

亜熱帯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

Fertilization Effects of Deep Ocean Water on Phytoplankton Community
in Subtropical Surface Water

池谷 透¹・川延 京子¹・高橋 正征¹

Tohru IKEYA, Kyoko KAWANOBE and Masayuki Mac TAKAHASHI

Abstract

Acceleration of oceanic phytoplankton production by enriching oligotrophic surface seawater with eutrophic deep ocean water has becoming a recent desirable subject in order to achieve sustainable fisheries as well as contributing to possible absorption of carbon dioxide in the atmosphere to slow down global warming and efficient resource utilization of deep ocean water for multiple-purposes. Before making actual operation of ocean fertilization, prior prediction of the probable effects is required by means of field experiments and numerical simulation model. In this study, parameters and the applicable values for the model estimation of fertilization effects of deep ocean water on phytoplankton community in oligotrophic subtropical surface water were examined based on the data collected in out-door culture experiments using natural seawater samples. The addition of deep ocean water to surface seawater resulted 214-fold increase of chlorophyll *a* concentration after several days of lag period. The specific growth constant of chlorophyll *a* concentration increased at a rate of 0.3 days⁻¹ per μM -nitrate and the yield of chlorophyll *a* was 1.48 $\mu\text{g}/\mu\text{M}$ -nitrate. These changes were resulted from the increase of phytoplankton, mainly diatoms. Due to the preferential growth of diatoms, the relative abundance of nano- and micro-phytoplankton increased from 20% or less to around 80%, and the Si/N ratio of the nutrients, consumed with the increase in chlorophyll *a* concentration, amounted to 0.87.

Key Words: *deep ocean water, surface water, phytoplankton, oligotrophic, fertilization, nutrients, growth rate, species composition, chlorophyll*

要 旨

水産生物資源の増産、地球温暖化減速のための大気中二酸化炭素の吸収、海洋深層水の効率的な資源利用などで、貧栄養な表層水へ富栄養な海洋深層水を添加して植物プランクトンの生産を加速することが真剣に考えられている。そのためには、実際に海域を肥沃化する前に現場モデル実験や数値シミュレーションによる効果予測が必要である。特に、深層水によってもたらされる栄養塩類とそれによる植物プランクトンの生産増加（一次生産）効果の定量把握が重要である。亜熱帯外洋の試水を用いた屋外培養実験を整理した結果、クロロフィル *a* 濃度の比増殖速度は 0.3 日⁻¹/ μM -硝酸態窒素で増加し、クロロフィル *a* 濃度の収量は 1.48 $\mu\text{g}/\mu\text{M}$ -硝酸態窒素となった。これらの変化は表層水中にごく僅かに存在していた珪藻類を主とする植物プランクトンが増加したためで、ナノ・マイクロ植物プランクトンの割合は 20 % 以下から 80 % 前後に増加し、クロロフィル *a* 濃度の増加と共に消費された Si/N 比は 0.87 に達した。ここで得られた速度や係数は深層水による海域肥沃化効果のモデル推定に役立つと考えられる。

¹ 東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学系 (〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1)

キーワード：海洋深層水、表層水、植物プランクトン、貧栄養、肥沃化、栄養塩類、増殖速度、組成、クロロフィル

1. 緒 言

海洋の一次生産は 500 ～ 1000 億トン C/年と推定されている（鈴木，1997）。海洋は地球表面の 70 % の広大な面積を占めているにもかかわらず、その一次生産は面積で 30 % の陸域の 50 ～ 100 % 程度にしかない。一方、地球上で最も生産性の高い生態系は珊瑚礁・マングローブ・湿地・サトウキビ畑などで、そこでは $2 \text{ kgC/m}^2/\text{年}$ 程度の生産力が知られている（鈴木，1997）。仮に $361 \times 106 \text{ km}^2$ の海洋全域がこの最大の生産力を示したとすると 7000 億トン C/年の生産規模（潜在生産力）になる。潜在生産力に比べて実際の海での生産が著しく低いのは、中・低緯度の外洋域を中心として生産の活発な 100 m 以浅での栄養塩類の供給が十分でないこと、極域や高緯度では冬季の日射量の低下と水温低下で光合成生産が抑制されてしまうためである。つまり、海洋では、光や栄養塩類の供給状態によって達成可能な最大生物量、すなわち、環境収容力が低いレベルになっている。

一方、食糧確保のために海洋から得ている水産生物資源の増大、あるいは地球温暖化の低減のために海洋生物生産を加速して大気中の二酸化炭素を吸収する、といった観点から、海洋の一次生産を人為的に高めることが世界的に考えられ、一部では実験も行われている（野崎，1994；鈴木，1997；高橋，1998；井関，2000；Matsuda ら，2000）。海洋一次生産の人為的加速にはいくつかの原理の利用が考えられるが、中でも多くの関心を持たれているのが、水深 200 m 以深に存在する海洋深層水（以下、深層水）の含んでいる栄養塩類の利用である。実際に、湧昇海域では中・深層から海水が表面あるいは表層近くに湧出し生産性を高めていることが各地で確認されている（Cushing，1971；宇田，1974）。深層水の含んでいる栄養塩類は、生物遺骸などの有機物分解産物であるから、有機物を生産する一次生産者の栄養塩類としては成分組成からいっても理想的

である。

実際に海域へ深層水を供給して肥沃化を行う場合には、深層水の含む栄養塩類による肥沃化効果を定量的に評価し、対象生物資源に対する効果を事前に推定する必要がある。そこで、本研究では、表層水が慢性的な栄養塩類の供給不足によって生産が少なくなっている亜熱帯海域を対象に、現場から得られた深層水と亜熱帯植物プランクトン群集を用いた培養実験によって肥沃化効果の定量的確認を行った。

2. 方 法

1999 年 9 月と 10 月に、沖縄本島喜屋武崎の南方沖約 35 km ($25^\circ 47' \text{N}$, $127^\circ 51' \text{E}$) とその周辺海域の水深 400 m と 800 m から得られた海水（以下、深層水として扱う）と表層植物プランクトン群集の試料を得て、プラスチック容器を用いて屋外太陽光下で培養実験を 2 回行った。実験では貧栄養で植物プランクトン群集密度の低い表層水に、富栄養であるが植物プランクトンがほとんどいない深層水を混合添加して、栄養塩類の消費と植物プランクトンの増加を経時的に追跡した。

実験 1 では、10 L のポリカーボネイト瓶に表層水を入れ、実験開始時に深層水（800 m）を 0 %（コントロール）、13 %、27 % 加えて最終容量を 9 L とし、屋外の太陽光下で 10 日間培養した。培養実験中の深層水の追加添加はしていないため、培養初期の栄養塩類が一方的に消費された。試料採取時の表層水温は 29.3°C 、培養実験時の水温は $23.6 \sim 28.7^\circ \text{C}$ を変動した。表層水と深層水の栄養塩類濃度は、それぞれ硝酸態窒素（亜硝酸態窒素も含む）が検出限界以下と $36 \mu\text{M}$ 、リン酸態リンが検出限界以下と $2.7 \mu\text{M}$ 、珪酸態珪素が $1.5 \mu\text{M}$ と $100 \mu\text{M}$ 、またクロロフィル *a* はそれぞれ $0.09 \mu\text{g Chl } a/\text{L}$ と検出限界以下であった。

実験 2 では、 1 m^3 のポリエチレンシート袋に表層水を入れ、0 %（コントロール）、0.6 %、1.2 %

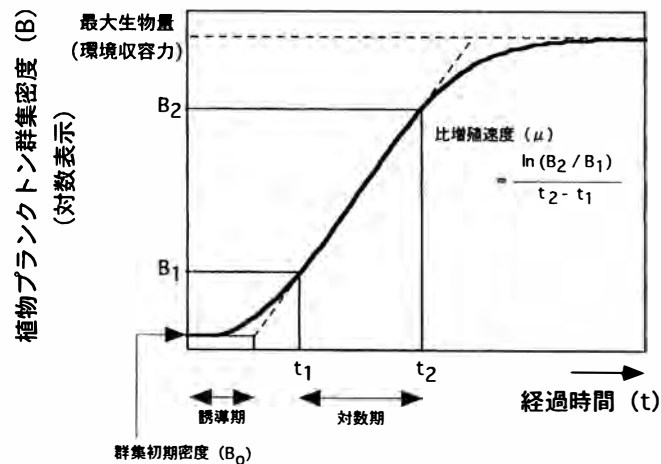


図 1. 植物プランクトン群集の増殖の概念図

の容量の深層水（400 m）をそれぞれ毎日添加して表層水中で 16 日間培養した。試料採取時の表層水温は 27.4 °C，培養実験中の水温は 23.5 ~ 26.5 °C を変動した。表層水と深層水の主要栄養塩類濃度は、それぞれ硝酸態窒素（亜硝酸態窒素も含む）が検出限界以下と 12 μM ，リン酸態リンが検出限界以下と 0.8 μM ，珪酸態珪素が 1.4 μM と 12 μM ，またクロロフィル *a* はそれぞれ 0.27 $\mu\text{g Chl } a/\text{L}$ と検出限界以下であった。

実験結果の詳細は池谷ら（2001）に示した。

3. 結果と考察

3.1. 表層植物プランクトンの増殖速度と増殖量に対する深層水の肥沃化効果

肥沃化によって植物プランクトンが増加するには、植物プランクトン密度がその場の条件での環境収容力以下の低濃度で、増加の余裕が必要である。植物プランクトン密度（群集初期密度）が低い場合には、図 1 の概念図に示したように、条件を満たせば環境収容力に達するまで植物プランクトンは増加する。その際、環境が変化すると植物プランクトンが新しい環境に順化するための時間（誘導期）の見られることがある。伊豆諸島周辺の局地性湧昇域での Ishizaka ら（1983）の培養実験によれば、誘導期は 3 日程度以内で、培養温度に依存し、低水温ほど長くなる傾向が示されている。また、植物プランクトンの初期密度が低いほど誘導期の長くなること

が考えられ、今回実施した亜熱帯外洋で植物プランクトン群集密度の低い沖縄南方海域の試料では 5 ~ 8 日の誘導期が観察された（池谷ら，2001）。

環境に順化した植物プランクトンは照射光下で増殖を開始し、一般に図 1 のような指数関数的な増加を示す（対数期）。このときの生物量の増加速度が比増殖速度（ μ ）である。環境が植物プランクトンにとって最適であれば、最大生物量（環境収容力）に達するまで増殖する。植物プランクトンの生物量は光合成生物のみが含むクロロフィル *a* 量で捉えることが多く、その場合、最大生物量は培養条件下では数 1000 $\mu\text{g Chl } a/\text{L}$ に達し、単位面積あたりになおすと 1000 $\text{mg Chl } a/\text{m}^2$ 程度になる。自然界での最大生物量は栄養環境が満足されれば光の強さに応じて変わり、真光層の厚みが薄いほど水による光吸収のロスが少なくなり、実際の海洋では 250 $\text{mg Chl } a/\text{m}^2$ 程度になる（高橋ら，1996；岸野・高橋，1996）。この場合、真光層の厚さが 1 m ならば平均クロロフィル *a* 濃度は 250 $\mu\text{g Chl } a/\text{L}$ ，10 m で 25 $\mu\text{g Chl } a/\text{L}$ ，100 m で 2.5 $\mu\text{g Chl } a/\text{L}$ ということになる。したがって、これ以下の濃度の時にクロロフィル *a* 増加の余裕が存在する。

中・低緯度海洋の植物プランクトンの増加のための条件としては、低水温時を除けば栄養塩類不足が最も多く、環境収容力は湧昇域で最大となり、水柱の成層構造が強く下層から上層への栄養塩類供給が制限されているところでは小さく抑えられている。したがって、後者の海域では、栄養塩濃度の高い深

層水の供給によって環境収容力（最大生物量）の増加が見込まれる。なお、水産生物資源の餌を考える場合には、植物プランクトンの生物量としてクロロフィル *a* 量ではなく、炭素量、乾燥重量、湿重量などが必要になる。自然水中で植物プランクトンのこれらの生物量を直接測定することは殆ど不可能で、そのためクロロフィル *a* から換算して求める。ただし、C/クロロフィル *a* 重量比は植物プランクトン種や環境条件によって 8～200 程度と振幅が大きい (Banse, 1977; Geider, 1987)。乾燥重量/C 比は種によって 2～5 の違いが見られるが、珪藻類、渦鞭毛藻類、緑藻類の 3 つの分類群間を平均すると 3 で、湿重量比/乾燥重量比も操作の違いによって 4～10 程度変動するが平均すると 5 で、C/クロロフィル *a* 比に比べると両者の変動は比較的小さい (Strickland, 1960; 高橋ら, 1996)。

本研究で試料を採取した沖縄海域の表層水中の植物プランクトン密度は $0.09 \sim 0.27 \mu\text{g Chl } a/\text{L}$ と先の最大植物プランクトン量に比べると 1～3 桁の低さである。したがって、植物プランクトンの増加する余裕は十分に存在する。また、表層水中の主要栄養塩類は検出限界以下の低濃度なので、栄養塩類によって植物プランクトンの生物量が低く抑えられていることが明らかである。実際に深層水を添加すると栄養塩類が消費されて植物プランクトンが増加し、実験 1 と実験 2 では、深層水を添加して 10～12 日後にクロロフィル *a* 濃度が最大に達した (池谷ら, 2001)。実験 1 では 27 % の深層水添加によって 10 日目にクロロフィル *a* が 214 倍に増加した。各実験区のクロロフィル *a* 濃度の増加速度は、培養開始後 10 日目にはいずれも一定に達していた。そこで、以降は 10 日間の栄養塩類濃度とクロロフィル *a* 濃度の変化から深層水による植物プランクトンの増殖への影響を検討した。

実験開始時に一度に深層水を加えた実験 1 では 10 日目に硝酸態窒素が $0.2 \mu\text{M}$ 以下にまで低下し、深層水を毎日少量加えた実験 2 では測定したすべての栄養塩類が深層水添加後速やかに検出限界以下になった。沖縄本島周辺海域の深層水中のアンモニア態窒素濃度は他の海域同様に検出限界レベルと考

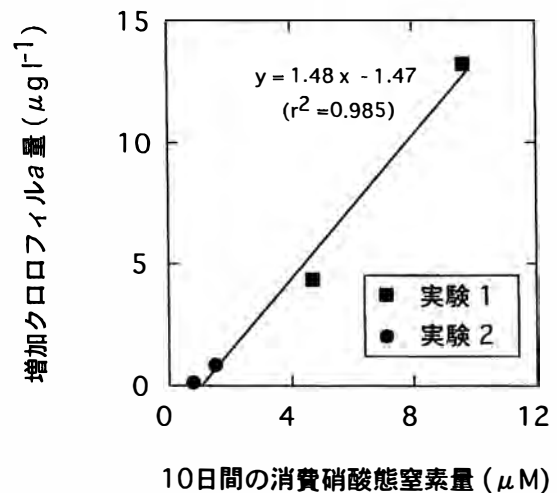


図 2. 亜熱帯外洋の貧栄養表層植物プランクトン群集に富栄養海洋深層水を添加して 10 日間培養した場合の消費された全硝酸態窒素量と増加クロロフィル *a* 量の関係 (深層水を添加しないコントロールの変化を差し引いた)

えられる (沖縄県海洋深層水開発協同組合, 1999) ので、用いた深層水中の栄養塩類の N:P:Si 濃度比 (モル) は、実験 1 が 1:0.074:2.8 (13:1:37)、実験 2 が 1:0.069:1.0 (15:1:15) である。

実験 1 の結果から、用いたプランクトン群集では硝酸態窒素が主律速栄養塩類となっていると判断されるので、10 日間に消費した総硝酸態窒素量とその間のクロロフィル *a* 量の増加をプロットしたのが図 2 である。両者には強い直線相関が認められ、深層水によって供給された硝酸態窒素がクロロフィル *a* 増加をもたらした主因であることが明らかである。リン酸態リンや珪酸態珪素もクロロフィル *a* の増加に比例して減少したが、硝酸態窒素が検出限界に達した時点では両者とも残存し、特に珪酸態珪素の残存量が著しかった (池谷ら, 2001)。中・低緯度海洋での植物プランクトンの主な律速栄養塩類は窒素もしくはリンの場合が殆どであるが、両者ともに植物プランクトンの組成比に近い濃度なので、仮に窒素が律速していても不足分のリンに比べてごくわずかで、ごく少量の窒素を加えるとリンが主に律速するようになる。つまり、実験を行った亜熱帯域をはじめとする海洋表層では一般に窒素もリンも律速する程度の量しか存在していない。珪素は珪藻類とごく一部の植物プランクトンが必要とす

表 1. 亜熱帯外洋の貧栄養表層植物プランクトン群集の増殖に関する各種パラメータ

	Chl <i>a</i> /N ($\mu\text{g}/\mu\text{M}$)	Chl <i>a</i> /P ($\mu\text{g}/\mu\text{M}$)	Chl <i>a</i> /Si ($\mu\text{g}/\mu\text{M}$)	P/N (mol/mol)	Si/N (mol/mol)	比増殖速度/N ($\text{日}^{-1}/\mu\text{M}$)	誘導期 (日)
本研究 ¹⁾	1.48	24.4	1.7	0.061	0.87	0.28	2 ~ 6
Ishizaka ら, (1983) ²⁾	1.37						<0.5 ~ 3

¹⁾ 23.6 ~ 28.7 °C, 298 ~ 852 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$, 太陽光下

²⁾ 13.5 ~ 30.4 °C, 5.4 ~ 432 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$, 太陽光または蛍光灯下

るだけなので、珪素の不足は植物プランクトンの群集組成に大きく影響する。

図 2 のプロットを直線回帰すると、 $y = 1.48x - 1.47$ ($r^2 = 0.985$) が得られ、硝酸態窒素とクロロフィル *a* の量比は 1.48 (μg クロロフィル *a* / μM 硝酸態窒素) が求められた。Ishizaka ら (1983) が伊豆諸島海域で行った培養実験ではやや小さい 1.37 の量比が得られている (表 1)。回帰直線は原点を通らないで、硝酸態窒素 0.99 μM で増加クロロフィル *a* 量が 0 となり、栄養塩類の添加によってクロロフィル *a* の増加の起こる閾値濃度の存在が示唆されているが、閾値濃度については今後の検討が必要である。なお、深層水 27 % 添加試料の 10 日目でのクロロフィル *a* 濃度は 14 μg Chl *a* / L に達し、培養容器中の液量は 0.3 m (培養条件での真光層の厚さになる) 程度なので上述の光学的な最大クロロフィル *a* 濃度と比較すると栄養塩類を添加することによってさらに高いクロロフィル *a* 濃度が期待される。実験中の消費量から求めたリンと珪素のそれぞれのクロロフィル *a* との関係は、リンが $y = 24.4x - 1.74$ ($r^2 = 0.965$)、珪素が $y = 1.70x + 0.60$ ($r^2 = 0.707$) である。その際に、リンでは硝酸態窒素同様の高い相関係数が得られたが、珪素では相関係数が低く他の栄養塩類に比べてやや弱い関係になった。得られた関係から植物プランクトンの N : P : Si の要求モル量比は 1 : 0.061 : 0.87 (16 : 1 : 14) と推定された (表 1)。このうち N : P はプランクトン生物全体を対象としたレッドフィールド比 (P : N : C = 1 : 16 : 106) に等しい。また、Si の要求量比についても典型的な珪藻類について得られている N/Si 比 0.89 (Brzezinski, 1985) にほぼ等しい。このことは、実験 1 と実験 2 では共に珪藻類を主とする植物プ

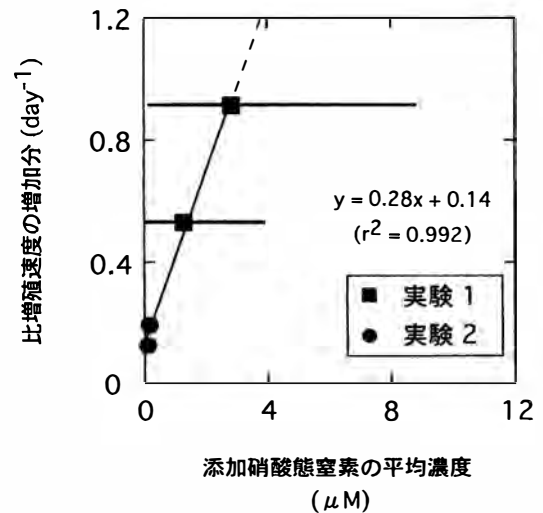


図 3. 亜熱帯外洋の貧栄養表層植物プランクトン群集に富栄養海洋深層水を添加して培養した場合の添加硝酸態窒素濃度と比増殖速度のコントロールに対する増加分との関係 (各硝酸態窒素の値は対数増殖期の硝酸態窒素の平均濃度で、対数増殖を示した期間の硝酸態窒素濃度の変動幅を横実線で示した)

ランクトンが深層水に含まれる主要栄養塩類を利用して増加したことを示唆している。

培養期間中のコントロールを差し引いたクロロフィル *a* 濃度の比増殖速度、いわゆる添加栄養塩類による増殖速度への肥沃化効果と考えられる分を示したのが図 3 である。図 3 から、深層水の添加量にほぼ比例して比増殖速度の増大する傾向が明瞭に読みとれる。これは、栄養塩類の律速濃度域で植物プランクトン細胞の栄養塩吸収速度が栄養塩類の濃度の増加にともなって増加傾向を示すことによる。実験の性格上、実験 1 では植物プランクトンは培養開始時に高濃度の栄養塩類に暴露され、その後は栄養塩類が利用されて濃度が次第に低下していく。一方、実験 2 では、植物プランクトンは毎日少量の深層水の添加によって低濃度の栄養塩類に暴露されるが、ここでは栄養塩類は短時間に吸収されて、以後は検出限界以下の低濃度になっている。以上のよ

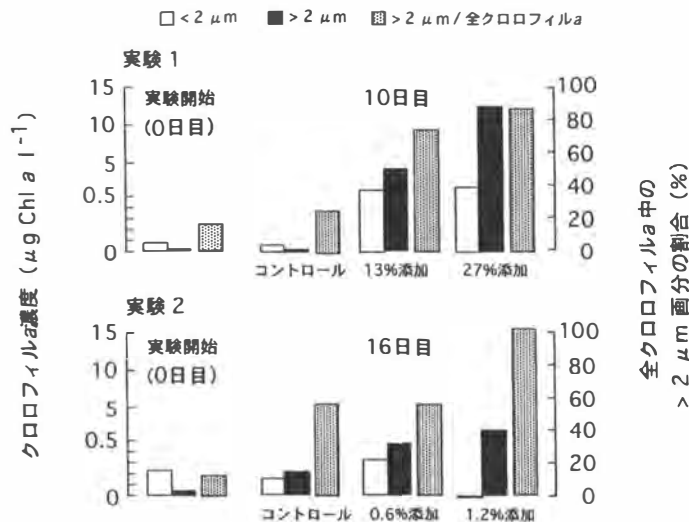


図4. 亜熱帯外洋の貧栄養表層植物プランクトン群集に富栄養海洋深層水を添加培養した場合の10日目(実験1)と16日目(実験2)のピコ植物プランクトン(2 μm以下)とナノ・ミクロ植物プランクトン(2 μm以上)のクロロフィルa量

うに、植物プランクトン側から見ると環境中の栄養塩濃度は一定でなく、図3に示した硝酸態窒素の量は指数関数的な増殖を示した対数期の平均濃度となっている。したがって、図3の結果は栄養塩濃度が増加している条件下での両者のおよその関係であるが、第一次近似的な関係は捉えられていると考えられる。ここでは結果を律速栄養塩濃度と比増殖速度が比例していると考えられているが、律速栄養塩濃度がより高濃度では比例関係から外れて比増殖速度が最大値に漸近することが予想される(Ishizakaら, 1983)。また、律速栄養塩濃度の低濃度域では閾値濃度の存在の可能性がある、それらについての吟味も必要である(高橋ら, 1996)。与える律速栄養塩濃度をより低濃度で厳密にコントロールするには透析膜培養法などの利用が考えられる(Takahashi and Fukazawa, 1982)。深層水を表層水に添加した場合に図2、図3の結果をもとにして栄養塩類の消費速度と植物プランクトン生物量の増加のモデル推定が可能になる。

なお、比増殖速度は栄養塩濃度だけでなくその他の環境要因の影響を強く受ける。特に温度に敏感で、Ishizakaら(1983)が伊豆諸島海域の表層植物プランクトン群集と深層水を使って比増殖速度に対する温度影響を培養実験で調べて整理している。比増殖速度に対する温度の影響を実験的に求めて光

合成や栄養塩類の吸収利用などへの影響を整理していく必要があるが、実験結果が得られるまでの当座は、栄養塩類の吸収利用は細胞内代謝の化学反応と細胞膜を透過する際の拡散・能動輸送によって左右されるので、比増殖速度と温度の関係は $Q_{10} = 2$ として扱うのが妥当と考える(Eppley, 1972)。

3.2. 表層植物プランクトンの群集組成に対する深層水の肥沃化効果

富栄養深層水を貧栄養表層水に添加して表層植物プランクトン群集の増殖を活性化した場合、植物プランクトンの種によって栄養塩類に対する反応が異なるため培養中に植物プランクトン群集の構成比が変化する。今回の実験でも培養実験によって植物プランクトン群集の種構成が明瞭に変化した。

肥沃化実験に用いた元の表層プランクトン群集はクロロフィルaの80%以上が2 μm以下のピコ植物プランクトンで占められていて、多様な種から構成される2 μm以上のナノ・ミクロ植物プランクトンは存在はするが現存量は20%以下であった(図4)。深層水添加によってピコ・ナノ・ミクロ植物プランクトンのすべてが増加したが、その増加の程度は植物プランクトン群によって異なった。つまり、深層水の添加量が増えるほど2 μm以上のナノ・ミクロ植物プランクトンが増加し、ピコ植物プランク

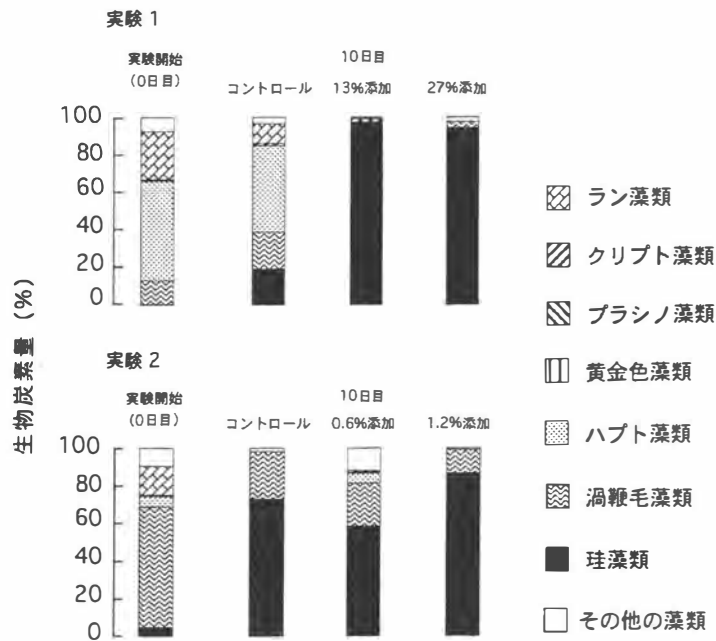


図5. 亜熱帯外洋の貧栄養表層植物プランクトン群集に富栄養海洋深層水を添加培養した場合の10日目(実験1)と16日目(実験2)のナノ・マイクロ植物プランクトンの構成グループの生物量

トンの割合が減少した(図4)。実験1では、ナノ・マイクロ植物プランクトンの割合は、深層水13%添加で全体の76%、27%添加で88%に達した。実験2でも深層水1.2%添加で同様の結果が得られた。亜熱帯海域では熱帯海域と同じく、通常はピコ植物プランクトンが優占しているが、同時に、生物量は極めて少ないが多様なナノ・マイクロ植物プランクトンを含んでいて(Takahashi and Bienfang, 1983)、栄養塩類の供給量が多くなった場合にはそれらナノ・マイクロ植物プランクトンの増殖の活発化が確認された。実際に、赤道湧昇海域などではナノ・マイクロ植物プランクトンの生物量の増加することが報告されていて本実験結果と一致する(Malone, 1980; Herbrand ら, 1985; Chavez, 1989)。

ナノ・マイクロ植物プランクトンを顕微鏡下で同定・計数し生体炭素量で整理した結果が図5である。元の表層水中のナノ・マイクロ植物プランクトンは、上述のように現存量は少なく、その構成グループは実験1と実験2で若干異なるがハプト藻類、渦鞭毛藻類、藍藻類などで、その他にごく微量のクリプト藻類、プラシノ藻類、珥藻類などの多様な分類群から構成されていることがわかる。しかし、培養10日目(実験1)、あるいは16日目(実験2)に

なると、珥藻類が生物量の過半からほとんどを占め、特に深層水の添加量の多いほど顕著になる傾向が認められる。ただし、深層水を添加しないコントロールでも珥藻類の割合の増加が見られているので、実験培養条件の影響も無視できないが、それに加えて深層水添加では影響が大きく出ている。実験1に比べて実験2では含まれている栄養塩類中の窒素に比した珥素の割合が半分以下と少なく、また、深層水の添加のしかたによる栄養塩類の供給頻度も異なるため、これらの要因が出現種組成に与えた影響についてさらに検討が必要である。水産生物の増産には中・大型珥藻類が餌として適していることが言われており、これら生物の割合を多くするためには深層水の含む栄養塩類組成比、添加濃度、表層植物プランクトン群集組成などが深層水添加による植物プランクトン群集組成の変化に及ぼす影響について検討が必要である。もちろん水温、日射量などの影響にも注意が必要である。

4. まとめ

人為的に富栄養の深層水を貧栄養表層水と混合した場合、表層水中の植物プランクトン群集密度が低

いので、多くの場合数日以内の誘導期の後に表層植物プランクトン生物量の増加が期待できる。ただし、現在得られている誘導期データは自然界での状況を想定した培養実験結果なので、必ずしも自然条件下での誘導期を示していない可能性はあるが、その場合でも、培養に比べて自然界の方が環境変化は小さいので、誘導期はより短くなると考えられる。

植物プランクトン生物量は、窒素・リン・珪素などの栄養塩類を一定量比で利用し、最も律速の著しい栄養塩類が利用できなくなる濃度まで必要栄養塩類を吸収してそれに見合った生物量まで増加する。本実験で得られた窒素・リン・珪素の比を表1に纏めたが、増殖に必要な栄養元素の存在比などの条件の変動によってはこれらの関係は必ずしも一定になるとは限らない。今後、時期や海域、あるいは構成植物プランクトン種などのちがいによって起こると考えられるこれらの比の変動幅に関するデータの集積が必要である。また、律速栄養塩類が十分供給される場合には、植物プランクトン量は光学的な限界値（高橋ら、1996；岸野・高橋、1996）まで増加することになるが、その量についての吟味も重要である。

一方、植物プランクトンの増加速度は、環境順化後は栄養などの環境が維持されている間は指数関数的に一定値をとるが、それは同時に温度・光強度などの影響を受けている。そのために、律速栄養塩類濃度、温度、光強度などと増殖速度との関係のデータの集積が不可欠で、これについても前述の栄養塩類と生物量の量比の関係同様、時期や海域、あるいは構成植物プランクトン種などのちがいとの関係の把握が望まれる。その場合、温度と光強度は一定に維持することが比較的容易であるが、栄養塩類濃度は特に低濃度を一定に保つことが難しく取り扱いやデータの解釈には工夫が必要である。

肥沃化した場合には、超微小のピコ植物プランクトンよりも中・大型のナノ・マイクロ植物プランクトンの増殖が選択的に大きく促進されるため、植物プランクトンの群集組成が変化する。深層水の混合のしかたによって実際にどのサイズの植物プランクトンがどの程度増えるか、また、種による刺激の

受け方についての情報を異なった地域や時期などについて明らかにしていく必要がある。深層水の含む栄養塩濃度比と濃度も重要な検討項目である。水産資源生物を増産する目的には、さらに、食物網内の植物プランクトンの利用ルートを検討して、水産資源生物により効果的に多くの物質が回るような工夫が必要で、それには植物プランクトン群集組成が鍵になる。

謝 辞

本研究は社団法人「マリノフォーラム 21」の平成 14 年度委託研究「深層水活用漁場造成のための総合システムの開発」（平成 14 年度水産庁補助事業「深層水活用型漁場造成技術開発」の一環）として実施した。なお、本研究の元になった実験データは新エネルギー・産業技術総合研究機構の平成 10 年度「地域コンソーシアム研究開発事業即効型地域コンソーシアム研究開発」の「洋上海洋深層水取水システムの開発と海洋肥沃化、二酸化炭素吸収及び生物効果の研究開発」で得られた。

文 献

- Banase, K. (1977): Determining the carbon-to-chlorophyll ratio of natural phytoplankton. *Mar. Biol.*, 41, 199-212.
- Brzezinski, M. A. (1985): The Si:C:N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables. *J. Phycol.*, 21, 347-357.
- Chavez, F. P. (1989): Size distribution of phytoplankton in the central and eastern tropical Pacific. *Global Biogeochem. Cycles*, 3, 27-35.
- Cushing, D. H. (1971): Upwelling and the production of fish. *Adv. Mar. Biol.* 9: 255-334.
- Eppley, R. W. (1972): Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fish. Bull.*, 70, 1063-1085.
- 古谷研 (2000): 海洋深層水利用で考えられる富栄養化の問題. 月刊海洋/号外 22: 234-238.
- Geider, R. J. (1987): Light and temperature dependence of the carbon to chlorophyll *a* ratio in microalgae and cyanobacteria: implications for physiology and growth of phytoplankton. *New. Phytol.*, 106, 1-34.

- Herbland, A., A. Le Bouteiller, P. Raimbault (1985): Size structure and phytoplankton biomass in the equatorial Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res.*, 32, 819-836.
- 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. *海洋深層水研究*, 2: 73-86.
- 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.
- Ishizaka, J., M. Takahashi and S. Ichimura (1983): Evaluation of coastal upwelling effects on phytoplankton growth by simulated culture experiments. *Mar. Biol.* 76: 271-278.
- 岸野元彰・高橋正征 (1996): 光利用と光合成. *月刊海洋/号外* 10: 40-49.
- Malone, T. C. (1980): Algal size. In: (Ed. By I. Morris) *The physiological ecology of phytoplankton*. Blackwell, Oxford, 433-463.
- Matsuda, F., T. Sakou, M. Takahashi, J. Szyper, J. Vadus, and P. Takahashi (2000): US-Japan Advances in the Development of Open-Ocean Ranching, UJNR Marine Facilities Panel, <http://www.dt.navy.mil/ip/mfp/paper5.html>.
- 野崎義行 (1994): 地球温暖化と海. 炭素の循環から探る. 東京大学出版会, 196 頁.
- 沖縄県海洋深層水開発協同組合 (1999): 「海ヤカラ 1 号」設置海域の水塊の物理・化学的特性. 62-80 頁. 平成 10 年度融合開発促進事業報告書「海洋深層水の取水方法の技術開発及び食品添加物, 健康食品の開発 (海洋深層水の事業展開に向けて)」。207 頁.
- Strickland, J. D. H. (1960): Measuring the production of marine phytoplankton. *Bull. Fish. Res. Bd. Canada*, 122: 1-172.
- 鈴木欸 (編) (1997): 海洋生物と炭素循環. 東京大学出版会, 東京 193 頁.
- 高橋正征 (1998): 海洋生物資源—200 海里内の生物生産の増産の必要性. *学術月報*, 51: 25-29.
- Takahashi, M. and N. Fukazawa (1982): A mechanism of “red tide” formation. II. Effect of selective nutrient stimulation on the growth of different phytoplankton species in natural water. *Mar. Biol.*, 70: 267-273.
- Takahashi, M. and P. K. Bienfang. (1983): Size structure of phytoplankton biomass and photosynthesis in subtropical Hawaiian waters. *Mar. Biol.*, 76: 203-211.
- 高橋正征・古谷研・石丸隆 (監訳) (1996): 粒状物質の一次生産. *生物海洋学* 2. 東海大学出版会, 90 頁.
- 宇田道隆 (1974): 世界海洋の湧昇現象. *月刊海洋* 6: 14-21.
- (2003. 3. 6 受付, 2003. 7. 23 受理)