

英虞湾の水質環境の特徴および長期変動

増田 健・山形陽一・畑 直亜

キーワード：英虞湾，水質，長期モニタリング

熊野灘沿岸の北部に位置する英虞湾は、湾口が西向きの東西に長い湾である。また、多くの支湾に分かれ、湾口部や湾中央部など湾内各所に浅瀬があるというリアス式海岸特有の複雑な地形を有する。太平洋に面しているが、太平洋からくる波の進行方向と湾口の向きが異なるため、志摩半島により遮られて湾内に直接入ることは少ない。これらの地形的な特長により、英虞湾は閉鎖的で穏やかな海域となっており、真珠養殖発祥の地として古くから真珠養殖業が行われている。

一方、英虞湾は複雑な地形のために海水交換が悪く、汚染が進行しやすいという特徴も持っている。このため、生活廃水の流入や長年にわたる真珠養殖漁場としての利用等の影響により汚染の進行が懸念され、水産研究部（旧水産試験場，水産技術センター）では英虞湾全域を対象として1976年から汚染状況の長期的監視を目的とした水質および底質のモニタリングを実施してきた。この調査の一部は、志摩郡の阿児町，志摩町，大王町および

浜島町の4町で運営されている英虞湾汚染対策協議会からの委託事業として実施されているため、年度ごとに調査結果が報告されている。しかし、蓄積された調査結果に対する総合的な解析は不十分である。そこで、中西らほか（2001）は底質の調査結果についてとりまとめを行い、汚染が深刻な状況であること、汚染が進行状態にあることを指摘した。水質についても、夏季に湾奥部を中心として貧酸素水の発生（西村らほか1994，水産技術センター，1997）が確認されており、底質同様汚染の進行がうかがわれる。これらから、本報では汚染状況の長期的監視を目的とした水質モニタリングの結果を用いて、英虞湾全域における夏季と冬季の水質環境の特徴および水質の長期変動傾向について解析した。

方 法

1981年～2002年の間に英虞湾の19～20測点（図1）で夏季（8月2日～9月1日）と冬季（10月24日～12月24日）

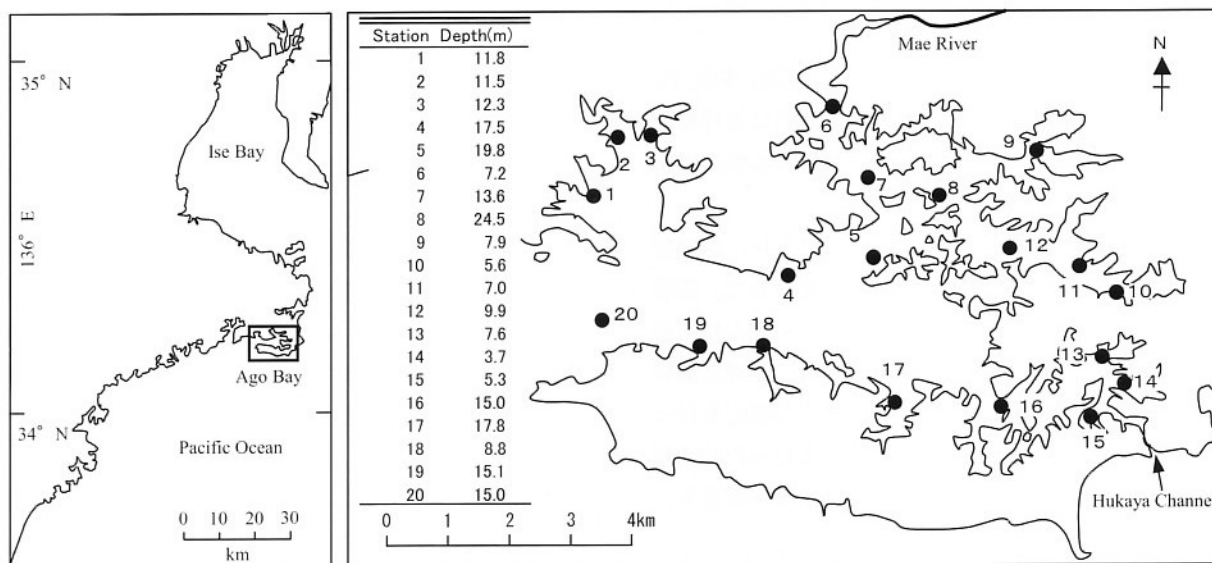


図1 英虞湾測点図

の年2回、表層（0 m層）と底層（B-1m層）で行った水温、塩分、溶存酸素量（以下DOとする）、COD、DIN、PO₄-PおよびChl. *a*の7項目の測定および分析結果を解析に用いた。各項目の測定機器および方法は、表1に示した。

表1 各項目の測定機器および方法

項目	期間	測定機器および方法
水温	1981年～1990年	YSI model57
	1991年～1996年	YSI model58
	1997年～2002年	アレック電子 ALC 1150-DK
塩分	1981年～1996年	EIL MC5/2型
	1997年～2002年	アレック電子 ALC 1150-DK
DO	1981年～1990年	YSI model57
	1991年～2002年	YSI model58
COD	1981年～2002年	アルカリ法
DIN, PO ₄ -P	1982年～1997年	試水をWhatman GF/Cフィルターでろ過後 Strickland and Parsons(1972)の方法で測定
	1998年～2002年	試水をWhatman GF/Cフィルターでろ過後 BRAN+RUEBBE TRAACS 800TMで測定
Chl. <i>a</i>	1982年～1997年	試水をWhatman GF/Cフィルターでろ過後 90%アセトンで抽出し、蛍光法で測定
	1998年～2002年	アレック電子 ALC 1150-DK

各測点間の類似性を把握するため、表層と底層の2層で観測を行った19測点（St. 8は底層の観測を行っていない）について、夏季と冬季における表層および底層それぞれの7項目の平均値を用いてクラスター解析（標準化ユークリッド平方距離を用いたウォード法）による測点のグループ分けを試みた。

さらに、各測点の観測項目についてトレンドの解析（kendall型）により測定期間における長期変動について解析を行った。

結 果

夏季と冬季における水温、塩分、DO、DIN、PO₄-P、CODおよびChl. *a*の7項目について、各測点における表層と底層の平均値を表2-1（夏季）、表2-2（冬季）に示した。

夏季の水温は、表層では26.9～29.3℃であり、湾口付近で最も低く、湾奥ほど高くなる傾向が見られた。底層は22.4～27.5℃であり、水深が深いほど低くなる傾向が見られたが、測点間の差は明確でなかった。表層と底層の水温の差は4.0±2.1℃であった。底層での測定を行った8年のうち、台風13号通過直後に観測を行った2002年以外の年は60%以上の測点で3℃以上の水温差が有り、温度成層が確認された。

冬季の水温は、表層では13.3～17.7℃であり、夏季とは逆に湾口付近で最も高く、湾奥ほど低くなった。底層

は14.0～16.7℃であり、水深が深く湾口部に近い測点で高い傾向が見られた。表層と底層の水温の差は0.7±1.5℃であった。

夏季の塩分は、表層では27.6～32.4であり、湾口付近で最も高く、湾奥ほど低くなる傾向が見られた。中でも、前川に近いSt. 6、St. 7が最も低かった。また、この2点は、他の測点に比べて標準偏差が高かった。これは、降雨等による河川水量の変動が影響しているためであると思われる。底層の塩分は33.2～34.1であり、St. 4やSt. 5のように水深が深い測点で高く、St. 14のように水深が浅い測点で低くなる傾向を示した。また、表層と同じく湾口付近のSt. 19と20でも高い値が見られた。

冬季の塩分は表層で29.9～33.4であった。冬季も湾口付近で塩分が最も高く湾奥で低い傾向が見られたが、夏季に比べるとその差は小さかった。底層では33.0～34.2であった。冬季の底層の塩分も夏季と同じく水深が深くなるほど高くなる傾向が見られたが、夏季ほど明確なものではなかった。

夏季のDOは、表層で6.7～7.6mg・L⁻¹、底層で2.3～6.9mg・L⁻¹であった。底層においては、DOがしばしば低下し、St. 14以外の18測点では最も値が低い時には3mg・L⁻¹以下の貧酸素状態となった。

冬季には表層で7.4～8.1mg・L⁻¹、底層で7.2～8.1mg・L⁻¹であり、表層、底層ともに高い酸素量が保たれていた。

DINは、夏季には表層で1.25～4.27μM、底層で0.89～6.22μMであり、冬季には表層で3.99～13.94μM、底層で1.51～3.13μMであった。DINは年による変動が大きく、冬季の表層では標準偏差が平均値の1.86～3.52倍とその傾向が顕著であった。また、表層では夏季と冬季ともにSt. 6が最も高かった。

PO₄-Pは、夏季には表層で0.11～0.61μM、底層で0.23～1.51μMであり、冬季には表層で0.28～1.23μM、底層で0.20～0.34μMであった。PO₄-PもDINと同様に年による変動が大きく、標準偏差が平均値の1.74～3.26倍と冬季の表層で特に変動が大きい点も同様であった。

CODは、夏季には表層で1.34～2.30mg O₂・L⁻¹、底層で0.78～1.74mg O₂・L⁻¹であり、冬季には表層で1.03～1.30mg O₂・L⁻¹、底層で0.56～0.78mg O₂・L⁻¹であった。全測点で表層、底層ともに冬季よりも夏季の方が高い値を示した。

Chl. *a*は、夏季には表層で1.4～7.0μg・L⁻¹、底層で1.1～5.1μg・L⁻¹であり、冬季には表層で0.8～1.7μg・L⁻¹、底層で0.8～1.1μg・L⁻¹であった。

これら7項目の平均値を用いたクラスター解析の結果

表2-1 英虞湾における夏季の水温, 塩分, DO, DIN, PO₄-P, CODおよびChl. *a*の平均値

Depth	Temperature(°C)	Salinity	DO(mg·L ⁻¹)	DIN(μ M)	PO ₄ -P(μ M)	COD(mgO ₂ ·L ⁻¹)	Chl. <i>a</i> (μ g·L ⁻¹)
0m							
Station	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD
1	27.9 ± 1.8	32.0 ± 2.0	7.2 ± 0.9	1.83 ± 1.49	0.11 ± 0.12	1.71 ± 0.79	3.2 ± 4.7
2	28.5 ± 2.0	31.8 ± 2.5	7.1 ± 1.2	1.48 ± 1.15	0.17 ± 0.28	1.65 ± 0.64	2.7 ± 3.1
3	28.4 ± 2.0	32.1 ± 1.9	6.9 ± 0.9	1.44 ± 0.95	0.15 ± 0.23	1.56 ± 0.73	2.6 ± 2.5
4	28.1 ± 1.9	31.8 ± 2.0	7.1 ± 1.0	1.26 ± 0.72	0.19 ± 0.40	1.62 ± 0.64	1.9 ± 1.8
5	28.1 ± 1.9	31.2 ± 2.5	7.2 ± 1.2	1.50 ± 1.17	0.19 ± 0.27	1.73 ± 0.84	3.4 ± 7.1
6	29.3 ± 2.3	27.6 ± 5.4	7.6 ± 1.5	4.27 ± 8.00	0.61 ± 0.58	2.30 ± 0.96	6.8 ± 6.1
7	28.7 ± 2.0	29.0 ± 5.4	7.4 ± 1.1	2.66 ± 5.11	0.27 ± 0.30	1.70 ± 0.83	4.2 ± 8.8
8	28.3 ± 2.0	31.2 ± 2.5	7.1 ± 1.1	1.65 ± 1.22	0.22 ± 0.28	1.69 ± 0.62	2.5 ± 2.4
9	28.9 ± 2.2	30.0 ± 3.7	7.0 ± 1.1	1.94 ± 2.68	0.31 ± 0.41	1.77 ± 0.59	2.9 ± 2.1
10	28.8 ± 1.8	31.1 ± 3.3	7.0 ± 1.3	1.75 ± 2.55	0.43 ± 0.51	1.86 ± 0.65	2.7 ± 1.8
11	28.6 ± 1.8	31.5 ± 2.5	7.1 ± 1.4	1.43 ± 1.96	0.38 ± 0.42	1.83 ± 0.70	2.2 ± 1.6
12	28.4 ± 1.8	31.8 ± 2.2	7.0 ± 1.1	1.25 ± 0.86	0.28 ± 0.35	1.66 ± 0.82	1.6 ± 0.8
13	28.4 ± 1.7	32.0 ± 1.8	6.9 ± 1.1	1.47 ± 1.13	0.19 ± 0.34	1.56 ± 0.68	2.2 ± 2.1
14	28.3 ± 2.1	31.9 ± 1.8	7.4 ± 1.4	1.76 ± 1.31	0.25 ± 0.46	1.76 ± 0.74	5.0 ± 4.0
15	28.0 ± 1.9	31.3 ± 2.3	6.9 ± 0.9	2.68 ± 2.42	0.22 ± 0.29	1.81 ± 0.71	7.0 ± 11.3
16	27.9 ± 2.0	32.4 ± 1.6	6.9 ± 1.2	1.55 ± 1.03	0.15 ± 0.20	1.34 ± 0.51	1.4 ± 1.2
17	27.5 ± 1.8	32.4 ± 1.7	7.1 ± 1.5	1.86 ± 1.23	0.15 ± 0.20	1.41 ± 0.64	1.8 ± 1.5
18	27.5 ± 1.6	32.1 ± 2.0	6.8 ± 0.9	1.93 ± 1.46	0.16 ± 0.20	1.54 ± 0.62	2.0 ± 2.2
19	27.1 ± 1.6	32.3 ± 2.0	6.7 ± 0.8	2.28 ± 1.41	0.18 ± 0.26	1.42 ± 0.64	1.5 ± 1.9
20	26.9 ± 1.7	32.3 ± 2.0	7.1 ± 0.9	1.74 ± 1.38	0.11 ± 0.14	1.38 ± 0.52	1.4 ± 1.4

Depth	Temperature(°C)	Salinity	DO(mg·L ⁻¹)	DIN(μ M)	PO ₄ -P(μ M)	COD(mgO ₂ ·L ⁻¹)	Chl. <i>a</i> (μ g·L ⁻¹)
B-1m							
Station	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD
1	24.2 ± 1.3	33.7 ± 0.5	3.2 ± 1.6	4.04 ± 2.93	1.00 ± 0.29	0.96 ± 0.34	3.1 ± 2.4
2	24.2 ± 1.5	33.6 ± 0.5	2.8 ± 1.7	6.17 ± 5.49	1.51 ± 0.62	0.96 ± 0.36	3.1 ± 2.6
3	23.9 ± 1.4	33.8 ± 0.4	2.1 ± 1.2	6.22 ± 5.62	1.43 ± 0.48	1.08 ± 0.37	3.1 ± 2.2
4	22.6 ± 1.4	34.1 ± 0.5	4.0 ± 1.7	3.86 ± 2.09	0.54 ± 0.24	0.78 ± 0.48	2.1 ± 1.4
5	22.4 ± 1.3	34.1 ± 0.4	3.3 ± 1.7	4.97 ± 2.41	0.82 ± 0.25	0.86 ± 0.48	1.6 ± 1.3
6	25.1 ± 1.5	33.6 ± 0.7	3.7 ± 1.7	2.32 ± 2.56	0.90 ± 0.78	1.42 ± 0.41	4.6 ± 2.5
7	23.4 ± 1.3	33.9 ± 0.6	3.4 ± 1.4	4.26 ± 3.88	0.91 ± 0.56	1.05 ± 0.57	2.3 ± 1.4
8							
9	25.0 ± 1.1	33.6 ± 0.7	3.3 ± 1.7	1.92 ± 1.69	0.82 ± 0.66	1.20 ± 0.38	4.5 ± 2.8
10	26.0 ± 1.3	33.3 ± 0.8	3.3 ± 1.6	0.89 ± 0.40	0.79 ± 0.58	1.74 ± 0.47	5.1 ± 2.3
11	25.2 ± 1.3	33.4 ± 0.8	2.8 ± 2.3	1.96 ± 2.23	0.85 ± 0.79	1.45 ± 0.55	3.4 ± 1.8
12	24.2 ± 1.2	33.7 ± 0.7	3.1 ± 2.1	1.90 ± 2.87	0.75 ± 0.54	1.19 ± 0.33	3.4 ± 3.2
13	25.3 ± 1.2	33.5 ± 0.6	5.2 ± 1.1	1.89 ± 1.93	0.53 ± 0.54	1.14 ± 0.24	3.4 ± 1.5
14	27.5 ± 1.6	33.2 ± 0.7	6.9 ± 1.6	1.34 ± 1.04	0.23 ± 0.11	1.33 ± 0.76	2.5 ± 1.6
15	25.9 ± 1.4	33.4 ± 0.8	5.3 ± 1.1	1.12 ± 0.39	0.30 ± 0.23	1.31 ± 0.34	3.5 ± 1.9
16	23.0 ± 1.2	33.9 ± 0.5	2.3 ± 1.2	5.26 ± 3.90	1.33 ± 0.58	0.97 ± 0.35	3.0 ± 3.5
17	22.4 ± 1.3	34.1 ± 0.5	2.8 ± 1.6	5.51 ± 3.26	0.88 ± 0.45	0.98 ± 0.32	1.9 ± 1.6
18	24.3 ± 0.9	33.7 ± 0.7	5.3 ± 1.9	1.89 ± 1.83	0.28 ± 0.11	0.85 ± 0.25	1.7 ± 0.5
19	22.8 ± 1.7	34.1 ± 0.4	4.9 ± 1.5	3.03 ± 2.74	0.36 ± 0.16	0.81 ± 0.28	2.0 ± 1.3
20	22.6 ± 1.4	34.1 ± 0.4	5.7 ± 1.6	2.39 ± 1.89	0.29 ± 0.11	0.90 ± 0.26	1.1 ± 0.7

0m層の水温, 塩分, DOおよびCODについては1981~2002年(1992年は除く), DINおよびPO₄-Pについては1982~2002年(1992年は除く), Chl. *a*については1982~1990年および1994~2002年のデータを用いた。
 B-1m層は, 1994年および1996~2002年のデータを用いた。

表2-2 英虞湾における冬季の水温, 塩分, DO, DIN, PO₄-P, CODおよびChl. *a*の平均値

Temperature(°C)		Salinity	DO(mg・L ⁻¹)	DIN(μ M)	PO ₄ -P(μ M)	COD(mgO ₂ ・L ⁻¹)	Chl. <i>a</i> (μ g・L ⁻¹)
Depth	0m						
Station	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD
1	16.2 ± 1.9	33.3 ± 1.6	7.7 ± 0.8	6.80 ± 22.05	0.75 ± 2.31	1.21 ± 0.74	1.7 ± 2.1
2	15.7 ± 2.0	32.6 ± 2.4	7.7 ± 0.7	5.17 ± 14.61	0.65 ± 1.89	1.20 ± 0.62	1.4 ± 1.5
3	16.1 ± 1.9	32.8 ± 2.1	7.6 ± 0.7	5.83 ± 16.97	0.70 ± 2.10	1.17 ± 0.66	1.4 ± 1.5
4	16.7 ± 2.1	33.2 ± 1.7	7.5 ± 0.6	4.19 ± 9.40	0.54 ± 1.29	1.20 ± 0.65	0.9 ± 0.7
5	16.0 ± 2.0	33.0 ± 1.6	7.6 ± 0.6	4.63 ± 12.73	0.64 ± 1.75	1.23 ± 0.66	1.2 ± 1.1
6	15.4 ± 2.5	30.1 ± 6.1	7.8 ± 1.1	13.94 ± 26.61	1.23 ± 3.05	1.30 ± 0.67	1.2 ± 1.6
7	15.3 ± 2.3	32.5 ± 1.7	7.8 ± 0.8	5.97 ± 14.95	0.73 ± 1.95	1.09 ± 0.60	1.3 ± 1.3
8	15.1 ± 2.5	32.6 ± 1.6	7.7 ± 0.7	6.34 ± 19.76	0.65 ± 1.75	1.13 ± 0.57	1.0 ± 1.1
9	14.4 ± 2.8	31.5 ± 2.0	7.8 ± 0.6	10.63 ± 37.10	0.68 ± 1.88	1.27 ± 0.58	1.4 ± 2.4
10	13.3 ± 2.6	29.9 ± 4.1	8.1 ± 0.7	8.84 ± 29.47	0.28 ± 0.49	1.28 ± 0.60	1.3 ± 1.3
11	13.9 ± 2.4	31.1 ± 2.9	8.0 ± 0.7	7.12 ± 25.64	0.42 ± 0.98	1.29 ± 0.65	1.1 ± 1.0
12	14.6 ± 2.5	32.3 ± 1.6	7.9 ± 0.7	4.74 ± 14.88	0.58 ± 1.53	1.26 ± 0.71	1.2 ± 1.2
13	14.7 ± 1.9	32.5 ± 1.5	7.8 ± 0.5	5.60 ± 16.15	0.71 ± 2.11	1.24 ± 0.74	1.0 ± 0.6
14	14.2 ± 2.1	32.0 ± 1.9	7.8 ± 0.5	12.16 ± 37.69	1.20 ± 4.01	1.27 ± 0.69	0.9 ± 0.5
15	14.5 ± 2.0	32.1 ± 1.8	7.7 ± 0.6	10.17 ± 30.10	1.07 ± 3.22	1.15 ± 0.62	1.1 ± 1.0
16	14.9 ± 1.9	32.6 ± 1.8	7.9 ± 0.5	3.99 ± 9.82	0.65 ± 1.75	1.04 ± 0.57	0.9 ± 0.6
17	15.6 ± 1.8	32.8 ± 1.8	7.7 ± 0.5	4.96 ± 13.77	0.62 ± 1.61	1.16 ± 0.63	1.1 ± 0.6
18	16.6 ± 2.0	33.3 ± 1.3	7.4 ± 0.6	4.70 ± 11.18	0.63 ± 1.67	1.13 ± 0.52	0.8 ± 0.5
19	16.9 ± 2.0	33.4 ± 1.5	7.4 ± 0.6	4.44 ± 10.05	0.58 ± 1.53	1.03 ± 0.54	0.9 ± 0.8
20	17.7 ± 1.9	33.3 ± 2.2	7.7 ± 0.7	4.17 ± 9.90	0.58 ± 1.53	1.06 ± 0.61	1.1 ± 1.2

Temperature(°C)		Salinity	DO(mg・L ⁻¹)	DIN(μ M)	PO ₄ -P(μ M)	COD(mgO ₂ ・L ⁻¹)	Chl. <i>a</i> (μ g・L ⁻¹)
Depth	B-1m						
Station	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD	MEAN ± SD
1	15.2 ± 1.5	33.8 ± 0.6	7.6 ± 0.6	1.59 ± 2.10	0.23 ± 0.12	0.62 ± 0.22	1.0 ± 0.6
2	15.1 ± 1.5	33.8 ± 0.5	7.5 ± 0.7	1.51 ± 1.92	0.20 ± 0.12	0.78 ± 0.42	1.1 ± 0.6
3	15.3 ± 1.5	33.9 ± 0.5	7.5 ± 0.7	1.58 ± 2.04	0.21 ± 0.10	0.76 ± 0.40	1.1 ± 0.6
4	16.2 ± 1.8	34.0 ± 0.4	7.4 ± 0.5	1.97 ± 2.57	0.21 ± 0.10	0.67 ± 0.37	0.9 ± 0.4
5	16.1 ± 2.0	33.8 ± 0.3	7.4 ± 0.6	1.72 ± 1.83	0.22 ± 0.12	0.70 ± 0.37	0.9 ± 0.6
6	15.5 ± 2.1	33.6 ± 0.3	7.3 ± 0.8	2.27 ± 1.84	0.27 ± 0.15	0.65 ± 0.13	1.1 ± 0.6
7	15.7 ± 2.0	33.8 ± 0.4	7.3 ± 0.6	1.84 ± 1.68	0.22 ± 0.16	0.69 ± 0.31	0.9 ± 0.5
8							
9	15.0 ± 2.4	33.5 ± 0.4	7.4 ± 0.9	2.01 ± 1.82	0.25 ± 0.16	0.72 ± 0.34	0.8 ± 0.4
10	14.3 ± 2.8	33.1 ± 0.4	7.2 ± 1.6	1.99 ± 2.55	0.23 ± 0.15	0.71 ± 0.12	0.8 ± 0.3
11	14.3 ± 2.2	33.2 ± 0.5	7.5 ± 1.0	2.17 ± 2.37	0.27 ± 0.18	0.63 ± 0.26	0.9 ± 0.4
12	14.9 ± 2.2	33.6 ± 0.6	7.6 ± 0.8	2.07 ± 1.73	0.27 ± 0.18	0.57 ± 0.24	0.8 ± 0.4
13	14.5 ± 1.9	33.5 ± 0.6	7.5 ± 0.8	2.76 ± 2.26	0.31 ± 0.19	0.58 ± 0.17	0.9 ± 0.4
14	14.0 ± 1.4	33.0 ± 1.0	8.1 ± 0.5	2.99 ± 2.33	0.32 ± 0.16	0.56 ± 0.15	0.9 ± 0.4
15	14.9 ± 1.6	33.4 ± 0.8	7.4 ± 0.7	3.13 ± 2.22	0.34 ± 0.16	0.60 ± 0.28	1.0 ± 0.6
16	15.1 ± 2.3	33.6 ± 0.6	7.6 ± 0.7	1.93 ± 1.80	0.31 ± 0.20	0.66 ± 0.39	0.8 ± 0.4
17	15.6 ± 1.9	33.8 ± 0.6	7.5 ± 0.6	1.91 ± 1.76	0.29 ± 0.18	0.62 ± 0.20	1.0 ± 0.5
18	16.5 ± 1.9	34.0 ± 0.6	7.3 ± 0.6	2.16 ± 1.63	0.29 ± 0.19	0.68 ± 0.46	0.7 ± 0.3
19	16.3 ± 1.8	34.1 ± 0.5	7.5 ± 0.6	1.95 ± 1.53	0.28 ± 0.18	0.72 ± 0.47	0.8 ± 0.3
20	16.7 ± 1.6	34.2 ± 0.4	7.6 ± 0.6	1.99 ± 1.37	0.30 ± 0.17	0.76 ± 0.26	0.8 ± 0.3

0m層の水温, 塩分, DOおよびCODについては1981~2002年, DINおよびPO₄-Pについては1982~2002年, Chl. *a*については1982~1990年および1994~2002年のデータを用いた。
 B-1m層は, 1994年および1996~2002年のデータを用いた。

を図2に示す。St. 1, 2, 3, 4, 5, 7, 16および17が属する第1グループ、St.18, 19および20が属する第2グループ、St. 9, 10, 11, 12および13が属する第3グループ、St.14および15が属する第4グループ、そしてSt.6だけで構成される第5グループの5つのクラスターに分かれた。また、第1と第2グループ、第3、第4と第5グループがそれぞれ近いクラスターに分かれた。

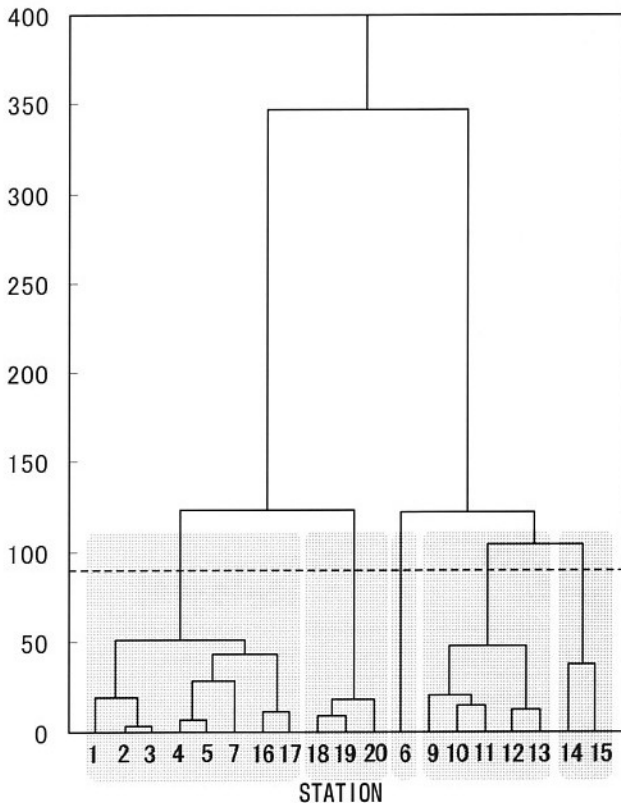


図2 クラスター解析(Ward method)によるデンドログラム 19測点について、夏季と冬季における表層および底層それぞれの水温、塩分、DO、DIN、 $PO_4\text{-P}$ 、CODおよびChl.aの平均値を用いてクラスター解析(Ward method)により5つのグループに分けた。

次に各測定項目の各年における全測点平均値の経年変化を、夏季と冬季に分けて示した(図3)。

水温は表層では夏季、冬季ともに年により大きく変動した。特に、夏季においては、各年における測点間のばらつきよりも年による変動幅の方が大きい傾向が見られた。水温の年による変動は底層でも見られたが表層と比べると小さかった。

塩分も表層では夏季、冬季ともに年により大きく変動した。1983年や1984年等のように塩分が低下した測点がある年に測点間のばらつきが大きくなった。

Chl.aも年により大きく変動し、明確な経年変化は見

られなかった。

DINおよび $PO_4\text{-P}$ は、まれに高い値を示し測点間の差が大きい年が見られた。特に、1990年冬季にはDINが $91.21\mu\text{M}$ 、 $PO_4\text{-P}$ が $9.22\mu\text{M}$ と例年に比べて極めて高い値を示した。

CODは他の項目とは異なり、明確な経年変化が見られた。1980年代後半から1991年には $2\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$ 前後の高い値が見られたが、1993年以降は減少に転じた。近年は大きな増減は無く、夏季の表層でも $1\text{mg O}_2\cdot\text{L}^{-1}$ 前後で推移している。

トレンドの解析により長期変動について解析を行ったところ、表層のCODは、夏季には全ての測点で有意な減少傾向(有意水準5%以下)が有り、冬季も測点9以外では有意な減少傾向が有った。また、各測点での値の高低は有るが、測点間での明確な長期変動の傾向の違いは見られなかった。表層の他の6項目および底層の全項目では、表層のCODのような明確な増減傾向は見られなかった。

考 察

測点のグループ分け

水質によるクラスター解析によって分けられた5つのグループを図4に示す。第5グループはSt.6だけで形成されており、表層の塩分が最も低く、表層のDINおよび $PO_4\text{-P}$ が高く、表層底層ともにCODが高いといった特徴が見られる。英虞湾で最も流量が大きい河川である前川が近いことから、陸域から河川水として淡水と共にDIN、 $PO_4\text{-P}$ およびCOD上昇の原因となる有機物が流入したためであると考えられる。

第4グループの測点(St.14, 15)は、深谷水道による外洋との海水交換があること及び水深が浅いことが特徴で、他のグループと比較して底層で塩分が低く、DOが高い。また、水温は全層で夏季に高く冬季に低い。第3グループ(St.9~13)は、湾奥部に位置する測点のうち、河川や水道による水の流入や交換が見られない測点で構成されている。第5グループほどではないが全層の塩分が低く、水温が夏季に高く冬季に低い。また、夏季の表層ではDINが低く、同じく夏季の底層ではDOが低いという特徴も見られた。St.13は、地形上他の4測点とやや離れているが、同じ枝湾にある第4グループとは深谷水道の影響度と水深の違いによって別のグループになった。

第2グループ(St.18, 19および20)は、湾口付近の測点により形成されている。このグループの特徴は、塩

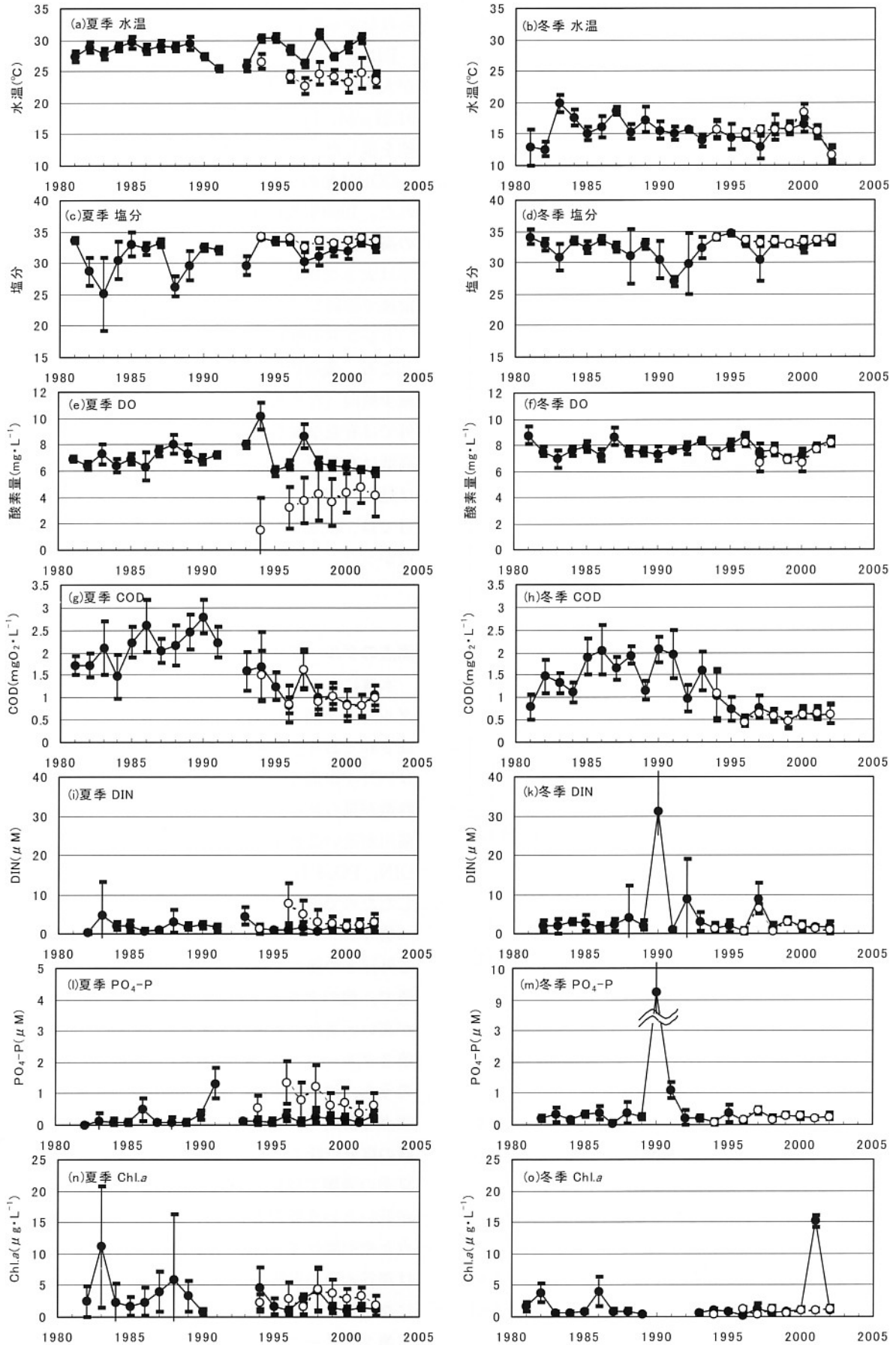


図3 水温、塩分、DO、COD、DIN、PO₄-PおよびChl. aの全測点平均値経年変化
 黒丸：0m 白丸：B-1m

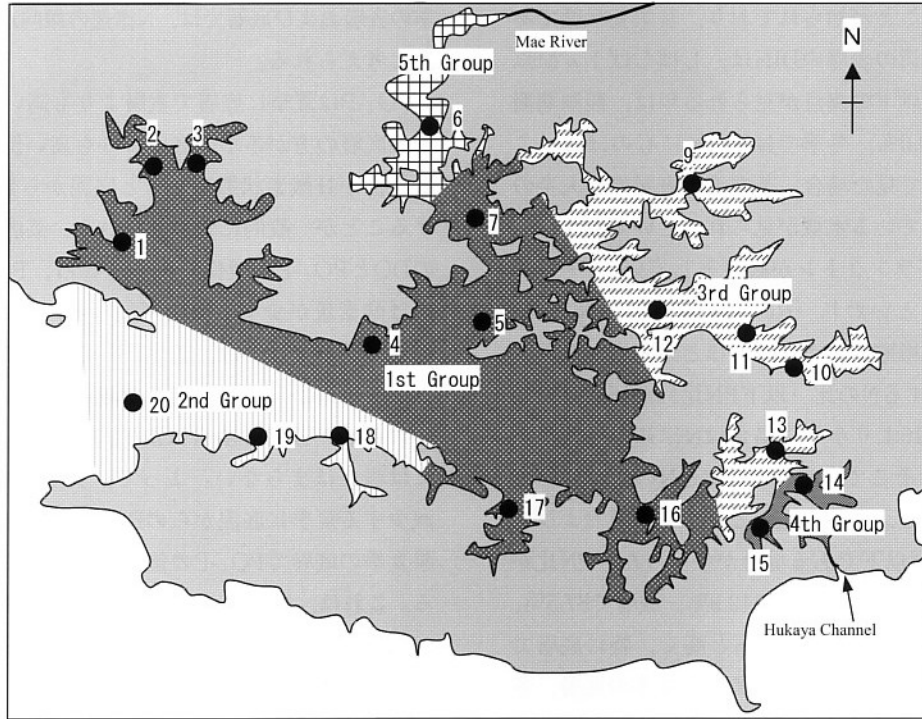


図4 クラスタ解析結果による測点のグループ分け

分が高く、CODが低く、Chl. *a*が低いことである。また、表層の水温が他のグループと比較して夏季に低く冬季に高い傾向も見られた。これらの特徴は、湾外水の影響を受けていることを示している。

第1グループは、湾中央部付近に位置するSt. 4, 5, 7, 16および17と湾口部に近い枝湾にあるSt. 1, 2および3により構成されている。表層の水温や塩分等を見ると第2グループと第3グループの中間的な値を示している。また、底層で他の測点と比較してDINおよびPO₄-Pが夏季に高く冬季に低い傾向が見られるのも特徴である。

この5つのグループは、湾の地形から見た分類とほぼ合致している。しかし、St. 6とSt. 7やSt. 13とSt. 14, 15のように、地形的や一部の項目からは同じグループに属しているように見える測点が異なるグループに属している部分が見られた。観測を行う測点を設定する際には地形的な特徴だけで決めてしまうことがあるが、英虞湾の場合は注意が必要である。

この調査の測点はSt. 1～3やSt. 10～12等同じグループに属していて地形的にも近い測点がある。一方、St. 3とSt. 4の間のように測点がまばらにしかない水域があり、測点の配置には改善すべき部分がある。

栄養塩

英虞湾の表層におけるDINは、夏季には1.25～4.27 μM、冬季には3.99～13.94 μMであり、PO₄-Pは、夏季には0.11～0.61 μM、冬季には0.28～1.23 μM、であった。英虞湾と同じく真珠養殖業が行われている宇和海における6月～9月の表層のDINおよびPO₄-Pは、それぞれ0.2～10.4 μMと0.03～0.84 μM（山下らほか2002）であり、英虞湾の栄養塩の状態と大きな差はないといえる。

次に一般的に富栄養とされている海域との比較を試みた。東京湾の表層では、NO₃-NとNH₄-Nの合計が1年のほとんどの期間で100 μM程度の値である一方、PO₄-Pは3 μM以上から0.1 μM以下の枯渇状態まで見られる（磯部 2002）。大阪湾でのDINおよびDIPの周年変化は、DINは5.5～27.3 μM、DIPは0.14～1.33 μMである（堀らほか1998）。伊勢湾白子付近における7月～8月の表層での栄養塩は、DINが2.3～42.1 μM、DIPが0.04～1.39 μMであり（水産技術センター、1985）、伊勢湾全域におけるDINとPO₄-Pは1月～3月ではDINが1.0～57.9 μMであり、PO₄-Pが0.06～2.13 μMである（水産研究部鈴鹿水産研究室ほか2003）。一般に富栄養といわれているこれらの海域と比較すると英虞湾は栄養塩が少ない海域であり、特にDINは低い傾向にあると考えられる。一般にDINが1 μM以下になると増殖が抑えられる植物プ

ランクトンが多いことが知られており、貧栄養状態であるとされる。英虞湾の表層のDINは、しばしば $1\ \mu\text{M}$ 以下となり、 $1\ \mu\text{M}$ 以下の測点が見られる年は、観測期間のうち夏季では80.0%、冬季では66.7%にものぼる。このことから、DINで見た場合、英虞湾の表層では大半の年で貧栄養となっている水域が見られるといえる。

一般に、植物プランクトンが必要としているPとNの比は1:16であるといわれ (Redfield et al., 1963) 植物プランクトンの増殖が抑えられるほど栄養塩が低下する海域ではPに対するNの比 (以下PN比) が16より大きい場合はP律速、16より小さい場合はN律速の海域であるとされている。そこで英虞湾でのPとNの比について比較してみたところ、夏季の底層と冬季の表層および底層では、PN比が16以下である場合が多かった。PN比が10以下の出現率は、夏季は表層で42.9%、底層で87.5%、冬季は表層で60.5%、底層で72.7%と高く、特に底層で顕著であった。これらから、英虞湾では夏季の底層、冬

季の表層および底層では、N律速の傾向がある状態であったと考えられる。

$\text{PO}_4\text{-P}$ は夏季に底層で表層よりも高い値が見られ、夏季の底層の方が冬季の底層よりも高い値が見られた。底層付近が貧酸素状態になると底泥から無機態のPが溶出することが一般的に知られている。英虞湾における底層のDOと $\text{PO}_4\text{-P}$ の関係をみたところ、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の値が高い時は酸素量が少ない傾向が見られた (図6)。 $\text{PO}_4\text{-P}$ の増加の原因としては、底泥からの溶出のほかに湾口および深谷水道からの海水流入や河川水の流入の影響が考えられるが、後者の場合はDOも増加するため、この現象には当てはまらない。よって、英虞湾でも底層のDOが減少する夏季に底泥からの $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出があり、その結果夏季の底層で $\text{PO}_4\text{-P}$ の値が高くなっていると考えられる。これは、先に述べた夏季の底層がN律速の環境になっている原因のひとつでもあると思われる。

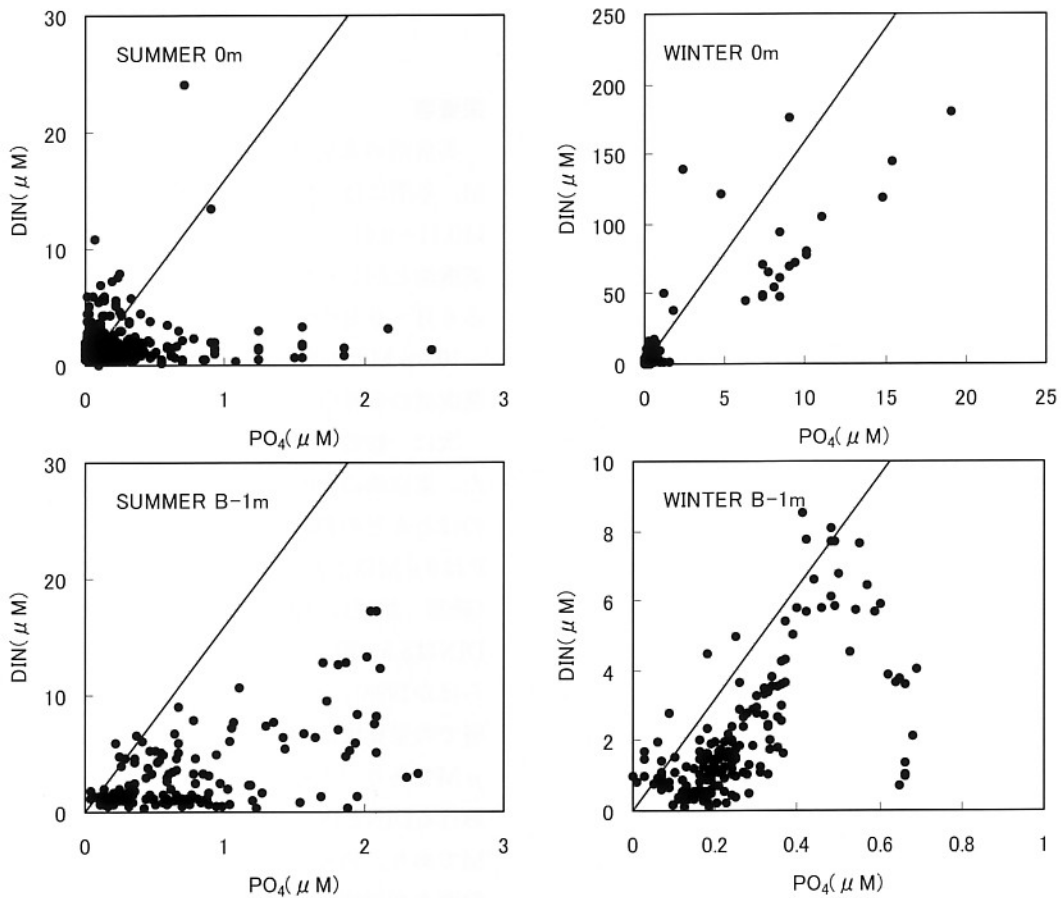


図5 夏季および冬季におけるPN比
ラインはP:N=1:16を示している

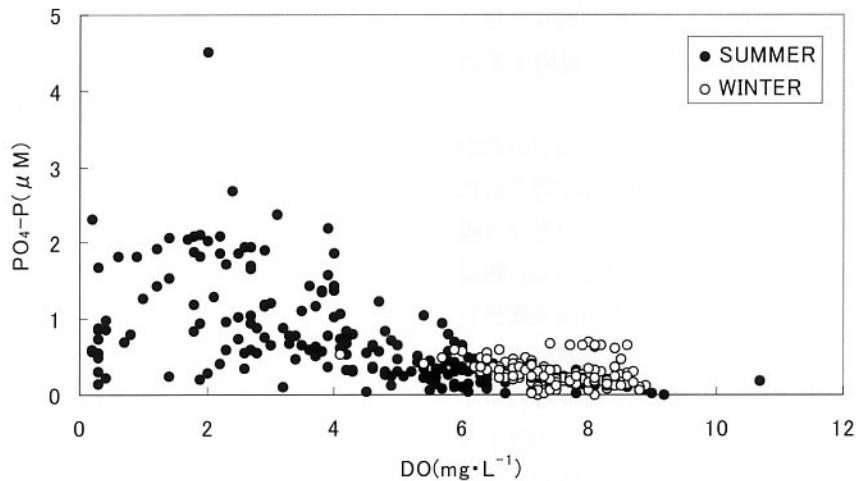


図6 底層におけるDOとPO₄-P

水質の長期変動

CODを除く各項目は年により変動が見られ、各年における測点間の最大値と最小値の差も変動した。中でもDINおよびPO₄-Pは極端に高い値が見られる年があり、1990年冬季には表層におけるDINとPO₄-Pの全測点平均値がそれぞれ91.21 μM、9.22 μMと大きな値を示した。これは、台風28号による11月29～30日の大雨の影響を受けて高い値となったと考えられる。同様に台風もしくは降雨の影響であると考えられる表層塩分の低下はしばしば確認されている。このように、英虞湾では水温、塩分、DO、DIN、PO₄-PおよびChl.*a*が天候や湾外水の影響を受けつつ、短期的に変動することが知られている（水産技術センター、1997）。また、夏季は8月2日～9月1日、冬季は10月24日～12月24日と年により観測時期が異なることも観測結果の変動に影響を与えている。しかし、短期的な環境変動や年による観測時期の違い等の影響を受けた観測結果に対しても、長期的な増減傾向の有無を調べることができるトレンドの解析を行った結果では、有意な増減傾向は見られなかった。よって、水温、塩分、DO、DIN、PO₄-PおよびChl.*a*は、1980年代から顕著な変化は見られないと判断された。

水産用水基準（2000年 日本水産資源保護協会）では、一般海域におけるCODは1 mg O₂ · L⁻¹以下が望ましいとしている。表層のCODは、かつては2 mg O₂ · L⁻¹前後と基準値を上回る高い値であったが、1990年代前半から減少傾向が見られ、近年は1 mg O₂ · L⁻¹前後と基準値付近まで減少したといえる。一方、底層のCODについては、表層とは異なり明確な減少傾向がなく、トレンドの解析においても有意な増減傾向はみられなかった。こ

れは、底層のCODの測定開始時期が1994年と既に減少が始まった後であったためと思われる。

CODが1993年以降に減少した要因としては、英虞湾内の漁場利用状況の変化や陸域からの負荷といった汚染負荷要因の変化が考えられる。漁場利用状況の変化の一つとしては、魚類養殖業が行われなくなったことがあげられる。英虞湾では、かつて湾口付近（浜島）で魚類養殖業が行われており、1983年にはブリ類70 tおよびマダイ60 tの水揚げがあった（三重県農林水産統計）。しかし、その後は減少し、1989年以降は魚類養殖業が行われなくなった。また、英虞湾で昔から盛んに行われてきた真珠養殖業は、貝掃除時にでの廃棄物の投棄やアコヤガイの糞等が汚染負荷要因のひとつとなっていることが指摘されている。この真珠養殖業についても最盛期に比べると近年規模の縮小が見られる。このことを、養殖規模の指標として真珠筏の台数でみると1981年には23,323台であったのが、1984年に最大28,108台に達した。その後も25,000台以上で推移したが、1990年以降は減少傾向を示し、1995年には1980年代前半並である23,541台であった。

魚類養殖業が行われなくなった点と真珠養殖業の規模が縮小傾向にある点から考えると、養殖による負荷は緩やかな減少傾向にあるのではないかと推察され、CODの減少に影響している可能性が考えられる。しかし、英虞湾は湾口部と湾奥部でCODの値が違うように湾口付近で行われている魚類養殖の影響は湾口部では強く湾奥部では弱かったと考えられ、英虞湾内全域のCODの減少を説明するには不十分であると考えられる。また、真珠養殖筏は英虞湾内全域に影響を与えるものの、1995年の筏

数は1984年の筏数から15.3%減少しただけであり、ピーク時の半分以下までCODが減少したことを説明するには不十分であると考えられる。

次に、陸域からの負荷の増減原因となりうるものの中には、人口の変化や生活排水処理率の上昇等が考えられる。三重県統計書によると4町の人口は、阿児町では緩やかな増加が見られるものの他の3町では減少し、観測期間中の4町の合計人口としては52,000人前後で推移し大きな変化は見られなかった。また、生活排水処理率についてみると、1997年および2001年において4町の中で最も高いのは阿児町であり、1997年は9.3%、2001年は55.2%であった(三重県, 1998, 2003)。生活廃水の処理率は近年急速に上昇しているものの、1997年の時点では低い水準であったと考えられる。以上のことから、陸域からの負荷についても、1990年前後にみられたCODの減少に影響があったとは考えにくい。

以上のように海水のCODは1993年以降減少したが、漁場利用および水域からの流入による汚染負荷の変化とCODの減少の間には明確な関連性は認められなかった。一方、海水のCODとは異なり、底質のCODは1976年以降増加傾向が認められることが指摘されている(中西らほか2001)。海水及び底質のCODの変化については今後もその動向を見ていく必要がある。

要 約

英虞湾内の20測点において1981年～2002年に年2回(夏季・冬季)実施してきた水質(水温、塩分、DO、DIN、 PO_4 -P、CODおよびChl.*a*)のモニタリング結果を解析し、英虞湾の水質環境の特徴と水質の長期変動についてとりまとめた。

クラスター解析による測点のグループ分けを試みた結果、St. 1, 2, 3, 4, 5, 7, 16および17が属する第1グループ(湾中央および浜島)、St. 18, 19および20が属する第2グループ(湾口部)、St. 9, 10, 11, 12および13が属する第3グループ(湾奥部)、St. 14および15が属する第4グループ(深谷水道付近)、そしてSt. 6だけで構成される第5グループ(前川河口付近)の5つのクラスターに分かれた。

英虞湾はDIN、 PO_4 -P濃度の低い海域であり、夏季の底層および冬季には、PN比が低いN律速の環境であった。特に、夏季の底層においては、貧酸素状態になると底泥からの無機態Pの溶出があり、PN比が低下要因のひとつであると考えられた。

水質7項目の長期変動をトレンドの解析を用いて調べ

た結果、CODを除き水質の大きな変化は見られなかった。しかし、表層のCODについては有意な減少傾向が認められた。

文 献

- 堀 豊・宮原一隆・長井 敏・辻野耕実・中嶋昌紀・山本圭吾・吉田陽一・荒木伸生・酒井康彦(1998): 大阪湾および播磨灘における主要植物プランクトンとDIN:DIP比等との相互関係, 日本水産学会誌, 64(2), 243-248
- 磯部 雅彦(2002): 東京湾の栄養塩の周年変動から読みとれること, 日本水産資源保護協会・月報, 平成14年9月号
- J. D. H. Strickland and T. R. Parsons(1972): Fish. Bd. Of Canada Bulletin No.167
- 中西克之・増田 健・畑 直亜・山形陽一(2001): 英虞湾における底質汚染の現状と近年の進行状況, 三重県科学技術振興センター水産研究部研究報告, 10, 71-77
- 日本水産資源保護協会編(2000): 水産用水基準
- 西村昭史・石村美佐・小林智彦(1994): 平成6年度貧酸素水塊被害防止対策事業報告書
- 水産技術センター(1985): 昭和59年度赤潮予察調査報告書
- 水産技術センター(1997): 平成9年度赤潮対策技術開発試験報告 海域特性による赤潮被害防止技術開発試験
- 三重県(1998): 平成10年刊三重県統計書
- 三重県(2003): 平成15年刊三重県統計書
- 水産研究部鈴鹿水産研究室・三重県ノリ養殖研究会・三重県漁業協同組合連合会(2003): 平成14年度ノリ情報総集編
- Redfield A. C., B. H. Ketchum and F. A. Richard(1963): The influence of organisms on the composition of seawater. P. 26-77, In, The Sea, Vol. 2, ed. M. N. Hill, Inter Science, New York
- 白旗慎吾編: パソコン統計解析ハンドブックIV ノンパラメトリック編, 共立出版. 336-343
- 田中 豊・垂水共之・脇本和昌編: パソコン統計解析ハンドブックII 多変量解析編, 共立出版. 226-251
- 東海農政局三重統計情報事務所: 三重県農林水産統計年報
- 山下亜純・谷川貴之ほか8名(2002): 漁場環境モニタリング調査指導事業(漁場環境管理調査), 平成13年度愛媛県水産試験場事業報告, 29-34