

## 内湾における化学環境と低次栄養段階の生物量の変動

多田邦尚・森下政和

The changes of environmental chemical conditions and biomass  
on lower trophic levels in a coastal bay

Kuninao TADA and Masakazu MORISHITA

The changes of environmental chemical conditions and biomass of phytoplankton and bacteria were investigated, for about three years, at the eastern part of Kagawa Prefecture, Shido Bay. Through the whole period, no stratification of the water column, permanently in the euphotic zone, was observed.

The standing stocks of dissolved inorganic nitrogen (DIN) in the water column increased in fall and decreased in winter. The changes of DIN standing stock were larger than that expected from nitrogen uptake and regeneration by phytoplankton. External loading of nitrogen from aquaculture activities, nitrogen release from the sediment, and uptake by cultured laver and benthic algae, were suggested.

Water temperature did well correlated with bacterial cell density but not with bacterial specific growth rate. Our results indicated that bacterial cell density was only a weak function of phytoplankton biomass, producer of potential food source for bacteria, such as dissolved organic carbon, and temperature.

**Key words :** Nutrient, chlorophyll a, phytoplankton, bacteria, Shido Bay

## 1. 緒 言

海域の植物プランクトンによる基礎生産は、魚介類等の高次栄養段階の生物生産を支えている。したがって、基礎生産量が多ければ多いほど、高次栄養段階の生物量も豊富になるはずであるが、これら二者の関係においては必ずしも定常状態が保たれていない。近年、各地の内湾では陸域からの栄養塩の流入や養殖場からの有機物負荷が原因となり、基礎生産者と高次栄養段階の生物量のバランスが崩れ、その結果、基礎生産により作られた有機物が高次栄養段階の生物へ効率よく移行せず、富栄養化あるいは赤潮の頻発等の問題が生じている。

また、近年海水中の従属栄養細菌がその現存量においても生物生産においても無視できない存在であり、溶存有機物から従属栄養細菌、さらにこれを捕食する従属栄養鞭毛虫及び繊毛虫などを含む微生物食物連鎖 (Microbial Food Chain) がさまざまな海域において重要な役割を果たしていることが明らかになってきた (今井1989)<sup>(1)</sup>。

以上のように栄養塩類や植物プランクトン及び従属栄養細菌等の低次栄養段階の生物量の増減を調べることは、内湾の生態系あるいは物質循環がどのような状態にあるのかを予想する上で大変重要である。著者らは海流の影響等の少ないと考えられる内湾として香川県東部に位置する志度湾をモデル海域に選び調査を行った。志度湾は庵治半島と大串半島に囲まれた水深の浅い湾であり、カキ、ハマチおよび海苔養殖等の水産業が盛んな湾である。本研究では約3年間に渡り志度湾の化学

環境と植物プランクトンおよび従属栄養細菌の季節変動等を明らかにすることを目的とした。

## 2. 試料及び方法

本研究に用いた試料は、1993年4月21日から1996年1月25日にかけてほぼ月一回の割合で志度湾に設定した観測点 (Stn. S, 水深約7m, Fig. 1) において採取した。試料の採取には本学農学部調査船カラスを使用し、CTD (アレック電子社製 Model AST-1000) により1m毎に水温、塩分の観測を行った。海水試料はバンドーン型採水器とバケツを用いて採取した。

採取した海水試料については、植物色素 (クロロフィル a), 硝酸+亜硝酸態窒素 ( $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$ ), アンモニア態窒素 ( $\text{NH}_4 - \text{N}$ ) を測定した。また、それに加え1993年4月から1994年3月には懸濁態有機炭素・窒素 (POC・PON) を、1994年8月から1996年1月にはリン酸態リン ( $\text{PO}_4 - \text{P}$ ) も測定した。更に1994年8月から翌年8月までの間には従属栄養細菌の細菌密度及び細菌の比増殖率の測定も行った。

クロロフィル a 濃度は、Whatman GF/F フィルターを用いて海水試料をろ過し、得られたフィルターを N, N-dimethylformamide で一昼夜以上抽出した後 (Suzuki and Ishimaru 1990)<sup>(2)</sup>, 分光法により測定を行った (Parsons ら 1984)<sup>(3)</sup>。栄養塩の測定には Whatman GF/F フィルターで海水試料をろ過し、そのろ液について  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$  濃度及び  $\text{NH}_4 - \text{N}$  濃度を Technicon Auto Analyzer II を用いて (Strickland and Parsons 1972)<sup>(4)</sup>, また  $\text{PO}_4 - \text{P}$  濃度をモリブデンブルー法 (Parsons ら 1984)<sup>(3)</sup> により測定した。

POC と PON の定量には、予め  $450^\circ\text{C}$  で 4 時間強熱処理した Whatman GF/F フィルターを用いて海水試料を吸引ろ過し、少量の蒸留水で除塩した後、これを凍結乾燥後、分析を行った。分析には柳本社製 MT-3 型 CHN コーダーを用い POC と PON を同時定量した。従属栄養細菌の細菌密度については、海水試料を採取後直ちに 25% グルタルアルデヒドで固定 (最終濃度 0.5%) し、計数時まで冷蔵所 ( $4^\circ\text{C}$ ) にて保存した。計数の際には海水試料を、蛍光染料の 4',6'-diamidino-2-phenylindole (DAPI) で染色し、野村マイクロサイエンス社のヌクレポアブラックフィルター (孔径  $0.2\mu\text{m}$ ) 上にろ過捕集した。次にこのフィルターをスライドガラス上に置き無蛍光のイマルジョンオイルとカバーガラスにて封入し、落射型蛍光顕微鏡 (ニコン Y-2F-E 型) にて直接計数を行った (木暮 1990)<sup>(5)</sup>。また、細菌の比増殖率の測定は海水試料を孔径  $1\mu\text{m}$  のヌクレポアフィルターで吸引ろ過して従属栄養細菌の捕食者を取り除き、これを容量 2 L のガラスボトルにいれ、一定時間現場海水中に放置した。吸引ろ過直後の試料を 0 時間とし、以後 8 時間まで 2 時間おきにガラスボトル中より試料を採取固定し、同様に細菌数を計数した。

## 3. 結果

### 3-1 化学環境

Fig. 2 に 1993 年 4 月 21 日から 1996 年 1 月 25 日までの水温、塩分及び現場密度の鉛直分布の周年変動を示した。各観測日の水温、塩分及び現場密度  $\sigma_t$  は全層でほぼ一定の値であり、水柱内は年間を通じてよく鉛直混合していた。クロロフィル a 濃度、栄養塩濃度、および従属栄養細菌密度も同様に鉛直的にはほぼ一定の値であったため、以下にこれらの成分について水柱平均値を用いて示した。

Fig. 3 に 1994 年 4 月 4 日から 1996 年 1 月 25 日までの透明度を示した。観測期間中の透明度は平均 3.8m で、冬季に高くなり海底が透明度深度となることもあった。一般に透明度の約 3 倍深が有光層と考えられており (Parsons ら 1984)<sup>(6)</sup>, Stn. S では年間を通じてほぼ全層が有光層であったと考えられる。

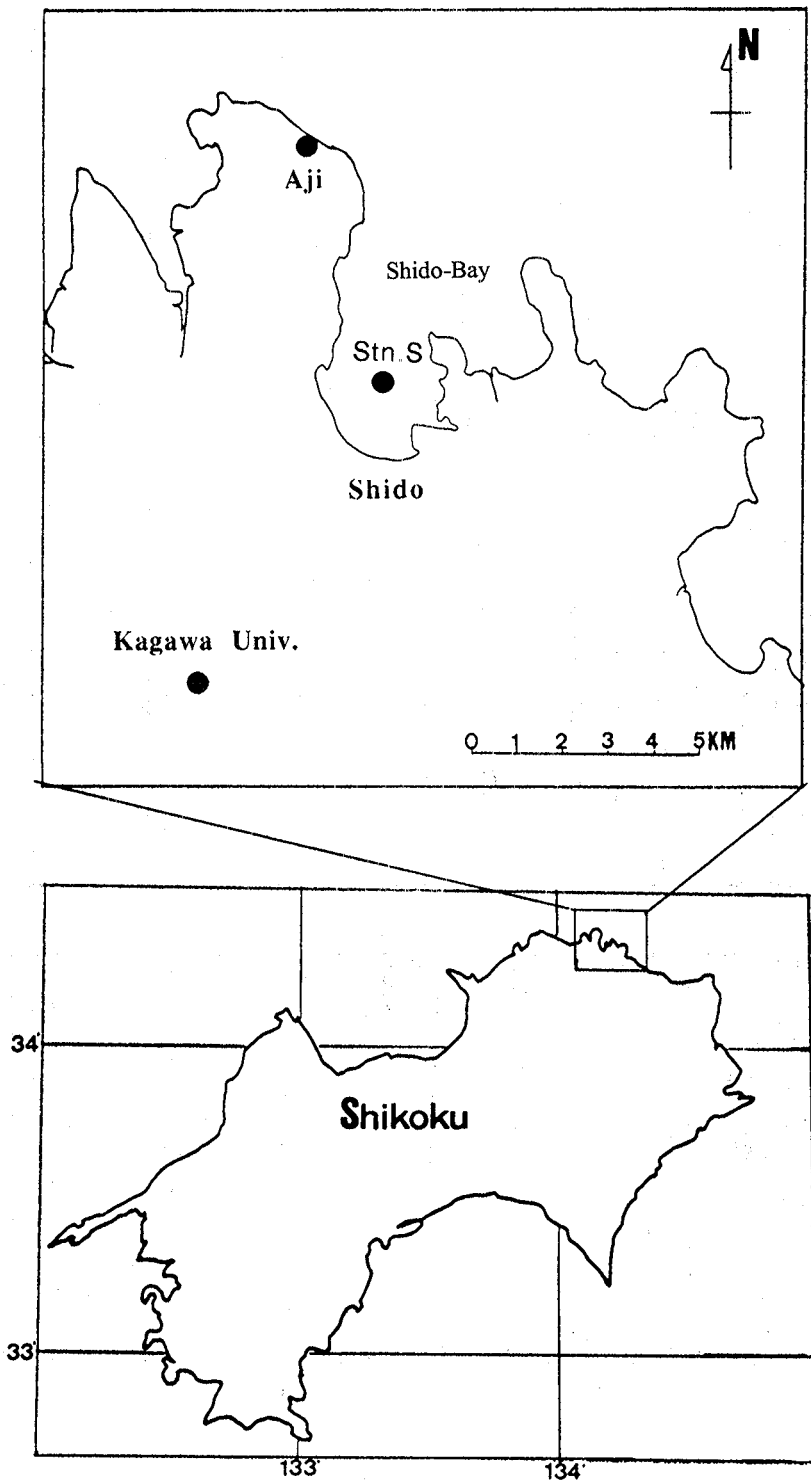


Fig. 1 The sampling station of Shido Bay, the Seto Inland Sea.

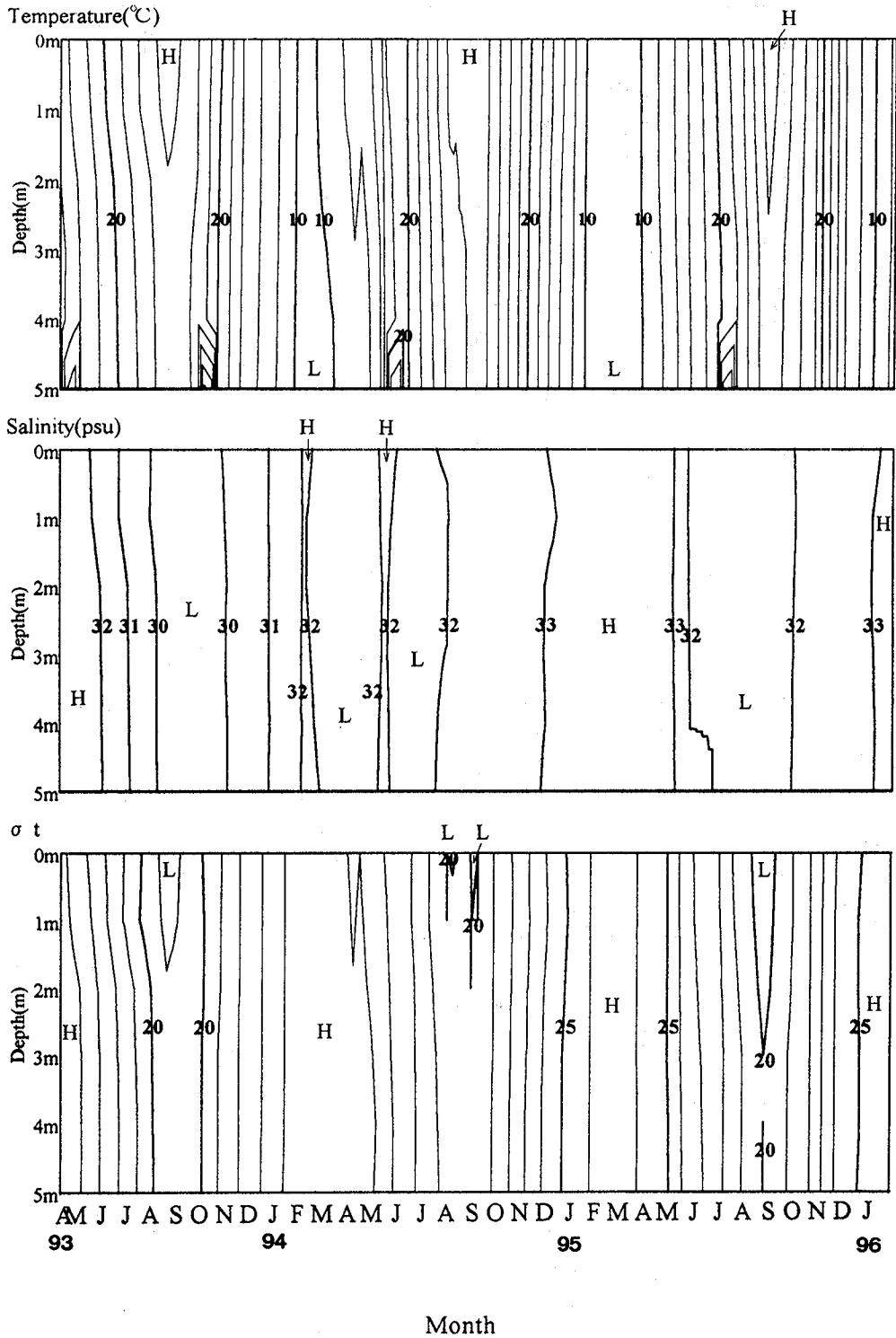


Fig. 2 Seasonal variations of vertical profiles of temperature, salinity and  $\sigma_t$ .

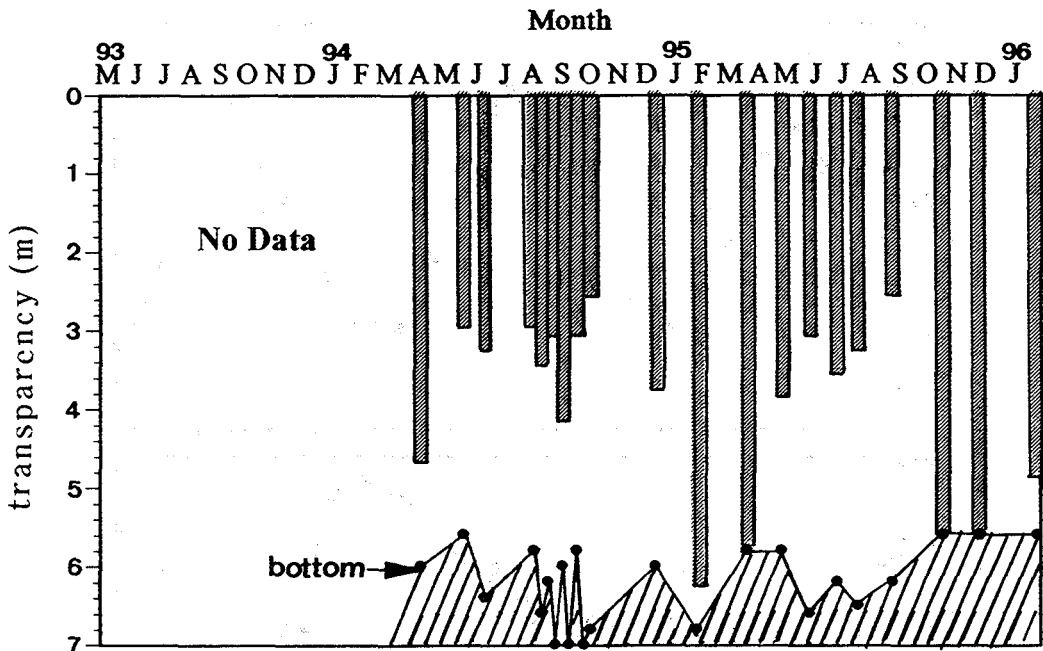


Fig. 3 Seasonal variations of vertical profile of transparency.

Fig. 4 に水柱平均の水温、塩分及び降水量の周年変動を示した。なお、降水量のデータは香川県気象月報<sup>(7)</sup>によった。水温は7.5~29.3℃の範囲で変動しており、夏季に高く、冬季に低くなる傾向が見られた。塩分は29.6~33.8psuの範囲で変動しており、1993年7月から12月にかけて低く31psu以下の値であり、1994年の12月から1995年の5月にかけて高く、33psu以上の値が見られた。塩分の増減と香川県の降水量との関係をもてみると (Fig. 4), 1993年の7月から塩分の低下が見られる以前の降水量は著しく多く、1994年の12月から塩分の増加の見られる以前の降水量は少なくなっており、塩分の増減に降水が影響しているものと考えられた。

Fig. 5 に水柱平均栄養塩濃度の周年変動を示した。NO<sub>3</sub>+NO<sub>2</sub>-Nは0~11.9μg-at/l, NH<sub>4</sub>-Nは0~6.44μg-at/l, PO<sub>4</sub>-Pは0.2~1.2μg-at/lの範囲で変動していた。季節変化に注目するといずれの年もNO<sub>3</sub>+NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N及びPO<sub>4</sub>-P濃度はともに9月頃から上昇し、12月頃から低下する傾向が見られた。

### 3-2 低次栄養段階の生物量の季節変動

Fig. 6 に水柱平均クロロフィル a 濃度の周年変動を示した。クロロフィル a 濃度は0.7~8.8μg/lの範囲で変動し、夏から秋にかけて高い値となることが多く、冬季には2μg/l以下となっており、水温と似た季節変動を示した。

Fig. 7 に水柱平均従属栄養細菌密度の周年変動を示した。従属栄養細菌密度は0.41~2.2×10<sup>6</sup>cells/mlの範囲で変動していた。測定が開始された1994年8月および9月には1.0~2.0×10<sup>6</sup>cells/mlの範囲を変動し、その後冬に向かって減少して1.0×10<sup>6</sup>cells/ml以下の値となり、その後、夏季に向かって再び増加する傾向が見られた。細菌数の変動傾向は、Fig. 4 に示した水柱平均水温の変動傾向と非常に良く似ていた。

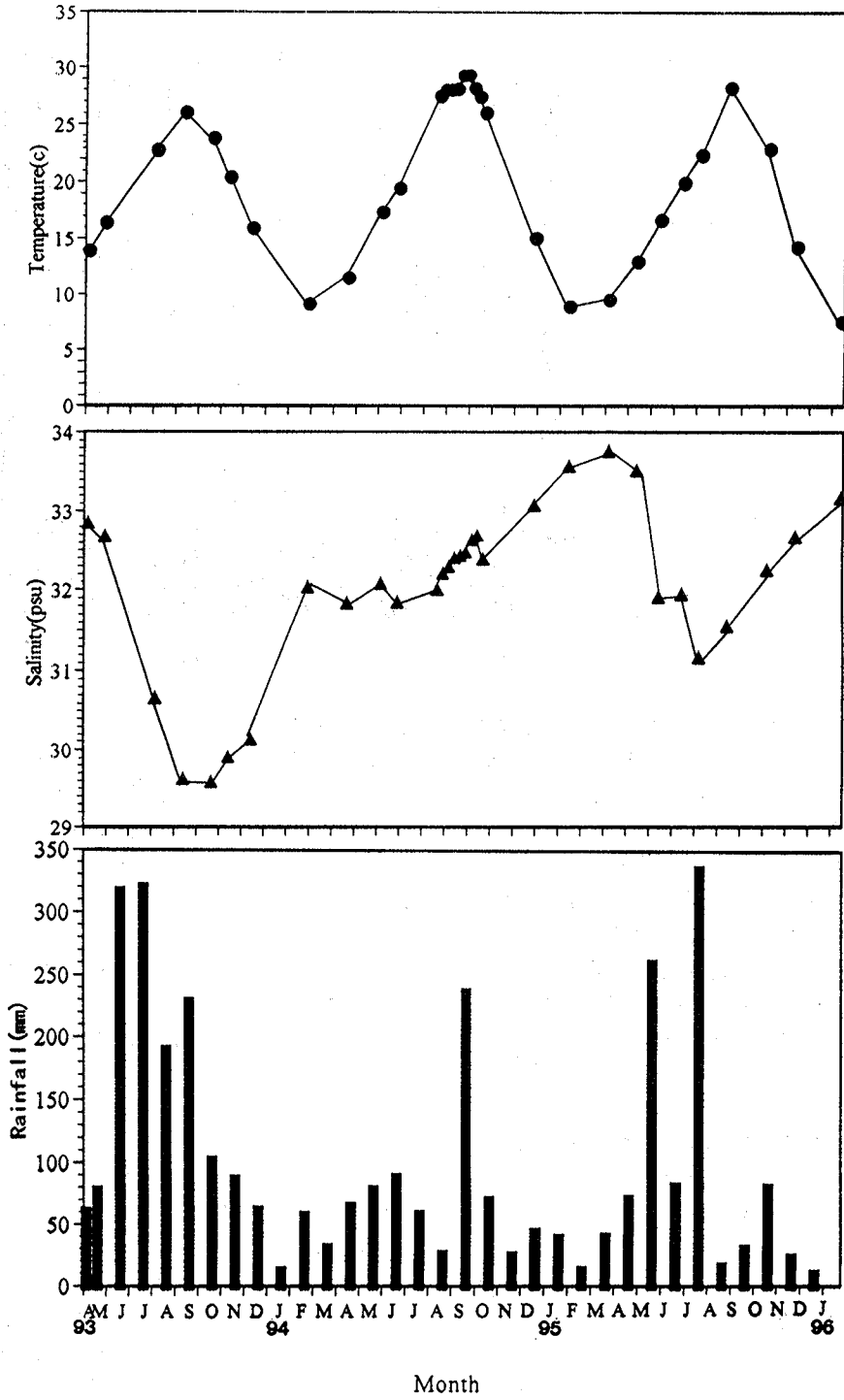


Fig. 4 Seasonal variations of average temperature, salinity in the water column and rainfall at Kagawa prefecture.

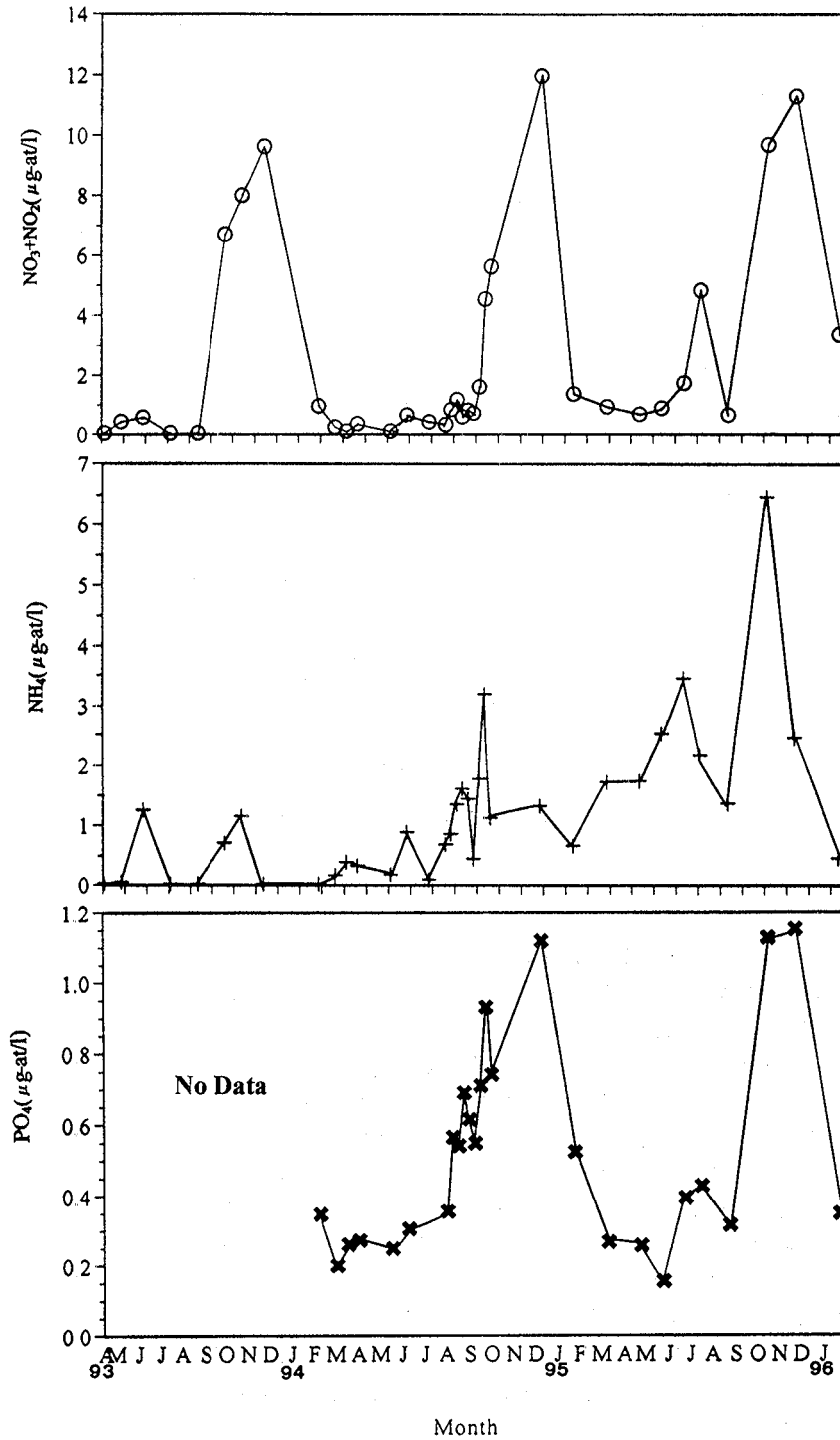


Fig. 5 Seasonal variations of average nitrate + nitrite, ammonia, phosphate concentration in the water column.

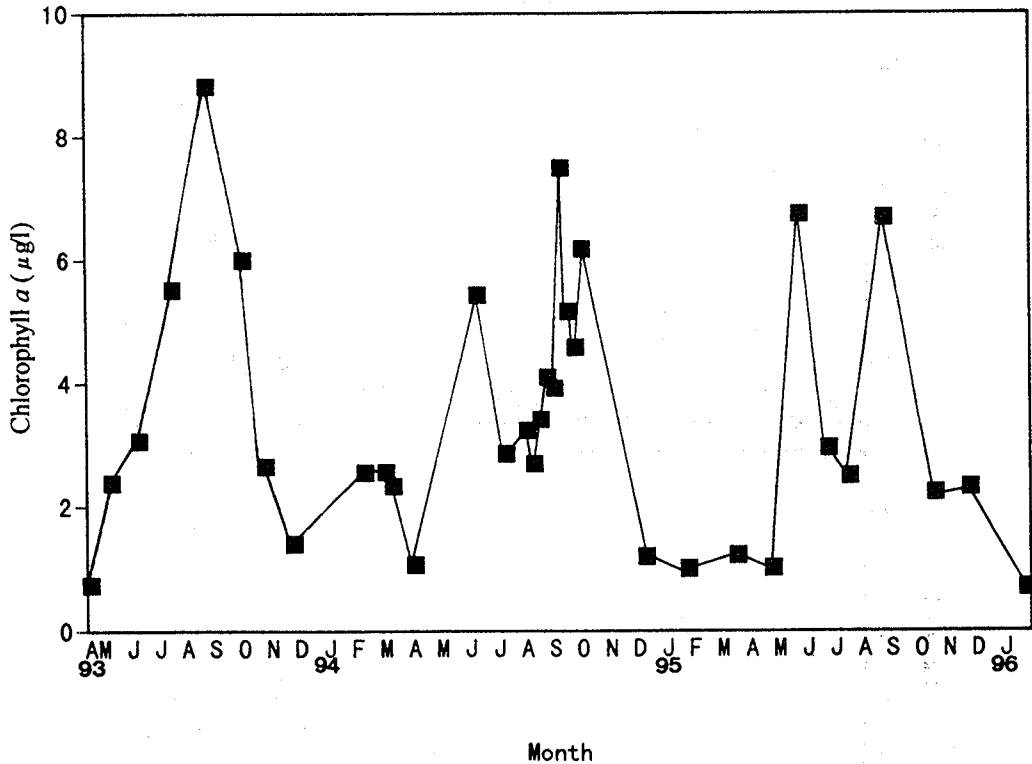


Fig. 6 Seasonal variations of average chlorophyll a concentration in the water column.

#### 4. 考 察

##### 4-1 植物プランクトン量と栄養塩濃度の変化

水柱内の植物プランクトン量の指標となるクロロフィル a の季節変動は Fig. 6 に示したように、中高緯度域で一般的に考えられている変動傾向とは異なっていた。即ち春季と秋季にブルーミングが見られるという季節変動ではなく、夏から秋に高い濃度となることが多かった。1993年4月21日から1994年3月2日までの約1年間のクロロフィル a 濃度と POC および PON の関係を Fig. 8 に示した。両者の間には良い相関関係が認められ、季節変化などにより植物プランクトンの生理状態に変化が生じていることが予想されるが、1年間のタイムスケールで見れば志度湾における植物プランクトンの C/Chlorophyll a, N/Chlorophyll a 比はそれぞれ 56.4, 6.46 と考えられた。一般に海洋における C/Chlorophyll a 比は 25~60 (Parsons ら 1984)<sup>6)</sup> とされており、今回志度湾で得られた C/Chlorophyll a 比はその範囲内の値であった。

1993年4月21日から1994年3月15日までの水柱内の  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 - \text{N}$ ,  $\text{NH}_4 - \text{N}$  および PON の積算量を Fig. 9 に示した。この期間に水柱内の PON 量は 8 月まで増加し、それ以後 11 月に向かって減少し、再び増加していた。この増減は植物プランクトン量の増減によると考えられ、8 月以降、植物プランクトンの減少に伴い PON も減少するが、この減少量以上の DIN (Dissolved Inorganic Nitrogen:  $\text{NO}_3 + \text{NO}_2 + \text{NH}_4 - \text{N}$ ) の増加が認められた。また 12 月から 2 月にかけては PON が増加するが、この増加量以上の DIN の減少が認められた。この事は水柱内の植物プランクトンの栄養塩



の取り込みによるDINの減少,あるいは植物プランクトンの分解による栄養塩の再生以上のDINの消費と負荷があることを示している。また,水柱平均DINと $PO_4-P$ 濃度はともによく似た季節変動を示しており (Fig. 5), 1994年12月から1995年1月までと1995年11月から1996年1月までには両者は急激に減少していた。これらの期間に減少したNとPの比はそれぞれ18.1, 12.3となり,これらはレッドフィールド比の16に近い値であった。このことより減少したNとPは水柱内の植物プランクトン以外の藻類によって消費された可能性が考えられる。冬季に見られるNとPの減少についてはこの時期に増殖させ収穫が行われる海苔,あるいは透明度が高くなる冬季に (Fig. 3) 光合成が活発になると予想される底生藻類による栄養塩の消費等が考えられた。また,水柱内のNとPの増加の要因としては養殖場における投餌や堆積物表層からの栄養塩の溶出の影響が予想される。なお, NとPの濃度増加の際に塩分の低下が見られないこと, および増加が毎年周期的に見られることより河川を通しての流入の影響は少ないものと考えられる。今後, 表層堆積物からのNやPの溶出, あるいは海苔等の養殖産物も含めたN及びPの収支の見積もりが必要であると考えられる。

#### 4-2 従属栄養細菌の変動

調査期間内の水柱平均細菌密度は $0.49 \sim 2.2 \times 10^6$  cells/ml の範囲を変動しており, その変動傾向は水温の変動と良く似ていた (Fig. 7)。一般に海水中の従属栄養細菌密度は冬季に少なく, 春から秋の間には比較的高いレベルで推移するとされており, このような変動傾向は一次生産量の動向と関係していると考えられている (木暮1985)<sup>(8)</sup>。van Es and Meyer-Reil (1982)<sup>(9)</sup>は, 様々な海域の海水中の細菌密度についての報告をとりまとめ, 河口域で $5 \times 10^6$  cells/ml 以上, 沿岸域で $1 \sim 5 \times 10^6$

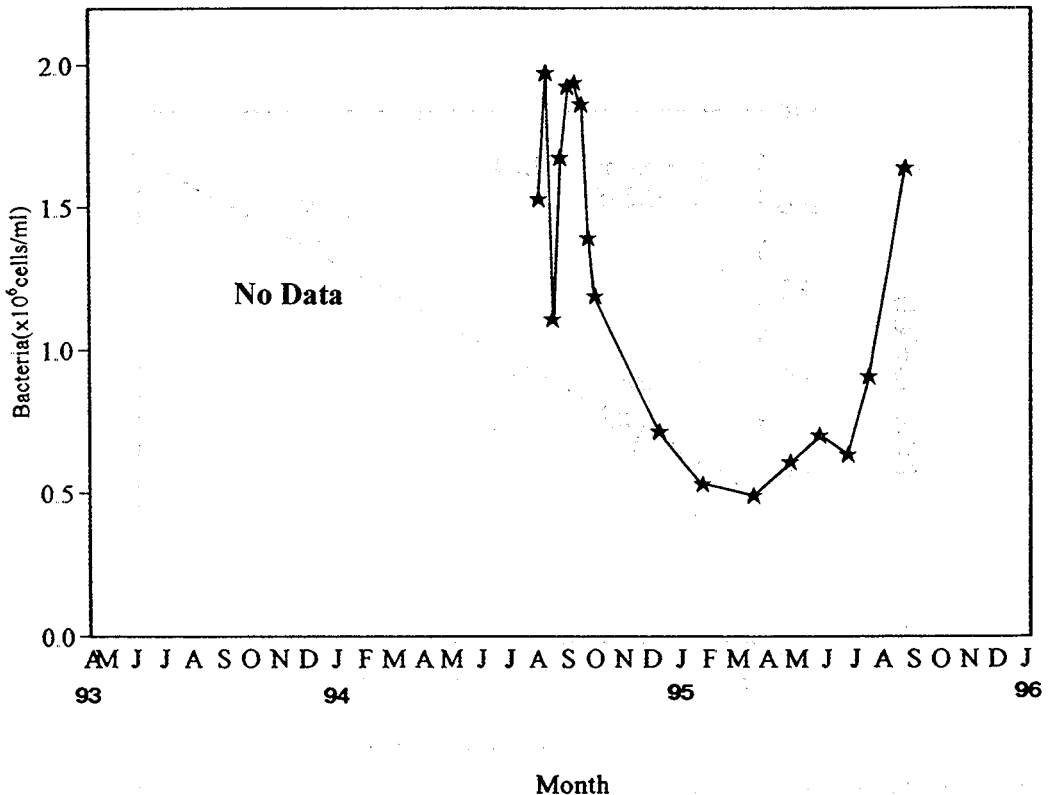


Fig. 7 Seasonal variations of average density of bacteria in the water column.

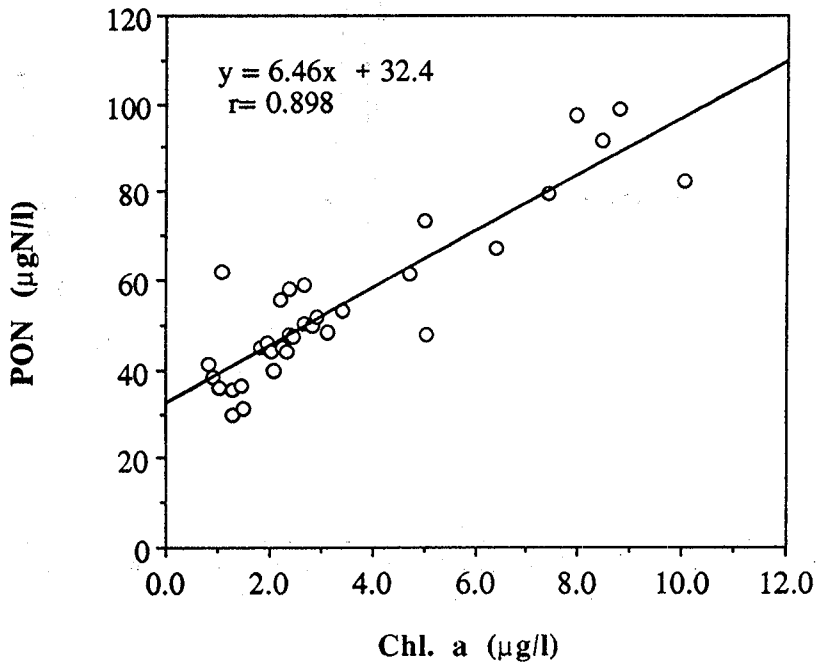
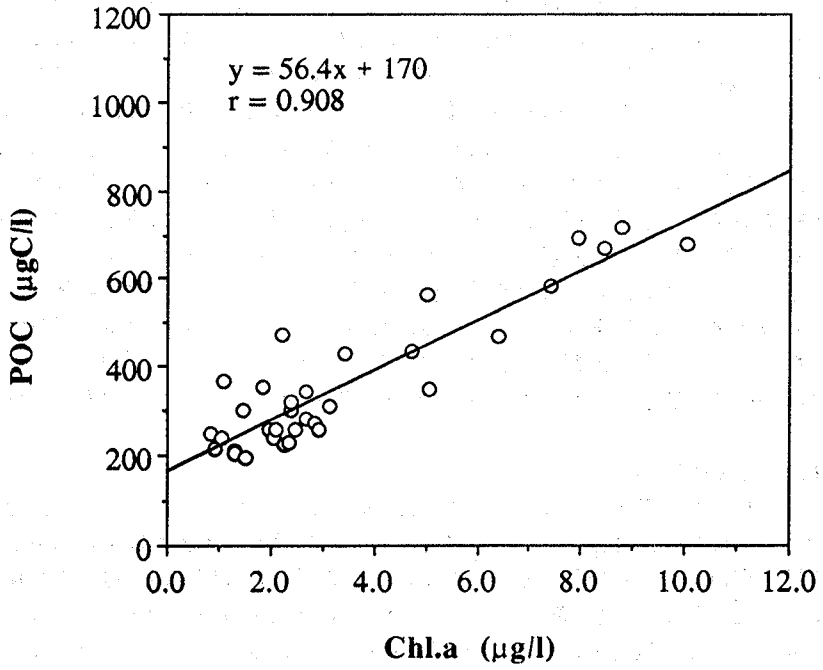


Fig. 8 Relationships between chlorophyll a concentration and particulate organic carbon (Top) and particulate organic nitrogen (Bottom).

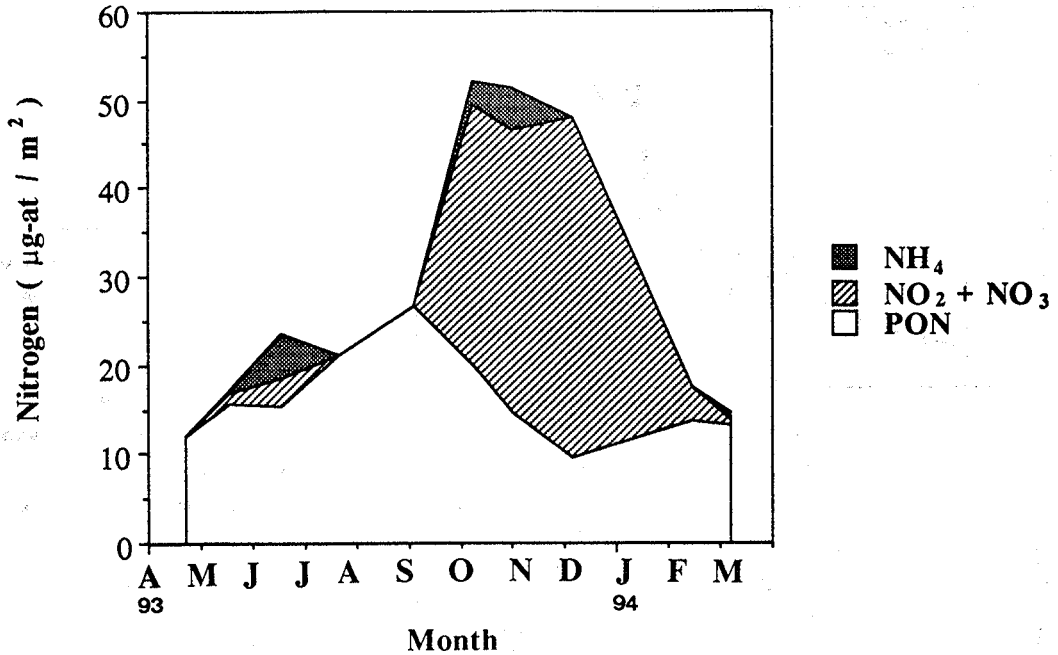


Fig. 9 The changes of the standing stock of ammonia, nitrate+nitrite and particulate organic nitrogen in the water column.

cells/ml, 沖合い域では $0.5 \sim 1 \times 10^6$  cells/ml であるとしている。今回、志度湾において得られた結果はこの van Es and Meyer-Reil の値と比べると、水温の高い8月から9月には沿岸域の範囲に入るものの、それ以外の時期ではこの範囲以下の値であった。一方、多田ら(1995)<sup>(10)</sup>が瀬戸内海の全域を四季にわたって調査したところ、表層水中の細菌密度は $0.32 \sim 3.4 \times 10^6$  cells/ml の範囲であり、志度湾の細菌密度の変動範囲はこれとよく一致している。また、今井(1984)<sup>(11)</sup>は周防灘で $0.45 \sim 3.0 \times 10^6$  cells/ml, Iwamoto ら(1993)<sup>(12)</sup>は広島湾において $1.2 \sim 4.3 \times 10^6$  cells/ml と報告している。これらの瀬戸内海についての報告と今回得られた結果を考え合わせると、温帯域における沿岸域の細菌密度としては $0.3 \sim 4 \times 10^6$  cells/ml 程度と考えられる。

従来から考えられている食物連鎖において、細菌は有機物分解者として位置づけられていたが、近年細菌が溶存有機物を摂取して自らが増殖することにより、粒状有機物の生産を行う役割も果たしていることが明らかにされてきた。この細菌が利用する溶存有機物は主に植物プランクトンにより排出されると考えられており (Azam ら1983)<sup>(13)</sup>、植物プランクトン量と細菌量の間には正の相関関係が見られることが推測される (Cole ら1988)<sup>(14)</sup>。実際に瀬戸内海においても、広島湾や大阪湾においても両者の間には良い相関関係が得られている (多田ら未発表)。しかし、Fig. 10に示したように、志度湾においては水温と細菌密度の間には良い相関関係が見られるものの、クロロフィル a 濃度と細菌密度の間には良い相関関係は認められなかった。一方、従属栄養細菌の比増殖率は観測期間内で、 $0.04 \sim 0.11 \text{ h}^{-1}$  の範囲を変動しており、比増殖率は、水温の上昇に伴い増加する傾向は見られるものの両者の間には良い相関関係は認められなかった (Fig. 11)。水温が上昇すると細菌密度は増加する傾向にある (Fig. 10) にもかかわらず、比増殖率は水温に強く存在していないことから海洋細菌が水温以外の環境要因によっても大きく影響を受け、更に海域によってその要因も異なるものと考えられた。今後、Microbial Loop の出発点である細菌の増殖の段階を明らかにする

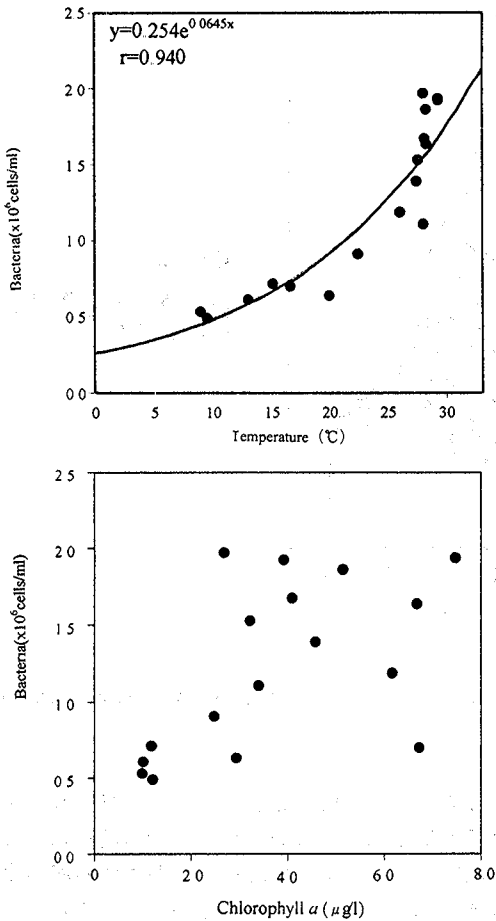


Fig. 10 Relationships between density of bacteria and temperature (Top) and chlorophyll a concentration (Bottom).

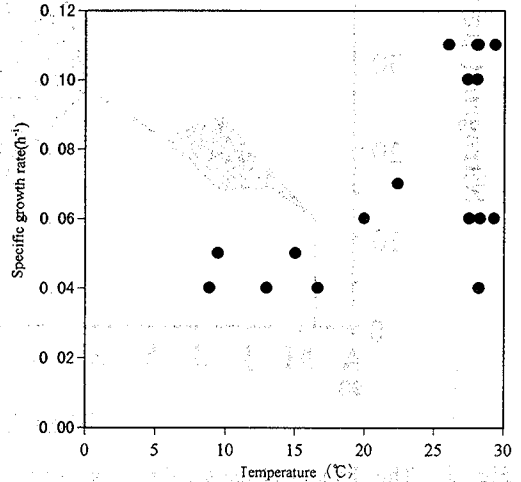


Fig. 11 Relationships between specific growth rate of bacteria and temperature.

ためには、植物プランクトン量と細菌密度を比較するだけでなく、植物プランクトンの生産速度と従属栄養細菌の増殖速度との関係を調べる事も必要であると考えられる。

## 要 約

香川県東部に位置する志度湾において、化学的環境および植物プランクトンと従属栄養細菌の生物量の変動について、約3年間に渡って調査を行った。その結果、志度湾では水深が浅く水柱全体が有光層であり、また年間を通して鉛直混合が卓越していた。

水柱内の植物プランクトンの指標であるクロロフィルa濃度は0.7~8.8 μg/lの範囲で変動し、夏から秋にかけて高い値となることが多く、冬季に2 μg/l以下となっていた。一方、溶存無機三態窒素(DIN)の水柱内積算量の変動は、懸濁態有機窒素(PON)の積算量の増減よりも大きかった。この事は、植物プランクトンの増殖や分解に伴う栄養塩の取り込みや再生以外のDINの消費と負荷があることを示している。水柱内のDIN増加の要因としては養殖場における投餌や底質からの

溶出が、また DIN 減少の要因としては養殖海苔や底生藻類による栄養塩の取り込みの影響が予想された。

さらに Microbial Loop の出発点である従属栄養細菌については、細菌密度と水温との間に強い相関関係を示すものの、比増殖率と水温との間には強い相関関係が見られず、その基質となる溶存有機物を排泄するとされている植物プランクトン量との間にも良い相関関係が認められなかった。このことから、海洋細菌の増殖が水温や、植物プランクトン量以外の要因によっても影響を受けていることが考えられた。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり貴重なご意見を賜った本学部、越智 正教授、門谷 茂教授に心から感謝いたします。また調査実験に御助力頂いた松本幸二、川西幹昌、宇佐純治（農学士・香川大学）の諸氏に深く感謝いたします。

また試料採取にご協力頂いた本学部附属浅海域環境実験実習施設の浜垣孝司技官に心から感謝いたします。

最後に貴重な議論をしてくださった本学部海洋生化学研究室、海洋資源化学研究室内の諸氏に深く感謝いたします。

## 引用文献

- (1) 今井一郎：沿岸域における微生物の生態。沿岸海洋研究ノート, 27, 85-100. (1989).
- (2) Suzuki, R. and Ishimaru, T.: An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N, N-Dimethylformamide. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 46, 190-194. (1990).
- (3) Parsons, I. R., Maita, Y. and Lalli, G. M.: *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. 173pp. Pergomon Press, Oxford (1984).
- (4) Strickland, J. D. H. and Parsons, T. R.: *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. 311 pp. Fish. Res. Bd. Canada, Bull. 167, Ottawa. (1972).
- (5) 木暮一啓：全菌数計数法。沿岸環境調査マニュアルⅡ〔水質・微生物編〕(日本海洋学会編), 269-272. 恒星社厚生閣, 東京 (1990).
- (6) Parsons, T. R., Takahashi, M. and Hargrave, B.: *Biological Oceanographic Processes* 330 pp. Pergomon Press, Oxford (1984).
- (7) 高松地方気象台：香川県気象月報 (1993, 1994, 1995).
- (8) 木暮一啓：水の生態系。微生物生態学Ⅱ—生態系の中の微生物—(清水 潮編), 40-90. 共立出版 (1985).
- (9) van Es, F. B. and Meyer-Reil, L. A.: Biomass and metabolic activity of heterotrophic marine bacteria, In Marshall, K. C. (ed), *Advance in Microbial Ecology*, 6, 111-170. Plenum Press, New York (1982).
- (10) 多田邦尚・茂中浩司・森下政和・多田充利：瀬戸内海における細菌密度の分布。1995年度日本海洋学会春季大会公演要旨集364-365. 東京 (1995).
- (11) 今井一郎：周防灘における海洋細菌の粒子径組成と現存量。南西水研報, 17, 183-196. (1984).
- (12) Iwamoto, N., Imai, I. and Uye, S.: Seasonal fluctuation in abundance of bacteria, heterotrophic nanoflagellates and nanodiatoms in Hiroshima Bay, the Inland Sea of Japan. *Bull. Plankton Soc. Japan*, 41, 31-44. (1994).
- (13) Azam, F., Fenchel, T., Field, J. G., Gray, J. S., Meyer-Reil, L. A. and Thingstad, F.: The ecological role of water column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 10, 257-263. (1983).
- (14) Cole, J. J., Findlay, S. and Pace, M. L.: Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: a cross-system overview. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 43, 1-10. (1988).

(1996年11月29日受理)