

亜寒帯海域における栄養塩の分布と構成比の特性*

米田 義昭** · 戸屋 健治**

Characteristics on the Distribution and Composition of Nutrients in Subarctic Regions*

Yoshiaki MAITA** and Kenji TOYA**

Abstract

The characteristics of nutrient concentrations and their compositions were examined in the southern Okhotsk Sea near coast of Hokkaido and the North Pacific Ocean from lat. 39°N to 51°N along 180° longitude.

Higher concentrations of nitrate nitrogen and silicate silica were found in the intermediate cold water of the southern Okhotsk Sea. In the North Pacific Ocean, the concentrations of nutrients changed drastically across a subarctic boundary. The concentrations of nutrients in the northern regions of the boundary increased gradually towards the north. Higher Si/P ratios were also found in the euphotic zone of the northern regions compared with that of the southern regions of the boundary. Nitrate was found to be the main chemical species of nitrogen compounds in the euphotic zone of the Okhotsk Sea and the North Pacific Ocean. It is expected that the primary productivity in subarctic regions depends on nitrate nitrogen as the nitrogen source. This means that the primary production is maintained by continuous supply of nutrients from the intermediate water, in early summer season. Hence, the most important factor controlling the high levels of net primary productivity in subarctic regions is the quality of nutrients supplied to euphotic zone.

1. 緒 言

本研究は亜寒帯海域における化学環境を明らかにする目的から、一次生産力を支配する主要因子の一つである栄養塩の空間分布と栄養塩を構成するリン、窒素およびケイ素の3元素に注目して、それらの構成比について検討した。

ここでとり上げるオホーツク海および北太平洋亜寒帯海域については、これまで海洋物理学的な面から数多くの研究が行われ、海況ならびに海洋構造が明らかにされた(KAJIURA, 1949; WATANABE, 1962; MOROSHKIN,

1964; 木谷, 1973; FAVORITE *et al.*, 1976; 大谷 1977; 青田, 1979)。これらの海域は水産資源が豊富な好漁場である事から、高い生産を維持する機構を解明すべく、生態学的手法を駆使した調査研究が行われ、それらの研究成果は辻田(1977) および三島(1981)によりまとめられている。一方、北太平洋亜寒帯海域の化学環境に関する問題としては、主に、リン酸態リンの分布とその分布をもたらし要因について SUGIURA and YOSHIMURA (1964), 杉浦 (1970) の研究など数多くの報告がある。しかし、オホーツク海域における栄養塩の空間分布ならびに構成比に関する研究報告は北太平洋と比べてきわめて少ないのが現状である。したがって、本研究では北太平洋亜寒帯域における栄養塩の空間分布および構成比について詳しく再検討する一方、オホーツク海南部海域における栄養塩の空間分布、構成比および水塊による栄養塩の特徴を中心にまとめた。

* 1985年12月5日受理

北海道大学水産学部北洋水産研究施設業績第175号
Contribution No. 175 from the Research Institute
of North Pacific Fisheries, Faculty of Fisheries,
Hokkaido University.

** 北海道大学水産学部 Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Hakodate. 041 Japan.

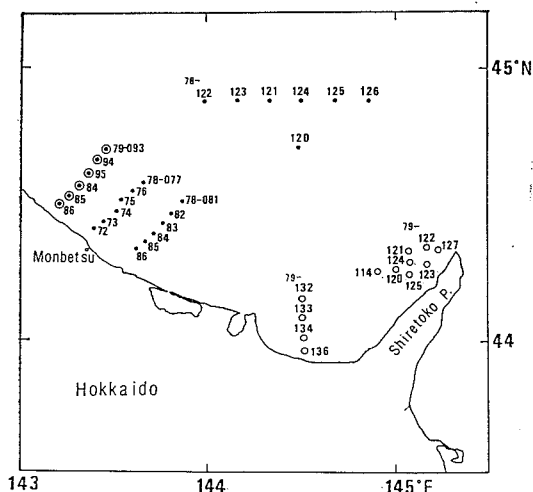


Fig. 1. Map of the Okhotsk Sea showing sampling stations. Closed circles and open circles in map show the sampling locations observed in June 1978 and June 1979, respectively.

2. 試料および方法

本研究に用いた海水試料は1978年と1979年の北大水産学部練習船北星丸第6次および第9次航海においてオホーツク海より (Fig. 1), また1982年と1984年の同練習船おしよ丸3世および4世による第90次および第3次航海において北太平洋の経度180度ラインに沿う北緯39度より51度までの観測点において採取された。海水の採水はナンゼン採水器によったが、採水後直ちにポリエチレン瓶に移し、急速凍結の後分析を行うまで -20°C の冷凍庫に保存した。

栄養塩は STRICKLAND and PARSONS (1972) に従い、オホーツク海域の試料は手分析により、また北太平洋の試料は Technicon Auto-analyzer AA-II を用いて自動分析された。

溶存酸素の定量は船上においてウインクラー法によった。水温および塩分の測定値は既存の資料 (北大水産学部, 1979, 1980, 1982, 1985) を引用した。

3. 水塊の定義

(1) オホーツク海

本研究の対象となったオホーツク海南部の北海道沿岸域については青田 (1979) の定義に従い、また沖合の中層および深層水については木谷 (1973) の水塊識別を参考にした。本論文中に用いるオホーツク海域の水塊名と

その定義については上述の2氏の論文を引用し、まとめると以下の通りである。

(i) 宗谷暖流水: 宗谷海峡から知床半島まではほぼ北海道の沿岸に平行で、しかも沖合の水とあまり混合せずに流れている水塊を宗谷暖流水と呼ぶ。この水塊の指標は塩分 33.6-34.0‰ の高塩分水である。

(ii) オホーツク海表層低塩分水: 北海道沿岸の約20渾沖以遠の50m以浅に見出される塩分32.5‰以下の低塩分水である。

(iii) 中冷水: 春期から晩秋期に認められる水温 $-1.0\sim-2.0^{\circ}\text{C}$ 、塩分33.0‰前後の水塊であり、水温の鉛直分布が中間層で最小となるいわゆる中冷構造をもつ水塊をいう。

(iv) 移行水: 中冷水よりもやや高い水温と塩分をもち、約100mから600mの深さに見出される。比容 $\delta t=150\text{ cl/ton}\sim 100\text{ cl/ton}$ の範囲がこの水塊の指標である。

(v) 深暖水: 上記の移行水の下層、すなわち600m以深に存在し $\delta t=100\text{ cl/ton}$ 以下を保有する水塊をいう。

(2) 北部北太平洋

北部北太平洋の海域については FAVORITE *et al.* (1976) に従って、亜寒帯・極前線・亜熱帯の三海域に分類した。1982年6月における経度180度ラインの鉛直断面図 (Fig. 5A) では北緯43度の200m以浅で水温と塩分の収斂はほぼ一致した分布を示して極前線帯を形成している。その北部には水温・塩分共に南北の勾配が著しい移行領域が存在する。そして北緯46度より北側は亜寒帯海域とみなされる。

4. 結果

(1) オホーツク海南部海域における栄養塩の分布と構成比

まず、Fig. 1 に示す海洋観測点から得られた水温と塩分の測定値に基づき、青田 (1979) の水塊分類に従って水塊と栄養塩濃度との関係を検討した。

(i) 宗谷暖流水の栄養塩

1979年6月におけるオホーツク海南岸域の水温・塩分・リン酸態リンおよび硝酸態窒素の分布を Fig. 2 (A, B) に示す。宗谷暖流水は北海道沖約10マイル程度の幅をもち、0~75mの深さに見出される。そこで塩分33.6‰以上、水温 $7.3\sim 11.0^{\circ}\text{C}$ の典型的な宗谷暖流水に分類される試水の栄養塩および溶存酸素濃度の単純平均値および標準偏差 (1σ) を求めて、Table 1 に示す。栄養塩および溶存酸素濃度は後述する水塊と比較して最も低い

溶存酸素量は全ての深さで過飽和になっている。

(ii) オホーツク海表層低塩分水の栄養塩

典型的なオホーツク海低塩分水は沖合の Stn. Ho 78120~78126 の表層部に見出されるので、これら7観測

点における 32.5% 以下 (30 m 以浅) の試水の栄養塩の溶存酸素濃度を平均して Table 1 に示した。栄養塩濃度は宗谷暖流水に比べて、リン酸態リンが約 2 倍、硝酸態窒素が約 8 倍と高くなっている。また、溶存酸素量はオホーツク海南岸の水塊の中で最も大きい。

(iii) 中冷水の栄養塩

中冷水はオホーツク海南岸域の Stn. Ho 78077, 78081, 78082 および沖合の 78120~126 の 100 m 以浅に存在している。Fig. 2 に示すように、沿岸域における水温分布の鉛直断面図から明らかなように、沖合から岸に向って楔状に広がっており、0°C 以下の水温極小層は沖合では 50~75 m 深に、沿岸部では 20 m 深に存在している。

中冷水の栄養塩は上記の 2 水塊に比し高い濃度を保持しているのが特徴である。その平均値を宗谷暖流水と比べるとリン酸態リンは 6.8 倍、硝酸態窒素は 36 倍、ケイ酸態ケイ素は 7.5 倍である。

(iv) 移行水および深暖水の栄養塩

移行水および深暖水の定義に該当する水塊は Stn. 78120~126 の水深 100 m 以深と知床半島沖の Stn. 79113~125 (Fig. 1) の 70 m 以深に見出される。Fig. 3 に Stn. 79122 の水温、塩分、比容アノマリーおよび栄養塩の鉛直変化と水塊区分の深さを示してある。栄養塩濃度は深度と共に増大するが、リンおよび窒素とケイ素の鉛直変化傾向が異なっている。すなわち、リンと窒素は水深 100~600 m の層に幅広い極大分布を持つが、ケイ素はゆるやかな増加の傾向を示し、大きな極大は認められない。このことは、REDFIELD *et al.* (1964) による栄養塩を構成する 3 元素と AOU の関係 (Fig. 4A) をみるときわめて明瞭になる。すなわち、水塊区分に従うと、オホーツク海低塩分水は AOU が負の値、移行水は 0~3.5 ml l⁻¹ の範囲、そして深暖水は 3.5~6.2 ml l⁻¹ の範囲にある各水塊区分の範囲にある。各水塊区分の範

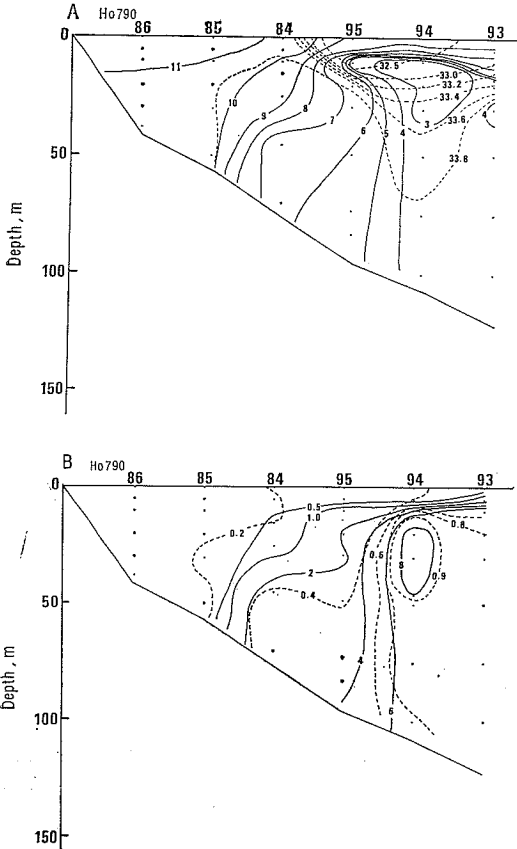


Fig. 2. (A, B) Vertical sections for temperature, °C and salinity, ‰ (A), phosphate-P and nitrate-N, µg atoms l⁻¹ (B) at the stations off Monbetsu in the southern Okhotsk Sea in June 1979.

Table 1. Mean concentrations of nutrients and dissolved oxygen at the observational stations near Hokkaido in the Okhotsk Sea in June 1978 and June 1979.

	Phosphate-P	Nitrate-N	Nitrite-N	Ammonium-N	Silicate-Si	D.O.
	µg atoms l ⁻¹					ml l ⁻¹
Soya warm water	0.21±0.07	0.36±0.25	0.12±0.06	0.54±0.38	3.14±2.70	7.36±0.30
Low salinity waters	0.47±0.20	3.1 ±3.5	0.15±0.07	0.45±0.27	7.33±2.51	8.75±0.69
Intermediate cold waters	1.44±0.18	12.9 ±4.4	0.20±0.05	0.66±0.25	23.5 ±4.80	7.96±0.59

Samples for nutrient analyses except silicate-Si were collected at the observational stations Ho 78069-081 in June 1978. Samples for silica analyses were collected at nearly the same locations in June 1969.

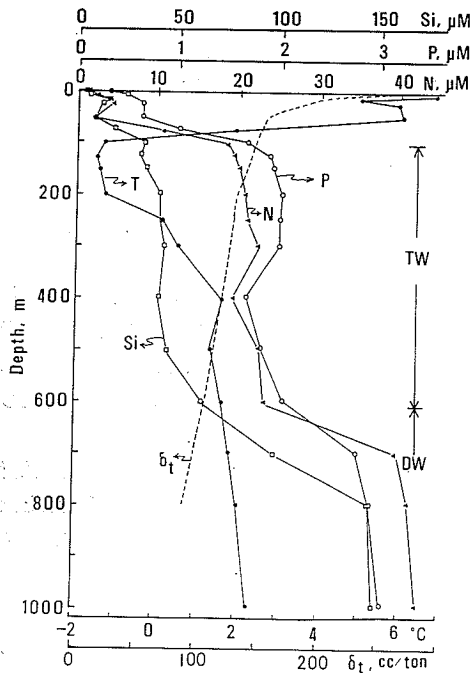


Fig. 3. Vertical distribution of phosphate-P, nitrate-N, silicate-Si, temperature and specific volume anomaly at the station Ho 79122 ($44^{\circ}20.3'N, 145^{\circ}10.0'E$) off Shiretoko in the Okhotsk Sea, June 22, 1976.

TW and DW show the transition waters and the deep warm waters, respectively.

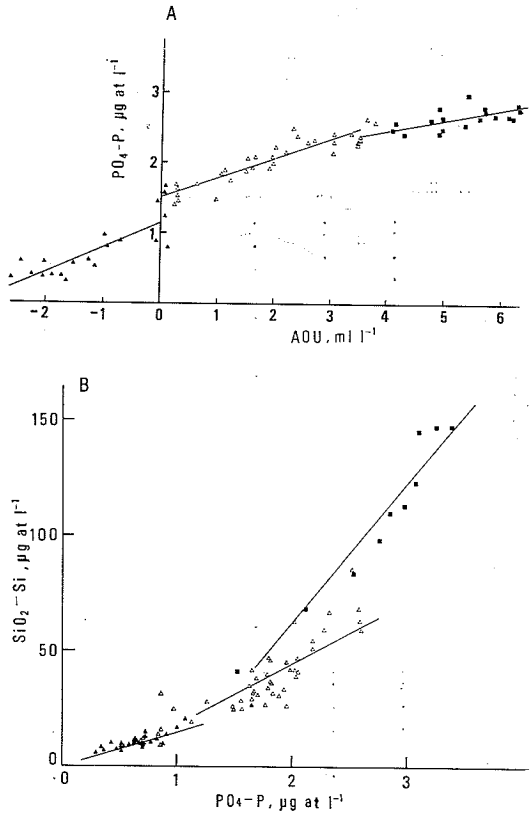


Fig. 4. (A, B) The correlations between AOU and phosphate-P (A), between phosphate-P and silicate-Si in typical water masses at the stations from Ho 78120 to 78126 (B). Symbols of solid triangle, open triangle and solid square show the surface low salinity waters, the transition waters, and the deep waters in the Okhotsk Sea, respectively.

図におけるみかけの溶存酸素消費量 (AOU) と栄養塩の関係 (Fig. 4A) および栄養塩相互間における相関関係 (Fig. 4B) より、水塊によって栄養塩の組成が明らかに異なっているのが分かる。AOU は栄養塩の再生量に関係する量と考えるならば、水塊によって再生される栄養塩の組成が異なっていることを意味する。栄養塩の各成分について、水塊によってどのような再生比を持つかをそれぞれの関係から求め Table 2 に示す。AOU 1 ml に対応する栄養塩の各成分の値は水塊によって異なっている。リンはオホーツク海低塩分水の値が最も大きく、移行水、深暖水の順で減少するのに対し、ケイ素はリンと全く逆の関係を示している。窒素については 3 水塊による系統的な変化は認められずほぼ一定の値を示している。AOU を規準とした場合に 3 元素で異なった値をとる理由としては、オホーツク海における水塊の層重構造 (青田, 1979) に起因すると考えられる。杉浦 (1970) が指摘しているように、ケイ素の再生は、密度の比較的高い層、す

なわち比較的深いところで起こり、しかも、必ずしもリンのように酸素消費を伴わなくとも起こるためである。

(2) 北部北太平洋海域における栄養塩の分布と構成比

経度 180 度に沿う北緯 39 度より 51 度までの鉛直断面における水温、塩分および栄養塩の分布を Fig. 5(A-E) に示す。栄養塩の各成分は南から北に向ってその濃度を高めるが、北緯 43 度付近の 200 m 以浅に栄養塩濃度が極端に変わる不連続面が認められる。この不連続面は水温と塩分の分布から識別される亜寒帯極前線の位置と一致する。極前線におけるリン、窒素 (硝酸態) およびケイ素の 200 m 以浅の値は、それぞれ、1.0, 10 および 15 $\mu g at l^{-1}$ である。極前線の北側の栄養塩は北に向って次

亜寒帯海域における栄養塩の分布と構成比の特性

Table 2. The mutual concentrations of nutrients correspond to 1 ml of apparent oxygen utilization in the southern Okhotsk Sea.

Water mass	PO ₄ -P*	NO ₃ -N*	SiO ₂ -Si**
	μg atoms l ⁻¹		
Surface low salinity waters	0.34 (σ=0.87, n=20)†	6.59 (0.84, 20)	—
Transition waters	0.25 (0.94, 36)	4.10 (0.72, 36)	15.5 (0.91, 40)
Deep warm waters	0.15 (0.70, 18)	5.26 (0.57, 18)	29.8 (0.95, 12)

* Phosphate-P and nitrate-N were analysed using the water samples collected from the stations Ho 78120-126 in June 1978.

** Silicate-Si was analysed using the water samples collected from the stations Ho 79113-127 in June 1979. The value of Si in the Surface low salinity waters was not available, because the waters from off Shiretoko were mixed by the Soya warm waters. (see also Fig. 3)

† The values in parentheses show the standard deviation (σ) and the sample numbers (n), respectively.

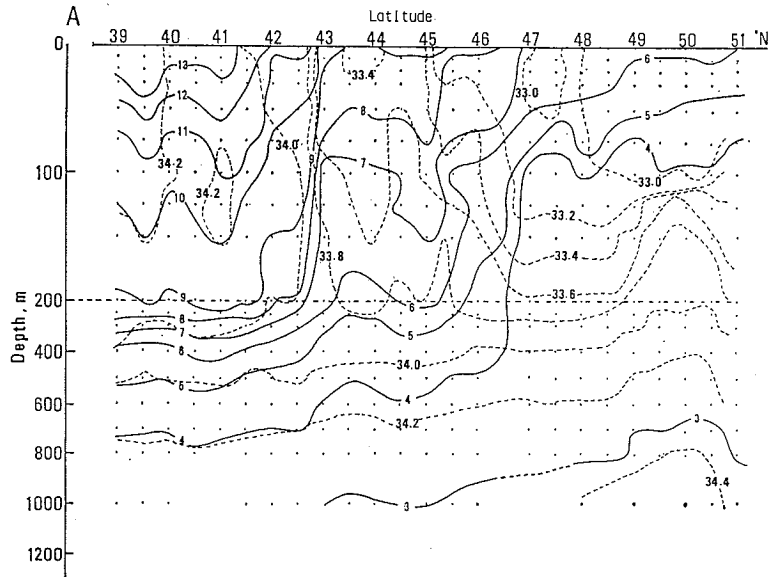


Fig. 5. (A-E) Vertical sections for temperature, °C and salinity, ‰ (A), phosphate-P (B), nitrate-N (C), silicate-Si (D) expressed as μg atoms l⁻¹, and dissolved oxygen, ml l⁻¹ (E) on lat. 39°-51°N along 180° longitude.

第にその濃度を増大させ、北緯 48-49 度付近において最大濃度に達する。この海域の 50 m 以浅におけるリン、窒素（硝酸態）およびケイ素の濃度は、それぞれ 1.6, 15 および 20 μg at l⁻¹ にも達する。また、窒素三態の総量に対し硝酸態窒素の占める割合は亜寒帯域の 50 m 以浅の総量 15.6 μg at l⁻¹ に対し硝酸態窒素は平均 85.6% を占め、窒素源の主成分となっている (Table 3)。

つぎに FAVORITE (1976) の水塊分類に従って極前線

の南北の栄養塩の特徴をみるため、亜寒帯海域の 39°00' N~40°30' N の測点と亜寒帯海域の 46°30' N~49°00' N の測点について検討を加えた。Table 3 は 0~50 m および 0~150 m の層間における栄養塩の平均濃度が示されている。2つの層に分けた理由は、前者が一次生産の活発に起こっている層、後者は水温と塩分の分布図からみて、南北の海洋構造に大きな変化がみられる層であることによる。Table 3 に示す通り、いずれにしても、亜寒帯海

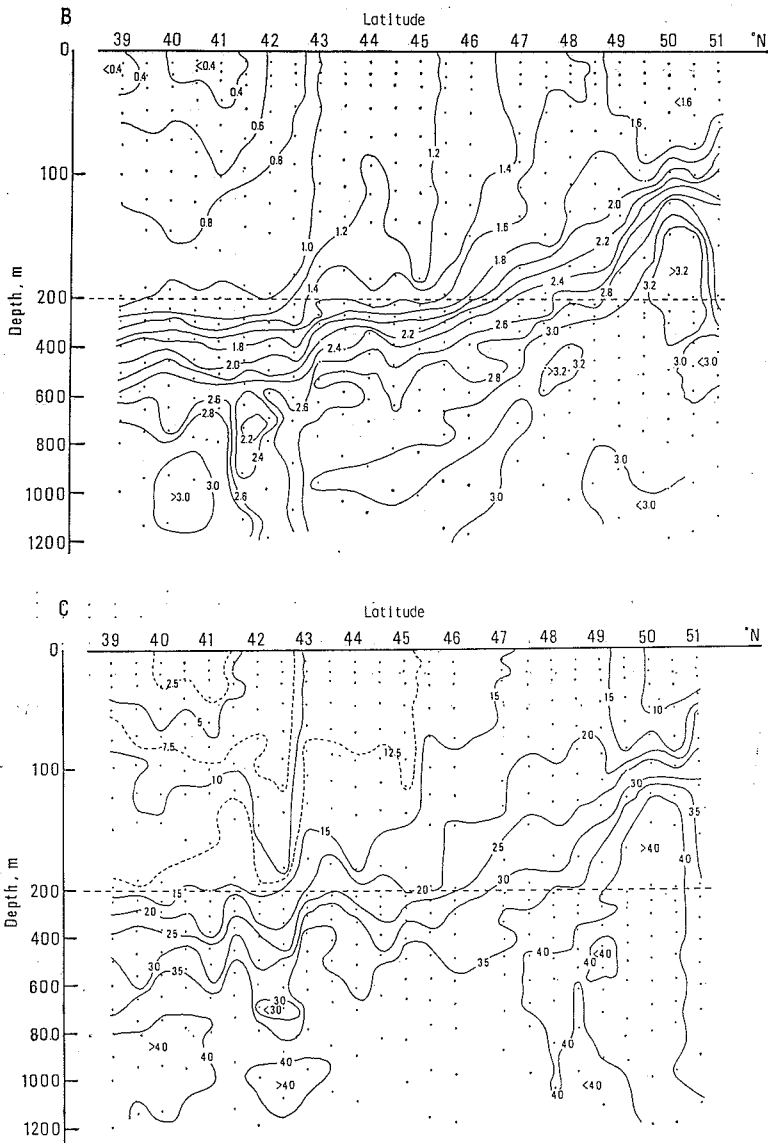


Fig. 5. (continued) (B-C)

域の平均濃度は高くリン、窒素、ケイ素について亜熱帯海域の 2~4 倍の値を示している。

亜熱帯海域と亜寒帯海域のリンに対する硝酸態窒素またはケイ素との相関関係を Fig. 6(A, B)に示す。リンと窒素の相関関係をみると、亜熱帯海域と亜寒帯海域の P:N 原子比(勾配)はそれぞれ 14.7 と 15.0 とほぼ等しいが、切片が異なる平行直線となっている。x 軸切片は前者が 0.18, 後者は $0.49 \mu\text{g at l}^{-1}$ である。一方、リンとケイ素の相関関係をみると (Fig. 6B) 亜熱帯海域と亜寒帯海域

における直線は異なる勾配をもっており、明らかにリンと窒素との相関関係とは異なっている。すなわち、2 水塊の 150 m 以浅の表層部におけるリン:ケイ素の原子比は亜熱帯海域が 23.6, 亜寒帯海域は 36.7 である。亜寒帯海域の栄養塩は量の豊富さに加えて、質的にはケイ素に富む性質を有している。ケイ酸態ケイ素および硝酸態窒素が亜寒帯海域の表層水に豊富な訳は、湧昇流によるのか、あるいは鉛直混合によるのかを結論づけることはできないが、ケイ素と硝酸態窒素がともに陸起源すなわ

亜寒帯海域における栄養塩の分布と構成比の特性

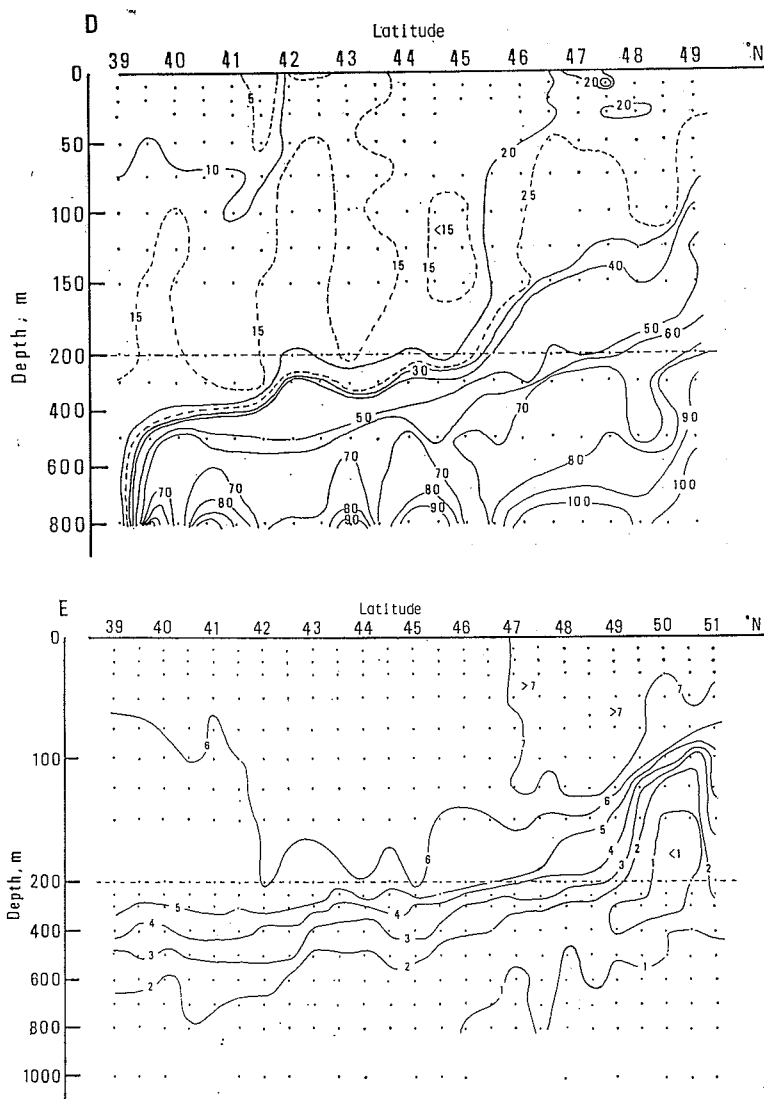


Fig. 5. (continued) (D-E)

ち河川水からの供給であるとは考えられないので、下方から輸送されたとしても誤りではないだろう。

5. 考 察

オホーツク海および北太平洋亜寒帯海洋前線以北の生産層における栄養塩は濃度の大きさに加え、質の面からも特徴がある。栄養塩相互の相関関係、すなわちリン：窒素：ケイ素の比からみた亜寒帯海域表層水の特徴は次の3つに要約される (Table 4)。すなわち、(1) P:Nの原子比が植物プランクトンの生体のもつ比に近い値であ

る。(2) 表層水に存在する無機窒素の化学型はその大部分が酸化型の硝酸態窒素である。(3) 亜寒帯表層水のP:Si原子比は36.7、オホーツク海南部海域の移行水は26.4を示し、亜熱帯表層水および宗谷暖流水に比べ著しく大きい。

一次生産が活発に起こっている表層ではリンよりも窒素源が枯渇するためN:P原子比はブルーミング末期には著しく小さな値を示す現象がしばしば見られる(米田, 1976)。本研究を実施した6月中旬、この海域は植物プランクトンのブルーミングがすでに終了した時期であると

Table 3. Mean concentrations of nutrients in the samples from the euphotic layer and subsurface layer of the North Pacific Ocean.

	Subtropical 39°00'N-40°30'N	Subarctic 46°30'N-49°00'N
	Concentration μg atom/l	
Euphotic layer (0-50 m)		
Phosphate-P	0.57±0.11	1.42±0.22
Nitrate-N	5.82±2.00	13.34±2.37
Nitrite-N	0.36±0.20	0.26±0.06
Ammonium-N	1.61±1.16	1.98±0.95
Silicate-Si	5.47±2.55	22.66±3.96
Subsurface layer (0-150 m)		
Phosphate-P	0.70±0.18	1.52±0.27
Nitrate-N	7.61±2.98	15.30±4.00
Nitrite-N	0.38±0.18	0.28±0.13
Ammonium-N	1.65±1.16	1.84±0.87
Silicate-Si	8.75±4.60	25.96±9.25

Samples for nutrient analyses except ammonium-N were collected in June 12 to June 17, 1984. Samples for ammonium-N were collected in June 12 to June 22, 1982.

Table 4. Atomic ratios of P:N:Si in the subsurface layer (0-150 m in depth) of the North Pacific Ocean and the Okhotsk Sea, in early summer.

	P	N	Si
Pacific Ocean			
39°00'-40°30'N	1	14.7	23.6
46°30'-49°00'N	1	15.0	36.7
Okhotsk Sea			
Surface low S.W.	1	17.6	15.1
Transition W.	1	15.5	26.4
Deep warm W.	1	15.5	59.9

予想されるにも拘らず、窒素源の枯渇が認められない。しかも、残存している窒素の化学型は硝酸態窒素である。この事実は植物プランクトンの必要とする窒素源が、ブルーム終了後においても酸化型の硝酸態窒素によってまかなわれていることを意味する。一般に海洋における一次生産は硝酸態窒素を窒素源とする場合を長期循環型の生産、アンモニア態窒素を窒素源とする場合を短期循環型の生産として区別している（たとえば VACCARO, 1965）。後者の循環は生産層内における一次生産者と二次生産者または従属栄養生物の間での窒素源のやりとり

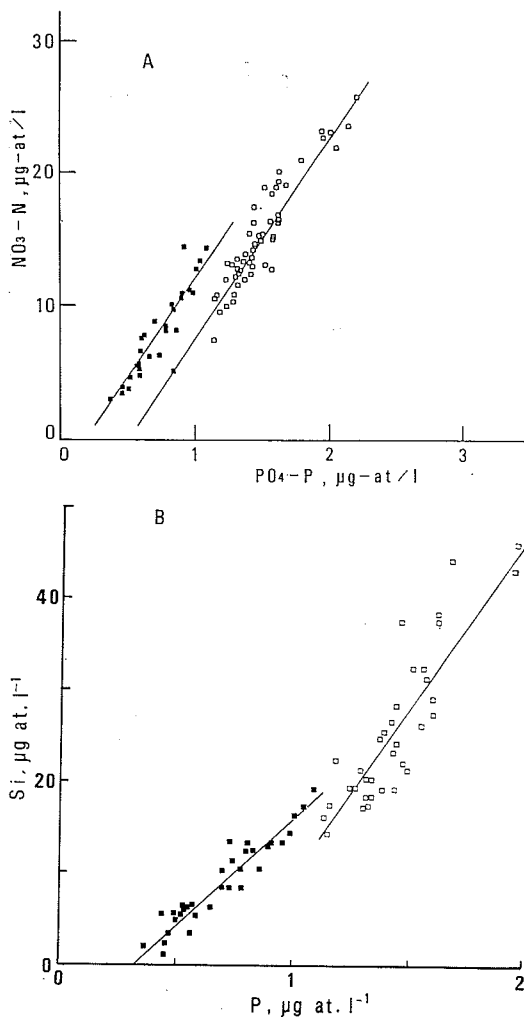


Fig. 6. (A,B) The correlations between phosphate-P and nitrate-N (A), between phosphate-P and silicate-Si (B) in surface waters of the North Pacific Ocean. Solid squares show subtropical waters from 39°00'N to 40°30'N, and open squares show subarctic waters from 46°30'N to 49°00'N.

であって、実質的には純生産が見込めないが、前者は深層または異水塊から供給された窒素源に依存した一次生産であるため生産層内では大きな生産の増加すなわち純生産が見込まれる。亜寒帯海域の一次生産の主要なタイプは長期循環型である。

P:Si 原子比の大きさは植物プランクトンの種組成に影響を及ぼすかも知れない。TSUNOGAI and WATANABE (1983) によれば、植物プランクトンの種組成を決

定する一義的要因としてケイ素の重要性を挙げている。オホーツク海における植物プランクトンの種は周年にわたり珪藻が優占し (KAWARADA, 1960), 植物プランクトンの現存量の 70~100% が珪藻種によって占められる (PETELIN, 1966) という生物学的証拠やオホーツク海の底質図 (PETELIN, 1966) から全面積の 50% 以上が珪藻軟泥または珪藻を含むシルトであるという事実からも珪藻種の優越性が裏付けられる。また, 太平洋亜寒帯域においてもオホーツク海におけると同様に珪藻が卓越する海域であるという研究報告も数多く見られる (たとえば谷口, 1981)。このような生産機能を維持するための要因としてケイ素とリンの存在比 (恐らく $Si/P < 25$) が重要である。海洋において珪藻類の豊富さは, 二次生産以降の栄養段階を決定する鍵であるとする PARSONS (1977) の説を受け入れるならば, 亜寒帯海域において人類が必要とする蛋白資源, すなわち魚に至る経路は海水に溶存しているケイ素と硝酸態窒素の豊富さによって支配されているといえよう。

謝辞: 試料採取に御協力いただいた北星丸とおしよろ丸の船長, 乗組員並びに研究員の諸氏に厚く御礼申し上げます。栄養塩の分析に御助力いただいた海洋化学前教授深瀬茂先生並びにスタッフ一同に感謝申し上げます。また本論文の校閲にさいし, 北大水産学部, 大谷清隆博士より貴重な御助言をいただいた。併せて感謝の意を表します。

文 献

- 青田昌秋 (1979) オホーツク海北海道沿岸海域の海況変動. 沿岸海洋研究ノート, **17**, 1-11.
- FAVORITE, F., A.J. DODIMEAD and K. NASU (1976) Oceanography of the Subarctic Pacific region, 1960-71. Bull. Int. N. Pacific Fish. Commn., **33**, 1-187.
- 北大水産学部 (1979) 海洋調査漁業試験要報, No. 22, 272 pp.
- 北大水産学部 (1980) 海洋調査漁業試験要報, No. 23, 332 pp.
- 北大水産学部 (1983) 海洋調査漁業試験要報, No. 26, 364 pp.
- 北大水産学部 (1985) 海洋調査漁業試験要報, No. 27, 390 pp.
- KAJIURA, K. (1949) On the hydrography of the Okhotsk Sea in summer. J. Oceanogr. Soc. Japan, **5**, 1-8.
- KAWARADA, Y. (1960) A contribution of microplankton observations to the hydrography of the northern North Pacific and adjacent sea. III. Plankton diatoms of the eastern Okhotsk Sea in the period from June to August 1957. Mem. Kobe Mar. Obs., **14**, 73-80.
- 木谷浩三 (1973) オホーツク海の底冷水・中冷水に関する漁場学的基礎研究. 博士論文, 北海道大学, 118 pp.
- 米田義昭 (1979) 太平洋沿岸の海洋構造と生産力. 水産海洋研究会報, **34**, 66-70.
- 三島清吉 (1981) 亜寒帯海洋前線周辺海域における生物群集と海洋環境. 北海道大学水産学部北洋水産研究施設業績集 (特別号, 昭和56年), 215 pp.
- MOROSHKIN, K.V.A. (1964) A new pattern of surface currents in the Okhotsk Sea. Okeanologia, **4**, 641-643 (in Russian).
- 大谷清隆 (1977) 北太平洋の海洋構造と変動. 水産海洋研究会報, **31**, 66-71.
- PARSONS, T.R. (1979) Some ecological, experimental and evolutionary aspects of the upwelling ecosystem. South Afr. J. Sci., **75**, 536-540.
- PETELIN, V.P. (1966) Okhotsk Sea. In, Encyclopedia of Oceanography, ed. R.W. FAIRBRIDGE, Reinhold Publishing Corporation, New York, 651-664.
- REDFIELD, A.C., B.H. KETCHUM and F.A. RICHARDS (1960) The influence of organisms on the composition of sea-water. In, The Sea, ed. M.N. HILL, **2**, 26-77.
- STRICKLAND, J.D.H. and T.R. PARSONS (1972) A practical handbook of seawater analysis. Fish. Res. Bd. Canada, Ottawa, 311 pp.
- SUGIURA, Y. and H. YOSHIMURA (1964) Distribution and mutual relation of dissolved oxygen and phosphate in the Oyashio and the northern part of Kuroshio region. J. Oceanogr. Soc. Japan, **20**, 14-23.
- 杉浦吉雄 (1970) 物質の分布とそれをもたらす要因. 海洋科学基礎講座, **10**, 東海大学出版会, 東京, 269-297.
- 谷口 旭 (1979) 極前線付近の植物プランクトン. 水産海洋研究会報, **35**, 39-43.
- 辻田時美 (1977) 北太平洋亜寒帯の生産力に関するモデリングについて. 北海道大学水産学部北洋水産研究施設業績集, 辻田時美教授退官記念論文集, 1-5.
- TSUNOGAI, S. and Y. WATANABE (1983) Role of dissolved silica in the occurrence of phytoplankton bloom, J. Oceanogr. Soc. Japan, **39**, 231-239.
- VACCARO, R.F. (1965) Inorganic nitrogen in sea water. In, Chemical Oceanography, Vol. 1, ed. RILEY, J.P. and G. SKIRROW, Academic Press, London and New York, 365-408.
- WATANABE, K. (1962) Summary of sea ice conditions off the coast of Hokkaido. Oceanogr. Mag., **14**, 16-27.