

培養実験による相模湾の植物プランクトン群集に対する海洋深層水の肥沃化効果

Fertilization Effects of Deep Ocean Water on the Phytoplankton Community in Sagami Bay using Incubation Experiments

井関和夫¹・高橋香菜²・早野智子¹・中嶋さやか^{1,3}

Kazuo ISEKI¹, Kana TAKAHASHI², Satoko HAYANO¹ and Sayaka NAKAJIMA^{1,3}

Abstract

The response of the surface water phytoplankton community in Sagami Bay by the addition of deep ocean water (DOW) was examined under natural sunlight in early September 2005. DOW collected from 205 m depth was mixed with surface water (SW) from 10 m in 20 liters polycarbonate bottles and incubated on deck of the R/V Tansei Maru using a deck incubator under different attenuated natural irradiance (25%, 13% and 6% attenuation for the mixed water). The DOW and the SW were also incubated at 25% and 50% attenuation, respectively. Chlorophyll *a* (Chl. *a*) increased rapidly in the mixed water under 25% attenuation and reached maximum concentration at 4 days later when nitrate and phosphate were depleted but silicate was not depleted until the end of the experiment. Particulate organic carbon (POC), particulate organic nitrogen (PON), and particulate biogenic silicon (BSi) also showed similar increases but did not have as conspicuous a peak within the incubation period as Chl. *a*. The net increase of particulate matter was well correlated with the net decrease of nutrients and the specific growth rates of Chl. *a* increased with the increase of light intensity and the initial nutrient concentration. These results clearly indicate the potential fertility of DOW to phytoplankton community in Sagami Bay and for ocean fertilization the pumped-up DOW should remain at water depths shallower than 20 m (more than 10% attenuation of surface irradiance) for several days or more.

Key Words: deep ocean water, fertilization, nutrients, phytoplankton, Sagami Bay

要　旨

2005年9月上旬に相模湾中央部で採取した表層水（10 m）と深層水（205 m）および両者の混合水（表層水：深層水=2:1）を遮蔽用ネットで覆い光強度の異なる天然光下で培養し、栄養塩類、クロロフィル *a* (Chl. *a*)、粒状有機炭素・窒素 (POC・PON) および生物起源ケイ素 (BSi) の日変化を調べ、深層水の肥沃化効果を検証した。25%光透過率の混合水では、培養開始4日に顕著な Chl. *a* ピーク（最大値）と硝酸塩とリン酸塩の枯渇を示したが、ケイ酸塩は実験期間中に枯渇状態に至らなかった。Chl. *a*、POC、PON 及び BSi の増加量は栄養塩の減少量に比例し、また Chl. *a* の比増加速度は光強度に対して強い依存性を示し、実験開始時の初期栄養塩濃度にも影響を受けていた。これらの結果は相模湾における海洋深層水の肥沃化ポテンシャルを明瞭に示し、肥沃化のためには人工揚水した深層水を、夏季表面光量の10%程度以上の水深に少なくとも数日間以上にわたって滞留させる必要があると推察された。

キーワード：海洋深層水、肥沃化、栄養塩、植物プランクトン、相模湾

¹広島大学大学院生物圏科学研究科（〒739-8528 広島県東広島市鏡山1-4-4）

²広島大生物生産学部（〒739-8528 広島県東広島市鏡山1-4-4）

³現住所：五洋建設株式会社技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1）

連絡先：井関和夫（〒739-8528 広島県東広島市鏡山1-4-4 広島大学大学院生物圏科学研究科）

1. 諸 言

20世紀後半において、人類は環境・資源・人口（または経済）の3つの問題を抱えたグローバル・トリレンマ状態に陥り、その打開策として再生産型資源の利用が注目され、海洋深層水の資源特性（低水温、富栄養、清浄など）の有効利用が図られてきた（高橋, 1994; 井関, 2000; 高橋・井関, 2000; Takahashi and Ikeya, 2003）。一方、水産資源に眼を向けると、近年、乱獲や海洋汚染、気候変動などにより世界的に漁獲量が落ち込むなかで、我が国の漁獲量も1980年代の最盛期（年間当たり約1200万トン）から一貫して減少傾向にあり、2000年代の水産物自給率は60%程度に低下している。今後の世界規模の人口増加を考慮すると、自給率の低下と食料不足がさらに深刻化することが懸念される。このため、我が国経済水域内で漁業生産性を高め、活用していくことが重要となる。これまでの漁獲量や低次生態系の調査では、湧昇海域における高い生物生産性が良く知られており（Menzel, 1967; Ryther, 1969; Ishizaka *et al.*, 1983），湧昇流の起源である深層水の植物プランクトンに対する増殖効果も、深層水、あるいは深層水と表層水の混合水を用いた培養実験など（Ishizaka *et al.*, 1983; Wilkerison and Dugdale, 1987; 中島, 1988; Furuya *et al.*, 1993; Iseki *et al.*, 1994; 池谷ら, 2001, 2003; Niraula *et al.*, 2005）により確認されている。このような社会的背景と科学的知見を基に、1989–90年の夏季に富山湾氷見沖において、水深220mの亜表層水を表層水と混合して有光層内に揚水・散布する世界初の洋上肥沃化実験が実施された（木谷・長田, 1989; Iseki *et al.*, 1994）。また、近年では、社団法人マリノフォーラム21の「深層水活用型技術開発事業」及び「海洋肥沃化システム技術確立事業計画」として、2003–2007年の夏季を中心に、相模湾中央部において、洋上肥沃化装置「拓海」（大内, 2002; 宮部ら, 2004）により水深200mから揚水した亜表層水（日量10万トン）と水深5mの表層水（日量20万トン）を混合し、水深20mに密度流として放流する洋上肥沃化実験が

行われた。この肥沃化実験中及びその前後の期間には、相模湾全体の一般海洋観測、漂流ブイによる放流水の追跡・挙動把握（井関, 2002; 井関・大村, 2004）および船上培養実験などの一連の調査が行われた。著者らは、その一環として、相模湾深層水の放流による植物プランクトン群集への肥沃化効果を調べるために、2005年9月に東大洋研究所「淡青丸」の相模湾調査中に船上で深層水や表層水との混合水を用いて植物プランクトン培養実験を行い、光強度と栄養塩濃度が植物プランクトンの増殖に及ぼす影響を明らかにすることができたので報告する。

2. 方 法

本培養実験で用いた海水は、東大洋研究所「淡青丸」KT-05-22航海期間中の2005年9月9日午前3～4時に、相模湾中央部に設置された海洋肥沃化装置「拓海」周辺（ $35^{\circ}05'N$, $139^{\circ}21.5'E$ ）において、水深10m（表層水）と205m（深層水）からCTD・クロロフィルセンサー搭載ロゼット型ニスキン採水器で採取した。これらの海水を用いて、表層水と深層および両者の混合水（表層水：深層水=2:1）と光条件の組み合わせからなる5つ実験区を設けた（Table 1）。試水はニスキン採水器からテフロンチューブを用いて、光量の調節を行うため遮光用ネットで覆った20lポリカーボネート瓶（10%塩酸液で洗浄後にMQ水で洗浄）に入れ、甲板上の自然太陽光下で、表層水を循環させた透明なアクリル水槽内で培養実験を行った。表層水は10m採水層の光透過率を考慮して50%の光透過率

Table 1 Light transmission in different incubation bottles

Block (Incubation bottles)	
10 m	50%
205 m	25%
Mixed water*	25%
Mixed water*	13%
Mixed water*	6%

*Mixed water: Surface water : Deep ocean water = 2 : 1 (volume ratios)

(以下、表層水 50 と記述), 深層水は「拓海」の放流水深 (20 m) 付近の光透過率を考慮して 25% 透過率 (深層水 25) とし、混合水は、それぞれ 25 %, 13% および 6 % 透過率 (混合水 25, 混合水 13 および混合水 6) に設定した。また、培養期間中の天然の光量子量の日変化は、拓海に設置された光量子計 (Li-Cor 社製 LI-190, 15 分間隔) でモニタリングした。なお、海洋肥沃化装置「拓海」の放出口がある水深 20 m での光量子量は、太陽入射光量の 2~10% 程度と推定された (Hashihama *et al.*, 2008)。培養実験は、2005 年 9 月 9 日~14 日の 5 日間を行い、毎日午前 6 時に各ポリカーボネート瓶から試水を採取した。

培養実験の試水は、栄養塩 (硝酸 + 亜硝酸塩 ($\text{NO}_3 + \text{NO}_2$) • リン酸塩 (PO_4) • ケイ酸塩 (SiO_4)), クロロフィル *a* (Chl. *a*), 粒状態有機炭素・窒素 (POC • PON), 生物起源粒状珪素 (BSi) の分析に供した。栄養塩は、試水の一部をマイレクス HA (孔径 0.45 μm) でろ過後、ろ液を冷凍保存し、後日オートアナライザー (TRAACS 2000) を用いて分析した。Chl. *a* の分析は、試水 500 ml を Whatman GF/F フィルターでろ過後、N,N-ジメチルホルムアミド (DMF) で抽出し (Suzuki and Ishimaru, 1990), 蛍光光度計 (Turner Design) を用いて分析した。POC と PON は、予め熱処理した (450°C, 2 hr) 25 mm GF/F フィルターで試水 1000 ml をろ過し、乾燥後のフィルターをデシケータで保存した。分析前に、濃塩酸の噴霧により無機炭素の除去を行い、CHN コーダー (Yanaco MT-5) を用いて有機炭素・窒素量を測定した。BSi は、試水 1000 ml を 47 mm ヌクレポアフィルター (孔径 0.6 μm) でろ過し、1 % Na_2CO_3 溶液を用いて 85°C, 1 hr の条件で BSi を抽出した後、抽出上澄み液を HCl で中和後にモリブデンブルー法で分

析を行った (Demaster, 1981; 中嶋・井関, 2006)。

培養期間中における植物プランクトン比増殖速度 (μ , d^{-1}) は、Chl. *a* 濃度の指數関数的増殖を仮定して Chl. *a* 濃度の時間変化から次式で求めた。

$$\mu = [1/(t_2 - t_1)] \cdot \ln(C_2/C_1)$$

C_1 と C_2 は、それぞれ時間 t_1 と t_2 における Chl. *a* 濃度である。深層水 25 以外の各実験区では、0 日目と Chl. *a* の最大値が得られた日の Chl. *a* 濃度の値とその間の日数から比増殖速度を求めたが、深層水 25 では、後述する理由により、0 日目の代わりに 1 日目の Chl. *a* 濃度の値を用いて同様の計算を行った。

3. 結 果

3-1. 実験開始前の採水点の水塊構造

2005 年 9 月 9 日の採水時には、海洋肥沃化装置「拓海」周辺の表層 0 ~ 5 m に顕著な低塩分水 (32.7~33.8 psu), 水深 10~20 m にかけて塩分躍層の発達が認められた。3 日前の 9 月 6 日には台風 14 号が長崎県に上陸し、日本海を北東に進み 8 日にオホーツク海に抜けていったため、この間の集中豪雨に伴い大量の河川水が相模湾に流入し、低塩分水が湾中央部まで影響を及ぼしたと考えられる。そこで、栄養塩濃度の高い河川水の影響を避けるため、「拓海」の取水口に相当する水深 5 m の代わりに 10 m から採水した。実験に用いた水深 205 m における硝酸塩濃度は 20.9 μM であったが、水深 10 m でも 3.5 μM という高い値を示し (Table 2), 河川水の影響と推察された。なお、培養期間中の光量子量は、実験初日 (9 月 9 日) は曇天で 12.7 $\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であったが、2 日目以降は天候が回復し 22.3 $\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ から 27.6 $\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ の間での変動であった。

Table 2 Water properties of surface (10 m) and deep ocean water (205 m) used for the incubation experiment

	Temperature (°C)	Salinity (psu)	Chl. <i>a</i> ($\mu\text{g l}^{-1}$)	$\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ (μM)	PO_4 (μM)	SiO_4 (μM)
Surface Water	21.0	34.17	1.37	3.53	0.26	8.15
Deep Ocean Water	10.4	34.43	0.028	20.9	1.61	41.1

3-2. 培養実験における栄養塩濃度と懸濁物濃度の日変化

培養実験中の各実験区における栄養塩濃度の時間変化をFig. 1に示した。培養期間中に、表層水50では $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ と PO_4 は2日目にはほぼ枯渇した。一方、深層水25では栄養塩濃度の減少は認められたが、実験終了時における減少率は初期濃度の僅か10%程度であった（例えば、 $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ 濃度は0日目と5日目でそれぞれ20.9 μM と18.8 μM ）。混合水を用いた3実験区（栄養塩の初期濃度は同一）では、光透過率が減少するにつれて栄養塩の減少速度も小さくなり、減少速度が最大の混合水25では4日目に $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ と PO_4 が枯渇していたが、混合水13と混合水6では、実験終了時でも十分な濃度（それぞれ4.2 μM と7.2 μM 以上の $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ ）が残存していた。 SiO_4 も $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ や PO_4 同様に減少傾向を示したが、実験期間内に全ての実験区で4 μM 以上の濃度を保ち、枯渇状態には至らなかつた。

一方、Chl.*a*、POC、PONおよびBSi濃度は、培養期間中に全ての実験区で増加が見られた（Fig. 2）。表層水50では、Chl.*a*濃度は実験開始後は増加していたが、2日目の栄養塩の枯渇（Fig. 1）に

より3日目から減少し、実験終了時には初期濃度（1.37 $\mu\text{g l}^{-1}$ ）より低い値（0.84 $\mu\text{g l}^{-1}$ ）になっていた。混合水を用いた3実験区では、光透過率が大きいほどChl.*a*濃度の増加は大きく、混合水25では4日目には初期濃度（0.92 $\mu\text{g l}^{-1}$ ）の17倍程度まで増加して15.5 $\mu\text{g l}^{-1}$ となったが、5日目には3.83 $\mu\text{g l}^{-1}$ に減少した。混合水25と較べると、混合水12、混合水6におけるChl.*a*の増加は顕著に小さく、4日目のChl.*a*濃度はそれぞれ初期値の3.9倍と1.8倍であった。深層水25では、培養期間中のChl.*a*濃度の増加は僅か1.15 $\mu\text{g l}^{-1}$ であったが、初期濃度（0.028 $\mu\text{g l}^{-1}$ ）と較べると5日目の値（1.18 $\mu\text{g l}^{-1}$ ）は約42倍であった。POCもChl.*a*と同様に全ての実験区で増加が見られ、表層水50は3日目に、混合水25、12および6は5日目に最大値を示した。このうち、混合水25では特に顕著な増加を示し、0日日の濃度が56.6 $\mu\text{g l}^{-1}$ であるのに対して、5日目には約9倍の490.5 $\mu\text{g l}^{-1}$ に達する最大値を示した。PONはPOCとほぼ同様の時間変化を示し、混合水25ではChl.*a*ほど明瞭ではないが4日目に最大値を示した。また、BSiもPOC、PONに類似した日変化を示した。

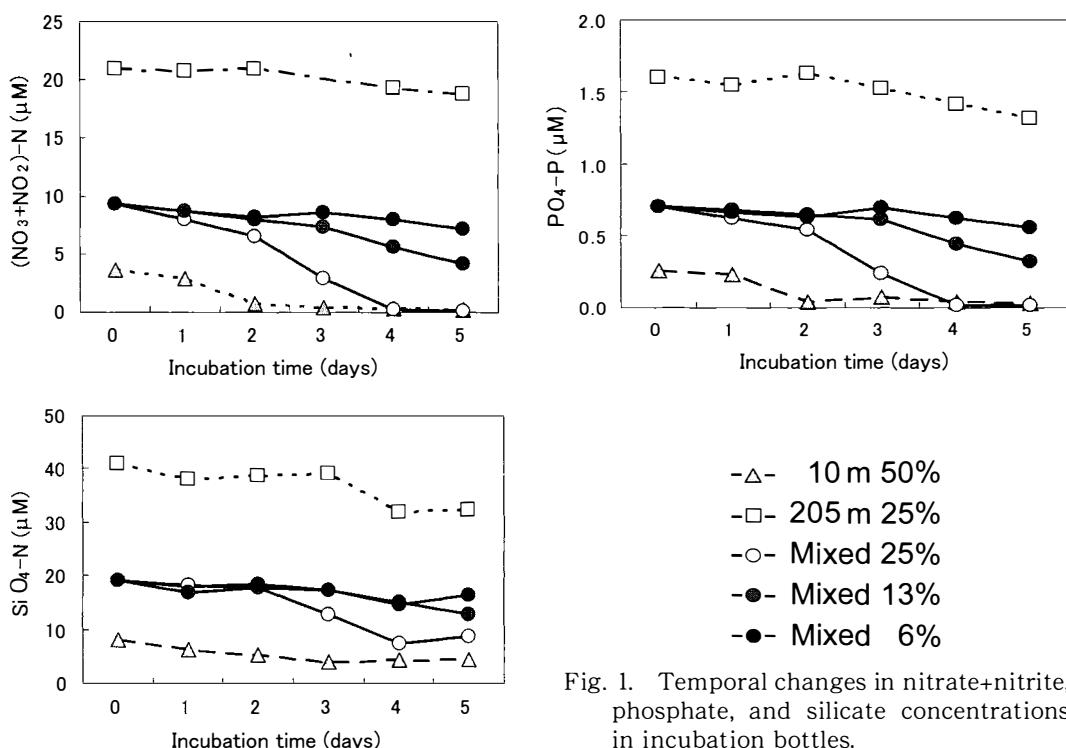


Fig. 1. Temporal changes in nitrate+nitrite, phosphate, and silicate concentrations in incubation bottles.

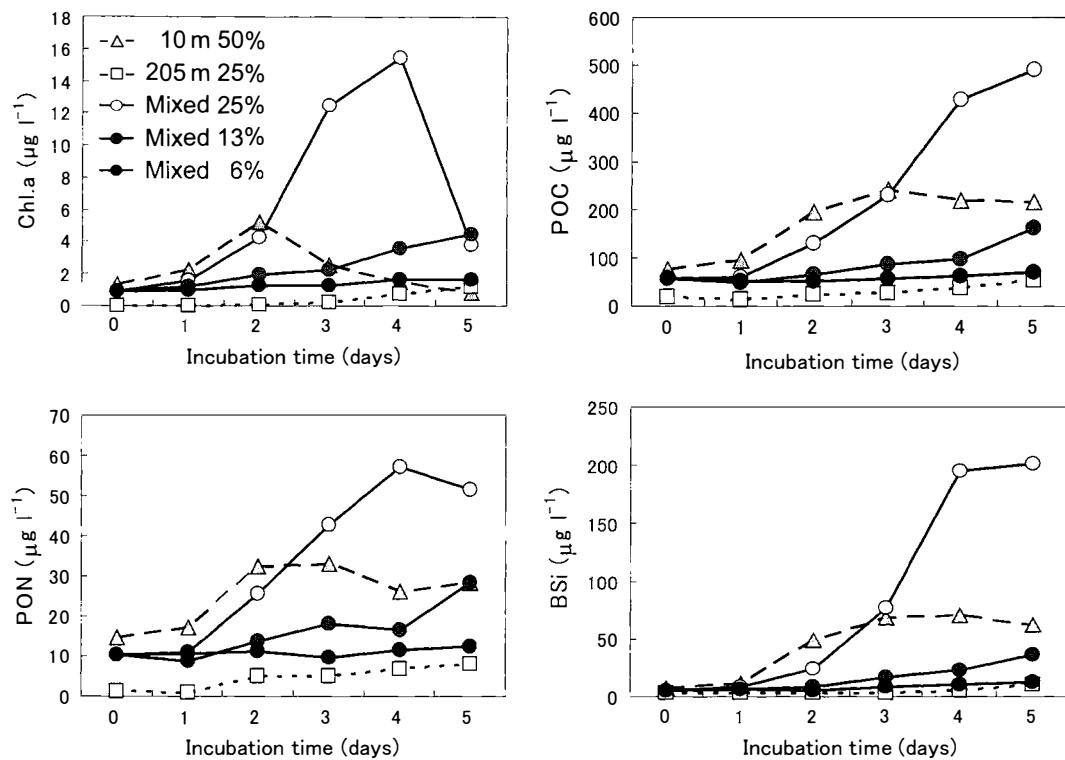


Fig. 2. Temporal changes in Chl.a, POC, PON, and BSi in incubation bottles.

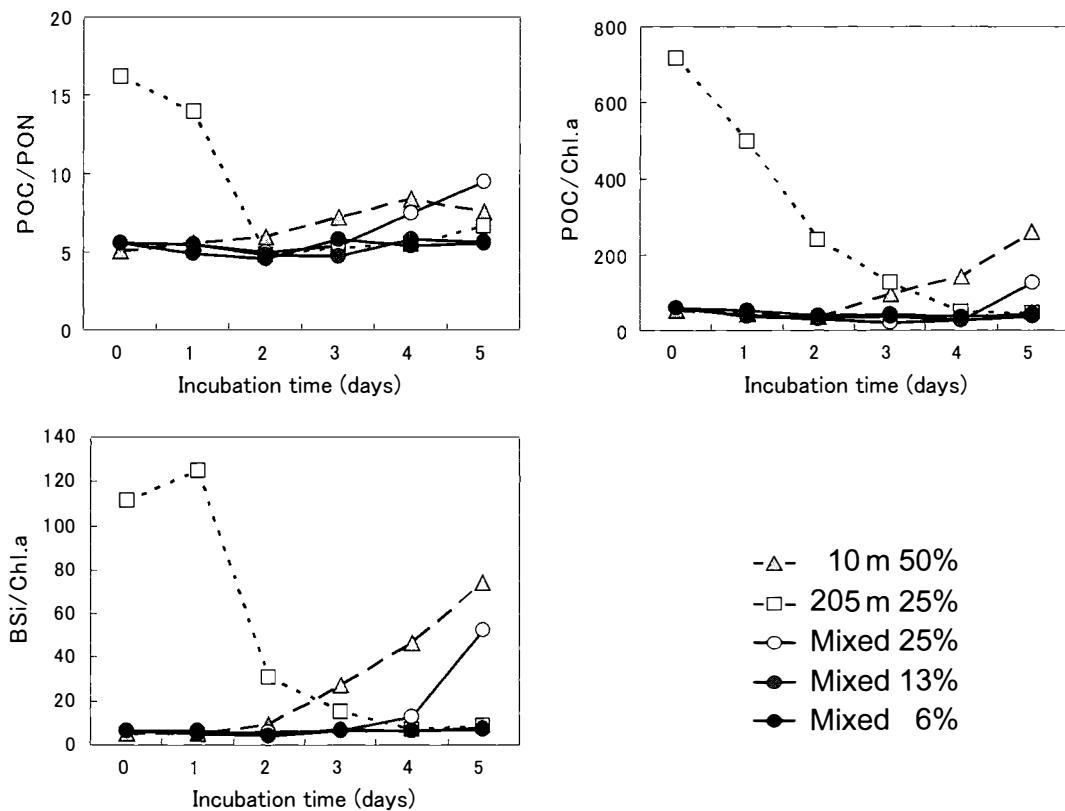


Fig. 3. Temporal changes in POC/PON, POC/Chl.a, BSi/Chl.a and BSi/POC ratios in incubation bottles.

3-3. 培養実験における粒状懸濁物組成比の日変化

培養実験中に各実験区で得られた各粒状懸濁物濃度比の日変化を Fig. 4 に示した。POC/PON 比は表層水 50 では 0 日目に 5.11 であったが徐々に上昇し、4 日目に 8.39 の最大値を示した。深層水 25 では POC/PON 比は 0 日目に際立って高く 16.2 の値であったが、2 日目まで急激に減少し 4.85 となり、その後 5 日目にかけて徐々に上昇し 6.66 となった。混合水 25 では、POC/PON 比は 0 日目に 5.56 であったが、3 日目まで変動は少なく (5.04~5.47)、4 日目から増加に転じ 5 日目には 9.49 となった。混合水 12 と混合水 6 も同様な傾向を示したが、混合水 25 ほど顕著な変動は示さず、実験期間中の

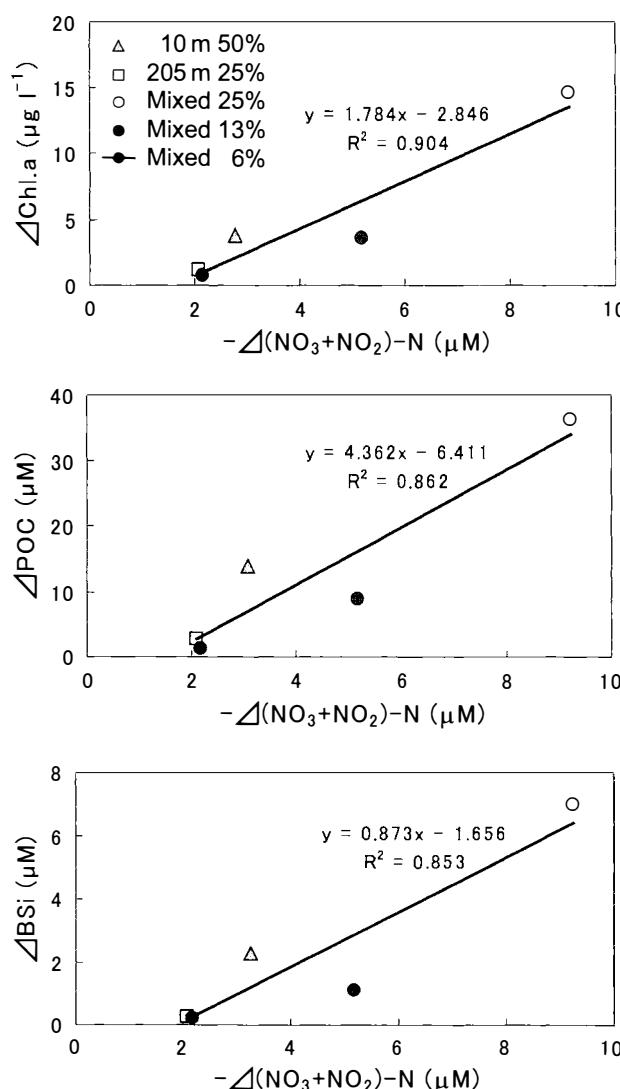


Fig. 4. Relationship between net decrease of nitrate plus nitrite concentration and net increase of Chl. *a*, POC and BSi from the initial time to the peak time or the end of the incubation.

POC/PON 比の変動は 4.6~5.9 の範囲内であった。

POC/Chl. *a* 比は表層水 50 では 0 日目に 54.7 であったが、3 日目から実験終了の 5 日目に最大の 259.5 となった。深層水 25 の POC/Chl. *a* 比は 0 日目に 715.7 の最大値を示し、その後急激に減少して 5 日目には 46.0 になった。混合水 25 では POC/Chl. *a* 比は 0 日目に 61.4 であったが、3 日目まで徐々に減少し 18.5 となり、4 日目から上昇に転じ 5 日目には 128.0 の値となった。培養期間中における混合水 12 と混合水 6 の POC/Chl. *a* 比の変動は少なく、0 日目 (61.4) を除くと、それぞれ 27.1~41.5, 37.8~54.7 の範囲にあり、混合水 12 は 4 日目に混合水 6 は 5 日目に最小値を示した。

BSi/Chl. *a* 比は POC/Chl. *a* 比に類似した変化を示し、表層水 50 では 0 日目に 5.08 であったが、3 日目から顕著に増加し実験終了時には 74.3 となった。深層水 25 では BSi/Chl. *a* 比は 0~1 日目に 120 程度であったが、3 日目から急激に減少して 5 日目には 8.47 になった。混合水 25 では、0 日目は 6.17 であったが、4 日目から明瞭な増加がみられ、5 日目には 52.6 となった。混合水 12 と混合水 6 の BSi/Chl. *a* 比の変動は少なく、それぞれ 4.30~8.08, 3.88~7.23 の範囲にあった。

3-4. 培養実験における粒状懸濁物濃度の正味増加量と栄養塩濃度の正味減少量との関係

培養実験中に各実験区で得られた Chl. *a*, POC 濃度および BSi 濃度の最大値からそれぞれの 0 日目の初期濃度を差し引いた増加分 (Y) とその時の $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ 濃度の減少分 (X) の間には、次式のように際立って高い相関が得られた (Fig. 5)。

$$\text{Chl. } a : Y = 1.784X - 2.846 \quad (R^2 = 0.904)$$

$$\text{POC} : Y = 4.362X - 6.411 \quad (R^2 = 0.862)$$

$$\text{BSi} : Y = 0.873X - 1.656 \quad (R^2 = 0.853)$$

これらの式から、1 μM の硝酸塩 + 亜硝酸塩が 1.78 $\mu\text{g l}^{-1}$ の Chl. *a*, 4.36 μM の POC および 0.873 μM の BSi に変換されたと推定される。

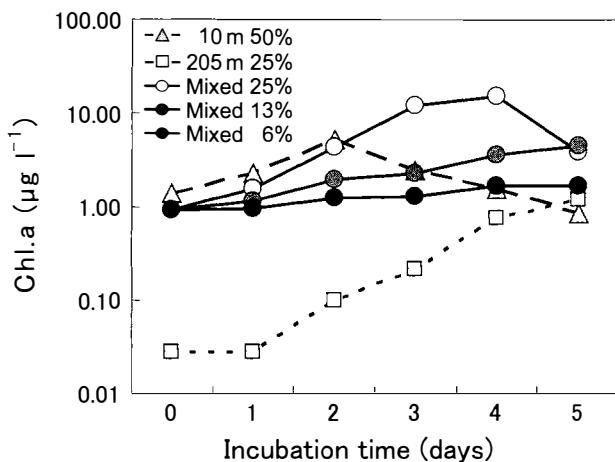


Fig. 5. Temporal changes of Chl. *a* in incubation bottles.

3-5. 培養実験における植物プランクトンの比増殖速度と初期栄養塩濃度・光透過率との関係

各実験区における植物プランクトンの日変化を詳細に調べるために、Chl. *a* 濃度を対数目盛で表して増殖過程を検討した(Fig. 5)。Fig. 1 と Fig. 2 にも示したように、表層水 50 と混合水 25 では、それぞれ 2 日目と 4 日目に Chl. *a* のピークが現れ、この時に $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ はほぼ枯渇状態になっていた。一方、混合水 13, 混合水 6, 深層水 25 では、実験終了時の 5 日目まで Chl. *a* 濃度は増加し、実験終了時においても十分な栄養塩濃度が残存していた。また、深層水 25 では、0 日目と 1 日目の Chl. *a* 濃度は他の実験区と較べて 1/30 以下で、両日とも同じ濃度であったことから、対数増殖期の前に誘導期のあることが確認された(Fig. 5)。従って、植物プランクトン (Chl. *a*) の比増殖速度は、表層水 50 では 0-2 日目、深層水 25 では 1-5 日目、混合水 25 では 0-4 日目、混合水 12 と混合水 6 では 0-5 日目を対数増殖期として前述の計算式により推定した。その結果、比増殖速度は、深層水 25 が最大値 (0.93 d^{-1}) を示し、次に混合水 25 の 0.70 d^{-1} と続き、以下、表層水 50, 混合水 12, 混合水 6 の順番で、それぞれ 0.67 d^{-1} , 0.32 d^{-1} および 0.12 d^{-1} であった。

各実験区で得られた Chl. *a* の比増殖速度と初期栄養塩濃度・光透過率との関係を Fig. 6 に示した。混合水の 3 つの実験区は初期栄養塩濃度が同一

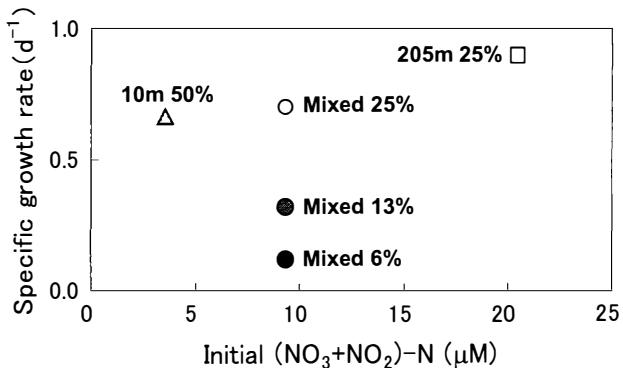


Fig. 6. Relationships of specific growth rates to initial nitrogen concentrations ($\text{NO}_3 + \text{NO}_2$)-N and different attenuated natural irradiance.

($\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ で $9.3 \mu\text{M}$) であるが、光透過率が 6 %, 13 %, 25 % と大きくなるに伴い、Chl. *a* の比増殖速度はそれぞれ 0.12 d^{-1} , 0.32 d^{-1} , 0.70 d^{-1} と顕著な増加を示した。表層水 50 は、混合水 25 の 2 倍の光透過率であったが、比増殖速度は 0.67 d^{-1} であり、混合水 25 の値に近似していた。これは、表層水 50 の初期栄養塩濃度が混合水 25 の 1/3 程度 ($\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ で $3.5 \mu\text{M}$) と低かったことが原因と考えられる。一方、深層水 25 の初期栄養塩濃度は $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ で $20.9 \mu\text{M}$ あり、混合水 25 の 2 倍ほど高く、比増殖速度 (0.93 d^{-1}) は全実験区の中で最大値を示した。

4. 考 察

本培養実験では、実験開始直前の台風通過に伴う大量降雨と相模湾への河川流入量の増大により、培養に用いた表層水 (10 m) の栄養塩濃度が高く、夏季成層期の一般的特徴である栄養塩の枯渇状態ではなかった。このため、表層水で 0 日目から 2 日目にかけて栄養塩濃度の減少と Chl. *a*, POC 濃度の増加が見られている (Figs. 1-3)。しかし、表層水と深層水を 2 : 1 に混合した混合水 25 における Chl. *a*, POC の増加は表層水 50 の 3 倍程度であること、また、深層水 25 での増加量は実験区で最も少なかったものの比増殖速度が混合水 25 より大きく最大値を示したこと (Fig. 5, 6) から、深層水の肥沃化効果は閉鎖系条件では明瞭に実証されたと

言える。培養実験中における Chl. *a* および POC 濃度の正味増加量と栄養塩濃度の正味減少量の関係 (Fig. 5) から、 $1 \mu\text{M}$ の $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ が $1.78 \mu\text{g l}^{-1}$ の Chl. *a* に変換されたと推定され、この値は伊豆諸島海域で得られた値 1.37 (Ishizaka *et al.*, 1983) や沖縄本島南方沖で得られた値 1.48 (池谷ら, 2003) とほぼ同様であった。また、培養期間中で栄養塩濃度が減少している時の POC/PON 比は 4.5~6 程度の低い値であり、POC/Chl. *a* 比が 27~60 程度であることから、各実験区で植物プランクトンの活発な増殖が起きていたことが示唆される (Antia *et al.*, 1963)。

植物プランクトンの増殖は、主に光量、栄養塩濃度および水温に影響されるが、培養槽内への表層水の連続循環により全実験区は表層水温に維持されていた。そこで、各実験区における Chl. *a* の比増殖速度と初期栄養塩濃度・光透過率の関係を見ると (Fig. 6)，初期栄養塩濃度が同一の混合水では、光透過率が高いほど Chl. *a* の比増殖速度が大きいことが明瞭に示されている。また、実験区の中で初期栄養塩濃度が最大であった深層水 25 において、比増殖速度の最大値 (0.93 d^{-1}) が得られ、かつ対数増殖期前に 1 日間の誘導期（遅れ）が存在していた。深層水 25 の培養瓶には表層の植物プランクトンは入っていないことから、深層の植物プランクトンが、表層の光・温度環境に順応するための時間が必要であり、結果として増殖に遅れが生じたと考えられる (Ishizaka *et al.*, 1983; Furuya *et al.*, 1994)。

一方、肥沃化装置「拓海」の放出口に相当する水深 20 m の光量子量は海面光量の 2~10%程度であり (Hashihama *et al.*, 2008)，自動昇降型 CTD (伝導度・水温・深度計) を搭載した漂流ブイによる放流水追跡実験 (井関・大村, 2004; 井関, 2006) では、放流点から少なくとも下流側 3 km までの密度躍層付近 (水深 10~30 m) において深層水が検出されている。

今回報告した培養実験と現場観測の結果から、相模湾において深層水の肥沃化を実現するためには、夏季海面光量の約 10%が到達する水深以浅に放流深層水（または混合水）が滞留し、十分な栄養塩濃

度が数日間以上は維持されることが必要と考えられる。このため、自然海洋に存在する密度躍層・渦や、湾・入り江などの地形を利用した深層水の閉じ込めや、取水・揚水量の飛躍的な増大に向けた一層の技術開発が必要である。

謝 辞

本研究は、社団法人マリノフォーラム 21 の「海洋肥沃化システム技術確立事業計画」の一環として実施した。同事業の高橋正征委員長はじめ委員の方々、マリノフォーラム 21 の関係各位には本研究への有益な助言を頂き、深く感謝致します。また、淡青丸の乗船研究者をはじめ、船長、乗組員の方々には、乗船調査で協力して頂きお礼を申し上げます。

参考文献

- Antia, N. J., C. D. MacAllister, T. R. Parsons, K. Stephens and J. D. H. Strickland (1963) Further measurements of primary production using a large volume plastic sphere. Limnol. Oceanogr., 8, 166–183.
- Demaster, D. J. (1981) The supply and accumulation of silica in the marine environment. Geochim. Cosmochim. Acta, 45, 1715–1732.
- Furuya K., H. Tsuzuki, K. Iseki and A. Kawamura (1993) Growth response of natural phytoplankton assemblages in artificially induced upwelling in Toyama Bay, Japan. Bull. Plankton Soc. Japan, 40, 109–125.
- Hashihama, F., N. Horimoto, J. Kanda, K. Furuya, T. Ishimaru and T. Saino (2008) Temporal variation in phytoplankton composition related to water mass properties in the central part of Sagami Bay. J. Oceanogr., 64, 23–37.
- 池谷透・中谷誠治・深堀芳雄・西岡純・武田重信・川延京子・高橋正征 (2001) 海洋深層水による亜熱帯表層水の肥沃化効果の屋外メソコスム実験による検証。海深研, 2, 73–86.
- 池谷透・川延京子・高橋正征 (2003) 亜熱帯性表層植物プランクトン群集に対する海洋深層水の肥沃化効果。海深研, 2, 73–86.
- Iseki, K., H. Nagata, K. Furuya, T. Odate and A. Kawamura (1994) Effect of artificial upwelling on primary production in Toyama Bay, Japan. Proc. the 1994 Mie Internat. Forum and Symp. on Global

- Environment and Friendly Energy Technology. Mie Academic Press, pp. 458-462.
- 井関和夫 (2000) 海洋深層水による洋上肥沃化－持続生産・環境保全型の海洋牧場構想－. 月刊海洋/号外, 22, 170-178.
- 井関和夫 (2002) 散布深層水の挙動把握と海域肥沃化に関する研究：漂流ブイと自動昇降型 CTD・クロロフィル計の有効性について. 海深研, 3, 83-90.
- 井関和夫・大村寿明 (2004) 汲み上げ海深研の挙動把握手法：相模湾における自動昇降 CTD と流速計を搭載した漂流ブイの性能試験. 海深研, 5, 31-41.
- 井関和夫 (2006) IV. 環境修復への利用. 6. 洋上肥沃化. 海洋深層水の多面的利用, (伊藤慶明・高橋正征：深見公雄編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 69-78.
- Ishizaka, J., Mac. Takahashi and S. Ichimura (1983) Evaluation of coastal upwelling effects on phytoplankton growth by simulated culture experiments. Marine Biology, 76, 271-278.
- 木谷浩三・長田宏 (1989) 人工湧昇システム. 月刊海洋, 21, 612-617.
- Menzel, D. W. (1967) Particulate organic carbon in the deep sea, Deep-Sea Res., 14, 229-238.
- 宮部宏彰・小林日出雄・荻原誠功 (2004) 海洋肥沃化装置「拓海」の開発. 石川島播磨技報, 4, 209-214.
- 中嶋さやか・井関和夫 (2006) 粒状珪素の分析手法の検討と周防灘における分布. 広島大学大学院生物圏科学研究科紀要, 45, 21-29.
- 中島敏光 (1988) 海産珪藻 *Skeletonema costatum* の増殖におよぼす海洋深層水の影響. 日本プランクトン学会報, 35, 45-55.
- Niraula, M. P., B. E. Casareto, T. Hanai, S. L. Smith and Y. Suzuki (2005) Development of carbon biomass using incubations of unaltered deep-sea water. Eco-Engineering, 17, 121-131.
- 大内一之 (2002) 海洋肥沃化装置の研究開発. 日本造船学会誌, 868, 443-448.
- Ryther, J. H. (1969) Photosynthesis and fish production in the sea. Science, 166, 72-76.
- Suzuki, R. and T. Ishimaru (1990) An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N,N-Dimethylformamide. J. Oceanogr. Soc. Jpn., 46, 190-194.
- 高橋正征 (1994) 海洋深層水研究の意義とその研究開発方向. 月刊海洋, 26, 196-222.
- 高橋正征・井関和夫 (2000) 総論：21世紀の資源としての海洋深層水. 月刊海洋/号外, 22, 5-10.
- Takahashi, M. and T. Ikeya (2003) Ocean fertilization using deep ocean water (DOW). Deep Ocean Water Research, 4, 73-87.
- Wilkerson, F. P. and R. C. Dugdale (1987) The use of large shipboard barrels and drifters to study the effects of coastal upwelling on phytoplankton dynamics. Limnol. Oceanogr., 32, 368-382.

(2010年4月27日受付；2010年10月25日受理)