の濃度は、5月、7月の場合と同様、低塩分域ほど高く、これらの栄養塩が、河川水に由来するものであることを示している。しかし、クロロフィル *a* は、低塩分域ほど高濃度という傾向はなく、河川水ブルームの先端付近で  $3.2\sim 3.6\ \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  を示し、周囲よりやや高濃度となっている。磷酸塩については、調査海域全域で  $0.3\ \mu\text{M}$  程度以下であり、河川水ブルームとの対応はみられない。一方、沖合においては、硝酸塩、溶存珪素は河川水ブルーム内よりも濃度は低いものの、5、7月の沖合水よりも高濃度である。またクロロフィル *a* は、 $1\ \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  以下の濃度の場合が多く、これは他の時期の沖合水と同程度である。

### 3.2. 河川水の拡散・混合に伴う栄養塩分布の季節変動

河川水ブルームの拡延方向、拡延面積は、5、7、11月の観測では、それぞれ異なっている。これらに影響す

る要因として、沿岸の流動、河川水の流出量および風等が考えられるが、本項では、流入した河川水が沿岸水と混合していく過程で、栄養塩濃度がどのように変動するか注目する。

河川から供給された栄養塩が、河川水ブルームの拡散・混合に伴って、どのように濃度が変化しているかを検討するため、5、7、11月の各季節における表層の栄養塩、クロロフィル *a* 濃度と塩分との関係を示した (Fig. 5)。

5月の硝酸塩濃度は塩分30以上、7月のそれは塩分31以上の水では検出限界以下に低下している。しかし、それより低塩分域では、少数の例外を除いて、塩分と硝酸塩の間には負の相関関係がみられている。11月については、プロットした塩分範囲内においては、硝酸塩と負の直線関係が認められる (Fig. 5A)。

溶存珪素は、5、7月には、塩分と負の関係を示しているが、1本の直線関係ではなく、塩分31付近で折れ曲がるようなカーブを描いている。それに対し、11月に

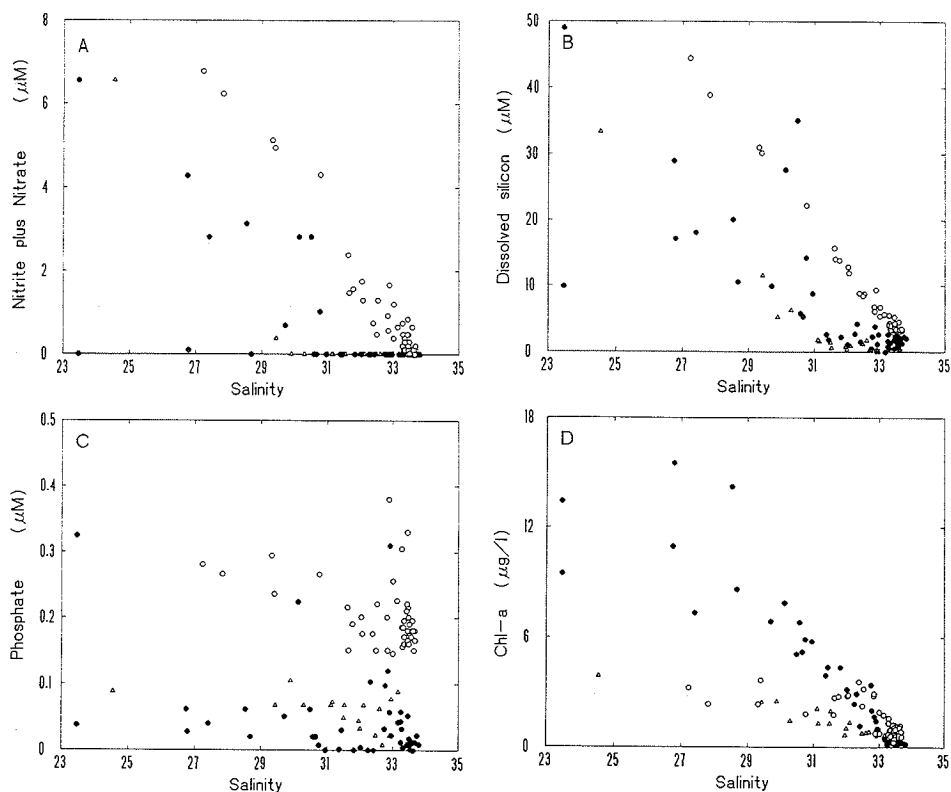


Fig. 5. Relationship between salinity and (A) nitrite plus nitrate, (B) dissolved silicon, (C) phosphate and (D) chlorophyll *a* at the surface. Open circles: July 19-22, 1991, open circles: Nov. 9, 1992.

は塩分に対して明瞭な負の直線関係を示している (Fig. 5B)。

磷酸塩については、硝酸塩、溶存珪素とは異なり、3回の観測ともに、塩分との間に特定の関係はみられず、塩分の変動に対する磷酸塩の変動は比較的小さい (Fig. 5C)。

クロロフィル *a* は、5月と7月には低塩分域ほど高濃度である傾向がみられ、特に7月については、塩分が23.5~33.8の範囲を変化する間に、クロロフィル *a* 濃度は15.5から0.1  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  まで変化している。11月は33以下の低塩分域では、クロロフィル *a* は0.7~3.6  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  の範囲に分布し、塩分との間に一定の傾向はみられていない (Fig. 5D)。

## 4. 考 察

### 4.1. 栄養塩分布の季節変動

5月の観測結果では、クロロフィル *a* 濃度は7月の場合よりも全体に低いものの、硝酸塩は塩分30以上の水域で枯渇しており、溶存珪素も塩分31付近で、下にふくらんだ曲線を示していた (Fig. 5A, B, D)。これは植物プランクトンによる栄養塩の消費があったことを示している。

7月には、硝酸塩は、塩分31以上の海域では枯渇しており、塩分と溶存珪素濃度の関係も、5月の場合と同様の変動パターンを示している (Fig. 5A, B)。またクロロフィル *a* は、5月に比べて著しく高濃度で、しかも低塩分域ほど、その傾向が顕著である (Fig. 5D)。このことは、河川水によって沿岸域に供給された栄養塩は、7月には、比較的、流入初期の段階から、速やかに植物プランクトンによって消費されていると考えられる。

しかし、11月の観測結果をみると、硝酸塩、溶存珪素濃度は、塩分と負の直線関係を示しており (Fig. 5A, B)、このことは、これらの栄養塩は塩分と同様、保存成分として分布していたことを示している。

沿岸域での栄養塩の挙動に関して、三保湾、中海、駿河湾、浜名湖 (MAEDA, 1953)、油壺湾 (高柳, 1993) では、溶存珪素と塩分との間には、負の直線関係がみられている。また東京湾 (才野, 1988)、大阪湾 (城, 1986) でも、栄養塩は保存成分として分布していることが報告されており、今回の新潟沿岸における11月の観測結果と一致している。

一方、ミシシッピー川 (BIEN *et al.*, 1958 を ASTON, 1978 から引用) や筑後川 (細川ほか, 1970) では、河川水の流入直後 (塩分 $\approx 0$ ) に、懸濁物質による吸着あ

るいはコロイド化による溶存状態の変化等の化学的な除去過程によって、水中の溶存珪素濃度が低下していることが指摘されている。1971年5月の信濃川河口域においても河川水が海水と接触直後、塩分が2以下の段階で、溶存珪素が水中から除去される様相が、部分的にみられている (川合・長田, 1993)。今回の11月の結果からは、観測した塩分範囲 (23以上) 内では、化学的あるいは生物的な栄養塩の除去の影響は少なかったといえるが、そのような除去過程について詳細に検討するには、より低い塩分範囲にまで観測域を拡大して、栄養塩の濃度変化を調べる必要がある。しかし、今回の観測範囲に限ってみても、化学的あるいは生物的除去の程度は、5,7月には大きく、11月には小さいという、明らかな季節による相違を示していた。

磷酸塩については、5,7月の河口域周辺で、わずかに濃度が高く、磷酸塩も他の栄養塩と同様、河川から供給されていることが示されたが、硝酸塩、溶存珪素に比べると河川水ブルーム内外での濃度差は小さい (Fig. 2E, 3E)。磷酸塩については、海域に流入後、塩分の存在下で、懸濁物質に吸着されることが知られており、新潟沿岸域でも同様のことが報告されている (永原, 1984)。檜山・永原 (1987) は、信濃川河川水に塩分を添加する実験を行った結果、塩分濃度が30.5のときに、磷酸塩は初期濃度の22.6%まで減少したことを報告し、磷酸塩は広い塩分範囲にわたって吸着を受けていることを示している。しかも、彼らは、この吸着は一様ではなく、懸濁物質の状態等によって吸着量が変化する可能性も指摘している。本論文では、新潟沿岸域における磷酸塩の分布に影響する環境要因として、懸濁物による吸着の可能性を指摘することはできるものの、詳しい検討を行うためには、改めて調査研究を行う必要がある。

### 4.2. 植物プランクトンに対する栄養環境

植物プランクトンの成長において、窒素と磷は最も重要な元素であり、これらの海水中における濃度の多寡が一次生産量を決定づけることが多い (たとえば PARSONS *et al.*, 1984; 高橋, 1991)。また珪藻等においては、このほかに珪素が必須であり、体成分の平均的な原子数比は、C:N:P:Si=106:16:1:15とされている (Redfield 比, 谷口, 1988)。新潟沿岸域に出現する植物プランクトンは、夏季から秋季にかけて、藍藻の *Trichodesmium* sp. がみられる場合もあるが、珪藻が優占することが報告されている (板野, 1978)。そこで新潟沿岸域の植物プランクトンは、上記の原子数

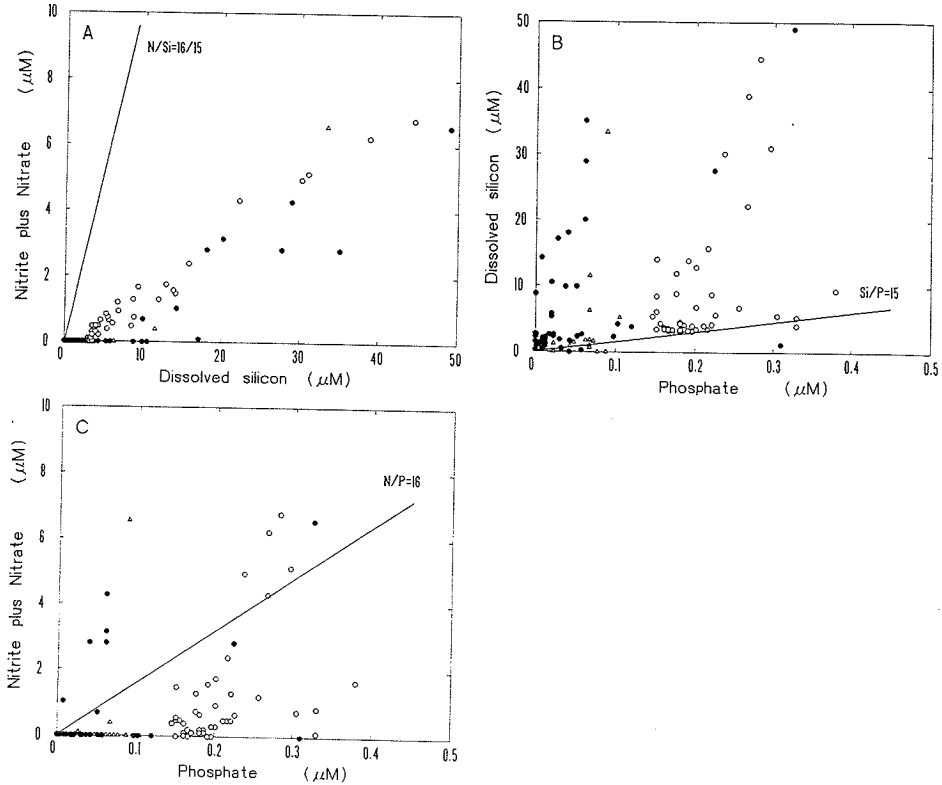


Fig. 6. Relationship between (A) dissolved silicon and nitrite plus nitrate, (B) phosphate and dissolved silicon and (C) phosphate and nitrite plus nitrate at the surface, with elemental atomic ratio which composed phytoplankton biomass (Redfield ratio). Open triangles: May 10-13, 1991, solid circles: July 19-22, 1991, open circles: Nov. 9, 1992.

比で元素を必要とすると仮定し、水中の栄養塩に含まれる原子数比を、珪藻の体成分のそれと比較するため、栄養塩相互の濃度散布図の中に、Redfield比を表す直線を描いた (Fig. 6)。

窒素と珪素の比は、5, 7, 11月のいずれにおいても、すべての定点で16/15より小さく、逆に珪素とリンの比は、大部分の定点で15より大きい (Fig. 6A, B)。このことは、植物プランクトンにとって、珪素は、常に窒素、リンよりも豊富に供給されていることを示している。窒素とリンの比は、各季節ともに、 $N/P=16$ の直線の両側に値が分布している (Fig. 6C) が、窒素が不足する場合の方が多く、特に5, 7月には検出限界以下に減少し、枯渇している定点が多い。本研究では溶存無機態の栄養塩類のみを対象としているので、有機態の窒素、リンあるいは微量物質等の役割についてはふれなかったが、信濃川や阿賀野川の影響下にある新潟沿岸域では、栄養塩の中で珪素は常に豊富に存在しているの対

し、窒素とリンは珪素に比べて乏しく、特に窒素が植物プランクトンの成長に対する制限要因になっていると考えられる。

### 5. 謝 辞

本論文について御助言と御校閲の労を賜った東北大学農学部谷口 旭教授にお礼申し上げます。海洋観測にご協力いただいた日本海区水産研究所調査船「みずは丸」の広橋昇保船長をはじめとする乗組員の方々、1991年7月の観測で著者にかかわって乗船され、観測にご尽力下さった日本海区水産研究所海洋環境部山田東也氏、試料の分析を手伝っていただいた布施加代子嬢に深謝します。本論文は著者が東北大学農学部に留学中、執筆したものであり、著者を快く送り出して下さった日本海区水産研究所海洋環境部長小川嘉彦博士、海洋動態研究室長平井光行博士をはじめとする研究室の皆様、および企画連絡室の担当者各位にお礼申し上げ



ます。

なお、本研究の一部は、平成3年度科学技術庁振興調整費による重点基礎研究「河口フロント域の微細構造と生物生産構造の解明」によって行ったものである。

## 文 献

- ASTON, S.R. (1978) Estuarine chemistry. *In*, Chemical Oceanography (2nd. ed.), Vol. 7, eds. Riley, J.P. and R. Chester, Academic Press. 361-440.
- BIEN, G.S., D.E. CONTOIS and W.H. THOMAS (1958) The removal of soluble silica from fresh water entering the sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **14**, 35-54.
- 檜山義明・永原正信 (1987) 河川による栄養塩等物質負荷量。海洋生物資源の生産能力と海洋環境に関する研究(第II期)成果報告書。科学技術庁研究開発局, 97-102.
- 細川 巖・大島文男・近藤倫彦 (1970) 筑後川感潮水域における溶存成分の濃度変化。日本海洋学会誌, **26**, 1-5.
- 板野英彬 (1978) プランクトン分布。沿岸漁場環境適正調査報告書(新潟県越後側沿岸海域), 新潟県水産試験場, 71-77.
- 城 久 (1986) 大阪湾における富栄養化の構造と富栄養化が漁業生産に及ぼす影響について。大水試研報, **7**, 1-174.
- 川合英夫・長田 宏 (1993) 信濃川等の河川排水と海水との混合過程。日水研報告, **43**, 9-54.
- 国立天文台 (1992) 理科年表, 平成4年版。丸善, 東京, 1040 pp.
- MAEDA, H. (1953) The relation between chlorinity and silicate concentration of water observed in some estuaries. II. *J. Shimonoseki Coll. Fish.*, **3**, 61-74.
- 永原正信 (1984) 新潟北部沿岸域の栄養塩類とクロロフィル *a* の季節変化。海洋生物資源の生産能力と海洋環境に関する研究, 北陸沿岸地域調査成果報告, 日水研, 85-97.
- PARSONS, T.R., M. TAKAHASHI and B. HARGRAVE (1984) Biological Oceanographic Processes. 3rd Ed., Pergamon Press, Oxford, 330 pp.
- 才野敏郎 (1988) 東京湾における栄養塩類の循環。沿岸海洋研究ノート, **25**, 114-126.
- STRICKLAND, J.D.H. and T.R. PARSONS (1968) A practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada*, **167**, 311 pp.
- 高橋正征 (1991) 海洋浮遊生態系の特徴。月刊海洋, **23**, 801-808.
- 高柳和史 (1993) 化学物質の濃度の沿岸海域での変動, その要因と時間スケール。沿岸海洋研究ノート, **30**, 153-164.
- 谷口 旭 (1988) 海とプランクトン, 海洋の化学環境条件。海洋と生物, **57**, 242-249.