

駿河湾における窒素およびリンの季節変動

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2008-01-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 名取, 雄太, 岩田, 樹哉, 篠村, 理子, 鈴木, 款 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00000388

駿河湾における窒素およびリンの季節変動

名取雄太¹・岩田樹哉²・篠村理子²・鈴木 款³

Seasonal variation of nitrogen and phosphorus pools in the Suruga Bay

Yuuta NATORI¹, Tatsuya IWATA², Yoshiko SHINOMURA²
and Yoshimi SUZUKI³

Abstract Elemental stoichiometry of inorganic and organic matter, especially for nitrogen (N) and phosphorus (P), is an important parameter for understanding of biogeochemical cycles within marine environments. We determined the pools of N and P for dissolved and particulate organic matter (DOM and POM, respectively) and inorganic matter in the Suruga Bay. Seawater samples were taken from 0 m to 1500 m in February, April, July, October, and December, 2001. Nitrate plus nitrite ($\text{NO}_3 + \text{NO}_2$), phosphate (PO_4), dissolved and particulate organic nitrogen (DON and PON, respectively) and those of phosphorus (DOP and POP) were measured, and then N : P ratios were calculated for each pool. N : P ratios showed seasonal variation and notable differences among the pools: N : P ratio was 0 - 15 for the inorganic pool [$(\text{NO}_3 + \text{NO}_2) : \text{PO}_4$], 20 - 30 for DOM (DON : DOP) and 10 - 16 for POM (PON : POP). As a result, N: P ratio for inorganic and POM pools were lower than Redfield ratio (= 16 : 1), while that for DOM pool was higher. In other words, N was more deficient than P for inorganic and POM pools. In contrast to this result, P was more deficient than N for DOM. Based on these results, we propose that PON is preferentially remineralized over POP, while DOP is preferentially remineralized over DON in the Suruga Bay.

Key Words: Nitrogen, Phosphorus, N : P-ratio, Redfield ratio, Suruga Bay

はじめに

近年、地球温暖化問題において海洋の物質循環の重要性が指摘されるようになってきた。

海洋における物質循環では、海洋における一次生産者である植物プランクトンの役割が重要である。植物プランクトンは表層で無機物を取り込み、光合成を行うことによって有機物を生成し、死後深層に沈降していき無機物に分解されることによって物質の変換、運

搬を行っている。このような表層から深層への生物活動に伴う物質の流れを生物ポンプと呼んでいる(鈴木ほか, 1997)。植物プランクトンはこの生物ポンプの中心的な存在であり、海洋における物質循環のもっとも重要な担い手になっているといえる。

この植物プランクトンの生産にとって重要なのが、海洋に溶け込んでいる無機態の窒素やリンといった栄養塩である。栄養塩は植物プランクトンの生長に必要不可欠であり、植物プランクトンの生産能力を決める

¹静岡大学理学部生物地球環境科学科, 〒422-8529 静岡市大谷836

¹Department of Biology and Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529 Japan
E-mail:r235017@ipc.shizuoka.ac.jp(Y.N.)

²静岡大学大学院理工学研究科, 〒422-8529 静岡市大谷836

²Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529 Japan
E-mail:r5744002@ipc.shizuoka.ac.jp(T.I.)
r5744004@ipc.shizuoka.ac.jp(Y.S.)

³静岡大学理学部地球科学教室 〒422-8529 静岡市大谷836

³Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529 Japan
E-mail:seysuzu@ipc.shizuoka.ac.jp(Y.S.)

大きな要因となっている(Cullen *et al.*, 1991). そのため、海洋の環境を知るうえで窒素やリンの動態に関する研究は非常に重要である。

この窒素、リン循環における研究では、これまで窒素とリンの無機態の濃度に主に焦点が当てられてきた(Butler *et al.*, 1979). しかし、最近の研究において有機態の窒素やリンが栄養塩の水中での動態に影響しているということがわかってきた(Ittekkot 1996). したがって、窒素、リン循環の研究をするためには、無機態だけでなく有機態の窒素やリンも含めたすべての窒素およびリンのプールを見る必要があるといえる。

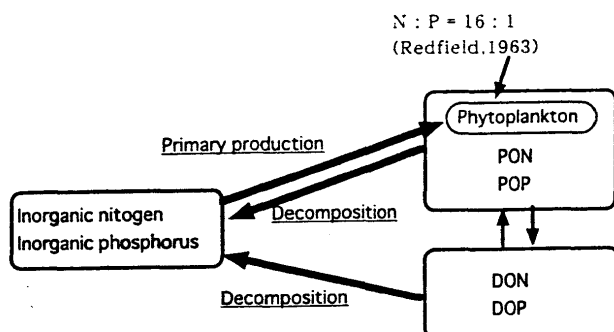


図1 海洋における窒素およびリンの循環モデル。
Fig. 1 A model on marine geochemical cycle of nitrogen and phosphorus.

図1に海洋における窒素とリンの簡単な循環図を示した。ここでは海洋における窒素およびリンを無機物、粒子状有機物、溶存態有機物の大きく3つのプールに分けている。海洋において窒素とリンはおおよそこのように循環していると考えられる。この海洋における窒素とリンの関係についてRedfield *et al.* (1963)では、植物プランクトンの組成比を測定し、窒素とリンのあいだには、 $N:P=16:1$ の一定の関係がある報告している。そしてこれをもとにしたRKRモデルでは、植物プランクトンによる栄養塩の取り込みや有機物の分解および無機化といったフラックスにおいて、窒素とリンは常にこの16:1という一定の比をもって挙動しているとしている。しかし、最近の研究では海洋表層において $N:P$ 比はかならずしも一定にならないという報告がなされている。実際にMillero (1996)では、溶存無機の $N:P$ 比は海洋表層において、太平洋ではレッドフィールド比16:1よりも低い値になり、大西洋では逆にレッドフィールド比よりも高い値になると報告している。このことは、窒素とリンは必ずしもこのような一定の比で連動して挙動しているわけではないことを示唆している。つまり、窒素とリンの挙動には違いがあると考えられる。窒素とリンはどちらも海洋における一次生産者である植物プランクトンの生産能力を制限するため、海洋における栄養塩の循環を考えるうえで、このような窒素とリンの挙動の違いを無視することはできない。

窒素とリンの挙動の違いに関するこれまでの研究では、無機態の窒素およびリンから考察を行ったものが多く、有機物から考察を行っている研究例は比較的少ない。しかし、海洋における窒素とリンの挙動の違いを明らかにするためには、無機態からだけでなく有機態の窒素、リンからも考察する必要がある。また、無

機物、粒子状有機物、溶存態有機物といった各プールの挙動を個々に見るだけでなく、これらすべてのプールについての窒素とリンの挙動を知ったうえで、それぞれのプールの相互関係も含めて考察する必要があると考える。

以上のことから本研究では、海洋での有機物の生産および分解過程における窒素とリンの挙動の違いを知るために、駿河湾において季節変動の観測を行い、まず無機物、粒子状有機物、溶存態有機物のそれぞれについて窒素とリンの挙動を明らかにする。そしてそれをもとに、有機物の生産および分解過程における窒素とリンの挙動の違いについて $N:P$ 比などから考察を行うことにする。

観測とサンプリング

観測は、駿河湾において静岡県水産試験場の観測船『駿河丸』で行った。駿河湾のほぼ中心部に位置するSt.

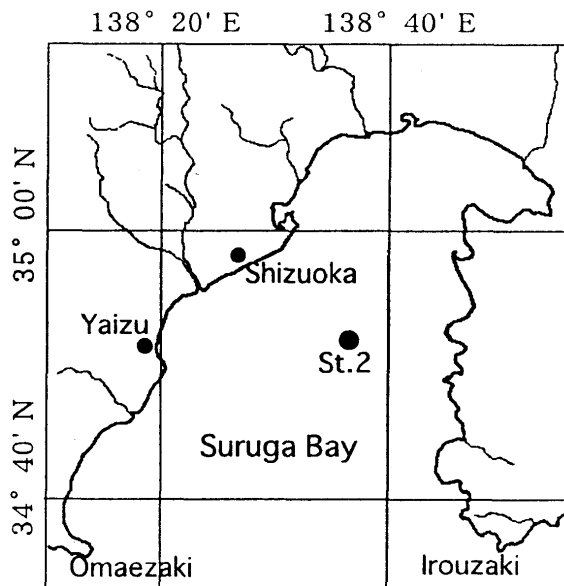


図2 観測地点。
Fig. 2 Location of the sampling point in the Suruga Bay.

2において2001年の2月、4月、7月、10月、12月の計5回の調査を行った。観測地点については、図2に示した。

海水サンプルは、表層から海底までCTD-キャセロールマルチサンプラー(CTD-CMS)に10 lニスキンボトルを12本取り付け付けたものと表面採水用のバケツを用いて各地点12~13層の採水を行った。採水、ろ過用のボトルおよび器具類は、5%エキストラMA02 (MERCK-7553)と3~4 N塩酸によってあらかじめ洗浄したものをを用いた。

硝酸塩+亜硝酸塩(NO_3+NO_2)、リン酸塩(PO_4)および全窒素(TN)、全リン(TP)用の海水サンプルは、各観測地点の表面から海底までの全層でサンプリングを行った。サンプルはニスキンボトルから直接100 mlポリエチレンボトルに採取し、測定まで冷凍保存した。

粒子状有機窒素(PON)および粒子状有機リン(POP)用サンプルは、St. 2において表層から300 m付近まで

の7~8層でサンプルを採取した。3 lのポリエチレンボトルにニスキンボトルから直接海水をとり、船上にて2~3 lろ過を行った。フィルターはPON, POP同時測定用に47 mmメンブレンフィルター(ポリカーボネイト製, 孔径0.4 μm)を用いた。これらのフィルターサンプルは測定まで冷凍保存した。なお本研究では、ろ過用のフィルターはすべてADVANTEC社製を用いており、ろ過は吸引ろ過を行った。

全有機窒素(TON), 全有機リン(TOP)および溶存態有機窒素(DON), 溶存態有機リン(DOP)はTN, TPおよび栄養塩から以下の式を用いて算出している。

$$[\text{TON}] = [\text{TN}] - [\text{NO}_3 + \text{NO}_2]$$

$$[\text{TOP}] = [\text{TP}] - [\text{PO}_4]$$

$$[\text{DON}] = [\text{TON}] - [\text{PON}]$$

$$[\text{DOP}] = [\text{TOP}] - [\text{POP}]$$

植物プランクトンの生物量の指標として植物プランクトンの主要色素であるクロロフィルa (Chl-a)についても測定した。Chl-a用のフィルターサンプルは、各観測地点で表層から200 mまでの7~8層で採取した。海水を1 lの褐色ボトルにニスキンボトルから直接とり、25 mm GF75フィルターを用いて海水を300 mlろ過した。そして、そのフィルターサンプルと分析用の抽出液N,N-ジメチルホルムアミド(DMF) 10 mlを10 mlのねじ口付き試験管にいれ、分析まで遮光して冷凍保存した。

そのほかにCTD-CMSによって水温、塩分、密度などのデータを得ている。

分析

サンプルの分析はすべて実験室で行った。

栄養塩は冷凍したサンプルを室温で解凍し、そのままTRAACS 2000 (BRAN+LUEBBE社製)を用いて定量した。TRAACS 2000では $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ はカドミウム還元法、 PO_4 はモリブデンブルー法により測定した。栄養塩の分析精度は $\pm 0.5\%$ 程度であった。

TN, TPおよびPON, POPは、アルカリ湿式酸化法(Koroleff 1977)を用いて有機物を分解し、分解によって生じた無機生成物を栄養塩と同様にTRAACS 2000を用いて定量した。TN, TPは、50 mlのポリプロピレン製耐圧ボトルに海水サンプルを40 ml量りとり、それに分解試薬を4 ml加える。PON, POPはフィルターサンプルをポリプロピレンボトルにいれ、純水20 mlと分解試薬2 mlを加えた。どちらも、120 $^{\circ}\text{C}$ 30分間オートクレーブにかけ有機物を分解した。そして、室温まで冷ました後、無機の分解生成物をTRAACS 2000で定量した。また分解用のポリプロピレン製耐圧ボトルは分析前にエキストラMA03(無リン酸, MERCK-7550)および4%塩酸で洗浄した。このアルカリ湿式酸化法について検証実験を行ったところ、この方法での濃度既知の標準試薬による分解回収率は90%以上であり、測定の分析精度は $\pm 3\%$ 程度であった。

Chl-aは冷凍保存したサンプルを室温で解凍し、蛍光光度計RF-5300PC(島津製作所製)を用いてDMF抽出による蛍光法によって測定した。

結果

密度およびクロロフィルa濃度の季節変動

図3に4月、7月、10月、12月における密度とChl-a濃

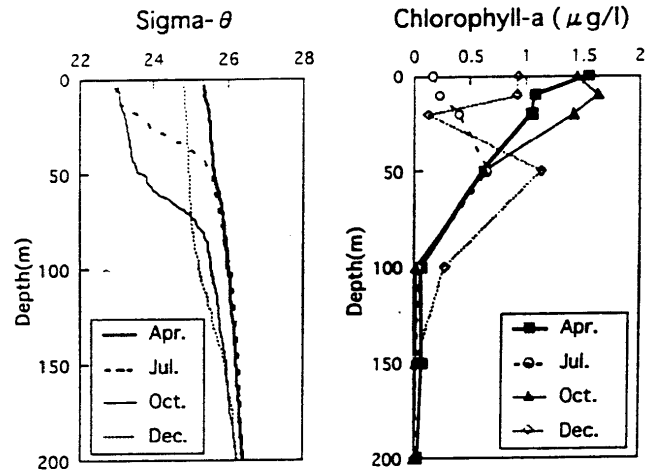


図3 密度とクロロフィルa濃度の鉛直分布。
Fig. 3 Vertical distributions of sigma- θ and Chlorophyll-a concentrations.

度の鉛直分布を示した。

密度は水深200 mではどの季節でも26程度であり、季節によってほとんど変化しなかった。表層において季節的な違いが見られ、4月、12月に25.5と高く、7月、10月に23と低くなった。これは4月と12月は7月、10月に比べて表層と深層の鉛直的な差が小さいことを示しており、比較的鉛直混合が盛んであったといえる。ここから4月と12月は7月、10月に比べて鉛直混合による深層からの栄養塩供給が大きいことが示唆された。

Chl-a濃度は表層において4月と10月に1.5 $\mu\text{g/l}$ と高く、7月、12月に比べて生物生産が盛んであったと考えられる。これは4月と10月はそれぞれ春と秋の植物プランクトンのブルーム期にあたるためだと考えられる。Chl-a濃度は表層から50 m付近までが高く、水深100 mではどの季節でもほとんど検出されなかった。

無機態および溶存態または粒子状有機物プール中の窒素、リン濃度

図4に冬期(2月)と夏期(7月)における表層から海底までの窒素、リンの無機物および有機物の鉛直分布を示した。 $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ および PO_4 は表層100 m付近までに深度とともに増加していき、水深1000 m以深では $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ は約40 $\mu\text{mol/l}$ 、 PO_4 は約2.8 $\mu\text{mol/l}$ ではほぼ一定になった。TONおよびTOPは表層で比較的高く、深層に行くとき減少する傾向にあった。また、TON, TOPは表層から200 m付近までで特に大きく減少した。

図5, 6に各窒素、リンの水深200 mまでにおける季節ごとの鉛直分布を示す。

$\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ は4月、7月、10月は表層で濃度がほぼ0 $\mu\text{mol/l}$ になっており、12月は2.5 $\mu\text{mol/l}$ であった。ここから春から秋にかけて $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ が枯渇している様子がわかる。また、4月、10月では表層の枯渇は水深10 mまでであるが、7月では水深20 mまで枯渇している。 PO_4 についても夏期に濃度が低く、冬期に高くなる傾向は $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ と同様であるが、夏期の表層における $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ のような栄養塩の枯渇は見られなかった。各季節の表層における PO_4 の値は0.1~0.3 $\mu\text{mol/l}$ であった。このような栄養塩の結果から、駿河湾では春から秋にかけて無機態の窒素が枯渇し、植物プランクトン

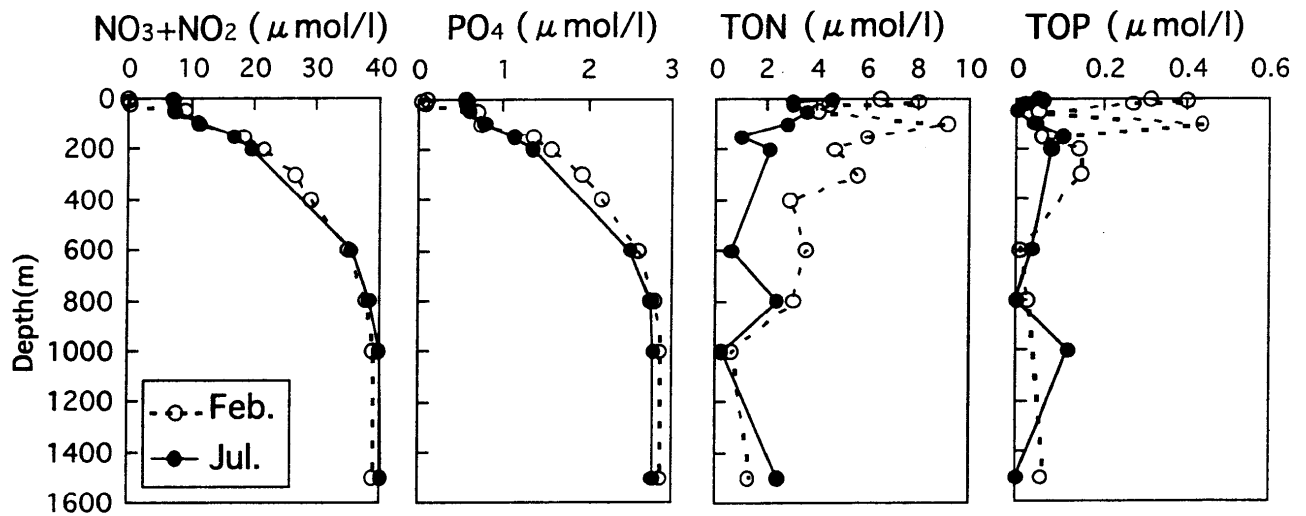


図4 表層から海底までの冬期(2月)と夏期(7月)の窒素およびリンの無機物、有機物濃度の鉛直分布。

Fig. 4 Vertical distributions of organic and inorganic nitrogen and phosphorus concentrations in winter (February) and summer (July) from surface to bottom.

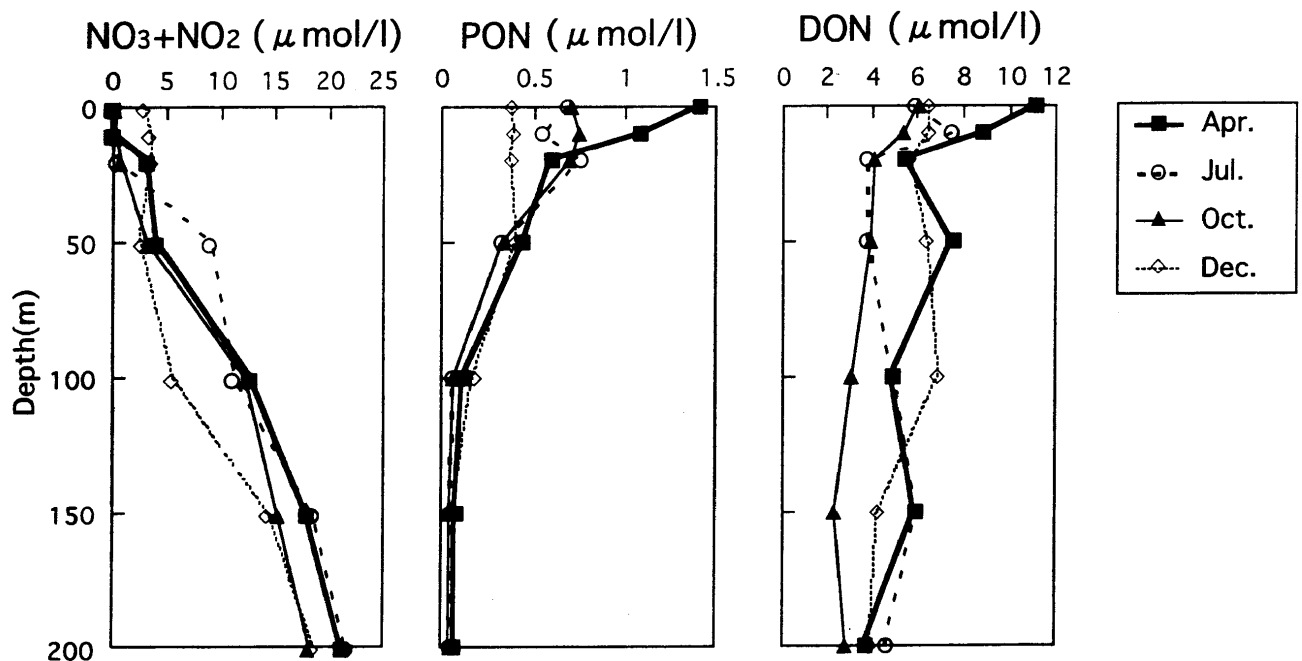


図5 NO_3+NO_2 , PON, DON濃度の鉛直分布

Fig. 5 Vertical distributions of NO_3+NO_2 , PON and DON concentrations.

による生産の制限要因になっている可能性が示唆された。

PONは表層において大きな季節変化が見られた。表層では12月は $0.4 \mu\text{mol/l}$ であるのに対し、4月は $1.4 \mu\text{mol/l}$ と3倍以上になった。PONは4月に最も高い値をとり、次に10月が高く、続いて7月、最も低い値をとったのは12月であった。POPも同様に濃度の高い方から4月、10月、7月、12月となっていた。このように粒子状有機物の濃度が4月と10月に比較的高くなったのは、粒子状有機物には植物プランクトン自体も含まれており、Chl-a濃度の高い4月と10月には(図3)、粒子状有機物における植物プランクトンの寄与が大きかったためだと考

えられる。また、PON、POPともに深度と共に急激に減少し、水深100 m以深ではどの季節でもほとんど検出されなかった。

DONでは4月にのみ $11 \mu\text{mol/l}$ と他の月に比べて2倍近く大きい値を示し、他の季節については大きな違いはみられなかった。DONは4月と7月に約 $0.3 \mu\text{mol/l}$ と表層において高い値を示した。溶存態有機物も粒子状有機物と同様に、表層で高く深層で低くなっている傾向が見られた。しかし、粒子状有機物は水深100 m以深ではほとんど検出されなかったのに対し、溶存態有機物は水深200 mでも比較的高い濃度で存在していた。また表層と深層の差は粒子状有機物に比べて溶存態有

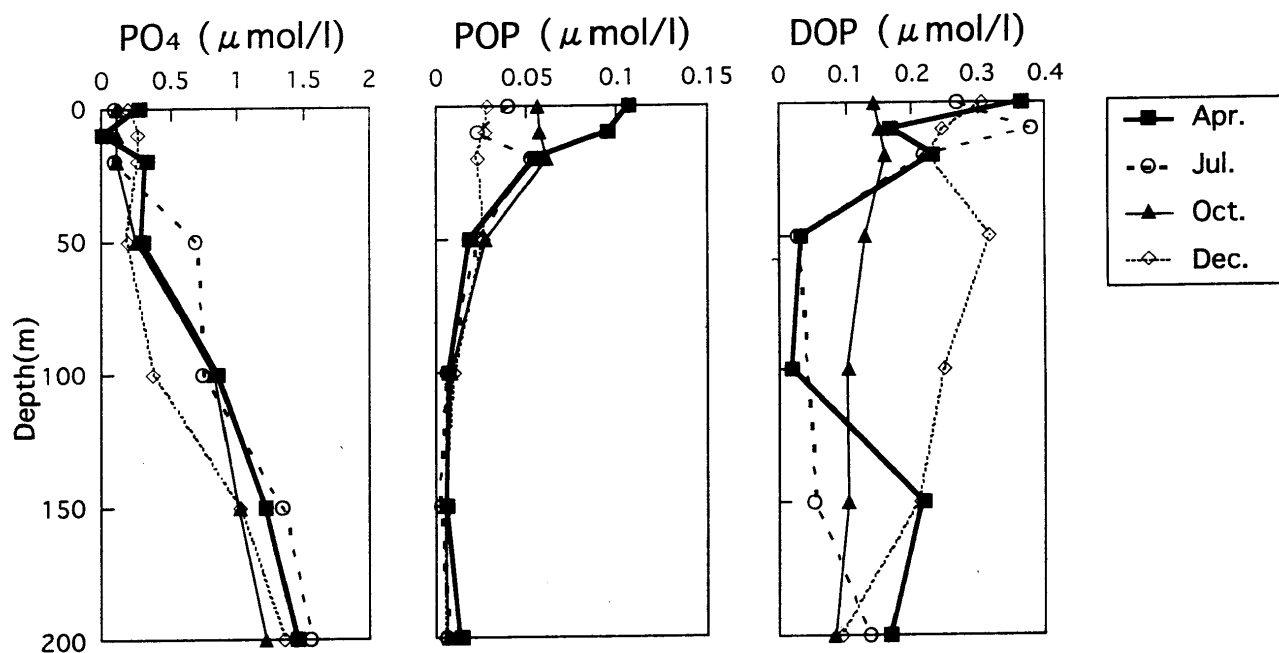


図6 PO₄, POP, DOP濃度の鉛直分布
Fig. 6 Vertical distributions of PO₄, POP and DOP concentrations.

機物の方が小さくなっていた。

無機態および溶存態または粒子状有機物の全体に占める割合

図7にTNおよびTPに占める各プールの割合を示した。これによると、窒素では4月、7月、10月の表層でNO₃+NO₂が検出されなかったため、TNの中はDONとPONのみで占められている。リンについては、PO₄は枯渇はしていないものの全体に占める割合はやはり表層で小さくなった。どの季節においても深度が増加するに従い、無機物の占める割合は大きくなった。

溶存態有機物は表層において大きな割合を占め、0 mでは全体の50~80%を占めている。粒子状有機物は窒素、リンともにどの季節においてもTN、TPに占める割合は0~20%と全体的に小さいが、春と秋のブルーム期である4月と10月の0 mでは比較的割合が大きくなっている。また溶存態有機物と粒子状有機物を比較すると、溶存態有機物に比べ粒子状有機物の占める割合は、大半が5分の1程度であった。

季節で比較した場合、0 mと50 mでは季節によって割合が大きく変動している。これは季節による成層構造の違いに大きく影響していると考えられる。密度の結果(図3)から見ると、7月は成層構造が発達して混合層が表層から10 m程度までであったため0 mと50 mで大きな違いが見られたと考えられる。それに対し、12月では80 m付近まで鉛直混合が盛んであったと考えられるため0 mと50 mにほとんど違いがなかったと考えられる。200 mではどの季節でもほとんど変化が見られなかった。

続いて窒素とリンについて比較した場合、窒素ではリンに比べて溶存態有機物の占める割合が大きく、リンでは無機物の占める割合が大きくなっていることがわかる。また粒子状有機物の割合は窒素よりもリンの方が大きくなっている。これは窒素とリンの存在しや

すい状態の違いがあるためと考えられる。

考察

ここまでに窒素、リンの各プールの濃度についての結果を示したが、窒素とリンの挙動の違いについてより詳しく相対的に見るために、ここからはN:P比などから考察を行う。ここからの議論では、窒素とリンの比較の基準としてレッドフィールド比のN:P=16:1を用いる。

各プールのN:P比

図8に無機物、粒子状有機物、溶存態有機物それぞれのN:P比の鉛直分布を示す。

無機物のN:P比はどの季節でも水深50 m以深はほぼ14で一定となった。深層では植物プランクトンによる取り込みは行われていないので、無機物の濃度を決めているのは有機物からの分解のみであると考えられる。したがって、有機物から無機物への分解はおおよそN:P=14:1で行われていると考えられる。水深50 m以浅では4月、7月、10月のN:P比は減少しており、12月は深度による変化は見られなかった。これは春から秋にかけては表層においてリンに比べて窒素が不足していることを示している。ここから駿河湾では、春から秋にかけて無機の窒素が植物プランクトンの生産の制限要因になっていることが示唆される。表層において無機物のN:P比が減少していることの要因は、海洋表層における植物プランクトンの取り込みによる影響であると考えられる。表層の無機物は深層での存在比である14:1で供給され、生物生産の結果として表層の存在比が小さくなると考えられるので、植物プランクトンによる取り込みはN:P=14:1以上で行われていることが示唆される。

粒子状有機物のN:P比は表層ではほぼN/P = 16付

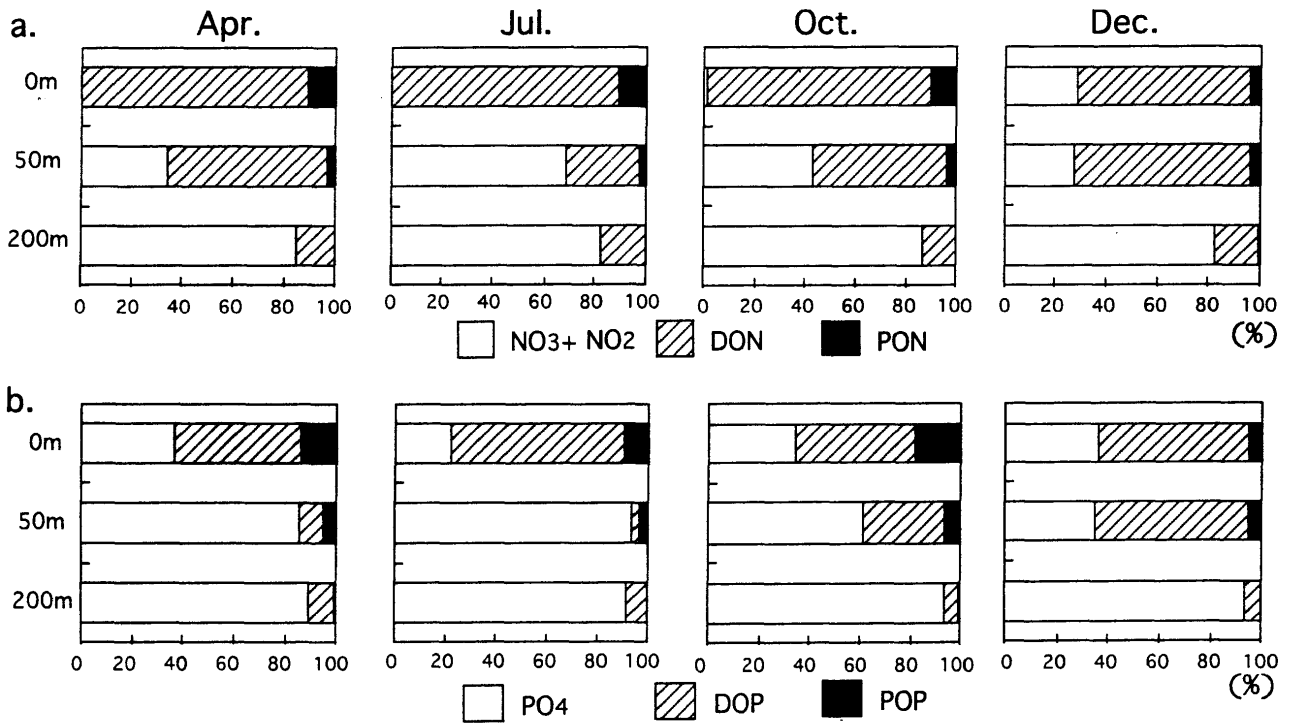


図7 窒素およびリンの無機物、粒子状有機物、溶存態有機物が全体に占める割合：(a) 窒素、(b) リン。
 Fig. 7 Percentage of inorganic matter and particulate and dissolved organic matter:
 (a) Nitrogen. (b) Phosphorus.

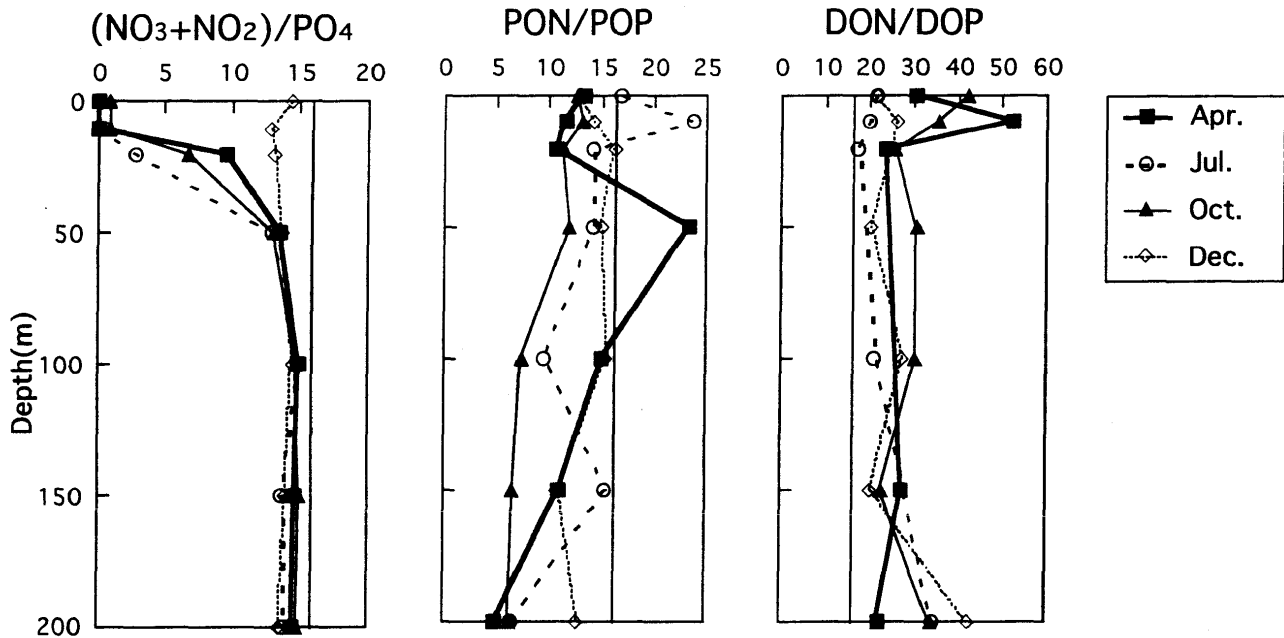


図8 無機物、粒子状有機物、溶存態有機物のN:P比((NO₃+NO₂)/PO₄, PON/POP, DON/DOP)の鉛直分布。グラフ中の直線はレッドフィールド比(=16)を示している。
 Fig. 8 Vertical distributions of N:P ratios of inorganic matter, particulate and dissolved organic matter ((NO₃+NO₂)/PO₄, PON/POP, DON/DOP, respectively). The lines correspond to the Redfield ratio (=16).

近に分布していた。粒子状有機物のなかには植物プランクトン自体が含まれているので、これは植物プランクトンのN:P=16:1を反映した結果になったと考えられる。また季節によってN:P比が変化することがわかった。駿河湾では季節によって植物プランクトンの優占種が変化することが知られており(村野, 1977),

植物プランクトンの種によって窒素とリンの組成比が違うことが示唆された。また、どの季節でも表層に比べ水深200 mの方がN:P比が小さくなっている。これは深層において、相対的にリンに比べ窒素の方が少ないことを示しているもので、粒子状有機物からの無機物へは相対的に窒素の方が優先的に無機化されていると

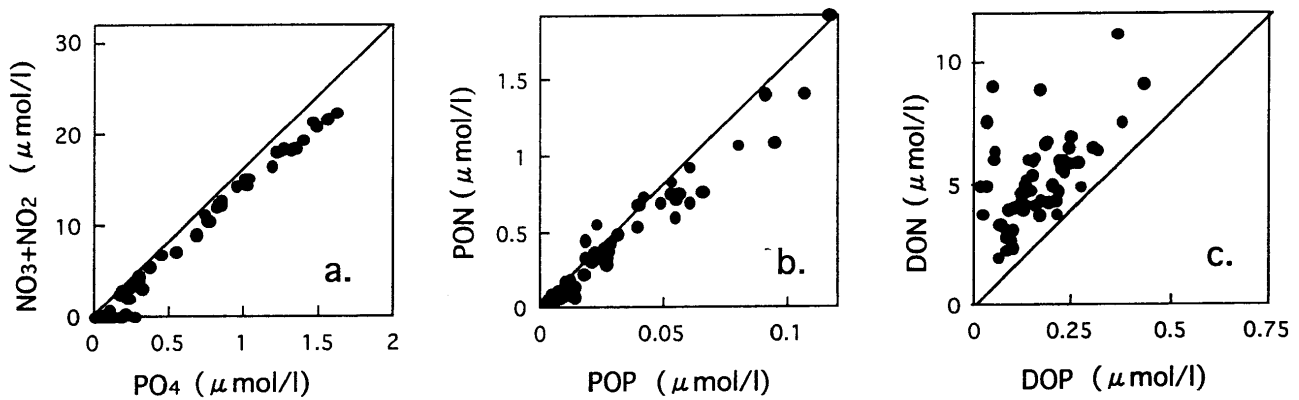


図9 窒素とリンの相関図：(a) 無機物、(b) 粒子状有機物、(c) 溶存態有機物。グラフ中の直線はレッドフィールド比(=16)を示している。

Fig. 9 Correlation of nitrogen and phosphorus: (a) Inorganic matter, (b) Particulate organic matter, (c) Dissolved organic matter. The lines correspond to the Redfield ratio (=16).

考えられる。

溶存態有機物のN:P比はすべてにおいてレッドフィールド比よりも大きい値を示した。季節によって比の値が変化しており、全体的な比の値の範囲はおおよそ20~50であった。このような結果は、Hopkinson *et al.* (1997)によって観測された比の範囲(DON:DOP=24~55)と一致する。これはレッドフィールド比と比較して、相対的に窒素よりリンが不足していることを示している。DON:DOP比に関しては鉛直的な違いは見られなかった。

窒素とリンの相関関係

図9に各プールの窒素とリンの相関図を示した。

無機物(a)はレッドフィールド比よりも下側に分布していた。これは、レッドフィールド比を基準に考えるとリンに対して窒素が不足していることを示している。このような無機物のN:P比がレッドフィールド比よりも小さくなるという結果はLoh & Bauer (2000)やMillero (1996)の太平洋の結果でも報告されている。粒子状有機物(b)はレッドフィールド比よりも下側に多く分布していた。これはリンに対して相対的に窒素のほうが不足していることを示している。溶存態有機物(c)では明らかにレッドフィールド比よりも高い方に分布していた。これは、レッドフィールド比と比較してリンよりも窒素の方が過剰に存在していることを示している。

以上のことから無機物ではリンに対して窒素が不足しており、粒子状有機物も窒素の方が不足、溶存態有機物はリンに対し窒素が過剰であるという傾向が明らかになった。これは、窒素は溶存態有機物でより存在しやすく、リンはより無機物または粒子状有機物で存在しやすいことを示唆しているといえる。このような結果は、図7で示した各プールのTN、TPに占める割合の結果からも示唆されている。またリンは窒素に比べて溶存態有機物で相対的に不足し、無機物で過剰であることから、溶存態有機物から無機物への分解は窒素に比べてリンの方が優先的に無機化していると考えられる。

これまでの考察から粒子状有機物ではリンに比べて窒素の方が優先的に無機化し、溶存態有機物では窒素に比べてリンの方が優先的に無機化するという結果になったが、ここで粒子状有機物は溶存態有機物に比

て濃度が5分の1から10分の1程度と小さく(図7)、全有機物に対する粒子状有機物の寄与は小さいと考えられる。したがって、有機物全体として考えた場合、溶存態有機物からの無機化がより反映され、有機物全体から無機物への無機化は窒素よりもリンの方が優先的であると考えられる。このことは、無機物において窒素よりもリンのほうが過剰に存在していることから示唆される。このような全有機物からの無機化がリンの方が優先的であるという結果はLoh & Bauer (2000)でも示唆されている。

まとめ

駿河湾において定期的に観測を行うことによって、駿河湾における無機物、粒子状有機物、溶存態有機物といった各プールの窒素およびリンの季節変動をとらえることができた。駿河湾では表層において各プールの濃度に大きな季節変動が見られた。またN:P比から考察を行うことで窒素とリンの相対的な挙動の違いが明らかになった。実際の各プールのN/Pの値とレッドフィールド比を比較すると、無機物では低く、粒子状有機物ではほぼ同じであり、溶存態有機物では大きくなった。またN:P比は季節によって変動することが明らかになった。以上のことから植物プランクトンの取り込みや組成比などは季節によって変動することが示唆された。

窒素とリンの相関を見ることで、無機物と粒子状有機物ではリンが余り、溶存態有機物では窒素が余ることが明らかになった。ここから、窒素は溶存態で存在しやすく、リンは無機物または粒子状有機物で存在しやすいことが示唆された。ここから、粒子状有機物から無機物への無機化は窒素が優先的であり、溶存態有機物から無機物への無機化はリンが優先的であることが示唆された。

謝辞

本研究を行うにあたり、毎回の駿河湾の観測において静岡県水産試験場の萩原快次氏、五十嵐保正氏をはじめ駿河丸乗船員の方々には多大なる御協力を頂きました。また宗林留美博士には本論文をまとめるにあたり多大なる御助言を頂きました。ここで厚く御礼申し

上げます。

引用文献

- Butler E. I., Knox S. & Liddicoat M. I. (1979), The relationship between inorganic and organic nutrients in seawater. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, **59**, 239-250.
- Cullen J., Yang X. & Hugh L., M. (1991), Nutrient limitation and marine Photosynthesis. In: Paul G., F. & Avril D., W. (eds.), *Primary production and biogeochemical cycles in the sea*, Plenum press, New York, 69-88.
- Hopkinson Jr., C. S., Fry B. & Nolin A. L. (1997), Stoichiometry of dissolved organic matter dynamics on the continental shelf of the northeastern U.S.A. *Continental Shelf Research*, **17**, 473-489.
- Ittekkot V. (1996), Particle flux in the ocean: introduction. In: Ittekkot V., Schafer P., Honjo S. & Depetris P. J. (eds.), *Particle Flux in the Ocean*. Wiley, Chichester, 1-6.
- Koroleff F. (1977), Simultaneous persulphate oxidation of phosphorus and nitrogen compounds in water. In: Grasshoff K.(ed.), *Report of the Baltic Intercal. Workshop*, Annex Compiler, Kiel, 29-31.
- Loh A. N. & Bauer J. E. (2000), Distribution, partitioning and fluxes of dissolved and particulate organic C, N and P in the eastern North Pacific and Southern Oceans. *Deep-Sea Research 1*, **47**, 2287-2316.
- Millero F. J. (1996), *Chemical oceanography*, CRC Press, Boca Raton, 469p.
- 村野正昭. (1977), 植物プランクトン. 駿河湾漁場開発調査報告書, 静岡県水産試験場, 75-99.
- Redfield A. C., Ketchum B. H. & Richards F. A. (1963), The influence of organisms on the composition of seawater. In: Hill M.N. (ed.), *The Sea*, Vol.2, Interscience, New York, 26-77.
- 鈴木 款・岡崎恵視・高橋正征・及川武久・樋渡武彦・深見公雄・石坂丞二 (1997), 海洋生物と炭素循環. 193p., 東京大学出版会, 東京, 193p.