

## 第2章第1節 横浜市沿岸および沖合域の水質変動特性

二宮 勝幸

### 2-1-1 はじめに

東京湾は、奥行きが深く湾口が狭いため、外洋水との交換が悪く、さらに河川を通して多量の汚濁物が流入することから、その水質改善ははかばかしくない。また、富栄養化の要因物質である窒素・磷についてみると、海域としては依然高い値にあり、春から秋にかけて赤潮の発生がみられ、二次汚濁を引き起こしている。このような中で海域の水質改善を進めるためには、赤潮の機構解明や発生子測などの調査研究がますます重要になってきている。しかし、赤潮は複雑な現象で、生物学的・化学的要因だけでなく海況・潮流や気象条件などによっても影響され、それらの要因と赤潮との関係を見出すことは極めて困難である。最近の研究によって、赤潮と環境因子との関係が一部明らかにされてきているが<sup>1)2)</sup>、未だに不十分というのが現状であろう。その理由として、赤潮現象が複雑であるほか、調査対象項目や領域が広く、人員や経費などに多大の負担がかかるため、調査規模が小さくなり、しかも調査期間も短くならざるを得ないことなどが原因しているものと思われる。

一方、水域における水質汚濁状況の把握のため、海域においても公共用水域水質測定計画に基づく水質測定が行われている。東京湾の水質測定は、沿岸の各都県市が測定地点を分担してほぼ東京湾全域について、月1回程度の頻度で実施されており、貴重なデータが蓄積されている。これだけ規模が大きく持続性のあるデータはほとんどないといえよう。従って、これらのデータから得られる知見は多いと考えられる。

そこで、ここでは最近の公共用水域水質測定結果を用いて、東京湾の西部に相当する横浜市沿岸および沖合域における水質の時系列変動特性や空間濃度分布を、特に赤潮との関係について詳細に検討した<sup>3)</sup>。

### 2-1-2 検討資料

検討に用いた資料は、神奈川県公共用水域水質測定計画測定結果の1981年度から1985年度までの毎月上旬1回のデータである<sup>4)</sup>。表2-1-1に沿岸7地点(St. 1~7)および沖合4地点(St. 8~11)の合計11地点の地点名および水深を、図2-1-1にそれらの地点の位置を示す。また、表2-1-2に項目名を示す。

表2-1-1 地点名および水深

地点番号	地点名	水深(m)
1	鶴見川河口	7.7
2	横浜港内	11.4
3	本牧沖	29.9
4	磯子沖	16.8
5	富岡沖	16.0
6	平潟湾沖	17.9
7	平潟湾内	2.7
8	扇島沖	26.9
9	中の瀬北	30.6
10	中の瀬南	30.7
11	第三海堡東	44.2

### 2-1-3 結果と考察

#### 2-1-3-1 各水質項目の時系列変動特性と空間濃度分布

表2-1-3および表2-1-4に地点別の上層および下層水質の平均値を示す。各水質項目の中でも、水温および塩分濃度は成層の形成や藻類の増殖にとって大きな物理的要因であり、海域における河川水の影響範囲を知る上でも重要な水質項目である。ここでは、まず水温および塩分濃度の時系列変動特性について、次に各水質項目相互の関連について検討した。

表 2-1-2 項目名

水温 (Temp)
透明度 (Trans)
pH
COD
溶存酸素 (DO)
有機態磷 (Org-P)
磷酸態磷 (PO <sub>4</sub> -P)
有機態窒素 (Org-N)
全無機態窒素 (TIN)
アンモニア態窒素 (NH <sub>4</sub> -N)
亜硝酸態窒素 (NO <sub>2</sub> -N)
硝酸態窒素 (NO <sub>3</sub> -N)
塩分濃度 (Salin)
クロロフィル-a (chl-a)

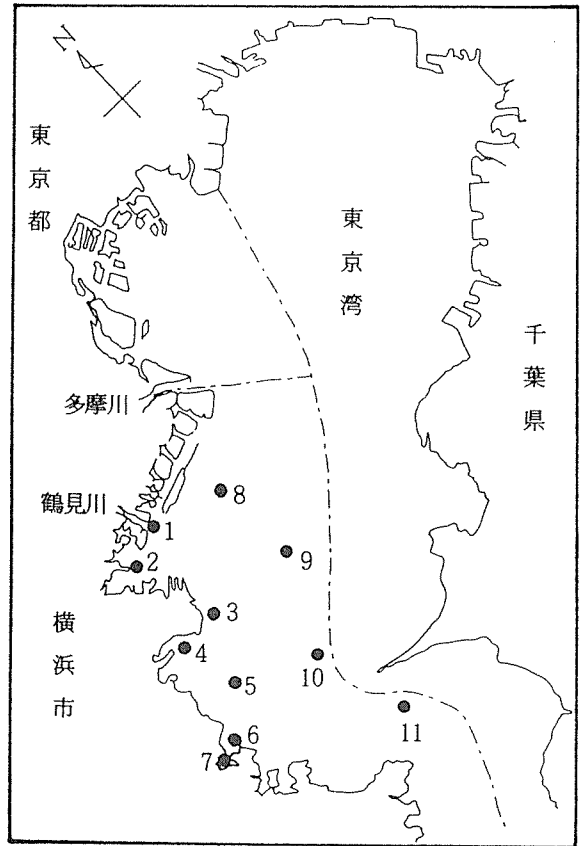


図 2-1-1 測定地点

表 2-1-3 地点別の上層水質の平均値

項目 地点番号	Temp (°C)	Trans (m)	pH	COD (mg/l)	DO (mg/l)	Org-P (mg/l)	PO <sub>4</sub> -P (mg/l)	Org-N (mg/l)	TIN (mg/l)	NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	NO <sub>2</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	Salin (‰)	chl-a (mg/m <sup>3</sup> )
1	18.7	2.2	8.0	5.5	7.5	0.060	0.154	2.34	2.40	1.74	0.104	0.55	24.7	20.9
2	17.3	2.7	8.2	4.7	8.5	0.058	0.061	1.05	0.75	0.36	0.064	0.32	28.9	22.5
3	17.2	3.1	8.3	4.5	9.3	0.056	0.028	0.91	0.47	0.20	0.041	0.23	30.5	27.7
4	17.5	3.0	8.3	4.4	8.7	0.054	0.041	0.87	0.52	0.24	0.043	0.23	30.7	27.3
5	17.4	3.3	8.3	3.9	9.1	0.042	0.027	0.78	0.41	0.16	0.038	0.21	30.9	18.1
6	17.3	3.2	8.3	4.5	8.9	0.055	0.030	0.82	0.42	0.17	0.036	0.21	31.0	34.5
7	17.4	1.9	8.0	5.6	6.9	0.082	0.172	1.43	1.02	0.65	0.075	0.30	26.4	25.9
8	17.3	2.9	8.3	5.4	9.8	0.053	0.053	0.79	0.68	0.36	0.049	0.28	29.4	46.7
9	17.1	3.5	8.3	3.9	9.1	0.045	0.023	0.72	0.42	0.16	0.038	0.22	30.5	22.6
10	17.2	3.7	8.3	2.9	8.7	0.030	0.022	0.60	0.33	0.11	0.031	0.19	31.5	10.8
11	17.6	4.7	8.2	2.3	8.0	0.022	0.021	0.50	0.26	0.09	0.022	0.15	32.4	7.7

表 2-1-4 地点別の下層水質の平均値

項目 地点番号	Temp (°C)	pH	COD (mg/l)	DO (mg/l)	Org-P (mg/l)	PO <sub>4</sub> -P (mg/l)	Org-N (mg/l)	TIN (mg/l)	NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	NO <sub>2</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	Salin (‰)
1	17.3	8.1	3.0	7.2	0.028	0.063	0.95	0.79	0.46	0.054	0.27	30.0
2	16.3	8.0	2.2	6.5	0.015	0.067	0.68	0.57	0.30	0.041	0.23	31.3
3	15.9	8.1	1.4	6.5	0.010	0.041	0.45	0.29	0.10	0.022	0.17	33.5
4	16.3	8.1	2.2	7.2	0.020	0.042	0.64	0.40	0.17	0.032	0.21	32.1
5	16.5	8.1	1.8	7.2	0.018	0.036	0.55	0.35	0.14	0.030	0.19	32.3
6	16.3	8.1	1.8	7.1	0.016	0.038	0.50	0.35	0.13	0.029	0.19	32.5
7	17.2	8.0	3.8	7.0	0.046	0.107	1.01	0.71	0.41	0.055	0.24	29.1
8	15.5	8.0	2.1	5.5	0.015	0.060	0.33	0.38	0.16	0.026	0.19	33.3
9	15.9	8.1	1.8	6.7	0.013	0.037	0.43	0.29	0.11	0.021	0.17	33.4
10	16.1	8.1	1.4	7.0	0.010	0.031	0.43	0.24	0.07	0.018	0.15	33.6
11	16.4	8.1	1.1	7.0	0.008	0.025	0.32	0.19	0.05	0.012	0.12	34.0

### 2-1-3-1-1 水温の時系列変動

図2-1-2に地点別の上・下層水温の時系列を示す。水温は上・下層とも夏期に高く冬期に低くなる季節変動を示した。また、夏期には上層水温の方が下層水温より高くなり、東京湾全域で成層構造が発達していることが認められた。成層の形成と崩壊には、上層と下層の水温差が大きな要因となっている。

図2-1-3に上層と下層の水温差の時系列を示す。St. 7では他地点ほど大きな水温差はみられないが、そのほかの地点では明確な季節変動を示し、4月頃から水温差が正、すなわち下層水温より上層水温の方が高くなり、それが10月頃まで続いた。その水温差が最大になる時期は沿岸、沖合とも8月頃であり、St. 3および沖合では沿岸より水温差が大きかった。St. 7で上・下層の水温差がみられないのは、強内湾性で水深が2.7mと浅く風や潮流によって上層水と下層水が混合し易いためであり、沿岸のSt. 3と沖合の地点で水温差が大きいのは水深が25m以下と深いので、密度躍層により混合効果や伝熱効果が下層まで及びにくいと考えられる。

一方、図2-1-2の年最高水温についてみると、地点並びに年によって多少の違いはあるものの、年最高水温は上層では8月に、下層では9月前後に現れており、上層より下層のほうが後に現れるという時間の遅れが認められた。この理由として、上層水は大気温度に敏感に反応するのに対し、下層においては密度躍層が存在するため上層水とのエネルギー交換が悪く、しかも海水の比熱も大きいので下層水は上層水温の変化にすぐ反応せず時間遅れで水温の変化が生じているものと思われる。下層水の年最高水温が9月頃に現れるということは、底質中ではその頃に微生物活性が最も高くなるため下層水は嫌気状態になり底質からの $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出も生じ易くなる<sup>9)</sup>。そして、上・下層の水温差が縮まり成層構造も壊れ易くなるだけでなく、風の影響により $\text{PO}_4\text{-P}$ の豊富な下層水が湧昇しても、下層水温が高いため上層水温が比較的高い状態を保持し易いと考えられる。このことは、9月頃に湧昇連関型の赤潮が発生し易い原因の一つになっていると推察される<sup>1)</sup>。

地点による年最高水温の上・下層での時間の遅れを調べるため、2つの周期的時系列データの相関係数はその2つの時系列の位相差の余弦で表されること<sup>7)</sup>を用いて検討することにした。すなわち、図2-1-2から水温の時系列はほぼ周期的時系列とみなすことができ、周期性を有する2項目間の位相差はその項目間の相関係数の逆余弦で表されるので、地点別の上・下層水温の相関係数から遅れの時間を計算により求めることができる。但し、図2-1-2からも明かなように、遅れの時間は年によって違いがあり、また冬期は循環期に相当するので上層水と下層水の混合が活発になり、時間の遅れや水温差はほとんど見られない。従って、図2-1-2のデータをそのまま用いて計算を行うと精度が悪くなる。そこで、各地点の平均的な遅れの時間を求めるため、8・9月の前後3ヶ月の5月～12月のデータの5年間平均値を用いて計算した。表2-1-5に地点別の5月～12月の平均上層水温と平均下層水温の相関係数および遅れの時間を示す。

表2-1-5から、遅れの時間が最も小さいのはSt. 7の0.22ヵ月であり、次にSt. 1の0.42ヵ月であった。St. 3を除く沿岸4地点(St. 2, St. 4, St. 5, St. 6)は0.64ヵ月から0.86ヵ月の範囲にあるのに対し、St. 3では1.24ヵ月と長かった。また沖合の4地点(St. 8, St. 9, St. 10, St. 11)は1.40ヵ月から1.58ヵ月の範囲にあり、沿岸と沖合のほぼ2つのグループに分けられた。St. 1の遅れの時間がSt. 7に次いで小さいのは、St. 1の水深が7.7mと浅く、しかもそこが鶴見川の直接的影響を受け上下混合が盛んに行われているためと考えられる。そのほかの沿岸では半月から1ヵ月程度の遅れの時間があり、沖合では1ヵ月半程度の時間の遅れが認められた。これらの違いはいずれも水深など地形の違いによるものと推察された。

### 2-1-3-1-2 塩分濃度の時系列変動

図2-1-4に地点別の上層および下層の塩分濃度の時系列を示す。図2-1-4から、いずれの地点も夏期に上層の塩分濃度が小さくなるという季節変動がみられ、塩分濃度の平均値が30%以下を示す地点は、St. 1とSt. 7のほか、St. 2とSt. 8であった(表2-1-3)。St. 2で塩分濃度が小さい理由は、流入河川水の影響と閉鎖性が大きいためであるが、沖合のSt. 8は鶴見川河川水の影響が及んでいるとは考えられず、

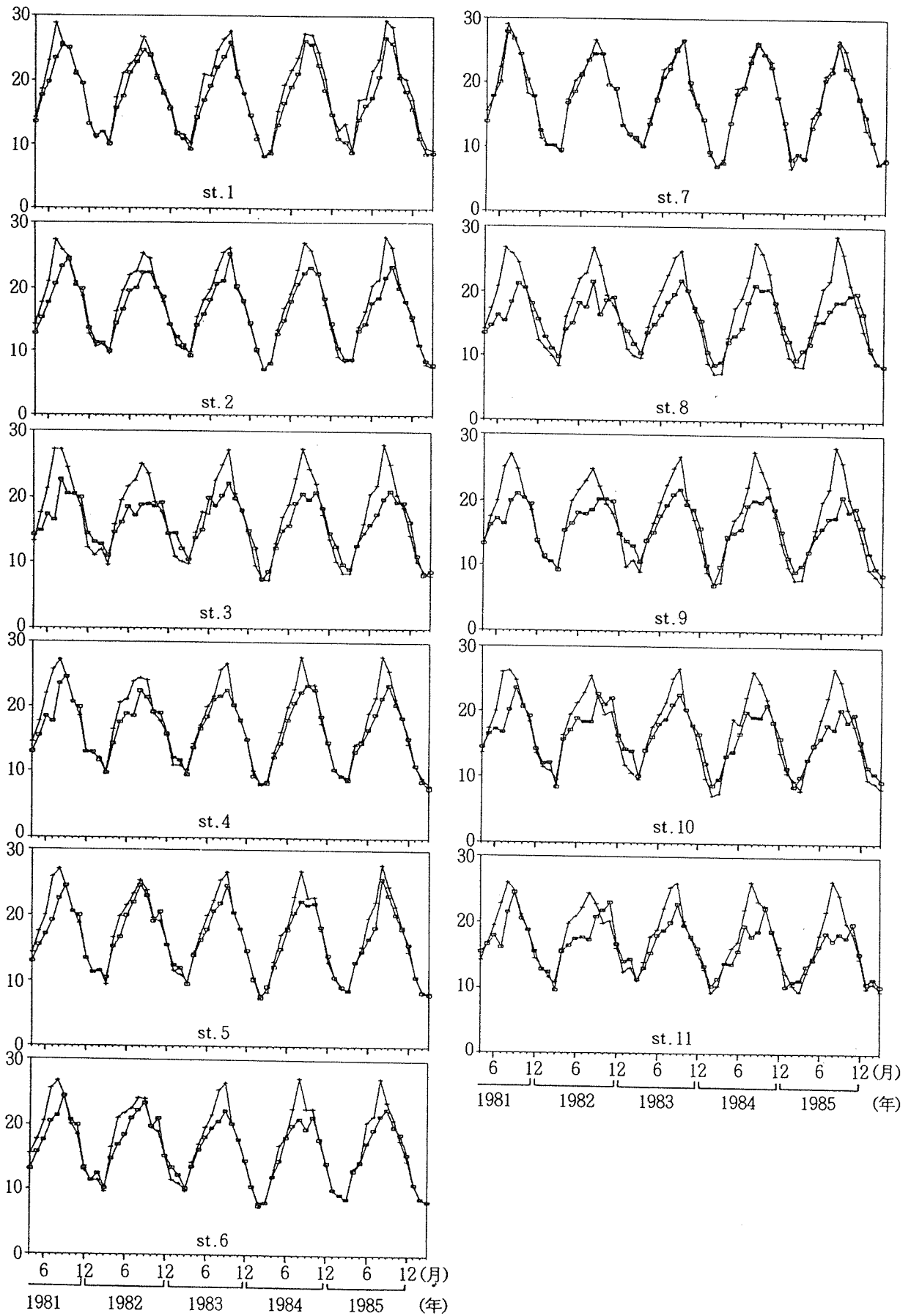


図2-1-2 上層(+ )および下層(□)の水温(°C)の時系列

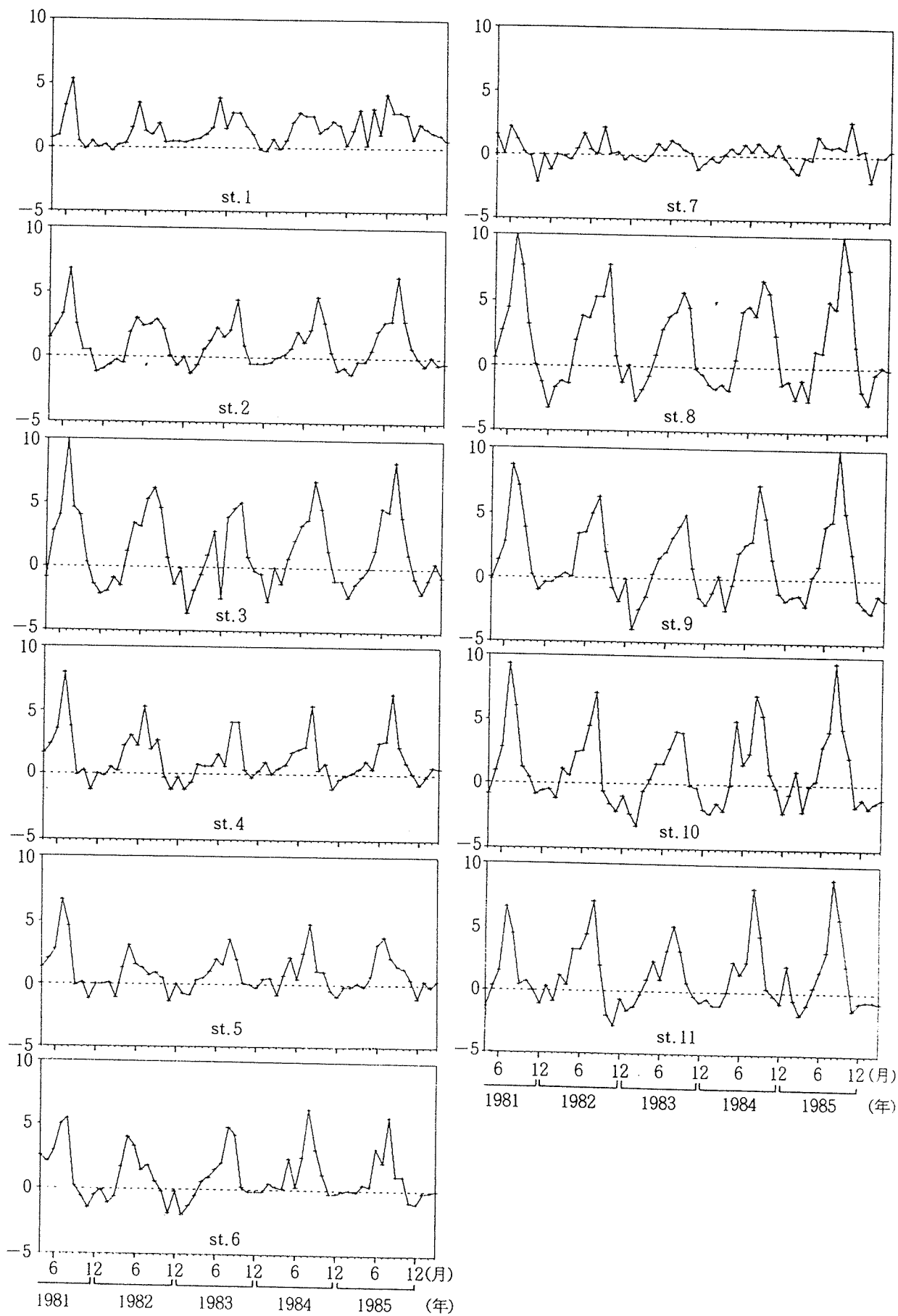


図2-1-3 上層と下層の温度差(°C)の時系列

表2-1-5 上層水温と下層水温の相関係数およびその最高水温の時間差

地点番号	相関係数	時間差(月)
1	0.975	0.42
2	0.925	0.75
3	0.798	1.24
4	0.917	0.79
5	0.944	0.64
6	0.901	0.86
7	0.994	0.22
8	0.677	1.58
9	0.742	1.40
10	0.716	1.48
11	0.681	1.57

むしろ湾奥からの淡水の影響があるものと思われる。沖合においては、湾奥の St. 8 から湾口の St. 11 に向けて淡水の影響が小さくなっていくのが認められた。次に、下層の塩分濃度を見てみると、St. 3 を除く沿岸では下層の塩分濃度は上層の塩分濃度の変動と順に対応しているのに対して、St. 3 および沖合では下層の塩分濃度は冬期に比べ夏期の方がやや高く、しかも冬期には上層と下層の塩分濃度は比較的近い値を示した。このような傾向を示すのは、夏期の成層構造の発達と冬期の循環による上下混合のためであり、水深の違いが沿岸と沖合における違いを生じさせていると考えられる。

### 2-1-3-1-3 主成分分析による St.3 における水質変動特性の解析

各水質項目間の時系列変動特性を詳細に検討するため、一例として St. 3 の水質データに相関係数に基づく主成分分析法を適用し<sup>7)</sup>、その変動特性を調べた。表2-1-6に上層水質の、表2-1-7に下層水質の第一から第三主成分までの固有値、因子負荷量および寄与率を示す。また、図2-1-5に上層水質の、図2-1-6に下層水質の第一から第三主成分までの主成分スコアの時系列を示す。

まず、上層水質(図2-1-5)についてみると、第一および第三主成分は季節変動を示し、最高値は各々6月頃と2月頃にあるが、第二主成分は明確な季節変動を示さなかった。一方、表2-1-6から第一主成分の因子負荷量のうち、水温、pH、COD、DO、Org-P、Org-N および chl-a が正の値、そして透明度、PO<sub>4</sub>-P、TIN、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N および塩分濃度が負の値を示した。前者は夏期に高い値を示す項目であり、後者はその逆の季節変動を示す項目であることから、第一主成分は夏期の富栄養化現象を説明していると考えられる。第二主成分の因子負荷量については、水温と塩分濃度が正值、そして透明度と pH を除く他の項目が負値を示しており、これは満潮時の海水の影響が大きい、すなわち塩分濃度が高い時に COD や 磷・窒素の栄養塩類濃度が低くなることを、逆に干潮時の河川水の影響が大きい時には COD などが高くなることを表している。季節変動がみられないことを考え合わせると、第二主成分は潮汐の影響を説明しているものと思われる。第三主成分の因子負荷量が大きい項目は塩分濃度と水温で、各々0.902と-0.672であった。水温と塩分濃度の時系列変動の項で述べたように、これは水温と塩分濃度の大きな季節変動を説明していると思われる。

つぎに下層水質(図2-1-6)についてみると、第一主成分は8月に最高値をもつ季節変動を示すが、第二および第三主成分はランダムに変動している。表2-1-7において第三主成分は寄与率が9.9%と小さく、しかも大きな因子負荷量をもつ項目がないことから、第一および第二主成分について検討することにした。表2-1-7から、第一主成分の因子負荷量が正の項目は水温、PO<sub>4</sub>-P および塩分濃度だけであり、DO などそれ以外の項目は負の値を示している。これは、夏の成層期に底質が嫌気状態になるのに伴い、下層の DO が減少し、底質から PO<sub>4</sub>-P などが溶出してくること<sup>5),6)</sup>を意味している。従って、第一主成分は夏期において嫌気状態にある底質の下層水への影響を表しているものと説明できる。第二主成分の因子負荷量が正の値の項目は塩分濃度と pH および DO であり、Org-P を除き磷・窒素化合物は負の値であった。これは、塩

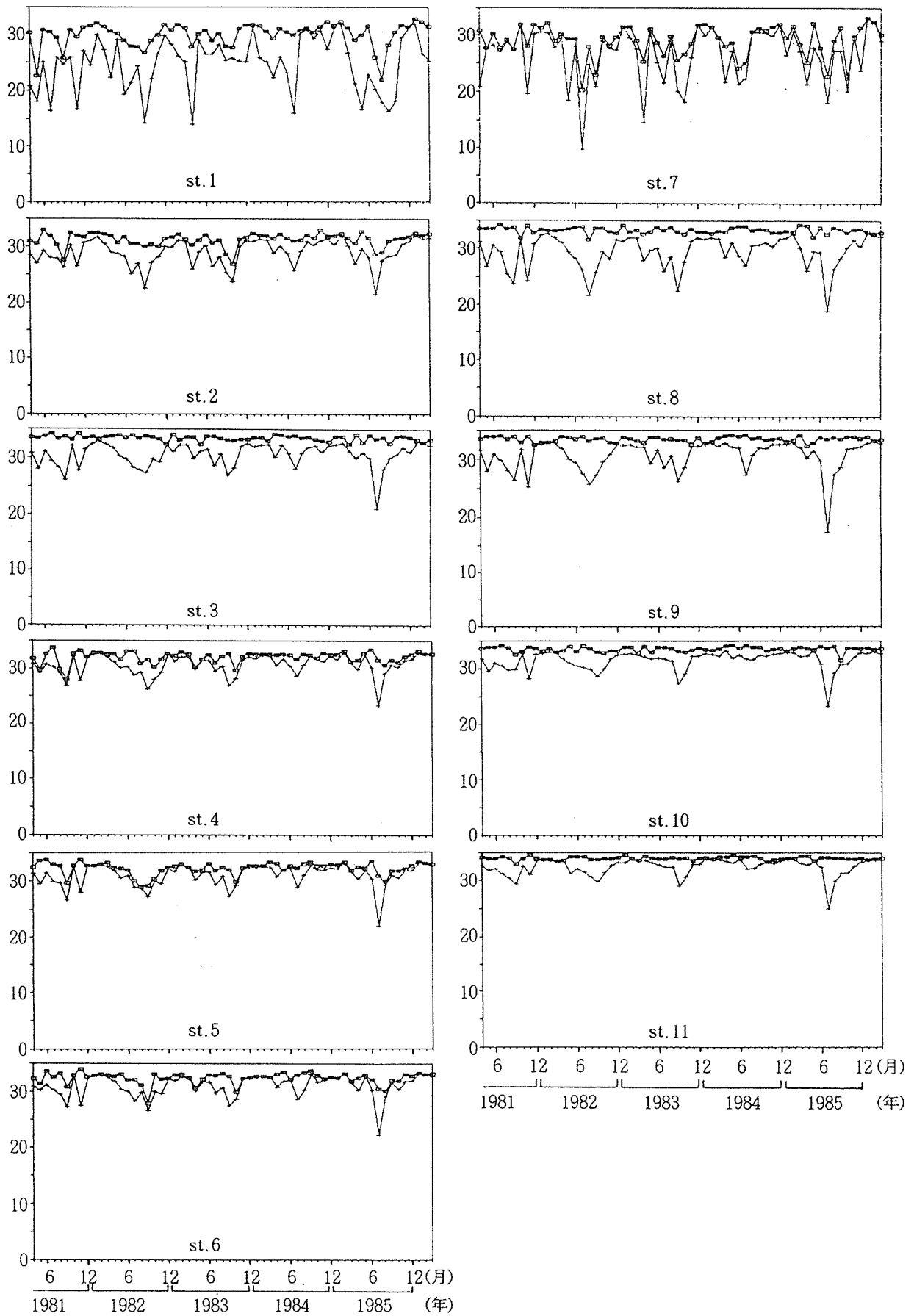


図2-1-4 上層(+ )および下層(□)の塩分濃度(%)の時系列

表2-1-6 本牧沖上層水質の主成分の固有値、因子負荷量および寄与率

主成分 固有値	$Z_1$ 5.467	$Z_2$ 2.772	$Z_3$ 1.928
Temp	0.431	0.387	-0.672
Trans	-0.562	0.012	0.444
pH	0.774	0.061	-0.051
COD	0.899	-0.346	0.115
DO	0.643	-0.317	0.171
Org-P	0.879	-0.377	0.122
PO <sub>4</sub> -P	-0.412	-0.284	0.027
Org-N	0.760	-0.495	0.175
TIN	-0.548	-0.791	-0.063
NH <sub>4</sub> -N	-0.479	-0.591	0.273
NO <sub>2</sub> -N	-0.369	-0.607	-0.301
NO <sub>3</sub> -N	-0.388	-0.674	-0.412
Salin	-0.222	0.218	0.902
chl-a	0.872	-0.293	0.186
寄与率(%)	39.1	19.8	13.8

表2-1-7 本牧沖下層水質の主成分の固有値、因子負荷量および寄与率

主成分 固有値	$Z_1$ 3.911	$Z_2$ 2.706	$Z_3$ 1.189
Temp	0.841	-0.129	-0.356
pH	-0.628	0.408	0.155
COD	-0.339	0.108	-0.503
DO	-0.885	0.330	0.209
Org-P	-0.634	0.035	-0.302
PO <sub>4</sub> -P	0.680	-0.606	-0.065
Org-N	-0.068	-0.610	-0.070
TIN	-0.503	-0.792	0.241
NH <sub>4</sub> -N	-0.220	-0.718	0.499
NO <sub>2</sub> -N	-0.514	-0.131	-0.385
NO <sub>3</sub> -N	-0.538	-0.371	-0.274
Salin	0.435	0.604	0.333
寄与率(%)	32.6	22.6	9.9

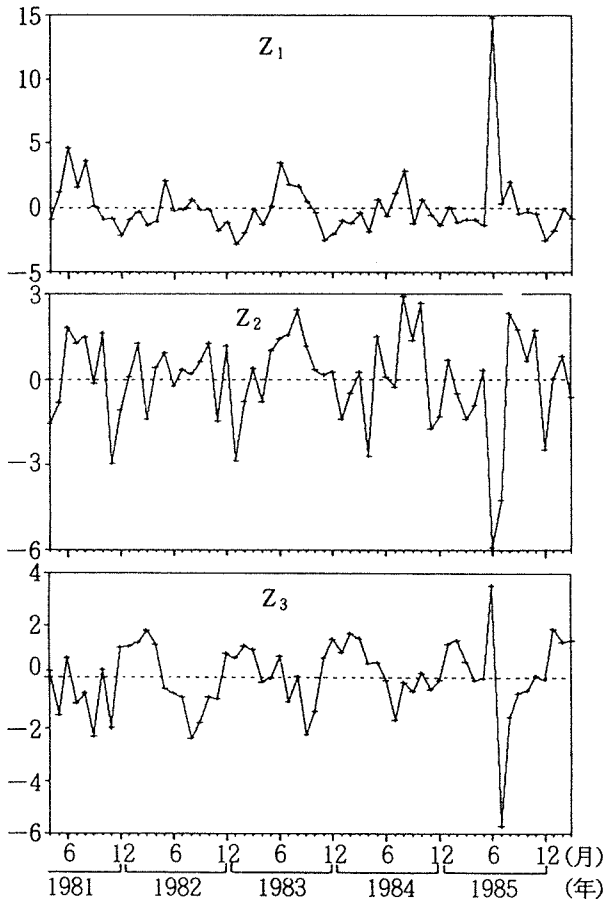


図2-1-5 本牧沖上層水質の第一から第三主成分までの時系列

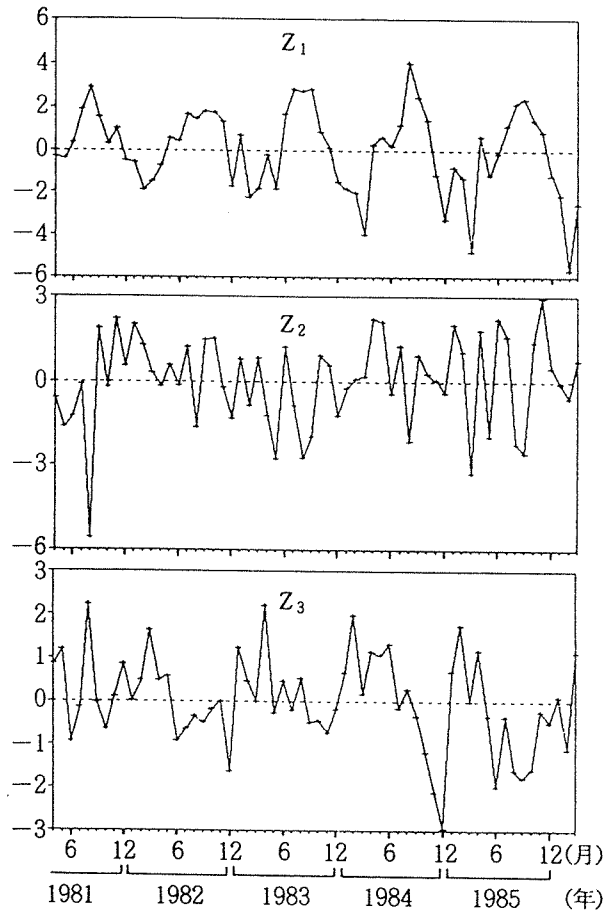


図2-1-6 本牧沖下層水質の第一から第三主成分までの時系列



分濃度が高い時にPHやDOも高く逆に燐・窒素化合物濃度が低いことを意味しており、しかも第二主成分に季節変動がみられないことから、第二主成分は潮汐の影響を説明しているものと思われる。

#### 2-1-3-1-4 主成分分析による各地点の水質変動特性の解析

主成分分析法を全ての地点に適用し、その第一主成分を求めた。表2-1-8に上層水質の、表2-1-9に下層水質の第一主成分の因子負荷量と寄与率を示す。

上層水質(表2-1-8)については、St.1とSt.7を除く地点の各因子負荷量の符号は互いにほとんど同じ傾向を示し、しかもSt.1とSt.7の第一主成分の各因子負荷量はSt.3の第二主成分(表2-1-6)の各因子負荷量と同じ符号を持っていた。それらの寄与率は各々36.6、40.0%と他地点の寄与率とほぼ同じ値を示していることから、St.1とSt.7は富栄養化現象よりも潮汐による影響の方が大きい地点であると考えられる。一方、St.8におけるPO<sub>4</sub>-Pの因子負荷量は他地点とは異なり正の値を示しており、これはSt.8ではPO<sub>4</sub>-P濃度が冬期より夏期に高くなることを意味している。一般に、夏期には藻類の増殖に伴い栄養塩類が消費されるので、PO<sub>4</sub>-P濃度も低くなる。それとは逆の傾向がSt.8で認められた理由として、塩分濃度が沖合の他の3地点と比較して低いこと(表2-1-3)を考え合わせると、藻類の増殖速度以上に湾奥の河川水由来のPO<sub>4</sub>-Pの供給があるためと考えられる。

下層水質(表2-1-9)については、St.1とSt.7の第一主成分の各因子負荷量はSt.3の第二主成分のそれとほぼ同じ符号および値を示し(表2-1-7)、しかもそれらの寄与率はいずれも40%以上と他地点より高い値を示すことから、St.1とSt.7では上層と同様に下層においても潮汐による影響が大きいことがわかった。

表2-1-8 地点別の上層水質の第一主成分の因子負荷量と寄与率

地点番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temp	0.082	0.577	0.430	0.545	0.442	0.482	0.286	0.549	0.538	0.670	0.648
Trans	0.444	-0.709	-0.561	-0.672	-0.694	-0.631	-0.026	-0.487	-0.714	-0.752	-0.740
pH	0.640	0.799	0.774	0.696	0.731	0.735	0.802	0.841	0.801	0.793	0.726
COD	-0.348	0.900	0.898	0.869	0.878	0.923	0.114	0.893	0.931	0.888	0.876
DO	0.374	0.556	0.643	0.423	0.678	0.641	0.620	0.695	0.621	0.330	0.400
Org-P	0.075	0.886	0.879	0.886	0.941	0.921	0.253	0.868	0.952	0.871	0.917
PO <sub>4</sub> -P	-0.849	-0.464	-0.412	-0.413	-0.491	-0.209	-0.834	0.393	-0.439	-0.632	-0.623
Org-N	-0.642	0.613	0.760	0.697	0.759	0.859	-0.542	0.886	0.649	0.403	0.260
TIN	-0.912	-0.573	-0.547	-0.711	-0.359	-0.548	-0.946	-0.638	-0.259	-0.646	-0.540
NH <sub>4</sub> -N	-0.778	-0.622	-0.479	-0.603	-0.440	-0.453	-0.880	-0.502	-0.363	-0.639	-0.444
NO <sub>2</sub> -N	-0.756	-0.311	-0.369	-0.473	-0.061	-0.251	-0.776	-0.477	-0.155	-0.432	-0.202
NO <sub>3</sub> -N	-0.600	-0.191	-0.388	-0.571	-0.137	-0.439	0.729	-0.495	-0.104	-0.424	-0.407
Salin	0.842	-0.335	-0.222	-0.278	-0.477	-0.287	-0.205	-0.453	-0.538	-0.522	
chl-a	0.157	0.789	0.872	0.816	0.841	0.852	0.480	0.856	0.827	0.695	0.772
寄与率(%)	36.6	39.7	39.1	41.2	38.7	40.2	40.0	43.7	38.1	41.6	37.8

表2-1-9 地点別の下層水質の第一主成分の因子負荷量と寄与率

地点番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temp	-0.195	0.899	0.841	0.720	0.890	0.831	0.075	0.772	0.814	0.819	0.822
pH	-0.313	-0.515	-0.628	-0.460	-0.187	-0.496	0.579	-0.760	-0.590	-0.456	0.087
COD	-0.652	0.343	-0.339	-0.393	0.257	-0.188	-0.318	-0.493	-0.156	-0.001	0.152
DO	-0.148	-0.958	-0.885	-0.814	-0.813	-0.899	0.436	-0.839	-0.881	-0.872	-0.570
Org-P	-0.673	-0.079	-0.634	-0.424	0.097	-0.375	-0.064	-0.246	-0.204	-0.354	-0.127
PO <sub>4</sub> -P	-0.450	0.798	0.680	0.479	0.323	0.649	-0.853	0.687	0.524	0.575	-0.172
Org-N	-0.823	0.128	-0.068	-0.354	-0.095	-0.216	-0.725	0.082	-0.055	-0.310	-0.181
TIN	-0.878	-0.064	-0.503	-0.825	-0.845	-0.832	-0.879	-0.616	-0.737	-0.710	-0.849
NH <sub>4</sub> -N	-0.828	-0.358	-0.220	-0.728	-0.654	-0.691	-0.843	-0.276	-0.516	-0.552	-0.566
NO <sub>2</sub> -N	-0.715	-0.524	-0.514	-0.408	-0.186	-0.240	-0.790	-0.546	-0.300	-0.126	0.117
NO <sub>3</sub> -N	-0.642	-0.656	-0.538	-0.615	-0.769	-0.677	-0.564	-0.548	-0.599	-0.476	-0.809
Salin	0.792	-0.317	0.435	0.156	-0.324	0.073	0.715	0.468	0.621	0.163	-0.197
寄与率(%)	41.0	34.3	32.6	32.2	29.6	34.0	40.2	32.8	31.5	27.2	23.8

### 2-1-3-2 赤潮の出現頻度および各水質項目との関係

一般に、赤潮は単位体積当りの細胞数あるいは chl-a 量などを基準にして判断されている。ここでは、chl-a が 50 mg/m<sup>3</sup>以上のものを赤潮とし、潮汐による影響の大きい河口域の St. 1 と St. 7 を除いた計 46 個のデータについて検討した。

#### 2-1-3-2-1 赤潮の地点別出現頻度

赤潮の発生は藻類の著しい増殖によるもので、栄養塩類濃度が高いだけでなく、温度や日照の積算時間も関与している。すなわち、栄養塩濃度の高い河川水が東京湾に流入してからある一定の時間あるいは距離を経て、藻類の増殖がピークに達するので、地点別の赤潮の発生回数から、各地点の特徴が抽出できると考えられる。表 2-1-10 に赤潮の地点別出現頻度を示す。

沿岸では赤潮は 3 回から 7 回発生しており、St. 2 で最も頻度が高く、7 回であった。沖合いでは、St. 8 が 14 回で St. 2 より 7 回も多く、また St. 9 でも赤潮は 5 回発生し、その頻度は沿岸と変わらないが、St. 10 で 2 回、St. 11 で 1 回と、湾口に向かって発生回数は少なくなった。St. 8 での赤潮の発生時期を調べてみると、6 月と 7 月が 4 回、5 月と 8 月が 2 回、そして 9 月と 10 月が 1 回であった。用いたデータは月 1 回の 5 年分のデータであるので、St. 8 では夏期には高い頻度で赤潮が発生していることが認められた。

#### 2-1-3-2-2 赤潮の年月別出現頻度

次に、赤潮の発生時期について調べた。表 2-1-11 に赤潮の年月別出現頻度を示す。赤潮の発生月は年毎に違いはあるものの、発生回数は 6 月には 46 回中 24 回すなわち全体の半数以上を占め、続いて 7 月の 9 回、8 月の 6 回の順で、5 月、9 月、10 月は少なく、各々 4 回、1 回、2 回であった。6、7、8 月の夏期の 3 ヶ月で赤潮全体の約 85% が発生していた。

発生年については、1981 年と 1985 年の発生回数が各々 12 回と 13 回で 10 回以上あり、次に 1984 年の 9 回、1983 年の 8 回、そして 1982 年の 4 回の順であった。但し、1984 年については、発生月は 8 月に 4 回、10 月に 2 回と、夏の後半から秋にかけて赤潮は発生しており、気象など赤潮の発生し易い条件がこの時期に当たっていたことが示唆された。また、1985 年については、発生回数は 7 月に 6 回あり、他の年と比べ赤潮は 7 月にも多く発生していた。赤潮のもっとも多い発生月である 6 月をしてみると、1981 年、1983 年、1985 年の 3 か年は赤潮の発生回数が 6~8 回と、1982 年や 1984 年の 6 月さらにそのほかの月に比べても多かった。年によって赤潮の発生回数が異なっている原因については、2-1-3-3-2 赤潮が 6 月に集中する原因についての項で触れるが、降雨等の気象が関連していると考えられる。

#### 2-1-3-2-3 水質項目間の関係

赤潮発生時における水質項目間の関係をみるため、表 2-1-12 に各水質項目間の相関係数を示す。chl-a と 0.8 以上の相関を示す項目は COD と Org-P および Org-N であり、これらの 4 項目間では相互にも高い相

表 2-1-10 赤潮の地点別出現頻度

地点番号	頻度(回)
1	7
2	7
3	5
4	4
5	3
6	5
7	6
8	14
9	5
10	2
11	1

表 2-1-11 赤潮の年月別出現頻度

年\月	5	6	7	8	9	10	合計
1981	1	8	1	2	0	0	12
1982	2	2	0	0	0	0	4
1983	0	6	1	0	1	0	8
1984	1	1	1	4	0	2	9
1985	0	7	6	0	0	0	13
合計	4	24	9	6	1	2	46

関を示していた。これらのうち、まず chl-a と COD の関係から赤潮と有機汚濁の関連を調べ、次に Org-P と Org-N の関係から植物プランクトン中の N と P の構成割合について検討した。図 2-1-7 に chl-a と COD の散布図を、図 2-1-8 に Org-P と Org-N の散布図を示す。

図 2-1-7 から COD (mg/l) と chl-a (mg/m<sup>3</sup>) との回帰式を求めると、次式が得られた。

$$[\text{COD}] = 0.045 [\text{chl-a}] + 4.7$$

あるいは  $[\text{COD}] = 0.058 [\text{chl-a}] + 2.1$

これらの式から、赤潮発生時の chl-a の 1 mg/m<sup>3</sup> は COD として 0.045 mg/l から 0.058 mg/l, 平均して約 0.05 mg/l に相当するといえる。また、切片の COD 値は 2.1 mg/l から 4.7 mg/l を示しており、この値は動物プランクトンあるいは動植物プランクトンのデトライタスあるいは陸起源の有機物質などに由来しているものと思われた。

次に、Org-P と Org-N の相関係数は 0.893 と最も高い値となった。植物プランクトンの体を構成している N と P は種類によってある程度の違いはあるものの、おおよそ一定していると考えられる。また、この検討に用いたデータは赤潮発生時のものであるため、Org-P や Org-N は大部分が植物プランクトンに由来していると考えて差し支えない。したがって、Org-P と Org-N が高い相関を示したと考えられる。そこで、Org-P と Org-N の比からその構成割合を推定した。図 2-1-8 から、Org-P (mg/l) と Org-N (mg/l) の回帰式を求めると、

$$[\text{Org-N}] = 8.54 [\text{Org-P}] + 0.24$$

あるいは  $[\text{Org-N}] = 10.7 [\text{Org-P}] - 0.13$

となった。これらの式から、N/P 比は 8.54~10.7 となり、横浜市沿岸および沖合海域で異常発生した植物プランクトン中の N/P の構成割合はほぼ 10 と推定された。この値は逆に植物プランクトンが海水中から栄養源としての取り込む N と P を割合を表していると考えられることから、後述するように植物プランクトンの増殖における制限因子が P か N かの判定基準になる。

一方、水温と chl-a の相関係数は -0.168 で、この 2 項目間に相関はみられないが、前述したように藻類の増殖速度は温度の影響を大きく受けるので、chl-a と水温との関係を調べた。図 2-1-9 に chl-a と水温との散布図を示す。

表 2-1-12 各水質項目の相関係数

	Temp	Trans	pH	COD	DO	Org-P	PO <sub>4</sub> -P	Org-N	TIN	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	Salin	chl-a
Temp	1.000													
Trans	0.207	1.000												
pH	-0.086	-0.196	1.000											
COD	-0.203	-0.551	0.500	1.000										
DO	-0.110	-0.439	0.688	0.568	1.000									
Org-P	-0.202	-0.536	0.374	0.914	0.490	1.000								
PO <sub>4</sub> -P	0.172	-0.143	0.137	0.202	0.103	0.075	1.000							
Org-N	-0.138	-0.455	0.422	0.890	0.506	0.893	0.281	1.000						
TIN	-0.055	0.024	-0.459	-0.286	-0.202	-0.275	0.157	-0.137	1.000					
NH <sub>4</sub> -N	0.037	0.118	-0.214	-0.186	-0.017	-0.200	0.403	-0.046	0.560	1.000				
NO <sub>2</sub> -N	-0.149	0.025	-0.468	-0.276	-0.257	-0.254	-0.010	-0.154	0.883	0.245	1.000			
NO <sub>3</sub> -N	-0.079	-0.044	-0.422	-0.231	-0.228	-0.212	-0.041	-0.135	0.876	0.092	0.905	1.000		
Salin	-0.194	0.056	0.258	0.238	0.085	0.221	-0.028	0.115	-0.774	-0.063	-0.822	-0.893	1.000	
chl-a	-0.168	-0.536	0.427	0.874	0.482	0.873	0.217	0.821	-0.360	-0.243	-0.370	-0.284	0.259	1.000

Chl-a が  $50 \text{ mg/m}^3$ 以上を示す時の温度範囲は  $17.4^\circ\text{C}$  から  $27.6^\circ\text{C}$  であるが、chl-a が  $500 \text{ mg/m}^3$ 以上を示す特異的な赤潮の発生はある特定の温度範囲に集中していることが認められた。その水温は  $20.2^\circ\text{C}$  から  $21.9^\circ\text{C}$  で、時期としてはいずれも6月で計5回あった。このことから、植物プランクトンは6月の水温が  $20^\circ\text{C}$  前後の時に最もよく増殖すると推察される。また、その発生地点は St. 3, St. 4, St. 6 および St. 8 であり、その回数は各々1回, 1回, 2回および1回であった。

Chl-a は水温と密接に関係していたことから、水温と同様に基本的な因子である Salin についても chl-a との関係調べた。図 2-1-10 に chl-a と Salin の散布図を示す。

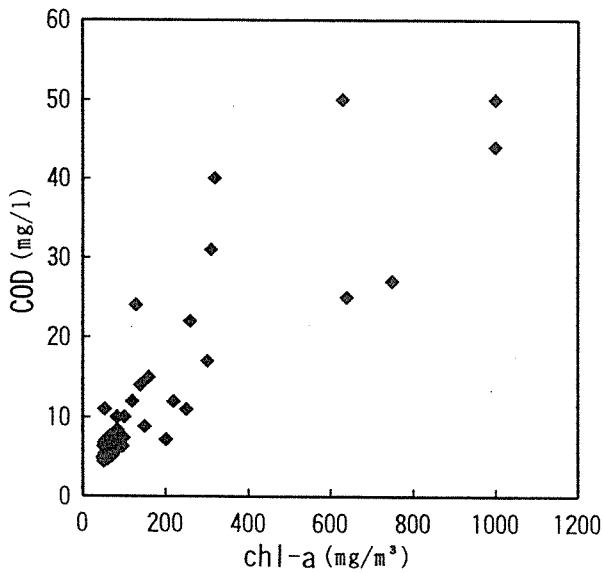


図 2-1-7 chl-a と COD の散布図

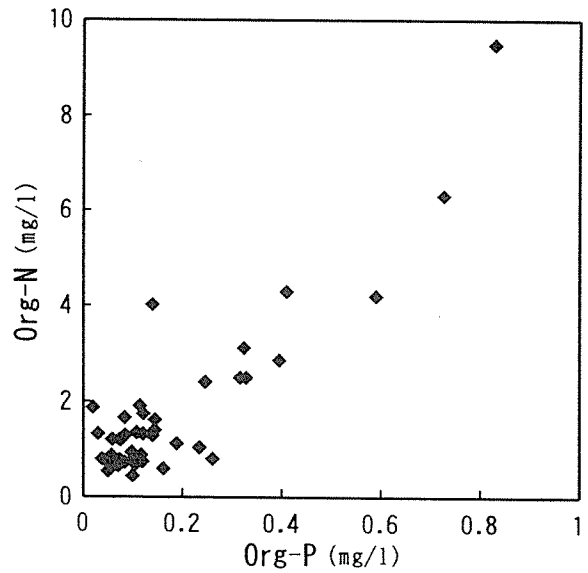


図 2-1-8 Org-P と Org-N の散布図

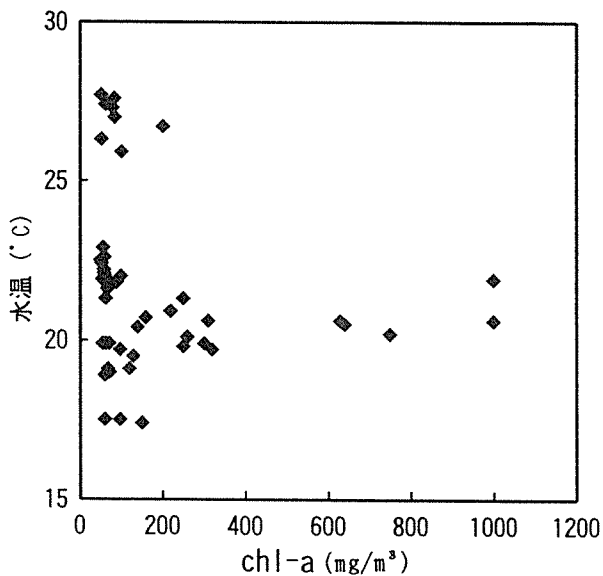


図 2-1-9 chl-a と水温の散布図

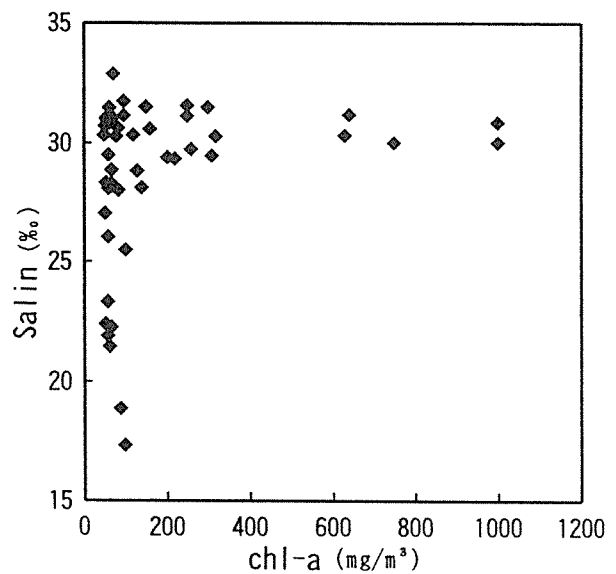


図 2-1-10 chl-a と Salin の散布図

Chl-a は水温との場合と同様にある特定の塩分濃度の範囲で高い値を示しており、その範囲はおおよそ 29~32 ‰であった。したがって、必ずしも河川水の影響の大きいすなわち塩分濃度の低い時に赤潮が発生しているとは限らないことがわかった。なお、28 ‰以下のデータは 7, 8, 9 月に発生した赤潮であり、そのうちのほとんどは 7 月の時のデータであった。今回用いた公共用水域水質測定結果の多くの場合は月の前半に測定が行われているので、7 月のデータは梅雨の期間のデータであり、その影響が Salin に表れたと考えられる。

### 2-1-3-3 赤潮の発生原因について

#### 2-1-3-3-1 夏期における平均的な水質濃度分布特性からの検討

夏期には藻類の増殖が活発になり、底質は嫌気状態になっているので、それらの影響の度合いが地域によって異なる場合、chl-a や DO などの濃度分布に特徴が現れる。ここでは、6, 7, 8 月の 3 ヶ月間の平均値を用いて、夏期における平均的な濃度分布特性を調べた。表 2-1-13 に上層水質の、表 2-1-14 に下層水質の地点別平均値を示す。

上層については、水温は沿岸で高く沖合いで低くなる傾向を示した。沿岸では河口域の St. 1 と St. 7 の水温が 24℃ 以上の値を示し最も高く、沖合では湾奥よりも湾口で低くなる傾向を示した。但し、沖合の St. 8 は 23.5℃ で河口域の 2 地点を除く他の全地点よりも高い値を示した。また、COD や chl-a も水温と同様な傾向を示すが、St. 8 の COD と chl-a は各々 10.1 mg/l, 133.7 mg/m<sup>3</sup> と全地点で最も高かった。下層についても、St. 8 は他地点に比べ特異的であった。St. 8 の DO は 2.8 mg/l で他地点より 2.8 mg/l 以上も低い値を、PO<sub>4</sub>-P は 0.090 mg/l で閉鎖性の強い St. 2 の 0.094 mg/l に近い値を示しており、St. 8 の下層は嫌気状態の底質の影響を強く受けていた。

このように、St. 8 は沖合の中でも特異な地点であることが認められたが、赤潮が発生し易く底質が嫌気状態にある原因として、この地点では塩分濃度も沿岸域より低い値を示すことなど(表 2-1-3, 図 2-1-4) から明らかなように、河川水の影響が当然考えられる。海域に出てからの河川水は面的には潮流や風などによって移動・拡散する。東京湾においては、一般に恒流は反時計回りであることから<sup>8),9)</sup>、St. 8 は湾奥

表 2-1-13 夏期(6~8月)における地点別の上層水質の平均値

項目 地点番号	Temp (℃)	Trans (m)	pH	COD (mg/l)	DO (mg/l)	Org-P (mg/l)	PO <sub>4</sub> -P (mg/l)	Org-N (mg/l)	TIN (mg/l)	NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	NO <sub>2</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	Salin (‰)	chl-a (mg/m <sup>3</sup> )
1	24.6	1.3	8.1	7.8	8.7	0.122	0.148	2.48	2.26	1.60	0.121	0.55	22.9	58.5
2	23.3	1.5	8.4	7.6	9.2	0.112	0.056	1.29	0.56	0.20	0.061	0.30	27.4	54.4
3	23.3	1.6	8.5	9.2	10.6	0.130	0.021	1.49	0.30	0.11	0.035	0.15	29.0	111.9
4	23.3	1.7	8.4	8.6	9.1	0.115	0.028	1.18	0.31	0.13	0.036	0.14	29.5	111.2
5	23.2	2.0	8.5	7.2	10.0	0.075	0.018	0.99	0.22	0.06	0.032	0.13	29.6	44.5
6	23.0	1.6	8.4	9.4	9.8	0.131	0.024	1.32	0.26	0.10	0.031	0.13	29.6	111.9
7	24.1	1.0	8.2	8.8	8.8	0.172	0.159	1.69	0.74	0.43	0.071	0.24	24.4	80.3
8	23.5	1.4	8.7	10.1	11.5	0.103	0.064	1.54	0.45	0.19	0.044	0.21	27.1	133.7
9	23.2	1.7	8.5	7.0	10.1	0.088	0.016	1.02	0.34	0.12	0.036	0.18	28.4	61.8
10	22.8	2.3	8.4	4.2	9.0	0.047	0.010	0.71	0.18	0.06	0.021	0.10	30.5	19.8
11	22.3	2.5	8.4	3.5	8.3	0.039	0.011	0.55	0.14	0.04	0.018	0.09	31.4	17.7

表 2-1-14 夏期(6~8月)における地点別の下層水質の平均値

項目 地点番号	Temp (℃)	pH	COD (mg/l)	DO (mg/l)	Org-P (mg/l)	PO <sub>4</sub> -P (mg/l)	Org-N (mg/l)	TIN (mg/l)	NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	NO <sub>2</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	Salin (‰)
1	22.2	8.1	4.1	6.3	0.041	0.069	1.00	0.71	0.41	0.055	0.24	29.0
2	20.1	8.0	2.6	4.8	0.017	0.094	0.63	0.47	0.27	0.034	0.17	31.0
3	18.6	7.9	1.3	4.9	0.007	0.062	0.52	0.28	0.11	0.019	0.15	33.7
4	19.9	8.1	2.4	5.7	0.021	0.049	0.59	0.31	0.13	0.026	0.15	32.1
5	20.4	8.1	2.1	5.9	0.023	0.037	0.53	0.27	0.10	0.026	0.14	32.0
6	19.8	8.0	2.0	5.6	0.017	0.047	0.53	0.27	0.09	0.026	0.15	32.4
7	23.2	8.1	5.7	6.6	0.089	0.114	1.25	0.55	0.32	0.054	0.18	27.2
8	17.8	7.8	2.0	2.8	0.014	0.090	0.36	0.34	0.16	0.022	0.16	33.5
9	18.2	8.0	2.0	5.2	0.015	0.050	0.44	0.26	0.09	0.018	0.15	33.7
10	18.3	8.0	1.4	5.8	0.008	0.040	0.39	0.22	0.05	0.015	0.15	33.8
11	18.1	8.1	1.2	6.1	0.008	0.029	0.23	0.17	0.05	0.010	0.11	34.1

の東京方面からの河川水の影響が大きいと推察される。本報告書の表紙の写真は、河川水による東京湾への影響が顕著に現れている 1986 年 8 月 6 日のランドサット合成画像<sup>3),10)</sup>である。

表紙の写真には、観測の 2 日前に 152 mm の大雨（横浜地方気象台）をもたらした台風が関東地方を通過し、それに伴う河川水由来の濁りが海域で白い模様として現れている。この写真からも明らかのように、多摩川の河川水が河口から扇島沿いに移動しており、St. 8 付近まで達しているのが認められる。さらに、St. 8 では湾奥の荒川・江戸川などの河川水の影響も加わっているようである。従って、St. 8 において赤潮が頻繁に発生し底質が汚染されている原因は、多摩川や荒川・江戸川の河川水の影響がそれらの河口から St. 8 付近まで及んでいるためと考えられる<sup>11)</sup>。これらのことを明らかにするためには、湾奥を含め東京湾全域の濃度分布について検討する必要がある。

### 2-1-3-3-2 赤潮が6月に集中する原因について

表 2-1-15 に各年の 6 月の上層水質の平均値を示す。前述したように、年によって異なるが 6 月には赤潮の発生頻度および藻類の異常増殖の割合が高かった(表 2-1-11)。赤潮の発生は、河川からの負荷、気象・海況、および藻類の生理・生態特性などによって影響される。藻類の増殖は温度に大きく影響され、藻類の種類にもよるが好適温度は 18~25℃ と言われている<sup>1)</sup>。また、河川水の影響としては、海域における栄養塩は主に河川から供給されるので、河川水中の栄養塩濃度が季節的に変動していれば、それが赤潮の発生に大きく影響しているものと思われる。人為的影響の大きい都市河川では、冬期には BOD のほか PO<sub>4</sub>-P や NH<sub>4</sub>-N などの濃度が高く春から夏に向かって低くなり、逆に NO<sub>3</sub>-N は降雨量の多い夏になると増加する<sup>12),13)</sup>。海域において藻類増殖の制限因子は PO<sub>4</sub>-P である場合が多いので、夏期よりも河川水中の PO<sub>4</sub>-P 濃度が高い冬期の方が栄養塩濃度からみると藻類の増殖に都合の良い条件となっている。しかし、河川水の海域上層への負荷特性は成層構造の発達の場合によって規定され、前述したようにそれは 4 月頃から大きくなる。従って、春から夏に向かって河川水中の栄養塩濃度は低下するものの、逆に温度は上昇していき、河川水から供給される栄養塩が上層で保持され易くなり、藻類の増殖に好適な温度である 20℃ 付近になると藻類は著しく増殖するものと考えられる。

年間のタイムスケールで考えると、6 月に赤潮が特異的に発生することは上述したように説明できる。しかし、現実には赤潮は数日から長いもので数十日の間隔で盛衰を繰り返しているので、ここで使用している月 1 回の測定データは赤潮のサイクルの一時期を捕らえているに過ぎない。実際、6 月に赤潮が発生する頻度は高いものの、年によって 6 月の赤潮の発生状況が異なっていた(表 2-1-11, 表 2-1-15)。このことは、一般に赤潮は降雨後の晴れた日に発生し易い<sup>1)</sup>と言われていることから推察されるように、測定日当日はもちろん測定日前の気象状況が大きく影響しているためと考えられる。図 2-1-11 に各年度の 6 月の測定日前 10 日間の気象状況を示す。

図 2-1-11 から、赤潮が発生した 1981 年、1983 年および 1985 年の各 6 月の特徴は、測定日の 2~5 日前に 4~13.5 mm の降雨があり、同時に気温の降下や日照時間の減少が見られ、その後気温は上昇し日照時間は増加し、測定日には平均気温は 20℃ を超え、しかも日照時間が 5 時間以上あったことである。逆に赤潮

表 2-1-15 各年度の 6 月の上層水質の平均値

項目 年	Temp (°C)	Trans (m)	pH	COD (mg/l)	DO (mg/l)	Org-P (mg/l)	PO <sub>4</sub> -P (mg/l)	Org-N (mg/l)	NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	NO <sub>2</sub> -N (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	Salin (‰)	chl-a (mg/m <sup>3</sup> )
1981	20.5	1.2	8.7	14.0	11.8	0.181	0.021	1.44	0.00	0.019	0.05	31.0	277.7
1982	21.5	2.2	8.2	5.3	7.1	0.095	0.067	1.39	0.25	0.047	0.16	30.0	17.8
1983	19.5	1.3	8.5	9.8	11.5	0.139	0.031	1.12	0.07	0.023	0.07	31.4	190.0
1984	18.6	3.8	8.2	3.5	7.8	0.033	0.028	0.77	0.25	0.043	0.21	31.3	11.6
1985	19.8	1.4	8.7	25.4	11.9	0.294	0.031	3.17	0.04	0.032	0.19	30.2	310.5

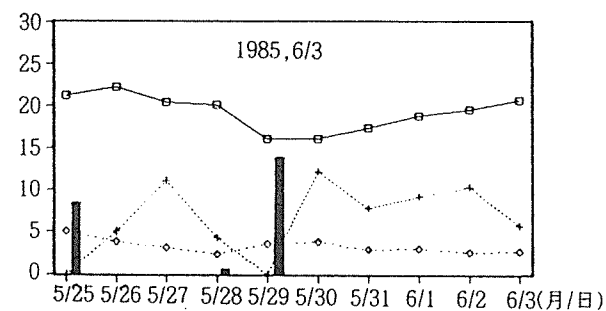
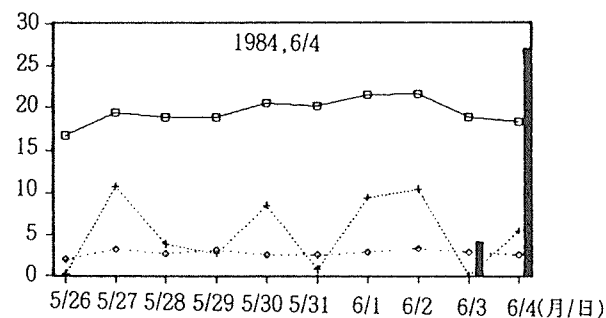
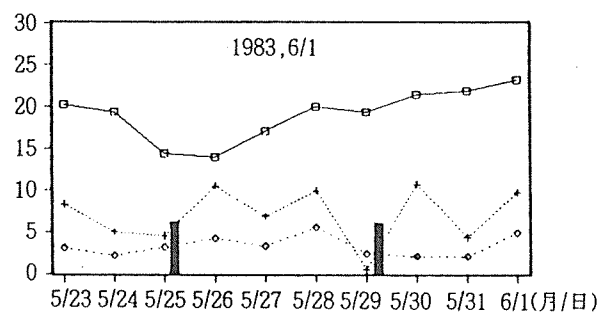
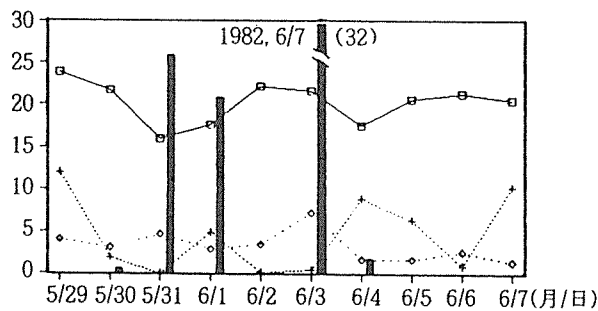
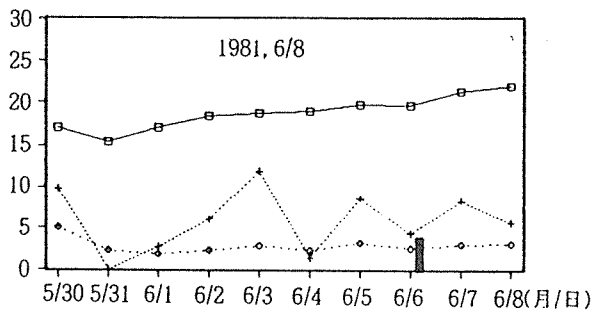


図2-1-1-1 各年度6月の測定日前10日間の気象状況  
 - 降雨量(mm) □ 平均気温(°C)  
 + 日照時間(hr) ◇ 平均風速(m/s)

の発生がみられない1982年の6月の特徴は測定日の日照時間が短く、気温は20°Cを超えてはいるもの前日を下回っており、4日前に32mmの降雨と平均風速7.2mの強風があったこと、そして1984年の6月の特徴は測定当日の日照時間は5時間程度あったものの、測定当日に27mmの降雨があり、しかも気温は前日より下降し平均気温は20°Cを下回っていたことである。これらのことから、赤潮発生の気象条件は、年間の大きな季節変動に加えて、赤潮の発生サイクルのタイムスケールでは数日前に適度な降雨があり降雨と同時に気温低下・日照時間減少があること、そして降雨後に気温の上昇と日照時間の増加に伴い平均気温として20°Cを超えることであるといえる。特に、水温の好適温度への上昇が重要な役割を果たしていることが示唆された<sup>14)</sup>。なお、赤潮の発生原因には強風に伴う栄養塩の豊富な下層水の上層への供給<sup>15),16)</sup>もあるが、ここではそれらの影響の詳細は明らかにできなかった。

これまで検討してきたことをまとめると、6月に赤潮が発生し易い原因として次のようにいえることができる。4月頃から成層ができ始めるので、それが安定して、数日前に適度な降雨があり、気温が降下した後上昇に転じてから、水温が20°Cを超え日照時間も十分にあり、藻類の増殖が活発になる日が特異的な赤潮の発生し易い時期となる。今後、赤潮の発生メカニズムを解明するためには、より短い時間間隔で調査し検証していく必要がある。また、5、6月頃は農業生産活動が活発になり肥料使用量も多くなると考えられることから、降雨に伴う肥料の流出などの影響も考慮していく必要がある。

### 2-1-3-3-3 各地点における藻類増殖制限因子の特徴

藻類の増殖は最小律の法則に従い、最も不足する物質が制限因子となり、増殖量を支配する。制限因子がわかれば、赤潮発生防止対策に結び付くわけである。一般に、海域では磷が制限因子となる場合が多く、制限因子が窒素か磷かの判定基準はTINとPO<sub>4</sub>-Pの濃度比から求めることができる。2-1-3-2-3水質項目間の関係の項で述べたように、赤潮発生時における植物プランクトン中のN/P比は約10であったことから、TIN/PO<sub>4</sub>-P比が10以

上では燐が制限因子、10以下では窒素が制限因子になると考えられる。表2-1-16に、地点別の夏期の上・下層水質のTIN/PO<sub>4</sub>-P比を示す。

上層水質については、TIN/PO<sub>4</sub>-P比が10以下を示す地点は3カ所あり、その値の低い順にSt. 7, St. 8, St. 2であった。St. 7のTIN/PO<sub>4</sub>-P比が4.7と最も小さい値を示すのは、その底質がかなり汚染されており<sup>17)</sup>平均水深も2.7mと浅いため、河川からの燐の負荷が大きいと共に底質からの燐の溶出量が多く<sup>18)</sup>、しかも下層のTIN/PO<sub>4</sub>-P比は4.9と上層のそれとほとんど変わらないことから潮流や風によって上下混合が起こり易くなっていることが原因しているものと考えられる。St. 8では湾奥からのPO<sub>4</sub>-Pの豊富な河川水の影響が及んでいるためであり、またSt. 2では横浜港へ流入している中小河川水の影響が及んでいるためと推察される。一方、St. 6ではTIN/PO<sub>4</sub>-P比は10.8となり、燐よりは窒素が制限因子である傾向が強かった。St. 6で窒素が制限因子となった原因として、St. 6はSt. 7の沖合いに位置し、特に干潮時にはSt. 7の水質の直接的影響を受ける地点であることは容易に想像できる(図2-1-1)。従って、窒素が制限因子であるSt. 7の水塊がSt. 6へ移動するため、St. 6で窒素が制限因子になる場合が多くなると考えられる。しかし、St. 1は鶴見川の直接的影響を受け易い地点であるのに、TIN/PO<sub>4</sub>-P比は15.3と大きな値をとり、他地点とは異なる傾向を示した。夏期の上層水のTIN濃度については(表2-1-13)、他地点が1mg/l以下であるのに対してSt. 1では2.26mg/lとかなり大きな値を示していることから、St. 1付近はPO<sub>4</sub>-PよりTINの供給が多い地点と推察される。このように、St. 1とSt. 7は河川水の影響が大きいという共通点をもつにもかかわらず、それらの制限因子は異なっていた。

下層水質については、上層水質と同様にSt. 1でTIN/PO<sub>4</sub>-P比が10.2と大きな値を示したが、その他の地点では3.8~7.2の範囲にあった。多くの地点も窒素が制限因子であることから、下層では底質からのPO<sub>4</sub>-Pの溶出による影響が大きいと考えられる。

表2-1-16 夏期の上層および下層水質のTIN/PO<sub>4</sub>-P比

地点番号	上層	下層
1	15.3	10.2
2	9.9	5.0
3	14.2	4.5
4	11.0	6.2
5	12.2	7.2
6	10.8	5.7
7	4.7	4.9
8	7.0	3.8
9	21.1	5.2
10	18.2	5.4
11	12.6	5.9

#### 2-1-4 まとめ

公共用水域水質測定結果を用いて、横浜市沿岸及び沖合い域の水質変動特性を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 成層構造は4月頃から発達し、8月に最大となり、10月頃まで続いた。
- 2) 上層の年最高水温は8月に現れるが、下層の年最高水温は8月より沿岸で半月~1ヶ月、沖合で1ヶ月半程度遅れていた。
- 3) 塩分濃度は沖合より沿岸の方が、また湾口より湾奥の方が低く、特に沖合のSt. 8で低いのが目立った。
- 4) 時系列データの主成分分析の結果から、上層の主成分は富栄養化現象と潮汐の影響、下層の主成分は嫌気状態の底質の影響と潮汐の影響で大部分説明できた。



- 5) 地点別の主成分分析の結果から、河口域においては潮汐の影響の方が富栄養化現象や底質の影響よりも大きかった。
- 6) 赤潮は沖合より沿岸で多く発生しているが、沖合の St. 8 は多摩川や荒川などの河川水の影響が及んでおり、赤潮の発生頻度は最も高かった。
- 7) 赤潮の発生時期は6月に集中しており、水温が20℃前後を超える時に藻類の異常増殖が認められた。その大きな要因として、降雨後における水温の好適温度への上昇が考えられた。また、最適塩分濃度は29~32%にあった。
- 8) 赤潮発生時の chl-a と COD の関係から、chl-a の 1 mg/m<sup>3</sup> は COD の約 0.05 mg/l に相当し、動物プランクトンのデトライタスなどに由来する COD 値は 2.1~4.7 mg/l であることがわかった。
- 9) 赤潮発生時の有機態の N/P 比は約 10 であり、それは植物プランクトン中の N と P の構成割合を示し、制限因子の判定基準になると考えられた。
- 10) 制限因子が窒素である地点は下層の全地点と上層では河川水の影響が及ぶ地点であるが、鶴見川河口は河川水の直接的影響を受けている地点にもかかわらず制限因子はリンであった。

## 謝 辞

データについては、神奈川県環境部水質保全課および横浜市環境保全局水質地盤課に提供いただいた。ここに記して厚く感謝します。

(なお、本稿は、横浜市公害研究所報第 14 号(1990)にすでに掲載したもの(一部加筆編集)である。)

## 文 献

- 1) 岡市友利編：赤潮の科学，恒星社厚生閣(1987)。
- 2) 日本水産学会編：赤潮－発生機構と対策，水産学シリーズ34，恒星社厚生閣(1986)。
- 3) 統計数理研究所：自然環境についての標本調査法の研究，統計数理研究所共同研究リポート16(1989)。
- 4) 神奈川県：神奈川県水質調査年表，昭和 56-60 年度。
- 5) 井沢博文，清木徹：広島湾の底泥をめぐる物質の代謝およびその動態的挙動 II 海底泥からの栄養塩溶出に及ぼす温度の影響，広島県環境センター研究報告5，72-76(1983)。
- 6) 成瀬洋児，安藤良，榊原靖，土山ふみ：底泥からのリンの溶出への影響因子について，名古屋市公害研究所報，14，59-65(1984)。
- 7) 二宮勝幸：主成分分析法を用いた周期的時系列データの解析(I)，COSINE 関数モデルによる検証，横浜市公害研究所報，13，113-119(1989)。
- 8) 菊地利夫：東京湾史，環境科学ライブラリー8，大日本図書(1974)。
- 9) 柳田友道：赤潮，講談社サイエンティフィック(1976)。
- 10) 水尾寛巳，鶴田治雄，二宮勝幸，雫石雅美，多賀保志，大隅昇，岸野洋久，田口時夫：東京湾の水質観測へのランドサットデータの利用について，横浜市公害研究所報，13，105-112(1989)。
- 11) 菱田昌孝，岡崎修平：東京湾における汚染物質の移行経路について，日本国土海洋総合学術診断技術報告集 海洋関係，1981，55-84(1982)。
- 12) 福島博，小市佳延：鶴見川水系の水質変動解析と評価，横浜市公害研究所報，9，137-144(1984)。
- 13) 二宮勝幸，水尾寛巳：主成分分析法を用いた周期的時系列データの解析(II)，河川水質への応用，横浜市公害研究所報，13，121-129(1989)。
- 14) 中村泰男，渡辺信：Chattonella antiqua の増殖に及ぼす温度，塩分，照度，pH の効果，国立公害研究所研究報告，63，79-85(1984)。

- 15) 加藤進, 中川喜明, 和田一人, 市岡孝生, 松本正: 伊勢湾の貧酸素水塊について, 三重県環境科学センター研究報告, 47-52(1989).
- 16) 福島悟: *Skeletonema costatum* の培養試験による横浜市沿岸域の藻類増殖潜在能力の評価, 横浜市公害研究所報, 13, 73-82(1989).
- 17) 横浜市公害研究所: 平潟湾・金沢湾周辺水域環境調査報告書, 公害研資料 No.68(1986).
- 18) 鎌田敏幸, 村上哲生, 榊原靖, 土山ふみ, 成瀬洋児, 安藤良: 名古屋港の植物プランクトンによる二次汚濁とその増殖に及ぼす要因について名古屋市公害研究所報, 13, 89-95(1985).

## 第2章第2節 帷子川感潮域における水質の長期変動傾向

### 二宮 勝幸

#### 2-2-1 はじめに

赤潮の発生は栄養塩の豊富な河川水の海域への流入が大きく影響しているが、河川水は感潮域で海水と混ざり合い、水質が複雑に変化した後<sup>1,2)</sup>、海域に流入し、海域での赤潮の発生に寄与しているものと思われる。東京湾沿岸、特に横浜市沿岸などでは埋立によって海岸線は以前よりかなり前進したため、感潮域は河川中流域まで達している場合もみられる<sup>3)</sup>。このように、海域における富栄養化機構を解明する一つの要件として、感潮域における水質変動を把握しておくことは重要である。

環境水質の変動要因には、自然的因子と人為的因子があり、前者は主として気象因子が大きく係わっている。これらの要因に基づく水質変動を分離して個々に考察することによって、人間の社会活動が感潮域水質に与える影響をより正確に評価することができると考えられる。

気象変動に伴う水質変動には、日周変動や季節変動、数日程度の間隔で繰り返される降雨の影響による変動、そして地球規模の気象変動に起因する数年程度の周期変動などがある<sup>4,5)</sup>。気象に起因する水質変動は、基本的にこのような短周期から長周期までの変動成分をあわせもっている。さらに、感潮域での水質変動を考える場合、ほぼ半日単位で変化する潮汐作用も水質の変動要因として重要である<sup>1,2)</sup>。

水質変動に影響を与える人為的因子には、人間の1日間あるいは1週間などを基本単位とした生活パターンによるものがあり、そのほかに下水道の整備など環境問題への取り組み方や人口増加など社会情勢によっても水質は変化する。

このように、気象変動に伴う基本的周期変動や潮汐に伴う半日程度の周期変動に人間の社会活動による影響が加わって、実際の河川感潮域における水質変動が形成されているわけである。そして、これらの事柄の総合的に反映された結果である公共用水域の水質を監視するため、各地方自治体により測定計画が実施され、長期間にわたる貴重なデータが蓄積されている。

ここでは、横浜市中心部を流れる帷子川の感潮域における公共用水域水質測定結果を用いて、過去15年間の水質、特に栄養塩類が気象、潮汐および人為的因子によってどのような影響を受けまた変化してきたのかを検討した。

#### 2-2-2 解析資料

##### 2-2-2-1 測定地点

測定地点を図2-2-1に示す。測定地点は帷子川中流の水道橋であり、河口からほぼ2.6 km上流に位置している。帷子川は流域面積約58 km<sup>2</sup>、延長距離約17 kmの河川であり、市内旭区上川井の丘陵地に源を發し、今井川等の支川と合流し、下流の横浜駅西口付近で数本の派川に分かれ、東京湾に流入している。帷子川流域は人口密度が高く、古くから捺染工業の盛んな場所であり、現在も捺染事業場が多い。

##### 2-2-2-2 測定期間および測定項目

解析に用いたデータは、公共用水域水質測定結果の帷子川の水道橋における1976年4月から1991年3月

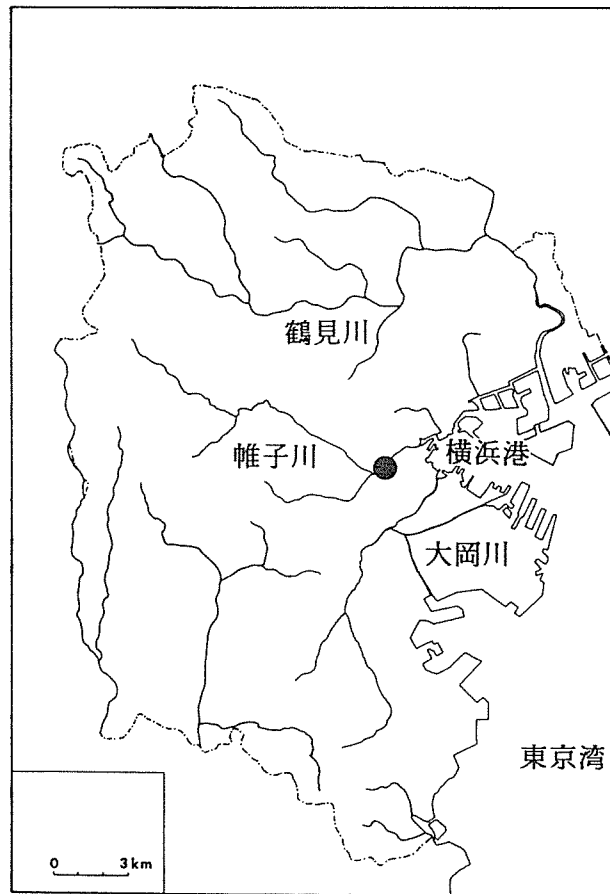


図2-2-1 測定地点

までの毎月1回、平日の午前9時前後に測定された次の8項目である<sup>6)</sup>；流量(FLOW)、BOD、COD、DO、陰イオン界面活性剤(MBAS)、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、CL。なお、MBASについては、1986年度までは標準物質としてドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム(DBS)が用いられていたが、1987年度以降はドデシル硫酸ナトリウム(DS)が用いられるようになったので、1987年度以降はDBSとDSの分子量比1.21をデータに乘じ、DBSを標準としたMBAS濃度に統一した<sup>7)</sup>。

### 2-2-2-3 測定日時について

環境水の水質変動は本来いろいろな周期成分から形成されている。ところが、実際に河川調査を行い水質時系列データを得るためには、ある時間間隔で水質試料をサンプリングし測定しなければならない。そのサンプリング間隔はどの周期成分(期間)について調べようとするのかによって自ずと決まる。例えば、季節変動成分や1年より長い周期成分を把握することを目的とした場合は、1年間について季節毎に1回、できれば月に1回程度の頻度で調査を行えばよい。ただし、この場合は、その調査日におけるサンプリングの時間が一定している必要がある。時間が一定していないと、季節変動成分に日周変動成分がノイズとしてランダムに加わってしまうからである。今回用いたデータは平日のほぼ一定時刻にサンプリングした試料から得られたものである。したがって、日周変動によるノイズはほぼ無視でき、また、人間の1週間の生活パターン、特に平日と休日に起因する変動ノイズも同様に無視できると考えられる。

一方、測定計画では、なるべく晴天日の調査を目標としているが、現実には降雨影響のある日が調査日になるのは避けられない。数日程度の間隔で発生する降雨の影響は、データに確率的な要素として含まれていると考えて解析すべきであろう。

また、潮汐作用は主として12時間25分周期で変動しており、太陽の日周期とは1日に50分単位で遅れて現れる。したがって、月1回の頻度で行われている測定計画の水質測定結果には、潮汐作用の影響はやはり確率的な要素として含まれているものと考えられる。

なお、参考資料として、横浜地方気象台の月平均気温、月合計日照時間、月合計降雨量<sup>8)</sup>も用いた。

## 2-2-3 解析結果

### 2-2-3-1 水質時系列とその周期性

図2-2-2に水質時系列を示す。

水質時系列の変動傾向をみると、FLOWは1976年から1981年頃まではそれ以降に比べやや高い値を示すが、不規則に変動しており、季節変動は認められなかった。季節変動が明確に認められない項目はFLOW以外に $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ およびCLであった。 $\text{PO}_4\text{-P}$ は年々減少傾向を示したが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ はほぼ横ばいで推移した後、1988年頃から上昇してきた。また、CLは1981年頃まで低い値で推移し変動幅は小さかったが、それ以降は高くなり変動幅も大きくなった。

一方、有機汚濁成分の指標となるBODやCODおよびMBASは明確な季節変動を示した。これらの項目は、降雨が多く高温となる夏期に希釈と微生物分解の作用を冬期に比べ多く受けるため、夏期に低く冬期に高い季節変動を示したと考えられる。また、季節変動の振幅は年によって変化しており、数年程度の間隔での変動も認められるようである。さらに、これらの項目のトレンドを見ると、年々減少していき、特に1988年以降に顕著な低下が認められた。1988年以降の顕著な低下は $\text{PO}_4\text{-P}$ や $\text{NH}_4\text{-N}$ にも認められた。その原因として、帷子川流域における下水道普及率の急激な上昇などが考えられるが、はっきりした原因は究明できなかった。

このように、水質時系列はいろいろな周期成分を含んでいることから、そのパワースペクトル<sup>9)</sup>を求め(図2-2-3)、周期性について検討した。

まず、スペクトルの特徴をみると、BODなどの有機汚濁成分では季節変動である12ヶ月周期が明確に認められたが、FLOW、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ およびCLは卓越した12ヶ月周期成分を示さなかった。FLOWはその時々の降雨量の増減によって直接に影響され、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は降雨に伴う中間流出の影響を受ける<sup>10-12)</sup>。そして、2-2-2-3節で述べたように、数日程度の間隔で発生する降雨の影響は今回のデータに確率的な要素として含まれるので、この2項目は他項目と比べ卓越した周期を示さなかったと推察される。 $\text{PO}_4\text{-P}$ については、河川水中に比較的豊富に含まれており、感潮域では海水との混合作用により水中から沈降除去される。そして、その $\text{PO}_4\text{-P}$ の除去割合は潮汐作用の程度により異なるので、月1回の頻度で測定されている公共用水域水質測定結果にはその影響が確率的に現れたため、明確な季節変動を示さなかったと考えられる。また、CLも同様に河川水と海水の混合作用の影響が確率的に現れたためと推察される。

次に、12ヶ月より長い周期成分についてみると、ほとんどの項目はスペクトル密度は小さいものの18~43ヶ月の周期成分を含んでいた。そこで、最も密度の高い12ヶ月周期を消去して長周期の変動成分について詳細に調べることにした。

### 2-2-3-2 水質の数年周期の変動と気象因子との関係

様々な周期成分を含む時系列から12ヶ月周期の成分を消去するためには、12ヶ月移動平均を行えばよい<sup>13)</sup>。図2-2-4に水質の12ヶ月移動平均時系列を示す。

移動平均時系列は、いずれの水質項目も数年程度の周期で増減を繰り返しており、また、BODや $\text{PO}_4\text{-P}$ などでは減少のトレンド、そして $\text{NO}_3\text{-N}$ では後半から増加のトレンドが認められた。この節では、数年程度の周期変動の要因について検討し、トレンドについては2-2-3-3節で述べる。

まず、FLOWは調査期間の前半にやや大きい値を示した後、1982年頃からはほぼ一定値で推移した。これ

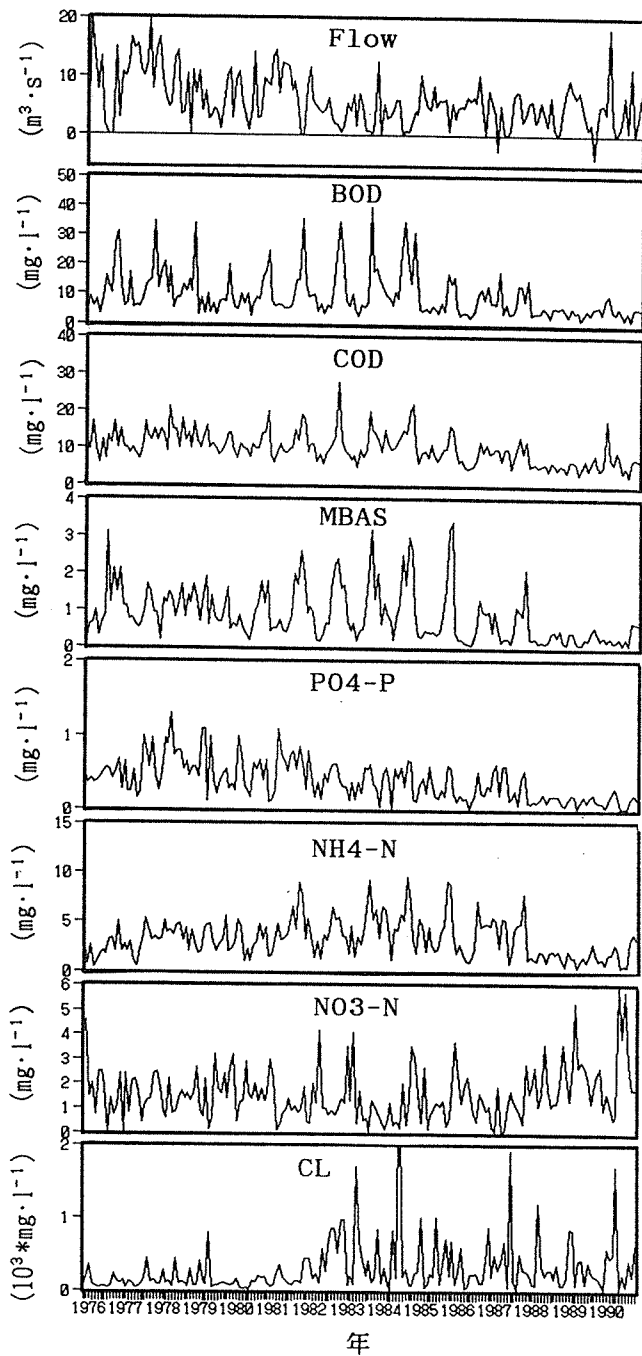


図2-2-2 水質時系列

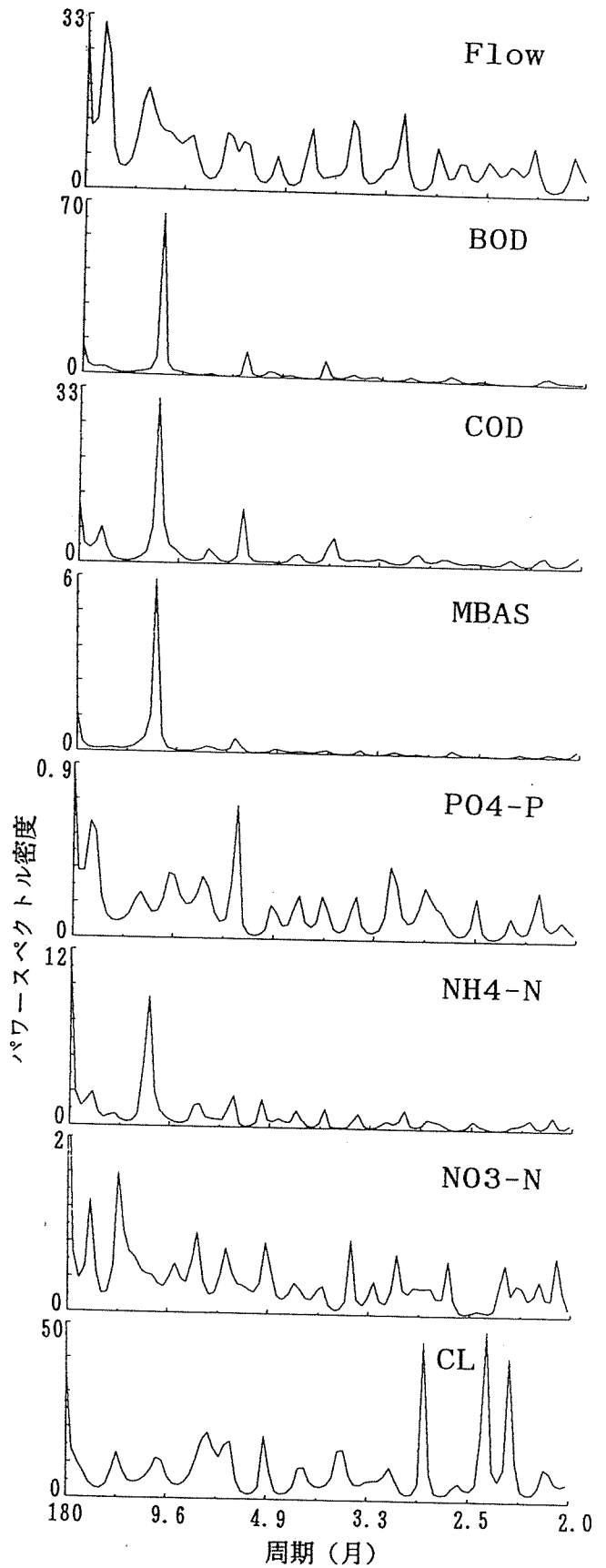


図2-2-3 水質時系列のパワースペクトル

と逆の変動を示したのはCLであった。この理由として、調査期間の前半では河川流量が多く海水の影響が少なかったためCLが小さく、それ以降では海水の影響が大きくなったためCLが大きくなったと考えられる。1982年以降に海水の影響が大きくなった原因についてはわからなかった。次に、BOD、COD、MBAS、 $PO_4$ -Pおよび $NH_4$ -Nについては、ほとんど同じ変動パターンを示した。それらの項目が高い値を示す年は1978、1981-82、1984および1987年でほぼ3年に1回の頻度であった。1988年以降は水質汚濁の程度が顕著に低下したため明確な変動を示さなかった。この3年程度の周期変動は、古田ら<sup>14)</sup>が指摘しているように30ヶ月前後の降雨量の循環変動が河川水に希釈作用の強弱をもたらした結果であると考えられる。

そこで、河川水質(図2-2-4)と気象との関係について比較検討するため、図2-2-5に横浜における1976年から1990年までの期間の気象のパワースペクトルを、また、図2-2-6にはその気象の12ヶ月移動平均時系列を示した。図2-2-6によると、降雨量の少ない年は気温が少し高く日照時間が長くなる傾向を示し、降雨量の少ない年は少ない順に1984、1978、1987、1981そして1990年であった。これらの年は、明確な変動のみられない1988年以降を除き、CODや $PO_4$ -Pなどが高い値を示す年とほぼ一致した。そして、降雨量のパワースペクトル(図2-2-5)から、その周期成分は35ヶ月で、それはCODや $PO_4$ -Pなどの長周期成分とほぼ一致した。したがって、CODや $PO_4$ -Pなどが3年程度の周期で変動する要因は、主として降雨量の年々変動を背景とした河川流量の増減の影響であると言える<sup>10,14)</sup>。

このようなCODや $PO_4$ -Pなどの変動特性とは異なり、 $NO_3$ -Nは降雨量の多い時期に高濃度を示した。雨水中にも $NO_3$ -Nは含まれているが、その濃度は平均して0.23mg/l程度<sup>15)</sup>であり、雨水はむしろ都市河川水中の $NO_3$ -N濃度を希釈しているといえる。したがって、 $NO_3$ -Nの高濃度の要因としては、降雨に伴う流出の影響が考えられる。一般に、降雨に伴う短期的な流出は、表面流出、中間流出および地下水流出(基底流)の3つから形成されている<sup>16)</sup>。このうち、浅層土壌を通して流れ出る中間流出は、降雨終了後に降雨の始まる前の濃度を上まわる成分を含み、しかもその状態が降雨後の数日間程度持続する場合が多い<sup>4,11)</sup>。 $NO_3$ -Nはこの中間流出成分に該当する。また、降雨量の多い年は平年に比べて降雨影響を受ける期間の長い年であると考えられる。したがって、降雨量の多い年は平年より中間流出の影響を受ける確率が高くなり、その結果、12ヶ月移動平均の $NO_3$ -N濃度が高まったと推察される。

$NO_3$ -Nや $NH_4$ -Nの変動は降雨影響に関してDOの変動と強く結びついている場合が多い。たとえば、降雨前後の河川水質変動において $NO_3$ -NとDOは降雨前に比べ降雨後に高い値を示すが、 $NH_4$ -Nはそれらとは逆の変動を示す<sup>9)</sup>。このようにDOの変動は $NO_3$ -Nと順に対応し、 $NH_4$ -Nとは逆に対応する。そこで、DOの変動と $NO_3$ -Nや $NH_4$ -Nなどの変動との関連を調べるため、図2-2-7にDOの12ヶ月移動平均時系列を示す。 $NO_3$ -Nや $NH_4$ -Nの変動(図2-2-4)と比較すると、DOの変動は $NO_3$ -Nと順に対応し、 $NH_4$ -Nや $PO_4$ -Pとは逆に対応した。したがって、降雨量の年々変動がDOの年々変動にも影響しているものと考えられる。特に、感潮域では汚染物質が多く堆積しており、その汚染底質が降雨量の少ない年にさらにDOの低下を引き起こして、底質から $PO_4$ -Pの溶出を促進させるので、富栄養化を引き起こす要因の一つになる。

なお、日本の降雨量が数年程度の周期変動を示す原因は、太平洋赤道域の東部と西部との間で生じている数年周期の水温および気圧の変動(エルニーニョおよび南方振動)によって大気中に大規模な波動が作られ、それが時間遅れで北上し日本の降雨量に影響するためと考えられている<sup>17,18)</sup>。

### 2-2-3-3 水質のトレンドの要因およびその影響

#### 2-2-3-3-1 減少のトレンド

図2-2-4において、BOD、COD、MBASおよび $PO_4$ -Pは減少のトレンドを示した。しかし、気象(図2-2-6)にはほとんどトレンドが認められないことから、これらの減少のトレンドは気象因子によるものではなく、下水道の普及など社会因子の影響によるものと考えられる。表2-2-1に、横浜市内の水域

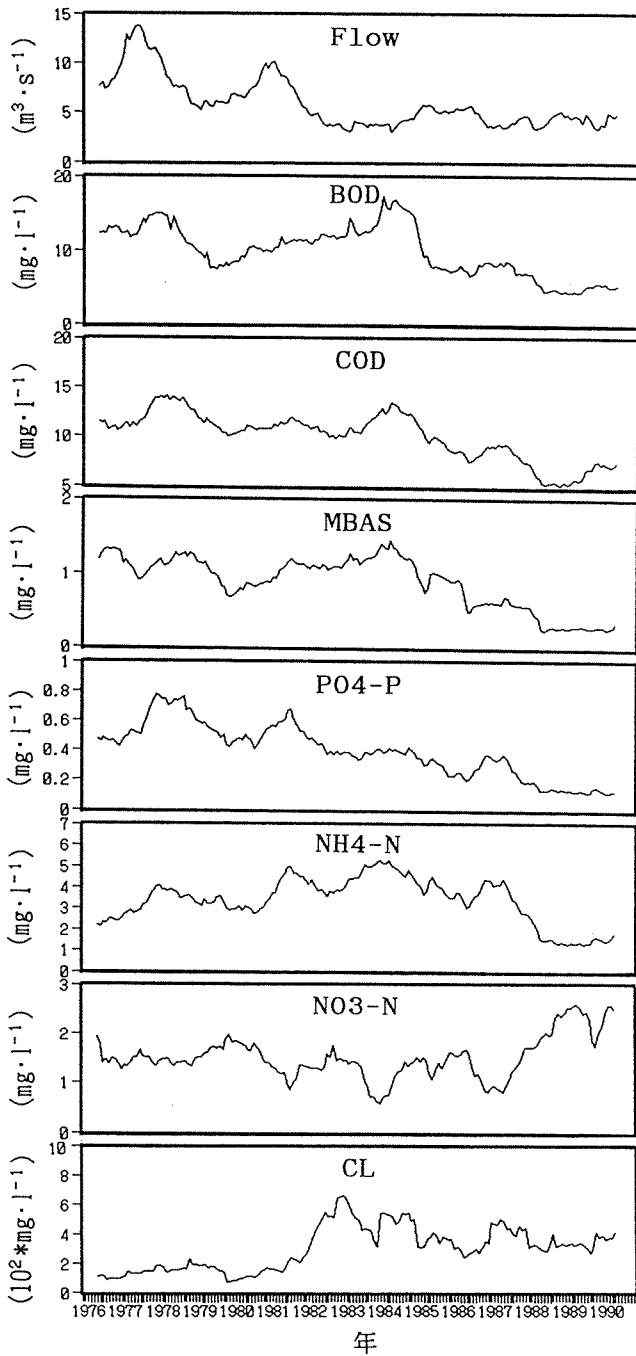


図2-2-4 水質の12ヶ月移動平均時系列

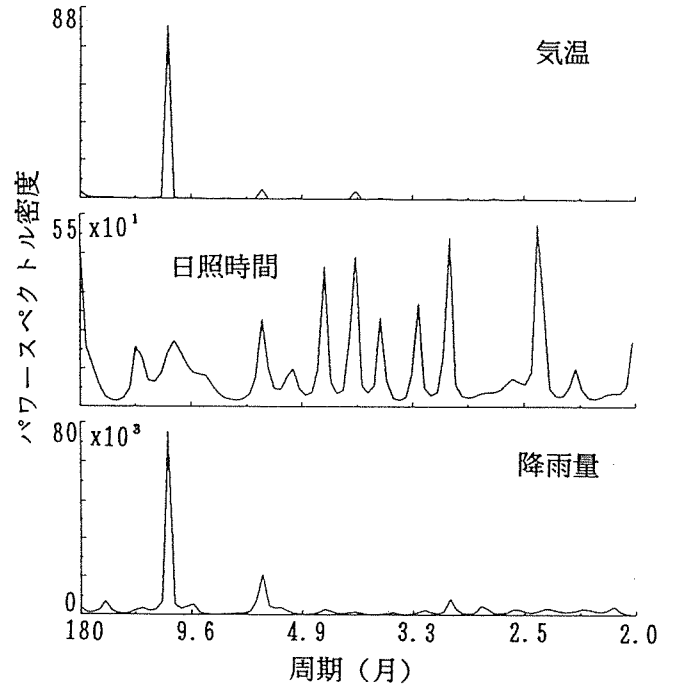


図2-2-5 気象のパワースペクトル

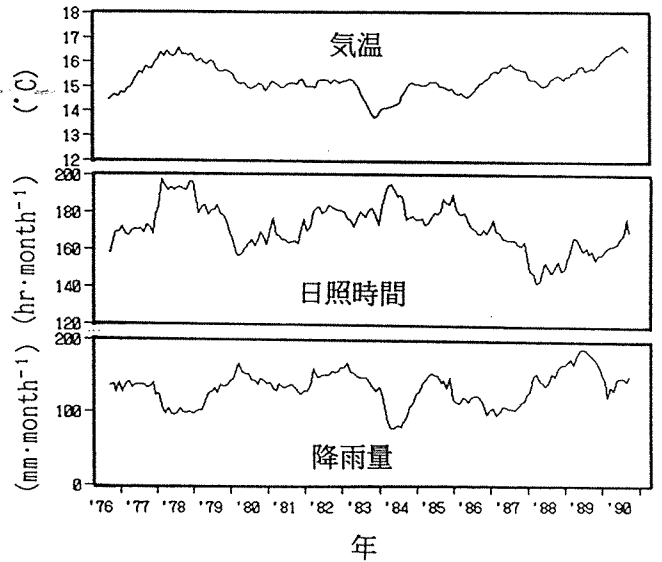


図2-2-6 気象の12ヶ月移動平均時系列

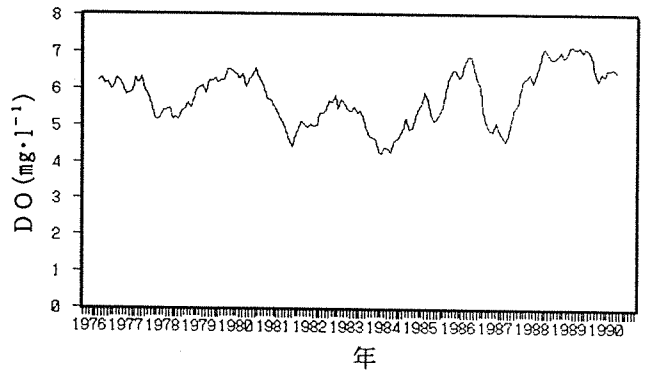


図2-2-7 DOの12ヶ月移動平均時系列



表2-2-1 水域環境に係わる社会因子

年	内容
1977	横浜市内人口 約267万人、下水道普及率 25.8%
1980	滋賀県「琵琶湖の富栄養化の防止に関する条例」施行 無リン化洗剤へ転換→1983年までにほとんどが転換
1982	茨城県「霞ヶ浦の富栄養化の防止に関する条例」施行
1985	水質汚濁防止法改正→湖沼のN・P基準設定
1987	コンパクト型洗剤へ転換
1990	水質汚濁防止法改正→生活系排水対策の追加
1991	横浜市内人口 約323万人、下水道普及率 89.0%

注) 下水道普及率は人口普及率であり、その年の3月の値を示す。

環境の改善に関わる社会的な出来事などを年代順にまとめて示す<sup>19,20)</sup>。なお、測定点の水道橋の上流には下水処理場は存在しない。

横浜市の人口は1977年から1990年までの間に17%増加したが、下水道普及率はそれを上回る44%の伸びを示した。また、1980年から1990年にかけては全国的に富栄養化防止などのための様々な施策や取り組みが行われた。したがって、CODやMBASなどの有機汚濁成分が減少のトレンドを示したのは、行政・メーカー・市民が水質汚濁対策に取り組んだ結果であると考えられる。以下、これら減少のトレンドを示す項目について考察した。

BOD, CODおよびMBASについてみると、1984年頃まではほぼ横ばいで推移しているが、それ以降は水質の改善効果によると思われる減少傾向が現れており、特に1988年以降は明確に低濃度になっている。PO<sub>4</sub>-Pも同様なトレンドを示すが、そのなかで1980年から1983年にかけて行われた無リン洗剤への転換の効果によると思われる降下は、降雨量の年々変動による水質変動を考慮すると、わずかに認められる程度である。もし、PO<sub>4</sub>-Pが洗剤に含まれるリン酸塩のみに由来するならば、1980~1983年の無リン洗剤への転換時に顕著な減少を示すはずである。しかし、そのような現象は見られず、むしろ1980年以前から減少傾向を示している。この理由として、下水普及率の上昇にともない水道橋より上流域の生活排水などは下流の下水処理場に送られたこと、無リン洗剤への転換以前から洗剤中のリン含有量が減少していたこと、さらには農地の宅地化が進んだことなどが考えられる。NH<sub>4</sub>-Nについては、1987年頃まで少し高めの時期もあったがほぼ横ばいで推移した後、1988年から極端に低い値を示しその状態が1990年まで続いた。2-2-3-1節でも述べたが、1988年以降の顕著な低下原因についてはわからなかった。

#### 2-2-3-3-2 増加のトレンド

NO<sub>3</sub>-Nについては、CODなどとは異なり、1986年頃まではほぼ一定の値で推移していたが、1987年以降になると増加のトレンドを示した。1987年以降はCODやNH<sub>4</sub>-Nなどが明確に低濃度を示しており、水質が大幅に改善された時期に相当している。したがって、1987年以降にNO<sub>3</sub>-Nが増加した要因として、河川水中における硝化反応との関連が考えられる。経年的に硝化反応が高まれば、あるいはNH<sub>4</sub>-Nが増加すれば、それに応じてNO<sub>3</sub>-Nも増加することになる。河川中の硝化菌のデータがないので、硝化反応の促進について詳しいことは言及できないが、DOが高くなると、それに応じてNO<sub>3</sub>-Nも増加する傾向がある<sup>12)</sup>。DOはNO<sub>3</sub>-Nと同じ変動パターンを示し(図2-2-7と図2-2-6)、特に1988年以降になるとやや増加しているの

が認められることから、DOは1988年以降は水質がきれいになってきたため増加したと推察される。しかし、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度とも減少傾向を示しており、硝化反応以外の要因も寄与しているものと思われる。

$\text{NO}_3\text{-N}$ の増加のもう一つの要因として、窒素汚染の地下水の影響が考えられる。2-2-3-2節で述べたように、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の3年程度の周期変動は降雨量の多い年に中間流出の影響が高まることに起因するものであった。したがって、降雨量に増加のトレンドが認められれば、それが $\text{NO}_3\text{-N}$ の増加傾向を引き起こす要因となる。しかし、降雨量の12ヶ月移動平均時系列(図2-2-6)にはほとんどトレンドが認められない。一方、3つの流出のうち地下水流出(基底流)による影響が考えられる。すなわち、基底流は恒常的な地下水の供給から成る<sup>16)</sup>ので、その供給地下水が汚染されれば河川水質にも影響を与えることになる。近年、農地への窒素肥料の施肥などによる地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 汚染が顕著になってきており、飲用水基準(この場合は $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ の濃度)の10mg/lを超過した井戸も増えてきている<sup>21,22)</sup>。そして、鶴見川などでは $\text{NO}_3\text{-N}$ は年々上昇傾向にある<sup>23)</sup>。したがって、基底流を構成する地下水は経年的に $\text{NO}_3\text{-N}$ によって汚染されてきており、地下水の流速が小さいことも原因して、その河川水質への影響は時間遅れでかなり緩やかに現れてきたと考えられる。そのほか、畜産業からの窒素負荷<sup>24)</sup>なども考えられるが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の増加要因についてはさらに詳細な調査が必要である。

### 2-2-3-3-3 N/P比の変化

一般に、藻類の増殖は最小律の法則に従い、最も不足する物質が制限因子となり、増殖量を支配する。湖沼における富栄養化現象は、窒素あるいはリンが制限因子となる場合が多く、 $\text{N/P} \leq 20$ かつ $\text{P} \geq 0.02 \text{ mg/l}$ の場合に窒素を制限因子としている<sup>25)</sup>。そして、NおよびPの大部分はそれぞれ $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ および $\text{PO}_4\text{-P}$ によって占められていることから、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度と $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度の比をN/P比としても大略間違いはない。

今までの考察結果から、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は増加傾向、そして $\text{NH}_4\text{-N}$ は横ばいから減少傾向を示したが、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は明確に減少傾向を示すことがわかった。したがって、N/P比は経年的に増加していくと予想されるので、N/P比の変化について調べた。図2-2-8にN/P比の時系列を示す。

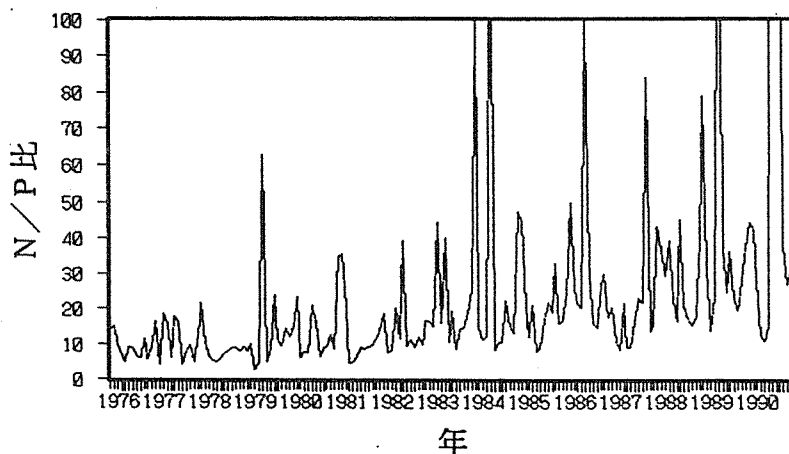


図2-2-8 N/P比の時系列

N/P比は、1976年から1978年頃までは10前後の値を示したが、1980年頃から徐々に増加していき、1980年後半には20を超えることが多くなった。したがって、帷子川感潮域においては過去15年間に制限因子はNからPに移ったといえよう。今後はPの減少速度は緩やかになるが、Nの増加傾向は続くと思われることから、これからの制限因子がPであることに変わりはないと推察される。また、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度は1990年度平均で0.13mg/lであり、現在でも二次汚濁を引き起こすのに充分である。富栄養化対策として、Nの増加を

抑えるとともに、Pの負荷量の削減についてもさらなる努力が必要である。

#### 2-2-4 まとめ

帷子川感潮域の水道橋における過去15年間の公共用水域水質測定結果を用い時系列解析を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 水質時系列には、季節変動のほか3年程度の周期変動や減少および増加のトレンドが認められた。
- 2) 3年程度の周期変動は、地球規模の気象変動に伴う降雨量の35ヶ月の周期変動に起因するものであった。降雨量の多い年に低濃度を示す項目はBOD、COD、MBAS、 $PO_4$ -Pおよび $NH_4$ -Nであり、逆に高濃度を示す項目は $NO_3$ -NとDOであった。それらの原因として、前者は降雨量の増加に伴う希釈効果、後者は降雨による中間流出の割合の増加などが考えられた。特に、汚染物質が多く堆積している感潮域では、降雨量の少ない年にDOの低下とそれに伴う底質からの $PO_4$ -Pの溶出を促進させると考えられることから、富栄養化対策を行う上で汚染底質の除去が必要であると推察された。
- 3) 減少のトレンドを示す項目はCODなどの有機汚濁成分や $PO_4$ -Pであり、その減少要因として、下水道の普及や農地の宅地化そして洗剤の転換などが考えられた。 $NH_4$ -Nについては、明確なトレンドは認められなかったが、1988年以降は顕著に低濃度となりその状態が1990年まで続いた。1988年以降の傾向は有機汚濁成分や $PO_4$ -Pにも現れたが、その原因についてはわからなかった。
- 4) 増加のトレンドを示す項目は $NO_3$ -Nであった。 $NO_3$ -Nの増加原因として、 $NH_4$ -Nの硝化や地下水の窒素汚染による影響などが考えられるが、さらに調査が必要である。
- 5)  $NO_3$ -Nは増加し $PO_4$ -Pは減少しているため、N/P比は増加してきており、富栄養化の制限因子はNからPに変わった。しかも、 $PO_4$ -Pは依然として高い値を示していることから、Pのさらなる削減が必要である。

#### 参考文献

- 1) 河原長美, 名合宏之: 旭川感潮部における表面水質の統計的性質, 水質汚濁研究, 7(4), 232-238(1984).
- 2) 細井由彦, 村上仁士: 感潮河川の水質におよぼす潮位振動の影響について, 水質汚濁研究, 6(1), 23-30(1983).
- 3) 横浜市公害研究所: 水域生物指標に関する研究報告, P 34(1989).
- 4) 二宮勝幸, 水尾寛己: 主成分分析法を用いた周期的時系列データの解析(II), 横浜市公害研究所報, 13, 121-129(1989).
- 5) 古田正次, 岩瀬敏夫: 環境水質データの解析システムについて, 愛知県公害調査センター報告, 17, 35-43(1989).
- 6) 神奈川県: 神奈川県水質調査年表(昭和51年度-平成2年度).
- 7) 古武家善成: 兵庫県内の河川および沿岸海域におけるMBAS長期モニタリングデータの統計解析, 水質汚濁研究, 14(3), 165-173(1991).
- 8) 横浜地方気象台: 神奈川県気象年報(1976-1991).
- 9) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店(1979).
- 10) 横浜市公害研究所: 魚の死亡事故の原因究明に関する研究報告書, 第2章 魚の死亡事故と水質変動特性との関連, 公害研資料 No.91(1991).
- 11) 海老瀬潜一: 面源負荷の流出に及ぼす水文条件の影響, 国立公害研究所研究報告, 95, 57-70(1986).
- 12) 二宮勝幸, 水尾寛己: 魚類へい死事故に関する調査, 横浜市公害研究所報, 12, 97-108(1987).
- 13) 鈴木榮一: 気象統計学, 地人書館(東京), (1975).

- 14) 古田正次, 岩瀬敏夫: 汽水域における環境要因の変動特性-地上気温の年々変動-, 愛知県公害調査センター報告, **19**, 18-22 (1991).
- 15) 矢本てるみ, 加藤善徳: 横浜市における酸性雨調査, 横浜市環境科学研究所報, **17**, 205-207(1993).
- 16) 国松孝男, 村岡浩爾: 河川汚濁のモデル解析, p 94, 技報堂出版, 東京(1989).
- 17) 中島幸久: ENSO と日本の降水量の年々変動, 気象, **33**(7), 35-37(1989).
- 18) 気象庁編: 異常気象レポート'89, p 238, 大蔵省印刷局(1989).
- 19) 吉村孝一: 化学物質としての界面活性剤, 水環境学会誌, **16**(5), 294-301(1993).
- 20) 横浜市下水道局: 水質年報(昭和 51 年度, 平成 2 年度)
- 21) 川西琢也, 川島博之, 尾崎保夫: 地下水の硝酸態窒素濃度の上昇と農業生産, 用水と廃水, **33**(9), 725-736(1991).
- 22) 永井茂: 地下水の無機汚染の実態と問題点, 水, **9**, 18-25(1990).
- 23) 二宮勝幸: 河川水質データの時系列解析, 用水と廃水, **36**(2), 107-114(1994).
- 24) 大久保卓也, 村上昭彦: 利根川における水質経年変化と流域環境変化の関連分析, 用水と廃水, **37**(3), 202-211(1995).
- 25) 鈴木繁: 公共用水域の水質と保全対策の動向, 用水と廃水, **35**(1), 7-18(1993).