

論文

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 —

安藤 晴夫 曾田 京三

要 旨

水質予測計算結果の検証方法を検討するために、臨海部周辺海域で、光学的方法で水質の連続観測を行い、有機性汚濁の時間的空間的な変動特性について解析を行った。また、光学的方法の精度や有効性についても検討した。その結果、化学分析結果との対比から、クロロフィル、SSは、光学的に測定できることが確かめられた。水質の時系列変動をトレンド成分と周期成分に分離解析した結果、蛍光強度、水温、塩分に24時間周期の変動が認められた。また蛍光強度の変動は日射量の変動に2～3時間遅れて良く対応していること、水温の変動は3～4時間遅れて日射量と対応していることが分かった。クロロフィル濃度の1時間当りの変化速度は、藻類の増殖速度で説明できる値よりはるかに大きかった。海水の流動は、クロロフィル濃度の時間的変化の要因の一つと考えられた。

1 はじめに

東京都内湾部の赤潮発生回数(年間)は、昭和59年度以後の5年間に12, 18, 23, 18, 16回と、依然として高い頻度で推移している。こうした植物性プランクトンによる二次汚濁では、短時間の指数関数的な増殖や集積によるパッチの形成などにより、水質が時間的にも空間的にも非常に大きく変動する点の特徴である。このような有機性汚濁の現状を解析したり、それを水質予測計算結果と対比する場合には、個々の測定精度は多少悪くても、時間空間的な変動傾向が把握でき、平均値として精度の良いデータが必要となる。これまで、海域での水質測定は、主に定点での採水分析により行われてきた。この方法では、採水試料について多くの項目を精度良く分析できるが、手間や費用的な制約から、連続測定は困難で、水質の時間空間的な平均値を得ることは難しい。

こうした観点から、海域での有機性汚濁の主因となっている植物性プランクトン(クロロフィル)濃度を連続測定できる光学的方法について、その精度を検討するとともに、その測定結果から、主に内湾部の水質の時間的変動特性や変動要因について解析を行った。

2 測定及び調査方法

(1) 光学的方法の原理

本調査で使用した2波長透過率・蛍光光度計の測定原理を図1に示す。

① 海水中の植物性プランクトンに含まれているクロロフィルは、波長436nmの光を受けると励起し、波長685nmの蛍光を発する。

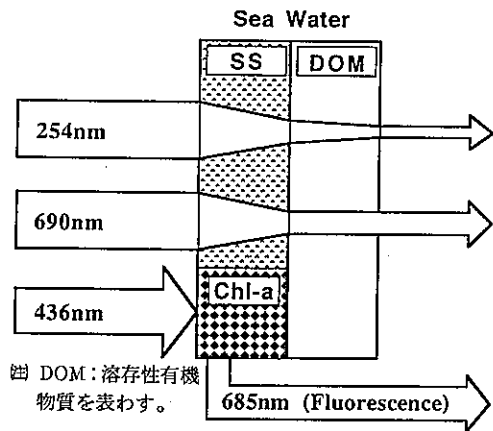


図1 光学的水質測定方法の原理

② 波長690nmの光は、海水中の懸濁物質により吸収、散乱される。

③ 波長254nmの光は、海水中の懸濁物質により吸収、散乱されるとともに、溶存性有機物によっても吸収される。

こうした蛍光発光や吸収・散乱による光の減衰が、海水中に存在する物質濃度と定量的な関係で起こればこの光学的特性を利用して、海水中の汚濁物質濃度を測定することができる。この点を確かめるために、調査期間中に採水分析をあわせて実施した。

なお、光学的測定結果は、次のように単位を換算して表示した。

① 蛍光強度は、ウランで器差補正し、mV値で表わした。

② 690nm, 254nmの光束透過率は、測定光路長10cmでの透過率を体積消散係数Cに換算し、蒸留水の消散係数Cwを差し引いた(C-Cw)690, (C-Cw)254で表わす(ただし以後、文中ではC690, C254と表記する。)

(2) 水質変動特性調査

東京都内湾の13号地と大井埠頭に挟まれた海域で、海面下1m層に、自記式2波長透過率・蛍光光度計と自記式水温・塩分計をフロートから吊り下げて設置し、1990年の7月と9月の2回、約2週間の連続測定を行った(図2)。光束透過率及び蛍光強度は1時間、水温、塩分は15分間隔で測定した。

また、連続測定の期間中に、晴海から中央防波堤内側、外側埋立地周辺海域にわたる測線上(図2)で、前述の時間変動特性調査と同じ項目を測定した。方法は、調査船に支柱を固定し、その先端(海面下1m)に水中ポンプを取付けて船上の水槽に導水し、越流状態にした。その水槽内に測定器のセンサー部を沈め、船の移動に伴う水質の変化を記録した。水槽の海水交換時間は約1分であった。また測線上のSt. 1~St. 8では、水質の鉛直分布を測定した(ただし本報では鉛直分布の測定データのみを使用した。)

3 結果と考察

(1) 光学的測定結果と採水分析結果

ア 蛍光強度とクロロフィル濃度

蛍光強度とクロロフィルa(Chl-a)、蛍光強度とクロ

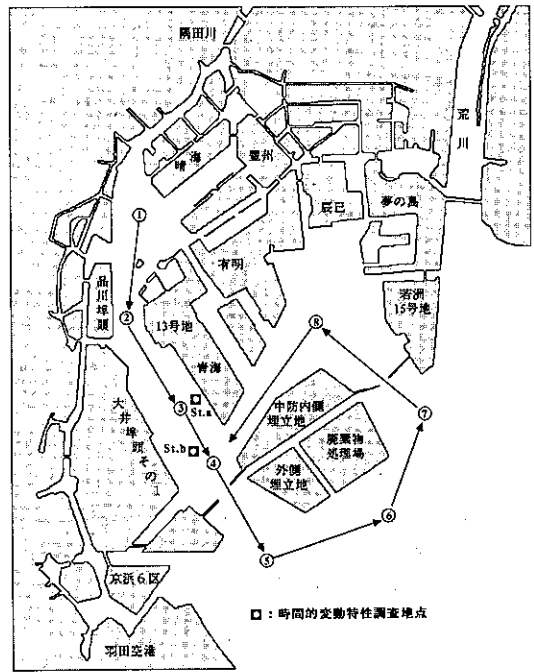


図2 調査地点図

ロフィルa+フェオ色素(T-Chl)の相関係数は、それぞれ0.88, 0.92で(図3)、良い相関を示した。このことから海水中の植物性プランクトン濃度を蛍光強度で把握できることが確かめられた。

イ 690nm 光束透過率とSS

C690とSSの関係を図4に示す。両項目間の相関係数は0.84で、海水中の懸濁性物質濃度についても光学的な測定が可能である。

ウ 254nm 光束透過率と溶存性COD

ある海水試料について懸濁性物質による光の減衰分をC254p、溶存性有機物による減衰分をC254dとすれば

$$C254 = C254d + C254p \quad \dots (a)$$

と表わされる。式(a)でC254は未処理の海水、C254dはろ過海水についての測定結果である。一方、同一の試料のC690からも懸濁性物質濃度が測定できる。したがって

$$C254p = C254 - C254d = a \cdot C690 \quad \dots (b)$$

と書ける。式(b)でaは比例係数である。

多数の試料についてC254, C254d, C690を測定するこ

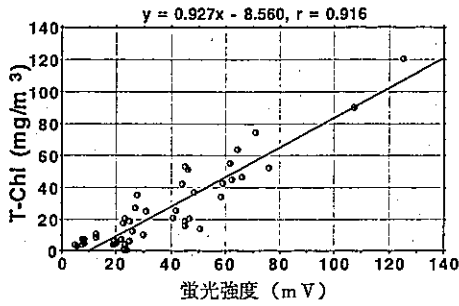


図3-1 蛍光強度と[クロロフィルa+フェオ色素]の相関

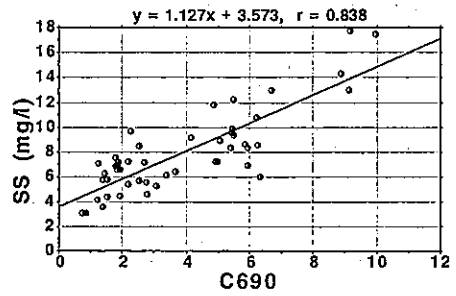


図4 690nm光束透過率(体積消散係数に換算)とSSの相関

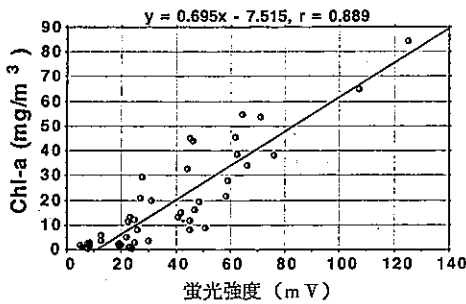


図3-2 蛍光強度とクロロフィルaの相関

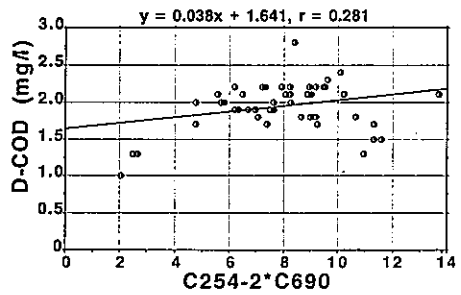


図5 254nm光束透過率(体積消散係数に換算後C690で補正)と溶存性CODの相関

とにより、この α が定まれば逆に、

$$C254d = C254 - \alpha \cdot C690 \quad \dots (c)$$

と表わされる式(c)で溶存性有機物濃度が推定できる。

実測結果から、 $\alpha = 2.0$ が得られた。この α を式(c)に代入し、溶存性COD(D-COD)とC254dとの相関を調べた(図5)。この図では、相関係数が小さく、光学的な方法でD-CODを測定することが困難であることを示している。その原因としては、溶存性有機物以外の成分(例えばBrなど)の吸収などが考えられるが、今回は確認できなかった。

光学的測定項目と採水分析項目を含めて項目相互の関係を検討するために、測定結果について主成分分析を行い、各項目を因子負荷量により分類した(図6)。この図によれば、蛍光強度(Fluo)はChl-a、T-Chlと、C690はSSと類似していることがわかる。また、C254もSSと非常に近い。更に、C254dを式(c)から計算した結果は、D-CODに近づくが、まだかなり異なっている。

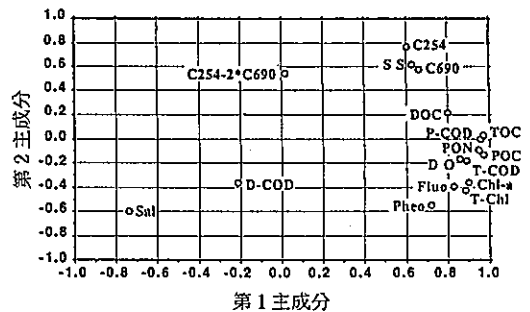


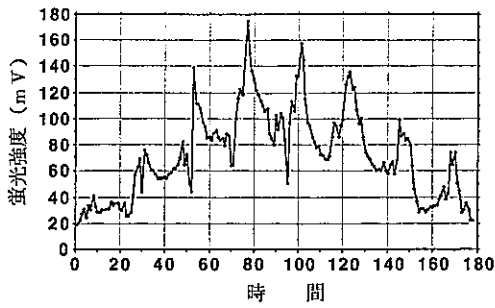
図6 因子負荷量による水質項目の分類

(2) 水質の時間的変動特性について

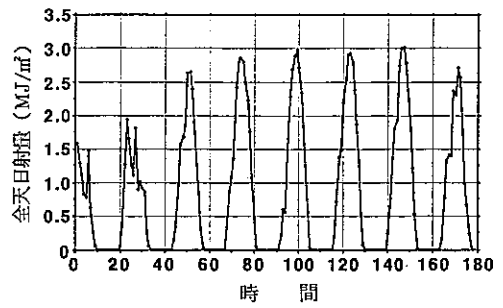
1990年7月の連続測定結果のうち、降雨の無かった7月18日からの6日間のデータについて水質(蛍光強度、水温、塩分)と気象(日射量、風速)、潮汐(芝浦の潮位)との関係について検討した。

ア 原データの特徴

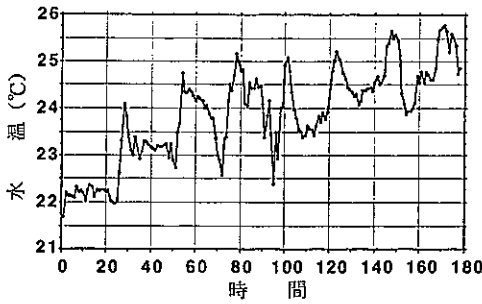
水質、気象、潮汐データの時系列変動を図7に示す。



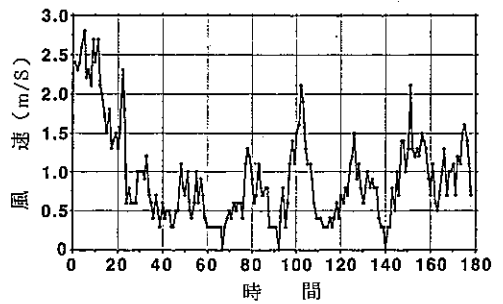
7-1 蛍光強度



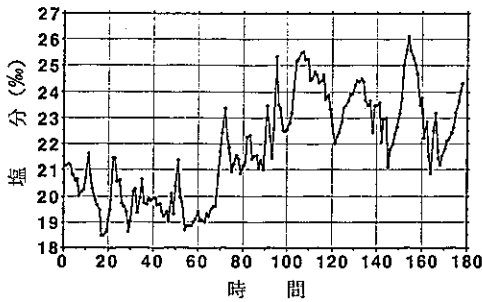
7-4 全日射量⁷⁾ 参考文献



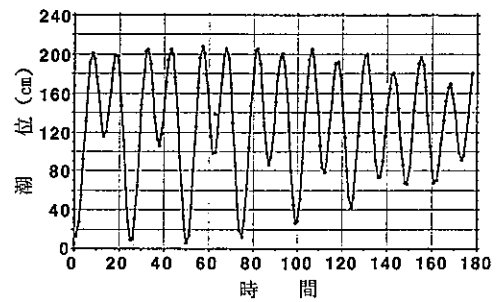
7-2 水温



7-5 風速(晴海)⁷⁾ 参考文献



7-3 塩分



7-6 潮位(芝浦)⁸⁾ 参考文献

図7 各項目の原データの時系列変動

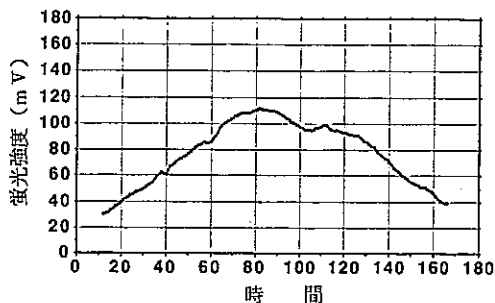
横軸は時間を表わす。蛍光強度は山型、水温は右上がりの直線状のトレンドに、周期的な変動が加わった形で変化している。また、塩分では、前半が低く、後半に高い傾向が見られ、周期性は明らかではない。日射量と潮位は非常に規則的な変動をしている。

イトレンド成分の分離

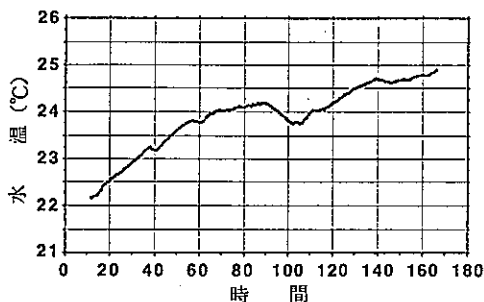
水質の原データに対して24時間の移動平均操作を行った(図8)。これにより、周期的な変動成分はほとんど消えて、トレンド成分が分離できた。

東京湾の運河部表層の4年間毎日の測定結果によれば、水温は毎年8月中下旬の最高点と2月中旬の最低点を結ぶ直線的な周年変動をしている。この結果は、今回の水温のトレンドとよく一致している。³⁾

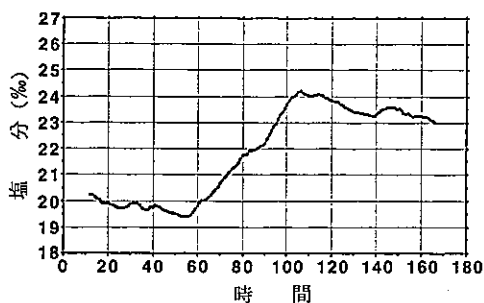
植物性プランクトンの異常増殖過程では、プランクトンは、日周期的な変動を繰り返しながら、最高濃度に達した後、急速に分解消滅していくといわれている。³⁾ 蛍光強度のトレンドは、こうした1サイクルの増殖過程を示していると考えられる。



8-1 蛍光強度



8-2 水温



8-3 塩分

図8 24時間移動平均値の時系列変動

塩分のトレンドについては、風速との関係が考えられるが、あまり明確ではない。

ウ 周期成分の解析

一般に、周期成分の解析法は、FFT法など周波数領域で扱う方法と、自己相関係数や相互相関係数などにより時間領域で扱う方法とに分類される。ここでは、後者の方法により解析を行った。

(ア) 自己相関係数と相互相関係数について

2組の時系列データをそれぞれA,Bとする。

$$A = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_t, \dots, a_n)$$

$$B = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_t, \dots, b_n)$$

ただし、tは測定時刻である。

このときA,Bの部分集合をA₀, B₀として

$$A_0 = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_t, \dots, a_n)$$

$$B_0 = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_t, \dots, b_n)$$

A₀, B₀間の相関係数r(0)を求める。つぎに、

$$A_1 = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_t, \dots, a_{n-1})$$

$$B_1 = (b_2, b_3, b_4, \dots, b_{t+1}, \dots, b_n)$$

としてA₁, B₁間の相関係数r(1)を求める。

同様に、時系列AとBの対応するデータの時刻をさらに1単位づつずらしたものについて相関係数を計算する。

最終的には、ずらし時間(ラグ)をmとして

$$r(0), r(1), r(2), r(3), \dots, r(m)$$

が得られる。すなわち、r(m)は、

$$A_m = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_t, \dots, a_{n-m})$$

$$B_m = (b_{m+1}, b_{m+2}, b_{m+3}, \dots, b_{m+t}, \dots, b_n)$$

についてのA_m, B_m間の相関係数である。

このラグmを横軸に、相関係数r(m)を縦軸にとりグラフ化することにより、周期性の強さや周期、時系列間の周期変動の位相差が推定できる。なお時系列AとBが同一データの場合の相関係数を自己相関係数、異なる場合を相互相関係数という。

(イ) 水質データの周期性の解析

原データとトレンド成分との差から周期成分を求めた(図9)。

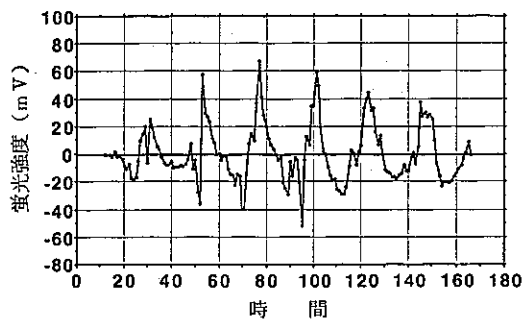
水質及び気象データの自己相関係数を図10に示す。これらの項目は、すべて約24時間の周期を有している。また、ピークの高さから、日射量が最も周期性が強く、次は蛍光強度、水温で、塩分と風速では周期性が弱い。

蛍光強度に対する水温、日射量、塩分の相互相関係数を図11に示す。この図で、横軸のラグは、水温、塩分、日射量に対して後の時刻の蛍光強度を対応させた場合を正にとっている。すなわちラグをmとすれば

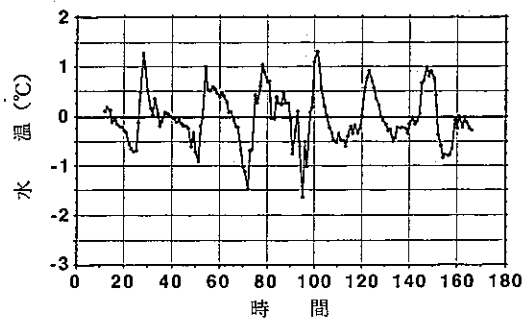
$$\text{蛍光強度}(m+t) : \text{水温}(t)$$

という対応関係での相関係数を示す。

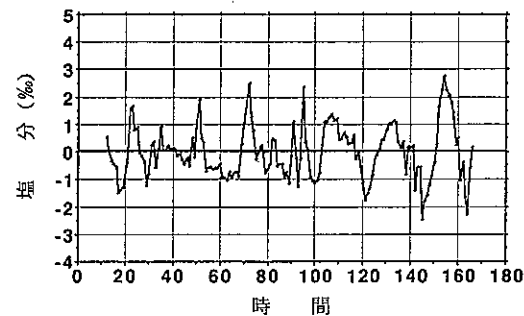
日射量については、約2~3時間の位置にピークが見られ、また、その相関係数が0.7と高いことから、蛍光強度の変動は、2~3時間遅れて日射量の変動によく追従



9-1 蛍光強度



9-2 水温



9-3 塩分

図9 周期成分の時系列変動

していることが分かる。

水温では、-1時間の位置にピークがあり（相関係数0.75）、蛍光強度の変動がむしろ水温の変動に1時間先行している。

図12は、水温に対する日射量、風速の相互相関係数を示したものである。この場合、水温は日射量に対して約3~4時間遅れて変動している。風速については、ピークでの相関係数が小さく対応関係があまりないと考えら

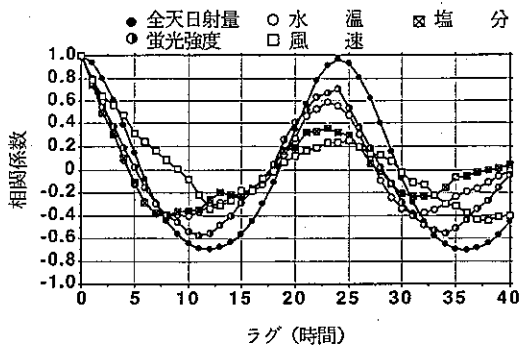


図10 各項目の自己相関

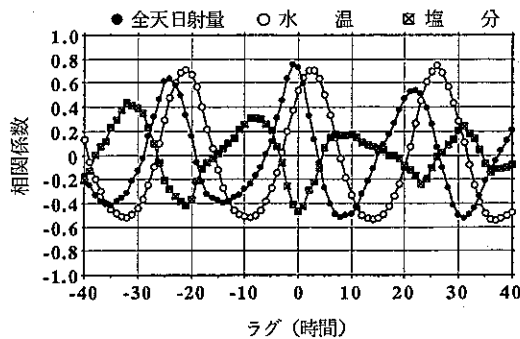


図11 蛍光強度に対する相互相関

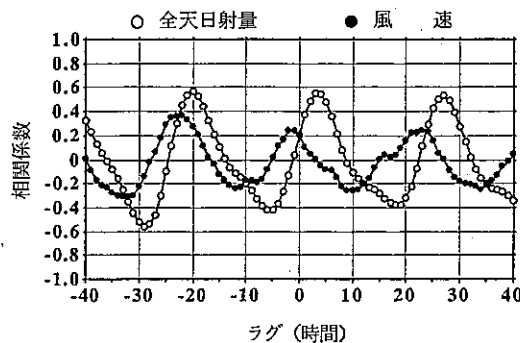


図12 水温に対する相互相関

れる。

図13は、塩分と風速、潮位差との相互相関係数である

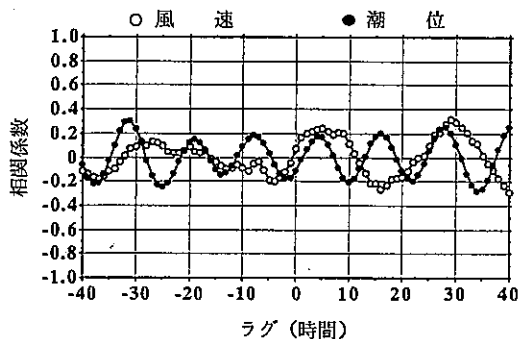


図13 塩分に対する相互相関

どちらの相関係数の最大値も0.3以下で対応関係はあまり明確ではない。

3) クロロフィル濃度の変動要因について

植物プランクトン濃度とT-Chlが比例するものとして以下の考察を行った。原データの各時刻の蛍光強度を図3の回帰式によってT-Chlに換算する。

次に時刻tとt+1のT-Chlから各時点での増殖速度を計算する。増殖速度を μ (1/日)とすると、

$$\mu = 1/n (T-Chl [t+1] / T-Chl [t]) / (1/24) \dots\dots(e)$$

と表わされる。式(e)により各時点での増殖速度を計算した結果が図14である。ここでは、増殖時 ($\mu > 0$) の μ の値にのみ着目する。実験室内の最適条件下で、単一藻類を培養して、その増殖速度を測定した場合、藻類の種類によっても異なるが、大きいものでも $\mu = 2$ 程度である。^{5) 6) 7)}これに対して図14では、この値を越える場合が

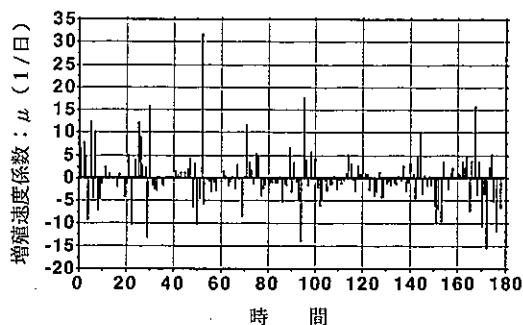


図14 クロロフィル濃度から計算した増殖速度係数の時系列変化

なりあり、大きい時には $\mu = 30$ 以上にも達する。したがって、こうした水質変動の大きさは、増殖による寄与だけでは説明がつかない。

図15は、St.b付近で蛍光強度の鉛直分布の時間的変動を測定した結果である。

9月27日の結果では、蛍光強度の時間的変化はほとんど認められないが、9月13日の結果では、12時から13時にかけて7 m層までの蛍光強度が急激に上昇している。

図16は、8地点(St. 1~St. 8)の蛍光強度の鉛直分布である。9月15日には、海面下、1.2m層で蛍光強度が最大になり、6 m以深ではほぼゼロになっている。10月1日には、3 m層付近で蛍光強度が最大になり、10m近くまで比較的高い値の分布をしている。また地点間の差も大きい。

図15、図16から、蛍光強度は、地点や水深の違いにより差が大きいことが分かる。このため、連続測定地点の周辺や下層の海水が流動すれば、観測される蛍光強度は、容易に変化すると推定される。このように、蛍光強度の日周変動のうち、藻類の増殖で説明のつかない点は、こうした海水の流動で説明できる。

ただし、この日周変動は日射量の変動と非常に良く対応していることから、こうした水塊の移動以外に、藻類の日周的な挙動(浮上や沈降)が存在する可能性もあるが、調査からは、その点は明らかにできなかった。

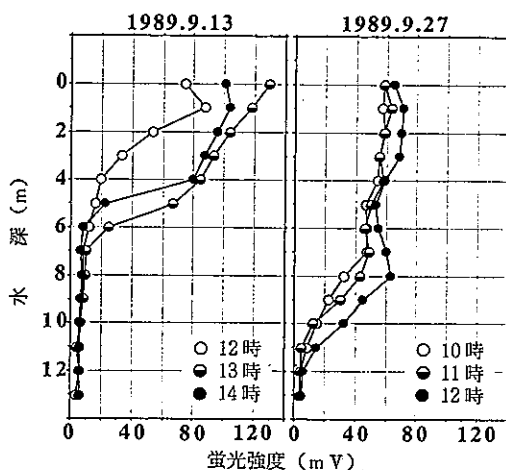


図15 蛍光強度の鉛直分布の時間的変化 (st. b)

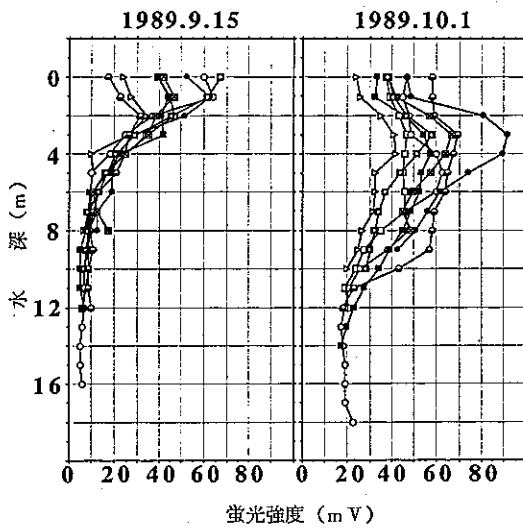


図16 蛍光強度の地点別鉛直分布

4 おわりに

今回の調査で、海域での水質が時間的空間的にも変動の大きいことが明らかになった。特に蛍光強度は、1時間で2倍ほど値が変化することもある。したがって、今後、こうした連続的な測定法で、日間変動や鉛直分布な

どを正確に把握することが、定点調査などのサンプリング精度やデータの代表性を高めるうえで非常に有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 環境保全局：昭和63年度公共用水域の水質測定結果（総括編），（1991）。
- 2) 安藤晴夫：連続測定データから見た朝潮運河の水質の特徴について，統計数理研究所共同研究レポート23，（1990）。
- 3) 飯塚昭二ら：藻類の生態，内田老鶴圃，（1986）。
- 4) 得丸英勝ら：工学基礎講座18，培風館，（1982）。
- 5) 安藤晴夫ら：東京湾の富栄養化に関する研究—そのII—，東京都公害研究所年報1985。
- 6) 安藤晴夫ら：東京湾の富栄養化に関する研究—そのIII—，東京都環境科学研究所年報1986。
- 7) 環境科学研究所：「東京湾の富栄養化機構の研究」に係わるプランクトン等の元素組成に関する実験報告書，（1988）。
- 8) 環境保全局：大気汚染常時測定室測定結果報告，7月，8月（1990）。
- 9) 海上保安庁水路部：平成元年潮汐表第一巻，（1990）。