

夏季の鹿島灘沖と遠州灘沖におけるクロロフィル a の鉛直分布

塩本明弘*・松村皐月*

Vertical distribution of chlorophyll-a off Kashimanada and Enshunada, Japan, in summer

Akihiro SHIOMOTO* and Satsuki MATSUMURA*

Abstract

Chlorophyll-a concentration was measured on the edge of Kuroshio current, off Kashimanada and Enshunada, in summer 1987. The chlorophyll-a maximum layer was observed at depth of 30 m or 50 m which located near thermocline. The maximum layer formed patch which extended over several stations. It was indicated that phytoplankton populations were active at the layer. It was considered that both the increase and accumulation of phytoplankton cells participated in the formation of chlorophyll-a maximum layer in the study areas. The chlorophyll-a concentration at the maximum layer was different by patches. It was suggested that grazing by herbivores influenced significantly on the concentration of chlorophyll-a at the layer.

はじめに

クロロフィル a は植物に特有の色素で、すべての植物プランクトンに含まれる。この色素は植物プランクトンの現存量の指標としてはもちろんのこと、基礎生産量の指標としても用いられてきた (RYTHER and YENTSCH, 1957 等)。さらに、クロロフィル a とその分解生成物であるフェオ色素との割合は、植物プランクトンの細胞活性の指標 (黒田ほか, 1976; 黒田, 1985) や動物プランクトンによる摂食圧の指標 (LORENZEN, 1967) としても用いられてきた。

一般に、暖海域においては亜表層にクロロフィル a の極大層が認められており (SHULENBERGER and REID, 1981 等)、この層における植物プランクトンの種組成は表層と異なるらしい (VENRICK *et al.*, 1973; FURUYA and MARUMO, 1983)。また、市村 (1980) が要約したところによると、極大層での生産量は有光層内の生産量の 10~50% 程度を占めている。したがって、暖海域の生物生産において亜表層極大層での生産は重要な位置を占めているに違いない。そこで、クロロフィル a の鉛直分布を明らかにし、極大層の形成機構を探ることは暖海域における生物生産過程の解明につながる。

1988年10月1日受理 遠洋水産研究所業績 第256号

* 遠洋水産研究所 (Far Seas Fisheries Research Laboratory; 7-1, 5-chome Orido, Shimizu 424, Japan.)

亜表層クロロフィル a 極大層の形成機構についてはこれまでに様々な仮説が提唱されてきた。それらを通覧すると、複数の形成要因があり主要因は海域により異なる(古谷, 1984)。さらに、これら形成要因は、現場での植物プランクトンの増殖が極大層の形成に寄与するとする立場と寄与しないとする立場に大別される(丸茂・石丸, 1984)。

本報告では、夏季の黒潮縁辺部における調査によってみられた亜表層クロロフィル a 極大層の形成機構について、上述した2つの立場から検討した。

本研究を遂行するにあたって多大の御援助を賜った東海大学海洋学部岡部史郎教授、東海区水産研究所海洋部佐々木克之氏、並びに試料の採取にご協力を頂いた遠洋水産研究所調査船・俊鷹丸の乗組員の方々にお礼申し上げる。

試料及び方法

試料は、遠洋水産研究所調査船・俊鷹丸(393.44 t)を用いて、鹿島灘沖と遠州灘沖の黒潮縁辺部において採取された(図1)。調査期間は1987年8月20日から8月29日までの10日間であった。

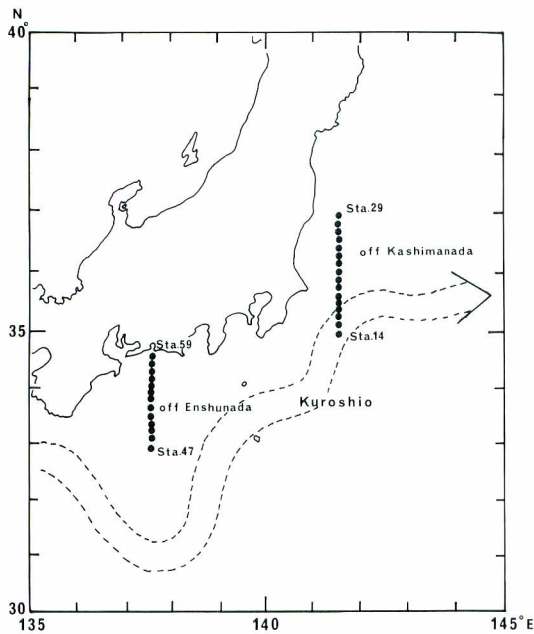


Fig. 1. Sampling stations off Kashimanada and Enshunada and Kuroshio current axis (Maritime Safety Agency, 1987).

試水は5-1のバンドン採水器を用いて水深0, 10, 20, 30, 50, 75及び100 mの合計7層から採取され、採水後直ちに希塩酸により前処理済みの47 mmのWhatman GF/Fガラスファイバーフィルターで濾過された。フィルターは実験室における測定時まで凍結保存された。クロロフィル a の測定にはターナー社製10-005 R型蛍光度計を用いた。懸濁態有機炭素(POC)と懸濁態有機窒素(PON)の定量にはカルロエルバ社製106型CHN元素分析計を用いた。ケイ酸態ケイ素($\text{SiO}_2\text{-Si}$)、亜硝酸+硝酸態窒素($\text{NO}_2+\text{NO}_3\text{-N}$)とリン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)は、試水を100 mlのポリ瓶に入れて凍結保存後、STRICKLAND and PARSONS (1968)の方法に準じて分析された。水温はDBTを用いて測定された。また、水中照度はバイオスフェリカル社製のMER 1010 分光放射照度計を用いて測定された。

結 果

鹿島灘沖と遠州灘沖における水温の鉛直断面を図2に示す。鹿島灘沖ではSta. 18以北の水深10~40 mに水温躍層がみられた。これは黒潮水が親潮系水に乗り上げていることによる。一方、遠州灘沖においては、Sta. 47~55にかけて水深20~50 mに水温躍層がみられ、Sta. 56以北は浅くなり、Sta. 59では10~20 mに躍層が形成されていた。

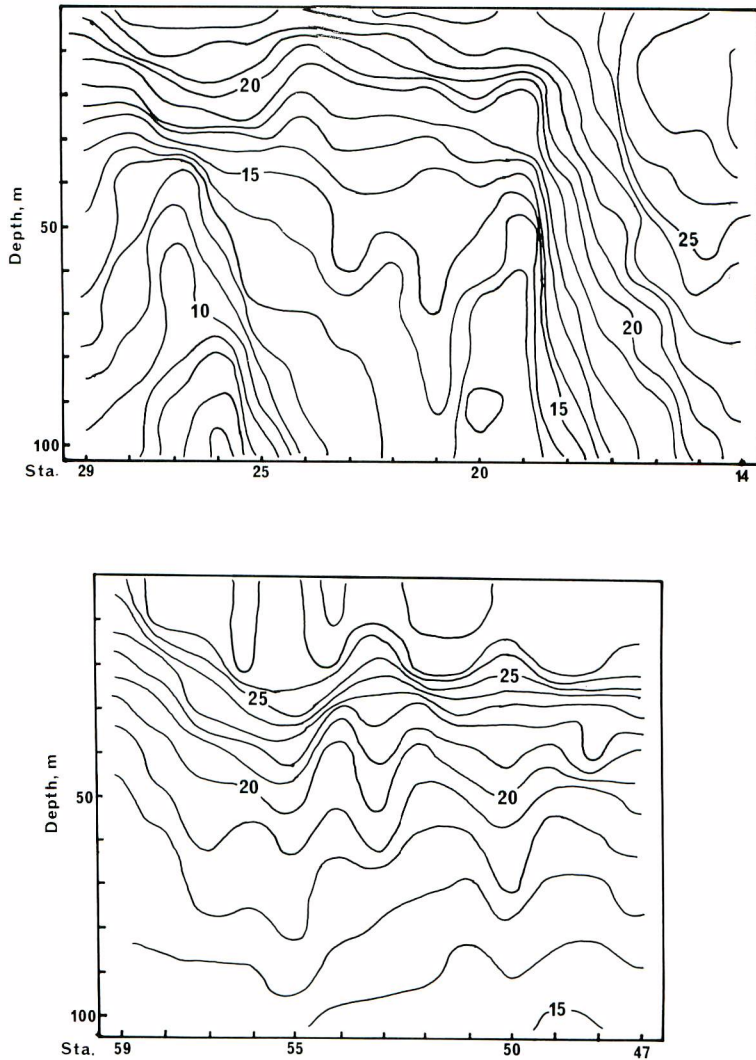


Fig. 2. Vertical sections of temperature ($^{\circ}\text{C}$) off Kashimanada (upper) and Enshunada (lower).

鹿島灘沖と遠州灘沖でのクロロフィル a の鉛直断面を図 3 に示す。得られたクロロフィル a の濃度は、鹿島灘沖で $0.28 \sim 2.42 \mu\text{g l}^{-1}$ 、遠州灘沖で $0.04 \sim 1.93 \mu\text{g l}^{-1}$ であった。鹿島灘沖では、Sta. 18~25 までの観測点にクロロフィル a の極大層が水深 20 m あるいは 30 m を中心にみられた。極大層での濃度は $1 \sim 2 \mu\text{g l}^{-1}$ 程度であった。これらの極大層はいくつかの観測点に拡がるパッチを形成していた。すなわち、Sta. 18~22 と Sta. 23~25 に 2 つのパッチが存在していた。一方、遠州灘沖においても、クロロフィル a の極大層が、Sta. 47~54 での観測点では水深 50 m を中心に、Sta. 56~58 では水深 30 m を中心にみられた。極大層での濃度は Sta. 47~54 では $0.5 \sim 1 \mu\text{g l}^{-1}$ 、Sta. 56~58 では $1 \sim 2 \mu\text{g l}^{-1}$ であった。これらの極大層は鹿島灘沖の場合と同様にいくつかの観測点に拡がるパッチを形成していた。すなわち、Sta. 47~54 の海域と Sta. 56 以北の各点が位置する海域に 2 つのパッチが存在していた。

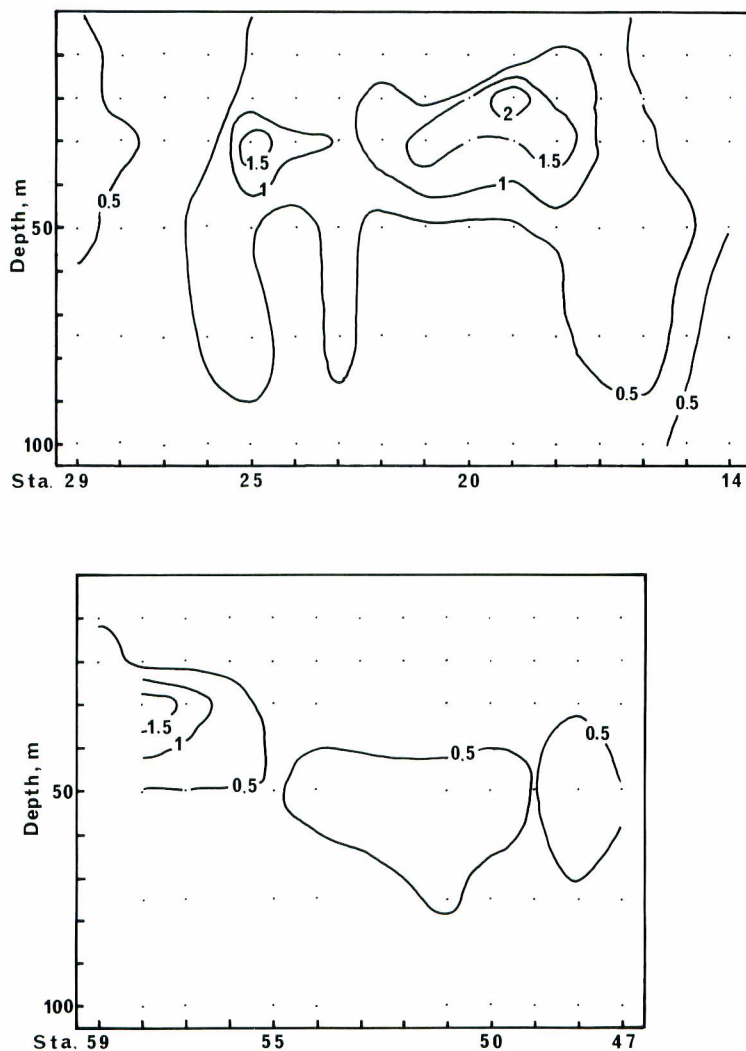


Fig. 3. Vertical profiles of chlorophyll-a concentration ($\mu\text{g l}^{-1}$) off Kashimanada (upper) and Enshunada (lower).

本調査においてみられたクロロフィル a の極大層は、鹿島灘沖では躍層とほぼ同じ深さに、遠州灘沖では躍層直下にみられた。また、表面での光の強さを 100% とすると、クロロフィル a の極大層は 1 ~ 5 % 前後の深さ、すなわち有光層の底部に位置していた。

得られたフェオ色素の濃度は、鹿島灘沖で $0.04 \sim 1.24 \mu\text{g l}^{-1}$ 、遠州灘沖で $0.03 \sim 1.22 \mu\text{g l}^{-1}$ であり、その鉛直断面はクロロフィル a の断面とほぼ同様であった(図 4)。また、クロロフィル a、フェオ色素及び POC の鉛直分布をみると、ほとんどの観測点においてクロロフィル a が極大となる深さで、他の 2 成分も極大となっていた(図 5)。

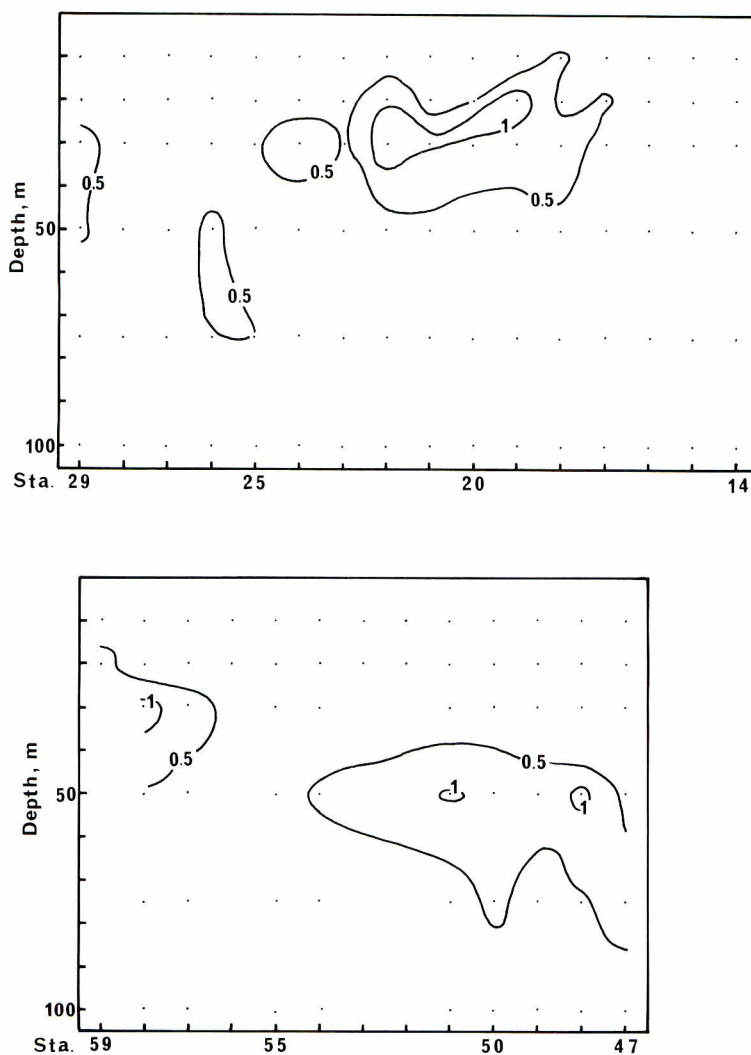


Fig. 4. Vertical profiles of phaeo-pigment concentration ($\mu\text{g l}^{-1}$) off Kashimanada (upper) and Enshunada (lower).

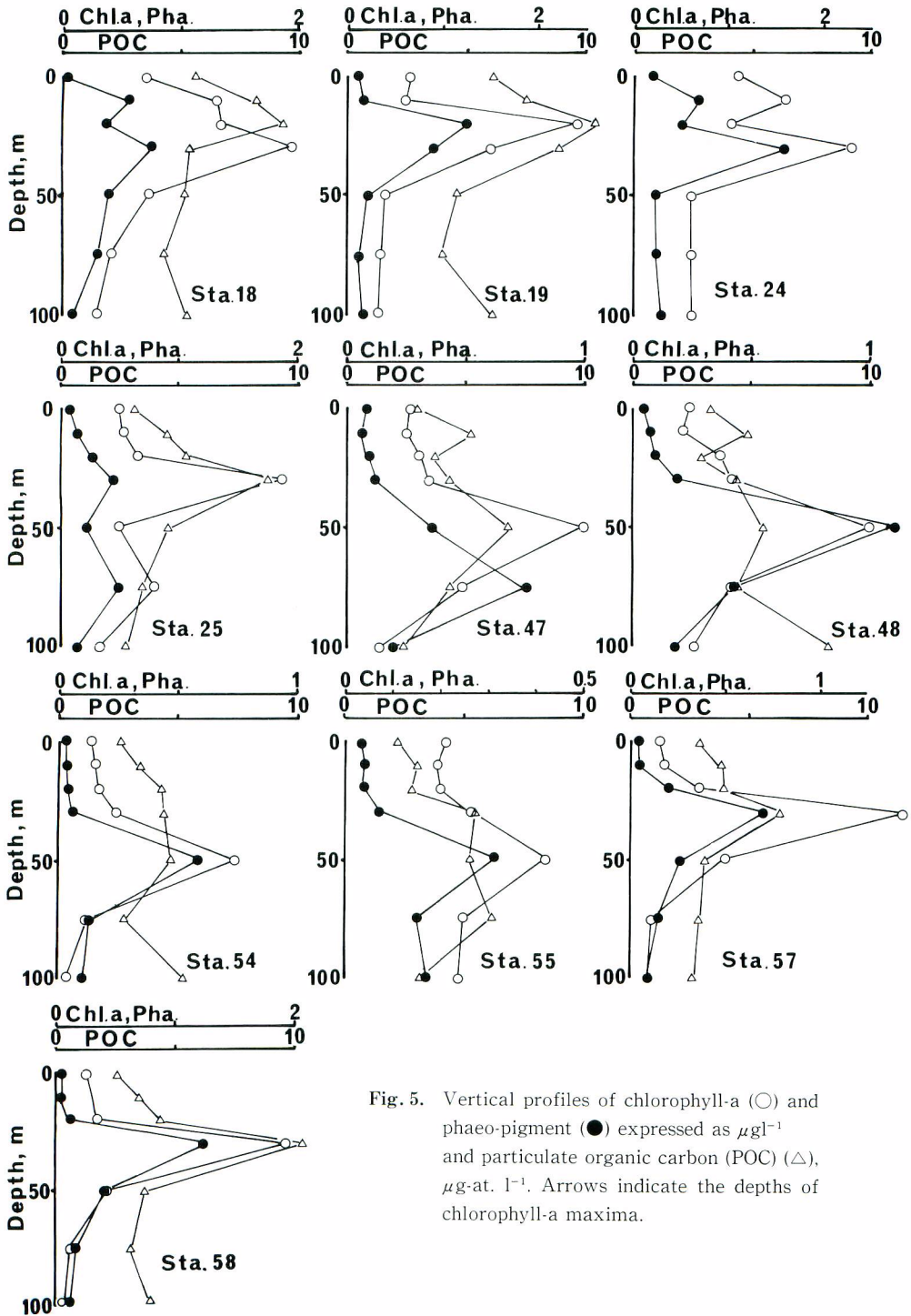


Fig. 5. Vertical profiles of chlorophyll-a (○) and phaeo-pigment (●) expressed as $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ and particulate organic carbon (POC) (Δ), $\mu\text{g}\cdot\text{at. l}^{-1}$. Arrows indicate the depths of chlorophyll-a maxima.

栄養塩類の鉛直断面を図 6 に示す。各栄養塩ともに表面ではほぼ枯渇状態を呈していたが、クロロフィル a 極大深度より以深では深さとともに増加していた。クロロフィル a 極大層における各栄養塩の濃度は観測点間で顕著な差はなく、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ が $5 \mu\text{g-at.l}^{-1}$ 、 $\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$ が $1 \mu\text{g-at.l}^{-1}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が $0.1 \mu\text{g-at.l}^{-1}$ 程度であった。

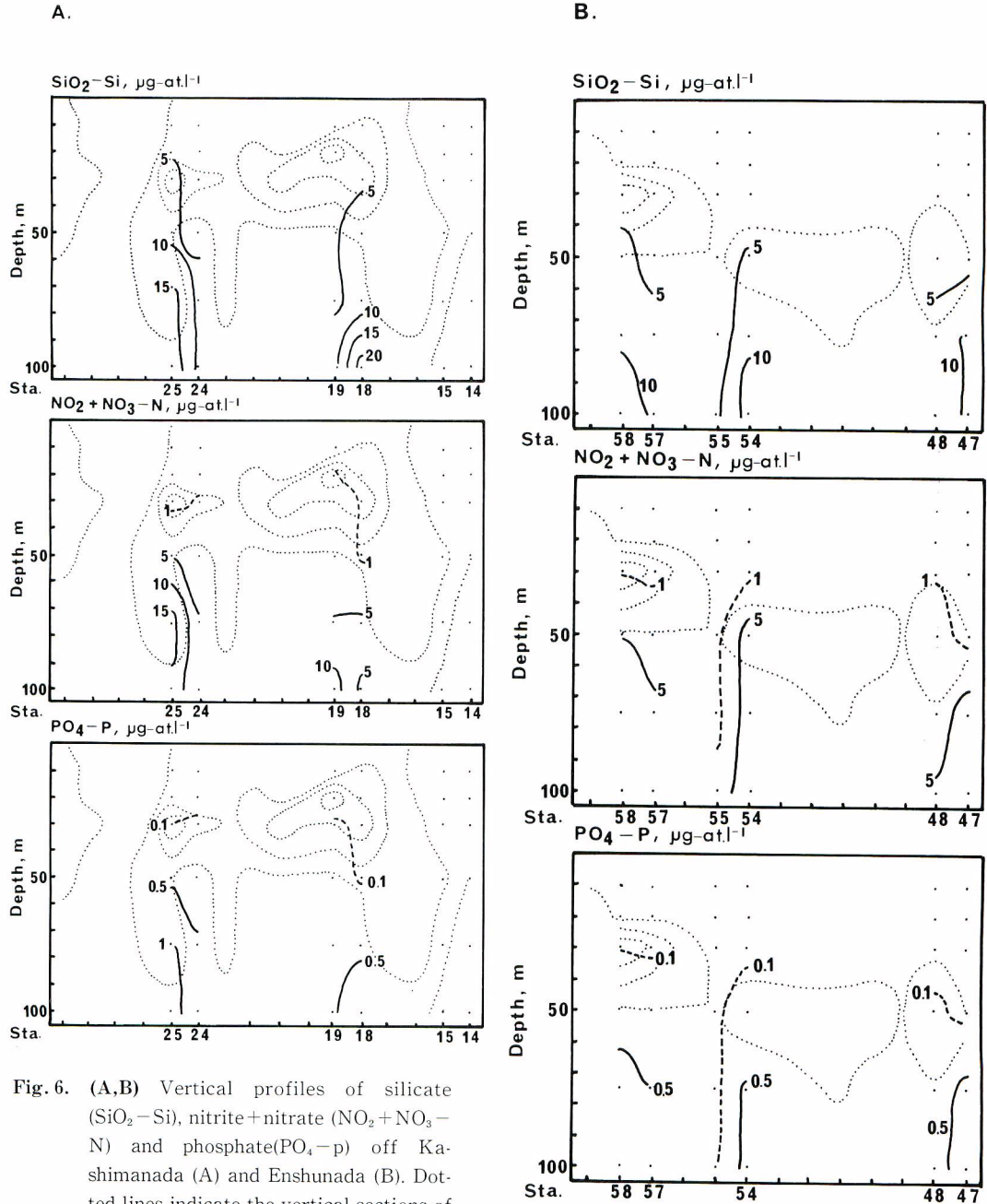


Fig. 6. (A,B) Vertical profiles of silicate ($\text{SiO}_2\text{-Si}$), nitrite+nitrate ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3\text{-N}$) and phosphate ($\text{PO}_4\text{-p}$) off Kashimanada (A) and Enshunada (B). Dotted lines indicate the vertical sections of chlorophyll-a (cf. Fig. 3).

考 察

亜表層でクロロフィル a が極大となる要因は次の 2 つの説に大別される (丸茂・石丸, 1984)。すなわち、現場における植物プランクトンの増殖が極大層の形成に寄与するとする説と、増殖が極大層形成に寄与せず、植物プランクトン細胞の集積作用により形成されるとする説である。本報においては増殖と集積作用が調査海域においてみられたクロロフィル a の極大層の形成要因であるか否かについて検討を加えた。

増殖が関与しているならば、極大層の植物プランクトンは他の深さのプランクトンに比べて活発な増殖を行っているはずである。POCとクロロフィル a の比 (POC/Chl. a) 及び POCとPONの原子比 (C/N) は植物プランクトンの活性を知るうえでの指標となる。POC/Chl. a は小さいほど懸濁物中に占める植物プランクトンの割合が高いことを表している。また、C/N は一般にレッドフィールド比、すなわち C/N=6.6 (REDFIELD *et al.*, 1963) に向かい小さくなるほど懸濁物中に占める生きている個体の割合が高いことを表している。したがって、POC/Chl. a が小さく、かつ C/N が 6.6 に近いほど懸濁物を構成する植物プランクトンは活発な増殖を行っていると考えられる。これらの比の鉛直分布を図 7 に示す。表面での値を除き、クロロフィル a 極大層において POC/Chl. a は極小となり、C/N はレッドフィールド比に最も近かった。これらの結果から、クロロフィル a 極大層を形成している植物プランクトンは他の深さのプランクトンに比べて活発な増殖を行っていると考えられる。

極大層で深の栄養塩類の濃度は深度が増すに従って増加していた (図 4)。このことは下層からこの層への栄養塩類の連続的な供給があることを示唆し、この供給が極大層における植物プランクトンの活発な増殖を維持しているものと推測される。

次に、集積作用が大きく関与しているならば、クロロフィル a は懸濁物として水温躍層に滞留、集積されることが十分起こり得る。クロロフィル a 極大層は、海域により多少の違いはあるものの、水温躍層と一致するか、あるいは隣接して出現していた (図 2, 3)。さらに、フェオ色素及び POC の極大層深度も水温躍層と一致あるいは隣接していたが (図 5)、これらの大半はデトライタスであり、増殖能力のないこれらが集積しているという結果は極大層深度に懸濁物の集積が起きていることを示している。以上のことより、本調査海域においては、少なくとも増殖と集積の両者が極大層の形成に関与していると考えられた。

極大層でのクロロフィル a の濃度はパッチによって異なっていた (図 3)。クロロフィル a の濃度は一義的には基礎生産力によって決まる。したがって、クロロフィル a の濃度は光の強さ、水温及び栄養塩類の濃度に依存するが、これらの値にパッチ間で顕著な相違は認められなかった (図 2, 4)。このことから、各パッチは同程度の潜在生産力をもっていると考えられる。ところが、パッチ間でクロロフィル a の濃度に違いがみられたことは、基礎生産力以外にも植物プランクトンの量に影響を及ぼす要因のあることを示唆している。

動物プランクトン (マイワシのような植物プランクトン摂食者も含まれるかもしれない) による摂食作用は主な要因のひとつであろう。各パッチにおける摂食圧の違いについて検討した。動物プランクトンによる摂食、排泄作用によってクロロフィル a はフェオ色素に変わるので、フェオ色素の濃度 (Pha) とクロロフィル a の濃度 (Chl. a) との比 (Pha/Chl. a) を摂食圧の指標として用いた (WELSCHMEYER and LORENZEN, 1985 等)。この比が大きいほど摂食圧は強きことになる。Sta. 18~22, Sta. 23~25 及び Sta. 57~59 の各パッチにおいては、クロロフィル a の濃度、Pha/Chl. a ともにほぼ等しかった (表 1)。

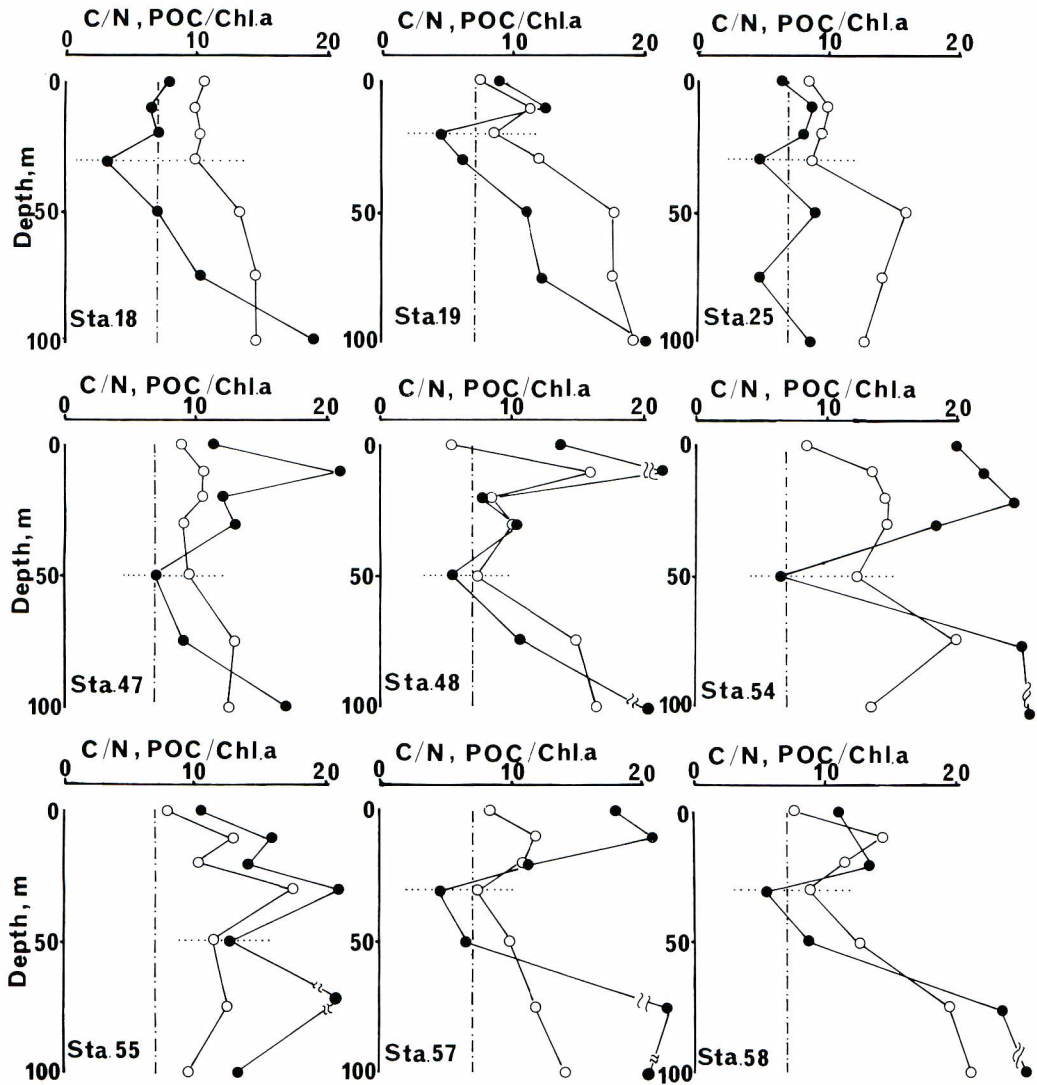


Fig. 7. Vertical profiles of C : N atomic ratio (○) and POC : Chl a ratio (●). Dotted lines and broken lines indicate the depth of chlorophyll-a maxima and Redfield ratio (C/N=6.6), respectively.

Table 1. Chlorophyll-a concentration (Chl.a) and phaeo-pigment : chlorophyll-a ratio (Pha/Chl.a) at the depth of chlorophyll-a maximum.

Sta.	Depth of Chl.a maximum (m)	Chl.a ($\mu\text{g/l}$)	Pha/Chl.a
18	30	1.89	0.39
19	20	2.42	0.51
20	30	1.71	0.35
21	30	1.93	0.55
22	20	1.14	0.86
	mean \pm SD ($\sigma n-1$)	1.82 \pm 0.66	0.53 \pm 0.20
23	30	0.99	0.49
24	30	1.15	0.70
25	30	1.87	0.25
	mean \pm SD ($\sigma n-1$)	1.34 \pm 0.47	0.48 \pm 0.23
47	50	0.51	0.69
48	50	1.00	1.10
49	50	0.49	1.43
50	50	0.71	1.27
51	50	0.66	1.58
52	nd	nd	nd
53	nd	nd	nd
54	50	0.74	0.78
	mean \pm SD ($\sigma n-1$)	0.69 \pm 0.19	1.14 \pm 0.35
57	30	1.38	0.49
58	30	1.93	0.63
59	nd	nd	nd
	mean \pm SD ($\sigma n-1$)	1.65 \pm 0.39	0.56 \pm 0.10

nd : no data

これらに対して、Sta. 47~54におけるクロロフィル a の値は低く、Pha/Chl. a は高かった。このような結果は摂食圧の差が極大層のクロロフィル a 値の相違を導いている可能性が大きいことを示唆している。

今後、クロロフィル a 極大層を形成する植物プランクトンの生理的状态を直接的な手法を用いて明確にするとともに、動物プランクトンの摂食圧を同時に定量化することにより、極大層の形成機構やその質的・量的相違を生じさせる要因に関する知見が得られるものと思われる。さらに、暖海域においては極大層での基礎生産量が全水柱内における基礎生産量にどれだけ寄与しているかを定量化することも重要であろう。

要 約

夏季の鹿島灘沖と遠州灘沖の黒潮縁辺部においてクロロフィル a の鉛直分布を調査した。その結果、

亜表層にクロロフィル a の極大層が認められた。極大層はいくつかの観測点に広がるパッチを形成していた。

極大層を形成する植物プランクトンは活発に増殖しており、また、極大層は水温躍層近辺にみられた。これらのことから、調査海域において認められた極大層の形成には増殖と細胞の集積作用の両方が同時に関与していると考えられる。

極大層でのクロロフィル a の濃度はパッチによって異なっていた。パッチ間潜在生産力に差がなく、動物プランクトン（マイワシのような植物プランクトン摂食者も含まれているかもしれない）による摂食圧に差があるとみなされた。したがって、クロロフィル a 濃度の違いは摂食圧の差に起因している可能性が高い。

文 献

- 古谷 研 1984：海洋植物プランクトンの分布形態. 日本プランクトン学会創立 30 周年記念号, 7-11.
- FURUYA, K. and R. MARUMO 1983: The structure of the phytoplankton community in the subsurface chlorophyll maxima in the western North Pacific Ocean. *J. Plankton Res.*, 5 (3), 393-406.
- 市村俊英 1980：亜表層植物プランクトン群集の生産性. 生物の生産機能の開発, 文部省, 80-106.
- 海上保安庁 1987：海洋速報, No. 17.
- 黒田一紀 1985：冬季日本南方海域におけるクロロフィル色素の分布特性. 黒潮の開発利用の調査研究成果報告その 8, 科学技術庁, 316-330.
- ・馬場信夫・高橋晴久 1976：試料. 遠州灘海域におけるクロロフィル色素の鉛直分布—1974 年 7 月および 1975 年 2 月—. 海と空, 52 (1, 2), 5-39.
- LORENZEN, C.J. 1967: Vertical distribution of chlorophyll and pheopigment: Baja California. *Deep-Sea Res.*, 14 (6), 735-745.
- 丸茂隆三・石丸 隆 1984：暖海域における植物プランクトンの鉛直分布. 海洋の生物過程 (丸茂隆三編), 94-99, 恒星社恒星閣, 東京.
- REDFIELD, A.C., B.H. KETCHUM and F.A. RICHARD 1963: The influence of organisms on the composition of sea-water. In: *The Sea* (Hill, M.N., ed.), 2. 26-77, Jhon Wiley and Sons, London and New York.
- RYTHER, J.H. and C.S. YENTSCH 1957: The estimation of phytoplankton production in the ocean from chlorophyll and light date. *Limnol. Oceanogr.*, 2 (3), 281-286.
- SHULANBERGER, E. and J.L. REID 1981: The Pacific shallow oxygen maximum, deep chlorophyll maximum and primary productivity, reconsidered. *Deep-Sea Res.*, 28 (9), 901-919.
- STRICKLAND, J.D.H. and T.R. PARSONS 1968: A practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada*, 167, 1-311.
- VENRICK, E.L., J.A. MCGOWAN and A.W. MANTYLA 1973: Deep maxima of photosynthetic chlorophyll in the Pacific Ocean. *Fish. Bull.*, 71 (1), 41-52.
- WELSCHMEYER, N.A. and C.J. LORENZEN 1985: Chlorophyll budgets: Zooplankton grazing and phytoplankton growth in a temperate fjord and the central Pacific gyre. *Limnol. Oceanogr.*, 30 (1), 1-21.