

— 論文 —

富栄養型内湾の東京湾における 従属栄養性細菌密度の時空間分布*

野村 英明[†]・石戸 義人[‡]・石丸 隆^{**}・村野 正昭^{**}

要 旨

1993年1月から1995年5月までの期間にわたって、富栄養化した内湾の典型である東京湾の多摩川河口沖の観測点 Sta. A と湾中央部の観測点 Sta. T4 において、毎月各層採水して、細菌密度の時空間変動を調査研究した。表層細菌密度 (cells ml⁻¹) は、測点 A では $0.7 \times 10^6 \sim 9.9 \times 10^6$ (平均: 4.1×10^6)、測点 T4 では $0.8 \times 10^6 \sim 9.6 \times 10^6$ (平均: 3.5×10^6) でそれぞれ変動した。最高細菌密度は、共に水深 5 m で観察された (1993年9月に Sta. A ; 11.1×10^6 , 1994年9月に Sta. T4 ; 10.5×10^6)。細菌密度は冬季に安定して低く、水温が上昇すると変動幅の増大を伴いつつ上昇した。東京湾では周年にわたり細菌群集の増殖を基質濃度は律速せず、その細菌密度は冬季には主に水温によって制御されていた。細菌密度は、時空間的に観測点間の差がほとんどなく、少なくとも東京湾中央部海域においては、細菌の生息環境は均一化していたと考えられる。

キーワード：細菌，季節的消長，富栄養化，東京湾

1. 緒 言

水圏生態系における従属栄養性細菌 (以後、細菌) は、有機物を無機化する主要な分解者である。細菌が分解者として果たす役割は水圏の富栄養化が進行するにつれて益々重要となる。そして、富栄養化が富栄養型の極相 (hypereutrophication) に達した生態系 (Hutchinson, 1969) においては、その役割は独占的なレベルに達する (Seki, 1992)。同時に、細菌は溶存態有機物を基質として利用し増殖することで、溶存態有機物を補食に堪える大きいサイズの粒子に作り変えることから、エナジー フローの起点となる生産者の役割も担っている

(Parsons and Seki, 1970; Pomeroy, 1974; Seki, 2000)。その生息密度は、環境に存在する利用可能な基質の多寡と細菌捕食生物やバクテリオファージによる除去のバランスで決まる (Ducklow and Shiah, 1993; Seki, 2000; Pernthaler, 2005)。基質濃度が上昇すれば、細菌密度は上昇する。ただし、それとともに除去圧も高まるので、ほとんどの海域で細菌密度は $10^5 \sim 10^6$ cells ml⁻¹ である (Seki, 1986; Sanders *et al.*, 1992; Fuhrman and Noble 1995)。

東京湾は日本で最も早くから有機汚濁の進行した内湾である。夏季の湾奥部では有機物の豊富な底質の生分解が進行するため、底層は無酸素化することが深刻な環境問題となっている。海底の無酸素化は、その海域から好気性底生生物を排除するとともに (Seki, 1991; 風呂田, 1991)、底質からリンの溶質を促し、水柱に解放することで、高い内部生産を維持する役割を果たし

* 2006年12月7日受領；2007年3月24日受理
著作権：日本海洋学会，2007

[†] 東京大学海洋研究所 〒164-8639 東京都中野区南台 1-15-1
主著者 e-mail address : nmr@ori.u-tokyo.ac.jp

[‡] 青森県農林水産部 〒030-8570 青森県青森市長島 1-1-1

^{**} 東京海洋大学 〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7

ている(鈴木ら, 2003; 松村ら, 2004)。東京湾の有機汚濁レベルは高い状況にある。東京湾の細菌数は海域の富栄養化レベルの上昇とともに上昇したとされ (Taga and Kobori, 1978), 富栄養化の進行した生態系における微生物の働きは増大していると考えられる。

東京湾における細菌生態学の研究は, 1970年代に蓄積がある (Seki, 1973a; Seki *et al.*, 1974a, b; Terada *et al.*, 1974 など)。Terada *et al.* (1974) と Seki *et al.* (1975) は, それぞれ夏季における東京湾の細菌密度の水平分布と鉛直分布を初めて実測した。彼らの細菌測定値は主に細菌計算板 (Petroff-Hauser bacterial counting chamber) を用いたため, 現在の核酸染色法による全菌数の計数の場合とは異なり, 細菌密度の計数信頼性は研究者の経験によって多少異なる可能性はある。しかし, Seki (1973a) は細菌計算板による計数の信頼性をアメリカ微生物学会の推奨している Kinyoun's carbon fuchsin を用いた生体染色によって随時確かめていた。そのうえ, 高濃度な栄養環境で生息する細菌群を測定する培養法に依存した計数方法に比べれば, 現実的な, 天然細菌群集を評価しており, 当時の天然細菌群集密度や分布を知る重要な手がかりとなっている。1970年代後半からは, 特定の分類群や菌種, あるいは石油成分分解細菌などの生理機能群に着目した研究が行われた (Seki, 1973b; Simidu *et al.*, 1977, 1987; Nair *et al.*, 1985; 山根ら, 1993; Kimata *et al.*, 2003)。その中で Kogure *et al.* (1980) は, 夏季に東京湾から浦賀水道にかけての細菌密度の鉛直断面を, 核酸染色法によって初めて記録した。しかし, Kogure *et al.* (1980) 以後, 同じく夏季に東京湾表層の細菌分布を調べた鈴木・小川 (2001) を除けば, 生態学的情報として基本である全菌数の時空間分布を調査した研究は, 近年見あたらない。そこで本研究では, 富栄養化の著しい東京湾の中央部の2観測点において, 細菌の細胞密度の時空間分布を追求した。

2. 方法

観測は, 東京水産大学所属研究練習船“青鷹丸”あるいは実習艇“ひよどり”により, 毎月1回昼間, 多摩川河口沖の観測点 Sta. A (水深約 23 m, 35°30'30"N,

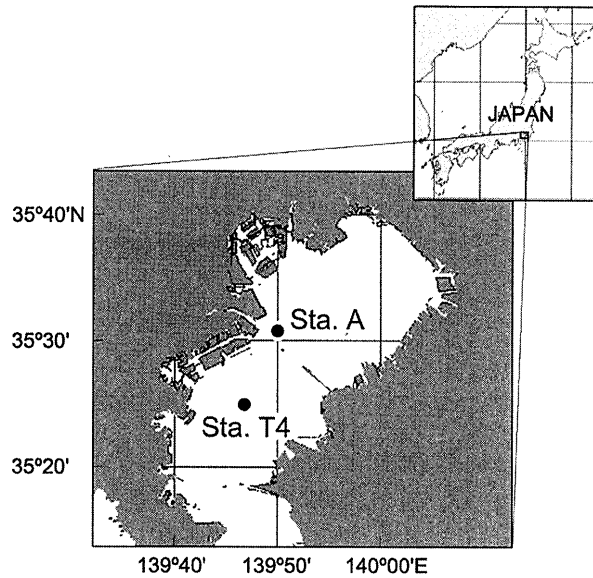


Fig. 1. Sampling stations in Tokyo Bay, Japan.

139°50'00"E) と木更津沖の観測点 Sta. T4 (水深約 27 m, 35°25'00"N, 139°48'00"E) において行なった (Fig. 1)。調査期間は 1993 年 1 月から 1995 年 5 月である。Sta. A においては表層から 20 m まで, Sta. T4 では 25 m まで, van Dorn 採水器を用いて 5 m 間隔で採水した。採水した海水 100 ml にグルタルアルデヒド (25% 溶液, 電子顕微鏡級) を最終濃度 1% になるように加え固定し, 冷暗所に保存して実験室へ持ち帰った。

試水の一部を分取し, DAPI (4'-diamidino-2-phenylindole) により細菌細胞の核酸を染色した後 (Porter and Feig, 1980), 濾過器の上にバックアップフィルターとして Millipore HA フィルター (孔径 0.45 μm) をのせた上に予め Sudan Black B で染色した Nuclepore フィルター (孔径 0.2 μm) を重ね, 約 -18 kPa の圧力で吸引して, Nuclepore フィルター上に試水中の細菌を捕集した。検鏡用のスライド試料は, フィルターを Olympus 社製無蛍光イマルジョンオイルで封入し, 作成した。細菌の計数は, Nikon 社製落射蛍光顕微鏡を用い, 紫外線励起光下で行なった。計数作業は採集後 1 週間以内に行なった。

DAPI 染色法では, 計数値が実際の菌数と比べ平均 30% の過小評価となるとされていること (Suzuki *et al.*, 1993) を考慮して, 本研究では過小評価分を加算した

計算値を細菌密度として用いることにした。細菌群集密度から炭素・窒素生物量への換算は、 $30.2 \text{ fgC cell}^{-1}$ と $5.8 \text{ fgN cell}^{-1}$ を用いた (Fukuda *et al.*, 1998)。

観測時にはCTDを用いて水温・塩分を測定した。また、クロロフィル色素は、各層で採取した海水40 mlをガラス濾紙 (Whatman GF/F) で濾過した後、N, N-dimethylformamide で抽出し、測定まで暗所で冷凍保存 (-20°C) した。このクロロフィル試料を蛍光光度計 (Turner Designs type 10R) で測定し、クロロフィル色素濃度を算出した (Suzuki and Ishimaru, 1990)。

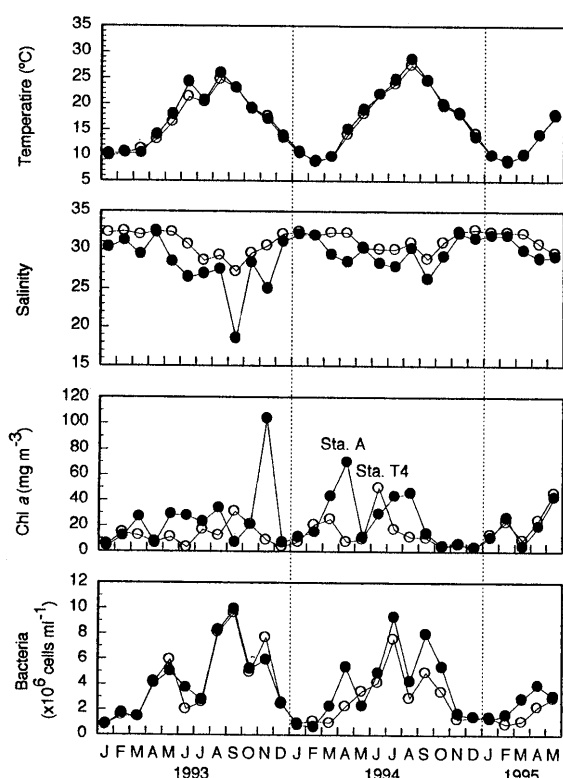


Fig. 2. Temporal variations in temperature, salinity, chlorophyll *a* concentration (Chl *a*) and bacterial abundance in the surface layer of Tokyo Bay from January 1993 to May 1995.

3. 結果

3.1. 海表層における水温・塩分・クロロフィル *a* 濃度・細菌密度の季節変動

海表層あるいは海表面における水温・塩分・クロロフィル *a* 濃度・細菌密度の季節変動を Fig. 2 に示す。表層 (1 m 層) における水温 ($^{\circ}\text{C}$) は、Sta. A では $8.8 \sim 28.7$, Sta. T4 では $8.7 \sim 27.5$ で変動した。年平均表層水温はそれぞれ 17.5 , 17.2 であった。水温は冬季2月 (1993年は1月) に低く、夏季8月に高かった。

表層における塩分は Sta. A では $18.49 \sim 32.23$, Sta. T4 では $27.20 \sim 32.68$ で変動した。年平均表層塩分はそれぞれ 28.88 , 30.96 となり、多摩川河口沖の測点で低かった。塩分は水温とは逆に、梅雨や台風による淡水流入の頻度が高い夏季を中心に低くなり、冬季に高かった。

表面 (0 m 層) におけるクロロフィル *a* 濃度 (Chl *a*, 単位は mg m^{-3}) は、Sta. A では $3.2 \sim 103.6$, Sta. T4 では $3.0 \sim 50.1$ で変動し、両観測点とも 3.0 を下回ることはなかった (年平均表面 Chl *a* はそれぞれ 24.6 , 14.9)。Chl *a* の変動は周年を通じて大きかったが、大まかには晩秋から初冬 (12月, 1月) に低く、春季から夏季 (4月~9月) に高い傾向を示した。1993年11月のSta. A における値が高い時、未固定海水を観察したところ植物プランクトン群集は、*Heterosigma akashiwo* を主体に構成されていた。この時5 m 層の Chl *a* は 259.1 に達していた。

表面における細菌密度 (cells ml^{-1}) は、Sta. A では $0.66 \times 10^6 \sim 9.90 \times 10^6$, Sta. T4 では $0.79 \times 10^6 \sim 9.60 \times 10^6$ で変動した (年平均はそれぞれ 4.08×10^6 , 3.50×10^6)。細菌密度は観測ごとに変動したが、大まかには冬季 (1月~3月) に低く、夏季 (7月~9月) に高かった。また、細菌密度の変動様式および密度は、両観測点に大きな違いは見られず類似の傾向を示した。

0-5 m 層における細菌密度と水温、細菌密度と Chl *a* の関係を Fig. 3 に示す。細菌密度は、 10°C 以下で $10^6 \text{ cells ml}^{-1}$ を切ることが多く、低かった。水温が 13°C 以上になると、細菌密度は $10^6 \text{ cells ml}^{-1}$ 以上と高くなり、広く分散した。最小自乗法によって相関を見たところ、水温が上昇するにつれ、細菌密度が上昇する

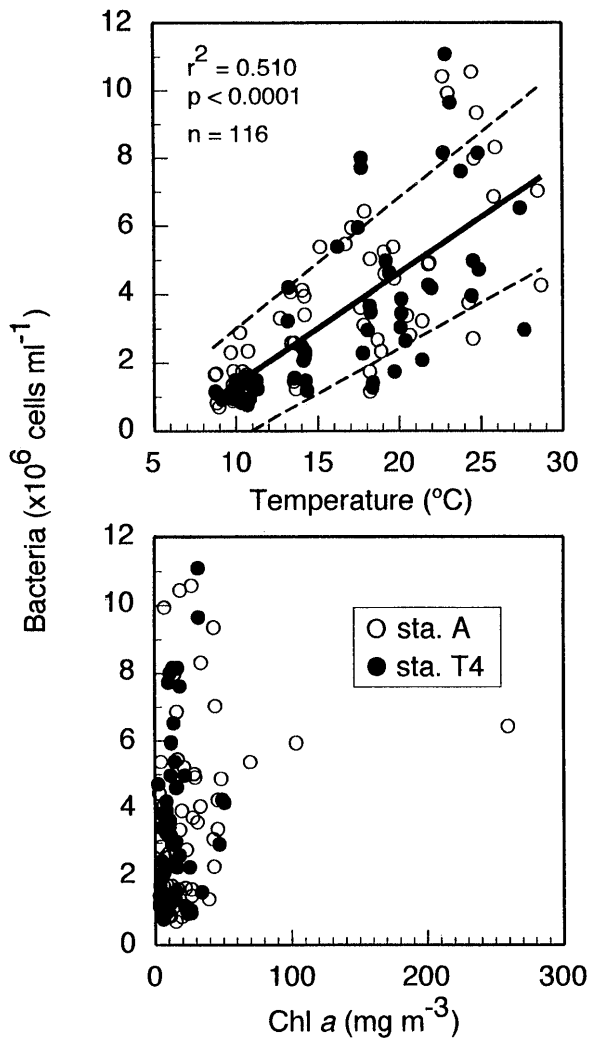


Fig. 3. Relationships between bacterial abundance and temperature (upper), bacterial abundance and chlorophyll *a* concentration (Chl *a*; lower) in the surface layer of Tokyo Bay during the study period. Solid lines represent the least squares regression line and dashed lines the 95% confidence limits (upper figure).

傾向にあった。細菌密度と Chl *a* の間には明瞭な関係は見いだされなかった。

3.2. 水温・塩分・Chl *a*・細菌密度の時空間分布

Sta. A および Sta. T4 における水温・塩分・細菌の時空間分布を、それぞれ、Fig. 4 と Fig. 5 に示す。水

温は冬季を除き、表層で高く、底層で低かった。年平均で 20 m 水温は、Sta. A で 15.8, Sta. T4 で 16.1 $^{\circ}\text{C}$ であった。季節的にみると表層との差 (1 m と 20 m の差) は夏季に大きく、例えば 1994 年 8 月では Sta. A, Sta. T4 それぞれで 9.0 と 7.8 $^{\circ}$ の差が見られた。一方、春季と秋季には上下層の温度差があまり生じなかった。一般に、鉛直混合の進む冬季の内湾では、上下層の差がなくなるといわれるが、本調査海域では上下層で水温の逆転が生じ、表層で低く、底層で高くなる。そのため冬季でも弱い躍層が維持されるため、上下層に水温差が観察された。

塩分は表層で低く底層で高かった。底層 (20 m) の塩分は季節的に変化が小さく、Sta. A では 32.17~34.14, Sta. T4 では 32.19~33.95 で、年平均はそれぞれ 33.34 と 33.18 であった。上下層の塩分差は、周年、解消することはなかった。しかし、冬季には差が 1 以下になることが、特に Sta. T4 では観察された。

Chl *a* (mg m^{-3}) は、上部混合層に濃密に分布し、最低は Sta. A では 1993 年 8 月に、Sta. T4 では同年 12 月に観測され、ともに 0.5 であった。全層での年平均は、Sta. A と Sta. T4 でそれぞれ 16.2 と 8.9 であった。年平均での水柱あたり Chl *a* (mg m^{-2}) は、Sta. A と Sta. T4 でそれぞれ 323 と 223 であった。冬季 (1 月~3 月) と夏季 (7 月~9 月) の Chl *a* は、Sta. A では 277 と 241, Sta. T4 では 286 と 172 となり、冬季の方が水柱あたり Chl *a* は多いものの、夏季との違いは 2 倍に満たなかった。水柱あたり Chl *a* が冬季に高い理由は、Chl *a* が夏季に表層付近では高濃度なものの、躍層以深では急激に減衰するのに対し、冬季の厚くなった上部混合層内に低濃度ながら広く Chl *a* が分布するためである。

細菌の細胞密度 (cells ml^{-1}) は春季から夏季の 10 m 以浅で高く、秋季から冬季には上下層での差が小さくなる傾向を示した。鉛直方向を含めた細菌の細胞密度の変動幅は、Sta. A では $0.61 \times 10^6 \sim 10.53 \times 10^6$, Sta. T4 では $0.40 \times 10^6 \sim 11.05 \times 10^6$ で変動した。鉛直的には各観測時の観測点における最高出現密度が観察される水深は必ずしも 0 m ではなかった。例えば、全調査期間を通じた最高密度は、Sta. A では 1994 年 7 月、Sta. T4 では 1993 年 9 月の共に 5 m 層で記録された。また、1994

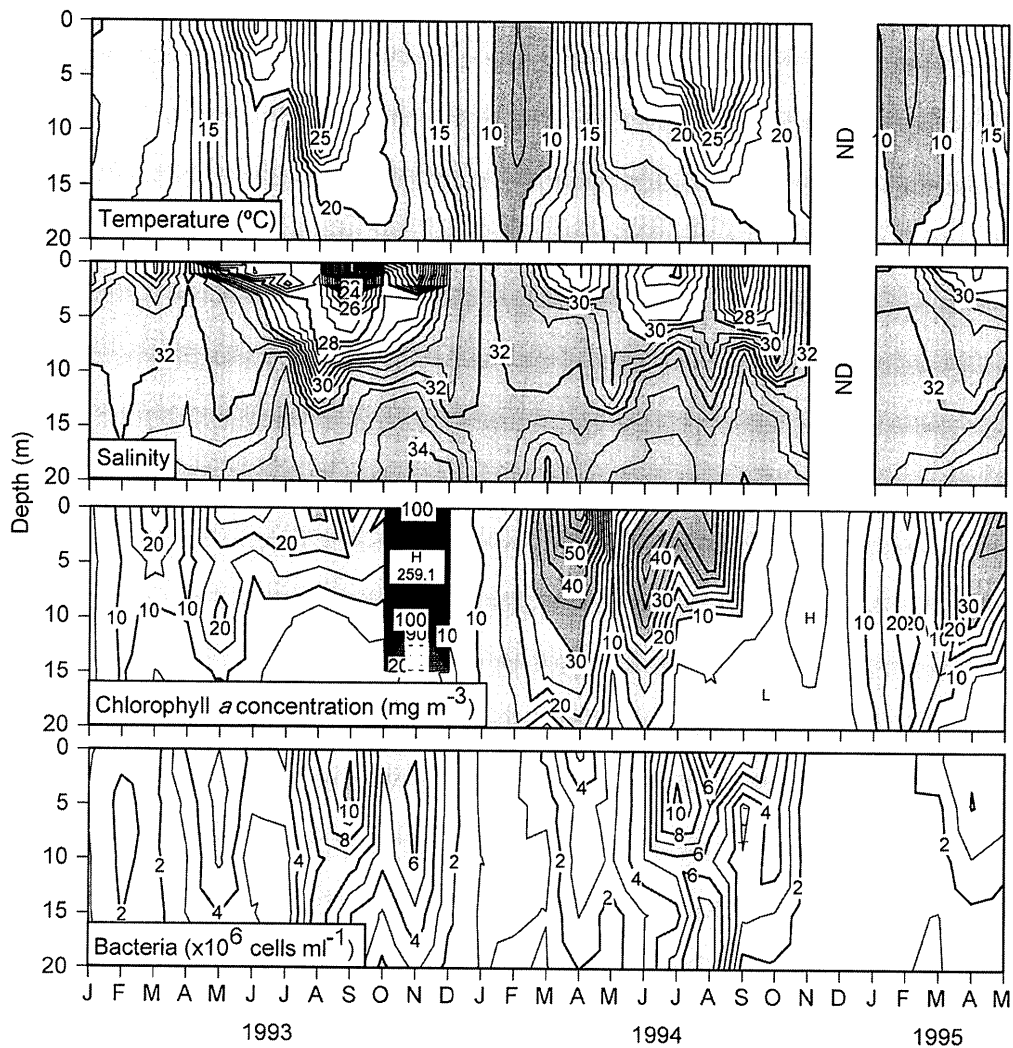


Fig. 4. Temporal and spatial variations in temperature, salinity, chlorophyll *a* concentration and bacterial abundance at Sta. A in Tokyo Bay from January 1993 to May 1995. ND: no data.

年8月のSta. A (7.80×10^6)や、同年3月のSta. T4 (1.14×10^6)のように、採水最深層でその測点の最高値がえられる場合もあった。

細菌の分布極大が中層や深層で観察されたように、細菌密度の上下層の差は周年通じて小さかった。例えば、全期間を通して各層でえられた平均密度を最も高い表層と最も低い採水最深層において、Sta. Aでは 4.08×10^6 に対し 2.45×10^6 、Sta. T4では 3.50×10^6 に対し 1.96×10^6 と、その差は2倍に満たなかった。全ての水深を平均した水柱平均細菌密度は、Sta. Aで 3.26×10^6 、Sta. T4で 2.69×10^6 であった。

細菌密度から算出した生物量を Fig. 6 に示す。水深が異なるため単位面積当たり (g m^{-2}) で表した。Sta. Aにおける炭素と窒素生物量は、 $0.62 \sim 5.08$ と $0.12 \sim 0.98$ で変動し、年平均はそれぞれ 2.36 と 0.45 であった。同様に Sta. T4 では、 $0.53 \sim 4.78$ と $0.10 \sim 0.92$ で変動し、年平均はそれぞれ 2.09 と 0.40 であった。生物量の高い夏季(7月~9月)における細菌生物量は、Sta. A と Sta. T4 で平均炭素量がそれぞれ 4.02 と 3.47、平均窒素量がそれぞれ 0.77 と 0.67 であり、深度は異なるものの、測点間に大きな隔たりは認められなかった。

Table 1. Bacterial abundance and estimated biomass from various enclosed environments along the temperate coast of Japan.

Research site	Sampling period	Abundance			Biomass			Ref.	
		Surface layer	Water column		Water column				
		($\times 10^6$ cells ml $^{-1}$)	(mgC m $^{-3}$)	(gC m $^{-2}$)	(mgN m $^{-3}$)	(mgN m $^{-2}$)			
Tokyo Bay	Jan 1993~ May 1995	0.66-9.90 [4.08]	0.61-10.53 [3.26]	18.5-318.1 [98.5]	0.62-5.08 [2.36]	3.6-61.1 [18.9]	119.3-975.2 [453.9]	1)	
Sta. T4	Jan 1993~ May 1995	0.79-9.60 [3.50]	0.40-11.05 [2.69]	10.1-276.2 [80.3]	0.53-4.78 [2.09]	2.3-64.1 [15.4]	102.4-918.0 [401.0]	1)	
Inner area	Aug 1974	3.20-150.00						2)	
	Jul 1974	48.00	1.30-48.00 [22.10]	39.3-1449.6 [667.4]#1	[6.67]#1	7.5-278.4 [128.2]#1	[1281.8]#1	3)	
Whole area	Jul~Aug 1978	30.00	4.70-7.80 [6.34]	4.20-7.27 [5.48]	126.8-218.5 [165.6]#1	2.14-3.10 [2.55]#1	24.4-42.2 [31.8]#1	411.8-594.5 [489.1]#1	4)
	Aug 1996	7.50-12.00						5)	
Uraga Channel	Jul~Aug 1978	1.50	1.40	42.3#1	1.06#1	8.12#1	203.0#1	6)	
Seto Inland Sea Whole area	Mar, Jun, Sep 1995, Sep 1996	0.40-2.20 [0.90]						7)	
	Oct 1993, Jan, Apr, Jun 1993	0.32-3.40 [1.0]						8)	
Suo-nada	Mar 1983		0.4-2.2 [1.4]	3.2-17.4 [11.2]	0.08-0.41#2 [0.03]#2			9)	
	Mar, Jul, Oct 1982		0.45-3.03 [1.36]	3.8-25.5 [11.53]	0.20-0.23			10)	
off Ie-Island	Jul, Aug 1992		1.1-2.7	33.2-81.54 #1	0.70-1.71 #1,3	6.4-15.7 #1	134.0-328.9 #1,3	11)	
Hiroshima Bay	Jul 1990~Jul 1991		1.01-4.89	11.9-57.5	0.10-0.46#4			12)	
	Jul~Aug 1990	1.36-4.30 [2.74]	1.16-4.30 [2.40]	[28.0]	[0.22]#4			13)	
	Mar 1984~ Sep 1985	0.9-4.8#5 [2.1]		12.2-65.0 [27.0]				14)	
Osaka Bay	Sep, Dec 1984, Mar, Jun 1985		0.40-5.08 [1.44]	2.3-37.8 [9.4]	0.04-0.93 [0.28]			15)	
Ise Bay	Feb 1995		[0.64]	[19.3]#1	[0.35]#1,6	[3.7]#1	[66.8]#1,6	16)	
	Jul 1996		[0.83]	[25.1]#1	[0.45]#1,6	[4.8]#1	[86.7]#1,6	16)	
Dokai Bay	Apr 1996~ Apr 1997	0.6-4.4 [2.1]						17)	
Uranouchi Bay	Apr~Dec 1991	1.2-11.0 [4.3]						18)	
Onagawa Bay	Jul 1994	0.8-3.9	0.5-3.0	15.1-90.6 #1	0.09-0.54 #1,7	2.9-17.4 #1	17.4-104.4 #1,7	19)	
	Dec 1993~ Mar 1995	0.4-4.0						20)	

[value] = mean

#1: estimation by Fukuda *et al.* (1998) #2: averaged depth = 23.7 m from Montani (1996) #3: the depth = 21 m#4: the depth = 8 m from Tada *et al.* (1998) #5: Sampling layer = 2 m #6: the depth = 18 m #7: the depth = 6 m

References: 1) This study, 2) Terada *et al.* (1974), 3) Seki *et al.* (1975), 4) Kogure *et al.* (1980), 5) Suzumura and Ogawa (2001), 6) Kogure *et al.* (1980), 7) Naganuma and Miura (1997), 8) Tada *et al.* (1998), 9) Imai and Itoh (1984), 10) Imai (1984), 11) Nakamura *et al.* (1994), 12) Iwamoto *et al.* (1994), 13) Iwamoto *et al.* (1993), 14) Imai and Yamaguchi (1996), 15) Imai and Yamaguchi (1997), 16) Naganuma (1997), 17) Tada *et al.* (2002), 18) Fukami *et al.* (1996), 19) Tanaka and Taniguchi (1996), 20) Tanaka *et al.* (1997)

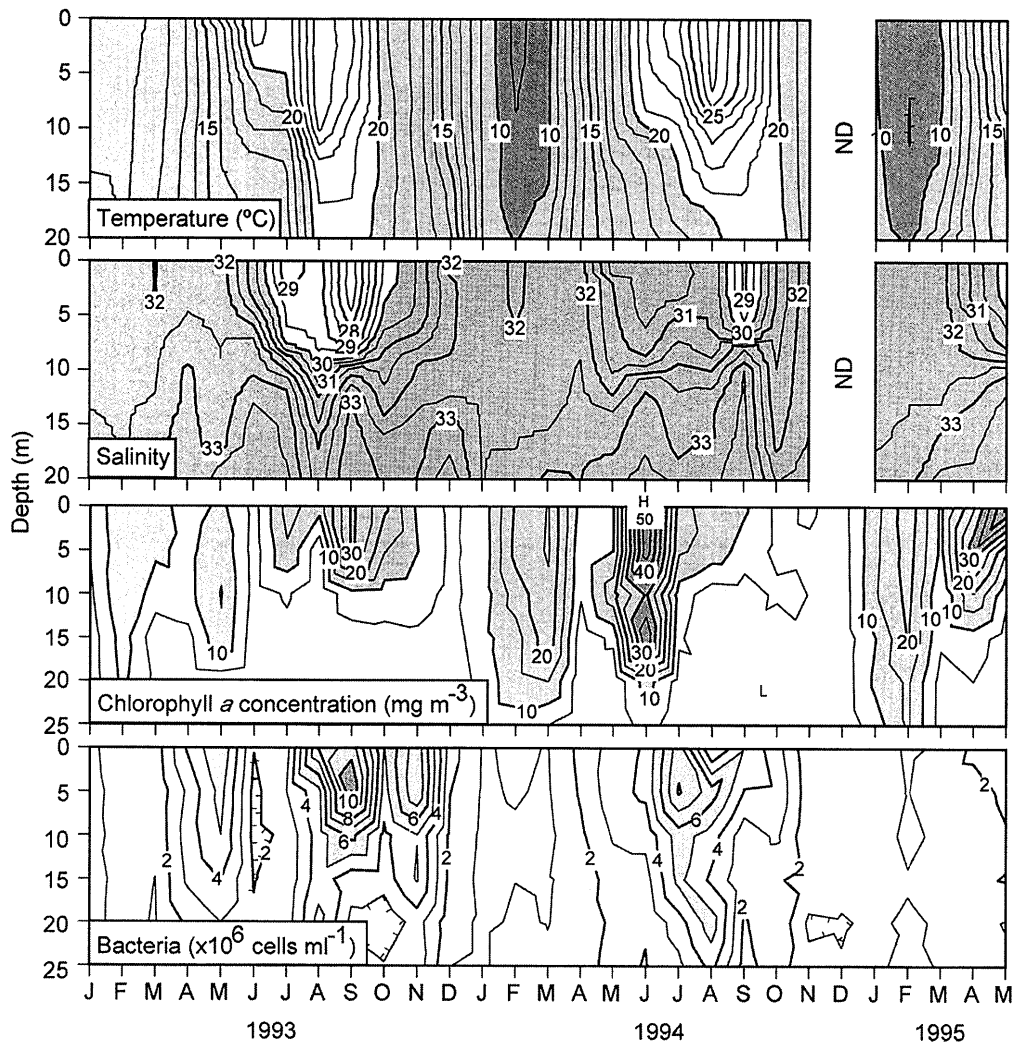


Fig. 5. Temporal and spatial variations in temperature, salinity, chlorophyll *a* concentration and bacterial abundance at Sta. T4 in Tokyo Bay from January 1993 to May 1995. ND: no data.

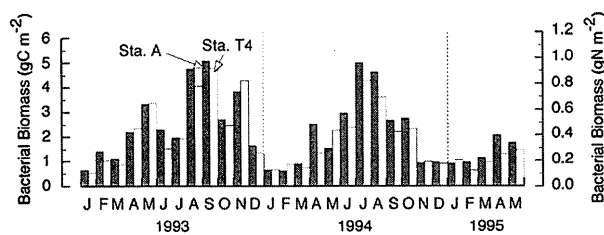


Fig. 6. Seasonal variation in biomass of bacteria in Tokyo Bay from January 1993 to May 1995.

4. 考察

細菌密度を左右する要因は、利用可能な基質である溶存有機物の量、ナノ鞭毛虫やバクテリオファージによる除去、水温が知られている (Kirchman, 2000)。細菌は植物プランクトン由来の溶存態有機物を利用するため、様々な水域で細菌密度と植物プランクトン生物量 (クロロフィル濃度, Chl *a*) との間に正の相関がみられる (Cole *et al.*, 1988; Simon *et al.*, 1992)。瀬戸内海では事実、そのような関係が報告されている (Naganuma and Miura, 1997; Tada *et al.*, 1998)。しかし、東京湾

では明瞭な関係は見られなかった。高度に栄養化した東京湾の海域では、高い栄養塩濃度と Chl *a* が周年維持され(松村ら, 2001), 特に夏季は植物プランクトンの生産が高い(Yamaguchi *et al.*, 1991)。また、冬季においても、例年冬季2月は珪藻のブルーム期であり(野村・吉田, 1997), 植物プランクトン由来の基質は豊富にあると考えられる。東京湾では、一般海洋細菌が利用できる有機物濃度が周年存在し、細菌の増殖を律速していないと考えられる。

夏季の観測時に、しばしば、溶存酸素濃度が水温・塩分躍層を境に減少し始めることが観察される。この時、細菌密度の分布は鉛直的な差が小さいことが多い。躍層以深で溶存酸素濃度が低くなる理由は、易分解性有機物が生分解をうけながら沈降し、酸素が消費されるためと考えられる。Seki (1973a) と Seki *et al.* (1974a) は、東京湾湾奥部の広い範囲で、微生物の呼吸速度が上層から下層まで顕著に変化しなかったことを報告している。したがって、海洋細菌の栄養摂取可能な閾値以上に基質濃度が存在する東京湾においては、大気からの酸素供給が激減する躍層直下から生分解による貧酸素化が始まると考えられる。

Terada *et al.* (1974) が調査を行なった1974年8月に東京湾湾奥部表層において細菌密度の高い分布は、低塩分水・高 Chl *a* 濃度で栄養塩に富んだ水塊と一致していた。このことは当時明確な水域区分ができたことを示している。細菌密度の季節的消長は、多摩川河口と木更津沖の二つの観測点ではほぼ同じパターンで変動した。本研究では調査したのは2観測点のみではあるが、塩分や Chl *a* などと細菌密度から明確な水域区分はできなかった。このことは、調査期間における東京湾中央部の水域が天然細菌群集の生息環境としては均質化していたことを示していると考えられた。

日本の様々な半閉鎖水域、特に瀬戸内海では1980年代初頭より天然細菌群集に関する研究が蓄積されている。そこで、それらの研究と本調査海域を比較してみる(Table 1)。いずれの海域でも細菌の出現密度は、夏季に最高値を示した。東京湾における細菌の最高出現密度は瀬戸内海(4.89×10^6 cells ml⁻¹; Iwamoto *et al.*, 1994) に比べ高く、瀬戸内海で 10^7 オーダーの細胞密度はみられていない。表層水における細菌の出現密度は、瀬戸

内海の $3.2 \times 10^5 \sim 4.3 \times 10^6$ cells ml⁻¹ に対し、東京湾は $6.6 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^7$ cells ml⁻¹ (ただし、Terada *et al.*, 1974 を除く近年の値として) であった。本研究で細菌計数時に過小評価する30%分を加算しなかったとしても、瀬戸内海に比べ東京湾で細菌の出現量・生物量が相対的に多いことは、東京湾の方が、富栄養化が進行しているためと考えられる。このことは年間の有機炭素の生産量の比較からも明らかで、東京湾の 1890 gC m⁻² (Yamaguchi *et al.*, 1991) に対し、瀬戸内海は 218 gC m⁻² (Tada *et al.*, 1998) である。

本研究において、東京湾の細菌密度は、低水温期には安定して低く推移し、水温が上昇すると変動を伴いつつ増加した。冬季の細菌密度が、安定的に低い理由としては、水温の影響が考えられる。富栄養化して海水中の基質濃度が十分に高い水域では、細菌の増殖は温度によって規定されるといわれる(Rivkin and Legendre, 2001)。細菌の増殖速度と水温には正の相関がみられ、細菌と鞭毛虫の増殖活性は、水温が制御要因として働くことが知られている(Šolić and Krstulović, 1994)。実際、日本沿岸内湾においては、細菌捕食性のナノ鞭毛虫の密度は、低水温期に低い(例えば、Iwamoto *et al.*, 1994; 今井・山口, 1996; Tanaka *et al.*, 1997)。すなわち、冬季の安定して低い細菌密度は、細菌の利用できる有機物濃度は十分にあるものの、細菌捕食者による捕食圧が低くても、それ以上に細菌の増殖速度が低いことに起因すると推測される。

近年、東京湾では冬季の水温が上昇している; 湾奥においては増加した放流下水道自体の局地的な水温上昇(木内, 2003)と、外洋系水の波及頻度上昇による全湾的な水温上昇(安藤ら, 2003; 八木ら, 2004)などである。このような冬季の水温上昇に伴う細菌活性の上昇が、東京湾で問題となっている貧酸素水塊の形成に影響を与えるか否かを含め、水柱における生分解や硝化・脱窒といった微生物過程の評価、植物プランクトンの生産との比較など、東京湾で遅れている微生物の生態系への寄与を明確にする研究が必要になっている。

謝 辞

東京水産大学(現・東京海洋大学)所属研究練習船“青鷹丸”の船長、士官、甲板員の方々と実習艇“ひよど

り”の艇長には、採集に際し多大な御助力を頂いた。東京大学海洋研究所教授木暮 一啓博士、技術官塚本 久美子博士には貴重な情報を提供いただいた。東京水産大学水産生物学講座の学生・大学院生諸氏には採集の際にご助力いただいた。これらの方々へここに深謝の意を表す。

References

- 安藤 晴夫、柏木 宣久、二宮 勝幸、小倉 久子、山崎 正 (2003): 東京湾における水温の長期変動傾向について. *海の研究*, **12**, 407-415.
- Cole, J. J., S. Findlay and M. L. Pace (1988): Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: a cross-system overview. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **43**, 1-10.
- Ducklow, H. W. and F. -K. Shiah (1993): Bacterial production in estuaries. p. 261-288. In *Aquatic Microbiology: an Ecological Approach*, edited by T. E. Ford, Blackwell Sci. Pub., UK.
- Fuhrman, J. A. and R. T. Noble (1995): Viruses and protists cause similar bacterial mortality in coastal seawater. *Limnol. Oceanogr.*, **40**, 1,236-1,242.
- Fukami, K., N. Murata, Y. Morio, and T. Nishijima (1996): Distribution of heterotrophic nanoflagellates and their importance as the bacterial consumer in an eutrophic coastal seawater. *J. Oceanogr.*, **52**, 399-407.
- Fukuda, R., H. Ogawa, T. Nagata, and I. Koike (1998): Direct determination of carbon and nitrogen contents of natural bacterial assemblages in marine environments. *Appl. Environ. Microbiol.*, **64**, 3,352-3,358.
- 風呂田 利夫 (1991): 東京湾内湾底生動物の生き残り と 繁殖. *沿岸海洋研究ノート*, **28**, 160-169.
- 今井 一郎 (1984): 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.
- 今井 一郎、伊藤 克彦 (1984): 1983年5月周防灘における従属栄養性微小鞭毛虫類の分布. *南西水研報*, **17**, 219-233.
- 今井 一郎、山口 峰生 (1996): 北部広島湾における海洋細菌の現存量と生産量、および従属栄養性微小鞭毛虫類の季節変化. *南西水研報*, **29**, 75-86.
- 今井 一郎、山口 峰生 (1997): 大阪湾における海洋細菌の現存量と生産量. *南西水研報*, **30**, 173-181.
- 岩本 典子、今井 一郎、上 真一 (1993): 夏季の広島湾における細菌と従属栄養性微小鞭毛虫類の出現密度の変動. *日本プランクトン学会報*, **40**, 55-66.
- Iwamoto, N., I. Imai, and S. Uye (1994): Seasonal fluctuation in abundance of bacteria, heterotrophic nanoflagellates, autotrophic nanoflagellates and nanodiatoms in Hiroshima Bay, the Inland Sea of Japan. *Bull. Plankton Soc. Japan*, **41**, 31-42.
- Kimata, N., N. Nishino, S. Suzuki, and K. Kogure (2003): *Pseudomonas aeruginosa* isolated from marine environments in Tokyo Bay. *Microb. Ecol.*, **47**, 41-47.
- 木内 豪 (2003): 都市の水利用が公共用水域に及ぼす熱的影響の長期的変化 — 東京都区部下水道と東京湾を事例として —. *水工学論文集*, **47**, 25-30.
- Kirchman, D. L. (2000): *Microbial ecology of the oceans*. Wiley-Liss, New York, 542 pp.
- Kogure, K., U. Simidu, and N. Taga (1980): Distribution of viable marine bacteria in neritic seawater around Japan. *Can. J. Microbiol.*, **26**, 318-323.
- Hutchinson, G. E. (1969): Eutrophication, past and present. p. 17-26. In *Eutrophication: Causes, Consequences, Correctives*. Proceedings of A Symposium. National Academy of Sciences, Washington, D. C.
- 松村 剛、堀本 奈穂、許 耀霖、石丸 隆 (2001): 東京湾における栄養塩の動向 (1989-1998年). *La mer*, **39**, 19-32.
- 松村 剛、石丸 隆、今村 正裕 (2004): 東京湾におけるリンの溶出と海洋構造の季節変動. *沿岸海洋研究*, **41**, 143-151.
- 門谷 茂 (1996): 第1章 瀬戸内海的环境と漁業のかかわり, p.1-40. *瀬戸内海の生物資源と環境 — その将来のために —*岡市 友利、小森 星児、中西 弘編, 恒星社厚生閣, 東京.
- Naganuma, T. (1997): Abundance and production of bacterioplankton along a transect of Ise Bay, Japan. *J. Oceanogr.*, **53**, 579-583.
- Naganuma, T. and S. Miura (1997): Abundance, production and viability of bacterioplankton in the Seto Inland Sea, Japan. *J. Oceanogr.*, **53**, 435-442.
- Nair, S., K. Tsukamoto, and U. Simidu (1985): Distribution of bacteriolytic bacteria in the coastal marine environments of Japan. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, **51**, 1,469-1,473.

- Nakamura, Y., K. Fukami, S. Sasaki, and J. Hiromi (1994): Population dynamics of bacteria and heterotrophic nanoflagellates following the summer diatom bloom in the Seto Inland Sea. *Bull. Plankton Soc. Japan*, **41**, 1-8.
- 野村 英明、吉田 誠 (1997): 東京湾における近年の植物プランクトンの出現状況. *La mer*, **35**, 107-121.
- Parsons, T. R. and H. Seki (1970): Importance and general implications of organic matter in aquatic environments, p. 1-27. In *Symposium on Organic Matter in Natural Waters*, edited by D. W. Hood, Inst. Mar. Sci. Univ. Alaska, Publ. No. 1.
- Pernthaler, J. (2005): Predation on prokaryotes in the water column and its ecological implications. *Nature Rev.: Microb.*, **3**, 537-546.
- Pomeroy, L.R. (1974): The ocean's food web, a changing paradigm. *BioScience*, **24**, 499-504.
- Porter, K. G. and Y. S. Feig (1980): The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnol. Oceanogr.*, **25**, 943-948.
- Rivkin, R. B. and L. Legendre (2001): Biogenic carbon cycling in the upper ocean: effects of microbial respiration. *Science*, **291**, 2,398-2,400.
- Sanders, R. W., D. A. Caron, and U. -G. Berninger (1992): Relationship between bacteria and heterotrophic nanoplankton in marine and fresh waters: an inter-ecosystem comparison. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **86**, 1-14.
- Seki, H. (1973a): Microbial respiration in marine environments during summer. *La mer*, **11**, 147-152.
- Seki, H. (1973b): Silica gel medium for enumeration of petroleumlytic microorganisms in the marine environment. *Appl. Microbiol.*, **26**, 318-320.
- Seki, H. (1986): Thresholds in eutrophication of natural waters. *Proceedings of the 1st International Symposium on Integrated Global Ocean Monitoring. Environ. Monitor. Assess.* **7**, 39-46.
- Seki, H. (1991): Microbial energetics in marine hypoxic water. *Mar. Pollut. Bull.* **22**, 163-164.
- Seki, H. (1992): Microbial uptake kinetics in Pacific coastal waters of different degrees of eutrophication. *Sci. Total Environ, Suppl. 1992* (Proceedings of A Symposium), 957-972.
- Seki, H. (2000): Original achievements leading inductively towards quantitative evaluation of detritus food chains in the marine food web. Conference a la remise du Prix de la Societe franco-japonaise d'océanographie. *La mer*, **38**, 27-37.
- Seki, H., H. Shinoyama, M. Muto, and H. Numano (1974a): Decomposition of particulate organic materials in Tokyo Bay at summer stagnation period in 1972. *La mer*, **12**, 9-15.
- Seki, H., J. Matsuo, M. Yamashita, and H. Numano (1974b): Halophilism of microorganisms in the eutrophied bay of Tokyo at the end of summer stagnation period. *La mer*, **12**, 66-71.
- Seki, H., Y. Yamaguchi, and S. Ichimura (1975): Turnover rate of dissolved organic materials in a coastal region of Japan at summer stagnation period of 1974. *Arch. Hydrobiol.*, **75**, 297-305.
- Simidu, U., E. Kaneko, and N. Taga (1977): Microbiological studies of Tokyo Bay. *Microb. Ecol.*, **3**, 173-191.
- Simidu, U., K. Kogure, and K. Tsukamoto (1987): Distribution of Vibrionaceae in the sea. *Nihon Biseibutsu Seitai Gakkaihho*, **1**, 65-74.
- Simon, M., B. C. Cho, and F. Azam (1992): Significance of bacterial biomass in lakes and the ocean: comparison to phytoplankton biomass and biogeochemical implications. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **86**, 103-110.
- Šolić, M. and N. Krstulović (1994): Role of predation in controlling bacterial and heterotrophic nanoflagellate standing stocks in the coastal Adriatic Sea: seasonal patterns. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **114**, 219-235.
- Suzuki, M. T., E. B. Sherr, and B. F. Sherr (1993): DAPI direct counting underestimates bacterial abundances and average cell size compared to AO direct counting. *Limnol. Oceanogr.*, **38**, 1,566-1,570.
- Suzuki, R. and T. Ishimaru (1990): An improved method for determination of phytoplankton Chlorophyll using N, N-Dimethylformamide. *J. Oceanogr. Soc Japan*, **46**, 190-194.

- 鈴木 昌弘、小川 浩史 (2001): 東京湾における夏季表層水中の有機態炭素・窒素・リンの分布. 沿岸海洋研究, **38**, 119-129.
- 鈴木 昌弘、國分 治代、伊藤 学 (2003): 東京湾における堆積物 — 海水間のリンの挙動. 海の研究, **12**, 501-516.
- Tada, K., K. Monaka, M. Morishita, and T. Hashimoto (1998): Standing stocks and production rates of phytoplankton and abundance of bacteria in the Seto Inland Sea, Japan. *J. Oceanogr.*, **54**, 285-295.
- 多田 邦尚、森下 政和、門谷 茂、濱田 健一郎、山田 真知子 (2002): 過栄養海域 (北九州市・洞海湾) における表層水中の細菌分布. 海と空, **78**, 1-6.
- Taga, T. and H. Kobori (1978): Phosphatase activity in eutrophic Tokyo Bay. *Mar. Biol.*, **49**, 223-229.
- Tanaka, T. and A. Taniguchi (1996): Short-term variation in abundance of bacteria and heterotrophic nanoflagellates in summer observed in Onagawa Bay, Japan. *Bull. Plankton Soc. Japan*, **43**, 21-29.
- Tanaka, T., N. Fujita, and A. Taniguchi (1997): Predator-prey eddy in heterotrophic nanoflagellate-bacteria relationships in a coastal marine environment: a new scheme for predator-prey associations. *Aquat. Microb. Ecol.*, **13**, 249-256.
- Terada, T., H. Seki, and S. Ichimura (1974): An areal distribution of microbial biomass in Tokyo Bay at summer stagnation period. *La mer*, **12**, 192-196.
- 八木 宏、石田 大暁、山口 肇、木内 豪、樋田 史郎、石井 光廣 (2004): 東京湾及び周辺水域の長期水温変動特性. 海岸工学論文集, **51**, 1,236-1,240.
- Yamaguchi, Y., H. Sato, and Y. Aruga (1991): Seasonal changes of organic carbon and nitrogen production by phytoplankton in the estuary of River Tamagawa. *Mar. Poll. Bull.*, **23**, 723-725.
- 山根 晶子、何地、村上 昭彦、岡田 光正 (1993): 東京湾底質中の微生物による原油系難分解性成分の分解. 海の研究, **2**, 161-168.

Temporal and Spatial Variation in Abundance of Heterotrophic Bacteria in a Eutrophic Inlet, Tokyo Bay, of the Temperate Pacific Coast of Japan

Hideaki Nomura *, Yoshito Ishido[†], Takashi Ishimaru, [‡] and Masaaki Murano [‡]

Abstract

Temporal and spatial variations in abundance of heterotrophic bacteria, along with environmental parameters such as temperature, salinity, and chlorophyll *a* concentration, were studied monthly from January 1993 to May 1995 at two stations in a heavily eutrophicated inlet, Tokyo Bay, of the temperate Pacific coast of Japan. Bacterial abundance in the surface layer ranged from 0.7×10^6 to 9.9×10^6 (mean: 4.1×10^6) at Sta. A and from 0.8×10^6 to 9.6×10^6 (mean: 3.5×10^6) cells ml^{-1} at Sta. T4. The maximum was observed at 5-meter depth at both stations (11.1×10^6 in September 1993, 10.5×10^6 in July 1994). Clear seasonal variation in bacterial abundance seems to be coupled with water temperature; low bacterial cell density occurred in winter and high density in summer. The threshold concentration of organic substrate was not a limiting factor for bacterial growth at the hypereutrophic region of Tokyo Bay, so the bacterial population was mainly governed by temperature during winter. The small differences in spatial variations and in cell density of bacterial populations between the two stations may imply that the ambient environment for bacteria is homogenous in the central watermass of this eutrophic bay.

Key words: heterotrophic bacteria, Tokyo Bay, eutrophication, seasonal variation

(Corresponding author's e-mail address: nmr@ori.u-tokyo.ac.jp)

(Received 7 December 2006; accepted 24 March 2007)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2007)

* Laboratory of Marine Microbiology, Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 1-15-1 Minami-dai, Nakano, Tokyo 164-8639, Japan

[†] Aomori Prefecture Department of Fisheries, 1-1-1, Nagasaki, Aomori-shi, Aomori 030-8570, Japan

[‡] Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7, Kohnan, Minato, Tokyo 108-8477, Japan