

特集

富栄養化した水域の生態学的環境修復

—北九州市洞海湾を例として—

夏季洞海湾のプランクトン生態系における物質の流れ

上 真一*・多田 邦尚**

1. はじめに

極度に富栄養化した洞海湾の水質を改善するには、富栄養の原因となっている窒素、リンなどの栄養塩の流入負荷量を削減することが必須である。必要な削減量を推定する方法の一つは生態系モデルの利用である^{1,2)}。生態系モデルによる推定をより確かなものとするには、使用するモデルが実際の海域の状況をどれだけ正確に模写しているかにかかっている。海洋では主としてプランクトンや細菌などの微小な生物群集によって構成される低次栄養段階において、親生物質の変性や転送が最も活発に行われている。独立栄養生物である植物プランクトンの一次（基礎）生産速度は、栄養塩の消費速度や有機物の生産速度を指標するパラメータであり、従属栄養生物である細菌の生産速度、あるいは動物プランクトンの二次あるいは三次生産速度は、有機物の消費速度、あるいは有機物から無機物への再生産速度を指標するパラメータであるので、生態系モデルを構築する際には基礎となるものである。

1996年8月21日に洞海湾全域を対象として、植物、動物プランクトンならびに細菌の現存量、生産速度に関する調査を行った。本論文は、夏季の洞海湾のプランクトン群集構造の特性について言及し、同時にこの時のプランクトン主要構成群の生産速度を推定することにより、プランクトン食物網を流れる物質のうち、特に炭素に注目してその流れを解明しようとするものである。

2. 調査方法の概要

1996年8月21日に、図1に示す7定点において、一般海洋観測、採水、プランクトンなどの生物採集を行った。各定点での水温、塩分の鉛直分布をCTDで測定し、3層(0.5, 4, 8 m)から

採水して溶存酸素濃度、クロロフィル濃度を測定した。細菌用と微小動物プランクトン用の試水をプラスチック容器に取り、直ちに1%グルタルアルデヒドで固定し、冷暗所に保存した。大形動物プランクトン（ここではネット動物プランクトンと呼ぶ）は目合い100 μ mのプランクトンネットを海底から表面まで鉛直曳きすることにより採集し、直ちに5~10%のホルマリン濃度になるように固定した。

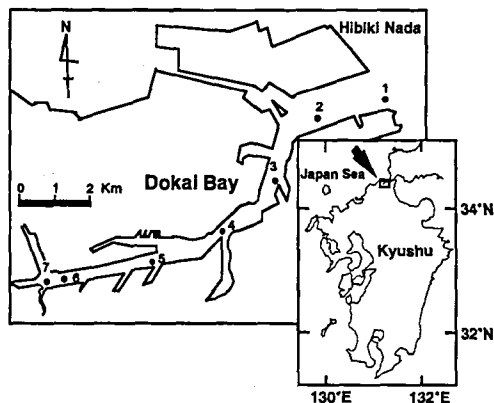


図1 洞海湾の調査定点

3. 環境要因

調査日における洞海湾の物理化学的環境要因を図2に示す。水温は鉛直的にわずかに成層しており、水柱内の平均水温は27.0~27.8°Cの狭い範囲にあった。塩分は湾口部では32より高くしかも鉛直的に均一であったが、湾奥部では河川水の流入により表層の塩分が26まで低下して鉛直的に成層していた。溶存酸素濃度は湾口部で水柱全体にわたって8 ml ℓ^{-1} 以上と高かったが、湾奥部になるにつれて底層での貧酸素化が顕著となり、定点

*広島大学生物生産学部, **香川大学農学部

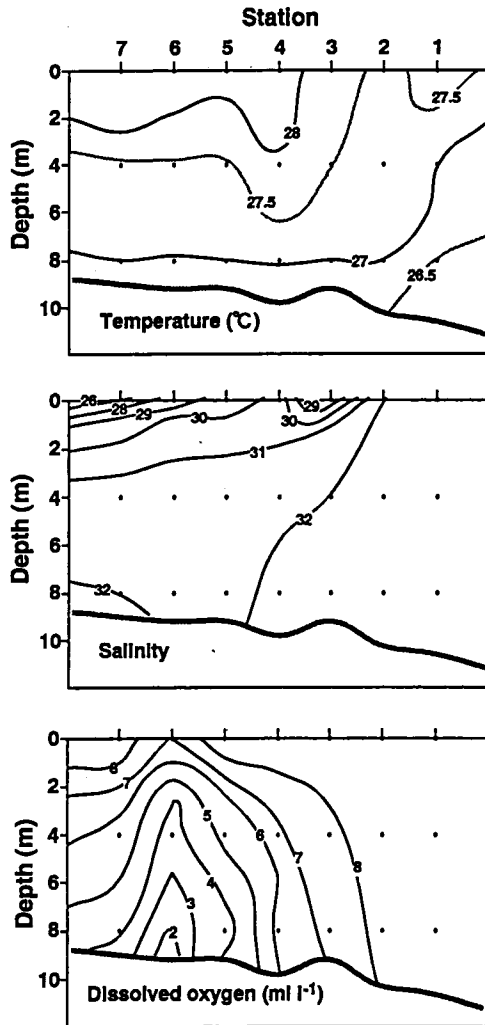


図2 水温、塩分、溶存酸素濃度の鉛直断面図

6で 2 ml l^{-1} の最低値を記録した。

4. 植物プランクトン

植物プランクトン現存量の指標となるクロロフィル濃度は、各定点の表層で最も高く、水深が増すにつれて低下した。水柱内平均クロロフィル濃度は $4.94 \sim 15.9 \mu\text{g l}^{-1}$ の範囲で変動し、湾内の平均濃度は $11.5 \mu\text{g l}^{-1}$ であった (図3)。

一次生産速度は ^{13}C 法により測定した³⁾。8月21日に定点6で測定した値と8月中旬に4回にわたって測定した定点T (図1には示していないが、定点3の近く)での値を平均すると、8月における洞海湾の平均一次生産速度は $1320 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ となった。

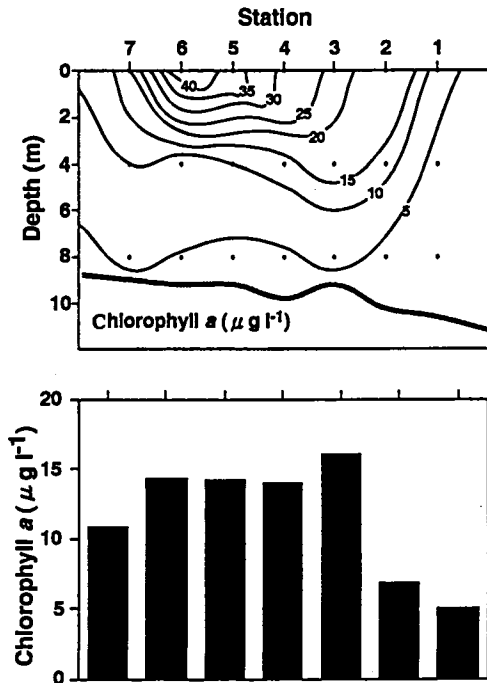


図3 クロロフィル濃度の鉛直断面図と各定点での水柱内平均濃度

5. 細菌

細菌は Hobbie ら⁴⁾の開発した方法を用い、木暮⁵⁾のマニュアルに従って落射蛍光顕微鏡による直接検鏡法により計数した。8月21日には定点2, T, 4, 5, 6, 7の表層においてのみ細菌密度を計数し、それぞれ $1.3, 1.2, 1.9, 1.9, 1.9, 1.6 \times 10^6 \text{ cells ml}^{-1}$ であった。細菌が水柱内に均一に分布していると仮定すると、湾内の平均密度は $1.6 \times 10^6 \text{ cells ml}^{-1}$ となる。従属栄養性細菌の炭素含量を 0.2 mg mm^{-3} と仮定し⁶⁾、細胞直径を $0.6 \mu\text{m}$ と仮定すると、1細胞当りの炭素含量は $23 \text{ fg C cell}^{-1}$ となるので、湾内の平均細菌現存量は $37 \mu\text{g C l}^{-1}$ と計算される。

定点T, 6の表層海水を、孔径 $1.0 \mu\text{m}$ のヌクレオポアフィルターで濾過することにより捕食者を除去してガラス容器中でインキュベートし、その後定期的に細菌密度を計数することにより比増殖速度を推定した。この時の平均比増殖速度は 0.089 h^{-1} であったので、平均現存量を乗じて湾内の細菌生産速度を $79 \mu\text{g C l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ と見積もった。

6. 微小動物プランクトン

濃縮試料を倒立顕微鏡で観察し、微小動物プラ

ンクトンは3群(有鐘類, 無殻繊毛虫類, カイアシ類ノープリウス)に別けて計数した。各群はいずれも湾中央部の表層あるいは中層に密集して分布し, 湾口部あるいは湾奥部では個体密度は低かった。3群を合計した微小動物プランクトンの水柱内平均密度は760~2674 indiv. ℓ^{-1} の範囲であり, 湾全体の平均密度は1473 indiv. ℓ^{-1} であった。そのうち有鐘類が最優占し(68%), カイアシ類ノープリウスが最少であった(12%)。12種類の有鐘類と, 3属の無殻繊毛虫類を同定したが, 各分類群は湾口部から奥部にかけてそれぞれ異なる地理的分布を示した。

一般に海域が富栄養状態になるにつれて, 微小動物プランクトンのうち特に繊毛虫類の増加が顕著であることが知られている⁷⁾。8月21日の洞海湾の平均DIN濃度は100 μM を超えており(門谷, 香川大学, 私信), 洞海湾の富栄養化の程度は東京湾, 大阪湾, 広島湾より明らかに進んでいると判定される。しかし洞海湾で今回観察された微小動物プランクトンの密度は, 瀬戸内海(四季における平均密度: 239~400 indiv. ℓ^{-1})⁸⁾より高かったものの, 東京湾(年間平均密度: 約4000 indiv. ℓ^{-1})⁹⁾より明らかに低かった。

各群の所定部位の体長を計測し, 既報の換算式^{8,10,11)}から1個体当りの炭素重量を計算した。微小動物プランクトン現存量は定点7で最低(2.92 $\mu\text{g C } \ell^{-1}$), 定点3で最高(22.42 $\mu\text{g C } \ell^{-1}$)となり, 湾内の平均現存量は10.10 $\mu\text{g C } \ell^{-1}$ であった(図4)。有鐘類, 無殻繊毛虫類, カイアシ類ノープリウスは全体のそれぞれ75, 5, 20%を占めた。

有鐘類, 無殻繊毛虫類の比増殖速度をMuller and Geller (1993)¹²⁾の多重回帰式から, カイアシ類ノープリウスの比増殖速度を既報の関係式⁸⁾から推定し, 得られた比増殖速度に現存量を乗じることにより生産速度を見積もった。微小動物プランクトンの水柱内平均生産速度は5.50~25.57 $\mu\text{g C } \ell^{-1} \text{ d}^{-1}$ の範囲で変動し, 湾内の平均生産速度は14.40 $\mu\text{g C } \ell^{-1} \text{ d}^{-1}$ であった(図4)。有鐘類, 無殻繊毛虫類, カイアシ類ノープリウスの貢献度は, それぞれ83, 12, 5%であった。

7. ネット動物プランクトン

ネット動物プランクトンの試料の一部を, 実体顕微鏡下で主要分類群毎に同定, 計数し, それらの乾燥重量を測定することにより最終的に炭素重量に換算した。またカイアシ類などの主要動物プランクトンは所定部位の体長を計測し, 既報の回

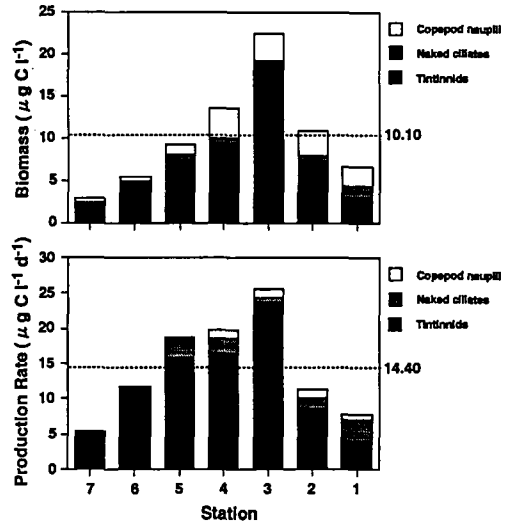


図4 微小動物プランクトンの各定点での水柱内平均現存量と生産速度

帰式から1個体当りの炭素重量に換算した¹³⁾。

ネット動物プランクトンの個体密度は湾口部では低く, 湾中央部より奥側の定点で高かった。湾内全体の平均個体密度は 106×10^3 indiv. m^{-3} であり, そのうちカイアシ類は53%を占めていた。ネット動物プランクトンの現存量は定点1で最低(20.6 $\text{mg C } \text{m}^{-3}$), 定点4~7で全体的に高く, 最高値(73.1 $\text{mg C } \text{m}^{-3}$)は定点5で観測された(図5)。湾内の平均現存量は53.2 $\text{mg C } \text{m}^{-3}$ であり, カイアシ類の占める割合は43%に過ぎず, カイアシ類以外のネット動物プランクトンが優占した。カイアシ類の各属により地理的分布は異なり, 湾口部付近では*Euterpina*属が最優占し, 奥部になるにつれて*Oithona*属, *Acartia*属が優占した(図5)。カイアシ類以外の分類群では二枚貝の幼生が最優占し, 次いでヤムシ類, 多毛類の幼生が多かった(図5)。ネット動物プランクトンと微小動物プランクトンを合わせた全動物プランクトンの平均現存量は63.3 $\text{mg C } \text{m}^{-3}$ となり, 前者は84%を占めた。

瀬戸内海全域の各季節におけるネット動物プランクトン現存量の平均値(13.2~35.5 $\text{mg C } \text{m}^{-3}$)¹³⁾と比較すると, 洞海湾の現存量は明らかに高かった。また瀬戸内海では全動物プランクトン中に占めるネット動物プランクトンの割合は80~87%の範囲であり¹²⁾, 洞海湾における割合はこれと同レベルであった。海域の富栄養化が進行するにつれて, 大型動物プランクトンより小型動物プランクトンが相対的に優占することが経験的に知られているので^{7,14,15)}, 本邦で富栄養化が最も

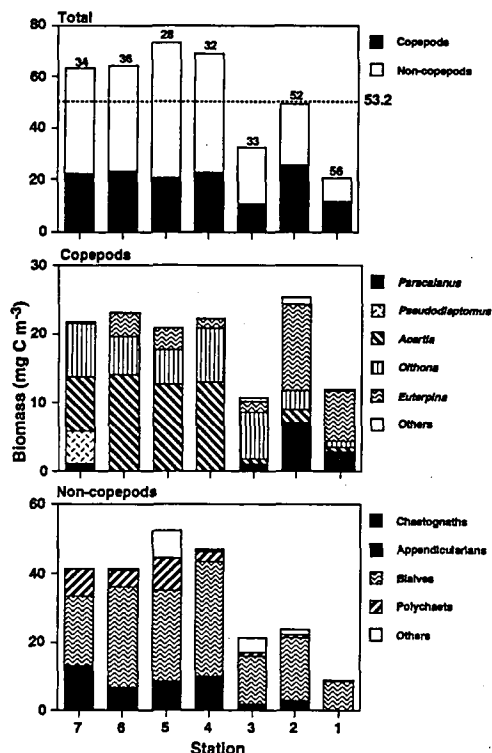


図5 ネット動物プランクトンの各定点での水柱内平均現存量

進んだ内湾と考えられる洞海湾において、ネット動物プランクトンの占める割合が相対的に高かったのは意外であった。その原因の一つは、本湾の護岸に付着するムラサキガイ (*Mytilus galloprovincialis*) やコウロエンカワヒバリガイ (*Limnoperna fortunei kikuchii*) などの二枚貝から放出された大量の浮遊幼生に起因している。

ネット動物プランクトンは食性(植食性、雑食性、肉食性)により二次生産者と三次生産者に別け、Uye and Shimazu (1997)¹³⁾に示した方法により生産速度を見積もった。二次生産速度は13.9~56.5 mg C m⁻³ d⁻¹の範囲にあり、湾内の平均値は38.3 mg C m⁻³ d⁻¹であった(図6)。そのうちカイアシ類の貢献度は15%と非常に低く、カイアシ類以外の動物プランクトン(特に二枚貝幼生)が大きな貢献をしていた。三次生産速度は0.52~7.26 mg C m⁻³ d⁻¹の範囲で変動し、湾内の平均値は4.20 mg C m⁻³ d⁻¹であった(図6)。この場合カイアシ類の生産が82%を占め、大きな貢献をしていた。

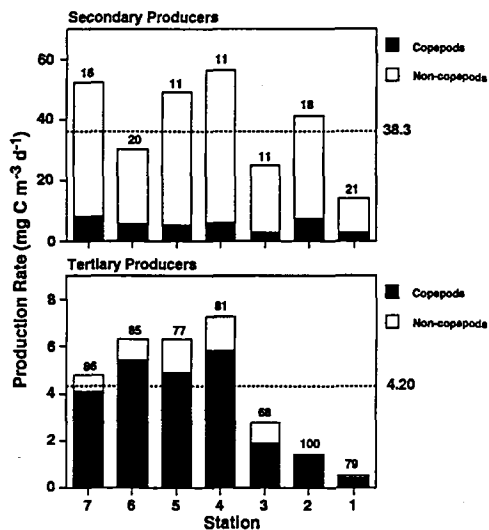


図6 ネット動物プランクトンの各定点での水柱内平均二次生産速度と三次生産速度

8. 食物連鎖を経由する炭素の流れ

洞海湾におけるプランクトン生態系の主要構成要素である、植物プランクトン、細菌、従属栄養性微小鞭毛虫類(今回調査対象としなかった)、微小動物プランクトン、植食性ネット動物プランクトン、肉食性ネット動物プランクトン間の炭素の流れを、各構成要素の生産速度あるいは摂餌速度(細菌の場合は取り込み速度)を基準として推定した。摂餌速度を推定する際、総成長効率をネット動物プランクトンの場合には0.3¹⁶⁾、微小動物プランクトンの場合には0.4¹⁷⁾、細菌の場合には0.5¹⁸⁾と仮定した。

図7はその結果を1 m²当りの日間速度で図示したものである。微小動物プランクトン、植食性ネット動物プランクトンが、もし餌の総てを植物プランクトンに依存しているとすれば、植物プランクトン一次生産速度の87%を、植物プランクトン現存量の36%をそれぞれ日間に消費することになる。今回得られた細菌生産速度を支えるためには一次生産速度の85%に相当する溶存態有機炭素を必要とするので、明らかに一次生産由来の炭素だけでは賄うことができず、陸源の溶存態有機炭素の供給を考慮に入れなければならない。その場合、陸源由来の有機炭素が細菌食物連鎖を経由して、より上位の栄養段階にまで転送されると予測される。その結果として、一次生産から二次生産(微小動物プランクトンと植食性ネット動物プランクトン)への転送効率は28%と、富栄養海

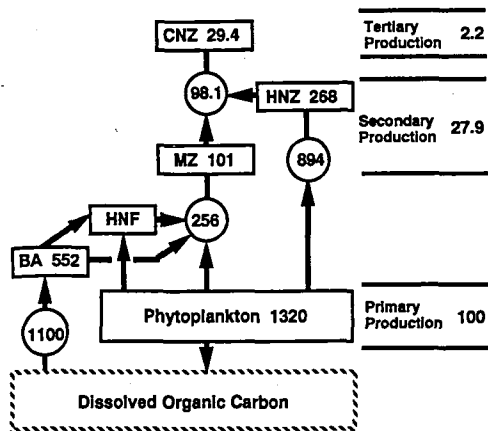


図7 夏季の洞海湾のプランクトン食物網を流れる炭素の流れ

四角内の数字は1 m²当りの日間生産速度を、円内の数字は生産速度を賄うために必要な日間要求量を示す。BA:細菌, HNF:従属栄養性微小鞭毛虫類, MZ:微小動物プランクトン, HNZ:植食性ネット動物プランクトン, CNZ:肉食性ネット動物プランクトン

域では稀にみる高い値となった¹⁹⁾。しかし二次生産から三次生産への転送効率率は8%の低い値であった。

9. おわりに

従来、洞海湾のように富栄養化の究めて顕著な海域では、豊富な栄養塩の供給により植物プランクトンによる一次生産速度は高いけれども、動物プランクトンによる消費速度は相対的に低いため、結果として一次生産から二次生産への転送効率は低下して、多くの余剰の植物プランクトンは枯死したり、海底に沈降するのではないかと考えられてきた。しかし今回の調査結果は予想に反して、洞海湾では動物プランクトンの現存量、生産速度が共に高く、特にネット動物プランクトンは植物プランクトンの主要な摂食者として重要な役割を果たしていることが明らかとなった。溶存態有機炭素は植物プランクトンから直接供給されるだけでなく、動物プランクトンの排泄や死亡によっても供給される。洞海湾内部で生産された有機炭素が不足する場合には、洞海湾外で生産された陸源有機炭素は細菌にとって重要な基質となるであろう。以上のように、夏季の洞海湾では植物プランクトンにより生産された有機物は、細菌を含めた従属栄養性生物がほぼ使い切っている姿が浮き彫りになった。この姿が夏季の洞海湾だけに特

有のものかどうか、他の季節、他の富栄養内湾でも同様な調査を行って検討する必要がある。

謝辞: 植物プランクトン、細菌の調査では、当時の香川大学院生森下政和君に、動物プランクトンの調査では、当時の広島大学院生長野直樹、島津哲也君に、それぞれ協力を頂いた。また野外観測では北九州市環境科学研究所の職員の方々に協力頂いた。各位に厚く謝意を表す。

文 献

- 1) Yanagi, T. (1995) A numerical modeling on the sedimentation processes in the Yellow Sea and the East China Sea. *J. Oceanogr.*, **51**, 537-552.
- 2) Yanagi, T., K. Inoue, S. Montani and M. Yamada (1997) Ecological modeling as a tool for coastal zone management in Dokai Bay, Japan. *J. Mar. Syst.*, **13**, 123-136.
- 3) Hama, T., T. Miyazaki, Y. Ogawa, T. Iwakuma, M. Takahashi, A. Otsuki and S. Ichimura (1983) Measurement of photosynthetic production of marine phytoplankton population using a stable ¹³C isotope. *Mar. Biol.*, **73**, 31-36.
- 4) Hobbie, J. E., R. J. Daley and S. Jasper (1977) Use of Nuclepore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl. Environ. Microbiol.*, **33**, 1225-1228.
- 5) 木暮一啓 (1990) 全菌数計算法. 沿岸環境調査マニュアルII [水質・微生物篇], 日本海洋学会(編), pp. 269-272.
- 6) Kogure, K. and I. Koike (1987) Particle counter determination of bacterial biomass in seawater. *Appl. Environ. Microbiol.*, **53**, 274-277.
- 7) Revelante, N., M. Gelmartin and N. Smodlaka (1985) The effect of Po River induced eutrophication on the distribution and community structure of ciliated protozoan and micrometazoan populations in the northern Adriatic Sea. *J. Plankton Res.*, **7**, 461-471.
- 8) Uye, S., N. Nagano and H. Tamaki (1996) Geographical and seasonal variation in abundance, biomass and estimated production rates of microzooplankton in the Inland Sea of Japan. *J. Oceanogr.*, **52**, 689-703.
- 9) 野村英明・石丸 隆・村野正昭 (1992) 東京湾の微小動物プランクトンとその季節的消長. *Limnol. Oceanogr.*, **37**, 57-72.
- 10) Verity, P. G. and C. Langdon (1984) Relationships between lorica volume, carbon, nitrogen, and ATP content of tintinnids in Narragansett Bay. *J. Plankton Res.*, **6**, 859-868.

- 11) Putt, M. and D. K. Stoecker (1989) An experimentally determined carbon: volume ratio for marine "oligotrichous" ciliates from estuarine and coastal waters. *Limnol. Oceanogr.*, **34**, 1097-1103.
- 12) Müller, H. and W. Geller (1993) Maximum growth rates of aquatic ciliated protozoa: the dependence on body size and temperature reconsidered. *Arch. Hydrobiol.*, **126**, 315-327.
- 13) Uye, S. and T. Shimazu (1997) Geographical and seasonal variations in abundance, biomass and estimated production rates of meso- and macrozooplankton in the Inland Sea of Japan. *J. Oceanogr.*, **53**, 529-538.
- 14) Mathes, J. and H. Arndt (1994) Biomass and composition of protozooplankton in relation to lake trophy in north German lakes. *Mar. Microb. Food Webs*, **8**, 357-375.
- 15) Uye, S. (1994) Replacement of large copepods by small ones with eutrophication of embayments: cause and consequence. *Hydrobiologia*, **292/293**, 513-519.
- 16) Ikeda, T. and S. Motoda (1978) Estimated zooplankton production and their ammonia excretion in the Kuroshio and adjacent seas. *Fish. Bull.*, **76**, 357-366.
- 17) Fenchel, T. (1987) Ecology of Protozoa - The Biology of Free-Living Phagotrophic Protists. Springer-Verlag, Berlin.
- 18) Cole, J. J., S. Finlay and M. L. Pace (1988) Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: a cross-system overview. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **43**, 1-10.
- 19) Cushing, D. H. (1971) Upwelling and fish production. *Adv. Mar. Biol.*, **9**, 255-334.