

わが国の沿岸海域における炭化水素酸化細菌に関する生態学的研究 IV

誌名	日本水産學會誌
ISSN	00215392
著者	藤沢, 浩明 村上, 正忠 真鍋, 武彦
巻/号	45巻9号
掲載ページ	p. 1099-1107
発行年月	1979年9月

わが国の沿岸海域における炭化水素酸化細菌 に関する生態学的研究—IV

海水中の炭化水素酸化細菌の密度と環境因子
との関係および細菌群の分布特性

藤沢浩明・村上正忠・真鍋武彦

(1979年4月19日受理)

Ecological Studies on Hydrocarbon-oxidizing Bacteria in Japanese Coastal Waters—IV
Relations between Several Environmental Conditions and Population Density
of Hydrocarbon-oxidizing Bacteria in Seawater of the Oil-polluted Waters
and Characterization of Group Composition of Bacteria

Hiroaki FUJISAWA*¹, Masatada MURAKAMI*¹,
and Takehiko MANABE*²

Accurate information on the relations between the environmental conditions and the population density of hydrocarbon-oxidizing bacteria is indispensable to clarify the self-purification in the oil-polluted areas. In spite of the above-mentioned importance, little has been known of them, as yet.

To clarify the influence of the environmental conditions on the population density of heterotrophic bacteria, hydrocarbon-oxidizing bacteria groups A (d_a) and B (d_b) in seawater of the coastal waters of the different grades of oil pollution, the following areas were chosen: Iwakuni waters (off oil industrial plants), Bisan Seto (one year after the Mizushima Oil Refinery Accident) and Hibiki Nada (slightly polluted area as control). The following factors were measured as the environmental conditions: oil content (d_p), chlorinity, COD and water temperature. And various relations of the density of these bacterial groups to these conditions were statistically estimated.

It may be given as a conclusion of the linear regression analysis that the density of bacteria is clearly affected by the environmental conditions, as indicated by the highly significant coefficients.

Further analyses were conducted by the multiple linear equation in which the areas were used as the dummy variables. And it was found that the dummy variables in the relations of the density of groups A and B with oil content were insignificant. Therefore, the difference in respective areas was not recognized in the relations, and the relations were respectively expressed in the following equations.

$$\log d_a = 3.34 + 1.35 \log d_p$$

$$\log d_b = 2.17 + 1.36 \log d_p$$

The group compositions of bacteria in respective areas were examined in the principal component analysis. And it was found that the accumulated proportions in z_1 (size factor) and z_2 (shape factor) were about 86 and 96%, respectively. This fact means that the group composition in these respective areas can be characterized by the distribution figure of scores on axes of z_1 and z_2 .

油濁海域における炭化水素酸化細菌 (HO と略称) の密度と油分濃度などの環境因子との関係についての正確な情報はきわめて少ない。前報¹⁾で著者らは、水島重油流出事故による汚染海域を対象として、重油流出事故に

伴う環境因子の変化が HO や従属栄養細菌 (H) の密度に及ぼす影響について推計学的に解析した。続いて本報では、汚染程度の異なる沿岸海域 (石油コンビナート沖、重油流出水域および油濁軽微な水域) を対象とし、

*¹ 水産大学校 (Laboratory of Microbiology, Shimonoseki University of Fisheries, Shimonoseki 759-65 Japan).

*² 兵庫県立水産試験場 (Hyōgo Prefectural Fisheries Experimental Station, Akashi 673 Japan).

海水中の HO や H の密度と環境因子との関係を推計学的にさらに明らかにし、またこれらの関係の水域による差異を検討した。さらに、これら細菌群の分布特性が水域によつてどのように異なるかを、主成分分析を用いて解析した。これらの結果について報告する。

実験方法

試料の採取 油濁海域として、石油コンビナートの廃水が流入し、慢性的に石油汚染を受けていると考えられる岩国沿岸水域 (IW と略称) を選び、その試料採取定点を Fig. 1 に示した。さらに、重油流出水域であつて次に油濁のレベルが高いと思われる備讃瀬戸 (BS, 事故発生約 1 年後)、および油濁の軽微な一般自然水域に近いと考えられる響灘 (HN) を対象水域として選んだ。両水域の定点は既報²⁾ に示したとおりである。これらの 3 水域の 16 定点において、1975 年および 1976 年の 10 月下旬から 12 月中旬にかけて 6 回、合計 28 の海水試料を採取した。試料は大半が表層海水であるが、定点によつては水深 5, 10 および 20 m 層からも採取した。採水方法は既報²⁾ で述べた方法と同一である。

細菌密度の測定 既報^{2,3)} で述べたように、細菌群を生理的差異によつて H, HO の A 群 (A と略称) および B 群 (B) の 3 群に分け、それぞれ海水 1 ml あたりの細菌数を測定した。以下各細菌群の密度をそれぞれ、 d_h , d_a および d_b と略記する。なお、A および B の指標基質は *n*-ヘキサデカンである。

環境因子の測定 既報²⁾ と同一方法により、油分濃度 (ppm, d_p)、塩素量 (% Cl)、COD (O_2 ppm)、pH および水温 ($^{\circ}\text{C}$) をそれぞれ測定した。

推計学的処理 処理に先立つて測定値を正規分布に直すため、前報⁴⁾ で述べたように、 d_h , d_a , d_b および d_p については対数に、Cl については $\sqrt{19-\text{Cl}}$ に、それぞれ変換した。Cl の変換については既報⁴⁾ で述べたよう

に、 $\sqrt{19-\text{Cl}}$ に変換すると正規化される。このことは、沿岸海域では Cl の 19% に近い外洋水が、汚濁された陸水で希釈されながら平面的に広がっているためと解釈され、 $\sqrt{19-\text{Cl}}$ で汚濁物質の混入を代表できると考えられる。なお、pH は変域がきわめて小さいので、この研究には用いなかつた。

測定値あるいは変換値を用いて、環境因子相互間の関係・細菌密度の相互関係および環境因子と細菌密度との関係を単相関分析によつて解析した。また、各環境因子と各細菌密度との関係は水域によつて異なると考えられる。しかし、水域は数値化できないので、これをダミー変数として組み入れた偏回帰分析⁵⁾によつて、全水域を通じてみられる環境因子と細菌密度との関係について、水域差を分離しながら検討した。なお、偏回帰分析は変数増加法によつた。さらに、各水域における細菌群の分布 (組成) の差異を判別するため、各群の細菌密度 ($\log d_h$, $\log d_a$ および $\log d_b$) を特性値とした主成分分析⁶⁾によつて、各特性値に対する主成分の因子負荷量の大小や正負の関係を調べ、また各点の第 1 主成分 z_1 (size factor) および第 2 主成分 z_2 (shape factor) スコアの散布図を作成し、これに基づいて考察した。

結果および考察

環境因子および細菌密度 これらについての測定結果を Table 1 に示した。Table 1 から主な環境因子の水域差をみると、 d_p については、IW が 0.06~0.48 (平均 0.17) ppm で最も高く、BS が 0.03~0.27 (0.11) ppm でこれに次ぎ、HN が 0.01~0.09 (0.06) ppm で最も低かつた。しかし、各水域の $\log d_p$ の平均値の差について t 検定したところ、IW と HN 間の差は有意とみなされたが、IW と BS、および BS と HN 間の差は、いずれも有意とみなされなかつた。COD については、IW が 0.83~8.20 (2.63) ppm、BS が 2.27~3.76 (3.18) ppm、HN が 0.33~3.23 (1.50) ppm で、BS が最も高かつた。各平均値の差の t 検定により、BS と HN 間の差は有意とみなされたが、IW と他の 2 水域間の差はいずれも有意とみなされなかつた。Cl については、IW が 16.24~17.34 (17.11) % Cl 、BS が 15.88~16.73 (16.54) % Cl 、HN が 18.45~18.90 (18.70) % Cl で、HN が最も高かつた。各水域の $\sqrt{19-\text{Cl}}$ の平均値の差を t 検定したところ、いずれの水域間の差も有意とみなされた。

上述の環境因子に関する結果および後述の因子相互間の関係から考察すると、おおむね IW および BS は有機汚染および油濁が進んだ複合汚染水域であり、これに対し、HN は有機汚染・油濁レベルが共に低い一般の自

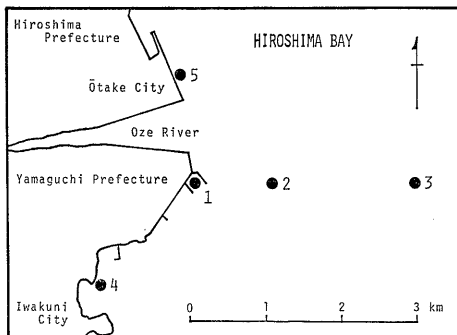


Fig. 1. Location of sampling stations in Iwakuni coastal waters.

Table 1. The population density of heterotrophic bacteria and hydrocarbon-oxidizing bacteria and the environmental conditions of seawater sampled from the coastal waters of the different grades of oil pollution

Area	Date	Sta- tion No.	Depth sampled (m)	Water		Chlo- rinity (‰)	COD (O ₂ ppm)	Oil content (ppm)	Hetero- trophic bacteria (cells/ml)	Hydrocarbon -oxidizing bacteria		
				temp. (°C)	pH					group A (cells/ml)	group B (cells/ml)	
Iwakuni waters	Oct. 24, '75	1	0	23.8	8.0	17.04	3.52	0.22	2.3×10 ⁵	10 ³	10 ²	
		2	0	22.1	8.2	17.31	2.93	0.17	1.2×10 ⁵	10 ³	10 ¹	
		3	0	22.3	8.3	17.29	3.35	0.13	3.1×10 ⁴	10 ³	10 ⁰	
		4	0	22.3	8.0	16.57	4.33	0.26	7.9×10 ⁵	10 ⁴	10 ²	
		5	0	22.5	7.8	16.24	8.20	0.48	1.6×10 ⁶	10 ⁴	10 ³	
	Nov. 26, '76	1	0	17.0	8.1	17.28	1.15	0.13	1.6×10 ⁴	10 ³	10 ²	
		1	5	16.8	8.1	17.34	0.90	0.11	1.9×10 ⁴	10 ³	10 ⁰	
		1	10	16.8	8.2	17.33	0.89	0.14	1.1×10 ⁴	10 ³	10 ¹	
		3	0	16.5	8.1	17.20	1.57	0.12	4.7×10 ⁴	10 ³	10 ¹	
		3	10	16.2	8.2	17.32	1.27	0.08	4.9×10 ³	10 ¹	10 ⁰	
Bisan Seto	Nov. 7, '75	1	0	20.0	8.0	15.88	3.03	0.20	1.1×10 ⁴	10 ³	10 ²	
		2	0	21.0	8.1	16.63	3.56	0.27	1.3×10 ⁴	10 ³	10 ¹	
		4	0	20.3	8.1	16.67	3.30	0.07	1.3×10 ³	10 ²	10 ¹	
		6	0	20.3	8.2	16.73	3.60	0.03	1.3×10 ³	10 ³	10 ²	
	Nov. 19, '75	7	0	18.5	7.9	16.66	2.70	0.04	7.0×10 ²	10 ¹	10 ⁰	
		9	0	18.8	7.9	16.63	3.76	0.06	6.0×10 ²	10 ¹	10 ⁰	
		10	0	18.0	7.9	16.49	3.20	0.15	2.6×10 ³	10 ²	10 ²	
		12	0	18.5	8.0	16.60	2.27	0.03	1.3×10 ³	10 ²	10 ¹	
	Hibiki Nada	Dec. 2, '75	A	0	15.0	8.0	18.45	2.77	0.01	1.2×10 ⁴	10 ³	10 ¹
			B	0	18.5	8.3	18.85	3.07	0.02	2.0×10 ²	10 ⁰	10 ⁻¹
C			0	18.8	8.2	18.90	3.23	0.07	2.1×10 ²	10 ¹	10 ⁻¹	
Dec. 14, '76		B	0	13.4	8.3	18.58	1.05	0.06	3.1×10 ²	10 ¹	10 ⁰	
		B	5	13.4	8.2	18.64	0.95	0.09	4.3×10 ²	10 ¹	10 ⁻¹	
		B	10	13.6	8.3	18.65	1.07	0.04	2.0×10 ²	10 ¹	10 ⁰	
		C	0	13.8	8.3	18.75	0.33	0.06	3.1×10 ²	10 ¹	10 ⁰	
		C	10	14.0	8.2	18.72	0.52	0.09	1.7×10 ²	10 ¹	10 ⁰	
C		20	14.2	8.2	18.77	0.51	0.08	2.6×10 ²	10 ²	10 ⁰		

Table 2. Correlation matrix of the factors observed (environmental conditions and population density of bacteria)

Factors	log d _p	√ 19-Cl	COD	Temp.	log d _h	log d _a	log d _b
	Transforma- tion of oil content in ppm	Transforma- tion of chlorinity in ‰	in O ₂ ppm	Water temperature in °C	Transformation of population density of heterotrophic bacteria in cells per ml	Transformation of population density of hydrocarbon -oxidizing bacteria group A in cells per ml	Transformation of population density of hydrocarbon -oxidizing bacteria group B in cells per ml
log d _p		0.46*	0.35	0.48**	0.65**	0.52**	0.47*
√ 19-Cl			0.50**	0.66**	0.60**	0.57**	0.72**
COD				0.79**	0.58**	0.51**	0.52**
Temp.					0.67**	0.52**	0.53**
log d _h						0.81**	0.69**
log d _a							0.85**

Note: The original data are shown in Table 1.

* significant at 0.05 level

** significant at 0.01 level

Table 3. Multiple linear regression of the population density of bacteria (y) on the environmental factor (x_1) and on the areas (x_2 and/or x_3 , as dummy variable) in the forward method

x_1	y	Step of selection	Cons-	Environ-	Dummy variable of Bisan Seto (x_2)	Dummy variable of Iwakuni waters (x_3)	F_1	F_2	F_3	R Multiple correlation coefficients
			tant	mental factor (x_1)						
			a_0	a_1	a_2	a_3				
log d_p (Transformation of oil content in ppm)	log d_h	1	2.93			1.64			25.93**	0.71
		2	4.41	1.21		1.17	6.74*			0.78
	log d_a	1	3.34	1.35			9.67**			0.52
		1	2.17	1.36			7.68*			0.47
$\sqrt{19-Cl}$ (Transformation of chlorinity in ‰)	log d_h	1	2.93			1.64			25.93**	0.71
		2	1.92	0.99		1.30	8.86**			0.79
		3	0.09	4.67	-4.10	-1.90		14.39**		0.88
	log d_a	1	0.51	1.20				12.78**		0.57
		2	0.11	1.81	-1.07				8.89**	0.71
		3	1.55	5.21	-4.74	-3.12			13.31**	0.83
	log d_b	1	-1.19	1.65				28.27**		0.72
		2	-0.40	1.97	-0.56				2.28	0.53
		3	-2.85	4.92	-3.74	-2.71			8.05**	0.82
COD (in O ₂ ppm)	log d_h	1	2.93			1.64			25.93**	0.71
		2	2.12	0.35		1.52	26.29**			0.87
	log d_a	1	1.19	0.29			8.92**			0.51
		2	0.92	0.26		0.83			8.37**	0.66
	log d_b	1	-0.08	0.33			9.71**			0.52
		2	-0.29	0.31		0.67			3.91	0.61
3	-0.54	0.21	0.99	0.12			5.49**		0.70	
Temp. (Water temperature in °C)	log d_h	1	2.93			1.64			25.93**	0.71
		2	-0.11	0.18		1.24	17.00**			0.84
	log d_a	1	-0.94	0.16			9.47**			0.52
		1	-2.47	0.18			10.16**			0.53

Note: The original data are shown in Table 1.

The multiple linear regression is expressed in the following equation.

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3$$

where, $x_1 = \log d_p$, $\sqrt{19-Cl}$, COD or Temp.

$y = \log d_h$ (Transformation of population density of heterotrophic bacteria in cells per ml), $\log d_a$ (Transformation of population density of hydrocarbon-oxidizing bacteria group A in cells per ml) or $\log d_b$ (Transformation of population density of hydrocarbon-oxidizing bacteria group B in cells per ml).

F = estimated value of SNEDECOR'S F for a_i (a_i = added variable in each step)

* significant at 0.05 level

** significant at 0.01 level

然に近い水域であると考えられる。

各群の細菌密度についてみると、 $\log d_h$ では IW が 2~6 (4.6) で最も高く、BS が 2~4 (3.3) でこれに次ぎ、HN が 2~4 (2.6) で最も低かった。各水域の平均値の差を t 検定したところ、3 水域のいずれの間の差も有意とみなされた。 $\log d_a$ ではそれぞれ、1~4 (2.5), 1~3 (1.9), 0~3 (1.2) であり、また、 $\log d_b$ では 0~3 (1.2), 0~2 (1.1), -1~1 (-0.2) であった。これらについて各水域間の平均値の差を t 検定したところ、 $\log d_a$ では IW と HN 間の差は有意とみなされたが、

IW と BS、および BS と HN 間の差は有意とみなされなかった。また、 $\log d_b$ では IW と HN、および BS と HN 間の差は有意とみなされたが、IW と BS 間の差は有意とみなされなかった。

上述の結果から、各群の細菌密度についてはおおむね、IW および BS が HN より高く、とくに IW が最も高い傾向がみられた。

環境因子および細菌密度相互間の単相関 $\log d_p$, $\sqrt{19-Cl}$, COD, 水温, $\log d_h$, $\log d_a$ および $\log d_b$ 相互の組合せについて、それぞれの相関係数を求め、Table

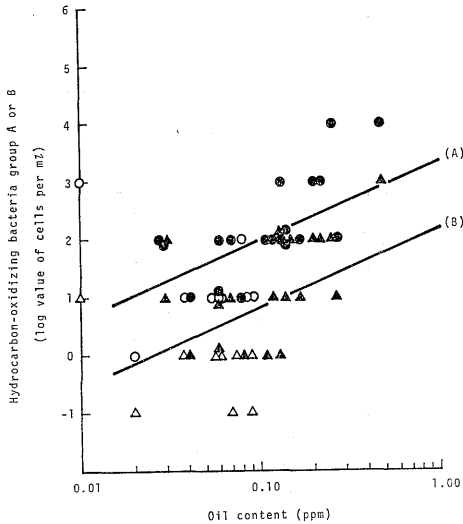


Fig. 2. Dependence of the population density of hydrocarbon-oxidizing bacteria group A (d_a) or group B (d_b) on the oil content (d_p).

●: d_a in Iwakuni waters and Bisan Seto, ○: d_a in Hibiki Nada, ▲: d_b in Iwakuni waters and Bisan Seto, △: d_b in Hibiki Nada.

The original data are shown in Tables 1 and 3.

The regressions are respectively expressed in the following equations.

Estimated equation (A):

$$\log d_a = 3.34 + 1.35 \log d_p$$

Estimated equation (B):

$$\log d_b = 2.17 + 1.36 \log d_p$$

2 に示す結果を得た。

Table 2 から明らかなように、COD と $\log d_p$ 間を除くすべての環境因子の組合せの間にかかなり高い相関が認められた。 $\sqrt{19-Cl}$ が COD および $\log d_p$ に対して有意な相関を示したことは、陸地に近い海水ほど有機汚染の程度が高く、油濁も進んでいることを表わしていると考えられる。また、COD と $\log d_p$ 間に相関が認められなかつたので、COD は一般の有機汚染の指標となつても、油濁の指標となりえない。各群の細菌密度相互間にも、また環境因子と細菌密度相互間にも、おおむね高い相関が認められた。なお、これらの関係については、後節で詳しく解析する。

偏回帰分析による各水域別の環境因子と細菌密度との関係 各環境因子と各細菌密度との関係の水域による差異は、水域をダミー変数として組み入れた偏回帰分析⁹⁾によつて解析した。この場合、資料が3水域にわたるので、ダミー変数は2個必要になる。また、偏回帰分

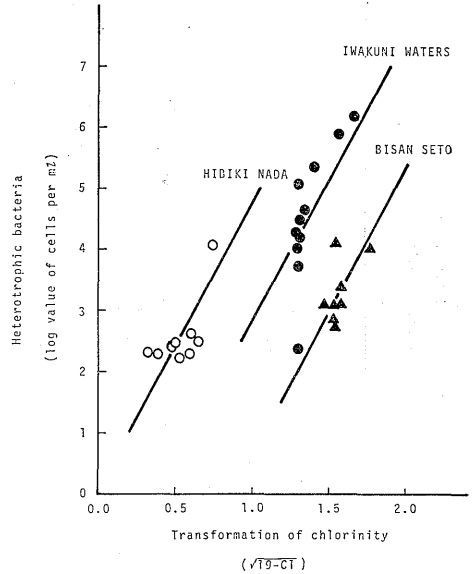


Fig. 3. Areal difference (dummy variable) in the relation between the population density of heterotrophic bacteria (d_h) and the transformation of chlorinity ($\sqrt{19-Cl}$).

The original data are shown in Tables 1 and 3.

The lines are respectively estimated in the multiple regression analysis on $\sqrt{19-Cl}$ and on the area (dummy variable).

析にはすべての環境因子を独立変数として組み入れることができるが、あまり多数の独立変数を組み入れることは実用的でない。さらに Table 2 に示すように、各環境因子相互間に強い相関がみられるので、変数増加法において、みかけ上最も相関が強い1つの因子が変数として取り入れられると、実際に関係があると考えられる他因子の影響が消えるおそれがある。そのため、ここではいずれか1つの環境因子 (x_1) のほかに水域因子2つ (BS... $x_2=1, x_3=0$; IW... $x_2=0, x_3=1$; HN... $x_2=0, x_3=0$) をダミー変数とした。この偏回帰分析の結果を Table 3 に示した。

Table 3 から次のことがわかる。 d_h は各環境因子に対して d_a および d_b よりも強い相関を示すにもかかわらず (Table 2 より)、 d_h については IW のダミー変数が Step 1 で入るため、環境因子が入るのは Step 2 になる。すなわち、 d_h は各環境因子と強い相関を示すが、水域差のほうが明らかである。IW の値は他水域の値と異なるので、この水域の値を分離すれば、さらに明瞭な関係を示すと考えられる。 d_a および d_b については、各環境因子に対する相関は d_h の場合より低いにもかかわらず、環境因子が Step 1 で取り入れられる。と

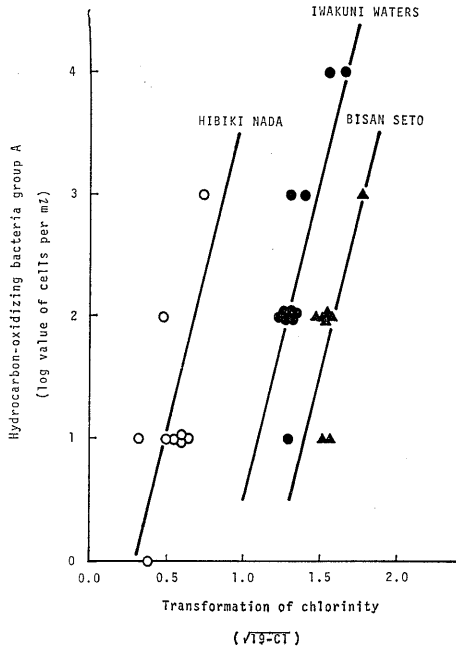


Fig. 4. Areal difference (dummy variable) in the relation between the population density of hydrocarbon-oxidizing bacteria group A (d_a) and the transformation of chlorinity ($\sqrt{19-Cl}$).

The original data are shown in Tables 1 and 3.

The lines are respectively estimated in the multiple regression analysis on $\sqrt{19-Cl}$ and on the area (dummy variable).

くに、 d_p に対する d_a および d_b の回帰では、ダミー変数の回帰係数はいずれも有意とみなされなかつた。すなわち、どの水域でも共通の回帰関係が認められた。これらのことから次の直線回帰式が成立し、さらにこれら両者の関係を Fig. 2 に示した。

$$\log d_a = 3.34 + 1.35 \log d_p$$

$$\log d_b = 2.17 + 1.36 \log d_p$$

Fig. 2 にみられるように、 d_a および d_b が水域ごとの水準差のない共通の直線上に乗っており、それらが単に d_p の大小によつて規制されていることがわかる。前報⁷⁾では、BS における d_p に対する d_b の関係には、季節差のない共通の回帰式 ($\log d_b = 2.35 + 1.10 \log d_p$) の存在が認められており、しかもこの式は上述の式と近似している。なお、水域差および季節差がないことから、 d_b は油濁に対応して変動する HO として、 d_a より重要であると考えられる。

$\sqrt{19-Cl}$ および COD に対する d_a および d_b の関係において、いずれもダミー変数が有意として組み入れ

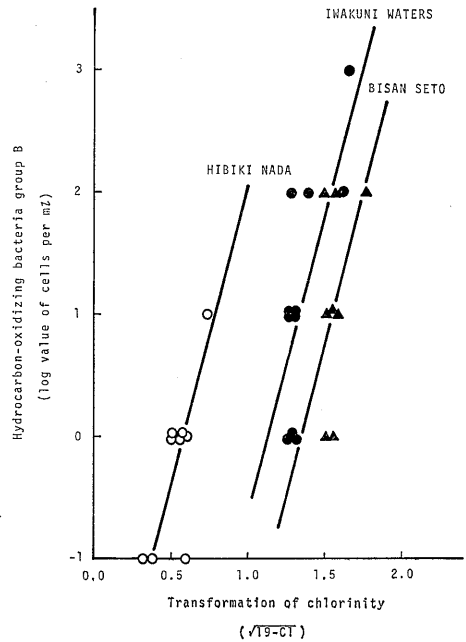


Fig. 5. Areal difference (dummy variable) in the relation between the population density of hydrocarbon-oxidizing bacteria group B (d_b) and the transformation of chlorinity ($\sqrt{19-Cl}$).

The original data are shown in Tables 1 and 3.

The lines are respectively estimated in the multiple regression analysis on $\sqrt{19-Cl}$ and on the area (dummy variable).

られた。とくに、水域による特徴が最も明らかに認められた $\sqrt{19-Cl}$ と各群の細菌密度との関係を Fig. 3, 4 および 5 に示した。

Fig. 3, 4 および 5 から明らかのように、 $\sqrt{19-Cl}$ と細菌密度との回帰直線の水域による差異は、各細菌群とも類似した傾向を示した。実際には HN の $\sqrt{19-Cl}$ は IW および BS の場合より低い、各水域とも同じ $\sqrt{19-Cl}$ のレベルでみると、いずれの細菌密度とも HN が最も高く、IW がこれに次ぎ、BS が最も低いことになる。すなわち、細菌密度については、みかけ上水域差が小さく感じられるが、 $\sqrt{19-Cl}$ との関係を水域別に解析すると、各水域の差異が明らかに認められた。同様に COD と各細菌密度との関係についても、おおむね水域差がみられた。

各群の細菌密度相互間の関係 前節までの検定によつて、各群の細菌密度は環境因子と密接な関係があり、各環境因子の影響におおむね水域差がみられることがわかつた。ここで考え方を変え、一般の水生生物の場合と同

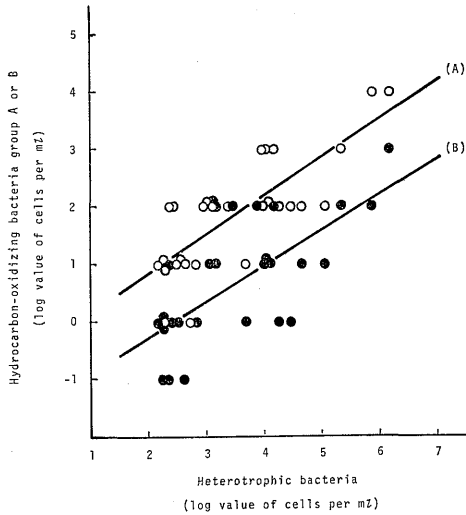


Fig. 6. Correlation between the population density of heterotrophic bacteria (d_h) and that of hydrocarbon-oxidizing bacteria group A (d_a) or group B (d_b).

○: d_a , ●: d_b .

The original data are shown in Tables 1 and 2.

Estimated equation (A):

$$\log d_a = -0.50 + 0.67 \log d_h$$

Estimated equation (B):

$$\log d_b = -1.51 + 0.62 \log d_h$$

様に、細菌群の分布の特性を用いて油濁の要素を一般有機汚染の要素から分離しながら、環境評価ができるかどうかについて、検討を試みた。その結果については次節で述べる。この試みの手はじめとして各群の細菌密度相互間の関係を調べ、 d_h と d_a および d_b との関係を図. 6 に、また d_a と d_b との関係を図. 7 に示した。

Fig. 6 および 7 に示すように、各細菌密度の間にはいずれも高い相関がみられ、それぞれ次の直線回帰式で表わされる。

$$\log d_a = -0.50 + 0.67 \log d_h$$

$$\log d_b = -1.51 + 0.62 \log d_h$$

$$\log d_b = -1.06 + 0.94 \log d_a$$

d_a が d_b の約 10 倍であることは、既報²⁾でも大体知られていたが、検定の結果、Fig. 7 の直線回帰式 (1) と (2) 間に有意な差が認められなかつたことから、さらに明らかとなつた。

主成分分析による各群の細菌密度の水域別分布特性前節では、各細菌密度相互間に密接な関係のあることが認められた。しかし、各環境因子の影響 (有意性および回帰係数の大きさ) は細菌群によつて異なり、また環境

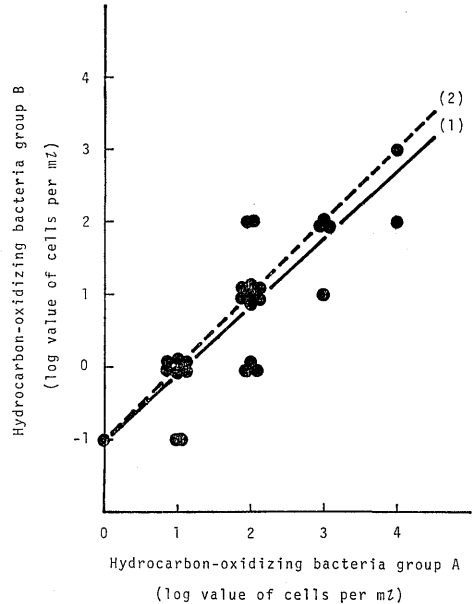


Fig. 7. Correlation between the population density of hydrocarbon-oxidizing bacteria group A (d_a) and that of group B (d_b).

The original data are shown in Tables 1 and 2.

Estimated equation (1):

$$\log d_b = -1.06 + 0.94 \log d_a$$

Estimated equation (2):

$$\log d_b = -1.00 + 1.00 \log d_a$$

因子とその細菌密度との関係は水域によつて異なる。それにもかかわらず、前節の式には環境因子および水域差を取り入れていないため、細菌群の組成が環境評価に役立つかどうかの判定には用いられない。ところが、細菌群の組成の変化が水域によつてどのような特徴を示すか (細菌群の分布特性) を、次に述べるような主成分分析⁹⁾を用いて解析すると、各細菌群の特性値が第1主成分 (z_1) および第2主成分 (z_2) にどのような重みで寄与しているかによつて、より適切な油濁指標細菌群をみつけることができた。

各群の細菌密度を特性値とした相関行列サイドからの主成分分析⁹⁾の結果を Table 4 に示し、これに基づく主成分スコアの散布図を Fig. 8 に示した。

Table 4 から、各群の細菌密度と z_1 との相関 (因子負荷量) は、いずれも 0.9 以上と高い。したがつて、 z_1 のみでは油濁の特徴を示すことができず、単に細菌密度の量的差異を強調するにすぎない。 z_1 は沿岸水域における有機汚染・油濁の複合汚染に対応する細菌レベルの変動を示す要因、いわゆる size factor と考えられ、細菌群の分布特性は z_1 のみによつて約 86% (累積寄与率) まで説明されることになる。そこで、水域による油

Table 4. Eigen-vector of the principal component analysis of the population density of heterotrophic bacteria and hydrocarbon-oxidizing bacteria in seawater sampled from the coastal waters of the different grades of oil pollution

Variables	Principal component	
	z_1	z_2
$\log d_h$ (Transformation of population density of heterotrophic bacteria in cells per ml)	0.56 (0.90)	0.76 (0.43)
$\log d_a$ (Transformation of population density of hydrocarbon-oxidizing bacteria group A in cells per ml)	0.60 (0.96)	-0.09 (-0.05)
$\log d_b$ (Transformation of population density of hydrocarbon-oxidizing bacteria group B in cells per ml)	0.57 (0.92)	-0.64 (-0.36)
Eigen value λ_k	2.57	0.32
Accumulated proportion (%)	85.7	96.2

Note: The original data are shown in Table 1.
Figures in parentheses indicate the factor loading.

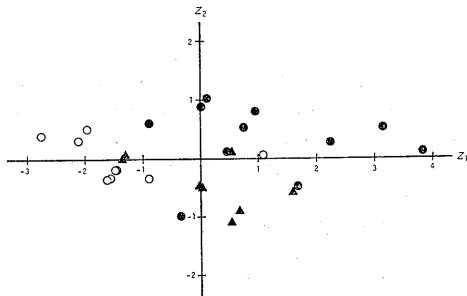


Fig. 8. Distribution of scores on axes of z_1 and z_2 in the principal component of the population density of heterotrophic bacteria, hydrocarbon-oxidizing bacteria groups A and B in seawater sampled from the coastal waters of the different grades of oil pollution.

●: score in Iwakuni waters, ○: score in Hibiki Nada, ▲: score in Bisan Seto.
The original data are shown in Table 1.

濁の質的差異を表わすためには、 z_2 が必要な要因となる。 z_2 と各群の細菌密度との相関は d_h が正、 d_b が負として寄与しており、 z_2 は d_h と d_b のみのバランスによって変動することがわかる。したがって、 z_2 は有機汚染あるいは油濁の質的差異による細菌レベルの変動を示す要因、いわゆる shape factor と考えられる。 z_1 および z_2 の両軸を用いたスコアの散布図 (Fig. 8) によつて、有機汚染・油濁が複合した沿岸水域における細菌群の分布特性は約 96% (Table 4 より) まで解釈できる。しかも、有機汚染・油濁と関連づけながら、水域別の細菌分布の特徴をよく示すことができる。Fig. 8 と環境因子の測定結果を合わせて考えると、次のことが推察される。

IW でスコアが z_1 および z_2 の正域に分布していることは、有機汚染・油濁レベルが高く、それに伴つて各群の細菌密度が高いという、有機汚染・油濁の複合汚染水域における細菌群の分布特性を示している。これに対し、スコアが z_1 の負域、 z_2 の中間域に分布する HN では両汚染レベルが低く、それに伴つて各群の細菌密度が低いという、汚染の軽微な一般の自然水域における細菌群の分布特性を示している。一方、BS は z_1 の中間域、 z_2 の負域という特異な分布特性を示している。これは BS が IW に比べて、有機汚染レベルで等しいかそれ以上であるにもかかわらず、 d_h が約 1/10 と少なく、 d_b に差がないために z_2 スコアが負域に分布したからである。この特異な分布特性は、BS が重油汚染水域であることから、重油流出事故発生から約 1 年後の調査であるにもかかわらず、この事故に伴う油濁の質的要素が明らかに影響したためと考えられる。

以上述べたように、主成分分析によつて沿岸海域における水域別の細菌群の分布特性をよく解析することができたが、有機汚染・油濁の複合汚染の指標細菌群としては、H および B が適しており、両群の分布を検討することで十分であると考えられる。

要 約

汚染程度の異なる岩国水域、備讃瀬戸および響灘について、海水中の従属栄養細菌や炭化水素酸化細菌 A 群および B 群の密度 (それぞれ d_h 、 d_a および d_b と略称) と環境因子との関係を推計学的に明らかにした。さらに、これら細菌群の分布特性が水域によつてどのように異なるかを、主成分分析を用いて解析した。これらの結果を要約すれば、次のとおりである。

1. 単相関分析の結果、油分濃度 (d_p)、塩素量 ($\sqrt{19-Cl}$)、COD および水温の環境因子相互間には、

おおむね高い相関が認められた。このうち、CODと d_p との相関のみが有意とならず、一方、 $\sqrt{19-Cl}$ はCODや d_p に対して有意な相関を示したので、有機汚染および油濁の指標とすることができる。また、各環境因子と各群の細菌密度間および各細菌密度相互間には、一般に高い相関が認められた。

2. 各環境因子と各細菌密度との相関の水域による差異を、水域をダミー変数として組み入れた偏回帰分析によつて解析したところ、とくに d_p に対する d_a および d_b の回帰では、ダミー変数の回帰係数は有意とみなされず、どの水域でも共通の回帰関係が認められた。一方、 $\sqrt{19-Cl}$ に対する各細菌密度の回帰におけるダミー偏回帰係数はいずれも有意となり、水域による差異が明らかになった。

3. 細菌群の水域別分布の特性を主成分分析によつて解析したところ、第1主成分 α_1 および第2主成分 α_2 を軸とするスコアの散布図によつて、有機汚染と油濁が複合した沿岸海域における分布特性を約96% (累積寄与率)まで解釈でき、水域別の細菌群分布の特徴をよく示すことができた。

終わりに、推計学的処理および結果の解析について、懇切なご指導を戴いた水産大学校前田 弘教授に深く謝意を表す。また、水産大学校微生物学研究室の卒論学生であつた伊藤文雄、清水一夫、下地義久および吉田忠男の諸君が実験に協力された。併記して謝意を述べる。なお、研究費の大半は、環境庁水島重油流出事故漁業影響調査費および農林水産生態系における汚染物質の循環と指標生物に関する研究費によつた。

文 献

- 1) 村上正忠・藤沢浩明・真鍋武彦：日水誌，**45**，1091-1098 (1979).
- 2) 藤沢浩明・村上正忠・真鍋武彦：日水誌，**44**，91-104 (1978).
- 3) 藤沢浩明・村上正忠・真鍋武彦：日水誌，**43**，659-668 (1977).
- 4) 村上正忠・藤沢浩明：水大校研報，**26**，299-311 (1978).
- 5) 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉沢 正：多変量解析法，日科技連出版社，東京，1977，pp. 112-128.
- 6) 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉沢 正：多変量解析法，日科技連出版社，東京，1977，pp. 159-257.