

第3章第1節 根岸湾と本牧沖における赤潮の消長と 気象因子の影響

二宮 勝幸*, 水尾 寛己*
畠中潤一郎**, 小野寺典好**, 若林 信夫**

3-1-1 はじめに

東京湾の水質汚濁状況¹⁾はCOD値でみると、ここ数年横ばいになっており改善傾向を示していない。この一因として、毎年植物プランクトンの異常増殖による赤潮が発生し、その影響を受けていることが挙げられる。赤潮は季節としては春から秋にかけて発生することが多いが、その季節の中でも特に降雨後の晴れた日に赤潮がよく見られることを経験している。実際、著者等²⁾は横浜市沿岸海域の公共用水域水質測定結果を詳細に検討したところ、赤潮発生当日はもちろん発生日前の気象状況が赤潮発生に大きく影響し、気象因子の中でも水温や風の影響が大きいことなどが示唆された。赤潮はこのような気象変化にともない数日から十数日の間隔で盛衰を繰り返しているものと考えられる。

このように気象変化が赤潮発生に大きく寄与していると推察されることから、赤潮発生の機構解明や予測を行い海域の二次汚濁対策を構ずる上で、どのような気象条件の時に植物プランクトンは増殖しあるいは減衰するのかを把握しておくことが重要となる。そのためには、実際の海域において短い時間間隔で水質を長期連続観測する必要があるが、そのような観測事例はほとんど見られない。その理由として、人的対応だけでは長期間の観測に無理があり、また自動計測機に関しても東京湾のような植物プランクトン量の多い内湾では使用に耐えうる計測機が開発されてなかったこと、測定精度の面などでも問題があったことなどが挙げられよう。しかし、近年、技術の進歩によって光学的自動測定機が現場海域で使用できるようになってきている³⁾。

そこで、光学的自動水質測定機を組み込んだブイを横浜市沿岸に設置し、その上層水質を長期連続観測して、植物プランクトンの消長と気象条件等との関係について検討した。

3-1-2 方 法

3-1-2-1 測定期間および測定時間間隔

測定期間：1989年6月上旬から9月上旬までの約3カ月間

測定時間間隔：1時間

3-1-2-2 測定地点

測定地点を図3-1-1に示す（以下、「根岸湾ブイ」という）。

測定地点：根岸湾湾口部（N 35°23'37"， E 135°39'50"）

測定位置：水深1m

Effect of meteorological factors on rise and fall of red tides in Negisi Bay and off the coast of Honmoku

* Katsuyuki Ninomiya, Hiromi Mizuo 横浜市環境科学研究所

** Junichiro Hatakenaka, Noriyoshi Onodera, Nobuo Wakabayashi 横浜市環境保全局

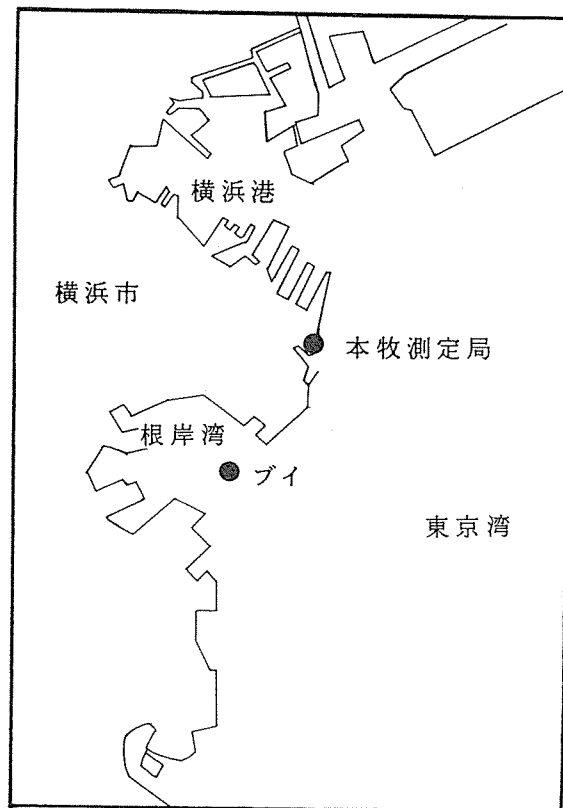


図3-1-1 測定地点

なお、根岸湾ブイから北方約4 kmに位置する本牧環境水質測定局（以下、「本牧測定局」という）のデータも参考に用いた。その位置を図3-1-1に併せて示す。

3-1-2-3 測定項目

根岸湾ブイ：水温、塩分、クロロフィル蛍光強度 (FI), 254 nm および 690 nm の体積消散係数 (C 254, C 690)

本牧測定局：水温、pH、DO、塩素イオン濃度 (C 1)、COD、FI

測定項目の中で、FIは植物プランクトンの生体に含まれるクロロフィルが蛍光を発する性質を利用して436 nmの励起光で685 nmの蛍光（単位：mV）を測定したものであり、植物プランクトンの活性クロロフィル量と対応している。また、体積消散係数については、海水中に存在する懸濁物や溶存態有機物は光と作用して吸収や散乱を行うが、その仕方が波長によって異なる性質を利用したもので、C 254は懸濁物と溶存態有機物両者による濁りの濃度、C 690は懸濁物による濁りの濃度に対応している³⁾。ただし、C 254は海水については有機態溶存成分を正確に表しているとは限らないとされているので、参考程度に用いた。

3-1-2-4 測定方法

光学的自動測定機(芙蓉海洋開発製クロローUV計：蓄電池駆動方式)を水深1 mになるように直径約1.5 m・高さ約4 mのブイに組み込み、そのブイを根岸湾に係留した。クレーン船でブイを海上に設置する場面とブイ上でのサンプル回収風景の写真を写真3-1-1および写真3-1-2に示す。データは1時間間隔でICカードに自動記録し、それを蓄電池とともに約2週間に1回の割合で回収・交換する方法により行った。なお、この機器は生物などによる光路レンズ部の汚れの影響を防止するため、測定時間前にレンズのワイパー洗浄を行っている。

本牧測定局については、取水口から測定局に海水をポンプアップし、その水を自動測定している。

3-1-3 結果と考察

約3か月の測定期間中に、生物が測定機に付着することによって、正常なデータが得られない場合が生じた。具体的には、光路レンズ部ではなく、その周辺に糸状の生物が付着し、それが光路上を揺れ動くため、その期間のデータはばらつきの激しいものとなった。このほかにブイを海上に設置するとホヤやムラサキガイが多数付着し、それらの中にゴカイなども認められた。

そこで、生物の付着などによる影響がみられなかった6月7日から7月6日までの約1か月の測定期間のデータについて解析を行うこととした。

3-1-3-1 気象概況

前述したように、植物プランクトンの増殖は当日の気象はもちろん、それより以前の気象によっても大きく影響される²⁾ので、まず測定期間中の気象概況(図3-1-2)について述べる。

6月7日は晴れたが、8日は曇となり、9日から梅雨前線が南岸に停滞して梅雨入りとなった。梅雨入り後は曇・雨天の日が多く、9~11日、16~17日、22~24日、および28日にはそれぞれ合計降雨量が30~100mmの大雨となった。気温については、6月9~11日、18~20日、および7月2~3日にかなりの低温となった。それら以外でも、降雨のある日は日中の気温が上がらない場合が多かった。風速は期間を通して5m/sを超えることはまれであり、海上は荒れることはなかったと推察される。このように、測定期間の6月7日から7月6日まではほぼ梅雨期間に相当し、1~4日程度の間隔で降雨があり、降雨がある時は日照が少なく、また気温の低下がみられた。

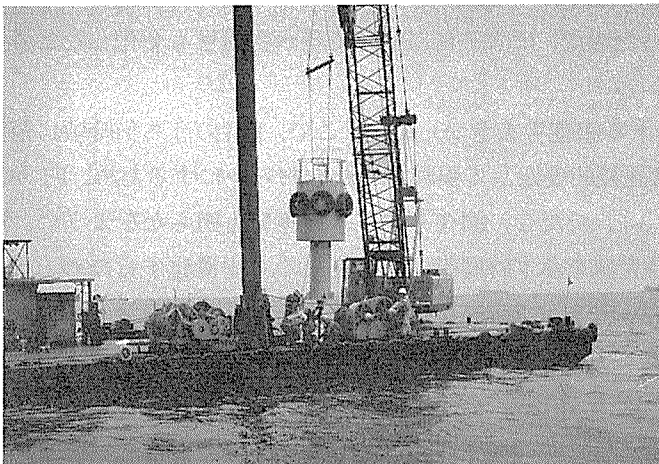


写真3-1-1 ブイの設置作業

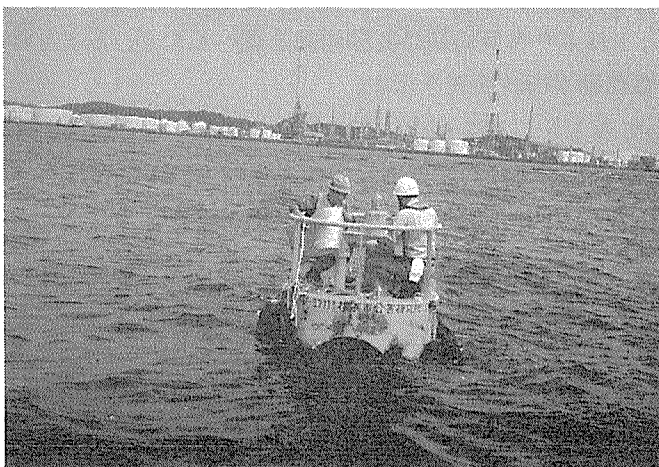


写真3-1-2 ブイ上での試料回収

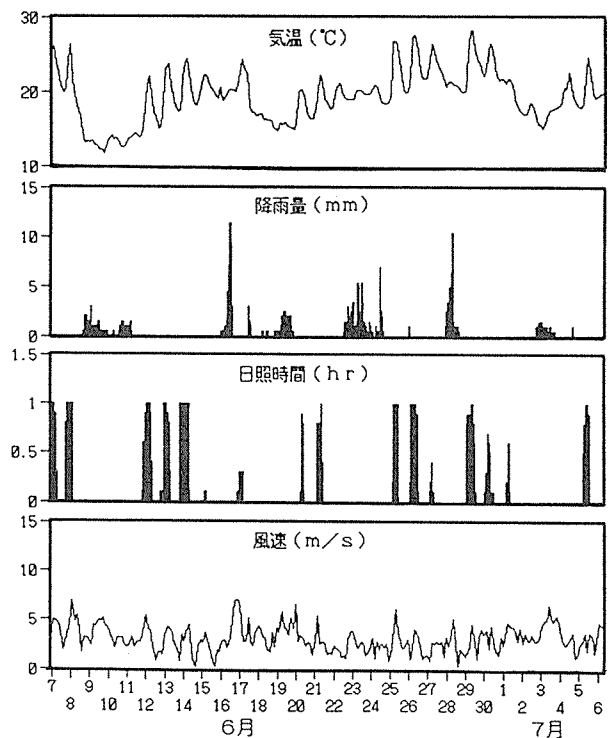


図3-1-2 気象時系列

3-1-3-2 水質測定結果

図3-1-3に根岸湾ブイの水質時系列を示す。

図3-1-3をみると、水温と塩分は降雨などの気象変化に起因すると考えられる大きな周期変動が認められ、その上に日周変動などに基因すると考えられる小さな変動が重なっていた。また、水温は、この期間中19~23℃の範囲にあり、この温度は植物プランクトンの増殖に最適な範囲⁴⁾であった。FIについては、1日単位の周期変動が明確に認められ、これは植物プランクトンの日周変動によるものと考えられた。C254やC690はFIとほとんど同じ傾向を示した。

このように、各水質時系列には様々な要因に基づいて時間変動する成分がいくつか含まれる。そこで、各水質時系列にはどのような周期変動成分が含まれているかを調べた。

3-1-3-3 水質時系列の周期変動特性

時系列データの周期変動特性を調べるには、スペクトル解析手法としてのパワースペクトル法が適用できる。図3-1-4に根岸湾ブイの水質時系列のパワースペクトルを示す。

パワースペクトル密度の比較的高い周期は12時間、24時間、および55~100時間の周期であった。12時間周期は潮汐作用によるものと推察され、水温では明確に認められたが、その他の項目では相対的にかなり小さかった。潮汐作用に伴う水温変化の影響が河口から比較的離れた沖合の測定地点（根岸湾湾口）にも及んでいることがわかった。24時間周期は1日間における日照変化に対応した周期変動であり、それは水温や植物プランクトンの増殖に関連したFIなどの日周変動に相当するが、塩分には認められなかった。24時間よりも長周期の55~100時間の変動成分は各水質項目で認められた。これは、3-1-3-1の気象概況で述べたように、測定期間中に1~4日おきに降雨があったので、ほぼそれに順じて各水質項目も変化したと考えられる。

FIに24時間周期が認められ、そのパワースペクトル密度も大きかった。そこで、1日のうち何時頃に植物プランクトンは最も増殖するのか、またその時間は比較的安定して現れるのかを明らかにするため、FIが日最大値を示す時間の度数分布を調べた(図3-1-5)。ただし、図3-1-3をみても明らかなように、FIは日に2回程度ピークをもつ場合があるので、日最大値を示す時間帯の偏りをなくし平滑化するため、日最大値を示す時間とともに2番目および3番目に大きい値を示す時間を含めた1日当たり3個のデータを採用した。例外として、3番目の値が複数個ある場合は3番目の値をもつ総ての時間を採用した。図3-1-5から、FIは12時から15時までが最も度数が大きく、次いで16時と17時の度数が大きかった。したがって、植物プランクトンは昼の12時から15時頃に最も増殖し、その後16時から17時にかけても増殖は弱まるものの増殖能力はある程度維持されると考えられる。ただし、プランクトンの種類によっては鉛直移動する場合もあるので、そのことを考慮する必要がある。

次に、不規則な変動成分や日周変動成分を除去し、1日よりも長周期の変動傾向を調べるため、各水質時系列の24時間移動平均を求めた。図3-1-6に水質移動平均時系列を示す。

図3-1-6から、まず水温と塩分の関係についてみると、水温が高くなると塩分は低くなる傾向がみられた。これは、水温が高い状態に維持されると、成層構造が発達し、低塩分の河川水が海域上層に保持されやすくなった結果と考えられる。次にFIの変動をみると、FIの比較的大きなピークが認められる日は13日、25日、および28日であった。その変動はC254やC690の変動とほとんど一致していることから、懸濁物や溶存態有機物の大部分は植物プランクトンに由来するものと考えられた。また、FIは水温変動ともほぼ一致しており、植物プランクトンの増殖に対する水温の影響は大きいと推察された。さらに、FIは6月20日前後を除いて塩分とは逆の変動を示しており、淡水化傾向の強いときにFIは高くなることがわかった。6月20日頃に淡水化傾向が見られたがFIが高い値をとらなかった理由としては、その時には水温が低かったことが大きく影響したためと思われる。

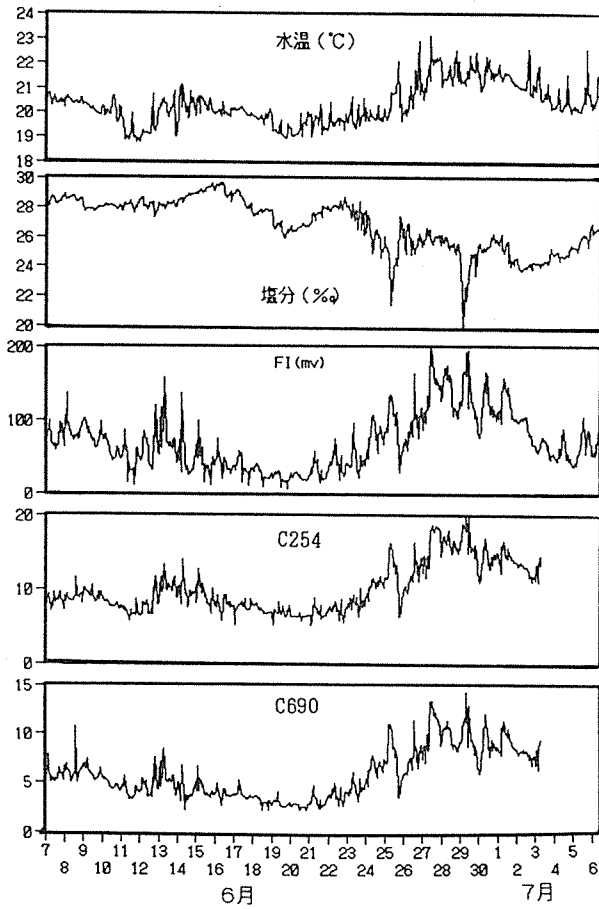


図3-1-3 水質時系列(根岸湾ブイ)

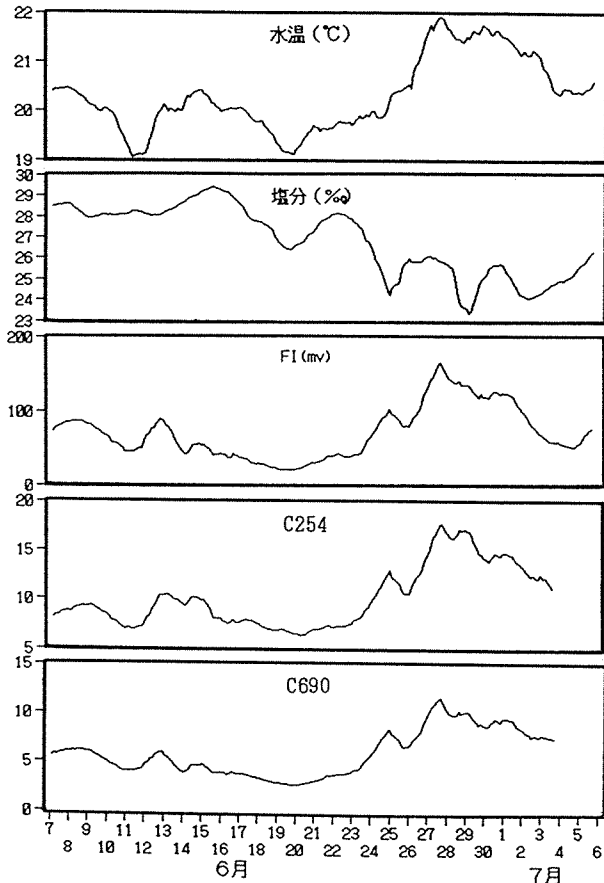


図3-1-6 水質移動平均時系列(根岸湾ブイ)

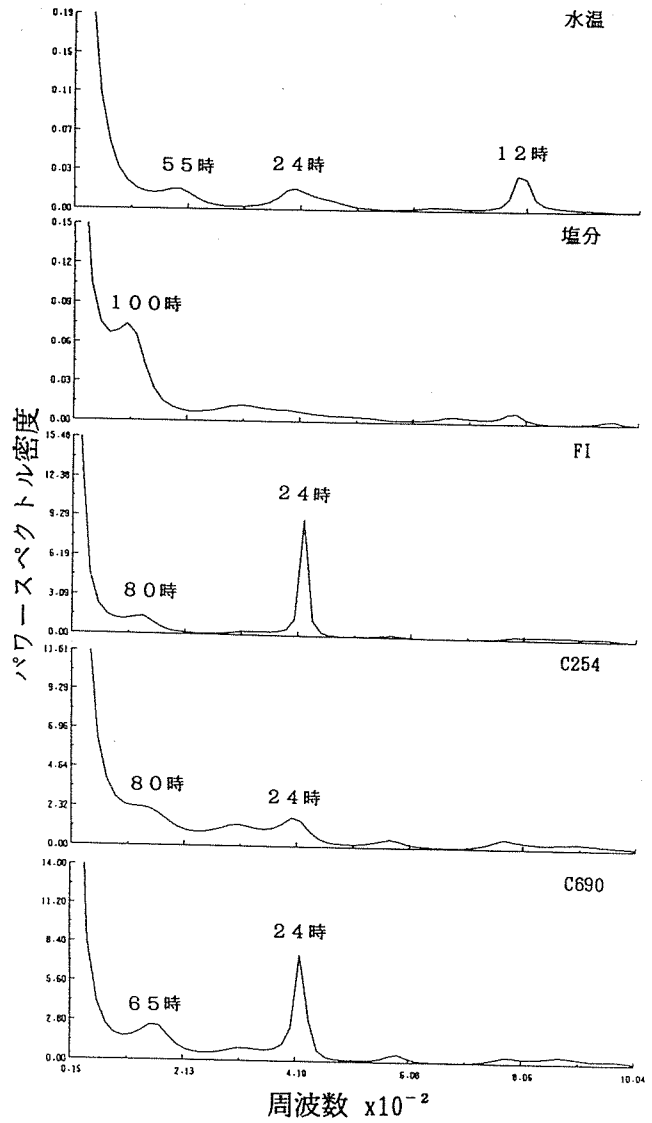


図3-1-4 水質時系列のパワースペクトル(根岸湾ブイ)

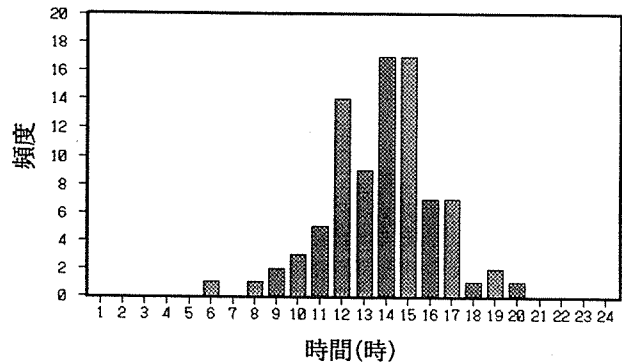


図3-1-5 FIが日最大値を示す時間帯の頻度分布

3-1-3-4 水温とFIの関係

水温とFIの変動は密接に関連していることから、より詳細にその関係を調べるため、それらの単位時間当りの変化量、すなわち微分曲線を求めた。それを図3-1-7に示す。

図3-1-7において、6月12日と27日頃に水温とFIは同じように大きく増加していた。水温の変化量は12日に平均して $0.05^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ そして27日に $0.04\sim 0.1^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ 程度の値を示し、FIの変化量は12日に $0.3\sim 3\text{mv}/\text{hr}$ そして27日に $1.5\sim 4.5\text{mv}/\text{hr}$ であった。このように水温の上昇が植物プランクトン量の増加に強く結び付いていることが明らかとなった。いずれも水温の上昇の数日前に水温の低下がみられ、この時は降雨があった。また、6月27日にプランクトン調査を行ったところ、優先種は 20°C 前後に増殖の最適温度⁴⁾をもつ緑色べん毛藻のヘテロシグマ・アカシマであり、その個体数は1ml中に約500個あった。

したがって、これまでの知見から、植物プランクトンの増殖過程を次のように要約することができる。すなわち、降雨に伴い水温が低下しその後天气が回復すると、水温は上昇に転じ 20°C 前後を超えるとともに、成層構造が発達し栄養塩の豊富な河川水が海域上層に保持される。このように、水温や栄養塩濃度などが赤潮発生の条件に合致すると、植物プランクトンの異常増殖に至る。

3-1-3-5 本牧測定局の水質データ

根岸湾ブイの水質データとの比較検討を行うため、根岸湾ブイから北方約4km離れている本牧測定局の水質データについて考察した。図3-1-8に根岸湾ブイの測定期間と同じ6月7~7月6日までの本牧測定局の水質時系列を、図3-1-9にその24時間移動平均時系列を示す。ただし、本牧測定局では、その期間中に13日から14日にかけて欠測があった。また、表3-1-1には、連続した水質データが得られている6月15日~7月6日までのデータについての水質項目間の相関係数を示す。

まず、表3-1-1をみると、PHとDOは最も高い正の相関を示し、次いでDOとFIが高い相関を示した。そのほか、水温・PH・DO・COD・FIの間で正の相関が認められた。これらの項目間で正の相関を示す理由として、植物プランクトンの光合成による炭酸同化作用が考えられる。すなわち、植物プランクトンは光を利用して海水中の炭酸を消費し代わりに酸素を放出するので、光が豊富で水温の高くなる昼間に植物プランクトンの増殖が活発になるとFIとともにPHやDOも高くなった。

このように植物プランクトンは1日間のなかで昼前後に最大増殖をすると考えられるが、1日のうち何時頃に植物プランクトンは最も増殖するのか、またその時間は比較的安定して現れるのかを明らかにするため、根岸湾ブイの場合と同様に本牧測定局についても各水質項目が日最大値を示す時間の度数分布を調べた(図3-1-10)。図3-1-10から、CODを除くほとんどの項目は14時あるいは15時に最も度数が大きく、これは根岸湾ブイの結果とほぼ同じであった。また、CODはそれらより1~2時間遅れの16時と17時に度数が最も大きかった。これらのことから、植物プランクトンの増殖は14~15時頃に最大となること、そしてその1~2時間後には増殖した植物プランクトンとともにそれらのデトリタスも加わるためCODが最も高まったと推察される。

一方、図3-1-9の本牧測定局の水質移動平均時系列をみると、水温・CL・FIの変動パターンは約4km離れている根岸湾ブイの結果(図3-1-6)とほぼ同じ傾向を示した。このことから、ある程度の平面空間内では植物プランクトンは類似の変動パターンを示すものと考えられた。また、FIはCODの変動ともよく対応しており、特にFIのピーク時にはCODのピークともよく一致していることから、COD成分のほとんどは植物プランクトン由来のものであると推察された。

FIとCODの関係を調べるため、図3-1-11にFIとCODの散布図を示す。また、FIとCODの回帰式を求めると、次式が得られた。

$$[\text{COD}] = 0.029 [\text{FI}] + 0.74$$

あるいは $[\text{COD}] = 0.014 [\text{FI}] + 1.61$

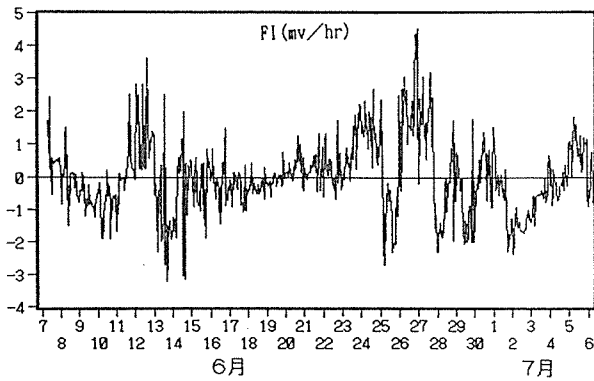
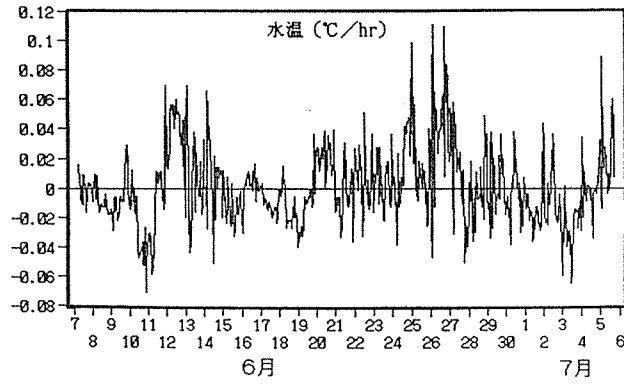


図3-1-7 水質移動平均時系列の微分曲線(根岸湾ブイ)

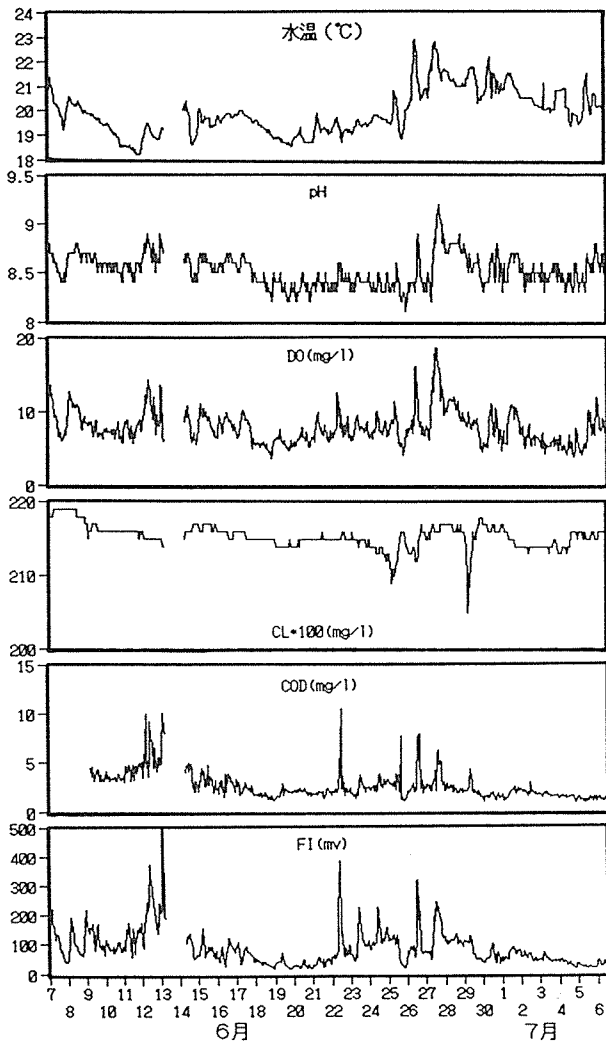


図3-1-8 水質時系列(本牧測定局)

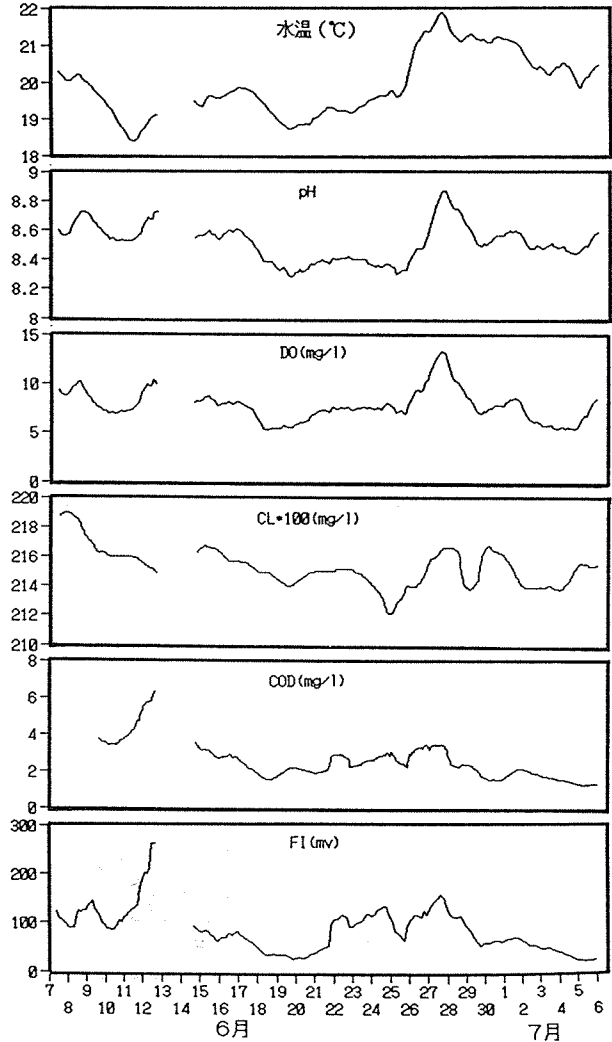


図3-1-9 水質移動平均時系列(本牧測定局)

表3-1-1 相関係数(本牧測定局)

	WT	pH	DO	COD	CL	FI
WT		0.661	0.590	0.167	0.036	0.358
pH			0.829	0.275	0.247	0.463
DO				0.508	0.071	0.720
COD					-0.141	0.691
CL						-0.145
FI						

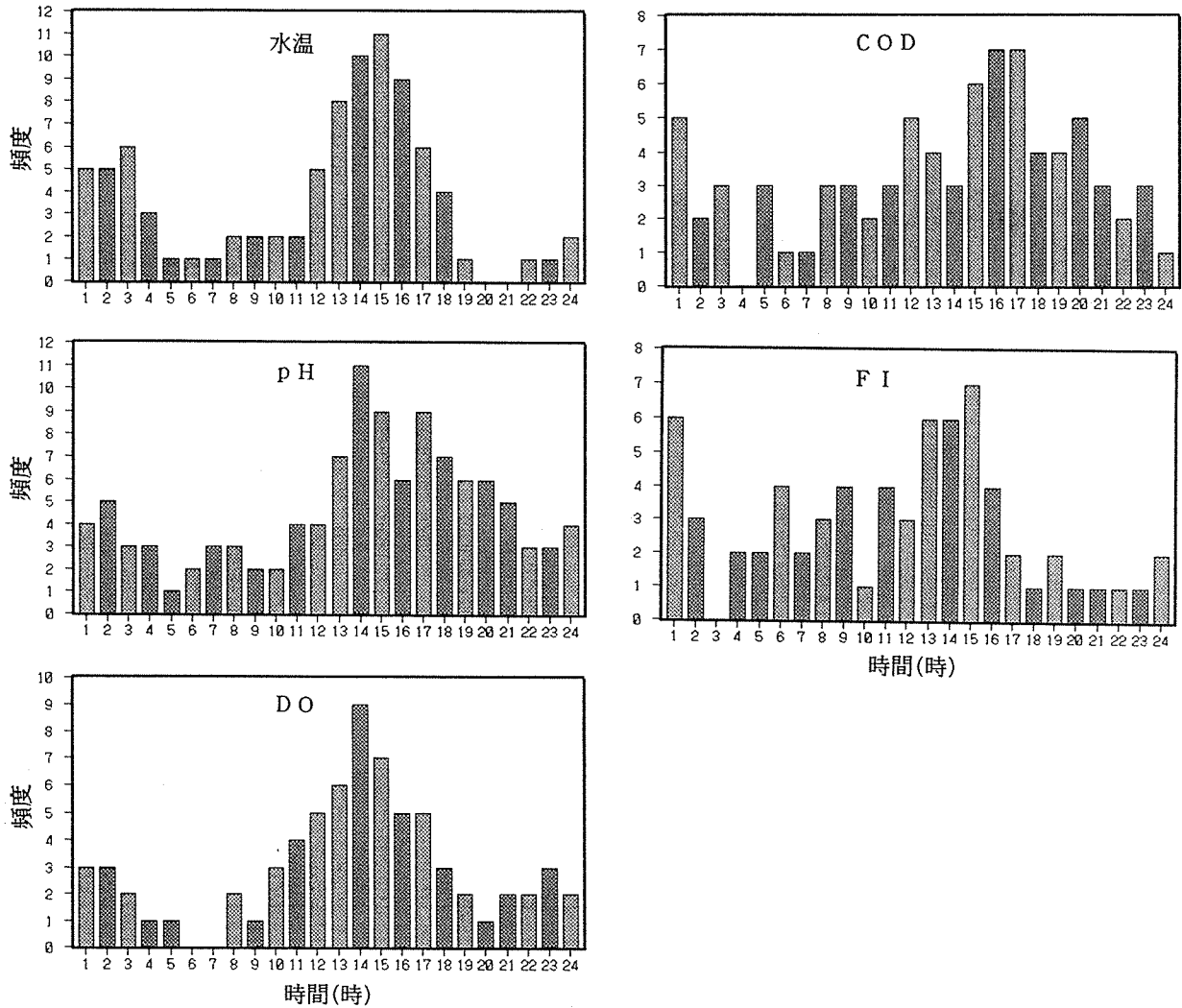


図3-1-10 各項目が日最大値を示す時間帯の頻度分布(本牧測定局)

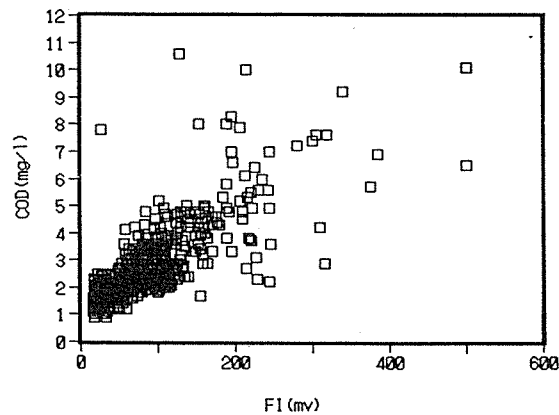


図3-1-11 FIとCODの関係(本牧測定局)

この式の傾きから FI の 1 mv は COD として 0.014~0.029 mg/l に相当すること、切片から FI=0 の時の COD 値は 0.74~1.61 mg/l となった。後者の場合の COD 値は植物プランクトンが存在しない時の海水の COD 値であり、本牧沖の海水中には植物プランクトンに由来しない COD 成分が上記の値程度含まれていると考えられた。

3-1-4 まとめ

光学的自動測定機を組み込んだブイを根岸湾に設置し、水質を梅雨期の約 1 カ月間連続観測した測定結果と同時期における本牧測定局の水質測定結果とから、以下のことが明らかとなった。

- 1) 水温が高い時に塩分は低くなる傾向が大きいことから、一般に言われているように、水温が高くなると成層構造が発達し、海域上層に栄養塩の豊富な河川水が保持されやすくなるといえる。
- 2) FI は水温変動とよく対応しており、特に降雨後の水温上昇時に FI は急激に増加していることから、植物プランクトンの増殖速度に対する水温の影響が大きいことがわかった。
- 3) 塩分については、FI とほぼ逆の変動パターンを示し、淡水化傾向の大きい時に植物プランクトン量は多かった。ただし、水温が低い場合は塩分が低くても植物プランクトンの増殖は抑えられた。
- 4) 濁度成分と COD の大部分は植物プランクトンに由来することがわかった。
- 5) 1 日間の光合成サイクルのなかでは、14~15 時頃に植物プランクトンの増殖速度は最大となり、その 1~2 時間後に COD 値は高くなる傾向を示した。
- 6) 根岸湾ブイと本牧測定局の平面空間距離 (4 km) のなかでは、植物プランクトンの変動はほぼ同じ傾向を示した。
- 7) 本牧沖の海水中には植物プランクトンに由来しない COD 成分が COD 値として 0.74~1.61 mg/l 程度含まれていると考えられた。

謝 辞

ブイの設置に関しご指導して頂きました、第三管区海上保安本部横浜海上保安航路標識事務所、横浜海上保安部航行安全課、東京湾水先区水先人会および横浜市港湾局港務部港営課、また、ブイ設置後の船舶の安全航行にご理解・ご協力して頂きました横浜市漁業協同組合および根岸湾沿岸の企業の関係各位に深謝いたします。調査時の船の使用に際しては、横浜市港湾局港務部海務課の協力を得ましたので、ここに深謝いたします。なお、この調査は芙蓉海洋開発 (株) に委託して行ったものである。

(なお、本論文は横浜市公害研究所報第 15 号 (1991) に掲載されたものを一部加筆修正したものである。)

文 献

- 1) 横浜市公害対策局：横浜市公共用水域水質測定結果報告書，昭和 63 年度。
- 2) 二宮勝幸：横浜市沿岸および沖合域の水質変動特性，横浜市公害研究所報，14，105-120 (1990)。
- 3) 黒木敏郎：海洋環境測定，新水産学全集 31，恒星社厚生閣 (昭和 57 年)。
- 4) 渡辺信，中村泰男：赤潮べん毛藻 *Heterosigma akashiwo* Hada の増殖特性 1. 増殖の及ぼす水温，塩分，照度，pH の影響，海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究，昭和 56 年度国立公害研究所特別報告。
- 5) 二宮勝幸，水尾寛己：横浜市沿岸における水質と気象の時系列，自然環境についての標本調査法の研究 II，統計数理研究所共同研究リポート 23，1-12 (1989)。

第3章第2節 強風下における水質変動の特徴

二宮勝幸*, 水尾寛己*, 畠中潤一郎**

3-2-1 はじめに

海域で赤潮が発生しやすい環境条件としては、水温や照度などが植物プランクトンの増殖に適した範囲にあることと、成層構造が安定化し栄養塩の豊富な河川水が上層に存在することなどである¹⁾²⁾。しかし、成層構造は強風が続くと壊されやすいことから、赤潮が発生している場合には風は赤潮を消滅させる一因になっており、また、赤潮を発生させにくい条件を作ってもいる³⁾。その一方で、風は海底泥から溶出したリン酸態リンを豊富に含む下層水を湧昇させ、上層へ栄養塩を供給する間接的な役割も果たしている⁴⁾。このように、風は赤潮の消長において大きな影響を及ぼしている。

そこで、光学的自動水質測定機と自動採水器を用いて夏季の10日間における根岸湾の上層水質を測定し、強風前後における水質変化、特に赤潮の消長について検討した。

3-2-2 方法

光学的自動測定機は前節と同様にブイに組み込んだものであり、自動採水器もブイに取り付け海面下1mで採水できるようにしたものである。

光学的自動水質測定機による自動測定は強風前後を通して行う予定であったが、実際には生物の付着等により正常なデータは限られた期間のものしか得られなかった。それは強風が吹く前から最大風速直後までの1週間であった。そして、それから3日間にわたって自動採水器による自動採水および試料回収を行い、試料中の栄養塩類等の手分析による測定を行った。したがって、測定データの検討は光学的自動測定機により得られた自動測定データの期間 (Run 1) と自動採水器による手分析データの期間 (Run 2) に分けて行うこととした。

3-2-2-1 光学的自動測定機による自動測定データ (Run 1)

測定期間は1989年7月31日から8月7日までの1週間で、測定時間間隔は1時間である。測定項目は水温、塩分、クロロフィル蛍光強度 (FI)、254 nm および 690 nm の体積消散係数 (C 254, C 690) である。

測定地点は前節と同じで、図3-2-1に示す根岸湾湾口部であり、測定位置は水深1mである。測定方法および測定データの回収方法も前節と同じ方法である。

3-2-2-2 自動採水器による手分析データ (Run 2)

光学的自動測定機を組み込んだブイの上部に内部を水冷した自動採水器を取り付け、採取した海水を1日毎に回収して当日分析を行った。

測定期間は8月8日から11日までの3日間で、採水間隔は2時間である。測定項目は水温、塩分、COD、溶存態COD (D-COD)、T-P、PO₄-P、T-N、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、クロロフィル-a (chl-a)、フ

Effect of wind factor on water quality in Negishi Bay

* Katsuyuki Ninomiya, Hiromi Mizuo 横浜市環境科学研究所

**Junichiro Hatakenaka 横浜市環境保全局

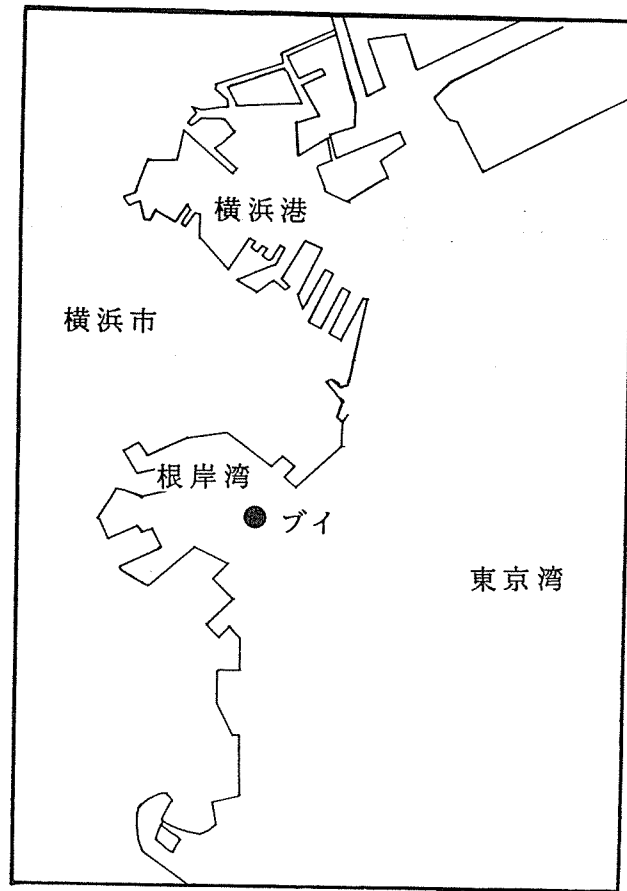


図3-2-1 測定地点

ェオ色素 (feo-a) である。分析方法は、 $\text{NO}_2\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ についてはテクニコン・オートアナライザーを用い、chl-a と feo-a については Lorenzen の方法で、その他の項目については JIS-K 0102 に準拠した。なお、次の項目については計算により求めた。

懸濁態 COD (P-COD) : COD から D-COD を差し引いた値。

有機態リン (Org-P) : T-P から $\text{PO}_4\text{-P}$ を差し引いた値。

無機態窒素 (TIN) : $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の和。

有機態窒素 (Org-N) : T-N から無機態窒素を差し引いた値。

3-2-3 結果と考察

ここでは、まず Run 1 について検討し、次に Run 1 の解析結果をもとに Run 2 について検討した。

3-2-3-1 Run 1

3-2-3-1-1 気象概況

前述したように、植物プランクトンの増殖は当日の気象はもちろん、それより以前の気象によっても大きく影響される²⁾ので、まず測定期間中の気象概況について述べる。図3-2-2に7月31日から8月7日までの気象概況を示す。

8月1日と同6日に降雨があり、同時に気温の低下と日照の減少がみられたが、2日から5日にかけては比較的晴天となった。風速は、8月3日頃から強くなり始め、6日に 10 m/s を超す北風となり、翌7日には南西風に変わったが、 7 m/s 以上の風速が続いた。

3-2-3-1-2 水質時系列

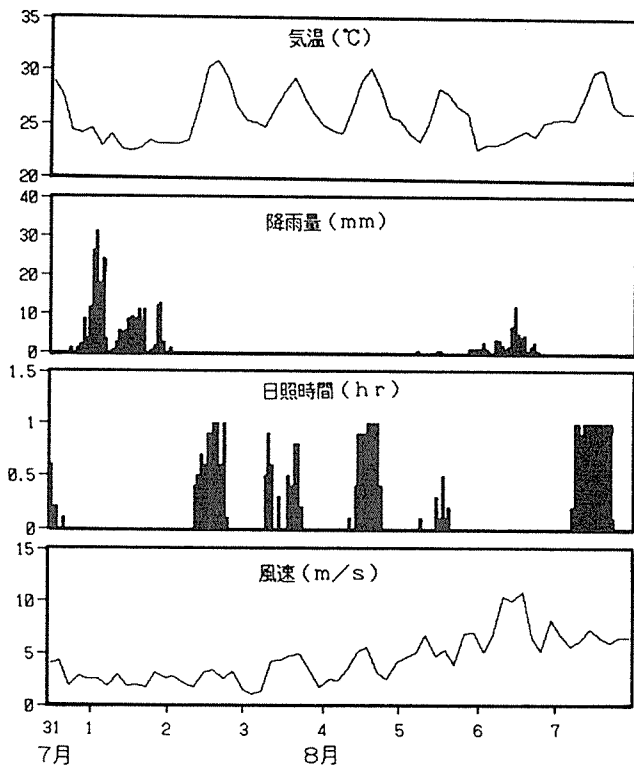


図3-2-2 Run 1の気象時系列

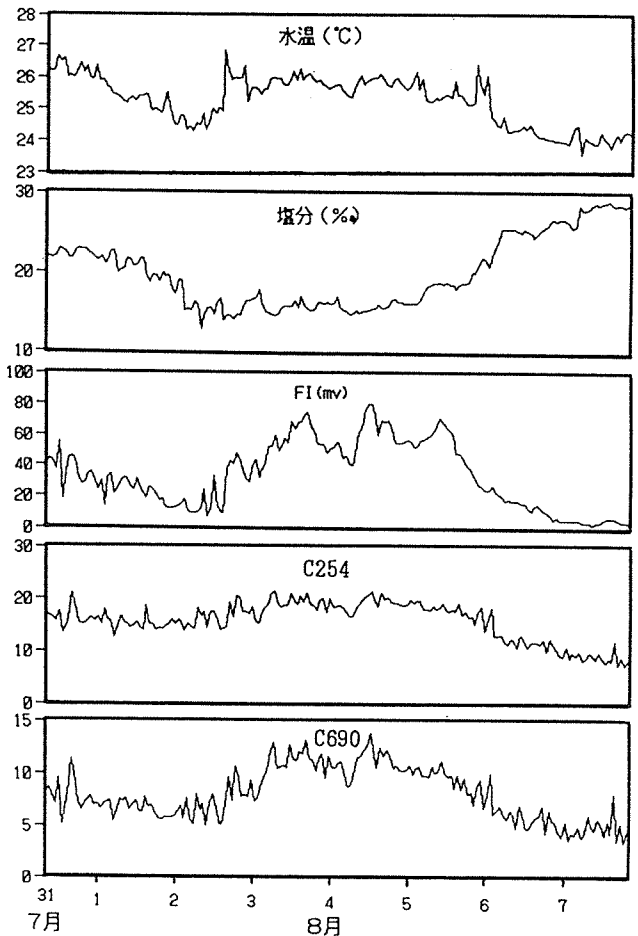


図3-2-3 Run 1の水質時系列

図3-2-3に7月31日から8月7日までの水質時系列を示す。

まず、水温についてみると、水温は1日と6日に低い値をとるなど気温とほぼ順に対応しているが、気温より少し時間遅れの形で変化している。次に、塩分は降雨の影響により8月1日から低下しはじめ2日には15%程度まで下がった。それから4日まで塩分はほぼ同じ濃度で推移し水温も比較的高いことから、水温躍層が発達していたものと考えられる。塩分は5日から上昇して7日には30%近くに達した。このように6日に降雨があったにもかかわらず塩分は低下せず逆に高まった理由として、3日頃から風速が強まり6日には10 m/sを超したので、沿岸の表層水が沖合いに流され、低水温で高塩分の底層水が湧昇したことが考えられる。

FIは水温の変化と順に対応し、水温の低い1日から2日にかけてと6日前後にFIも低く値を示した。しかし、前者と後者とではFIの変化の特徴はやや異なっていた。それは、前者に比べ後者では、FIはほとんどゼロに近い値となり、しかも小さな変動成分が無いという特徴的なパターンを示した。この6日前後の特徴的なパターンは、単に水温が低いため植物プランクトンの増殖が抑えられただけではなく、底層水の湧昇が影響したためと考えられる。C254やC690もFIとほぼ同じ変化を示した。

したがって、7月31日から8月7日までの水質変化は次のように推察することができる。1日の降雨と水温の低下にともない植物プランクトン量は減少したが、2日から天気は回復したため水温が高まると同時に栄養塩の豊富な低塩分の河川水の供給を受け植物プランクトンは増殖した。しかし、3日から風速は徐々に強まり、その影響による底層水の湧昇が5日から生じた。そして、6日には風速は10 m/sを超したため海水の鉛直混合が盛んになり、植物プランクトンは急激に減少した。

3-2-3-2 Run2

3-2-3-2-1 気象概況

図3-2-4に8月8日から11日までの期間の気象時系列を示す。この期間中は、10日の午後に一時的に降雨があったが、ほぼ晴天の日が続いた。風については、6日から7日にかけての強風(図3-2-2)がおさまり、8日に風速は5 m/s程度あったものの、それ以降は徐々に風速は弱まっていった。

3-2-3-2-2 水質時系列

図3-2-5(1)~(3)に8月8日から11日までの水質時系列を示す。また、この期間の毎日午前10時頃に塩分の鉛直濃度分布を調べたので、その結果を図3-2-6に示す。

水温は8日から9日にかけて24~25°Cの範囲で大きな変動もなく推移していたが、10日になると急に水温は上昇し、風も弱いため日中には27°Cまでなった。水温の変化とは逆に塩分は徐々に低下していることから、Run 1で述べた6日~7日の海水の鉛直混合が解消し水温躍層が徐々に発達してきたと推察された。このことは、塩分の鉛直濃度分布からも認められる。なお、11日の早朝に塩分が大きく低下し20‰を下回ったのは、10日の降雨の影響が時間遅れであられたためと考えられる。水温躍層が形成されるにつれて、とくに日中のPHやCODなどが高まってきており、植物プランクトンの増殖が盛んになっているようである。このことを裏付けるように、chl-aやfeo-aも高まっている。

一方、栄養塩類についてみると、PとNとでは異なる挙動を示した。NO₃-N・NH₄-N・NO₂-Nは植物プランクトンの増殖の盛んな日中にやや濃度が低下しているが、この期間中はほぼ同じような濃度で推移しており、むしろ11日の早朝には河川水の影響と推察される濃度の上昇がみられた。PO₄-PはNO₃-Nなどと同様に日中に濃度が低下したものの、この期間を通してみると濃度は減少する傾向が明確に認められた。8日から9日にかけてPO₄-Pが高かった理由として、PO₄-Pの豊富な底層水が湧昇したことが考えられる。そして、10日になるとPO₄-Pはかなり低いレベルまで下がっており、水温躍層が安定し植物プランクトンによるPO₄-Pの消費が大きく増加したと推察される。このように、植物プランクトンによるTIN(NO₃-NとNH₄-NとNO₂-Nの濃度和)とPO₄-Pの消費の仕方に違いがみられた。

この期間におけるNとPの変化を調べるため、図3-2-7にTIN/PO₄-Pの比の時系列を示す。8日から9日の前半にかけてTIN/PO₄-Pの比は10を超えることはなかったが、9日の後半から徐々に高まっていき10日の後半を過ぎると50を超えた。TIN/PO₄-Pの比が10以上であるとPが制限因子となることから、9日の後半以降はPが制限因子になったといえる。しかも、10日にはPO₄-Pはゼロに近い濃度レベルまで低下していることから、もし新たにPが加わる要因が存在すれば、さらに植物プランクトンは増殖することが考えられる。

3-2-4 まとめ

強風が吹く前後における水質変化を調べるため、光学的自動測定機と手分析による水質測定を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 強風は水温躍層を破壊し低水温・高塩分の底層水を湧昇させると同時に、海水の鉛直混合が盛んになり植物プランクトンはほとんどみられなくなるが、PO₄-Pの豊富な底層水の影響により上層のPO₄-P濃度は高まった。
- 2) 強風のあと風速が弱まり天気も回復すると、水温躍層が徐々に形成される。水温躍層が安定するにしたがい、とくに日中の植物プランクトン量は増加し、逆に栄養塩類は減少した。
- 3) 栄養塩類のなかでも、NO₃-NやNH₄-Nなどと比較してPO₄-Pの濃度減少の割合は大きく、PO₄-Pが制限因子となっていることがわかった。

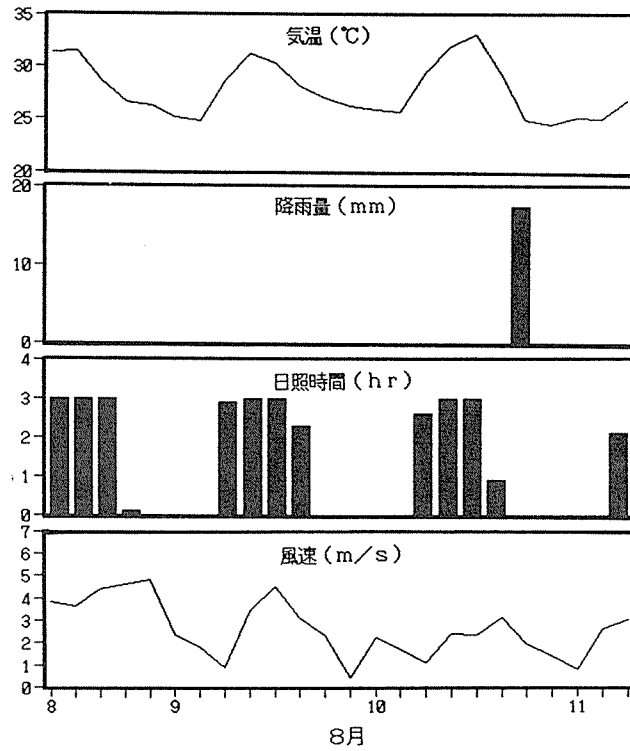


図3-2-4 Run 2の気象時系列

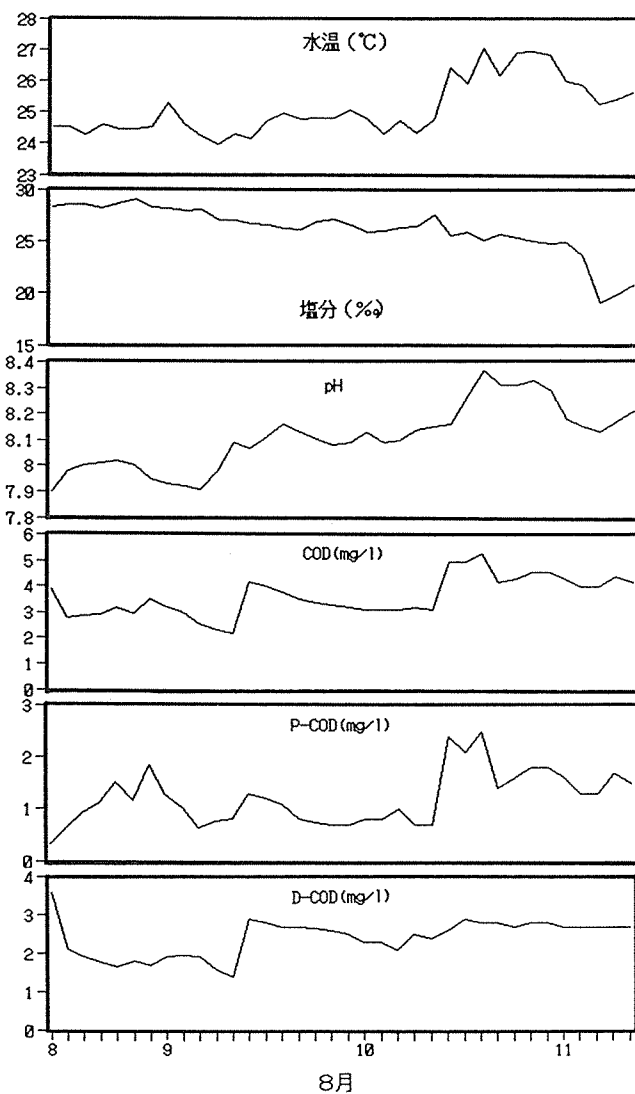


図3-2-5(1) Run 2の水質時系列

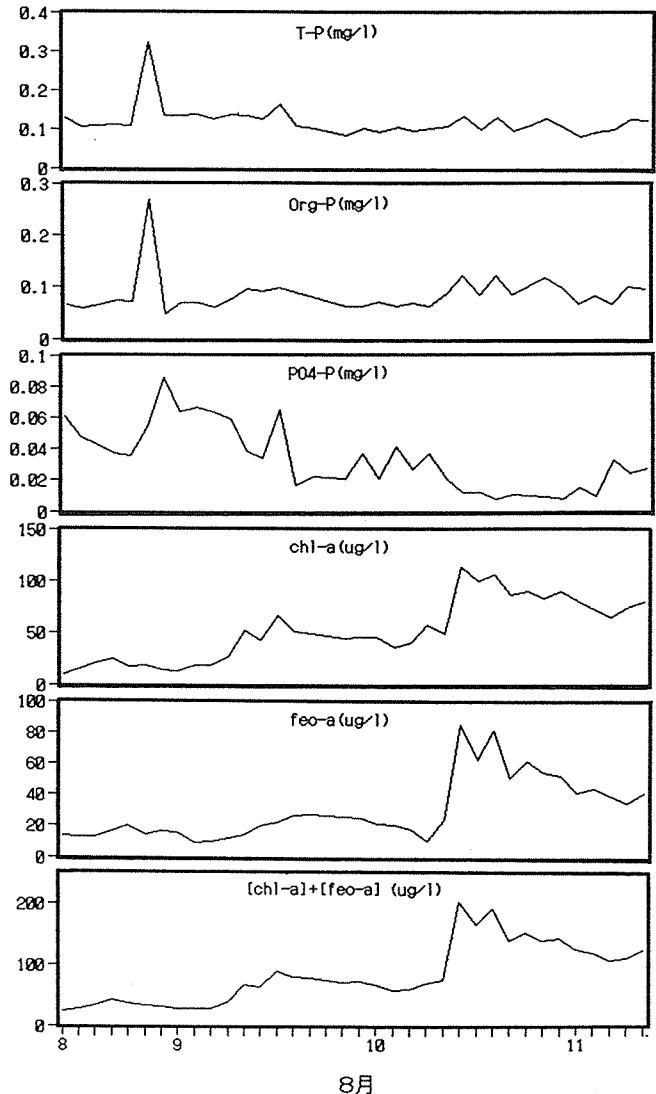


図3-2-5(2) Run 2の水質時系列

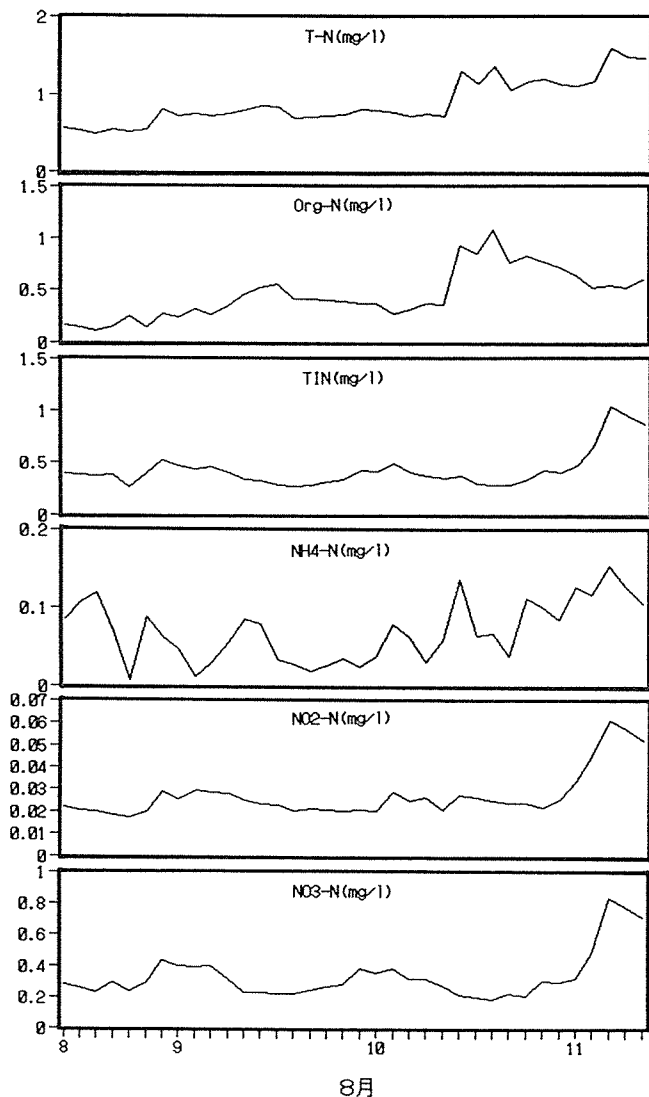


図3-2-5(3) Run2の水質時系列

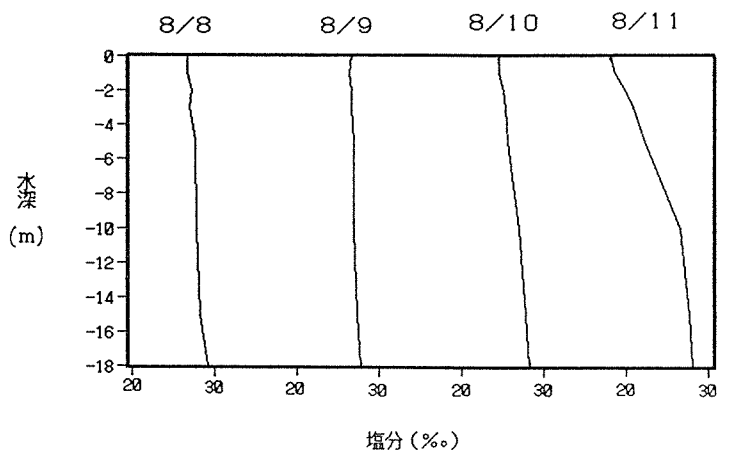


図3-2-6 Run2の塩分鉛直分布

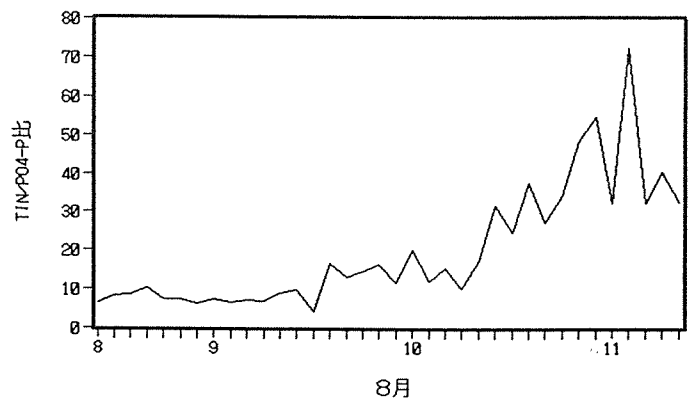


図3-2-7 Run2のTIN/PO₄-P時系列

謝 辞

ブイの設置に関しご指導して頂きました、第三管区海上保安本部横浜海上保安航路標識事務所、横浜海上保安部航行安全課、東京湾水先区水先人会および横浜市港湾局港務部港営課、また、ブイ設置後の船舶の安全航行にご理解・ご協力して頂きました横浜市漁業協同組合および根岸湾沿岸の企業の関係各位に深謝いたします。調査時の船の使用に際しては、横浜市港湾局港務部海務課の協力を得ましたので、ここに深謝いたします。なお、この調査のうち光学的自動測定については、芙蓉海洋開発(株)に委託して行ったものである。

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) 二宮勝幸，水尾寛己，畠中潤一郎，小野寺典好，若林信夫：赤潮の消長における気象因子の影響，横浜市公害研究所報，15，67-73(1991)。
- 4) 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)。

第3章第3節 堀割川河口の水質におよぼす潮位振動の影響

二宮勝幸*, 水尾寛己*, 畠中潤一郎**

3-3-1 はじめに

河川感潮域は河川水と海水とが混ざり合うため、水質が複雑に変化する水域である^{1,2,3)}。なかでも、都市河川の感潮域は、河川からの汚濁負荷が流れの停滞や海水との混合のため、汚濁物質が沈降しやすい場所となっている。実際、感潮域の底質はかなり汚染されており^{4,5)}、その汚染底質がまた水質に悪影響を及ぼしている^{6,7)}。このような感潮域における水質は、河川からの汚濁負荷だけでなく、富栄養化し恒常的に赤潮が発生している海域からの二次汚濁負荷によっても影響を受けていると考えられる^{8,9)}。海域からの汚濁負荷は潮汐作用に伴う海水の往復運動に左右される¹⁰⁾。従って、潮位振動が河川感潮域水質にどのように影響しているのかを調べることによって、感潮域の水質変動をより正確に把握することができる。

感潮域における水質変動は、主としてその水域で生じる変動成分と、河川水および海水がもっている変動成分とが組合わさったものと考えられる。1ヶ月程度の期間における感潮域水質の基本的周期変動成分としては、河川水と海水に含まれる日周変動成分および降雨影響の変動成分と、潮汐に伴う12時間25分の周期変動成分などがある¹⁰⁾。これらの周期変動に、さらに風や気温の変化などの作用が加わり⁷⁾、感潮域の水質変動が形成されているわけである。

この章では、感潮域の水質変動が潮位振動によってどのように影響しているのかを統計的に検討するとともに、あわせて海域における水質変動特性との比較を行った。

3-3-2 方 法

3-3-2-1 測定期間および地点

測定期間：1990年7月10日から25日までの約2週間。

測定地点：下水道普及率が95%を越える大岡川派川である堀割川河口(図3-3-1のA地点)。海水は観音橋付近まで遡上していることから、A地点は比較的海水の影響の大きい地点と推察される。また、比較のために用いた海域の測定地点は根岸湾(B地点)で、潮位観測地点は横浜港高島(C地点)である。

3-3-2-2 測定方法

光学的自動測定機(芙蓉海洋開発社製：クロロUV計)を係留栈橋に取り付け、測定部の水深が海面下0.5mの位置になるように調整した。1時間間隔で水温、塩分、クロロフィル蛍光強度(FI)、254nmおよび690nmの体積消散係数(C254、C690)の5項目を連続測定した。

測定項目の中で、FIは植物プランクトンの生体に含まれるクロロフィルが蛍光を発する性質を利用して436nmの励起光で685nmの蛍光を測定したもの(単位：mV)であり、植物プランクトンの活性クロロフィル量と対応している。また、体積消散係数については、海水中に存在する懸濁物や溶存態有機物が光の吸収や散乱を行うが、その仕方が波長によって異なる性質を利用したもので、C254は懸濁物と溶存態有機物両者に

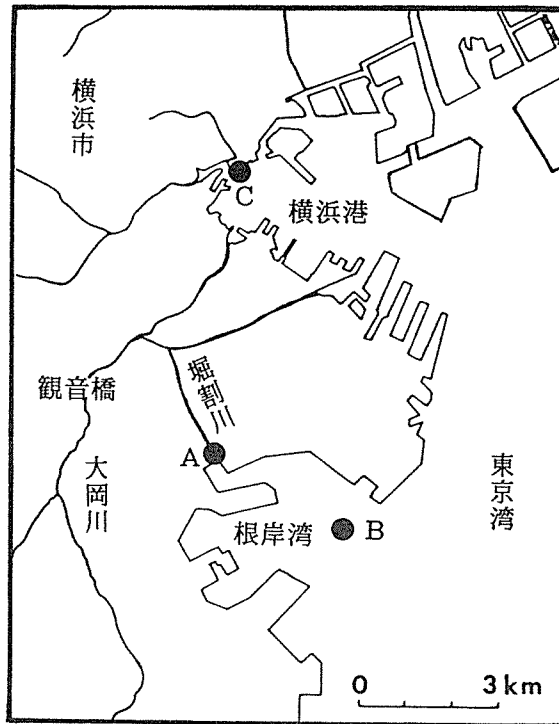


図3-3-1 測定地点

よる濁りの濃度，C 690 は懸濁物による濁りの濃度に対応する。ただし，C 254 は海水については有機態溶存成分を正確に表しているとは限らないので¹¹⁾，参考程度に用いた。

3-3-3 結果と考察

3-3-3-1 気象概況

河川水や海水の水質変動は日周や降雨など気象変化により大きく影響される。気象概況についてみるため、測定期間中の気象時系列を図3-3-2に示す。

10日は曇りで、11日には晴れたものの12~13日にかけて北風を伴う降雨があった。そのため、気温は一時的に低下し20℃を下回った。その後天気は回復し、日照時間も増え、気温は上昇していった。しかし、20日には日照時間が一時的に減少するとともに風向きは東になり、気温も低下した。それから天気は回復し、晴れまたは曇りとなった。

平均風速が5 m/sを超えたのは15日から17日にかけてであり、15日が5.9 m/sで最も高かった。いずれの日も南西風であった。

3-3-3-2 水質測定結果

図3-3-3に、水質時系列を示す。

水温は日周変動のほか約半日周期の変動もあり、潮汐による影響が認められた。その変動幅は10~16日までは小さいが、17日から大きくなりしかもトレンドとして上昇して行く傾向がみられた。塩分については、10~14日までほぼ規則的な約半日周期の変動が続いた。13日1時には降雨に伴う一時的な塩分の低下があった。その後、15日から塩分の変動幅は小さく乱れた形となり、20日から再び半日周期の変動が現れ、徐々に上昇していく傾向がみられた。FIについては、日周変動成分が大きく現れているほか、夜間にも小さなピークも認められた。10日から高い値でかつ大きい変動幅で推移したが、13日以降は減少し、16日には最低値をとり日周変動幅も小さくなった。その後は上昇に転じ、18日から再び日周変動幅が大きくなり23日まで続き、24日以降は低下した。C 254 と C 690 については、FI とほぼ同じトレンドを示したほか、13日の降雨影響の

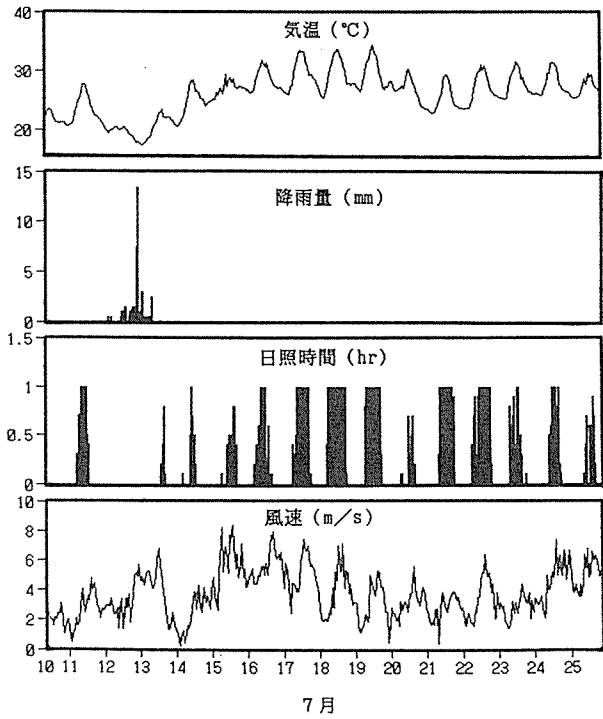


図3-3-2 7月10日~25日の気象時系列

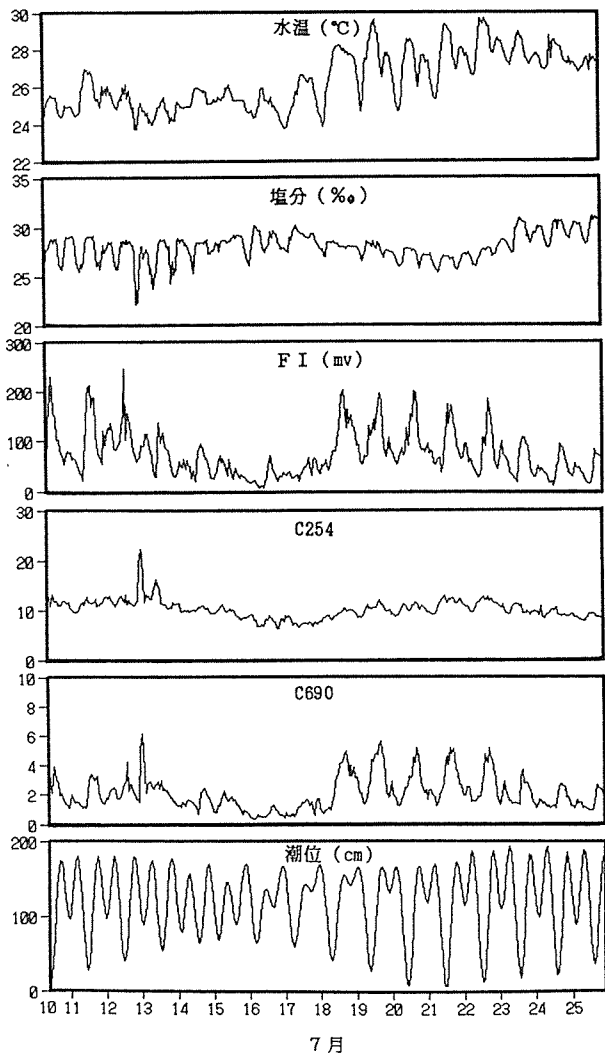


図3-3-3 7月10日~25日の水質・潮位時系列 (堀割川河口)

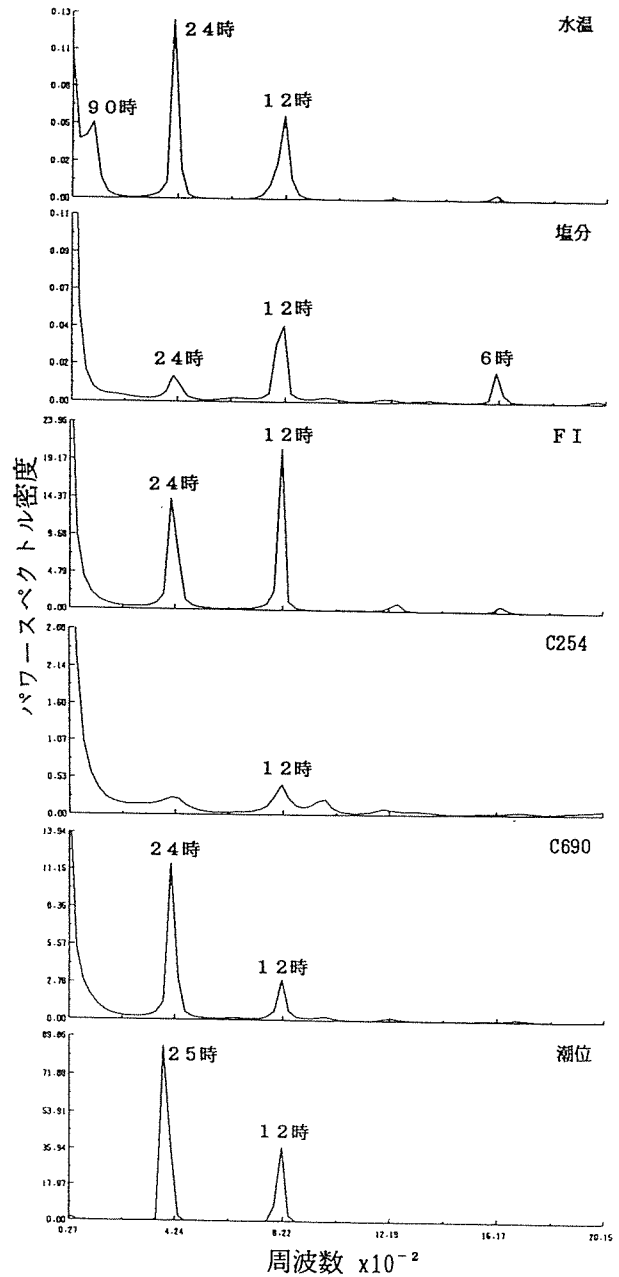


図3-3-4 7月10日~25日の水質・潮位時系列のパワースペクトル(堀割川河口)

鋭いピークも認められた。潮位は、約半日および一日周期の変動で推移し、17日頃の大潮を境にして前後で変動幅が大きくなった。

3-3-3-3 感潮部水質の周期変動特性

感潮域水質は日周および降雨影響の変動成分をもつ河川水と海水の作用を受けるが、潮汐作用による海水の移流時に海水の影響を大きく受けると考えられる。潮汐は潮位振動によって引き起こされ、その潮位振動は主として12時間25分(M_2 分潮)の周期で変動する。従って、水質時系列の周期成分を調べれば、河川水や海水そして潮汐作用の影響の度合がわかる。周期成分を調べる方法としては、周波数領域によるものと時間領域によるものがあるが、ここでは前者の方法を用いて検討した。

図3-3-4に、水質および潮位時系列のパワースペクトルを示す。いずれの水質項目も12時間と24時間の周期成分があるほか、水温では90時間、塩分では6時間の周期変動もみられた。潮位については12時間と25時間の周期変動が存在し、それぞれ M_2 分潮と O_1 分潮に対応した。このことから、水質項目の12時間周期成分は潮位振動に基づくものと考えられるが、水質項目が25時間ではなく24時間の周期成分をもつ理由としては、潮位振動より日周変動による影響の方が大きいと推察した。水温の90時間は気象変化によるものと考えられる。なお、塩分の6時間周期の原因については後述する。

3-3-3-4 水質変動におよぼす気象の影響

水質時系列のパワースペクトルの結果で、いずれの項目も12時間と24時間の周期成分を含むことから、その2つの周期成分を除去してトレンドを求めめるため、24時間移動平均を行った。気象時系列についても同様に24時間移動平均を行い、水質変動におよぼす気象の影響を検討した。ただし、潮位については25時間移動平均を行った。図3-3-5および図3-3-6に、水質および気象の24時間移動平均時系列を示す。水温の変動パターンはほぼ気温と対応しているが、気温と対応していない16日前後の水温低下の原因は、15日から風速が大きくなり塩分も高くなったことから、強い南西風が低水温高塩分の底層水を湧昇させた結果と推察される。13日と20日の水温低下原因として、前者は降雨と北風、後者は日照低下と東風の影響が考えられる。塩分については、大きな傾向として水温とほぼ逆の変動パターン、すなわち水温が高いと塩分は低くなるパターンを示した。これは、水温が高くなると成層が形成され上層が淡水化傾向を示したためであり、17日前後と23日以降の高濃度はいずれも強い南西風による底層水の湧昇のためと推察される。このパターンと対応しない13日の低塩分は降雨によるためと考えられる。また、塩分の変動パターンは潮位のそれと類似していたが、その原因についてはわからなかった。このように、水温と塩分の変動は日照とそれに伴う気温変動のほか、降雨や風向および風速によって説明できた。

以上の検討結果を考慮すると、FIの変動要因については次のように説明できる。12日頃までFIは高い値で推移していたが、13日の降雨を伴う北風により水温が低下したためFIは急激に減少した。14日には天気回復し水温も上昇したためFIの減少は止まった。しかし、15日には強風により底層水の湧昇が起こりFIは再び減少に転じ、16日に最低値を示した。その後、天気が回復し水温も上昇してきたので成層構造が発達して植物プランクトンの増殖に適した条件となり、FIは急上昇した。20日に一時的な日照と水温の低下の影響を受けたものの、19日から23日にかけては、FIは比較的安定した状態で推移した。24日からは強い南西風が吹き始めたため、再び低下した。

このように、FI変動のトレンドは気象によって大きく影響される。これらの結果は根岸湾口の海域で行った赤潮調査結果と同じ傾向を示していることから、堀割川河口は海水の影響が大きい水域と推察される。

3-3-3-5 水質変動におよぼす潮位振動の影響

堀割川河口の水質変動特性として、潮位振動による影響が大きいことがわかった。ここでは、そのことについて詳細に検討する。

検討対象期間は、水温、塩分、FIが比較的安定して推移し、風による影響などがみられない20日12時か

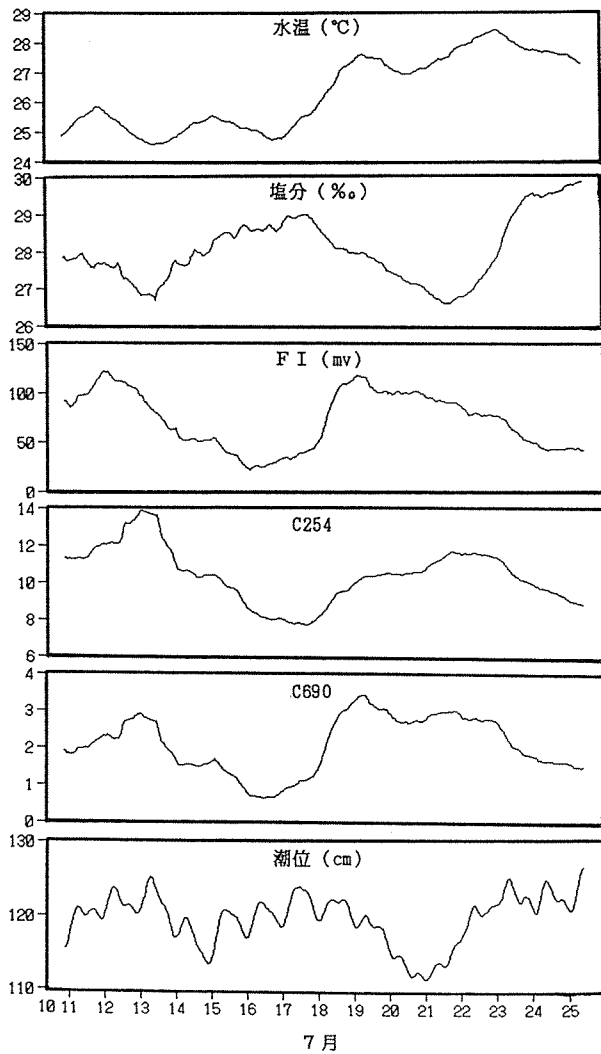


図3-3-5 7月10日~25日の水質の24時間・潮位の25時間移動平均時系列(堀割川河口)

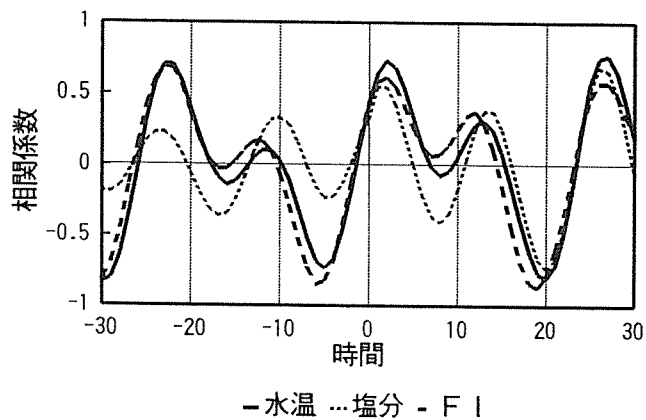


図3-3-8 7月20日12時~23日12時における潮位に対する水質の相互相関係数(堀割川河口)

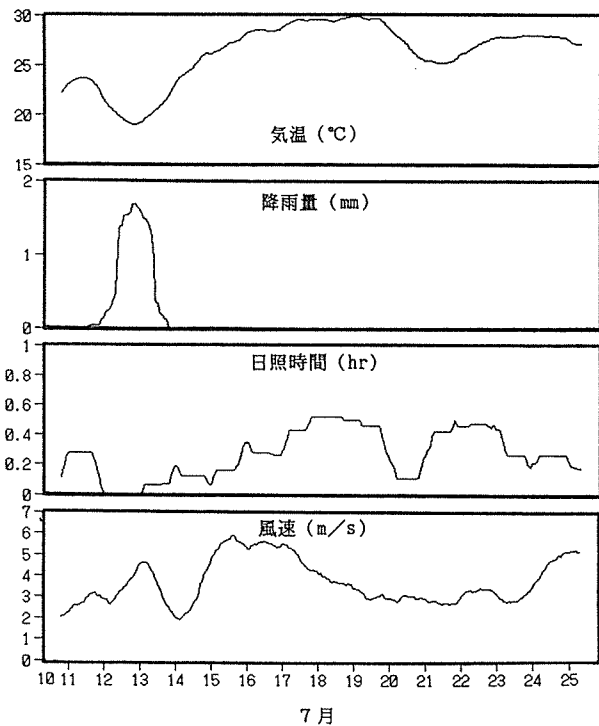


図3-3-6 7月10日~25日の気象の24時間移動平均時系列

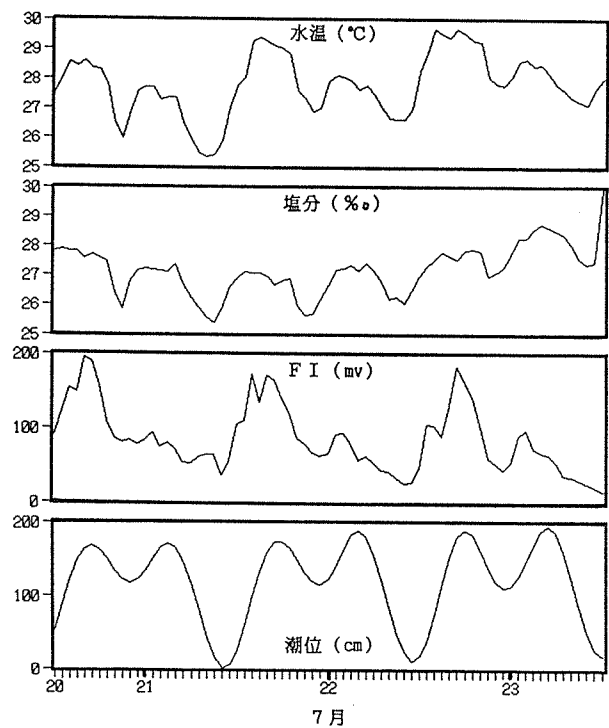


図3-3-7 7月20日12時~23日12時の水質・潮位時系列(堀割川河口)

ら 23 日 12 時までの 3 日間とした。図 3-3-7 にその 3 日間の水質時系列を示す。また、各水質時系列間の位相を調べるため、潮位に対する各水質項目の相互相関係数を図 3-3-8 に示す。

図 3-3-8 において、各水質項目は 12 時間と 24~25 時間の周期で変動しており、潮位振動とよく対応していた。水質項目の相互相関係数は潮位に対して 0~2 時間先行して現れていた。潮位振動は 12 時間 25 分と 24 時間 50 分の周期をもつことを考慮すると、先行時間は、塩分については 1 時間、水温と FI については相互相関係数の大きい昼間は 2 時間、相互相関係数の小さい夜間は 0~1 時間であった。水質測定点 (A 地点) は潮位測定点 (B 地点) より約 10 km 南に位置するので、A 地点の潮位振動の方が B 地点より早く現れるため、このような結果に至ったと推察される。しかし、水温や FI の昼間のように、潮位との差が 2 時間にもなることは考えられない。図 3-3-7 をみると、水温の昼間のピークには、2 つの山があるか、またはピークの早い時期にショルダーがあるのが認められた。FI も水温と同じ傾向を示し、その早い時期の山あるいはショルダーが現れる時間は 13~14 時であった。横浜市本牧沖での調査結果¹²⁾では、FI が日最大値を示す時間は 14 時前後であることを考慮すると、水温や FI の早い時期の山あるいはショルダーは A 地点周辺水域での一日間の日照変化に伴う水温や FI のピークと推察される。その後の山は、沖合海水の日周変動成分が潮汐によって時間遅れで現れたものと推察される。従って、河口周辺水域で日照変化に伴い水温や FI が高まり 14 時前後にピークに達した後、それと同様なピーク特性をもつ沖合域の海水が潮汐作用により移動して来て時間遅れで河口域に影響をおよぼしたと考えられる。

また、夜間に現れた FI の小さいピークも潮位振動に伴う沖合海水の移動の影響と考えられるが、ある種の植物プランクトンは夜間には鉛直降下により水温躍層付近に集積することから、FI の夜間のピークはその影響を受けているためと推察される。

なお、図 3-3-7 の塩分時系列において、全てのピークに一時的かつわずかな塩分濃度の低下が認められた。これは、3-3-3-3 の項で述べたように、塩分に 6 時間周期が現れた原因と考えられるが、その低塩分をもたらした水塊が河川由来あるいは沿岸海域由来によるものかについてはわからなかった。

3-3-3-6 海域の水質変動特性との比較

3-3-3-6-1 水質項目間の関係

図 3-3-9 に B 地点の水質時系列を、表 3-3-1 に A 地点と B 地点の水質統計値を示す。平均値で見ると、水温は A 地点より B 地点の方が低い。これは、B 地点における調査期間が 6 月上旬から 7 月上旬までの梅雨の時期であったのに対して、A 地点では梅雨明け前後の期間であったためである。塩分についても、海域である B 地点の方が A 地点より少し低い値を示した。このような傾向は FI や C254 にも表れているが、わずかなものであった。しかし、C690 については、B 地点の方が A 地点より平均値で約 3 倍、最大値で約 2 倍大きかった。図 3-3-3 および図 3-3-9 の C690 の時系列を比較すると、日周変動などに伴う変動パターンはほぼ同じであったが、B 地点の方が全体的に高かった。従って、B 地点では懸濁態物質が恒常的に多く存在していることを示している。また、A 地点で C690 が低い理由は、その地点は下水道普及率の高い大岡川の派川にあり、かつ海水遡上地点から 7 km 下流であることから、河川由来の懸濁物質の影響が少な

表 3-3-1 堀割川河口と根岸湾の水質統計値

		水温 (°C)	塩分 (‰)	FI (mv)	C254	C690
堀割川	平均値	26.4	28.1	73.7	10.4	2.1
	最大値	29.7	31.2	246.1	22.5	6.2
	最小値	23.7	22.1	5.1	6.6	0.3
	標準偏差	1.5	1.4	46.3	1.9	1.2
根岸湾	平均値	20.3	26.9	69.6	10.2	5.9
	最大値	23.2	29.7	201.0	21.9	14.4
	最小値	18.1	20.0	5.0	5.1	2.2
	標準偏差	0.8	1.7	39.4	3.4	2.6

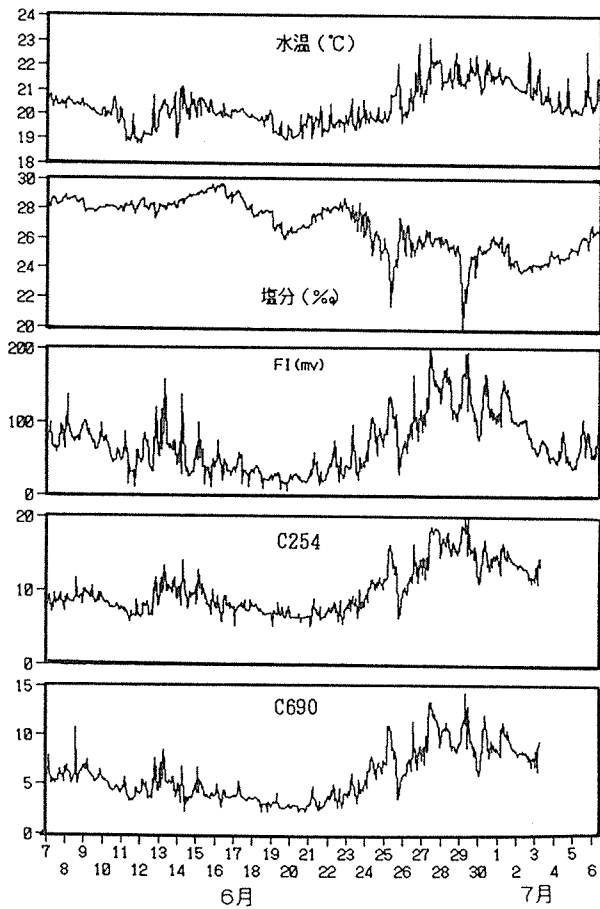


図3-3-9 6月7日~7月6日の水質時系列(根岸湾ブイ)

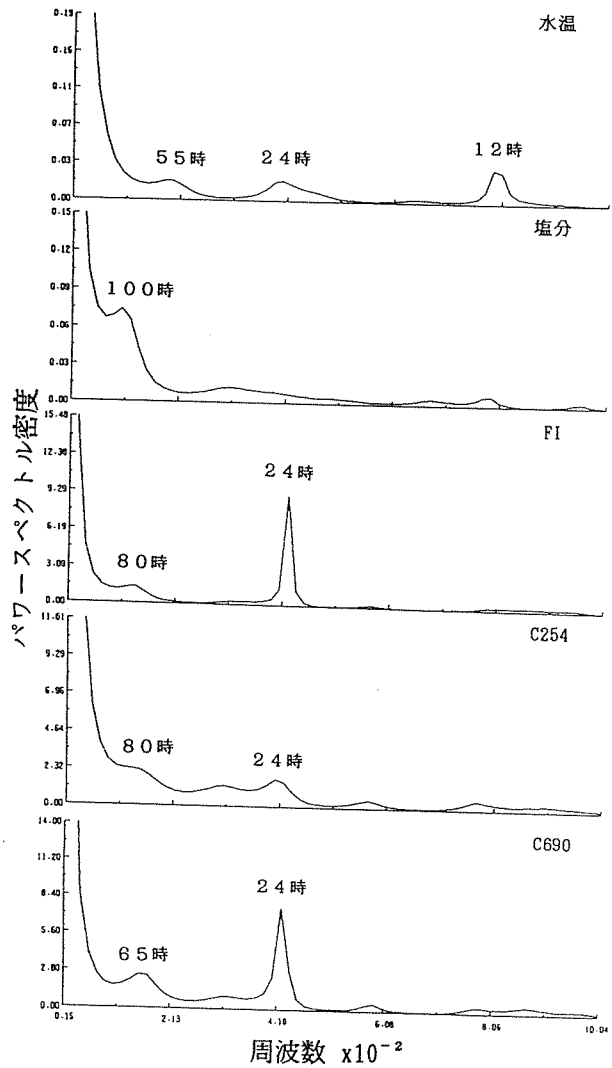


図3-3-11 6月7日~7月6日の水質時系列のパワースペクトル(根岸湾ブイ)

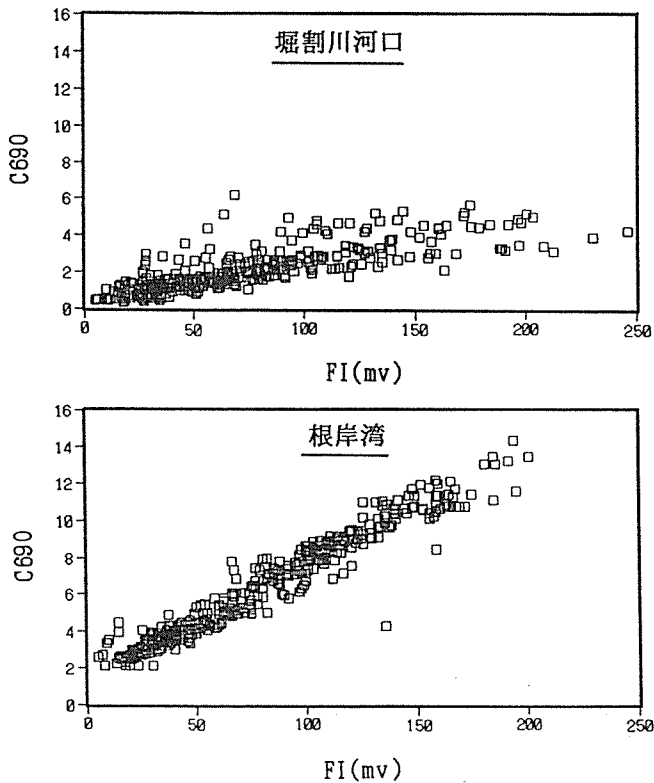


図3-3-10 FIのC690の関係

いことも関係していると思われる。

一方、植物プランクトンは水中から栄養塩などを取り込み増殖するので、FI と C 690 を調べることによって、全体の懸濁物質のうち植物プランクトンに由来する割合を推定することができる。図 3-3-10 に A 地点と B 地点における FI と C 690 の関係を示す。回帰式は次のようになった。

$$\text{A 地点: } [C 690] = 0.06 [FI] + 1.5 \quad (r = 0.803)$$

$$\text{B 地点: } [C 690] = 0.02 [FI] + 0.6 \quad (r = 0.975)$$

B 地点の相関係数は A 地点の相関係数より大きく、植物プランクトンと懸濁物とが良く対応していた。また回帰直線から、B 地点の方が A 地点より傾きは 3 倍、切片は約 2.5 倍大きかった。A 地点の相関係数が小さい理由として、河口域では懸濁物質の少ない河川水と多い海水とが混合するため、バラツキが大きくなったことが原因していると考えられる。傾きは単位 FI 量当りの懸濁物量を表しているから、A 地点では植物プランクトン由来の懸濁物質が河川水と海水の混合作用によって希釈されるほか、沈降し易くなるなどして比較的速く水中から除かれると推察される。そして、B 地点ではその周辺海域からも植物プランクトンに由来する懸濁物質が供給されるため、切片は A 地点より B 地点の方が約 2.5 倍多くなったと考えられる。

3-3-3-6-2 周期変動特性

A 地点の水質変動成分には、潮汐と日照による 12 時間と 24 時間の周期が明確に認められたので、海域の B 地点の水質についても周期特性を調べた。図 3-3-11 に、B 地点の水質のパワースペクトルを示す。

B 地点では、水温に 12 時間および 24 時間周期の小さなピークがあり、FI と C 690 に日照変化による 24 時間周期が認められるほかは、気象影響による 1 日より長い周期成分しかみられなかった。なかでも、塩分については降雨などの気象変化による 100 時間の周期成分だけしかなかった。このように、潮位振動に伴う河川水の影響は A 地点から約 5 km 沖合いに離れた B 地点までは及ばなかった。

3-3-4 まとめ

光学的自動測定機を用いた堀割川河口の表層水質の連続測定結果から、以下のことが明らかとなった。

- 1) 水温や FI などには、日周変動に基づく 24 時間周期成分および潮位振動に伴う M_2 分潮の 12 時間周期成分が認められた。ただし、塩分は 24 時間周期成分はなく、潮位振動に伴う O_1 分潮の 25 時間周期成分が含まれていた。
- 2) 感潮域における植物プランクトンの変動は、その周辺水域で起こっている日周変動成分と、二次汚濁した海域からの影響成分とから成っていた。後者は潮汐作用による海水移流の影響であり、昼間では前者より数時間遅れて現れた。また、後者の影響は昼間だけではなく夜間においても認められたが、夜間は小さかった。
- 3) これらの周期成分を除いた水質の変動傾向は、堀割川沖合の根岸湾における変動特性と同じであった。
- 4) 水温は気温変動とほぼ対応していたが、風向・風速や降雨そして日照変化による影響も認められた。
- 5) 塩分は水温とは逆の変動パターンを示すが、降雨を伴う北風が吹いた時には、塩分と水温はともに低下した。
- 6) FI の増減は気象によって影響され、主として水温と塩分によって説明できた。

謝 辞

潮位データを提供して頂きました横浜市港湾局港湾工事事務所、測定機の設置に協力して頂きました根岸丸釣船店に深謝いたします。なお、この調査は芙蓉海洋開発（株）に委託して行った。

（なお、本稿は、横浜市環境科学研究所報第 16 号（1992）にすでに掲載したもの（一部加筆編集）である。）

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) 古田正次, 岩瀬敏夫: 環境水質モニターデータによる河川水質変動の評価(3), -感潮河川新川の水質変動特性, 愛知県公害調査センター報告, 15, 27-35(1987).
- 4) 二宮勝幸, 白柳康夫, 小市佳延: 底質汚染指標, 横浜市公害研究所報, 11, 83-109(1986).
- 5) 二宮勝幸: 油分による鶴見川の底質汚染, 横浜市公害研究所報, 8, 119-126(1983).
- 6) 二宮勝幸: 魚の死亡事故の原因究明に関する研究報告書, 魚の死亡事故と水質変動特性との関連, 横浜市公害研究所 公害研資料 No.91, 13-32(1991).
- 7) 白柳康夫, 大矢正代: 横浜港底質からのリン, 窒素の溶出-溶存酸素濃度と温度の影響-, 横浜市公害研究所報, 15, 57-66(1991).
- 8) 二宮勝幸: 横浜市沿岸および沖合域の水質変動特性, 横浜市公害研究所報, 14, 105-120(1990).
- 9) 二宮勝幸, 水尾寛己, 畠中潤一郎, 小野寺典好, 若林信夫: 赤潮の消長における気象因子の影響, 横浜市公害研究所報, 15, 67-73(1991).
- 10) 星野通平: 新地学教育講座10-海洋と陸水, 東海大学出版会, 40-43(1976).
- 11) 安藤晴夫, 曾田京三: 東京湾の富栄養化機構の研究(その10)-水質変動要因に関する解析-, 東京都環境科学研究所報, 111-118(1991).
- 12) 二宮勝幸, 水尾寛己: 横浜市沿岸における水質と気象の時系列, 自然環境についての標本調査法の研究II, 統計数理研究所共同研究リポート23, 1-12(1989).