

東京湾における植物プランクトン量と 水質 5 項目に関する多変量解析の試み

古畑 和哉

はじめに

東京湾では、陸域から流入する汚染負荷や底泥から海水中に溶出する栄養塩類によって、毎年春から秋にかけて赤潮が発生し、近年ではほとんど恒常的にみられる。赤潮生物、特に植物プランクトンは、世代を終えると海底に沈降・堆積し、バクテリアによって酸化分解される。しかし、夏期に躍層が形成され、表層から底層への酸素の供給が途絶えると、底層の溶存酸素は欠乏し、還元状態で硫化物イオンが生成する。この硫化物イオンを含む低酸素水が表層へ湧昇すると、生じたイオウ粒子によって海面が青白色に濁る現象、いわゆる“青潮”を発生¹⁾し、時に東京湾の貝類漁業に大きな被害を与える²⁾ことがある。このように水質・底質の悪化に関わりがあると考えられる赤潮は、降雨・日照・風浪などの気象・海象、栄養塩や微量物質、生物の種間関係など、複数の要因が重なって発生する³⁾といわれ、それらの要因に関する研究は少なくない。例えば大内⁴⁾は、広島湾奥部の水質に重回帰分析を適用し、赤潮の発生に塩分が大きく関わっていることを指摘している。また加藤⁵⁾は判別分析を行い、伊勢湾における赤潮の発生要因としてCOD・pH・DO・塩分を挙げている。

筆者は、東京湾の赤潮や底層の低酸素水塊の発生状況を把握するため、漁場環境研究室が毎年、夏期に実施している海況調査の結果をもとに多変量解析⁶⁾を試み、東京湾における赤潮の発生要因について若干の考察を行ったので報告する。

資料と方法

表1に多変量解析に用いた資料を示す。

1991年5月21日、5月29日、6月5日、6月26日、7月23日、8月28日、9月3日の計7回、図1に示す東京湾の12調査点(St. 9, St. 6, St. 3, 東京灯標, 浦安, St. 15, 船橋, 波浪観測塔, St. 2, 京葉シーバース, 盤洲Cブイ, 盤洲Bブイ)において、各点の表層から水深2 mごとに水温(°C)、塩分(‰)、pH、酸

素飽和度(%)を多成分水質計(鶴見精機製, TS-WQ-2R)で測定し、このうち表層のデータを解析資料とした。その際、表層水を約3 l、ポリ瓶に採水し、クロロフィルaと懸濁粒子の測定用試水とし、別に試水中の赤潮生物を光学顕微鏡で同定した。

植物プランクトンの現存量を表すクロロフィルaの測定は次のように行った。試水の蛍光を蛍光光度計(Turner Designs製, C10-005R)で測定し、このうち最も強い蛍光を示した試水をガラス繊維濾紙(Whatman製, GF/C)で濾過し、濾紙上の植物色素を90%アセトンで抽出した。SCOR-UNESCOの方法⁷⁾により、抽出液の吸光度を分光光度計(日立製作所製, U-3200)で測定し、クロロフィルaを $\mu\text{g}/\ell$ の単位で求めた。この蛍光とクロロフィルaの相対比から換算して、ほかの試水のクロロフィルaを求めた。

懸濁粒子は、サイズが $60\mu\text{m}$ を越える赤潮生物は非常に少ない⁸⁾ことから、試水を $60\mu\text{m}$ 径のメッシュ・フィルターに通し、濾過海水で5~8倍に希釈した試料をコールター・カウンター(Coulter Electronics製, TA-II)で測定し、粒子量を個/mlの単位で求めた。コールター・カウンターのアパチャー・チューブは、粒子サイズ2~ $40\mu\text{m}$ までの粒子を検出できる $100\mu\text{m}$ 径のものを用いた。

多変量解析は、田中らのBASICプログラム⁹⁾でクラスター分析と重回帰分析を行った。

クラスター分析は、調査点間の距離(非類似度)を標準化ユークリッド平方距離(standardized square-euclidean distance)で、またクラスター間の距離を群平均(group average)で定義し、水温・塩分・pH・酸素飽和度・クロロフィルa・懸濁粒子を変数として調査点の分類を行った。

重回帰分析は、クロロフィルaを目的変数、水温・塩分・pH・酸素飽和度・懸濁粒子を説明変数として分析を行った。重回帰式が目的変数の予測に役立たない説明変数を含むと回帰式の予測精度が悪くなるため、変数減少法(backward method)により変数の選択を行い、最も回帰の当てはまりが良いと思われる重回

表1 解析資料

第1回 ('91.5.21 調査)

調査点	測定項目					
	水温	塩分	pH	DOX	Chl-a	懸濁粒子
St.9	18.5	31.93	8.4	113	19.7	217157
St.6	19.8	30.53	8.6	119	19.7	343043
St.3	21.1	30.01	8.7	123	21.8	397343
東京灯標	21.1	24.88	8.7	167	105.8	758243
浦安	20.7	29.39	8.7	139	52.9	649833
St.15	20.8	29.78	8.7	126	26.9	448290
船橋	21.3	28.41	8.7	143	53.8	735567
波浪観測塔	19.8	29.24	8.7	110	24.8	452600
St.2	20.2	29.44	8.7	116	26.5	486457
京葉トンネル	19.8	29.42	8.7	115	21.0	422590
盤洲Cブイ	20.1	30.96	8.4	100	16.4	505300
盤洲Bブイ	19.3	31.22	8.4	99	10.1	482667

第2回 ('91.5.29 調査)

調査点	測定項目					
	水温	塩分	pH	DOX	Chl-a	懸濁粒子
St.9	18.2	31.35	8.4	106	63.7	391443
St.6	18.9	30.56	8.5	130	134.7	435090
St.3	19.3	30.33	8.6	154	208.0	522577
東京灯標	20.4	24.12	8.4	116	135.8	502343
浦安	19.7	29.39	8.5	116	34.7	510800
St.15	19.4	29.84	8.5	137	65.9	419343
船橋	18.5	30.72	8.2	71	34.7	319833
波浪観測塔	17.3	31.63	8.1	66	11.4	268790
St.2	19.1	30.12	8.5	144	100.0	484833
京葉トンネル	19.2	30.10	8.6	149	135.8	462710
盤洲Cブイ	18.4	31.38	8.4	123	59.1	318857
盤洲Bブイ	18.7	30.94	8.6	156	139.8	462177

第3回 ('91.6.5 調査)

調査点	測定項目					
	水温	塩分	pH	DOX	Chl-a	懸濁粒子
St.9	19.7	29.60	8.5	127	68.6	612477
St.6	20.3	26.77	8.6	156	95.5	771143
St.3	19.9	28.79	8.5	131	80.9	565110
東京灯標	20.0	26.09	8.5	145	87.1	674223
浦安	20.2	27.87	8.6	149	86.2	611500
St.15	19.6	30.17	8.5	133	60.7	491123
船橋	19.0	31.41	8.2	87	20.2	477943
波浪観測塔	-	-	-	-	-	-
St.2	-	-	-	-	-	-
京葉トンネル	-	-	-	-	-	-
盤洲Cブイ	-	-	-	-	-	-
盤洲Bブイ	-	-	-	-	-	-

第4回 ('91.6.26 調査)

調査点	測定項目					
	水温	塩分	pH	DOX	Chl-a	懸濁粒子
St.9	22.4	26.71	8.7	166	66.0	355577
St.6	23.8	21.46	8.7	197	117.4	461590
St.3	22.6	27.83	8.7	187	98.3	444490
東京灯標	21.6	19.40	7.6	37	23.8	465100
浦安	25.5	21.68	8.6	201	105.6	505833
St.15	26.0	23.63	9.0	200>	89.8	827457
船橋	25.7	28.66	9.0	200>	80.6	465010
波浪観測塔	24.2	27.87	9.1	200>	101.1	468443
St.2	24.9	25.81	9.1	200>	89.8	400790
京葉トンネル	24.0	27.25	9.0	200>	64.1	348810
盤洲Cブイ	22.3	29.29	8.6	200>	63.4	353957
盤洲Bブイ	22.8	28.91	8.7	197	71.4	295667

第5回 ('91.7.23 調査)

調査点	測定項目					
	水温	塩分	pH	DOX	Chl-a	懸濁粒子
St.9	26.3	28.99	8.9	214	70.1	2363176
St.6	25.9	26.07	9.1	200>	183.1	4125172
St.3	26.5	24.44	9.2	200>	172.1	4246020
東京灯標	27.3	17.66	8.7	212	202.0	5467155
浦安	28.1	25.33	9.3	200>	168.5	4790135
St.15	28.5	26.49	9.3	200>	173.5	4802452
船橋	26.7	27.31	9.0	192	143.2	4730928
波浪観測塔	28.3	26.39	9.2	200>	143.2	3998868
St.2	26.7	25.36	9.0	161	156.8	3735553
京葉トンネル	26.3	27.42	9.0	200>	110.6	2793708
盤洲Cブイ	27.3	27.94	9.0	200>	108.7	2428652
盤洲Bブイ	26.6	28.23	8.9	185	91.0	3188567

第6回 ('91.8.28 調査)

調査点	測定項目					
	水温	塩分	pH	DOX	Chl-a	懸濁粒子
St.9	25.2	26.36	8.7	161	51.2	494067
St.6	25.2	29.65	8.6	160	36.2	527477
St.3	24.5	27.78	8.8	201	56.4	618667
東京灯標	24.5	20.33	8.6	170	76.5	624543
浦安	25.6	27.85	8.7	202	71.6	718090
St.15	25.2	29.37	8.8	193	33.1	554923
船橋	24.0	31.08	8.4	118	36.2	813743
波浪観測塔	25.8	28.99	8.8	184	30.8	505123
St.2	25.5	28.86	8.7	194	40.5	537710
京葉トンネル	25.1	29.35	8.7	194	38.0	621157
盤洲Cブイ	24.1	30.75	8.5	152	66.7	433677
盤洲Bブイ	24.9	28.38	8.8	196	65.6	469033

第7回 ('91.9.3 調査)

調査点	測定項目					
	水温	塩分	pH	DOX	Chl-a	懸濁粒子
St.9	25.6	29.3*	8.6	144	60.8	861677
St.6	26.8	22.41	8.8	195	90.8	1313443
St.3	27.9	27.41	8.7	163	21.8	474743
東京灯標	26.4	18.14	8.8	201	129.2	1479710
浦安	28.2	26.75	8.8	193	44.0	778790
St.15	27.6	27.55	8.7	167	28.2	531777
船橋	27.5	26.9*	8.8	200>	83.3	1072090
波浪観測塔	27.6	27.57	8.8	158	28.2	546200
St.2	27.2	27.64	8.7	149	16.8	347767
京葉トンネル	26.6	28.57	8.7	165	25.0	473233
盤洲Cブイ	26.3	29.34	8.6	141	31.3	355943
盤洲Bブイ	27.3	28.85	8.7	159	28.5	465210

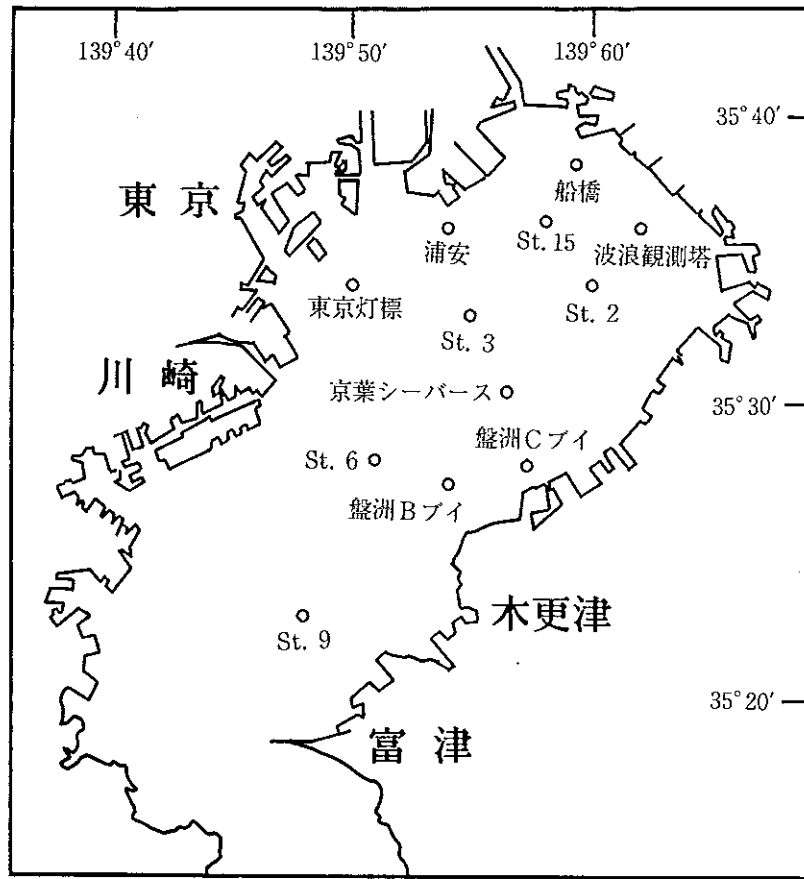


図1 東京湾における調査点

帰式（最良重回帰式）を求めた。

結果

図2にクラスター分析の結果，得られたデンドログラム（樹形図）を示す。また表2に重回帰分析の結果，得られた最良重回帰式の統計量を示す。

計7回の調査で，水温は17.3～28.2℃の範囲に，pHは7.6～9.3の範囲にあった。塩分は17.66～31.93%の範囲にあり，毎回，荒川・隅田川・多摩川の河口域に位置する東京灯標で最も低かった。酸素飽和度は37～200%以上^{*}を示し，多くは過飽和状態であったが，5月29日に船橋と波浪観測塔で60～70%台，6月5日に船橋で87%とやや低く，6月26日には東京灯標で37%とごく低い値を示した。これは，北東風による表層水の吹送が，底層の低酸素水を表層へ湧昇させたためとみられる。

赤潮の状況は，船上からの目視観察によれば，5月から7月にかけては褐色系の比較的大規模な赤潮，8

月と9月は褐緑色系の比較的小規模な赤潮であった。なお現在，赤潮の定量的な定義はなく，植物プランクトンに含まれるクロロフィルaで50 $\mu\text{g}/\ell$ 以上を赤潮とする見解¹⁰⁾があるが，ここでは，微小な浮遊生物の異常繁殖に原因する海面の着色現象を赤潮とした。

赤潮の構成プランクトンは，5月21日から6月5日までの3回の調査では渦鞭毛藻（*Prorocentrum minimum*, *Gyrodinium fissum*）とラフィド藻（*Heterosigma akashiwo*）主体，6月26日と7月23日の調査では珪藻（*Skeletonema costatum*, *Thalassiosira sp.*）と渦鞭毛藻（*Protoperidinium pellucidum*, *Prorocentrum triestinum*）の複合相，8月28日と9月3日の調査では珪藻（*Nitzschia pungens*, *Eucampia zodiacus*, *Cylindrotheca closterium*）主体であった。ただし，5月29日・波浪観測塔，6月5日・船橋，6月26日・東京灯標のように酸素飽和度の低い調査点では，出現相はほかの調査点とは異なり，微小藻類やデトリタスが優占した。

*多成分水質計の酸素飽和度の測定上限は200%である。

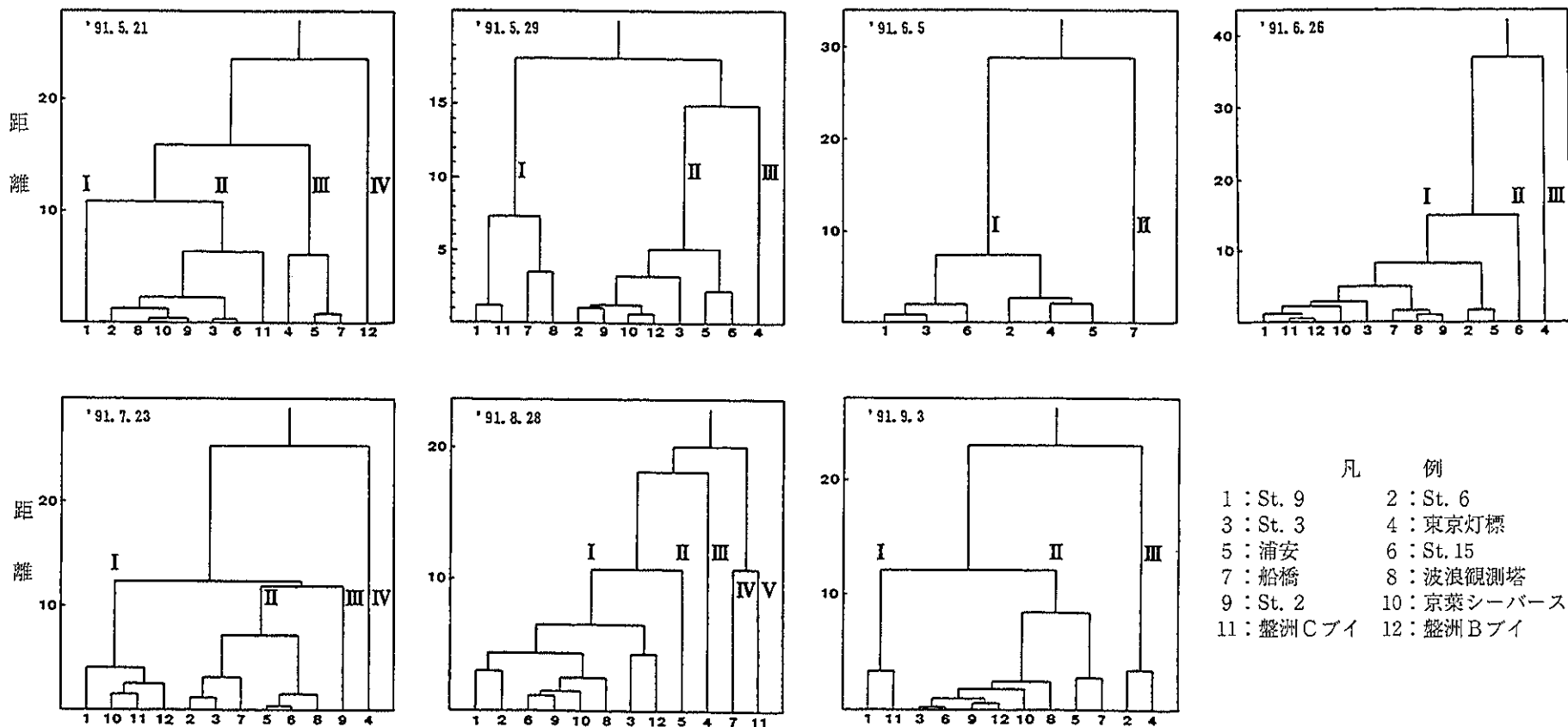


図2 デンドログラム (距離10でI~Vのクラスターに分類)

表2 最良重回帰式の統計量

調査日	偏回帰係数(標準偏回帰係数)					定数	分散比	重相関係数	寄与率	自由度調整 済み寄与率
	水温	塩分	pH	酸素飽和度	懸濁粒子					
'91.5.21	-4.6338 (-0.1459)	-6.7427 (-0.4540)	-40.4694 (-0.2046)	0.9095 (0.6638)	0.00003 (0.1588)	550.6	94.8	0.9937	0.9875	0.9771
'91.5.29				1.4955 (0.7669)		-89.3	14.3	0.7669	0.5882	0.5470
'91.6.5		-9.5618 (-0.7128)	232.2510 (1.2290)	-0.9297 (-0.8291)		-1502.1	62.8	0.9921	0.9843	0.9687
'91.6.26		-4.1232 (-0.5471)		0.5614 (1.0438)		84.7	13.5	0.8661	0.7515	0.6946
'91.7.23	-11.0200 (-0.2340)	-9.0605 (-0.6580)	111.5440 (0.4926)		0.00002 (0.4101)	-396.4	21.2	0.9611	0.9237	0.8800
'91.8.28		-3.3660 (-0.5707)				145.3	4.8	0.5707	0.3257	0.2582
'91.9.3	-5.6437 (-0.1218)				0.00009 (0.9446)	139.0	116.2	0.9812	0.9627	0.9544

考 察

図2において、各デンドログラムを距離10で横に切ると、2個ないし5個のクラスターが得られる。このうち、7調査点について分析した6月5日のデンドログラムを除けば、東京湾の12点は3個ないし5個のクラスターに分類される。それらのクラスターは隣接する複数の調査点で構成されることが多く、1調査点が独立したクラスターをつくることは比較的少ない。クラスター内の調査点の構成をデンドログラム別に比較すると、1調査点・1クラスターの例を除けば、クラスターが特定の調査点で構成される傾向は認められない。これは、東京湾の12点が毎回異なるクラスターに分類されることを示している。

12点のうち、水温・塩分・pH・酸素飽和度・クロロフィルa・懸濁粒子がいずれも極値を示した調査点（6月5日・船橋、6月26日・東京灯標）は、デンドログラム上で独立したクラスターをつくり、ほかのクラスターとは融合しにくい。これは、底層の低酸素水が表層へ湧昇し、非類似度が高くなったためとみられる。

重回帰分析において、変数減少法により説明変数の選択を行うと、表2の偏重回帰係数の項にみられるように、5月21日は全説明変数、5月29日は酸素飽和度、6月5日は塩分・pH・酸素飽和度、6月26日は塩分・酸素飽和度、7月23日は水温・塩分・pH・懸濁粒子、8月28日は塩分、9月3日は水温・懸濁粒子がそれぞれ回帰式に取り込まれた。塩分は7回帰式中、5回帰式に取り込まれ、最も多く回帰式に取り込まれた説明変数である。また、塩分とクロロフィルaの間には負の相関があった。

さらに、これらの最良重回帰式の有意性を分散分析により検定したところ、7回帰式中、6回帰式が5%水準で有意であった。有意でなかったのは8月28日で、その理由として説明変数の変動の範囲が狭かったことが考えられる。しかし、有意となった重回帰式の自由度調整済み寄与率は0.5470~0.9771の範囲にあり、概ね良好な結果が得られたといえよう。

次に、7回中、12点を対象にした6回の調査について、クラスターを3個ないし5個に分類し、これらのクラスターによって東京湾の海域別区分を試みると、区分は必ずしも明瞭ではない。しかし、おおよその傾向として、東京湾を荒川・隅田川・多摩川の河口域、千葉県沿岸部、さらに両海域に挟まれた湾中央部の3海域に区分することができると思われる。

12点のうち、東京灯標では毎回、塩分が最低値を示したほか、クロロフィルaが7回中4回まで最高となった。また、7デンドログラム中、4つのデンドログラムで独立したクラスターをつくった。このことは、東京灯標の位置する荒川・隅田川・多摩川の河口域が河川水の流入によって低塩分であること、またクロロフィルaが示すように高い低次生産量をもつことで、東京灯標がほかの調査点とは区別されることを示している。一方、東京灯標以外の調査点では、隣接する調査点は同じクラスターに属する傾向があり、水質環境は比較的均質であったと考えられる。

以上、クラスター分析による東京湾の海域区分の結果、河口域はほかの海域と比較して非類似性が高いといえ、これは河川水の流入が河口域の水質環境、特に塩分に影響するためと考えられる。また、水質5項目に関する重回帰分析の結果、塩分はクロロフィルaと負の相関があり、クロロフィルaを予測する最もよい説明変数である。従って、植物プランクトンの現存量をクロロフィルaで表すならば、河口域における赤潮の発生は、塩分によって間接的に予測できると考えられる。

ところで、大雨による河川水の流入量の増加や、強風による海水の鉛直混合など、気象・海象の顕著な変化は、水温・塩分などの物理的環境のほか、栄養塩などの化学的環境に大きな変化をもたらし、特異な水質環境を生じると考えられる。このような現象は内湾の奥部、特に河口域で起こり易く、もとより河口域の水質環境は赤潮発生の条件を満たしている¹¹⁾。東京湾の赤潮発生機構を解明するためには、今後、河口域に着目し、今回の多変量解析で用いなかった降雨や日照、風浪などの気象・海象のほか、栄養塩や微量物質などの資料を用いて、河口域における赤潮の発生要因を詳細に検討する必要があると考える。

要 約

- 1) 1991年5月から同9月にかけて、東京湾の12点において計7回、水質調査を行い、得られた表層のデータ（水温・塩分・pH・酸素飽和度・クロロフィルa・懸濁粒子）を資料として、クラスター分析と重回帰分析を行った。
- 2) クラスター分析の結果、東京湾の12点を3~5個のクラスターに分類した。しかし、クラスターが特定の調査点で構成される傾向は認められなかった。
- 3) 全般に東京湾の海域区分は明瞭ではなかったが、

河口域は低塩分・高クロロフィルaを示し、ほかの海域とは区別された。

- 4) 重回帰分析の結果, 説明変数の選択を行って最良重回帰式を求めると, 7回帰式中, 6回帰式が5%水準で有意となった。有意となった回帰式の自由度調整済み寄与率は, 0.5470~0.9771の範囲にあった。
- 5) 塩分は, クロロフィルaを予測する5つの説明変数のうち, 最も多く(5%水準で有意となった6回帰式中, 5回帰式)最良重回帰式に取り込まれ, クロロフィルaと負の相関があった。
- 6) 以上のことから, 河口域における赤潮の発生は, 塩分によって間接的に予測できると考えた。

文 献

- 1) 環境庁(1988): 青潮の発生機構の解明等に関する調査. 昭和62年度環境庁委託業務結果報告書, 東京久栄, 1-3.
- 2) 柿野 純(1986): 東京湾内湾における貝類へい死事例. 水産土木, 23(1), 41-47.
- 3) 中田英昭(1987): 赤潮発生環境の構造分析. 赤潮の科学(岡市友利編), 恒星社厚生閣, 東京, 256-266.
- 4) 大内 晟(1982): 重回帰式による赤潮発生予測. 日水誌, 48(9), 1245-1250.
- 5) 加藤 進, 広部 宏, 前川徳昭(1985): 判別分析からみた赤潮要因について. 日水誌, 51(1), 7-12.
- 6) 奥野忠一, 久米 均, 芳賀敏郎, 吉澤 正(1971): 多変量解析法. 日科技連, 東京, 1-24.
- 7) 安達六郎, 入江春彦編(1980): 赤潮マニュアル. 試料の採集・処理・観察法, 赤潮研究会分類班, 9.
- 8) SCOR-UNESCO(1966): Determination of photosynthetic pigments in seawater. Monographs on Oceanographic Methodology, 1, 11-18. UNESCO, Paris.
- 9) 田中 豊, 垂水共之, 脇本和昌(1984): 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, 東京.
- 10) 日本水産資源保護協会(1981): 埋立ておよび海底地形の改変等に伴う漁業影響モニタリング調査暫定指針(その4). 月報, No. 322, 12-15.
- 11) 才野敏郎(1991): フロント域での生化学過程. 海洋, 23(4), 208-216.