

鹿島灘沿岸域における栄養塩及びクロロフィル a 量の時空間変動特性

大森 義暢*1・八木 宏*1・足立久美子*2・須能 紀之・二平 章

Spatial and temporal variability of nutrient salts and chlorophyll-a in the Kashima coastal sea area

Yoshinobu OHMORI, Hiroshi YAGI, Kumiko ADACHI, Noriyuki SUNOU and Akira NIHIRA

Abstract

Based on the field observation results in 2000, the spatial distribution and temporal variability of nutrient salts and chlorophyll-a in the Kashima coastal sea area were investigated. The results show that nutrient salts in the costal region are affected by the phosphorus rich water from the offshore bottom layer in spring and summer, while the nitrogen rich surface nearshore water dominates in autumn. The spatial distribution and its temporal variation of the chlorophyll-a in the shelf sea region are closely correlated with the nutrient variation. Hence, the vertical location of maximum concentration of chlorophyll-a moves from the middle layer to the surface layer corresponding to the seasonal variation of the nutrient field.

Key words : Nutrient salt, Chlorophyll-a, N-P ratio, blooming, seasonal variation

1. 目的

開放性の高い砂浜海岸域は、これまで内湾域の藻場・干潟などと比べ貧栄養で生産力が低いと考えられることが多かった。しかしながら、最近の足立ら (1995) による長期間・高頻度の栄養塩及び基礎生産力調査によって、開放性の高い鹿島灘海岸域が実際には高い基礎生産力を有していることが明らかにされつつある。また、奥西ら (2000) は、足立らの栄養塩・クロロフィル a 量データに基づいて海岸域における物質循環の仕組みを数値生態系モデルの面から検討しているが、それによると鹿島灘砂浜域では植物プランクトンの再生産過程が新生産過程に匹敵するかそれ以上である可能性を示している。このことは、鹿島灘のような開放性海域であっても、海岸域は再循環を基本とした固有の物質循環の仕組みを有している可能性を示している。

このように、開放性海岸域の低次生産を基本とした物質循環はその特徴が徐々に明らかにされつつあり、今後は栄養塩のソースとなる河口域から沖合域までを含む沿岸域全体にわたる物質循環の全体像を明らかにする中で、浅海域物質循環系を評価していくアプローチが不可欠である。そのためにはその基礎となる沿岸海域全体を対象とした高頻度・高解像度の栄養塩及び基礎生産力の計測が不可欠であるが、例えば鹿島灘海域については、武士 (1999) によって表層クロロフィル a 量の時空間構

造の特徴がまとめられているものの、栄養塩も含んだ形で物質循環を調査検討された例はほとんどない。

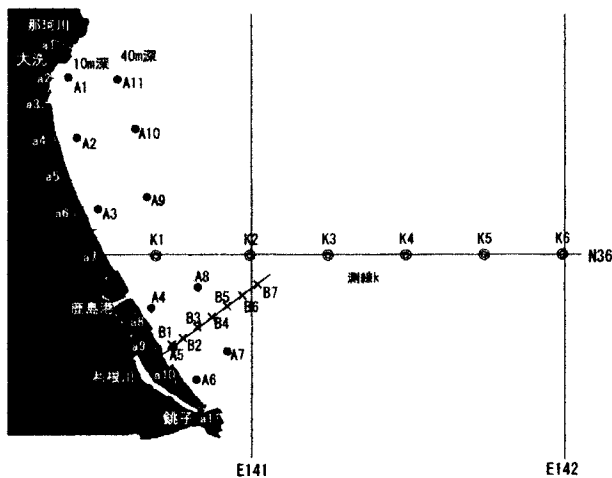
そこで本研究では、東京工業大学、水産庁水産工学研究所、茨城県水産試験場の共同研究として、2000年6～10月の間、船舶による調査を実施し、その結果を中心として鹿島灘沿岸域の栄養塩・クロロフィル a 量の時空間変動の基本特性を把握することを試みた。

2. 方法

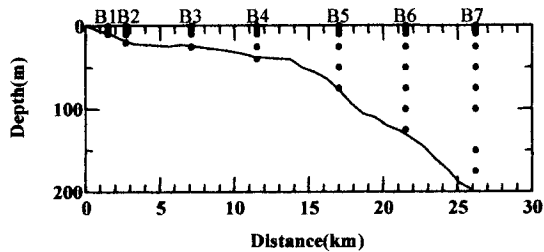
本研究では2000年6～10月までの5ヶ月間、茨城県水産試験場調査船ときわにより、鹿島灘沿岸域の栄養塩、クロロフィル a 量の調査を月1回行った。調査点は図1に示すとおりで、陸岸に沿った水深10m帯に6箇所、大陸棚縁に近い水深40m帯に5箇所を設定した (図1中のA1～A11)。計測内容は、①採水による栄養塩 (DIN, DIP) 調査 (測定層は水深10m帯では0, 2, 5, 10m, 水深40m帯では0, 2, 5, 10, 25, 40m)、②採水による表層クロロフィル a 濃度計測、③蛍光光度計付STDによる水温、塩分、クロロフィル a 濃度 (蛍光光度値から換算) の鉛直分布計測である。なお、今回の調査だけでは、より詳細な岸沖断面構造や広域空間分布特性などが把握できないため、本観測結果に i) 足立らが実施した水産工学研究所調査船たか丸による、鹿島灘須田浜岸沖断面内の栄養塩・クロロフィル a 濃度等調査結果 (観測点はB1～B7)、ii) 須能らが実施した茨城県水産試験場調査船ときわ・水戸丸による海洋定線調査結果 (観測点はK1～K6)、iii) 人工衛星SeaWiFSによる表層クロロ

* 1 東京工業大学大学院

* 2 水産庁水産工学研究所



平面図



断面図(B測線)

図1 観測点の配置図

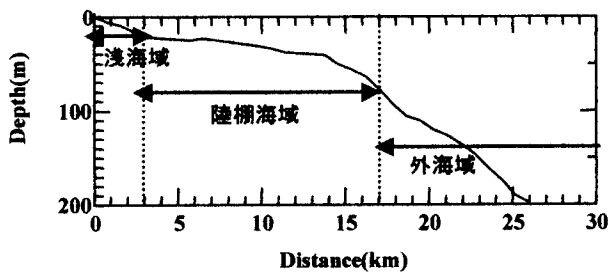


図2 領域の定義

フィル a 濃度空間分布を合わせて解析を行った。

なお、クロロフィル a および栄養塩の分析については、試水200ないし300mlをWhatman GF/Fフィルターでろ過し、DMFによる色素抽出ののち、蛍光法によりクロロフィル a を測定した。また試水をメンブレンフィルター(孔径 $0.45\mu\text{m}$)でろ過し、ブラン・ルーベ社製TRAACS 800により、ろ水中の栄養塩濃度を測定した。

3. 結果と考察

ここでは、対象海域全体を①浅海域、②陸棚海域、③外海域の3つの領域に分け(図2)、各領域の栄養塩、

クロロフィル a 濃度の時空間変動特性を比較することで、沿岸域の空間構造を把握することを試みた。なお以下では、観測点A2~A5(水深10m帯)沿岸方向平均を浅海域の代表値、A7~A11(水深40m帯)の沿岸方向平均を陸棚海域の代表値とした。浅海域についてはA1とA6の値に河川影響が強く現れ、浅海域を代表する値として不適当と考えられるためにこのような方法を選んだ。また外海域については、毎月の観測が行われなかったため、足立らによる2000年5、7月及び1998年2月の岸沖断面観測結果の測点B7(水深170m)の値で季節的な変化を示した。

(1) 栄養塩の時空間変動特性

① 栄養塩変動の基本的な特徴

図3は、溶存体窒素DIN($\text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$)、溶存体リンDIP($\text{PO}_4\text{-P}$)の鉛直分布の経時変化を、(a)浅海域、(b)外海域、(c)陸棚海域それぞれについて示したものである。浅海域においてはDIN、DIPとも6、7、8月には鉛直変化が小さく、濃度レベルは高くないが、9、10月に濃度が急激に増加しており、表層で大きく底層で小さい顕著な鉛直分布を示す形に変化している。これに対して、外海域では季節を通して濃度は底層で大きく、冬季から夏季に向けて濃度レベルが大きく減少している。

一方、陸棚海域では、6、7月に下層で濃度レベルが高い分布形から、8月に全水深的に減少した後、DINについては表層で増加する傾向が見られる。図4は、足立らの観測結果に基づいて、このような栄養塩の季節変化を岸沖断面分布で示したものである。これによると、冬季(2月)には沖合下層部を中心に濃度が大きく、浅海域、陸棚海域でも比較的濃度レベルが高いが、5月、7月にかけて表層から濃度が減少していく様子が顕著に現れており、水深が小さい浅海域、陸棚海域では全水深的に濃度レベルが低下していることがわかる。

② N-P比の特徴

次に、図5は、窒素とリン存在量の相対的な大きさを示すN-P比(DIN/DIP)を浅海域、外海域、陸棚海域で比較したものである。但し、ここでは表層と底層の値のみを表示している。図中には、海水の標準的な栄養塩比を表すといわれているRedfield比によるN-P比(=16)を実線で示しており、ここではこれを窒素、リンの相対的な大きさを表す目安と考える。これによると、浅海域のN-P比はRedfield比と同程度かそれ以上の値を示しており、季節を通して窒素が多く、逆に外海域では、全体的にRedfield比を下回っており、相対的にリンが多いことがわかる。一方陸棚海域ではRedfield比と比較して大小の値が存在している。以上を簡単にまとめると、浅海域では窒素、外海域ではリンが多く、陸棚海域ではその中間的な傾向を示すといえる。図6は、陸棚海域における窒素、リンの相対的な重要性を示すために、Redfield

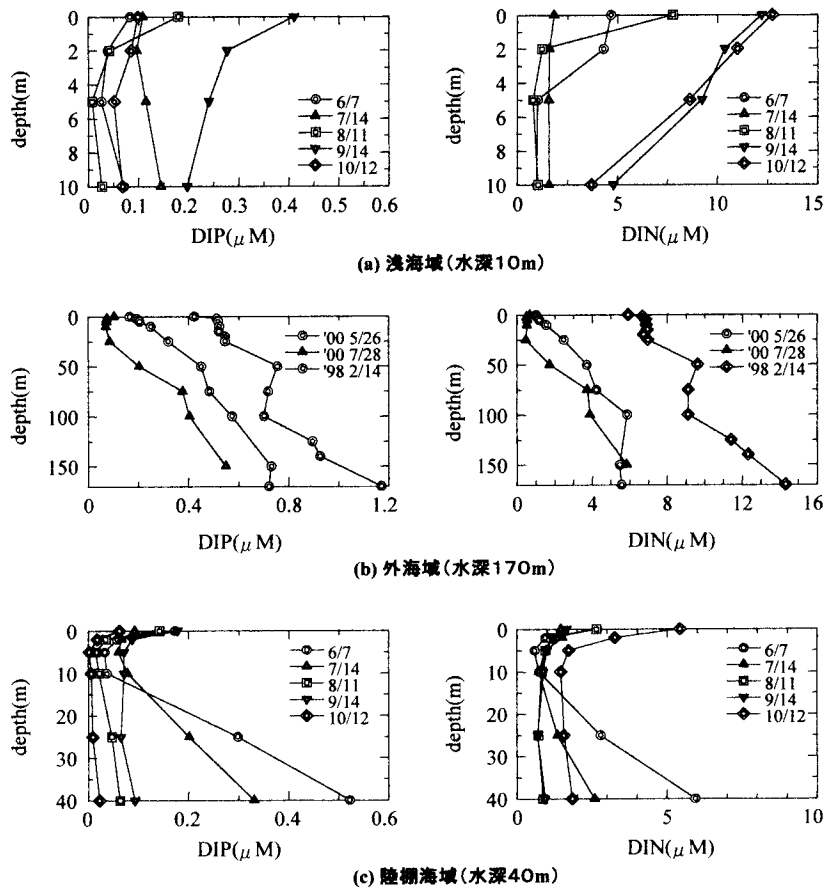


図3 DIN及びDIPの観測結果

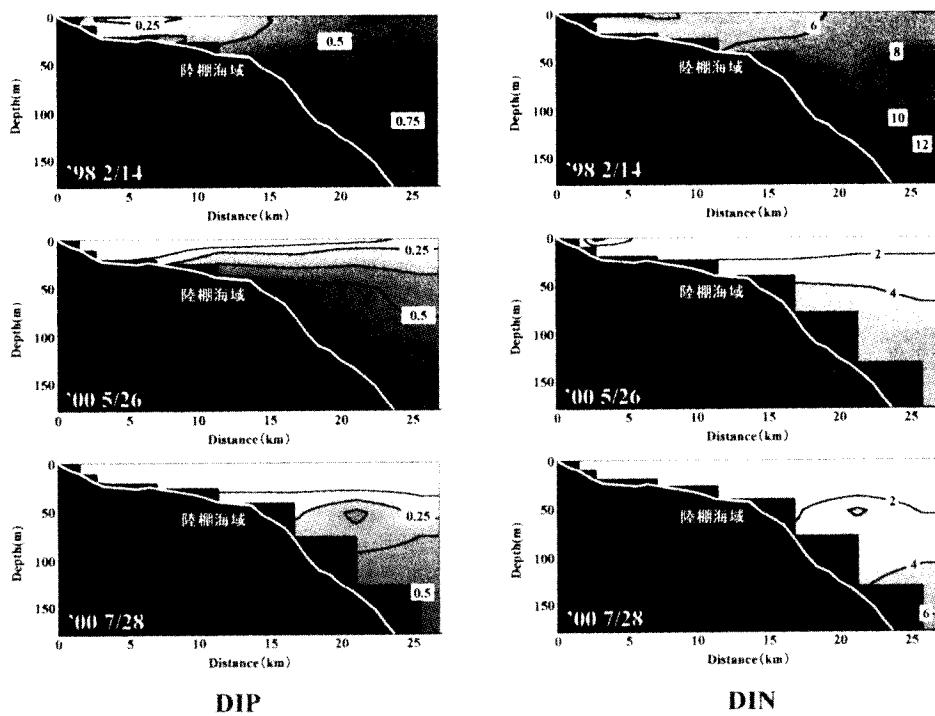
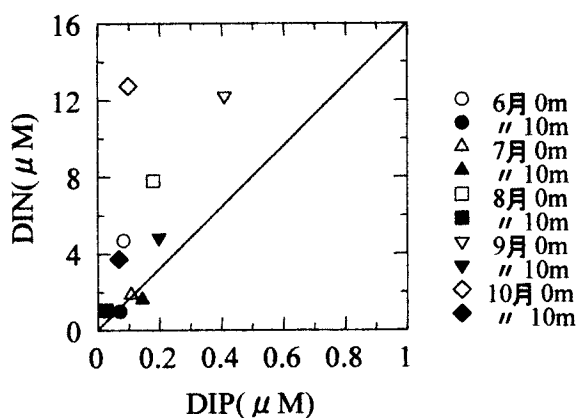
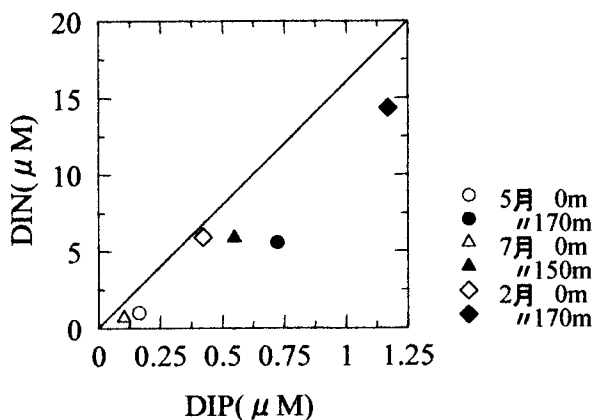


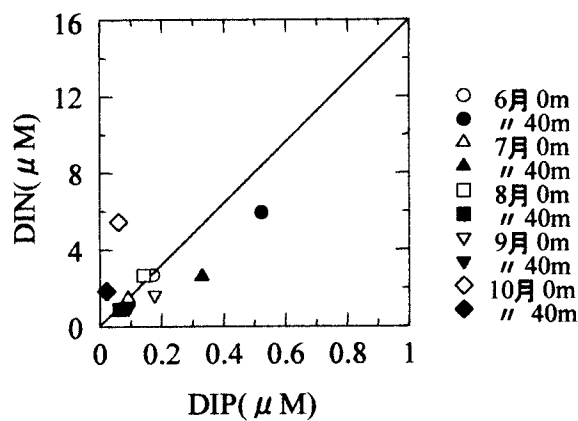
図4 DIN及びDIPの岸沖断面分布の変化



(a) 浅海域(水深10m)



(b) 外海域(水深170m)



(c) 陸棚海域(水深40m)

図5 NP比との比較

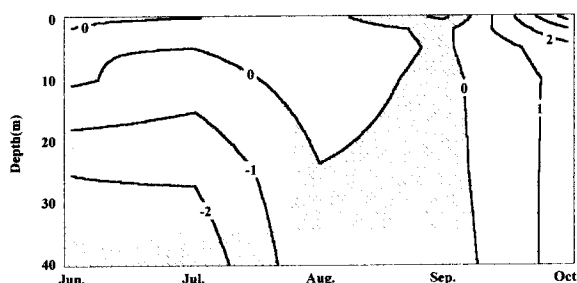


図6 DIN-16DIPの値の鉛直分布(陸棚海域)の経時変化(2000年6月~10月)

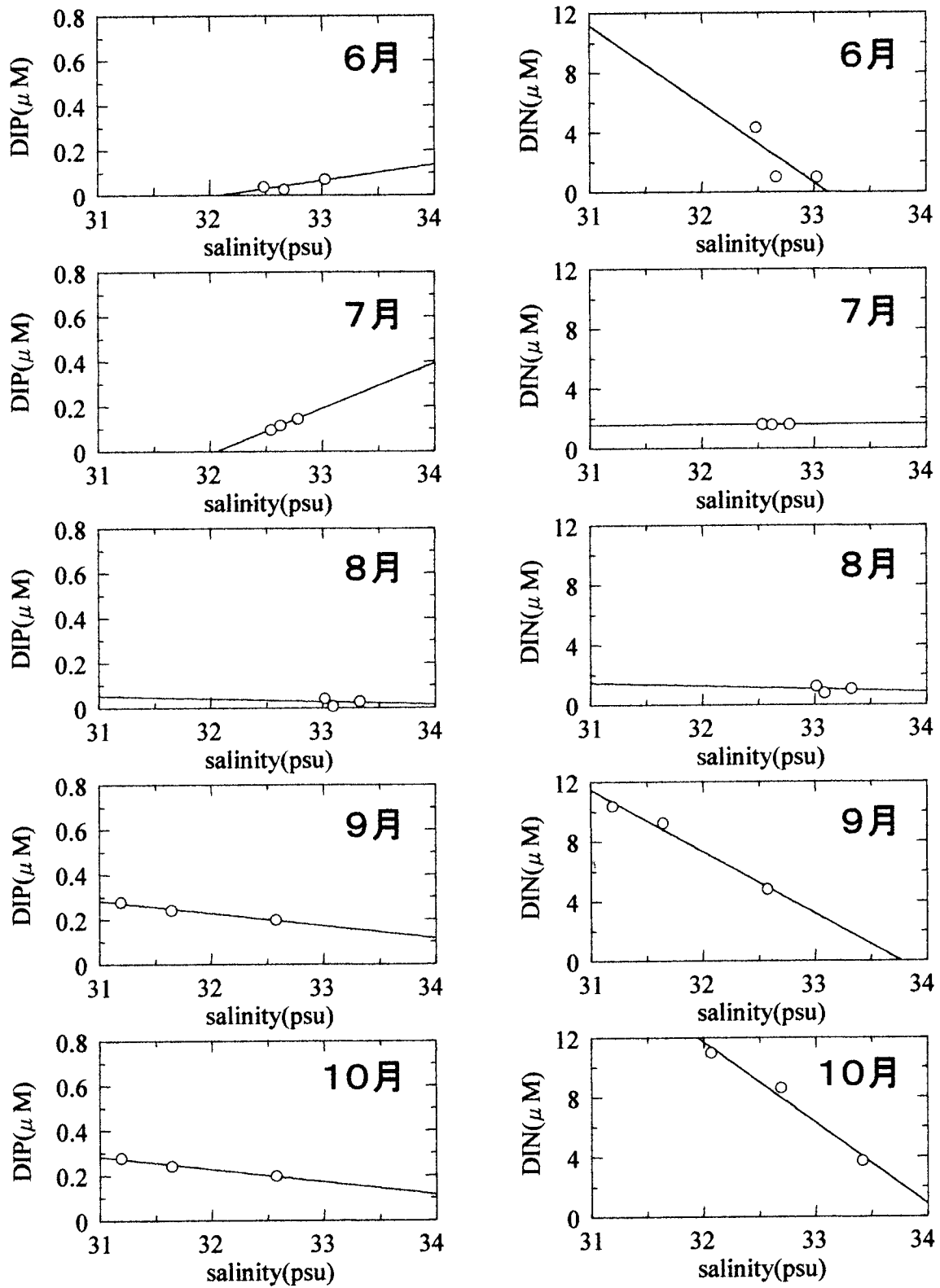
此の関係に基づき(DIN-16DIP)という量を定義し、その鉛直分布の経時変化を示したものである。この値が、正(図中の非斜線部)であれば窒素が多く、負(図中の斜線部)であればリンが多いことを示している。これを見ると初夏には下層で相対的にリンが大きく、秋季には窒素が大きくなっており、陸棚海域におけるリン、窒素の相対的な大きさは、季節や水深によって大きく変化していることをこの結果は示している。

③ 栄養塩と塩分の関係

塩分濃度は、その海水について、陸水影響が大きいか(低塩分)、外海水影響が大きいか(高塩分)を判断する指標となるので、ここでは栄養塩濃度と塩分の関係について検討した。図7は、塩分とDIN及びDIPの関係について月ごとに、浅海域、外海域それぞれに対して表示したものである。これによると、浅海域では、DINは観測期間全体を通して低塩分水が高DINとなる傾向を示しているが、DIPについては6月の高塩分水が高DIPを示す状態から、8月以降には低塩分水が高DIPを示す状態に関係が逆転している。一方、陸棚海域では、DIPについては高塩分水が高DIPを示す関係が観測期間全体で保持されているが、DINについては、6月の高塩分水が高DINを示す状態から、8月以降には低塩分水が高DINを示す状態へ変化している。

④ 栄養塩分布とその変動に関する考察

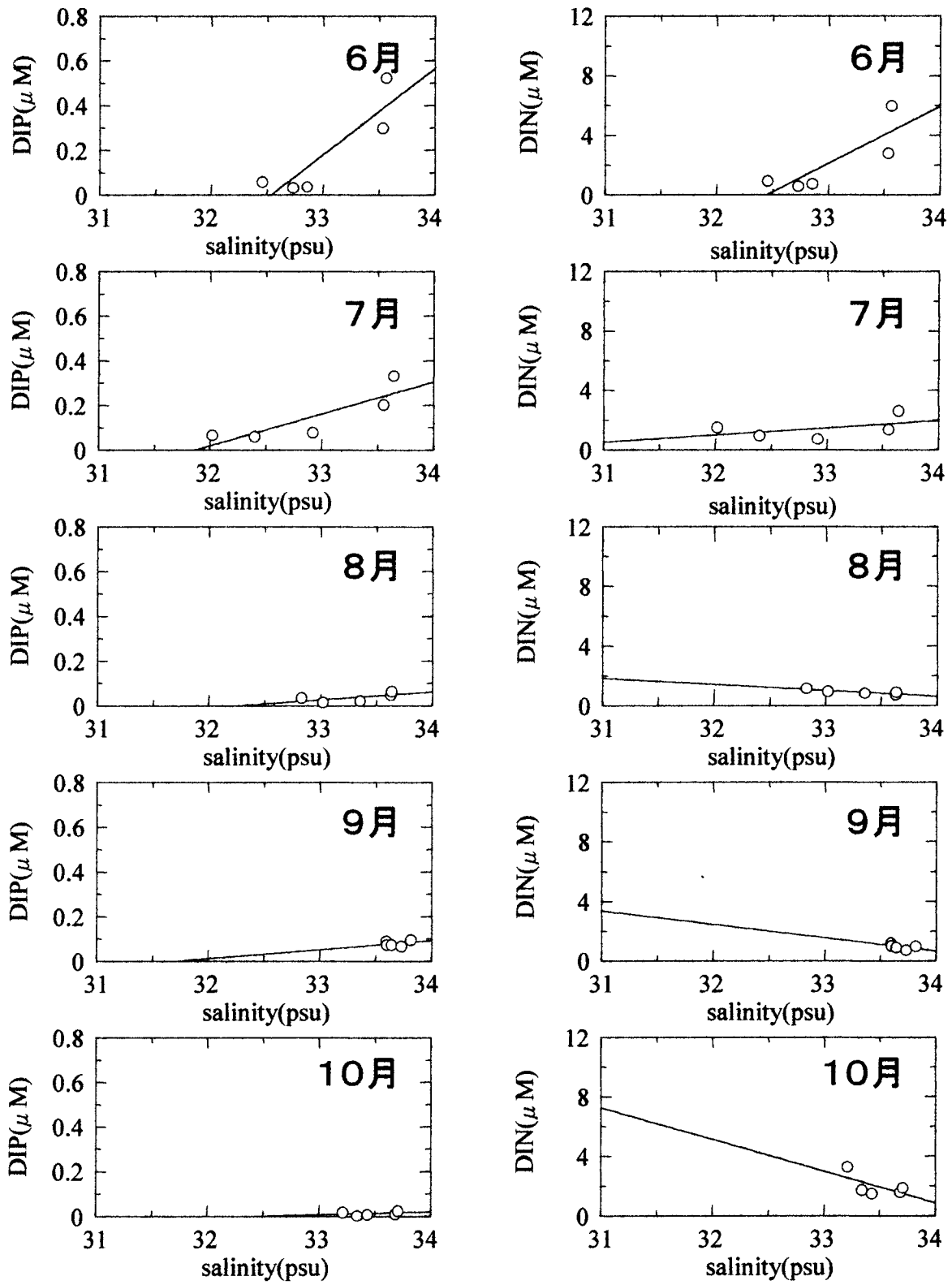
これまでに示した栄養塩の鉛直分布、岸沖断面分布、N-P比、N-S図、P-S図から栄養塩変動の特徴を整理したものが図8である。すなわち、水塊の基本的な特性として、陸水の影響を受けた海水は低塩分で相対的に窒素が多い高栄養塩水、外海系の海水は高塩分で相対的にリンが多い高栄養塩水の傾向がある。したがって陸水の影響が大きい浅海域は、期間全体を通して低塩分水が高DINの傾向を示し、外海水の影響を受ける陸棚海域は、期間全体を通して高塩分水が高DIPの傾向となる。一方、浅海域のリン、陸棚海域の窒素は季節によって傾向が変化し、外海影響が大きい春季から初夏にかけては高塩分水が陸棚海域で高DIN、浅海域で高DIPとなるのに対し、陸水影響が大きくなる秋季には低塩分水が陸棚海域で高



PS図

NS図

図7a 浅海域での塩分とDIN、DIPとの相関関係



PS

NS

図 7 b 陸棚海域での塩分と DIN、DIP との相関関係

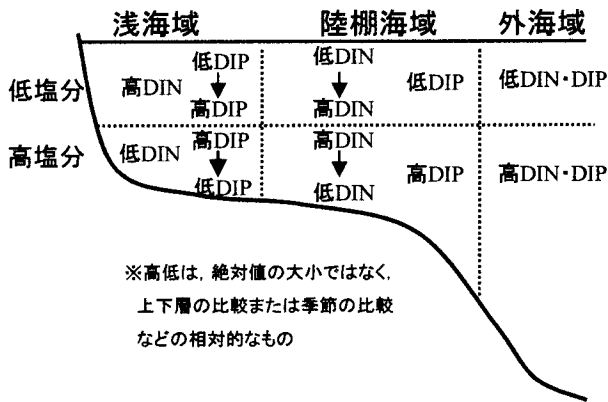


図8 栄養塩の空間構造と季節変化の概念図

DIN、浅海域で高DIPになっている。

次に、これまでの栄養塩に関する検討から、季節による栄養塩変動をまとめると次のように説明できる。まず外海域を中心として冬季から夏季にかけて表層から栄養塩レベルが減少する傾向は、外洋域で一般的な成層期に増殖した植物プランクトンの栄養塩消費量の増加に加え、夏季に低栄養塩の黒潮系水が沿岸に接近することなどが原因と考えられる。浅海域、陸棚海域でも表層を中心として、冬季から春季にかけて栄養塩消費がすすむが、春季～初夏には陸棚底層に外海系の水（高塩分、相対的にリンが多い高栄養塩水）が残存し、浅海域から陸棚海域の栄養塩供給にはこの水が重要な役割を果たしていると考えられる。夏季には栄養塩消費がさらに進むために、浅海域から陸棚海域全体の栄養塩レベルは大きく低下する。その後、秋季にかけて陸水の供給が増え、窒素を主体として浅海域、表層を中心に栄養塩レベルが増加すると思われる。このように、栄養塩供給過程においては、春季から初夏は外海からの供給が大きく、また秋季は陸

水影響が大きいと考えられ、浅海域と外海域の間に位置する陸棚海域はこういった季節変動が顕著に現れる海域といえる。

(2) クロロフィル a 量の時空間変動特性

図9は、季節的なクロロフィル a 量の空間分布の変化を示すために、茨城県水産試験場の定線海洋観測結果のうち観測点K1～K6の6点について、それぞれクロロフィル a 濃度鉛直分布の最大値を各測点での代表的なクロロフィル a 濃度と考えて、その時空間コンターを表示したものである。これによると、冬季から春季には4、5月を中心に沖合100km以上の範囲でクロロフィル a 濃度が高い値を示しており、これに対して9、10月は沿岸に近い海域（距岸20km以内）で大きな値となっている。次に、クロロフィル a 濃度の詳細な平面分布構造を理解するために、房総・鹿島灘海域の表層クロロフィル a 分布を人工衛星SeaWiFSの画像データに基づいて検討した。図10は、2000年2月～10月までの表層クロロフィル a 濃度推定値を各1ヶ月ごとに合成画像として示したものである。これによると、春季に、特に4月に南部黒潮域を除く海域全体で高クロロフィル a 濃度となっており、これは発生時期や発生領域のスケールなどを考えると春季のブルーミングと考えられる。一方、9月には沿岸近くで、特に利根川河川水の影響と思われる犬吠埼南付近を中心としてクロロフィル a 濃度が高くなっており、分布パターンなどから陸水の影響によるブルーミングと考えられる。

次に図11は、クロロフィル a 濃度鉛直分布の経時変化を(a)陸棚海域、(b)外海域、(c)浅海域の順にそれぞれについて水温分布とともに表示したものである。まず、陸棚海域については、3～7月は水深20m付近にクロロフィル a 濃度の極大層が存在したが、9～10月には表層極大と

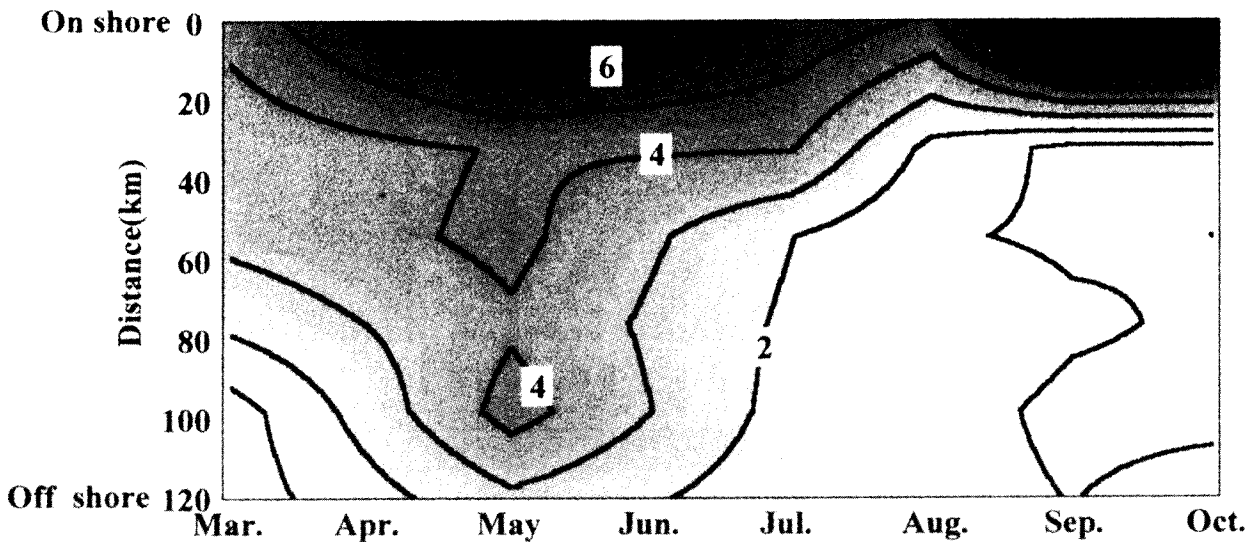


図9 クロロフィル a 量（各測点での最大値）の岸沖分布の経時変化（2000年3月～10月）

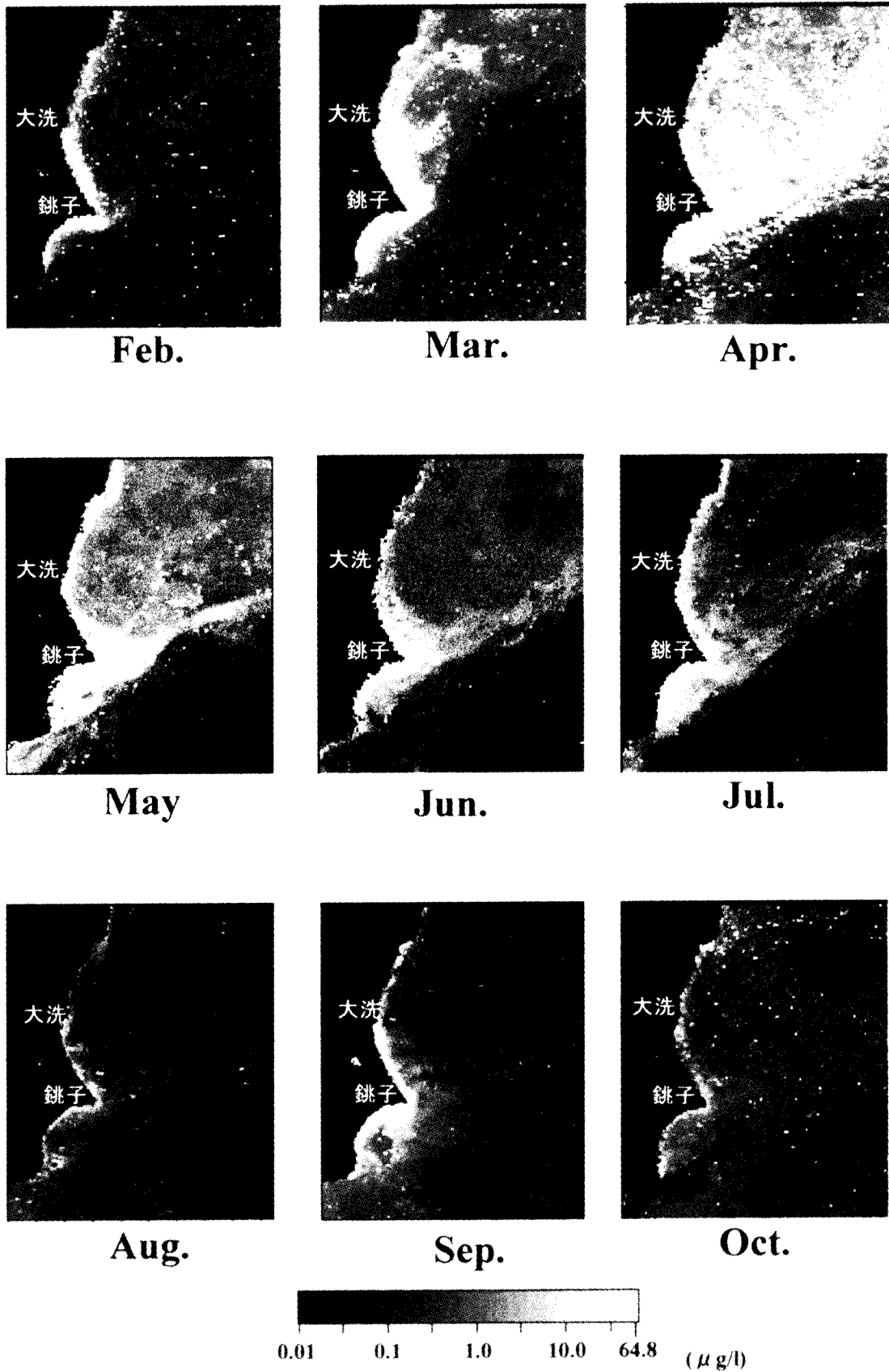


図10 人工衛星SeaWiFSによるクロロフィルa量推定値の空間分布(2000年2月~10月)

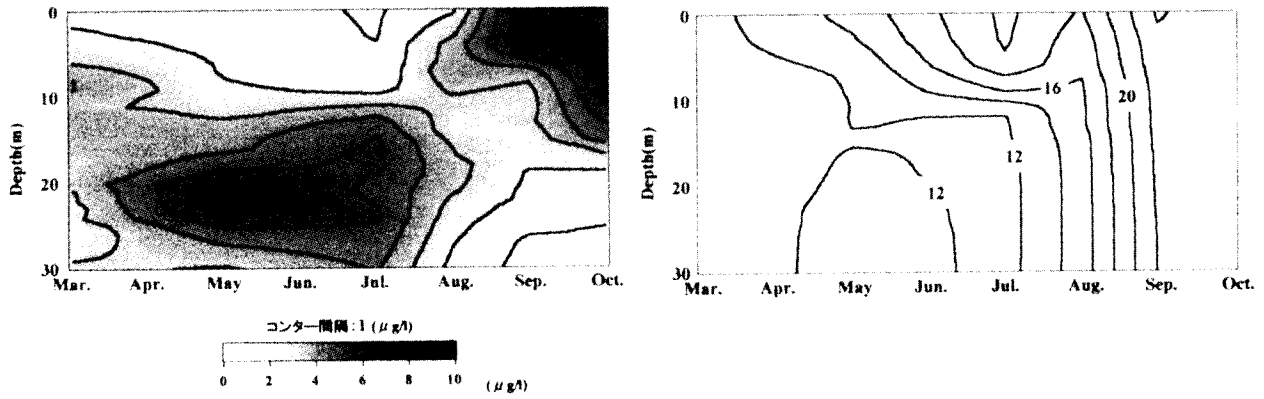


図11a クロロフィル a、水温の鉛直分布（陸棚海域）の経時変化（2000年3月～10月）

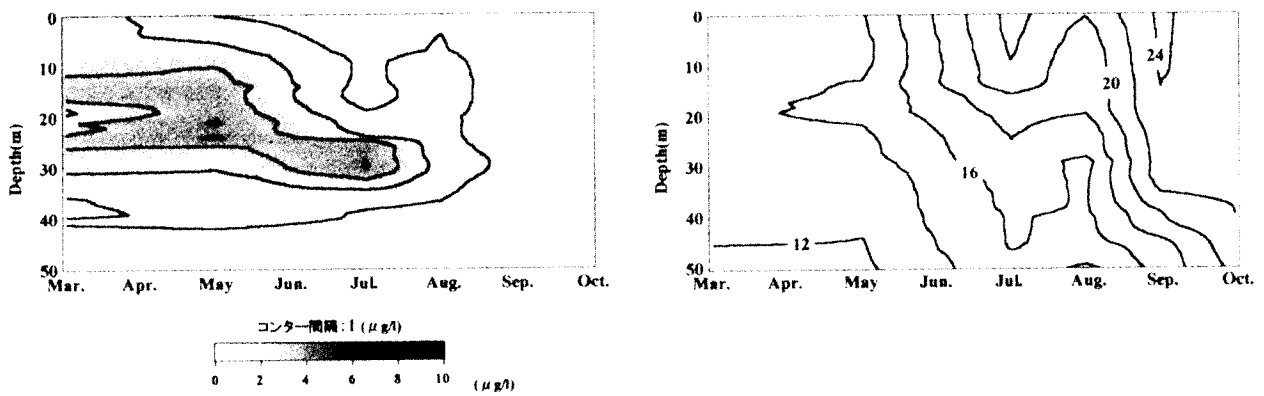


図11b クロロフィル a、水温の鉛直分布（外海域）の経時変化（2000年3月～10月）

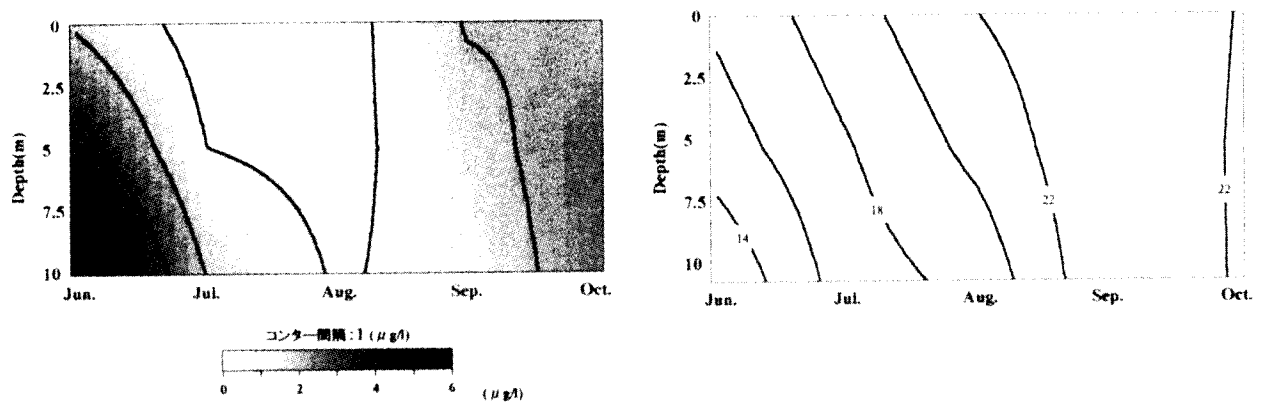


図11c クロロフィル a、水温の鉛直分布（浅海域）の経時変化（2000年6月～10月）

なっており、夏季以降に分布形態が変化していることがわかる。これは先述の栄養塩の空間構造との関係で考えれば、陸棚海域においては春季～初夏にかけては外海系の下層を中心とした栄養塩供給が主体であるために、クロロフィル a もそれに対応した形で下層に形成され、夏季以降には栄養塩分布が陸水系主体に切り替わることによって、表層を中心とした分布に遷移したと考えられる。これに対して、外海域では春季～夏季にかけて水深20～30mの位置付近にクロロフィル a 極大が形成されており、これは先に示した陸棚域の極大層に連なるものである。6、7月に極大層の位置がやや深くなるが、これはこの時期が温度成層の発達する時期に相当しており、海域の密度構造の影響を受けて極大層が低下したものであると考えられる。また、外海域は陸水影響が小さいために、栄養塩が低減する秋季には極大層は消滅している。一方、浅海域は陸棚海域の分布の特徴を反映した形となっており（但し、観測値は6～10月のみ）、初夏には底層でクロロフィル a 濃度が高く、秋季には表層で高くなる形に変化している。このように、沿岸域のクロロフィル a 濃度は、栄養塩分布に対応した季節変化、空間変化を表すことを本観測結果は示している。

4. 要 約

2000年に実施した観測結果に基づき、鹿島灘海域の栄養塩、クロロフィル a 濃度の空間分布特性（浅海域、陸棚海域、外海域の相違）とその季節変化の特徴を示した。主要な点を整理すると以下ようになる。

(1) 栄養塩分布について

- ① 浅海域では相対的に窒素が多く、9、10月に河川影響により大きく増える。
- ② 外海域では底層で栄養塩レベルが高い。冬季から夏季にかけて濃度が減少する。
- ③ 陸棚海域では初夏には外海域の影響を受け、秋季になると浅海域の影響を受ける。

(2) クロロフィル a 分布について

陸棚海域では初夏には下層で極大層が見られ、秋季になると極大層が表層へ移る。この傾向は浅海域のクロロフィル a 分布にも現れる。

謝 辞

今回の調査を実施するにあたり、茨城県水産試験場ときわ、水産工学研究所たか丸の乗務員の方々をはじめ、多くの方々の協力を得ました。深く感謝の意を表します。

文 献

- 足立久美子・日向野純也・木元克則（1994）鹿島灘砂浜海岸における一次生産、I、植物プランクトン量の変動（1992年）、水産工学研究所技報、16、13-24。
- 奥西武・足立久美子・日向野純也・中村義治・中山哲巖（2000）鹿島灘沿岸における一次生産の基本構造、海岸工学論文集、47、1021-1025。
- 武士和良（1999）茨城県における表面クロロフィル a 量の季節変化、茨城水試研報、37、101-114。