

東京内湾の底質と底生生物について

田島 良博

Surficial sediment and benthos in Tokyo Bay.

Yoshihiro TAJIMA*

はしがき

1980年代以降、東京内湾では栄養塩や透明度などの水質は改善傾向にあるとされるが¹⁾、近年特に問題となっている貧酸素水塊の発生状況は、横ばいかむしろ拡大傾向である^{1,2)}。また、底質環境については、湾奥では1970年代以降、強熱減量やCOD等の値に明確な改善傾向は見られず、依然高い有機物濃度を示している³⁾。

本県沿岸の底質環境については、当センターが1978～1981年に、相模湾、東京湾口及び東京内湾で実施した広域の調査があり、東京内湾では1981年に湾奥まで含めた60点の調査が実施された⁴⁾。同時に底生生物の調査も実施されており⁵⁾、当時の底質、底生生物の状況に関する詳細な報告として貴重な資料となっている。しかし、このような規模や調査点密度の底質、底生生物の調査は、その後長い期間実施されていない。近年の貧酸素水塊の影響や、環境改善の施策を検討する上でこのような資料は不可欠であるが、同様の規模での調査は、財政的にも体制的にも困難である。そこで、上記の調査点を参考に、東京内湾の川崎市から横浜市地先を中心とした26点に絞って、夏季及び冬季の底質、底生生物の調査を実施し、底質環境の現状について検討した。

材料と方法

底質調査

底質調査は、2009～2011年度の各年度に8～10点で夏季（8月）と冬季（1月または2月）に各1回、調査船うしおによりスミス・マッキンタイヤ型採泥器（0.05 m²型）を用いて底泥の採集を行った（図1、表1）。採集した底泥約1リットルを氷蔵で持ち帰り、次の各

項目について分析を行った。粒度組成は、目開き4.00mm、2.00mm、1.00mm、500μm、250μm、125μm、63μmの標準ふるい(JIS Z 8801)により8段階に区分、強熱減量は重量法（電気炉で700℃、2時間強熱）、化学的酸素要



図1 調査点図

表1 底質・底生生物調査採泥実績

年度	季節	調査日	実施調査点
2009	夏季	2009/8/24	Stn.1～10
	冬季	2010/2/19	Stn.1～10
2010	夏季	2010/8/11	Stn.15～18
	夏季	2010/8/13	Stn.11～14
2011	冬季	2011/2/16	Stn.11～18
	夏季	2011/8/10	Stn.19～26
	冬季	2012/1/18	Stn.19～26

求量 (COD) は過マンガン酸カリウム消費量、全硫化物は水蒸気蒸留法により分析を行った。なお、粒度組成のうち $63\mu\text{m}$ のふるいを通過したものを泥とし、その重量割合 (%) を含泥率とした。

CODと含泥率は、東京湾口や相模湾では高い正の相関を示すが、東京内湾ではCOD 30mg/g を超えると両者の相関が低くなる⁴⁾。また、矢沢ら⁴⁾はこの関係をもとに検討した結果、COD 30mg/g までは正常な底質と評価できるとした。そこで、CODと含泥率の関係について、本研究でも同様の傾向が認められるか検討を行った。

CODと強熱減量は共に有機物量の指標であるが、両者の関係をもとに、本研究で用いる有機物の指標について検討した。

また、調査点を底質環境の類似性からグループ分けし、グループ単位で有機汚染の状況について検討するため、季節別に底質項目の分析結果によるクラスター分析を行った。クラスター分析のデータは、前述の検討結果を受けた有機物の指標に、含泥率及び全硫化物を加えた3項目を使用した。クラスター分析の計算はEXCEL多変量解析Ver. 6.0 (株式会社エスミ) で行い、原データの距離は基準値のユークリッド距離とし、クラスター間の距離はウォード法とした。

各グループの有機汚染の評価は、クラスター分析に用いた底質3項目のデータによる合成指標⁹⁾を調査点ごとに計算し、グループ内の平均値と値の範囲で比較した。

底生生物調査

底生生物調査は、底質調査と同時に同一の調査点で採泥を行い、底質調査用とは別に採集した採泥器2回分(0.1 m^2 分)の底泥を1サンプルとした。このサンプルを船上で目開き1mmのふるいで振った後、残留物を10%ホルマリンで固定して実験室に持ち帰った。各サンプルより底生生物を選別し、可能な限り種まで同定して個体数と重量を測定した。

また、各調査点の種類別の採集個体数から、Shannon-Wiener関数による多様度 H' (単位: bit) を求め、底生生物相の多様性を検討した。さらに、底質項目を用いたクラスター分析による各グループと底生生物の出現状況や多様度 H' の関係から、底質環境と底生生物相の対応について検討した。

底質環境と水深の関係

合成指標は、先の底質項目のみを用いる簡易な方法と、底生生物の多様度 H' を加えて計算する方法がある⁹⁾。そこで、多様度 H' を加えた合成指標を計算し、底質項目のみで求めた合成指標との対応を検討した。

また、多様度 H' を加えた合成指標と水深の関係から、本調査海域における底質環境の特徴について検討した。

結 果

各底質項目の水平分布

含泥率は、夏季、冬季とも中ノ瀬西側から北の水深20

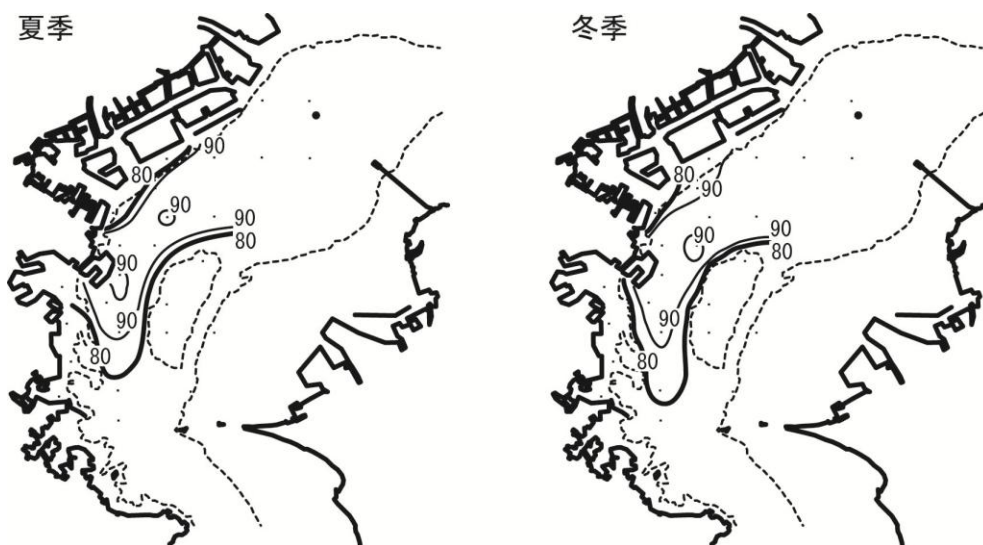


図2 含泥率の分布(単位: %)

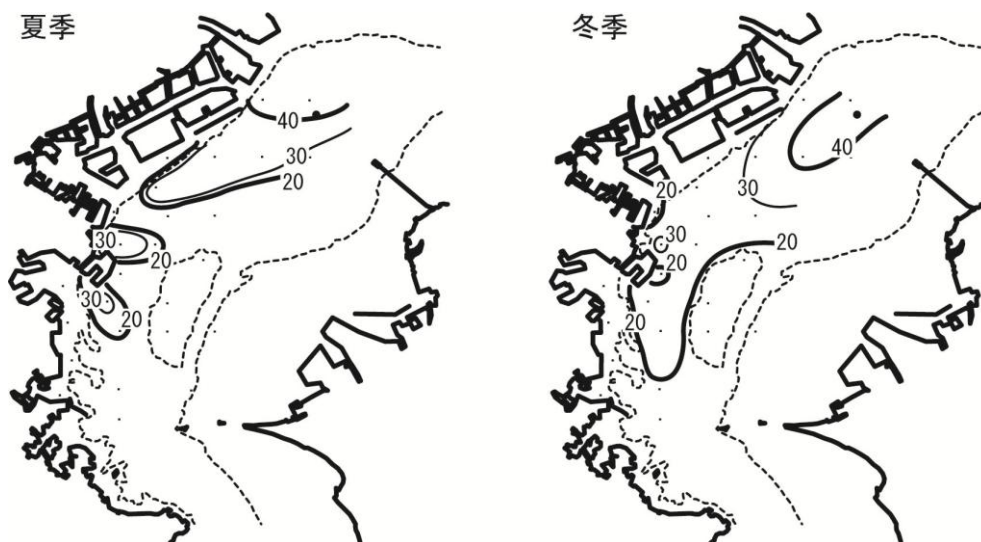


図3 CODの分布(単位: mg/g)

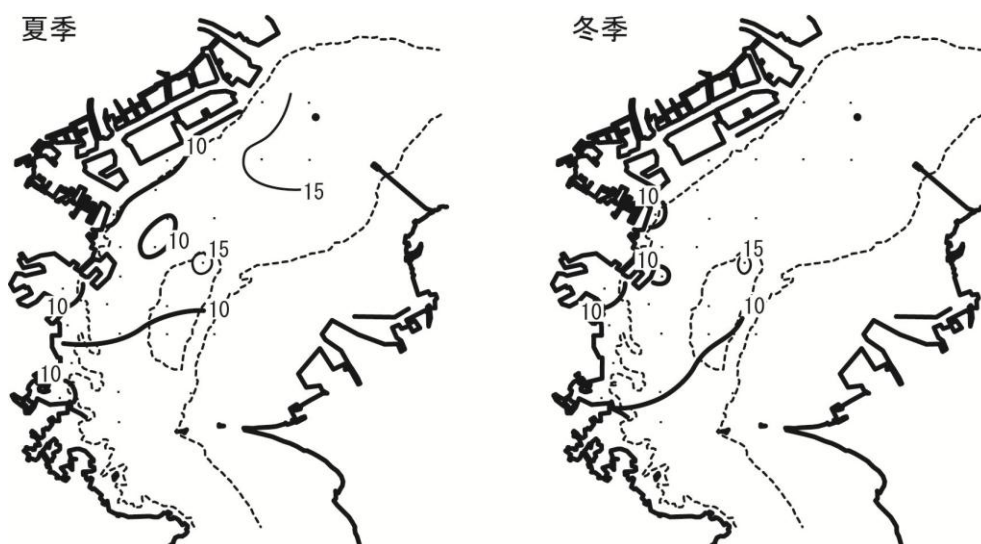


図4 強熱減量の分布(単位: %)

m以深では概ね90%以上を示し、80%以上の点はさらに南のStn. 10まで見られた(図2)。

CODは、夏季は水産用水基準の上限である20mg/gを上回る海域は、横浜港沖のStn. 12以北と本牧沖の南北に見られ、調査海域北部のStn. 11と19では40mg/gを超えた。夏季、冬季とも水深20m以浅の調査点では概ね20mg/gを下回った。冬季は中ノ瀬西側から北の水深20m以上の調査点で20mg/gを超え、含泥率80%以上の分布と概ね一致したが、夏季はStn. 7や22など同海域でも20mg/gを下回る調査点が見られた(図3)。

強熱減量は、夏季、冬季とも中ノ瀬西側以北で10%以上の調査点が見られたが、中ノ瀬上や富岡沖など水深20m以浅の海域でも10%を超え、中ノ瀬北部の

Stn. 23では15%を超えるなど、CODとは異なる分布を示した(図4)。

全硫化物は、夏季、冬季とも水産用水基準の上限である0.2mg/gを上回る点が、水深20m以深の海域に沿ってStn. 10まで見られ、含泥率80%以上の分布と概ね一致した。また、Stn. 14では夏季、冬季とも、Stn. 11では夏季に2mg/gを超える値を示した(図5)。

なお、採泥日時や水深、各項目の分析結果及び合成指標の計算結果は、表2にまとめて掲載した。

CODと含泥率の関係

CODと含泥率の関係を図6に示す。両者の関係は、CODの値が30mg/g付近までは概ね正の相関が見られるが、そ

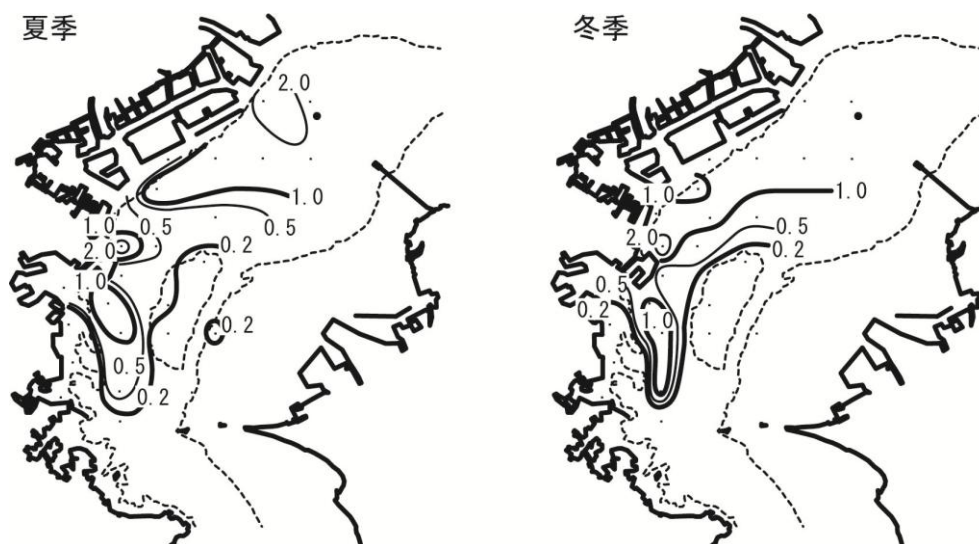


図5 全硫化物の分布(単位: mg/g)

ここで含泥率の値が100%に近づき、それ以上はCODの値が増加しても含泥率は横ばいとなった。COD30mg/g以下の値を用いて含泥率との相関を求めたところ、次の関係式を得た。

$$\text{夏季: } Y=2.9305X+23.483 \quad (R^2=0.5910)$$

$$\text{冬季: } Y=3.3602X+10.225 \quad (R^2=0.7438)$$

ただし、X: COD (mg/g)、Y: 含泥率 (%)

CODと含泥率の関係は、夏季、冬季とも概ね矢沢ら⁴⁾の結果と一致した。しかし、夏季はデータのバラつきが大きく、冬季に比べて決定係数 (R^2) はやや低かった。また、含泥率を100%としたときのCODの値は、夏季が

26.1mg/g、冬季が26.7mg/gで、矢沢ら⁴⁾の結果より計算した値 (29.2mg/g) よりやや低かった。

CODと強熱減量の関係

CODと強熱減量を図7に示す。COD10mg/g以上では、両者は概ね正の相関が見られたが、10mg/g未満では、CODの値が低いにも関わらず強熱減量が10%を超える点が見られた。このことから、強熱減量は条件によってはCODと異なる傾向を示す可能性が示唆された。

よって、以下の検討では有機物の指標としてCODを用いた。

表2-1 底質分析結果: 夏季

調査点番号(Stn.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
調査点番号(Stn.)												2010		
採集年月日	2009											2010		
	8/24	8/24	8/24	8/24	8/24	8/24	8/24	8/24	8/24	8/24	8/24	8/13	8/13	8/13
採集時刻	12:00	11:38	10:48	10:20	13:23	12:16	12:55	11:10	13:45	14:11	11:22	10:50	11:58	
水深(m)	17.6	19.7	7.3	7.0	17.9	27.0	33.6	42.0	42.0	51.2	24.5	24.4	34.4	
強熱減量 (%)	5.6	8.7	14.9	13.6	11.5	13.3	8.2	10.0	10.3	9.0	10.9	10.8	9.8	
COD(mg/g)	10.9	15.7	4.2	4.6	10.6	31.0	10.9	11.0	20.4	17.7	43.6	30.9	29.7	
全硫化物(mg/g)	0.32	0.72	-	0.01	0.22	1.10	0.24	0.18	1.02	0.87	2.27	1.19	0.72	
含泥率 (%)	52.6	59.5	9.1	14.6	53.8	98.2	89.1	86.4	90.4	78.1	98.7	90.0	92.4	
合成指標	-0.79	-0.10	-2.18	-2.05	-0.87	1.57	-0.17	-0.28	0.95	0.47	3.17	1.50	1.05	
合成指標(+H)	0.00	-0.24	-2.39	-2.56	-0.96	1.82	0.50	-0.30	0.88	0.18	3.23	1.58	1.11	
調査点番号(Stn.)	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
調査点番号(Stn.)												2010		
採集年月日	2010											2011		
	8/13	8/11	8/11	8/11	8/11	8/10	8/10	8/10	8/10	8/10	8/10	8/10	8/10	
採集時刻	10:25	11:20	10:58	10:28	10:00	11:37	12:00	11:17	10:55	10:40	10:18	12:50	13:11	
水深(m)	33.5	40.8	20.1	13.7	51.0	26.3	29.3	30.6	30.9	17.4	18.4	18.8	20.4	
強熱減量 (%)	12.1	11.0	7.3	7.6	5.5	16.5	15.8	15.3	11.3	17.4	9.3	7.0	4.3	
COD(mg/g)	31.1	37.0	16.8	8.9	7.0	44.6	29.1	32.7	9.4	3.7	2.7	7.8	4.3	
全硫化物(mg/g)	2.19	1.58	0.54	0.04	0.09	1.80	1.84	1.61	0.39	0.07	0.10	0.29	0.14	
含泥率 (%)	97.8	95.2	80.3	30.9	27.4	99.6	99.4	99.3	94.6	32.5	20.1	60.2	35.3	
合成指標	2.60	2.20	0.17	-1.54	-1.64	2.78	2.23	2.14	0.02	-1.68	-1.93	-0.79	-1.54	
合成指標(+H)	3.30	2.43	0.15	-2.22	-1.07	3.44	2.96	2.88	0.73	-2.32	-2.13	-0.67	-1.54	

※全硫化物の「-」は検出限界(0.01mg/g) 未満

表2-2 底質分析結果：冬季

調査点番号(Str.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
採集年月日	2010										2011		
採集時刻	2/19	2/19	2/19	2/19	2/19	2/19	2/19	2/19	2/19	2/19	2/16	2/16	2/16
水深(m)	19.3	20.4	7.6	9.2	18.5	27.0	34.3	42.5	42.6	51.8	25.3	25.3	35.5
強熱減量(%)	10.7	8.4	14.8	14.6	11.2	12.9	11.0	9.7	10.6	10.2	11.7	11.3	11.0
COD(mg/g)	24.6	12.8	3.3	5.0	6.6	30.5	24.6	14.2	21.5	19.7	31.2	22.3	23.5
全硫化物(mg/g)	1.25	1.12	0.01	0.03	0.14	1.60	1.39	0.26	1.03	1.37	1.83	0.79	0.57
含泥率(%)	85.4	48.1	5.9	20.8	38.3	99.0	95.7	94.9	90.2	86.8	96.2	84.3	86.0
合成指標	1.23	-0.05	-2.26	-1.89	-1.40	2.04	1.56	0.08	1.00	1.19	2.23	0.69	0.56
合成指標(+H)	1.27	0.29	-2.18	-2.47	-1.39	2.04	1.58	0.25	0.86	1.25	2.15	0.95	0.33

調査点番号(Str.)	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
採集年月日	2011					2012							
採集時刻	2/16	2/16	2/16	2/16	2/16	1/18	1/18	1/18	1/18	1/18	1/18	1/18	1/18
水深(m)	34.4	42.2	20.3	14.5	52.0	26.9	30.1	32.0	32.4	14.9	19.2	19.8	20.9
強熱減量(%)	12.7	11.2	7.5	13.9	6.5	13.7	14.2	13.1	11.2	18.4	10.5	6.5	4.4
COD(mg/g)	37.2	24.8	12.1	6.7	9.0	41.2	39.6	41.3	28.2	3.6	4.8	13.0	10.1
全硫化物(mg/g)	2.02	1.04	0.34	0.02	0.12	1.39	1.38	1.51	0.66	-	0.07	0.16	0.10
含泥率(%)	95.8	90.3	63.7	16.5	18.4	98.9	99.1	99.1	96.0	16.2	69.4	44.7	28.7
合成指標	2.63	1.13	-0.52	-1.92	-1.70	2.25	2.18	2.37	1.01	-2.06	-0.94	-1.01	-1.48
合成指標(+H)	2.77	1.04	-0.51	-2.57	-1.61	2.96	2.90	3.07	1.86	-2.31	-1.37	-0.52	-1.65

※全硫化物の「-」は検出限界(0.01mg/g)未満

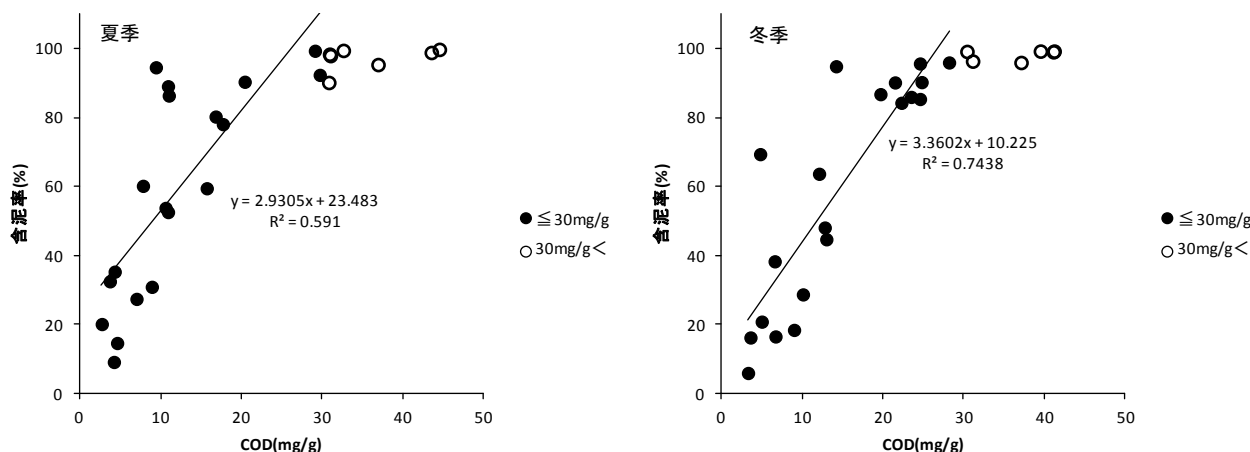


図6 CODと含泥率の関係

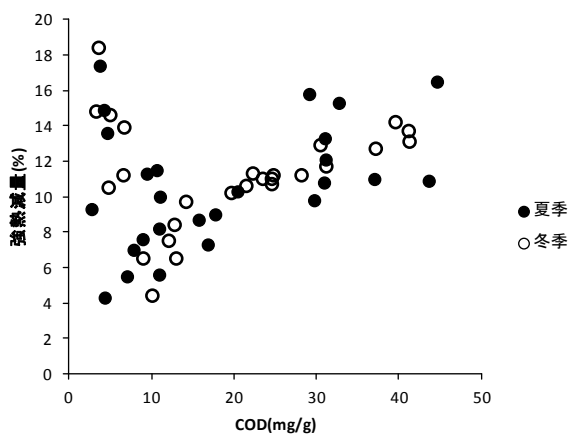


図7 CODと強熱減量の関係

調査点のグループ化と汚染状況の評価

底質項目(含泥率、COD、全硫化物)によるクラスター分析の結果と後述のグループの括りを図8に、各グループの底質項目及び合成指標の平均値と範囲を表3に示す。グループを構成する調査点にやや相違は見られたものの、夏季、冬季とも大きく3つのグループにまとめられた。これらのグループを合成指標の平均値が低い順にA、B、Cとし、その分布を図9に示す。また、本文中では季節の記号(夏：S、冬：W)を付してグループ名とした(例：夏季のAグループをSA)。合成指標は、0を境界に負の値であれば正常な底質、正の値であれば汚染された底質と評価される⁶⁾。

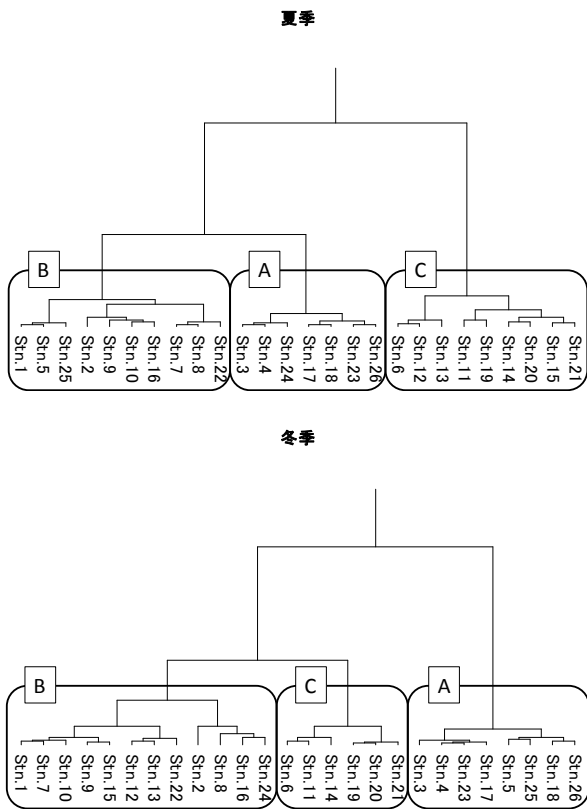


図8 底質項目(含泥率、COD、全硫化物)を用いたクラスタ分析によるデンドログラム (A~Cによる括りは合成指標によるグループの構成)

SA、WAは、COD、全硫化物とも水産用水基準を達成し、合成指標も-1を下回る正常な底質であった。これに対し、SC、WCはCOD、全硫化物とも水産用水基準を上回り、合成指標は構成する全調査点で1を超え、グループ平均では2を超えたことから、汚染された底質と評価された。

SBの合成指標は、0を挟んで±1の範囲となり、平均値も0に近く正常な底質と汚染された底質の境界付近の値を示した。WBの合成指標は、最小値は-1に近

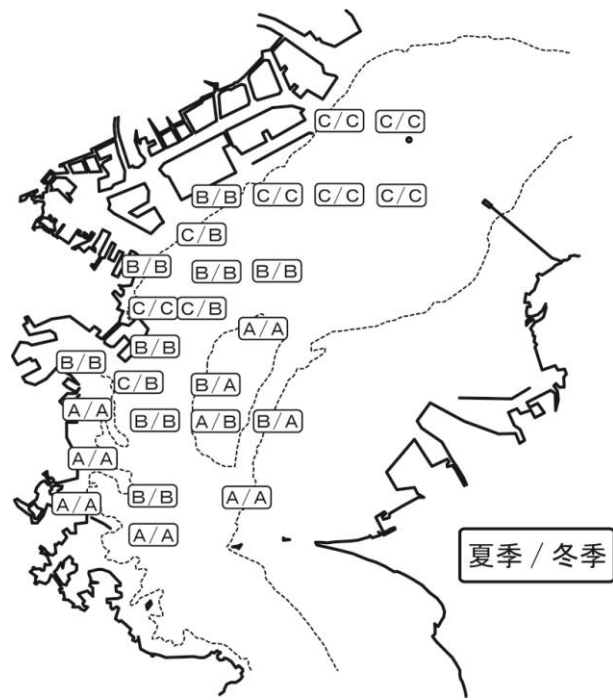


図9 各調査点の環境項目によるグループ分けの結果

くSBと同程度であったが、最大値が1.56で、範囲はSBに比べて正の側に広がった(表3)。

水平分布では、Aグループに属する調査点は、中ノ瀬上と調査海域南部に分布し、湾口部に最も近いStn. 18を除くと、すべて水深20m線付近から浅いところに分布していた。また、夏季、冬季ともCグループとなった調査点は、主に調査海域北部に集中していたが、隣接していない点では唯一、やや離れた本牧沖のStn. 14が夏季、冬季ともCグループであった(図9)。

底生生物の種数、個体数の分布及び多様度

各調査点の底生生物の種数を図10に、個体数を図11に示す。中ノ瀬西側及び中ノ瀬より北の20m以深では、夏季、冬季とも種数が10種を下回る調査点が多く、採集個

表3 各グループの底質項目測定結果と合成指標の平均値と範囲(最低~最高)

季節とグループ	含泥率(%)	COD(mg/g)	全硫化物(mg/g)	合成指標
夏季	SA	24.3 (9.1~35.3)	5.1 (2.7~8.9)	0.06 (-~0.14)
	SB	74.5 (52.6~64.6)	13.1 (7.8~20.4)	0.48 (0.18~1.02)
	SC	96.7 (90.0~99.6)	34.4 (29.1~44.6)	1.59 (0.72~2.27)
冬季	WA	23.7 (5.9~44.7)	7.2 (3.3~13.0)	0.07 (-~0.16)
	WB	82.6 (48.1~96.0)	19.4 (4.8~28.2)	0.82 (0.07~1.39)
	WC	98.0 (95.8~99.1)	32.5 (30.5~41.3)	1.62 (1.38~2.02)

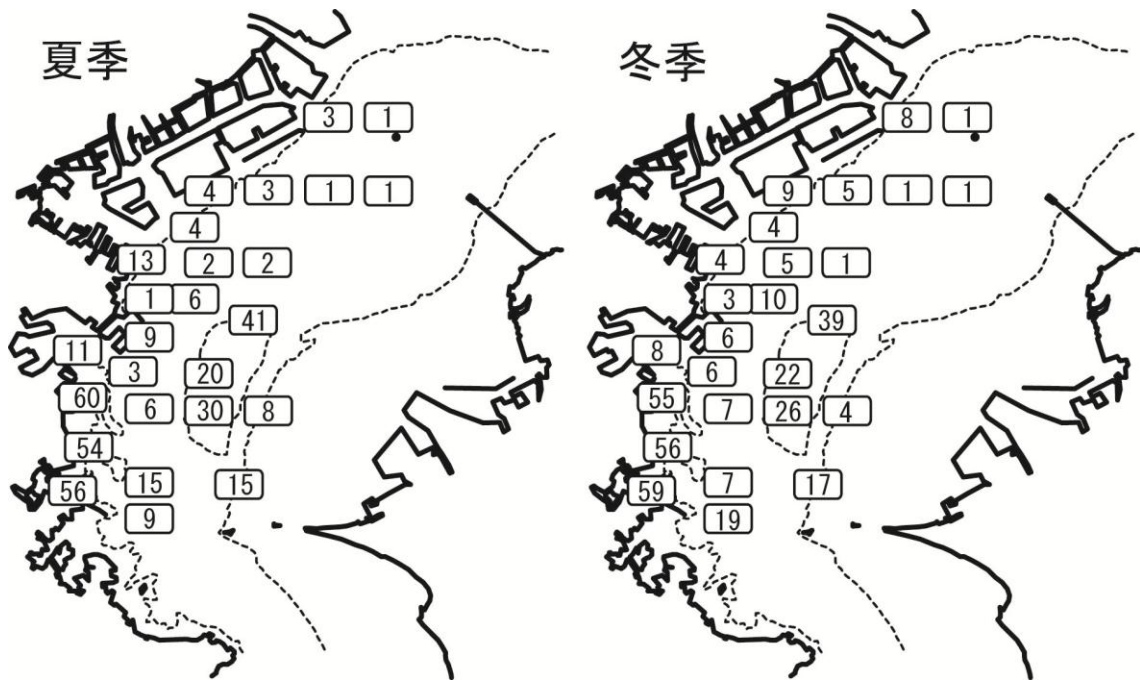


図10 底生生物の出現種数

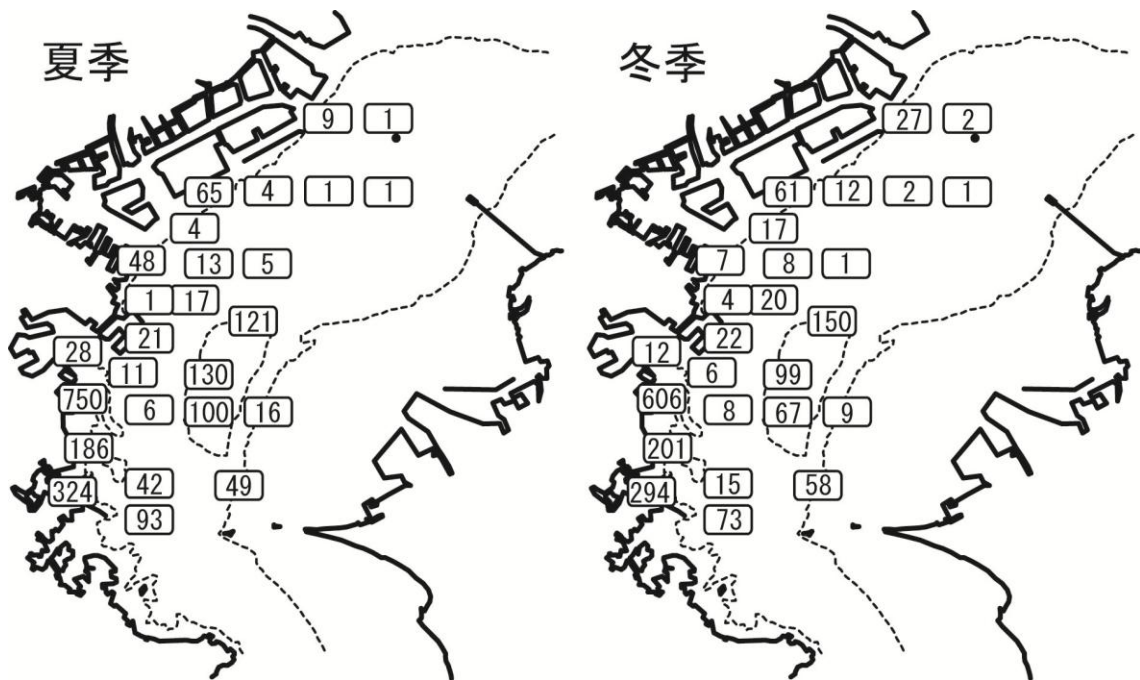


図11 底生生物の採集個体数(0.1m²あたり)

体数も20個体に満たない調査点が多かった。本調査では無生物の調査点は見られなかったが、Stn. 19~21では出現種数が1種のみで、採集個体数も1~2個体であった。富岡沖から南のStn. 3, 4, 17では、種数は50種を超え、採集個体数も100個体以上、中ノ瀬上のStn. 5, 23, 24では、種数は20種以上、個体数は60個

体以上であった。

各調査点の多様度指数H' (bit)を図12に示す。富岡沖から南のStn. 3, 4, 17や中ノ瀬上のStn. 5, 23, 24ではいずれも3以上で、その内Stn. 17では、夏季、冬季とも5以上であった。また、出現種数が1種のみであったStn. 19~21は、夏季、冬季とも0であった。

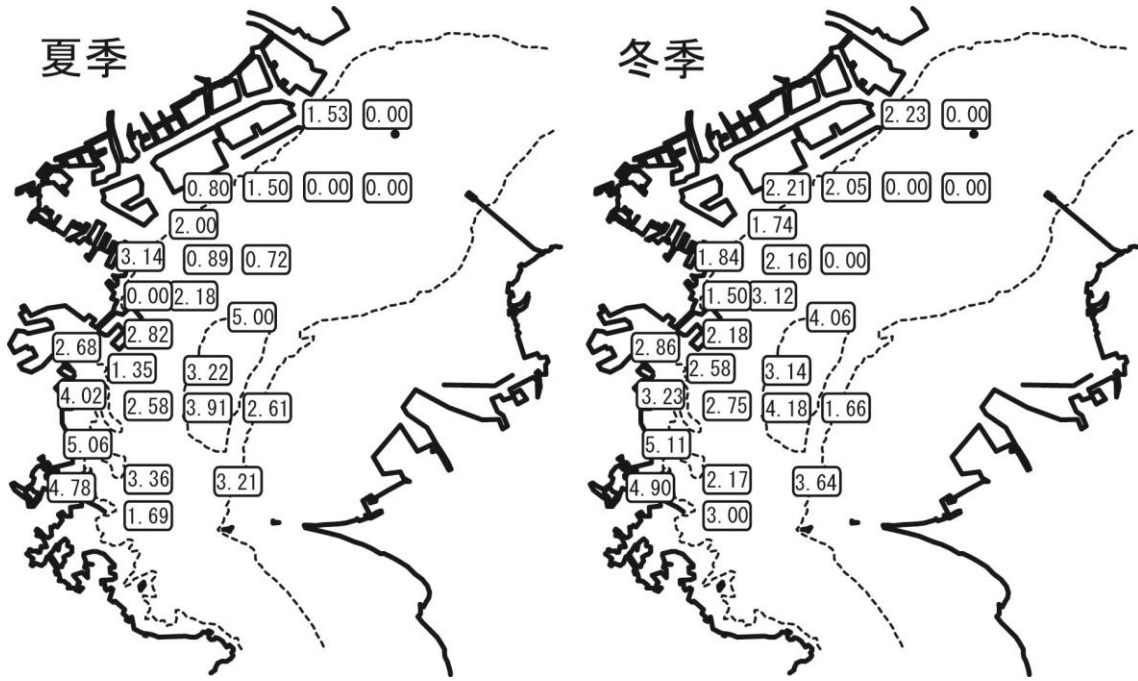


図12 底生生物の多様度指数H'

底質項目によるグループと底生生物の多様度の関係

底質項目により区分した各グループにおける底生生物の種数、個体数及び多様度H'の平均値と範囲を表4に示す。底生生物の出現状況は、底質環境が良好なほど種数、個体数とも多く、SAとWAでは平均値で30種以上、200個体前後の底生生物が採集された。一方、SCとWCでは、種数は平均3種前後で、個体数は平均10個体未満であり、多様度H'の平均値はともに1.0であった。SBとWBでは、種数は平均、範囲ともほとんど差は見られなかったが、個体数の平均ではWBがSBの半分程度、多様度の平均は共に2.3であったが、範囲から見たバラつきはWBの方が大きかった。

方が大きかった。

表4 底質項目による各グループにおける底生生物の種数、個体数及び多様度の平均値と範囲（最低～最高）

季節とグループ	種数	個体数	多様度H'(bit)
夏季 SA	37.9 (9~60)	231.9 (49~750)	4.0 (1.69~5.06)
夏季 SB	9.0 (2~20)	37.4 (5~130)	2.3 (0.72~3.36)
夏季 SC	2.6 (1~6)	5.4 (1~17)	1.0 (0.00~2.18)
冬季 WA	33.9 (4~59)	186.3 (9~606)	3.6 (1.66~5.11)
冬季 WB	7.8 (1~26)	20.3 (1~67)	2.3 (0.00~4.18)
冬季 WC	3.2 (1~8)	8.0 (1~27)	1.0 (0.00~2.23)

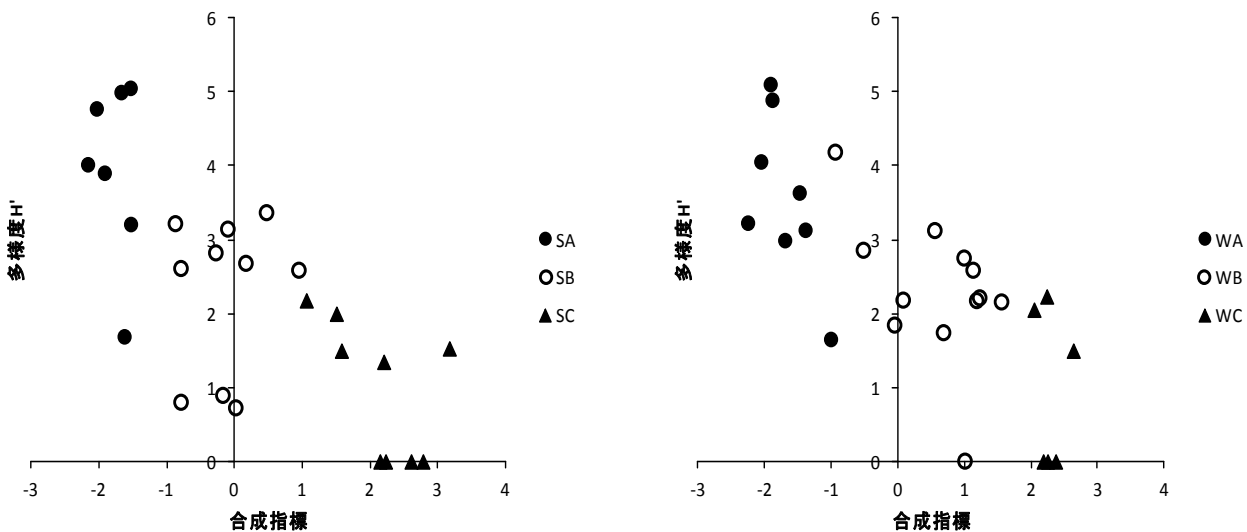


図13 底質項目による合成指標と多様度H'の関係

底質項目による合成指標と多様度 H' の関係を図13示す。夏季、冬季とも合成指標の値は、各グループ間での重複は無いが、多様度 H' はそれぞれのグループ内で高い値と低い値の二つのグループに分かれるような傾向が見られた。多様度 H' の低い点が複数見られたSB、SC、WCについてt-検定を行ったところ、高いグループと低いグループの平均値に有意な差が認められた (SB、SC : $P < 0.01$, WC : $P < 0.05$)。また、多様度 H' の低い点が1点のみであったSA、WA、WBについては、箱ひげ図による外れ値の検出を行ったところ、WBの1点 ($H' = 0$ の点)のみ外れ値と判断された。

底質環境と水深の関係

底質項目による合成指標と多様度 H' を加えた合成指標の関係を図14に示す。両者の相関は、夏季、冬季とも高く、回帰直線は以下のとおりで、評価の基準となる原点付近を通ることが示された。

夏季 : $Y = 1.1375X + 0.1064$ ($R^2 = 0.9618$)

冬季 : $Y = 1.1220X + 0.0487$ ($R^2 = 0.9677$)

ただし、X : 底質項目による合成指標

Y : 多様度 H' を加えた合成指標

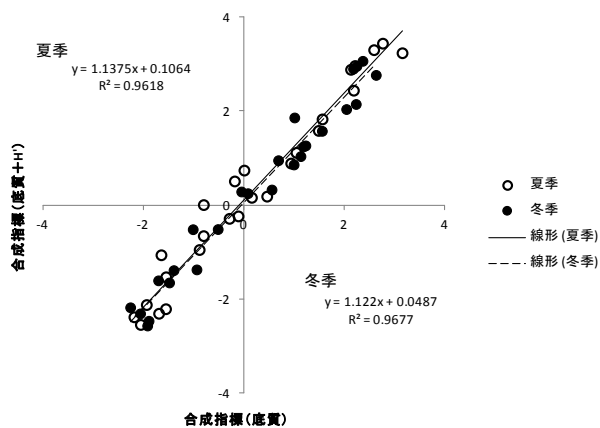


図14 底質項目による合成指標と多様度 H' を加えた合成指標の関係

多様度 H' を加味した合成指標 (以下「合成指標 (+ H')」) と表記) と水深との関係を図15に示す。夏季、冬季とも同様の傾向を示し、水深15m以浅では合成指標 (+ H') は-2を下回り、20m前後では-2付近から1を超える値まで見られた。水深25m前後から40m付近まではすべての調査点で合成指標 (+ H') が正の値となり、2を超える調査点のほとんどはこの水深帯に含ま

れた。また、水深25m以上では水深が増加するにつれて合成指標 (+ H') の値が下がる傾向が見られた。

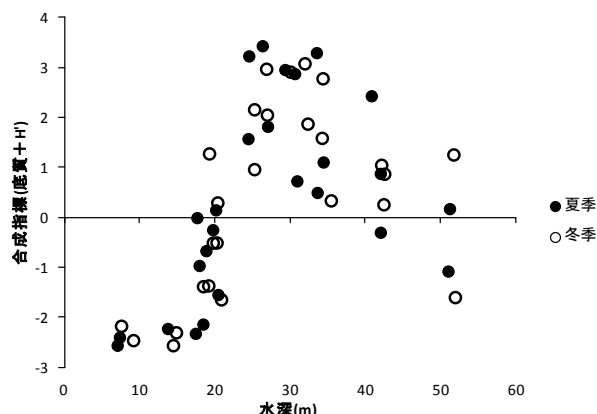


図15 水深と合成指標 (+ H') との関係

考察

有機物の指標について

CODと強熱減量は、ともに有機物の指標として用いられ両者の値には関係があるとされるが、強熱減量は無機物の影響によって値が変化することがある⁷⁾。本研究では、概ね両者に正の相関が認められるものの、COD10mg/g未満では、強熱減量の値が大きくバラついた (図7)。これは、強熱減量の値が底質中の無機物の影響を受けたためと考えられる。強熱減量は、堆積物中の炭酸カルシウム含有量の測定にも用いられ、700℃では、含有する炭酸カルシウムの40%強の重量が減じる⁸⁾。CODの値に比べて、強熱減量の値が高かった調査点は、Stn. 3、4、5、17、23、24といったSAやWAのグループに含まれる底質環境の良好な場所で、底生生物の多様度が高く、ホトトギスガイ *Musculista senhousia* やシズクガイ *Theora fragilis* など二枚貝類の採集量も多かった。従って、底質中に含まれる、これら貝類の貝殻片に由来する炭酸カルシウムが強熱減量の値に影響を与えたと考えられる。このことから、本研究では、有機物の指標としてCODを用いることが適当と判断した。

また、CODの環境指標として、水産用水基準では20mg/g以下という基準が示されているが、矢沢ら⁴⁾は独自の検討から30mg/gを正常な底質の上限と判断した。本研究では、底質項目によるグループSC、WCは、合成指標の値から汚染された底質と評価したが、SC、WCのCODの最低値は約30mg/gであり (表3)、この値を超える調査点は例外なく汚染された底質といえる。一方、正常な底質と評価されたSAやWAでは、合成指標は-1以下で、COD

の平均値は10mg/gを下回り、最高値でも13.0mg/gであった(表3)。しかし、CODの値が10mg/gから30mg/gの範囲では境界を見出すことは困難であり、正常な底質の上限の値については、個別の項目ではなく合成指標による総合的な評価によるべきと考えられた。

底質項目の分布と底質環境の現状

各底質項目の水平分布を見ると、含泥率80%以上と全硫化物0.2mg/g以上の調査点の分布は概ね一致し、冬季についてはCOD20mg/g以上の調査点も概ねこれらと一致した(図2、3、5)。底質項目による合成指標は、含泥率80%、COD20mg/g、全硫化物0.2mg/gで値がほぼ0となることから、これらの分布が一致したところが底質環境の良否の境界と言える。この点から見ると汚染された底質は、中ノ瀬より北の平場から中ノ瀬西側を通過してStn. 10あたりまで広がっていた。Stn. 10と18は、ともに水深50m前後であるが、Stn. 18はSA、WAに属し(図9)、正常な底質であることから、内湾の汚染の影響が及んでいるのはStn. 10付近までと考えられる。

CODの値は、最も高いところでは44.6mg/g(夏季Stn. 19)で、含泥率との相関が見られなくなる30mg/gを超える調査点が夏季に7点、冬季に6点見られた(表2)。また、全硫化物の値は、1mg/gを超える海域が北部だけではなく中ノ瀬西側にも見られ、水産用水基準の0.2mg/gを下回ったのは夏季8点、冬季9点で、全26点中1/3程度であった(表2)。全硫化物の値が高いのは、底層水の貧酸素化による有機物の嫌気分解の影響と考えられる。このような状況から、現在の東京内湾では、高い有機物負荷と貧酸素水塊の発生による底質環境の悪化が、中ノ瀬西側の海域まで広がっていると考えられた。

含泥率、COD、全硫化物の分布状況は、1981年の調査⁹⁾と比べて目立った変化はなく、COD40mg/g以上の海域や全硫化物1mg/g以上の海域も概ね一致しており、現在の汚染状況は、約30年前の水準からほとんど回復していないと考えられる。

合成指標による評価と底生生物の出現状況

本研究では、底質項目による合成指標の値が-2を下回る調査点から3を超える調査点まで、0点を挟んで多様な底質環境を網羅できた。底質項目によるクラスター分析では、グループ間の各底質項目の値の範囲には重複が見られたが、合成指標では重複は無かった。グループ分けは、夏季、冬季それぞれの中での相対的なものであ

るが、概ね底質環境の良否でグループ化ができたと考えられる。Aグループは正常な底質、Cグループは汚染された底質と判断されるが、Bグループは環境評価の境界となる0点を挟んだいわゆるグレーゾーンである。SBとWBでは、合成指標の範囲がやや異なるが、概ね0点を挟んで±1の範囲をグレーゾーンと考えるのが適当であろう。

最も良好な底質環境であったSAやWAでは、CODや全硫化物の値は全点で水産用水基準を下回り、含泥率も50%未満で、汚染した底質が広範囲に広がる東京内湾においては、貴重な環境といえる(表3)。SA、WAでは、底生生物量が非常に豊富で、種数はSB、WBと比べても非常に多く、多様な底生生物相を示した(表4)。その一方で、汚染された底質と評価されたSCやWCでは、底質項目による合成指標の平均値が2を超え、CODは平均値で30mg/g以上、全硫化物も平均値で1.6mg/g前後と、有機汚染がかなり進んだ状態である。底生生物の出現状況は、種数が平均で3種前後、個体数も平均で10個体を下回り、非常に貧相な底生生物相であった(表4)。

このように、底質環境の良否と底生生物相の豊かさは概ね良く対応したが、合成指標と多様度H'との関係では、すべてのグループで合成指標に対し多様度H'の高い点と低い点が存在し(図13)、概ね両者に有意な差が見られた。SAで多様度が低い調査点は湾口部に最も近く水深約50mのStn. 18であったが、WAでは水深20m付近のStn. 25であり、水深による底生生物相の違いとは考えられない。また、SCやWCの多様度H'が低い点はすべてH'が0の調査点で、これら4点のうち3点は夏季、冬季共通でStn. 19~21である(図12)。これらの調査点がある海域は、1982~1983年に実施された四季の調査で、春を除いて無生物域が見られた海域と概ね重複する⁹⁾。これらの海域では、貧酸素水塊の影響で夏季には底生生物がほとんど生息できず、何らかの理由で冬季でも底生生物相が回復できないと考えられる。貧酸素水塊が解消する冬季にも底生生物相が回復しないのは、高濃度の硫化物の存在など底質環境そのものの劣悪化が原因であるとの指摘や¹⁰⁾、本来の地形や海況特性によるものではないかとの見解がある¹¹⁾。Stn. 6と11はともにSC、WCに属し、グループ内では多様度H'が高い調査点であるが、全硫化物の値はStn. 11では夏季、冬季ともStn. 19~21より高く、Stn. 6も冬季にはStn. 19~21を上回る。また、隣接し、水深も同程度のStn. 6や11とStn. 19~21の間に、地形や海況特性の相違を見出すのは困難である。さらに、SBや

WBでも合成指標による底質環境の評価は同程度でありながら、多様度H'は明らかに2分される(図12)。このように、同水準の底質環境で底生生物の多様性に明確な差異が生じ、それが合成指標の値の広い範囲で見られた。このような現象は調査を実施した3年間ではいずれの年でも見られたことから、調査年の違いによる差異とは考えられず、その理由については本研究では明らかにならなかった。底生生物の生息と底質環境の関係については、本研究で用いた底質の項目による評価では十分でない可能性があり、今後さらなる検討が必要と考えられた。

底質環境と水深の関係

合成指標の検討では、底質項目のみで算出した値より底生生物の多様度H'を加味した値の方がやや大きくなるが、両者の相関は高く、回帰直線が原点付近を通ることから(図14)、いずれの値を使用しても評価は概ね一致すると考えられた。先に述べたように、底質項目による合成指標と底生生物の多様度H'との関係では不明な点があるが、より多くの情報に基づく評価であることから、本研究では水深との関係については多様度を加味した合成指標(+H')を用いた。

合成指標(+H')の値と水深との関係を見ると、水深25~30m付近で最も値が高く、各水深でのバラつきは大きい。水深が増加するに従い低下する傾向が見られた。これは、湾奥に最も近く汚染が進んでいると考えられるStn. 19の水深が約26mで、そこから湾口部に向かって深くなる海底地形の勾配による影響が大きい。湾口に向かう南北の環境変化は緩やかであるが、水深20m付近では合成指標(+H')の値が-2を下回る値から1をやや上回る値まで大きくバラつき、25m以上の水深帯との間に底質環境の顕著な境界が存在すると考えられる。水深15mより浅いところでは、合成指標(+H')の値は-2~-3の範囲で、本調査海域の中で最も良好な底質環境を示した。

最も底質環境が良好であった水深帯の調査点は、富岡沖やその南のStn. 3、4、17(採泥水深7~14m)、中ノ瀬上のStn. 23(同15~17m)が該当し、底質環境が良好であるとともに他の調査点に比べ底生生物の種数、個体数も非常に多かった(図10、11)。1981年に行われた底生生物の調査では、富岡地先で40種、中ノ瀬でも20種以上の底生生物が確認され、採集個体数は本研究と同じ0.1m²あたりに換算して100個体以上であった⁹⁾。このことから、当該海域は長期間にわたって底生生物が豊富な環境を保

ってきた貴重な海域と言える。

また、合成指標(+H')の値に大きなバラつきが見られた水深20m付近の調査点は、低い値を示したのは中ノ瀬や千葉県寄りのStn. 24~26であったが、調査海域でも北寄りに位置するStn. 1(夏)やStn. 2(夏、冬)でも0付近から負の値を示し、グレーゾーンの中でも正常な底質かそれに近い評価となる範囲であった。本牧以北ではより水深の浅い調査点がなく、水深による底質環境の勾配は明らかではないが、これら北部の海域でも水深が20m以浅であれば正常な底質環境を保てる可能性が示されたと考えられる。

このような水深による底質環境の不連続な変化は、水質の影響と考えられる。東京湾では、夏季に成層が形成され、湾奥海域を中心に底層は広範囲で貧酸素化する。しかし、塩分躍層が形成される10m付近から表層にかけては、夏季でも通常溶存酸素濃度が高く、外洋系水の進入により底層の貧酸素水塊が中層に広がる場合でも、この躍層より上では影響を受けにくい^{12,13)}。このため、水深10m以浅では、貧酸素水塊の影響は少ないと考えられるが、10m以深の水温や塩分、溶存酸素濃度の変化は複雑であり¹²⁾、20~25m付近に水質の境界が存在するかは明らかでない。底質や底生生物に対する貧酸素水塊の影響については、貧酸素状態にどれだけの時間曝されるかといった、累積的な影響を含め、今後さらに調査、研究を進める必要がある。

底質環境の改善に向けて

貧酸素化の解消を目的とした底質改善の手法としては、堆積したヘドロなどを除去する浚渫や、底泥の上に覆砂する方法などがあるが、新たな浮泥の沈降、堆積が続く場所では、浚渫の効果は無に等しく、覆砂による底質改善も一時的なもので、時間経過と共にその効果は失われる¹⁴⁾。

本研究の調査海域のうち、水深30m前後の海域では、含泥率が高く、夏季、冬季とも底生生物は非常に貧相である。このような海域で覆砂による底質改善を行った場合、良好な底質の添加による底生生物相の回復は一時的で、再び汚染された底質に戻ると予測され、安定した底質環境の改善は期待できない。一方、Stn. 3、4、17など水深10m前後の浅い場所では、長期的に安定した底生生物相と良好な底質環境が維持されており、このような浅場の造成が持続的な環境改善方策として有効であると考えられた。本牧沖以北の海域ではこのような浅場のデー

タは得られていないが、Stn. 1、2のような水深20m前後の海域でも、沖合の25m以上の海域と比べて明らかに底質環境が良好であることから、川崎市や横浜市北部の地先でも浅場造成の効果は期待できると考えられる。これらの地先は港湾区域であることから、大規模な浅場の造成は困難であろうが、環境改善の取り組みとして関係者による検討を期待したい。

摘 要

- 1 2009～2011年度の夏季及び冬季に、東京内湾の26点で採泥を行い、底質、底生生物の分析を行った。
- 2 底質調査では、水深20m以深の海域に沿って中ノ瀬西側より南の海域まで、汚染された底質が広がっていた。CODや全硫化物の分布状況は、1981年の調査と比べてほとんど変化はなく、底質環境の改善は見られなかった。
- 3 富岡沖や中ノ瀬では、底質環境が良好で底生生物相も1981年の調査と同様非常に豊かであり、長期間良好な環境が保たれていることが明らかとなった。
- 4 底質環境が最も悪かった調査海域北部では、底生生物も貧相で、無生物ではないものの多様度H' が0の点が複数見られた。
- 5 水深15m以浅の海域では、底質、底生生物とも長期間良好な状態が保たれており、横浜市北部や川崎市地先でも、浅場造成は有効な底質環境の改善方策と考えられた。

謝 辞

調査を実施するにあたり、調査船うしおの甲斐正臣船長はじめ乗組員の方々には、調査準備の段階から実施まで様々な場面でご尽力をいただいた。また、資源環境部(調査当時)の山田佳昭主任研究員、清水詢道非常勤職員には、海上での調査や標本処理など多岐にわたりご協力をいただいた。本研究を支えていただいた方々に感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 石井光廣・長谷川健一・柿野純(2008)：千葉県データセットから見た東京湾における水質の長期変動, 水産海洋研究, **72**(3), 189-199.

- 2) 安藤晴夫・柏木宣久・二宮勝幸・小倉久子・川井利雄(2005)：1980年以降の東京湾の水質汚濁の変遷について—公共用水域水質データによる東京湾水質の長期変動解析—, 東京都環境科学研究所年報2005年版, 141-150.
- 3) 安藤晴夫(2009)：東京都の運河部・内湾部における底質の長期変動傾向の解析, 東京都環境科学研究所年報2005年版, 141-150.
- 4) 矢沢敬三・土屋久男・池田文雄(1986)：東京湾及び相模湾の底質について, 神奈川県水産試験場研究報告, **7**, 5-16.
- 5) 原口明郎(1984a)：東京内湾, 東京湾口及び相模湾の底生生物, 神奈川県水産試験場研究報告, **6**, 27-34.
- 6) 社団法人水産資源保護協会(2013)：水産用水基準7版(2012年版), pp. 104.
- 7) 日本水産資源保護協会編(1980)：新編水質汚濁調査指針, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 552.
- 8) 新城俊也・小宮康明・宮城調勝・与那嶺盛明(2003)：強熱減量試験による石灰質土の炭酸カルシウム含有量の測定, 土と基礎, **51**(4), 32-34.
- 9) 原口明郎(1984b)：東京内湾四季別底生生物の変化, 神奈川県の水生物第6報, 97-131.
- 10) 風呂田利夫(1988)：東京湾における貧酸素水の底生・付着動物群集に与える影響について, 沿岸海洋研究ノート, **25**(2), 104-113.
- 11) 桑原連・清水誠(1989)：東京内湾のマクロベントス分布と水・底質環境, 沿岸海洋研究ノート, **26**(2), 158-171.
- 12) 山田佳昭(1992)：東京内湾域における貧酸素水の季節的消長, 神奈川県水産試験場研究報告, **13**, 65-72.
- 13) 藤原建紀・高橋鉄哉・山田佳昭・兼子昭夫(2000)：東京湾の貧酸素水塊に外洋の海況変動が及ぼす影響, 海の研究, **9**(6), 303-313.
- 14) 鈴木輝明・武田和也・本田是人・石田基雄(2003)：三河湾における環境修復事業の現状と課題, 海洋と生物, **25**(3), 187-199.