

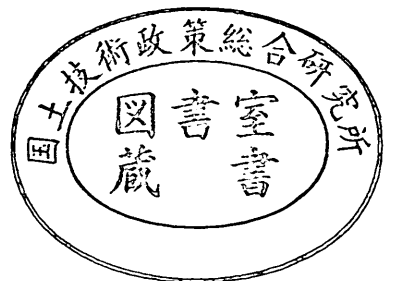
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 26 NO. 2(1) JUNE 1987

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第26巻 第2号 (Vol. 26, No. 1), 1987年6月 (June 1987)

目 次 (CONTENTS)

1. Bearing Capacity of a Foundation on Top of High Mound Subjected to Eccentric and Inclined Load
..... Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME..... 3
(偏心傾斜荷重を受ける高マウンド上の浅基礎の支持力 寺師昌明・北誥昌樹)
2. Fatigue Properties of Prestressed Concrete Beam-to-Column Joints for Waves
..... Osamu KIYOMIYA, Hiroshi YOKOTA, Toshiyuki YOKOI, Muneto ABE, Osamu KOHRIYAMA, Koichi MINAMIKAWA and Kunihiro MUKAI..... 25
(プレストレストコンクリート柱・はり接合部の波力に対する疲労特性 清宮 理・横田 弘・横井聰之・阿部宗人・郡山 修・南川光一・迎 邦博)
3. 汀線位置の短期変動特性とそのモデル化の試み
..... 加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次広児..... 63
(Daily Changes of Shoreline Position and its Tentative Predictive Model Kazumasa KATOH, Shin-ichi YANAGISHIMA, Hiroyuki MURAKAMI and Kohji SUETSUGU)
4. ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定 橋本典明..... 97
(Estimation of Directional Spectra from a Bayesian Approach Noriaki HASHIMOTO)
5. 湧昇流を発生させるための水中設置構造物背後の流れと乱れ特性
..... 鶴谷広一・松延嘉國・惟住智昭・柳嶋慎一.....127
(Measurements of Turbulent Flow Downstream of a Submerged Structure Hiroichi TSURUYA, Yoshikuni MATSUNOBU, Tomoaki KOREZUMI and Shin-ichi YANAGISHIMA)
6. 波と底泥の相互干渉による波高減衰と底泥の流動について
..... 中野 晋・鶴谷広一・鷹濱 潤.....171
(On Wave Attenuation and Flowing of Mud Layer due to an Interaction of Waves with a Mud Bottom Susumu NAKANO, Hiroichi TSURUYA and Jun TAKAHAMA)
7. 水質自動観測データの解析と赤潮予測への応用 村上和男.....213
(Analysis of Water Quality Data obtained by Automatic Measurement System and Its Application of Red-Tide Prediction Kazuo MURAKAMI)

8. 海上工事に伴う濁り予測モデルと濁り監視への適用性について堀江 毅.....253
 (Mathematical Modeling on the Fate of Suspended Particles Caused by Marine Works and Application of thd Models to Environmental Monitoring
 Takeshi HORIE)
9. マイクロコズムとセジメントトラップとを用いた沿岸域での浮遊粒子挙動の観測
 細川恭史・三好英一・関根好幸・堀江 毅.....297
 (Field Observation of Dynamics of Suspended Particles in Coastal Sea by Microcosm and Sediment Trap Experiments
 Yasushi HOSOKAWA, Eiichi MIYOSHI, Yoshiyuki SEKINE and Takeshi HORIE)
10. 捨石マウンドの支持力の新しい計算法
 小林正樹・寺師昌明・高橋邦夫・中島謙二郎・小谷 拓.....371
 (A New Method for Calculating the Bearing Capacity of Rubble Mounds
Masaki KOBAYASHI, Masaaki TERASHI, Kunio TAKAHASHI,
 Kenjiro NAKASHIMA and Hiraku ODANI)
11. 砂地盤の支持力に及ぼす複数基礎の干渉効果.....寺師昌明・北誥昌樹.....413
 (Interference Effect on Bearing Capacity of Foundations on Sand
 Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME)
12. 砂地盤の横方向反力に対する杭幅の影響.....高橋邦夫・春日井康夫.....437
 (Influence of Pile Width on Lateral Reaction of Sandy Subgrade
 Kunio TAKAHASHI and Yasuo KASUGAI)
13. コンクリート舗装構造の非破壊評価法の開発 ——フォールリングウエイトデフレク
 トメーターによる八谷好高・佐藤勝久・田中孝士.....465
 (Development of Non-Destructive Evaluating Method of Concrete Pavement—
 by Falling Weight Deflectometer
 Yoshitaka HACHIYA, Katsuhisa SATO and Takashi TANAKA)
14. 港湾構造物及び海洋構造物の安全性照査に関する検討
 ——作用荷重の変動係数と荷重係数の算定——白石 悟・上田 茂.....493
 (Study on the Method of Verification of Structural Safety of Port and Offshore Structures —Computation of Coefficients of Variation of Loads and Load Factors—Satoru SHIRAISHI and Shigeru UEDA)
15. 防波堤ケーソンに用いる新形式フーチング構造の力学特性と構造解析
 横田 弘・清宮 理.....577
 (Mechanical Properties and Structural Analyses of New Types of Footing Used in Breakwater Caissons Hiroshi YOKOTA and Osamu KIYOMIYA)

7. 水質自動観測データの解析と赤潮予測への応用

村上 和男*

要 旨

本報告は多変量解析法を用いた水質データの処理を通して、赤潮時の水質特性について述べたものである。用いた水質データは、運輸省第三港湾建設局において、大阪湾西宮防波堤脇で実施された水質自動観測による連続水質データである。

観測は58年度(15日間)、59年度(30日間)、60年度(40日間)の3回にわたって実施された。調査項目は主として赤潮に関するものとして、水温、塩分、pH、溶存酸素、濁度、COD、クロロフィル-a、硝酸、アンモニア、リン酸、総リン、ケイ酸である。これらの水質項目について、1時間ごとの連続測定を実施している。

これらの水質の時系列データを用いて、主成分分析、重回帰分析、クラスター分析、相関分析等の多変量解析法を用いて、数多くの水質項目間の相互特性、赤潮時における各水質項目の挙動、さらには、赤潮発生の要因となる栄養塩の挙動等について検討した。

水質データが多変量解析による結果から、調査海域の水質の総合特性値は植物プランクトンによる赤潮の状態を示すものであることなどが示された。また、赤潮の状態を示す指標をクロロフィル-a量として、これらの時系列データを用いて、重回帰分析、あるいはカルマン・フィルター等の手法を用いて、赤潮発生の予測手法について検討した。

* 海洋水理部 海水汚染水理研究室長

7. Analysis of Water Quality Data obtained by Automatic Measurement System and Its Application to Red-Tide Prediction

Kazuo MURAKAMI*

Synopsis

This paper describes the characteristics of water quality at a red-tide in coastal region using the multivariate analysis. The data used here were obtained at the side of the Nishinomiya Breakwater in the Osaka Bay to develop the automatic measurement system of water quality.

The automatic measurements of water quality were carried out for 3 durations. The measurements were conducted for 15 days in 1983, for 30 days in 1984, and for 40 days in 1985, respectively, at intervals of one hour. Water quality items measured in this investigation were water temperature, salinity, pH, DO, SS, COD, chlorophyll-a, nitrate, ammonia, phosphate, total phosphorus, and silicate.

With the time series data, the author investigated the characteristic features of variations of these water quality items by multivariate analysis such as principal component analysis, multiple regression analysis, cluster analysis, correlation analysis, etc.

From the results of the study, it is found that the synthetic characteristics of water quality are expressed by the several items related to red-tide plankton, and the most suitable index of red-tide is the concentration of chlorophyll-a.

* Chief of Marine Diffusion Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

目 次

要 旨	213
1. ま え が き	217
2. 多変量解析法	217
2.1 主成分分析	218
2.2 重回帰分析	218
2.3 クラスタ分析	219
2.4 時系列解析	219
3. 水質自動観測による連続水質データの測定	220
3.1 水質指標と測定方法	220
3.2 水質項目の特性	222
3.3 時系列と相関分析	227
4. 多変量解析法による水質データの解析	229
4.1 主成分分析結果	229
4.2 スコアによる水質の総合指標	236
4.3 クラスタ分析による水質項目間の分類	237
4.4 重回帰分析によるクロロフィル-a量の算定	238
5. 赤潮時の水質特性とその予知	244
5.1 重回帰分析によるクロロフィル-a量の予測	245
5.2 カルマン・フィルターによるクロロフィル-a量の予測	249
6. ま と め	250
参 考 文 献	251

1. まえがき

海域の環境問題を論じる際に、非常に数多くの水質指標があり、水質調査においても数多くの測定項目について実施されている。また、水質の測定項目には、人間の視覚的なものから、物理的なもの、化学的なもの、更には生物学的なものがあり、その内容も複雑多岐にわたっている。水質汚染の典型的な例として赤潮という現象がある。赤潮とは、ある海域でのプランクトンの異常発生による海の色の変化現象を表すもので、時として大きな漁業被害を与えることがある。赤潮の発生原因としては、プランクトンの生育に必要な栄養塩の過剰という状況があげられるが、このような条件が満たされても必ずしも赤潮が発生するとは限らず、まだ不明確な点も多い。また、赤潮の予測、あるいは防除といった方策についても、この関連に関する研究は、まだその日が浅く確立したものとは言えない現状である。これは、赤潮という現象がプランクトンの生態という生物学的な現象に加えて、収束・発散、酸化・還元等の物理・化学的要素が複雑にからまった現象であるゆえんであると思われる。

このような複雑な現象を把握するために、我国の沿岸域において数多くの水質調査が実施されてきた。しかし、現象が複雑なだけに調査項目が増大し、それらのデータの解析においても従来の解析手法では不十分な点が多く、いくつかの問題点が生じてきている。

このような観点から、数多くの調査項目のなかから、互いに相関のある多くの変量のデータを要約し、ある所定の目的に応じた変量に総合するような多変量解析法が、多種多様な調査項目からなる水質データの解析に適していると言える。多変量解析による水質データの解析は、湖沼や河川においては従来から実施されていたが、海域においては、系統だった連続的なデータの取得が困難であることからあまり行われていないのが現状である。

本報告では、運輸省第三港湾建設局神戸機械整備事務所が実施した水質自動観測装置開発に関する調査研究の際に実施された長期の連続水質データを用いて多変量解析を実施し、水質指標の各項目間の相関を調べるとともに、海域における水質汚染の総合指標を求め、赤潮時における水質特性について検討したものである。また、連続水質データの時系列特性から、重回帰分析、およびカルマン・フィルター等の手法を用いて赤潮発生の予測に対する検討についても実施した。

本論文の構成は、1.にまえがき、2.に多変量解析法の概要について述べ、3.に水質自動観測による連続水質デ

ータの特性、4.にそれらのデータの多変量解析による解析、5.に赤潮時の水質特性とその予測、6.にまとめとなっている。

2. 多変量解析法

水質データには数多くの項目がある。表-1には、その項目としていくつかの例をあげた。これらの項目の中には水質汚濁の指標となるものもあれば、自然環境によって左右されてしまうものもある。また、これらの中には、お互いに正の相関の強いもの、逆に負の相関に強いものもあれば、また、お互いには全然関係のない項目もある。このような数多くの水質項目から、水質汚濁というある漠然とした概念を取り出すのは非常に大変なことである。また、水質データの処理は非常に煩雑なものとなり、単にデータを取得したという事実だけが残りということに陥りやすい。

表-1 水質項目の一覧表

日射量	(insolation flux)
気温	(atmospheric temperature)
風向・風速	(wind direction, wind speed)
流向・流速	(current direction, current speed)
波	(wave)
水温	(water temperature)
塩分	(salinity)
酸素イオン濃度	(exponent of hydrogen concentration-pH)
溶存酸素	(dissolved oxygen-DO)
水中照度	(illumination)
濁度	(turbidity)
懸濁物	(suspended solid-SS)
クロロフィル-a	(chlorophyll-a)
総有機態炭素	(total organic carbon-TOC)
溶存有機物	(dissolved organic materials)
総リン	(total phosphorus)
有機態リン	(organic phosphorus-OP)
無機態リン	(inorganic phosphorus-IP)
硝酸・亜硝酸	(nitrates, nitrites)
アンモニア態窒素	(ammonia nitrogen)
有機態窒素	(organic nitrogen)
ケイ酸	(silicic acid)
化学的酸素要求量	(chemical oxygen demand-COD)
生物化学的酸素要求量	(biochemical oxygen demand-BOD)
透明度	(transparency)
色度	(chromatilty)
酸化・還元電位	(oxydation-reduction potential-ORP)

多変量解析とは、奥野ら¹⁾によれば、“互いに相関のある多変量（多種類の特性値）のデータのもつ特徴を要約し、かつ所与の目的に応じて総合するための手法である”，としている。したがって、多種多様な水質指標によって表された水質の総合的な特性を調べるのに適した方法であると考えられる。

多変量解析には数多くの方法があるが、代表的なものとして、主成分分析、重回帰分析、クラスター分析、パターン分析などがあげられる。

多変量解析による水質データの分析に関しては、従来から河川^{2),3)}、あるいは湖沼^{4),5)}において用いられている。また、最近においては、海域での栄養塩やクロロフィルの挙動^{6),7)}、あるいは赤潮予報⁸⁾などの解析手段としても多変量解析法が利用され始めている。著者らも、大阪湾⁹⁾、東京湾¹⁰⁾のデータを用いて、水質データの解析を実施している。

2.1 主成分分析¹⁾

主成分分析とは、互いに相関のある多種類の特性値のもつ情報を、互いに無相関な少数個の総合特性値に要約するものである。これを数式で表すと以下のようになる。例えば、 n 個の測点で p 種の水質項目についての測定が実施されたとする、これらの変数は

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1 &= \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ \vdots \\ x_{1n} \end{bmatrix}, \mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} x_{21} \\ x_{22} \\ \vdots \\ x_{2n} \end{bmatrix}, \dots, \\ \mathbf{x}_p &= \begin{bmatrix} x_{p1} \\ x_{p2} \\ \vdots \\ x_{pn} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \dots(1)$$

で表される。この p 個の特性値が互いに無相関であるならば、そのおのおのについて n 個のサンプルについての解析を行えばよい。しかし、このおのおのの特性値の間に相関がある場合には、この共通要素に関しては重複して解析したことになる。そこで、主成分分析においては、式(2)に示すように p 個の特性値の重み付き平均値としての m 個の特性値によって表すものとする。

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= l_{11}x_1 + l_{12}x_2 + \dots + l_{1p}x_p \\ z_2 &= l_{21}x_1 + l_{22}x_2 + \dots + l_{2p}x_p \\ z_m &= l_{m1}x_1 + l_{m2}x_2 + \dots + l_{mp}x_p \end{aligned} \right\} \quad \dots(2)$$

ここで、各項の重みは、

$$l_{k1}^2 + l_{k2}^2 + \dots + l_{kp}^2 = 1 (k=1, 2, \dots, m) \quad \dots(3)$$

という条件を満たす。このようにして表された m 個の特性値のうち、第1主成分、第2主成分等は以下の条件によって設定される。

(1) 第1主成分の係数 $\{l_{1i}\}$ は式(2)の条件の下で z_1 の分

散が最大となる。

(2) 第2主成分の係数 $\{l_{2i}\}$ は式(2)を満足しつつ、かつ z_2 が z_1 と無相関であるという条件の下で z_2 の分散が最大となる。

(3) 以下同様にして、第 m 主成分の係数 $\{l_{mi}\}$ を定める。

実際、 m 個の主成分を求める係数 $\{l_{ki}\}$ ($k=1, 2, \dots, m$; $i=1, 2, \dots, p$)は、もとの変数 x_1, x_2, \dots, x_p の分散・共分散行列 V （または相関行列 R ）の固有値の大きい方から順に m 個とり、対応する固有ベクトルを充たすればよい。すなわち、方程式

$$\begin{aligned} |V - \lambda I| &= \begin{vmatrix} V_{11} - \lambda & V_{12} & \dots & V_{1p} \\ V_{21} & V_{22} - \lambda & \dots & V_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{p1} & V_{p2} & \dots & V_{pp} - \lambda \end{vmatrix} \\ &= 0 \end{aligned} \quad \dots(4)$$

の p 個の根を大きい順に並べて

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0 \quad \dots(5)$$

と書くことにする。この λ_k ($k=1, 2, \dots, p$)は行列式 V の固有値である。

各主成分 z_k の分散は式(5)の固有値 λ_k に等しくなる。また、固有値 λ_1 から λ_p までの和は p となる。したがって、主成分 z_k の分散の総分散に対する割合（これを寄与率）は式(6)で、また m 個の主成分の累積寄与率は式(7)で表される。

$$\text{寄与率} = \frac{\lambda_k}{p} \quad \dots(6)$$

$$\text{累積寄与率} = \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i}{p} \quad \dots(7)$$

以上のように、主成分分析においては、いくつかの特性値を持つデータに対して、互いに独立でかつ分散ができるだけ大きくなるような主成分に集約し、その主成分の持つ情報を効率的に集約する方法と言える。

2.2 重回帰分析

異なった水質間の相互関連を調べる場合、相関あるいは回帰という概念が重要となる。例えば、湖水の濁度と風速との相関を調べてみると、かなり良い正の相関があることがわかる¹¹⁾。このような場合、湖水の濁度 \hat{y} は風速 x の一次式として、

$$\hat{y} = a_0 + a_1 x \quad \dots(8)$$

のように表すことができる。ここに、 a_0 は定数であり、 a_1 は傾きを示す定数である。いま、式(8)のように1つの目的変数 \hat{y} に関して1つの説明変数 x で表す場合を単重回帰分析と呼ぶ。また、次式のように複数の説明変数によって表す場合には重回帰分析という。

$$\hat{y} = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_px_p \quad \dots(9)$$

ここで、説明変数 x_1, x_2, \dots, x_p は互いに独立に目的変数 y に影響を与えるのではなく、互に関連しあって複雑に影響しあう。したがって、個々の x に対する y の単回帰を求め、それらを重ね合せるという方法では異なったものとなる。

一般に重回帰分析を行う場合、説明変数の数を増せば増すだけ回帰式の近似は良くなるが、あまり説明変数が多いと、得られた結果が実用的でなく、かつ無意味なものになってしまう。現場で役立つ重回帰式の説明変数の数は、たかだか4つか5つが適当であると言われている。したがって、多くのデータが存在する場合には、どの変数を用いれば良いかの変数選択の問題が生じる。

変数選択の基準として、

- ①. 目的変数 y の予測に役立つこと、
 - ②. 測定（管理）しやすい変数であること、
 - ③. 説明変数間の相関はなるべく小さいこと、
- などがあげられる。また、計算機を用いて機械的に選択する方法として、ある変数を取り込む（または棄てる）場合の寄与率の増加分（または減少分）から最も寄与率が増加するように、計算機によって自動的に行う変数増減法などがある。

2.3 クラスタ分析

クラスタ分析とは、数多くの変数の中からその特性値に似たもの同志を集める手法で、数値分類法の1つである。クラスタ分析における似たもの同志の指標として、個体間の類似度あるいは距離の定義、クラスタに分類する基準、およびそのアルゴリズム等を与える必要がある。

距離の定義としては、ユークリッド距離（式(10)）、マハラノビスの汎距離（式(11)）などがある。

ユークリッド距離

$$d^2_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^p (x_{\alpha i} - x_{\beta i})^2 \quad \dots(10)$$

マハラノビスの汎距離

$$d^2_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p (x_{\alpha i} - x_{\beta i}) \omega^{ij} (x_{\alpha j} - x_{\beta j}) \quad \dots(11)$$

ここで、 ω^{ij} は行列 ω_{ij} の逆行列の i, j 要素で

$$\omega_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{\alpha=1}^n (x_{\alpha i} - \bar{x}_i)(x_{\alpha j} - \bar{x}_j) \quad \dots(12)$$

で定義される。また、類似度の定義としては、個体間積和（式(13)）、個体間相関係数（式(14)）などがある。

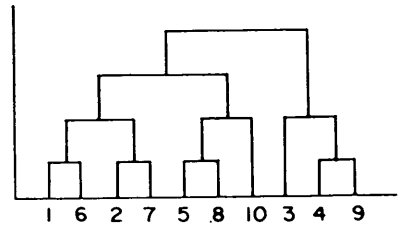


図-1 樹形図

個体間積和

$$q_{\alpha\beta} = \frac{\sum_{i=1}^p (x_{\alpha i} - \bar{x}_i)(x_{\beta i} - \bar{x}_i)}{S_i^2} \quad \dots(13)$$

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{\alpha=1}^n (x_{\alpha i} - \bar{x}_i)^2$$

個体間相関係数

$$r_{\alpha\beta} = \frac{\sum_{i=1}^p (z_{\alpha i} - \bar{z}_\alpha)(z_{\beta i} - \bar{z}_\beta)}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (z_{\alpha i} - \bar{z}_\alpha)^2 \sum_{i=1}^p (z_{\beta i} - \bar{z}_\beta)^2}} \quad \dots(14)$$

これらの定義式において、距離は小さいほど、また、類似度は大きいほど、2つの個体 α と β は似ていることを意味する。

クラスタ分析の手法には、階層的クラスタ分析と非階層的クラスタ分析とがある。図-1に示すのは、階層的クラスタ分析の表現としての樹形図（デンドログラム）である。このようなクラスタの分割法には、最近隣法、最遠隣法などのように、いくつかの分割法に分けられる。

以上、ここでは、多変量解析法において最も一般に用いられている主成分分析、重回帰分析、およびクラスタ分析の概略について述べた。なお、これらの手法の詳細については参考文献(1)などを参照されたい。

2.4 時系列解析

観測値の時間的変動現象を時間の関数とみたとき、その観測値系列を時系列と呼ぶ。また、観測値のもつ時間的変動の統計的性質を利用して、未観測値や欠測値の外挿あるいは内挿、さらには予測などを行うことを時系列解析と呼んでいる。

ある観測値の時系列が定常確率過程の場合については Yule-Walkerの方法、あるいは Burgの方法により予測が可能である¹¹⁾。しかし、Yule-Walkerあるいは Burgの方法は、長期にわたる定常確率過程の入力、出力データの統計的性質を基礎にした予測手法であり、非定常なデータには適用できない。次に述べる Kalman Filterの理論は、データが必ずしも定常確率過程でなくてもよ

く、また、線形でなくともよいことから、最近よく利用される。

Kalman Filter とは、片山¹²⁾によれば、(1). 信号を生成するシステムの動特性、(2). 雑音の統計的性質、(3). 初期値に関する先験情報、および時々刻々与えられる観測データを用いて、システムの状態の最小 2 乗推定値を逐次的に与えるオンラインデータ処理アルゴリズムであるとしている。

Kalman Filter による理論は次のように書き表すことができる¹³⁾。すなわち、線形の状態方程式・測定方程式において、状態量の真値 x と推定値 \hat{x} の誤差

$$e = x - \hat{x} \quad \dots\dots(15)$$

を考え、 e の平均値をゼロとし、 e の分散行列を最小とするような \hat{x} を推定することである。

いま、線形離散システムに対して、状態方程式および測定方程式を次のように考える。

$$x_k = \phi(k, k-1)x_{k-1} + \Gamma_k w_k \quad \dots\dots(16)$$

$$y_k = M_k x_k + v_k \quad \dots\dots(17)$$

ここに、 w_k 、 v_k はそれぞれ白色ノイズで、

$$E\{w_k\} = 0 \quad \dots\dots(18)$$

$$E\{w_k w_l^T\} = Q_k \delta_{kl} \quad \dots\dots(19)$$

$$E\{v_k\} = 0 \quad \dots\dots(20)$$

$$E\{v_k v_l\} = R_k \delta_{kl}, \quad R_k > 0 \quad \dots\dots(21)$$

である。いま、時刻 t_{k-1} で $Y_{k-1} = \{y_0, y_1, y_2, \dots, y_{k-1}\}$ が既知であるとする。すると、時刻 t_k において測定値 y_k を得ると、カルマンフィルタの最適推定値 $\hat{x}(k|k)$ と推定誤差 e の共分散行列 $P(k|k)$ は、

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K_k \{y_k - M_k \hat{x}(k|k-1)\} \quad \dots\dots(22)$$

$$P(k|k) = (I - K_k M_k) P(k|k-1) \quad \dots\dots(23)$$

で表される。ここに、

$$\hat{x}(k|k-1) = \phi(k, k-1) \hat{x}(k-1|k-1) \quad \dots\dots(24)$$

$$P(k|k-1) = \phi(k, k-1) P(k-1|k-1) \cdot \phi^T(k, k-1) + \Gamma_k Q_k \Gamma_k^T \quad \dots\dots(25)$$

$$K_k = P(k|k-1) M_k^T \cdot \{M_k P(k|k-1) M_k^T + R_k\}^{-1} \quad \dots\dots(26)$$

である。ここで、 K_k はカルマン利得行列(Kalman gain)と呼ばれるものである。

次に、カルマンフィルタのアルゴリズムを用いての予測について考える。いま、状態方程式が次のように表されたとする。

$$x_{k+1} = f(x_k) + w_{k+1} \quad \dots\dots(27)$$

x_k としては、フィルタリングによって、次のように最適推定値が与えられている。

$$E\{\hat{x}_k\} = 0 \quad \dots\dots(28)$$

$$E\{(x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T\} = P_k \quad \dots\dots(29)$$

$$E\{w_{k+1}\} = 0 \quad \dots\dots(30)$$

$$E\{w_{k+1} w_{k+1}^T\} = Q_{k+1} \quad (31) \dots\dots$$

いま、 x_k と w_{k+1} は独立であり、かつ $f(x_k)$ が線形であると仮定すると、

$$\hat{x}_{k+1} = E\{x_{k+1}\} = E\{f(x_k)\} = F_k \hat{x}_k \quad \dots\dots(32)$$

$$P_{k+1} = E\{(x_{k+1} - \hat{x}_{k+1})(x_{k+1} - \hat{x}_{k+1})^T\} = E\{(f(x_k) - \hat{x}_{k+1})(f(x_k) - \hat{x}_{k+1})^T\} + Q_{k+1} = F_k P_k F_k^T + Q_{k+1} \quad \dots\dots(33)$$

となる。これらをまとめると、カルマンフィルタによる予測のアルゴリズムは以下のようになる。

(i) フィルタ方程式

$$\hat{x}(k+1|k) = F_k \hat{x}(k|k) \quad \dots\dots(34)$$

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K_k \{y_k - M_k \hat{x}(k|k-1)\} \quad \dots\dots(35)$$

(ii) カルマンゲイン

$$K_k = P(k|k-1) M_k^T \cdot \{M_k P(k|k-1) M_k^T + R_k\}^{-1} \quad \dots\dots(36)$$

(iii) 推定誤差共分散行列

$$P(k+1|k) = F_k P(k|k) F_k^T + Q_{k+1} \quad \dots\dots(37)$$

$$P(k|k) = P(k|k-1) - K_k M_k P(k|k-1) \quad \dots\dots(38)$$

(iv) 初期条件

$$x(0|-1) = \bar{x}_0 \text{ (平均値)} \quad \dots\dots(39)$$

$$P(0|-1) = \Sigma_0 \text{ (共分散行列)} \quad \dots\dots(40)$$

以上、カルマンフィルタのアルゴリズムについて述べた。この方法は理論的にも応用的にも非常に価値が高く、多くの分野において活用されている。

3. 水質自動観測による連続水質データの測定^{14), 15), 16)}

3.1 水質指標と測定方法

本報告で用いられた水質データは、運輸省第三港湾建設局神戸機械整備事務所が実施した水質自動観測装置開発に関する調査研究の際に測定されたものである^{14), 15), 16)}。表-2に、この調査で測定された水質項目、および観測条件等を示す。

ここで、水質自動観測によって測定された水質項目の概要について述べる。

(i) 水温

水塊の分布や水の素性を知りうるデータとなる。また水温の鉛直構造は、躍層の状態、水塊の安定・不安定の指標となる。また、植物プランクトン等の生物には、発育条件としての好適水温範囲があり、赤潮発生のプランクトン種の決定に重要な要因である。

表-2 調査水質項目 (58年度～60年度)

測定期間	58年度 10月4日～10月17日	表層	1時間毎
	59年度 7月17日～8月16日	表層	1時間毎
	60年度 7月9日～8月20日	表層, 4m層交互に	1時間毎
水温	サーミスタ式 三洋測器 M-3		
pH	ガラス電極型 セントラル科学 UC22型		
塩分	多電極型 三洋測器 M-3		
溶存酸素	ポーラログラフ L&N社 7932型		
濁度	透過光型 新日本気象海洋 SKIM-1		
アンモニア**	膜濃縮分析法 紀本電子工業		
COD	アルカリ性過マンガン酸カリウム法 紀本電子工業		
リン酸	モリブデンブルー法 紀本電子工業		
TP*	アルカリ性オキシニ法 オートクレープ分解法 紀本電子工業		
ケイ酸**	ボルタンメトリー法 紀本電子工業		
蛍光強度	蛍光光度法 ターナー社		
硝酸	2波長紫外吸収法 紀本電子工業		

* 60年度調査のみ実施

** 59・60年度調査のみ実施

(ii) 塩分

水温と同様に、水塊の分布や水の素姓を知りうるデータとなる。塩分が低下した後に赤潮がよく発生するという報告例もあり、河川水の影響あるいは外海水の侵入等の影響を把握するのに最もよい指標である。

(iii) pH (酸素イオン濃度)

外洋水では8.3～8.4の範囲の値を示すが、河川水などを含んだ内湾水では8.2前後となる。また、植物プランクトンの光合成によって上昇することから、赤潮状態の指標となりうる。

(iv) 溶存酸素

海水中の生物は呼吸によって酸素を消費する。また、各種の物質の酸化の際にも消費される。一方、植物プランクトンの光合成活動により酸素は補給される。したがって、表層での溶存酸素の上昇は赤潮の指標となりうる、また底層での溶存酸素の減少は貧酸素水塊の形成の原因となりうる。

(v) 光束透過率

水中を透過する光は、海水自身あるいは懸濁物によって散乱し、吸収され弱くなる。したがって、光束透過率により、水中の懸濁物の量を算定することができ

る。海水中の懸濁物には、土砂による濁り、およびプランクトンなどがある。

(vi) 蛍光強度 (クロロフィル-a)

植物プランクトンはクロロフィルを含有することから、クロロフィル量を測定することにより植物プランクトン量の指標となりうる。クロロフィル-aは植物プランクトンの光合成に関与するので、最も重要なクロロフィルである。クロロフィル-aは蛍光を発する性質を持つので、海水中の蛍光強度を測定することによりクロロフィル-a量を算定する。植物プランクトンによる赤潮の指標となりうる。

(vii) COD (化学的酸素要求量)

海水中の被酸化物質を化学的に酸化した場合に消費される酸素量をいう。CODは人為的な有機汚濁物質やプランクトン等の排出物による汚濁等を測る総合的な指標として用いられている。現在、海域においてはCODを水質指標とした海域類型の指定が行われている。

(viii) 硝酸・亜硝酸

窒素はリンと同様に生物の構成要素であるから、生物の増殖には必要な物質である。したがって、その存在量が少なければプランクトン増殖の制限因子となる。硝酸態窒素は植物プランクトンによって直接利用されるため、夏期には減少し、冬期に増加する傾向にある。

(ix) アンモニア

硝酸と同様に窒素化合物であり、プランクトン増殖の制限因子となりうる。アンモニウムイオンはバクテリアなどの作用を受けて酸化され、亜硝酸イオン、硝酸イオンとなる。

(x) リン酸

リンは生物の主要な構成要素のひとつであり、その存在量が少なければプランクトン増殖の制限因子となりうる。リンは水中において無機と有機の形で存在し、リン酸態リンはこの無機リンのことを示す。

(xi) TP (総リン)

海水中のリンは、リン酸態リンの他に、可溶性の有機リンあるいは不溶性の粒状物として存在する。これらのリンは分解されて無機リンとなりうる。プランクトン増殖の栄養塩量を把握するために、総リンがその指標となる。

(xii) ケイ酸

ケイ酸はケイ藻類の殻の形成に必要な要素であるために、ケイ藻類の増殖の制限因子となる。

以上の項目についての連続測定を運輸省第三港湾建設局により実施された。調査の目的が水質自動観測装置の開発にあったために、測定方式も表-2に示すような自動計測の方法を用いている。測定時間間隔は基本的には1時間ごととしている。また、自動観測データのチェックのために、時々手分析による測定を行って、相互のデータの照合を行っている。なお、水質の自動観測装置、およびそのデータ等の詳細に関しては、参考文献(14)~(16)を

参照されたい。

3.2 水質項目の特性

水質自動観測装置の開発調査において、前節で述べた水質項目についての連続観測を、西宮沖防波堤の図-2に示す位置で実施された。それらの測定値の経時変化曲線を、58年度については図-3に、59年度については図-4に、また60年度については図-5に示す。

まず、これらの水質項目についての特性について述べる。表-3に示すのは、58年度に実施された調査の各測定項目の最大値、最小値、平均値、標準偏差の各値を示す。同様の値について、59年度については表-4に、60年度については表-5に示す。どの年度の結果に対しても、水温、pH、塩分の値の変動(標準偏差)は他の測定項目に比べて小さい。しかし、リン酸、蛍光強度、アンモニア、硝酸などの測定項目は、その変動が大きく、最大値と最小値とでは数十倍の差が示されている。

60年度の測定結果に対しては、測定を表層と海面下4m層とで1時間ごとに交互に実施しているので、水質項目の特性に対する水深による相違が若干示されている。例えば、4m層に比べて表層の方が水温が若干高く、塩分が低い。また、溶存酸素、浮遊物質、蛍光強度については表層の値が高く、表層において赤潮が発生しやすいようすがわかる。

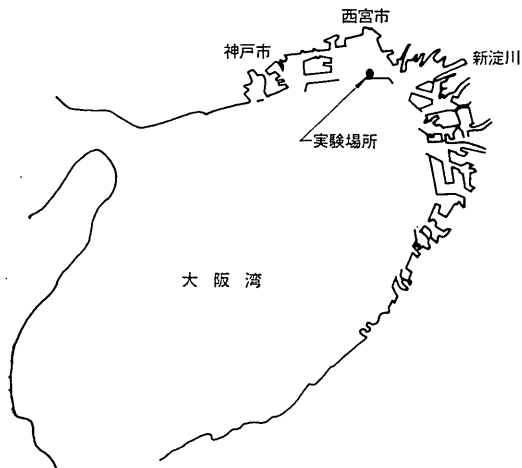


図-2 調査実施位置

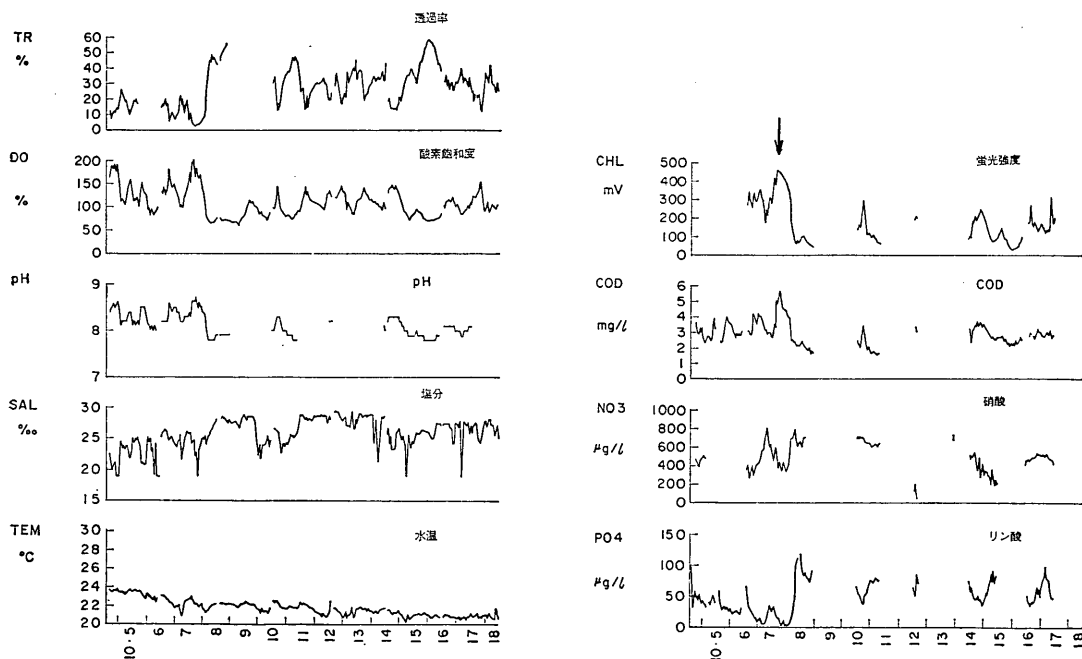


図-3 測定結果の経時変化曲線 (58年度調査)

水質自動観測データの解析と赤潮予測への応用

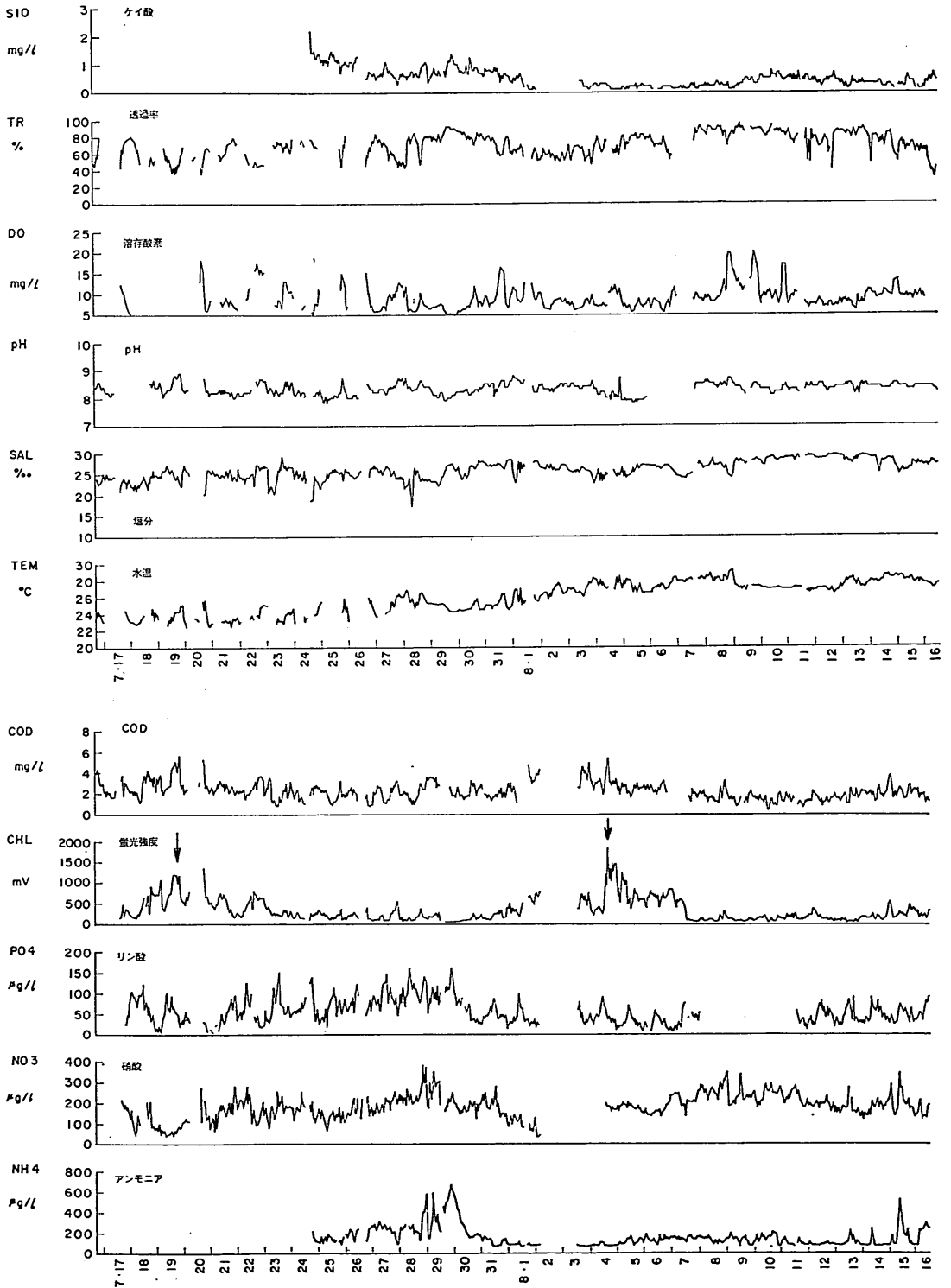


図-4 測定結果の経時変化曲線 (59年度調査)

村上 和 男

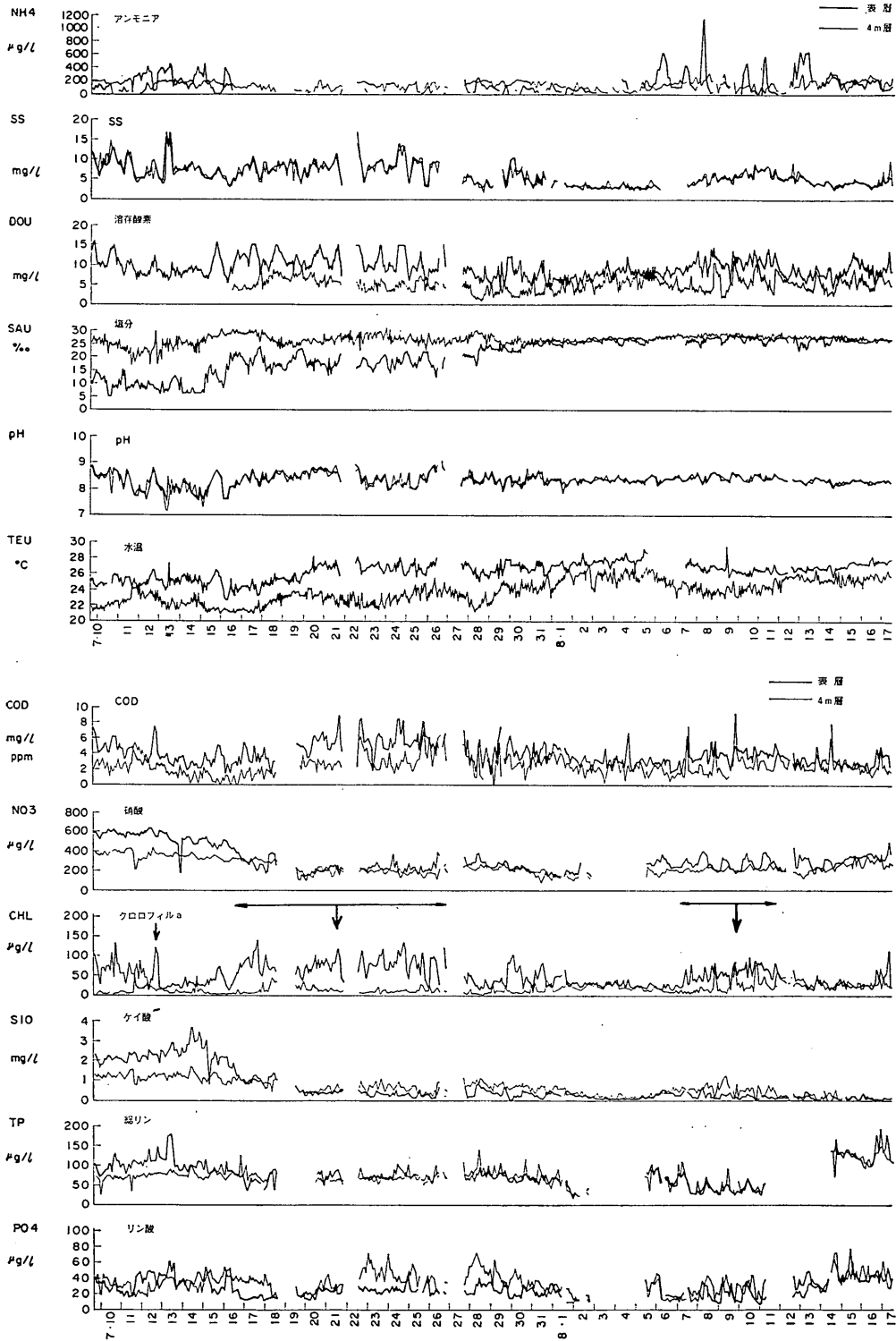


図-5 測定結果の経時変化曲線 (60年度調査)

表-3 各測定項目の最大値, 最小値, 平均値および標準偏差 (58年度データ)

	最大値	最小値	平均値	標準偏差
水 温(℃)	23.7	20.3	21.8	0.82
塩 分(%)	29.5	18.9	25.9	2.40
pH	8.7	7.8	8.14	0.24
酸素飽和度(%)	198	61	109.1	29.3
光束透過率(%)	58.5	2.0	27.7	12.9
リン酸(μg/l)	118	2	46.3	25.4
硝酸(μg/l)	800	38	487	158
C O D(mg/l)	5.7	1.6	2.91	0.73
蛍光強度(mV)	462	36	177.8	109.6

表-4 各測定項目の最大値, 最小値, 平均値および標準偏差 (59年度データ)

	最大値	最小値	平均値	標準偏差
水 温(℃)	29.1	22.6	26.1	1.66
塩 分(%)	29.5	17.1	25.9	2.04
pH	8.9	7.9	8.31	0.19
溶存酸素(mg/l)	20.1	4.9	8.94	2.79
光束透過率(%)	93.6	31.2	70.9	13.5
ケイ酸(mg/l)	2.2	0.1	0.49	0.34
アンモニア(μg/l)	660	59	151	101
硝酸(μg/l)	386	33	179	58
リン酸(μg/l)	162	2	54.8	30.8
蛍光強度(mV)	1,849	35	317	278
C O D(mg/l)	5.7	0.4	2.24	0.85

多変量解析を行う際には, おおのの水質項目の分布特性をよく把握する必要がある。また, 主成分分析を行う際には, 各項目のデータの分布形状が正規分布に近い方が情報の主成分への集約度が高くなると言われている。そこで, おおのの水質項目の分布特性についての検討を行った。図-6に示すのは, 60年度データの表層での水温とクロロフィル-aのヒストグラムである。水温に関しては, やや右側(高温側)に偏った分布となっているが, 比較的正規分布に近い分布特性を示している。これに対して, クロロフィル-aは勾配の急な右下がり

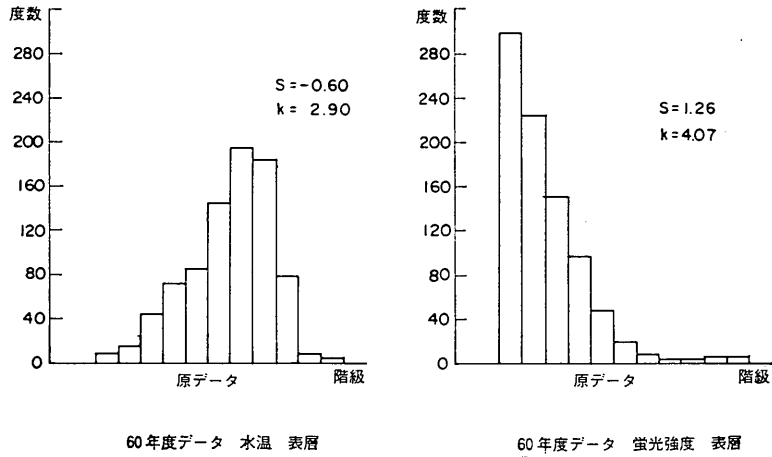
表-5(1) 調査項目の最大値, 最小値, 平均値, および標準偏差 (60年度データ, 上層)

	最大値	最小値	平均値	標準偏差
水 温 (℃)	28.7	22.7	26.27	1.15
pH	9.02	7.32	8.36	0.24
塩 分 (%)	28.8	5.0	20.65	6.59
溶存酸素 (mg/l)	15.7	3.9	9.32	2.39
浮遊物質 (mg/l)	16.9	1.9	6.19	2.66
アンモニア (ppb)	1,128	1	148.6	152.2
C O D (ppm)	8.8	1.3	3.88	1.41
リン酸態リン (ppb)	79.0	7.0	27.98	11.64
総リン (ppb)	193	15	79.8	30.5
ケイ酸 (ppm)	3.74	0.01	0.69	0.85
クロロフィル-a (ppb)	142	12	49.0	27.5
硝酸 (ppb)	631	80	316.8	131.3

表-5(2) 調査項目の最大値, 最小値, 平均値, および標準偏差 (60年度データ, 下層)

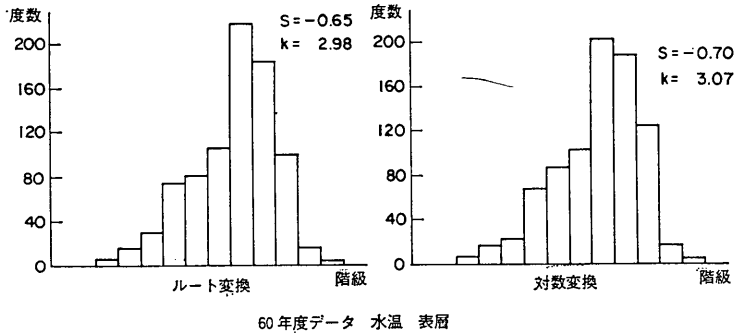
	最大値	最小値	平均値	標準偏差
水 温 (℃)	27.2	21.0	23.79	1.52
pH	8.92	7.13	8.35	0.25
塩 分 (%)	30.8	16.8	26.74	1.95
溶存酸素 (mg/l)	11.0	1.4	5.20	1.80
浮遊物質 (mg/l)	15.5	2.1	6.14	2.59
アンモニア (ppb)	319	1.0	128.9	64.5
C O D (ppm)	9.2	0.1	2.45	1.24
リン酸態リン (ppb)	73.0	9.0	33.9	12.8
総リン (ppb)	168	23	73.7	25.7
ケイ酸 (ppm)	1.72	0.01	0.62	0.40
クロロフィル-a (ppb)	88.0	2.0	17.8	14.0
硝酸 (ppb)	442	112	250.0	72.0

の分布特性となっている。これらのデータに, ルート変換あるいは対数変換を施してヒストグラムを求めた結果を図-7に示す。水温のデータに関しては, これらの変換による分布特性にあまり変化はみられないが, クロロフィル-aのデータに関しては, 対数変換により, は

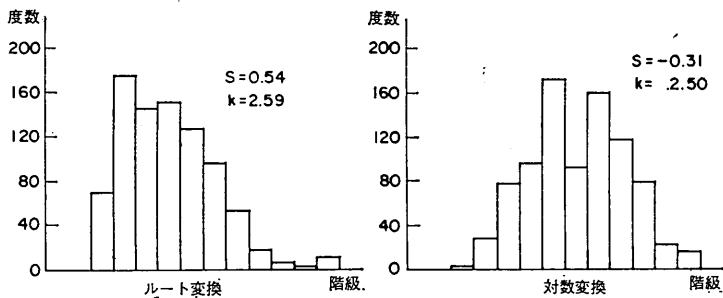


60年度データ 水温 表層
60年度データ 蛍光強度 表層
左：60年度データ 水温表層 右：60年度データ クロロフィル-a 表層

図-6 ヒストグラム



60年度データ 水温 表層



60年度データ 蛍光強度 表層

上：60年度データ 水温表層
下：60年度データ クロロフィル-a 表層

図-7 ヒストグラム (ルート変換, 対数変換)

ほぼ左右対称の分布特性を示すようになっている。図-6と図-7のヒストグラムに対するひずみ(歪)度(skewness)と尖度(kurtosis)を同図中に示す。これらの値から判断すると、水温に関しては原データのまま、またクロロフィル-aに関しては対数変換を施したデータの方が正規

分布に近い分布特性を示していることがわかる。

以上のようにして、58~60年度に実施されたおのおののデータに対してひずみ度と尖度を求め、原データ、ルート変換データ、あるいは対数変換データの中でどれが最も正規分布に近いかを検討した結果を表-6に示す。吉

表-6 水質項目の正規性の検討

	58年	59年	60年	No. 479 ⁹⁾	本報告
水 温	○	○	○	○	○
塩 分	○	○	○	○	○
pH	○	○	○	○	○
D O	L_n	L_n	R	L_n	L_n
S S	—	—	L_n	L_n	L_n
C O D	L_n	R	R	R	R
クロロフィル-a	L_n	L_n	L_n	—	L_n
リン酸態リン	○	R	R	○	○
総 リ ン	—	—	R	L_n	L_n
ア ン モ ニ ア	—	L_n	R	R	R
硝 酸	○	○	L_n	R	R
ケ イ 酸	—	L_n	R	—	R
光 束 透 過 率	○	○	—	R	—

○：原データ R ：ルート変換
 L_n ：対数変換 —：データがない

見ら³⁾によると、自然的因子に関連した項目に関しては正規分布に、また、都市活動に関連した項目は対数正規分布に従うとしている。また、宗宮らは⁵⁾、河川負荷や底泥のまき上げ等に影響される項目ほど対数正規分布になりやすいとしている。表-6の結果をみると、水温、塩分、pHが原データのまま、DO、SS、クロロフィル-a、TPが対数変換、COD、アンモニア、硝酸、ケイ酸がルート変換を施した場合が比較的正規分布に近い形となった。この結果から判断すると、自然的因子に関する項目は原データ、また、プランクトンの増殖、あるいは赤潮状態の結果を示すような、突発性の現象を示す水質指標

に関しては対数正規分布を示していると考えられる。また、栄養塩などの赤潮の原因物質、あるいは有機物に関する項目は、中間的なルート変換により正規分布に近く分布形状を示している。これらは、自然的な因子とプランクトン増殖のような突発性の因子の両方から影響を受けているためと思われる。

本報告では、58~60年度データの結果、および筆者らのお阪湾泉南沖での結果⁹⁾を勘案して表-6の最右欄のように決定した。

3.3 時系列と相関分析

各水質項目の経時変化曲線を図-3~図-5に示した。これらの図上に、現場実験時において観察者によって赤潮が発生したと思われる時期^{14), 15), 16)}を矢印で示す。この時期の各水質項目の特徴的な変動を検討する。

まず、赤潮が発生したと思われる時期に蛍光強度の強さが上昇していることがわかる。これは、クロロフィル-aが蛍光エネルギーを発する物質であること、また、図-8¹⁶⁾に示すように、クロロフィル-aと蛍光強度には比較的良い正の相関があることから、海水中のクロロフィル-aが増加した結果とみなしてよい。クロロフィル-aは光合成細菌以外のすべての植物に含まれているので、その量は植物プランクトン量を示す最もよい指標と考えられている。したがって、蛍光強度は赤潮の指標として用いることができると判断される。また、これ以後は蛍光強度をクロロフィル-a量として以後の解析を行うものとする。

図-3~図-5の経時変化曲線から、クロロフィル-a量が増加している時には、COD、DO、pHの値が増加し、 NH_4 、 PO_4 等の栄養塩の濃度が減少していることがわかる。これは、海水中の植物プランクトンが、無機栄養塩のNとPを消費して繁殖し、その結果として、海水中の有機物の増加、および植物プランクトンの光合成活動によるDO、pHの上昇であると考えられる。このような

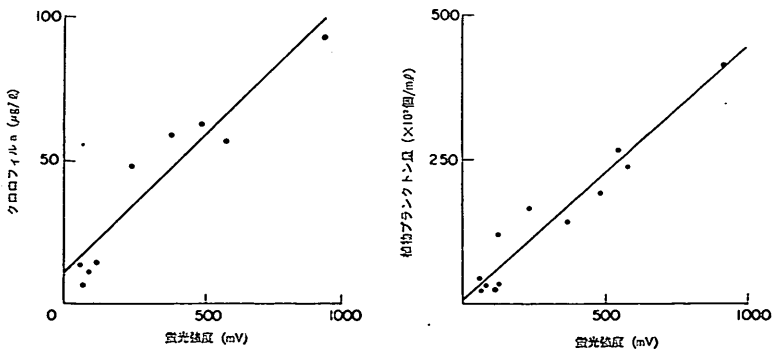


図-8 植物プランクトン量、およびクロロフィル-a量と蛍光強度の相関¹⁶⁾

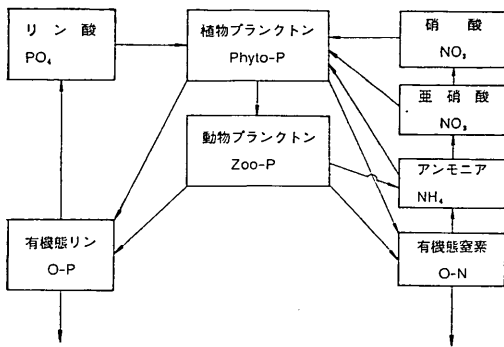


図-9 栄養塩の流れ⁶⁾

現象は、図-9に示すような栄養塩の流れ⁶⁾、すなわち、赤潮発生のメカニズムによく合致したものになっているものと思われる。

このような水質データ項目の相互の関連を調べるために、おのおのの項目間の相関を求めた。その結果を表-7～表-9に示す。これらの相関表に用いたデータは、変換を施していない原データを用いている。これらの表において、相関の高いものについては数字を()で囲んでいる。各年度において共通して相関の高いもののうち、正の相関をもつものはDOとpH、CODとクロロフィル-a、また負の相関をもつものは、クロロフィル-aとPO₄、

表-7 水質項目間の相関 (58年度データ, 原データ)

	TEM	SAL	pH	DO	TR	PO ₄	NO ₃	COD	CHL
水 温 TEM	*								
塩 分 SAL	-0.343	*							
pH pH	(0.509)	-0.492	*						
溶 存 酸 素 DO	0.375	-0.284	(0.945)	*					
光 束 透 過 率 TR	-0.427	0.377	(-0.932)	(-0.883)	*				
リ ン 酸 PO ₄	-0.265	0.348	(-0.658)	(-0.529)	(0.759)	*			
硝 酸 NO ₃	0.091	0.004	-0.264	-0.309	0.302	0.026	*		
C O D COD	0.154	-0.321	(0.813)	(0.785)	(-0.797)	-0.612	-0.365	*	
蛍 光 強 度 CHL	0.463	-0.289	(0.931)	(0.918)	(-0.924)	-0.756	-0.231	(0.864)	*

表-8 水質項目間の相関 (59年度データ, 原データ)

	TEM	SAL	pH	DO	TR	S ₂ O	NH ₄	NO ₃	PO ₄	CHL	COD
水 温 TEM	*										
塩 分 SAL	0.340	*									
pH pH	0.162	0.108	*								
溶 存 酸 素 DO	0.222	0.111	(0.505)	*							
光 束 透 過 率 TR	0.213	0.336	-0.360	-0.254	*						
ケ イ 酸 S ₂ O	(-0.790)	-0.259	-0.303	-0.232	0.041	*					
ア ン モ ニ ア NH ₄	-0.465	-0.288	-0.224	-0.342	0.134	0.470	*				
硝 酸 NO ₃	0.354	0.065	-0.009	0.128	0.403	-0.062	0.279	*			
リ ン 酸 PO ₄	-0.371	-0.283	-0.211	-0.310	0.162	(0.571)	(0.661)	0.323	*		
蛍 光 強 度 CHL	-0.040	-0.254	0.018	0.120	(-0.548)	-0.419	-0.289	-0.354	-0.431	*	
C O D COD	-0.097	-0.381	0.221	0.162	(-0.504)	-0.271	-0.070	-0.279	-0.341	(0.695)	*

表-9 水質項目間の相関 (60年度データ, 原データ)

	TEU	TEL	pH	SAU	SAL	DOU	DOL	SS	NH ₄	COD	PO ₄	TP	S ₂ O	CHL	NO ₃
水 温(表) TEU	*														
水 温(4 m) TEL	(0.633)	*													
pH pH	0.388	0.058	*												
塩 分(表) SAU	(0.562)	(0.670)	0.207	*											
塩 分(4 m) SAL	0.171	-0.111	0.199	0.481	*										
D O(表) DOU	0.027	-0.333	0.475	-0.175	0.122	*									
D O(4 m) DOL	-0.006	0.251	0.206	0.106	-0.187	0.257	*								
S S SS	-0.233	-0.519	0.148	(-0.589)	-0.160	(0.572)	0.065	*							
アモニア NH ₄	-0.128	-0.002	-0.262	-0.103	-0.001	-0.147	-0.210	0.002	*						
C O D COD	0.162	-0.040	0.263	-0.027	-0.090	0.222	0.071	0.257	-0.145	*					
リン 酸 PO ₄	-0.055	-0.121	-0.308	-0.098	0.035	-0.153	-0.263	-0.074	0.420	-0.241	*				
総 リ ン TP	-0.041	0.055	-0.245	-0.184	-0.196	-0.109	-0.014	-0.002	0.239	-0.009	(0.569)	*			
ケ イ 酸 S ₂ O	(-0.680)	(-0.636)	-0.324	(-0.810)	-0.414	0.087	-0.299	0.399	0.203	-0.123	0.223	0.330	*		
蛍 光 強 度 CHL	0.047	-0.070	0.237	0.000	0.017	0.337	0.018	0.276	-0.217	(0.657)	-0.438	-0.035	-0.111	*	
硝 酸 NO ₃	-0.484	-0.358	-0.284	(-0.612)	-0.368	0.045	-0.051	0.199	0.310	-0.041	0.248	0.467	(0.815)	0.042	*

光束透過率*とDOなどがあげられる。これらの代表的な例として、CODとクロロフィル-a、およびPO₄とクロロフィル-aの相関図を図-10、図-11に示す。これらは、かなり相関が高い場合の例である。しかし、クロロフィル-aとpHのように、58年度のデータでは相関が高いのに59年度のデータではあまり相関がないような結果を示す場合もある。これらは、観測時期の相違による差とも考えられるが、水質データ相互の関連も、そう単純ではないためによるものと思われる。

図-10と図-11に示した相関の比較的高いCODとクロロフィル-a、およびクロロフィル-aとPO₄についての1次回帰係数を求めたものを表-10に示す。夏期に実施した59、60年度の方がクロロフィル-a量の増減に大きな変動があるために、回帰係数もそれらの結果を反映したものとなっている。なお、ここで、クロロフィル-aと蛍光強度との関係、および植物プランクトン量と蛍光強度との関係は、図-8より、以下に示した¹⁰⁾関係式を用いた。

$$\begin{aligned} & \text{植物プランクトン量 (10}^2 \text{ cells/ml)} \\ & = 0.438 \times \text{蛍光強度 (mV)} + 9.5 \quad \dots\dots(4) \end{aligned}$$

* 光束透過率は60年度の測定においては濁度に変換しているため相関係数の符号は逆転している。

$$\text{クロロフィル-a} (\mu\text{g/l})$$

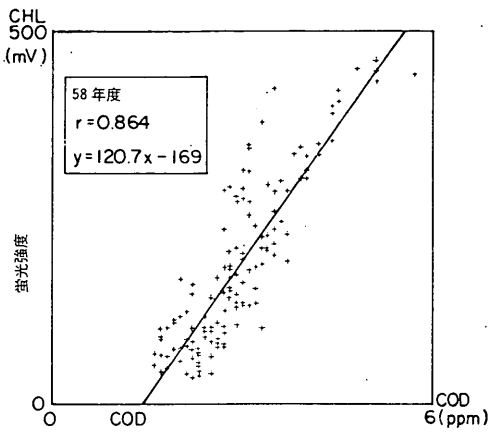
$$= 0.0955 \times \text{蛍光強度 (mV)} + 11.1 \quad \dots\dots(4)$$

4. 多変量解析法による水質データの解析

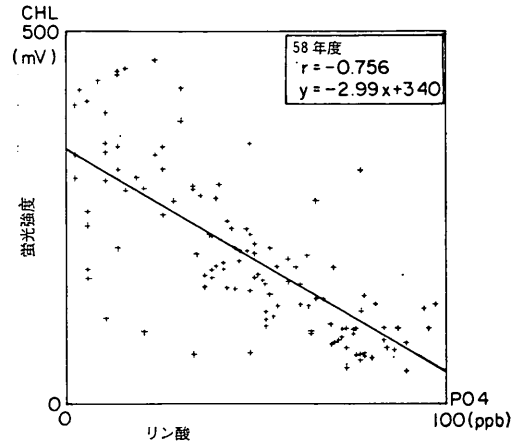
4.1 主成分分析結果

水質データを表-6の右欄に示したように変換したものをを用いて主成分分析を実施した。表-11に示すのは60年7月9日～8月17日の40日間にわたって実施されたデータ相互の相関係数である。右上に示すのが表層でのデータの相関係数であり、左下に示すのが4m層のものである。表層と4m層での相関係数の値は、全般的には類似したものとなっているが、項目間によっては逆の符号になっているものもある。特に、塩分に関する項が表層と4m層で大きく異なっている。

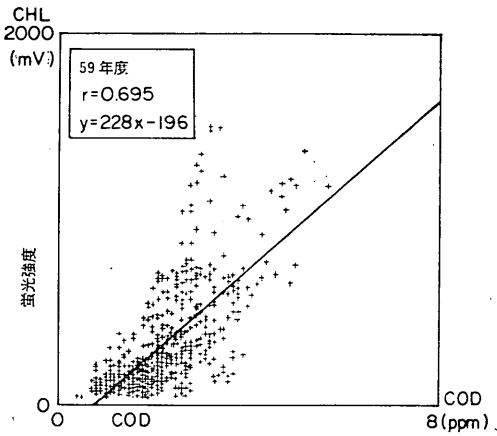
表-12には、固有値と累積寄与率を示す。この表において、固有値が1.0以上である主成分は、その主成分が持つ情報の寄与率が平均値以上であることを示している。したがって、解析は固有値が1.0以上の主成分に対して行えばよいことを意味する。次に、おのおの水質項目と固有値が1.0以上の主成分との相関を示す固有ベクトルの結果を同表に示す。この表から、第1主成分と第2主成分の因子負荷量の分布を表したものが図-12(1)



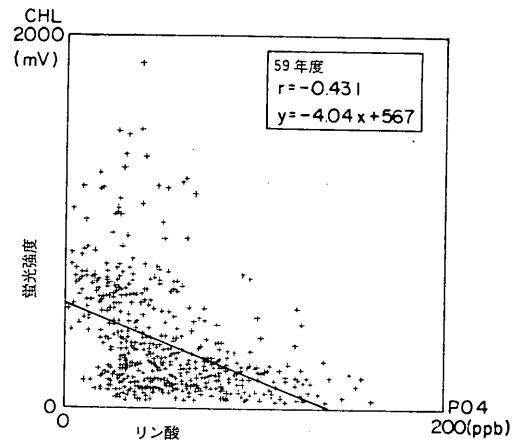
(1) : 58年度データ



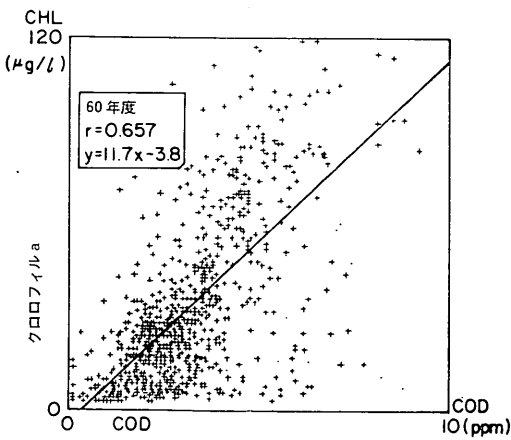
(1) : 58年度データ



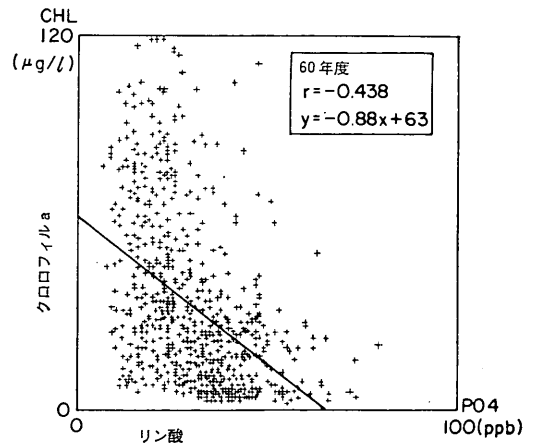
(2) : 59年度データ



(2) : 59年度データ



(3) : 60年度データ



(3) : 60年度データ

図-10 相関図 (クロロフィル-aとCOD)

図-11 相関図 (クロロフィル-aとPO₄)

水質自動観測データの解析と赤潮予測への応用

表-10 クロロフィル-a と COD, およびクロロフィル-a と PO₄-P の回帰直線と相関係数

	クロロフィル-a ^(ppm) —COD ^(ppm)		クロロフィル-a ^(ppm) —PO ₄ -P ^(ppb)	
	回 帰 直 線	r	回 帰 直 線	r
58 年 度	$y=11.6x-5.0$	0.864	$y=-0.29x+43.6$	-0.756
59 年 度	$y=21.8x-7.6$	0.695	$y=-0.39x+65.2$	-0.431
60 年 度	$y=11.7x-3.8$	0.657	$y=-1.02x+64.3$	-0.438

表-11 データ相互の相関係数表 (右上:表層, 左下:4m層)

	TE	pH	SA	DO	SS	NH	CO	PO	TP	SI	CH	NO
水 温 TE	1.000	0.454	0.551	0.129	-0.146	-0.208	0.296	-0.158	-0.168	-0.763	0.205	-0.551
水素イオン濃度 pH	-0.076	1.000	0.281	0.451	0.189	-0.530	0.445	-0.534	-0.338	-0.359	0.549	-0.389
塩 分 SA	-0.547	-0.012	1.000	-0.054	-0.541	-0.108	-0.041	-0.184	-0.422	-0.857	0.026	-0.660
溶 存 酸 素 DO	0.302	0.189	-0.161	1.000	0.544	-0.476	0.381	-0.397	-0.145	-0.081	0.671	-0.059
浮 遊 物 質 SS	-0.492	0.247	0.107	0.097	1.000	-0.329	0.436	-0.208	0.102	0.318	0.595	0.153
ア ン モ ニ ア NH	-0.048	-0.094	0.174	-0.535	-0.161	1.000	-0.430	0.710	0.344	0.267	-0.676	0.537
化学的酸素要求量 CO	0.156	0.202	-0.265	0.236	0.158	-0.208	1.000	-0.247	-0.094	-0.144	0.589	-0.305
リ ン 酸 PO	-0.340	-0.250	0.361	-0.497	-0.002	0.568	-0.120	1.000	0.709	0.168	-0.553	0.464
総 リ ン TP	0.007	-0.237	-0.007	-0.143	-0.093	0.318	-0.065	0.623	1.000	0.280	-0.262	0.515
ケ イ 酸 SI	-0.769	0.038	0.342	-0.486	0.346	0.114	-0.269	0.154	-0.230	1.000	-0.204	0.719
クロロフィル-a CH	0.588	0.001	-0.272	0.680	-0.195	-0.366	0.201	-0.457	-0.067	-0.673	1.000	-0.315
硝 酸 NO	-0.226	-0.140	0.272	-0.012	0.017	0.327	-0.375	0.290	0.485	0.071	-0.022	1.000

である。

4 m層についての固有値と累積寄与率, および固有ベクトルの結果を表-13に, また, 第1, 第2主成分の因子負荷量の分布を図-12(2)に示す。4 m層については, 1.0以上の固有値を示したものは第4主成分までであった。

表層での結果は, 第1主成分が40%の寄与率を持ち, 第3主成分までで全体の76%の情報を集約している。また, 4 m層においては, 情報の集約度は若干低く, 第1主成分で31.6%の寄与率を持ち, 第4主成分までで72.6%の情報を集約している結果となっている。

表-12, 13, および図-12(1), (2)の結果から判断すると, 表層での第1主成分は, クロロフィル-a (CH), 溶存酸素 (DO), COD, pH の正の相関が高く, ケイ酸 (SI), 硝酸 (NO), リン酸 (PO) 等の負の相関が高いことから, 植物プランクトンによる赤潮に関する総合特

性値であると思われる。また, 表層での第2主成分は, 濁度 (SS) との正の相関が高く塩分 (SA) との負の相関が高いことから河川起源の水塊を表す特性値であると思われる。4 m層に関しても, 第1主成分は表層の場合と同様に植物プランクトンによる赤潮に関する総合特性値であると思われる。第2主成分は, 塩分を除いては表層での第2主成分の特性 (ただし, 符号は逆) と類似しており, 濁りを示す特性値となっているものと思われる。これは, 河川起源の水塊は海水と比べて比重が軽いので表層の結果にはかなりの影響を及ぼすが, 4 m層にはあまり影響を与えないためと考えられる。

これまでの解析において, データは60年7月から8月の40日間に実施されたものを全部用いて行った。しかし, 60年度の観測は7月前半は梅雨期であり, 観測点での海水の塩分がかなり低かったこと, また, 8月は真夏のデータであること, および台風の通過により上下層の

表-12 固有値, 累積寄与率, および固有ベクトル (60年度表層)

	固有値	寄与率 (%)	累積寄与率 (%)	主成分	1	2	3
1	4.801	40.0	40.0	1 TE	0.590	-0.448	0.483
2	3.000	25.0	65.0	2 PH	0.754	0.108	0.098
3	1.320	11.0	76.0	3 SA	0.498	-0.782	0.019
4	0.678	5.6	81.6	4 DO	0.540	0.542	0.136
5	0.558	4.7	86.3	5 SS	0.210	0.848	0.170
6	0.480	4.0	90.3	6 NH	-0.773	-0.291	0.168
7	0.368	3.1	93.4	7 CO	0.556	0.376	0.399
8	0.280	2.3	95.7	8 PO	-0.739	-0.185	0.559
9	0.215	1.8	97.5	9 TP	-0.584	0.191	0.652
10	0.131	1.1	98.6	10 SI	-0.629	0.648	-0.300
11	0.115	1.0	99.6	11 CH	0.740	0.509	0.102
12	0.055	0.4	100.0	12 NO	-0.752	0.433	0.053

60年度表層

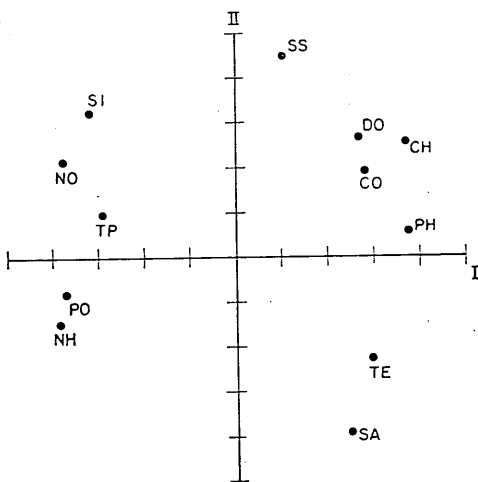


図-12(1) 因子負荷量の分布: 60年度表層データ

60年度4m層

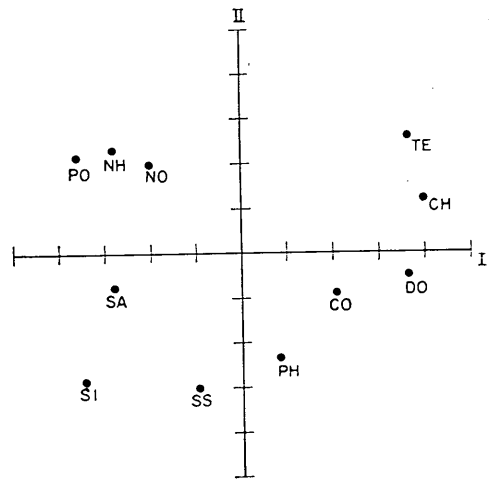


図-12(2) 因子負荷量の分布: 60年度4m層データ

混合が行われたことなど、観測期の前半と後半とでは、かなり環境条件が相違していたことが予想される。

そこで、60年度調査データの前半と後半の値の比較を行った。表-14に、観測期前半と後半での水温、塩分、DOの平均値と標準偏差を示す。観測期前半の表層での塩分の値が16.0%と後半の値と比べて極端に低いことがわかる。また、水温に関しても、前半の方が後半に比べて2~3℃低く、また表層と4m層での水温差も前半の方が大きい。図-13には観測期間中の降雨量、および水温と塩分の表層と4m層とでの差を示す。降雨量は7月前半の梅雨時期と、8月の台風による影響を受けた時期

にあり、7月の後半にはほとんどなかった。しかし、塩分の表層と4m層との差は、7月前半に大きく、後半になると徐々にではあるが減少していき、まだ差は存在する。しかし、8月に入ると、表層と4m層での塩分にはほとんど差がなくなっている。これは、前半の梅雨時期には淀川から大量の淡水が流れ込み、上層で軽く、下層で重い鉛直分布を示したのに対し、後半には、淡水の流入量が減少したことと、台風による上下の混合が行われた結果と考えられる。

表-14および図-13でみたように、観測期の前半と後半では周囲の環境がかなり変化していることがわかる。こ

表-13 固有値, 累積寄与率, および固有ベクトル (60年度 4 m層)

	固有値	寄与率 (%)	累積寄与率 (%)		1	2	3	4
1	3.793	31.6	31.6	1 TE	0.726	0.517	-0.273	-0.042
2	2.331	19.4	51.0	2 PH	-0.165	-0.474	0.110	0.309
3	1.396	11.6	62.6	3 SA	-0.559	-0.152	0.367	-0.227
4	1.218	10.1	72.7	4 DO	0.719	-0.097	0.568	-0.019
5	0.876	7.3	80.0	5 SS	-0.187	-0.602	0.388	0.398
6	0.755	6.3	86.3	6 NH	-0.570	0.463	-0.222	0.133
7	0.490	4.1	90.4	7 CO	0.414	-0.175	-0.117	0.734
8	0.423	3.5	93.9	8 PO	-0.716	0.427	0.025	0.361
9	0.239	2.0	95.9	9 TP	-0.307	0.690	0.304	0.396
10	0.223	1.9	97.8	10 SI	-0.693	-0.569	-0.106	-0.175
11	0.143	1.2	99.0	11 CH	0.795	0.244	0.337	-0.114
12	0.114	1.0	100.0	12 NO	-0.400	0.397	0.648	-0.155

のようなことを考慮に入れて、観測期間の前半では7月13日～25日まで、また後半では8月1日～12日までと設定し、今後のデータの解析を実施した。

このように観測時期を限定した場合のデータに対する主成分分析の結果を、観測期前半のデータに関しては表-15, 16に、また後半のデータに関しては表-17, 18に示す。

前半のデータを用いた結果から上下層での比較を行うと、全体的な傾向はそう大きく変わるものではないが、塩分と pH の相関係数においてかなりの相違がみられる。これは、塩分については前述したように、上下層でかなりの差がみられたことによるものと思われる。特に、塩分と無機栄養塩との相関係数は上下層で符号が逆転して

表-14 観測期前半と後半での水温, 塩分, DOの
平均値と標準偏差

	前 半		後 半	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
水 温 (表 層)	25.6℃	1.20℃	27.0℃	0.70℃
水 温 (4 m層)	22.4℃	0.89℃	25.0℃	1.00℃
塩 分 (表 層)	16.0%	4.60%	26.5%	1.20%
塩 分 (4 m層)	26.8%	1.96%	27.4%	1.01%
D O (表 層)	10.4mg/l	2.46mg/l	9.0mg/l	2.11mg/l
D O (4 m層)	5.4mg/l	1.44mg/l	5.6mg/l	1.90mg/l

注) 前半とは 7月13日～7月25日まで
後半とは 8月1日～8月12日までのデータとする。

おり、表層では河川起源の栄養塩が多く、4 m層では底層からの溶出等の栄養塩が多いものと考えられる。また、pH に関しては、表層では他の水質項目との相関が極めて高いのに、4 m層ではあまり高くない。これは、植物プランクトンによる光合成が表層において活発に行われているが、4 m層になると光合成活動が若干鈍くなることを示しているものと思われる。

前半・表層における第1主成分は、植物プランクトンの存在を示すクロロフィル-a, DO, COD, pH などと強い正の相関を示し、植物プランクトンによって消費されたと思われる NH₄, PO₄, S₂O₃, NO₃ 等の栄養塩と強い負の相関を示している。したがって、表層での前半における第1主成分は植物プランクトンによる赤潮の存在を示す水質の総合指標とみなすことができ、その寄与率も57.3%と大きい。ゆえに、この第1主成分によって、前半・表層のデータの57.3%の情報を集約していることになる。第2主成分については、濁度との相関が正で高く、塩分との相関が負で高いことから、河川起源の濁った水塊を示す指標であると思われる。

観測期前半の4 m層のデータに関しては、第1主成分については、DO, COD, クロロフィル-aと正の相関を示し、栄養塩とは負の相関を示していることから、表層と同じく植物プランクトンによる赤潮の存在を示す総合指標と考えられるが、その情報の集約度は38.6%と表層に比べて小さい。第2主成分については、NH₄, PO₄, CODと正の相関を示し、S₂O₃, NO₃, クロロフィル-aと負の相関を示している。この特性値は、DO, クロロフィル-aとCODが逆相関を示していることから、植物プランクトンに関連しない有機物汚染、あるいは、プランクト

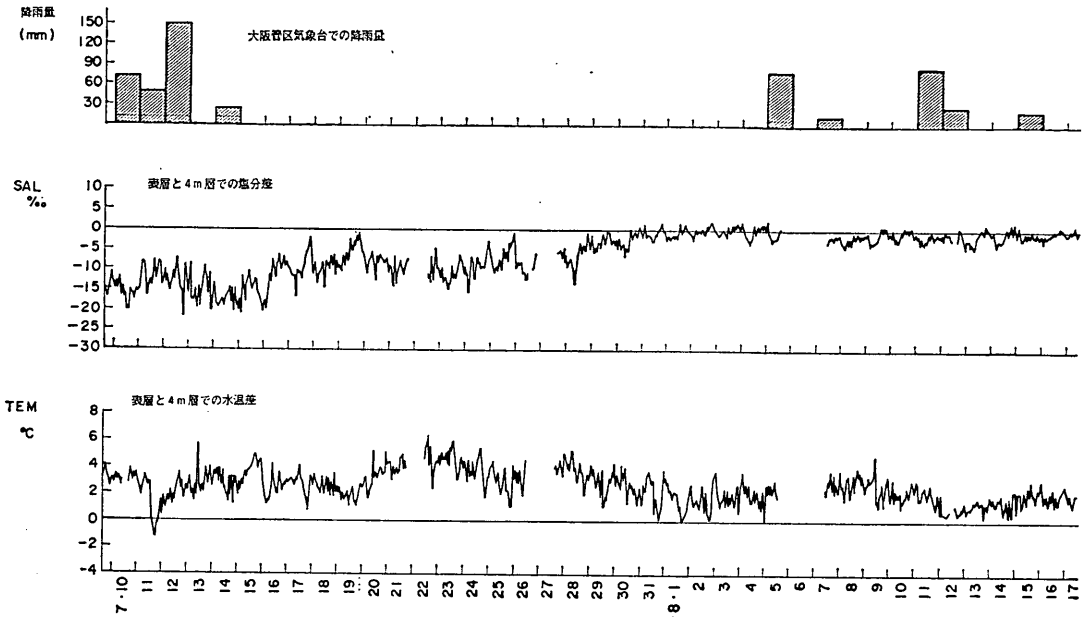


図-13 降雨量と表層と4m層での塩分差および水温差(60年)

表-15 データ相互の相関係数表(60年度, 前半, 右上: 表層, 左下: 4m層)

	TE	pH	SA	DO	SS	NH	CO	PO	TP	SI	CH	NO
水 温 TE	1.000	0.511	0.155	0.370	0.418	-0.471	0.745	-0.237	-0.104	-0.623	0.536	-0.559
pH pH	0.078	1.000	0.436	0.610	0.239	-0.686	0.524	-0.636	-0.442	-0.483	0.642	-0.563
塩 分 SA	-0.833	-0.144	1.000	0.378	-0.153	-0.712	0.440	-0.549	-0.619	-0.773	0.595	-0.773
溶 存 酸 素 DO	0.303	0.327	-0.463	1.000	0.459	-0.698	0.434	-0.665	-0.382	-0.370	0.747	-0.498
S S SS	0.002	0.163	0.043	0.023	1.000	-0.220	0.331	-0.126	0.125	-0.167	0.460	-0.269
ア ン モ ニ ア NH	-0.273	-0.023	0.328	-0.613	-0.050	1.000	-0.555	0.810	0.636	0.745	-0.891	0.736
C O D CO	0.547	0.156	-0.375	0.151	0.053	-0.023	1.000	-0.249	-0.236	-0.721	0.577	-0.706
リ ン 酸 PO	-0.279	-0.290	0.523	-0.754	-0.009	0.620	0.054	1.000	0.704	0.461	-0.758	0.516
総 リ ン TP	-0.376	-0.202	0.304	-0.257	0.105	0.089	-0.412	0.099	1.000	0.526	-0.532	0.555
ケ イ 酸 SI	-0.745	-0.121	0.544	-0.290	0.108	0.221	-0.613	0.134	0.381	1.000	-0.729	0.893
ク ロ ロ フ ィ ル - a CH	0.436	0.065	-0.603	0.719	-0.114	-0.565	0.149	-0.609	-0.200	-0.311	1.000	-0.732
硝 酸 NO	-0.714	0.002	0.392	-0.091	-0.113	0.120	0.701	-0.133	0.447	0.806	-0.127	1.000

ンの死骸による酸素消費などの結果を示しているものと考えられるが、しかし、濁度とは相関がないことなど、あまり良くわからない点もある。

後半のデータに関しては、真夏の時期での調査であり、降雨量も少なかったことから、水温変化および塩分

変化は比較的小さい環境下でのものであった。このような環境下では、内湾水は高温・低塩分であり、外海水は低温・高塩分であることから、塩分と水温は逆相関となる。後半においても、植物プランクトン量の指標となるクロロフィル-a(すなわち蛍光強度)とpH, DO, SS,

表-16 主成分の固有ベクトル (60年度, 前半, 左: 表層, 右: 4 m層)

表 層			4 m 層							
		1	2	3		1	2	3	4	
1	TE	0.621	0.588	-0.253	1	TE	0.844	0.298	-0.115	0.150
2	pH	0.757	0.063	0.206	2	pH	0.252	-0.151	0.758	-0.433
3	SA	0.739	-0.474	-0.301	3	SA	-0.825	0.049	0.127	-0.055
4	DO	0.728	0.137	0.508	4	DO	0.683	-0.567	0.134	-0.087
5	SS	0.327	0.736	0.359	5	SS	-0.016	0.011	0.701	0.657
6	NH	-0.928	0.141	-0.123	6	NH	-0.544	0.528	0.103	-0.281
7	CO	0.721	0.404	-0.389	7	CO	0.586	0.567	0.162	-0.030
8	PO	-0.765	0.337	-0.435	8	PO	-0.565	0.717	-0.071	0.024
9	TP	-0.650	0.572	-0.065	9	TP	-0.512	-0.274	-0.122	0.494
10	SI	-0.853	0.009	0.450	10	SI	-0.768	-0.435	0.087	-0.010
11	CH	0.917	0.077	0.201	11	CH	0.698	-0.469	-0.226	0.017
12	NO	-0.881	-0.004	0.310	12	NO	-0.640	-0.667	-0.021	-0.185
固有値		6.873	1.765	1.281	固有値		4.633	2.480	1.229	1.011
寄与率%		57.3	14.7	10.7	寄与率%		38.6	20.7	10.2	8.4
累積寄与率%		57.3	72.0	82.7	累積寄与率%		38.6	59.3	69.5	77.9

表-17 データ相互の相関係数表 (60年度, 後半, 右上: 表層, 左下: 4 m層)

	TE	pH	SA	DO	SS	NH	CO	PO	TP	SI	CH	NO
水 温 TE	1.000	0.106	-0.475	-0.075	-0.537	-0.037	-0.118	-0.158	-0.027	-0.165	-0.350	-0.216
PH pH	-0.353	1.000	0.251	0.699	0.471	-0.489	0.339	-0.647	-0.416	-0.657	0.567	-0.144
塩 分 SA	-0.872	0.365	1.000	0.405	0.315	-0.527	-0.012	-0.390	-0.093	-0.411	0.249	-0.144
溶 存 酸 素 DO	0.253	0.286	-0.087	1.000	0.608	-0.163	0.293	-0.311	-0.101	-0.549	0.726	0.347
S SS	-0.599	0.390	0.560	0.121	1.000	0.041	0.452	-0.008	0.007	-0.372	0.862	0.364
ア ン モ ニ ア NH	-0.468	0.084	0.422	-0.639	0.031	1.000	0.056	0.788	0.362	0.571	-0.035	0.743
C O D CO	0.012	0.287	-0.019	0.483	0.341	-0.452	1.000	0.004	0.144	-0.136	0.531	0.006
リ ン 酸 PO	-0.421	-0.019	0.451	-0.418	0.085	0.599	-0.423	1.000	0.643	0.665	-0.179	0.642
総 リ ン TP	0.043	-0.145	0.024	-0.077	-0.067	0.079	-0.165	0.647	1.000	0.312	-0.018	0.350
ケ イ 酸 SI	-0.685	-0.013	0.543	-0.663	0.181	0.616	-0.454	0.530	0.038	1.000	-0.418	0.258
クロロフィル-a CH	0.116	0.174	-0.068	0.657	0.329	-0.665	0.695	-0.515	-0.196	-0.580	1.000	0.289
硝 酸 NO	-0.622	0.285	0.670	-0.042	0.592	0.377	-0.109	0.431	0.180	0.375	-0.097	1.000

COD とは高い正の相関を示している。

後半の表層における第1主成分は、前半の場合と同様に植物プランクトンによる赤潮を示す総合特性値である。この時の赤潮はケイ藻によるものであったと報告¹⁶⁾されており、事実、珪酸とクロロフィル-aとは逆相関になっている。また、第2主成分は海水の濁りの程度を示す

特性値であると思われる。

後半の4 m層に関する場合、第1主成分は表層とよく似た特性値を示していると思われる。第2主成分についても、表層と同様に濁りを示す特性値であると思われるが、表層の場合は栄養塩と高い正の相関を示しているのに対し、4 m層では塩分、pHと高く、栄養塩とはあま

表-18 主成分の固有ベクトル (60年度, 後半, 左: 表層, 右: 4 m層)

表 層		4 m 層							
		1	2	3		1	2	3	
1	TE	-0.143	-0.478	-0.784	1	TE	0.748	-0.545	0.157
2	pH	0.863	-0.007	-0.334	2	pH	-0.103	0.635	-0.083
3	SA	0.573	-0.005	0.682	3	SA	-0.697	0.582	-0.008
4	DO	0.738	0.426	-0.193	4	DO	0.634	0.499	0.286
5	SS	0.592	0.710	0.105	5	SS	-0.280	0.803	0.027
6	NH	-0.642	0.618	-0.246	6	NH	-0.807	-0.190	-0.188
7	CO	0.335	0.432	-0.276	7	CO	0.506	0.619	0.029
8	PO	-0.752	0.587	0.025	8	PO	-0.770	-0.151	0.515
9	TP	-0.434	0.455	0.037	9	TP	-0.252	-0.214	0.899
10	SI	-0.812	0.169	0.161	10	SI	-0.856	-0.078	-0.263
11	CH	0.679	0.632	-0.091	11	CH	0.642	0.618	0.102
12	NO	-0.240	0.816	-0.117	12	NO	-0.625	0.501	0.222
固 有 値		4.446	3.127	1.426	固 有 値		4.634	3.059	1.354
寄 与 率%		37.1	26.1	11.9	寄 与 率%		38.6	25.5	11.3
累 積 寄 与 率%		37.1	63.2	75.1	累 積 寄 与 率%		38.6	64.1	75.4

り高くない相関となっており、表層とは若干異なった濁りの特性値を示しているものと思われる。

以上、表層と4m層のデータを前半と後半とに分けて主成分分析した結果を総括すると、どの場合においても、第1主成分の特性は植物プランクトンによる赤潮の存在を示す総合特性値を示していると思われ、pH, DO, SS, COD, クロロフィル-aとは正の相関をもち、N, P, Siなどの栄養塩とは負の相関を示している。前半と後半での結果で大きく異なるのは、これらの赤潮を示す特性値に対する水温の相関である。一般的には、夏期においては、低温・高塩分の外海水と高温・低塩分の内湾水との識別がなされるが、梅雨期においては比較的水温の低い淡水が流入したことにより、表層における水温の特性が前半と後半とで異なったものになった。塩分に関しては、前半と後半での特性は同じで、表層においては植物プランクトンと正の相関を示し、4m層においては負の相関を示している。このことは、上下層に塩分差がついた時、すなわち、海水が安定状態になった時に赤潮が発生したものと推察される。

また、これらの解析において、60年度前半の表層のデータにおける第1主成分の情報の集約度が大きく、植物プランクトンによる赤潮の最も典型的なパターンを呈したものと予想される。

4.2 スコアによる水質の総合指標

主成分分析の主要な目的は、総合特性値のスコアを求めて、得られたデータの分類あるいはデータの順位づけ

等を行うことにある。

スコアとは、個々の観測で得られる水質データより計算される主成分の値で、次式によって求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} z_{a1} &= l_{11}x_{a1} + l_{12}x_{a2} + \dots + l_{1p}x_{ap} \\ z_{a2} &= l_{21}x_{a1} + l_{22}x_{a2} + \dots + l_{2p}x_{ap} \\ &\vdots \end{aligned} \right\} \dots (43)$$

ここにおいて、

z_{a1}, z_{a2} : 個々の水質データより求められる第1主成分と第2主成分のスコア、

l_{1i}, l_{2i} : それぞれの主成分に対する固有ベクトル、

x_{ai} : 標準化された水質データの値

$$\left(= \frac{\text{測定値} - \text{平均値}}{\text{標準偏差}} \right)$$

である。式(43)によって求められた第1主成分と第2主成分のスコアを各測定時ごとに計算し、図上にプロットしたのが図-14、図-15である。図-14が表層についてであり、図-15が4m層についてである。横軸が第1主成分のスコアを、縦軸が第2主成分のスコアを示す。なお、データは表-6に示すように変換されたものを用いている。また、水質項目に何らかの欠測があった時刻のデータについては、この解析からは除外してある。

これらの図から、観測期間全体を通してのスコアの散布図は第1象限から第4象限まで万遍なく分布しているが、これらのある観測期間別に分けると、表層では右上

りの、また4m層についても右上がりの細長い楕円で囲まれた部分に分割できることがわかる。そして、例えば表層の図-14の散布図をみると、期間が経過するにつれて、右上がりの楕円状の塊りは徐々に第2象限から第4象限へと移る傾向にあることがわかる。4m層の散布図についても、楕円のもつ傾きが若干小さくなってはいること、および表層ほどは明確に分離していないことなどの相違点はあるが、全体的には表層とほぼ類似の傾向を示していると言える。これは、図-13からもわかるように、梅雨期の前半と真夏期の後半での水温、塩分などの周囲の環境の変化に影響されたことを反映して、表層では前半と後半での水質に明確に差が現れ、4m層ではその影響が少し薄められた結果であると思われる。

このように、スコアを用いて水質の総合特性値を求める試みはいくつか行われている。吉見ら³⁾、星野ら¹⁷⁾は、これをWQI (Water Quality Index) と呼んで水質の解析に用いている。WQIを算定する際に、式(4)からもわかるように、pHのように標準偏差が非常に小さい水質項目はわずかな変動が生じてもそのスコアに大きく影響を与えるために、解析からは除外して行うことが多い。

ここで比較のために、60年度前半のデータを用いて、スコアの算定を3つのケースについて行った。そのケ

ースの内訳を表-19に示す。ケース1とケース2は、データ変換を施した場合と施さない場合の比較であり、ケース2とケース3は、前述したように標準偏差の小さいケイ酸とpHを除外した場合と除外しない場合の比較である。表-20に示すのは、おのおののケースについての第1主成分の固有値、寄与率、および因子負荷量である。3つのケースとも、第1主成分は植物プランクトンによる赤潮の存在を示す特性値であると考えられる。全般的には、どのケースともほとんど同じである。しいて言えば、赤潮プランクトンの指標となるクロロフィル-aと第1主成分との相関がケース1、ケース2、ケース3の順に大きくなっており、第1主成分の持つ特性値の意味づけが変数変換を行い、かつ、変数選択を行うことにより、より明りょうになることが予想される。しかし、その差はそう大きなものではない。図-16に、これらの3つのケースに対する第1主成分のスコアを求めた結果を示す。3ケースとも、ほぼ同様の経時変化を示している。クロロフィル-a量から推測される赤潮の期間が7月17日～25日であり、その傾向は第1主成分のスコアの結果にも表れている。

4.3 クラスタ分析による水質項目間の分類

数多くの水質項目から、クラスタ分析によって水質

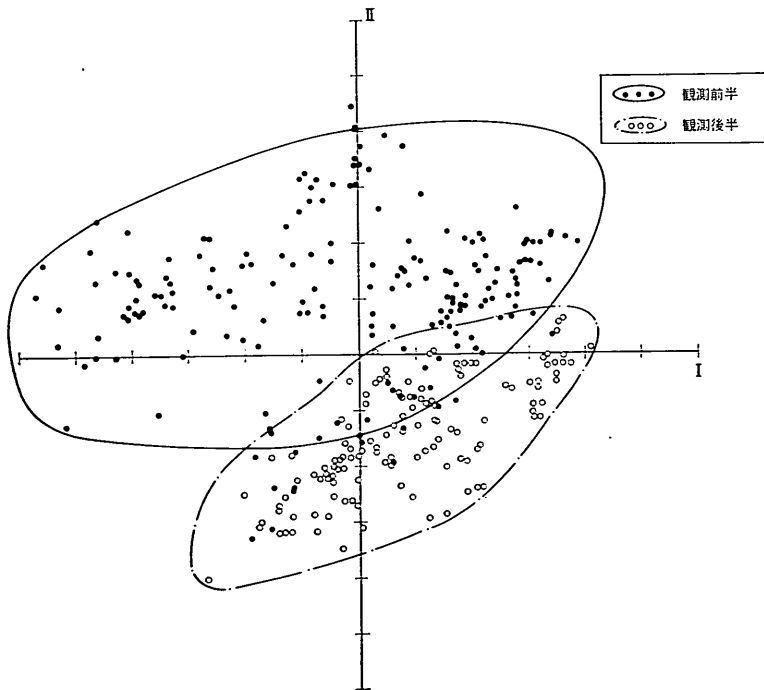


図-14 スコアの散布図 (60年度表層データ)

X軸：第1主成分 Y軸：第2主成分

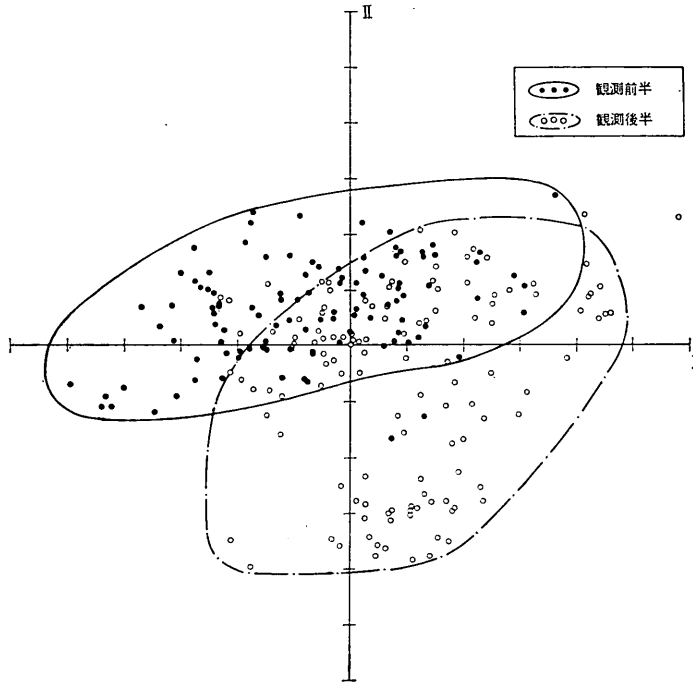


図-15 スコアの散布図 (60年度 4 m層データ)

X軸：第1主成分 Y軸：第2主成分

表-19 主成分分析におけるデータの処理法

ケース番号	水 質 項 目	デ ー タ 変 換
ケ ー ス 1	12項目 (水温, pH, 塩分, DO, 濁度, 硝酸, ケイ酸, アンモニア, COD, リン酸, TP, クロロフィル-a)	原データ (変換なし)
ケ ー ス 2	12項目 (ケース1と同じ)	表-6によりデータ変換
ケ ー ス 3	10項目 (ケース1よりケイ酸とpHを除外)	表-6によりデータ変換

項目の分類を行った。クラスター分析とは、数多くの変数の中から似たもの同志を集めて分類する手法で、これらのグループに関する情報があまりなく、何らかの基準によってデータの分類を行ったり、あるいはデータ群の質的側面を把握しようとする場合に用いられる。

図-17に、60年度データを用いて行ったクラスター分析の樹形図を示す。ここで用いた方法は、各水質項目間の相関係数を類似度とした場合の、最遠隣法である。これらの樹形図を類似度0.25で分類すると表-21のようになる。図-17、および表-21より、60年度に実施した12の水質項目は、アンモニア、リン酸、硝酸、ケイ酸のような栄養塩類のクラスターと、クロロフィル-a, DO, pH, SS, CODのように植物プランクトンの存在を示すクラ

スターに分類されるのがわかる。水温は植物プランクトンのクラスターに分類されるが、塩分は表層では植物プランクトンのクラスターに、4 m層では栄養塩のクラスターに分類されている。

今回の調査では、表層と4 m層という比較的近い上層での測定であったために、塩分以外の水質項目に関しては測定層による相違はみられなかったが、底層での測定値、あるいは季節の異なる測定値があれば、また異なったクラスターに分類されるものと思われる。

4.4 重回帰分析によるクロロフィル-a量の算定

赤潮を示す指標としてクロロフィル-a量がよく用いられる。これは、クロロフィル-aが植物プランクトンの光合成活動に関与する物質を含み、ゆえに、植物プランク

表-20 3つの方法による第1主成分の固有値、寄与率、因子負荷量 (60年度, 表層, 前半)

		ケース1	ケース2	ケース3
固有値		6.772	6.873	5.618
寄与率(%)		56.4	57.3	56.2
因子負荷量	水温	-0.609	-0.621	-0.593
	pH	-0.756	-0.757	*
	塩分	-0.761	-0.739	-0.729
	DO	-0.707	-0.728	-0.761
	SS	-0.213	-0.327	-0.347
	アンモニア	0.903	0.928	0.935
	COD	-0.712	-0.721	-0.699
	リン酸	0.769	0.765	0.788
	総リン	0.685	0.650	0.660
	ケイ酸	0.872	0.853	*
クロロフィル-a	-0.875	-0.917	-0.931	
硝酸	0.894	0.881	0.867	

トンの現存量を表す最もよい物質であることによる。ここでは、クロロフィル-a量を赤潮の水質指標と仮定して、重回帰分析によるクロロフィル-aの算定を行った。重回帰分析とは、2.2でも述べたように、ある目的変数 y_i を、いくつかの説明変数によって表そうとするものである。いま、1つの目的変数に対して p 個の説明変数での場合の線型重回帰モデルを考えると、目的変数 y_i は

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_p x_{pi} + \varepsilon_i \dots (44)$$

で表される。ここに、

y_i : 目的変数

表-21 クラスター分類された水質項目

データ	クラスター	水質項目
前半	C ₁	水温, COD, SS
	C ₂	pH, DO, クロロフィル-a, 塩分
表層	C ₃	アンモニア, リン酸, 総リン, ケイ酸, 硝酸
前半	C ₁	水温, COD, DO, クロロフィル-a
	C ₂	pH, SS
	C ₃	塩分, ケイ酸, 硝酸, 総リン
	C ₄	アンモニア, リン酸
後半	C ₁	水温, pH
	C ₂	塩分, DO, SS, クロロフィル-a, COD
表層	C ₃	アンモニア, リン酸, 硝酸, 総リン, ケイ酸
後半	C ₁	水温, DO, COD, クロロフィル-a
	C ₂	pH, 塩分, 硝酸, SS
	C ₃	アンモニア, ケイ酸, リン酸, 総リン

x_{ni} : 説明変数 ($n=1\sim p$)

β_n : y の x_n に対する偏回帰係数

ε_i : 残差または誤差

である。残差 ε_i は、 y の変動のうち説明変数 x_i では説明しきれない部分を示す。ここでは、目的変数として植物プランクトンの指標としてのクロロフィル-a (蛍光強度) を選び、その他の水質項目を説明変数とする。

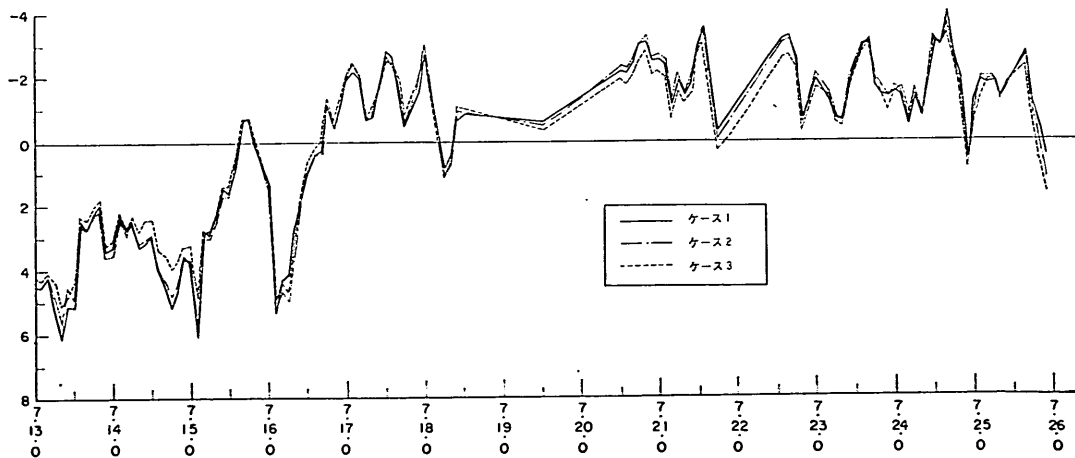


図-16第1主成分のスコアの経時変化 (60年, 表層, 前半)

60年 表層 前半

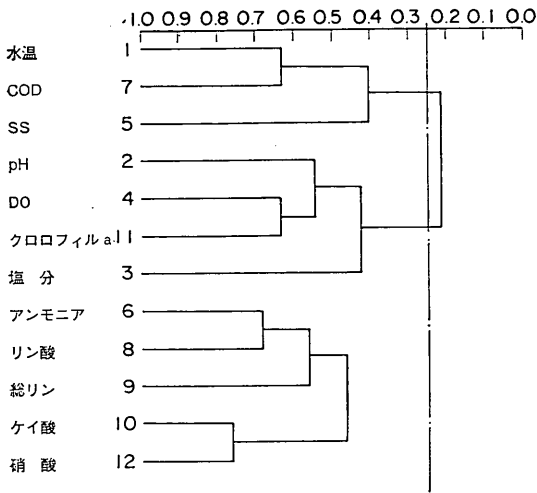


図-17 (1) 樹形図 (60年度, 前半, 表層)

60年 表層 後半

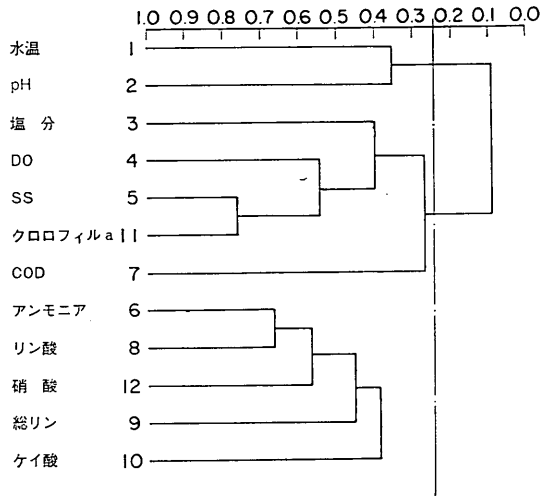


図-17 (2) 樹形図 (60年度, 前半, 4 m層)

60年 4 m 前半

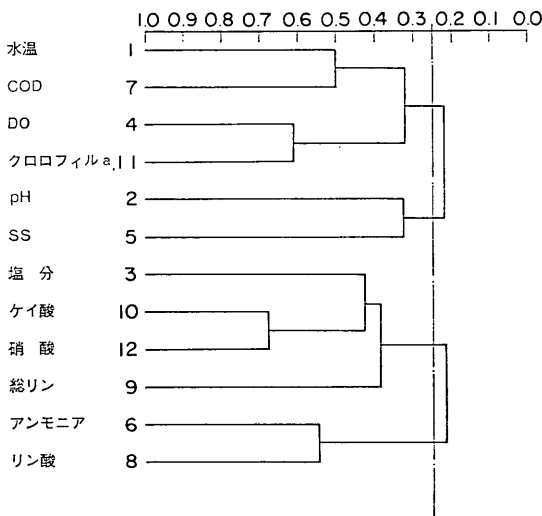


図-17 (3) 樹形図 (60年度, 後半, 表層)

60年 4 m 後半

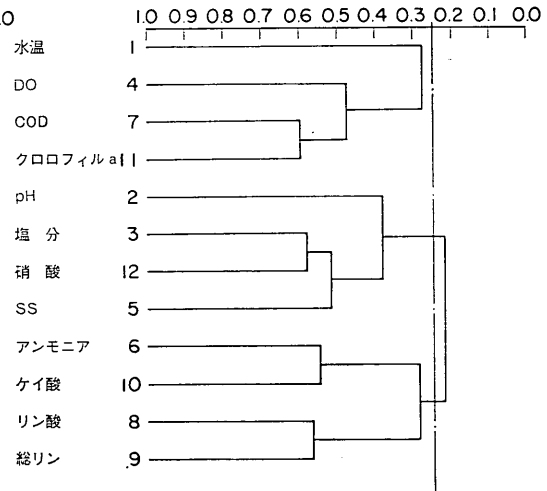


図-17 (4) 樹形図 (60年度, 後半 4 m層)

重回帰分析を行う際に、求める重回帰式が目的変数の特性をよく表すためには、数多くある説明変数から適切な変数を選択する必要がある。まず手始めに、最も一般的に用いられている変数増減法による変数選択を行った。この方法は、説明変数 $x_{(1)}, \dots, x_{(r-1)}$ が取込まれた時に、残りの変数の中で寄与率が最も大きくなる変数を一つずつ加えていく増加法と、取り込まれた変数の中

からある変数 $x_{(r)}$ を除いた場合の寄与率の最も小さい変数を一つずつ減少させていく減少法を組み合わせた手法である。説明変数の取込み基準 F_{IN} および追い出し基準 F_{out} は、

$$F_{IN} = F_{out} = 2.0 \quad \dots (45)$$

とした。

以上のような変数選択法を用いて重回帰分析を行っ

表-22 変数増減法による変数選択
(60年度, 前半, 表層)

	60年度 前半 表層			
	変換データ		原データ	
	増加	減少	増加	減少
第1段階	NH ₄	—	NO ₃	—
第2段階	SS	—	DO	—
第3段階	S ₂ O	—	S ₂ O	NO ₃
第4段階	PO ₄	—	SS	—
第5段階	DO	—	PO ₄	—
第6段階	NO ₃	—	SAL	—
第7段階	—	—	—	—

た60年度前半の表層のケースについての変数選択の結果を表-22に示す。原データを用いた場合と、表-6に基づいて変数変換した場合には選択されるデータに相違のあることがわかる。特に、今回は目的変数のクロロフィル-aに対数変換を施したために、その影響が大きかったものと思われる。また表-23には、これらの変数とクロロフィル-aとの相関係数もあわせ示す。ここで、丸印の付いたものは変数増減法によって選択された変数である。これらの表より、原データおよび変換データの両方のケースについて共通して選択されているものは、DO, SS, リン酸, ケイ酸である。また、原データの場合にのみ選択されたのが塩分、変換データの場合にのみ選択されたのが硝酸とアンモニアであった。原データの場合、硝酸はクロロフィル-aとの相関が負で高かったた

表-23 クロロフィル-aとの相関係数と選択された変数との関連

水質項目	変換データ		原データ	
		相関係数		相関係数
水 温	—	0.536	—	0.528
p H	—	0.642	—	0.594
塩 分	—	0.595	○	0.549
D O	○	0.747	○	0.739
S S	○	0.460	○	0.432
ア ン モ ニ ア	○	-0.891	—	-0.738
C O D	—	0.577	—	0.612
リ ン 酸	○	-0.758	○	-0.683
総 リ ン	—	-0.532	—	-0.477
ケ イ 酸	○	-0.729	○	-0.717
硝 酸	○	-0.732	—	-0.744

めに第1段階で選択されているが、第3段階で珪酸が選択された後、棄却されている。これは、珪酸と硝酸の相関係数が0.9と非常に大きかったことに起因するものと思われる。また、SSはどちらの場合に対しても、クロロフィル-aとの相関が他の水質項目と比べて大きくないのに、共通して選択されている。これは、クロロフィル-aを示す植物プランクトンの存在がSSとして表れており、SSが赤潮の重要な指標の1つであるからと思われる。以上のような重回帰分析によって得られた偏回帰係数の結果を表-24に示す。これらの結果から共通して言えることは、クロロフィル-aを算定する重回帰式において、DO, SS, およびCODは正の偏回帰係数を持ち、

表-24 重回帰分析結果

	データ変換後のデータ				原データ			
	60年 上層		60年 4m層		60年 上層		60年 4m層	
	前半	後半	前半	後半	前半	後半	前半	後半
水 温 TEM	0.0	0.0	0.0	-0.17133	0.0	0.0	0.0	0.0
水素イオン濃度 pH	0.0	-0.77908	-0.37035	0.0	0.0	0.0	-7.29263	0.0
塩 分 SAL	0.0	-0.07450	-0.12497	0.0	-0.84101	0.0	-1.69041	0.0
溶 存 酸 素 DO	0.37186	0.67492	1.20664	0.0	3.80224	2.56188	4.30094	2.27982
浮 遊 物 質 SS	0.45668	1.11476	0.0	0.32426	2.99224	8.55686	0.0	2.43453
アンモニア態窒素 NH ₄	-0.03308	0.0	-0.02736	-0.05784	0.0	0.0	0.0	-0.03718
化学的酸素要求量 COD	0.0	0.26179	0.0	0.41045	0.0	2.49835	0.0	5.34366
リン酸態リン PO ₄	-0.01256	-0.02054	0.0	-0.00749	-0.85983	0.0	0.0	-0.24018
総 リ ン TP	0.0	0.16235	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ケ イ 酸 S ₂ O	-0.46422	0.37243	0.0	-1.22097	-16.38356	0.0	0.0	0.0
硝 酸 態 窒 素 NO ₃	0.01961	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.03422	0.0
相 関 係 数	0.936	0.904	0.770	0.924	0.916	0.907	0.795	0.857

アンモニア、リン酸は負の偏回帰係数となっている。これらは、クロロフィル-aとの相関係数の値と一致している。しかし、pHのように正の相関係数を持つが負の偏回帰係数を示す例や、ケイ酸のように、時として正の偏回帰係数を持つ場合などがあり、重回帰式の算定においても各水質項目のかかわり合いは複雑のようである。

表-24に示した偏回帰係数を用いてクロロフィル-a量を算定した結果と、実際に測定されたクロロフィル-a量の比較を図-18(1)~(4)に示す。ここに示したのは、データ変換を施した場合についてのみである。どのケースに対しても、非常に良く近似されていると考えられる。また、表-24の最後の欄には、測定値と算定値との相関

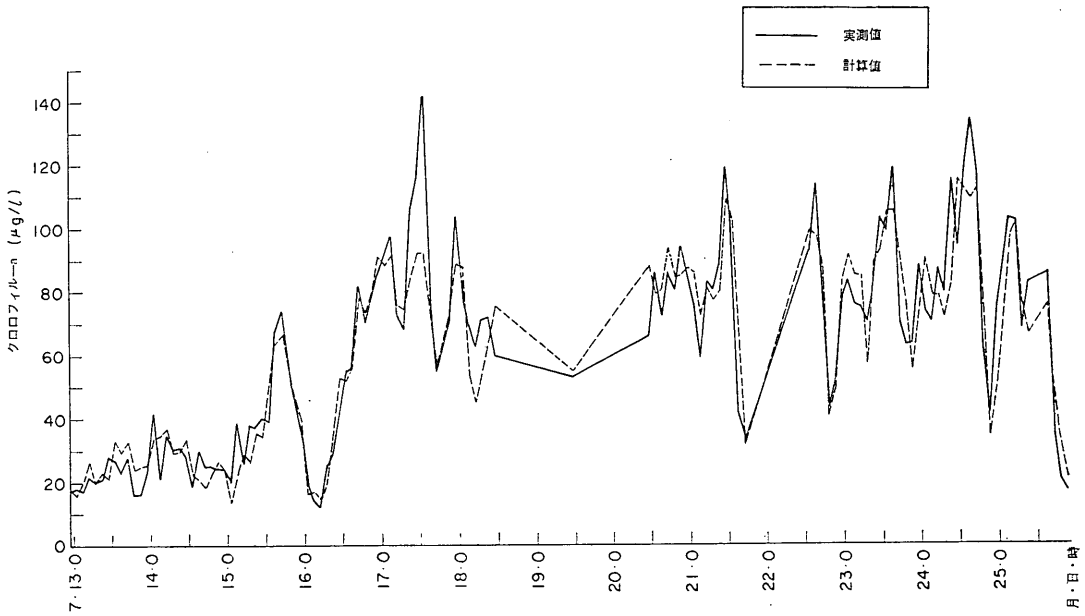


図-18 (1) 重回帰分析によるクロロフィル-a量の算定値と実測値との比較 (60年度, 前半, 表層)

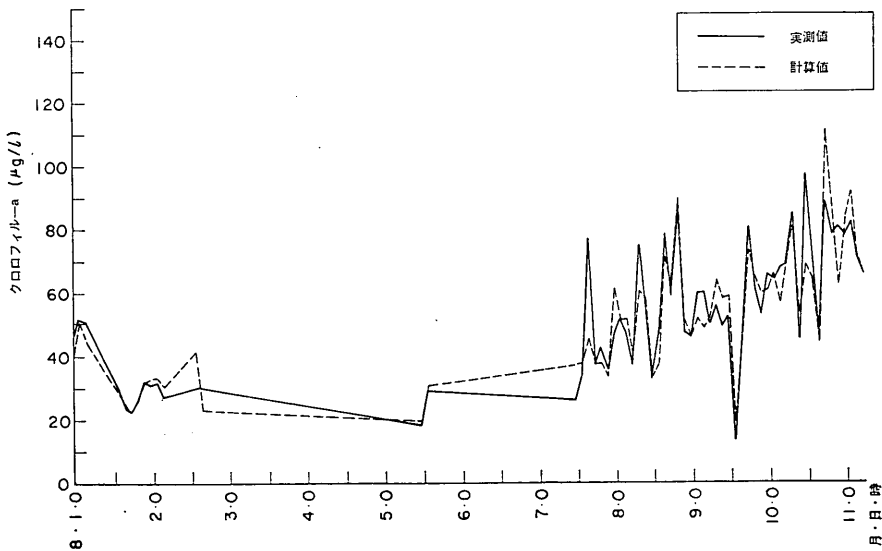


図-18 (2) 重回帰分析によるクロロフィル-a量の算定値と実測値との比較 (60年度, 前半, 4 m層)

係数について示す。どのケースについても非常に高い相関係数を持ち、重回帰式によるクロロフィル-a量の算定が測定値をよく近似していることを示している。

最後に、変数変換されたデータでの重回帰分析、クラスター分析および相関係数の結果を表-25にまとめて示す。重回帰分析においては、白丸は正の偏回帰係数を、

黒丸は負の偏回帰係数を示す。また、クラスター分析においては、図-17の樹形図において2つのクラスターに分類した場合に、白丸はクロロフィル-aと同じクラスターに、黒丸は他のクラスターに分類されたことを示す。相関係数に関しては、クロロフィル-aとの相関係数が正の場合は白丸で、負の場合が黒丸である。大きい

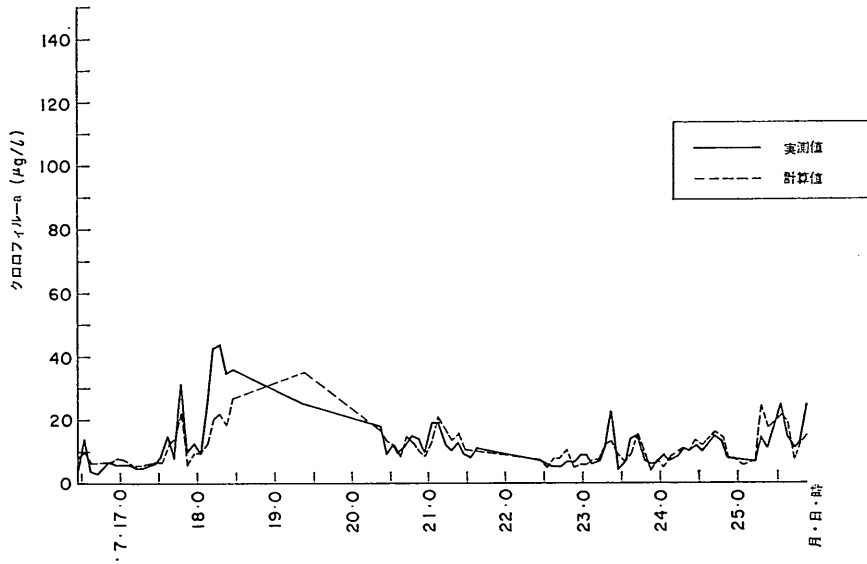


図-18 (3) 重回帰分析によるクロロフィル-a量の算定値と実測値との比較 (60年度, 後半, 表層)

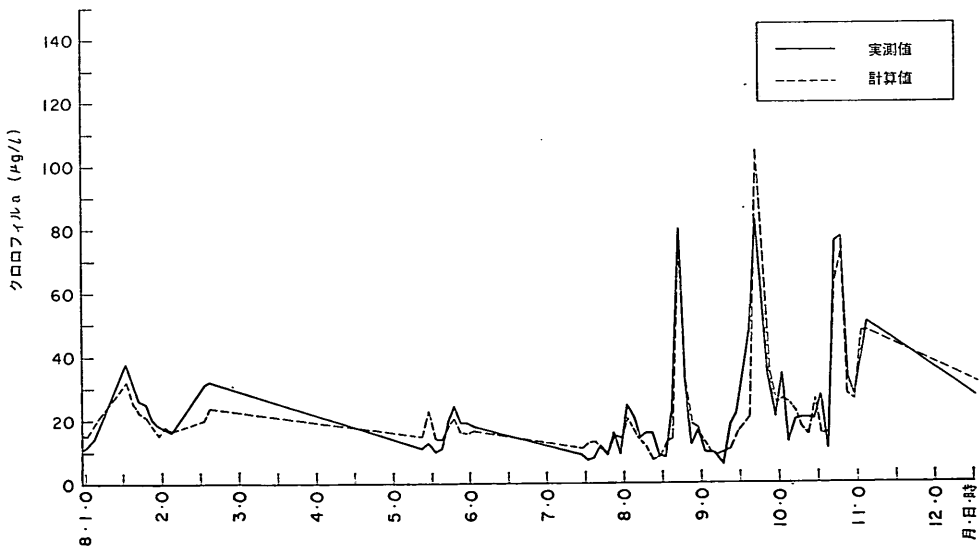


図-18 (4) 重回帰分析によるクロロフィル-a量の算定値と実測値との比較 (60年度, 後半, 4 m層)

図-18

丸は、相関係数が0.5以上の場合であり、それ以下の場合は小さい丸で示す。一般的にみて、DO, SS, CODが白丸となっており、植物プランクトンによる赤潮の存在を示す指標となっており、アンモニア、リン酸、ケイ酸などが黒丸となっており、これらの栄養塩が消費されて赤潮が発生していく過程を示している。水温に関しては、クロロフィル-aの挙動と同じ変動を示している。塩分は表層と4m層とは逆の挙動を示している。

重回帰分析において、計算機による変数増減法によると、その時々ケースによって選択される変数とその程度異なるという結果になっており、おのおの変数の持つ偏回帰係数の持つ意味も変わってくる。したがって、表-25に示したように、種々の方法での検討を行って、それらの結果から選択する説明変数を決定するのも一つの方法であると思われる。

5. 赤潮時の水質特性とその予知

第三港湾建設局神戸機械整備事務所が実施した水質自動観測装置開発に関する調査の目的は、赤潮を事前に予測することにあった。近年、赤潮に関する研究は盛んに行われ、その特性、発生機構等に関してもかなりの研究が行われている^{18),19)}。また、赤潮の予測に関する研究もいくつか発表されている^{20),21),22)}。

これらの研究成果によれば、沿岸域の赤潮は、大雨のち高温で日照が続く海面が穏やかなとき、または異質の水塊が混合するような場合に多く発生すると言われている。すなわち、このような環境が赤潮プランクトンの

増殖に必要な条件を満足する環境であると言える。

赤潮プランクトン増殖に必要な環境条件とは、生育に必要な無機栄養塩が十分にあることであり、かつ、水温、塩分、日射量などが増殖に好適なことなどが考えられる。無機栄養塩としては、比較的少量に必要とされる窒素、リン、硫黄、カルシウム、カリウム、マグネシウムなどの元素、微量ではあるが生育に欠かせないものとして、鉄、亜鉛、マンガン、銅、硼素、モリブデン、コバルト、ヨウ素、バナジウムなどの元素がある。これらの物質はいずれも海水中に存在するが、窒素とリンが相対的に少いために植物プランクトンの生産に対する制限因子とされた。

本調査の結果をみても、植物プランクトンが増加している時には、リン酸、硝酸などの無機栄養塩は植物プランクトンに消費されて減少し、また、pH, DO, CODなどは植物プランクトンによる光合成、あるいは有機物増加などにより増大している傾向が読み取れる。

しかし、これらの結果は赤潮が発生したことによる水質指標の変化を示す結果である。赤潮による水産業への被害を未然に防止するためには、赤潮発生の時期、水域、規模、出現種等を出来るだけ早く予知する必要がある。

赤潮の予知に関する研究は、関係各機関において精力的に行われている。例えば、三河湾における愛知県水試の報告²³⁾によると、5日後の赤潮の発生・非発生の予測が82%での確率で、また、5日後の赤潮の継続・非継続の予測が77%での確率でできたとしている。この報告

表-25 各水質項目の重回帰分析、クラスター分析、相関解析におけるクロロフィル-aとの関連

	60年上層前半			60年上層後半			60年下層前半			60年下層後半		
	重回帰	クラスター	相関係数	重回帰	クラスター	相関係数	重回帰	クラスター	相関係数	重回帰	クラスター	相関係数
水温		○	○		○	●		○	○	●	○	○
水素イオン濃度		○	○	●	○	○	●	○	○		●	○
塩分		○	○	●	○	○	●	●	●		●	●
溶解酸素	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
浮遊物質	○	○	○	○	○	○		○	●	○	●	○
アンモニア態窒素	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●
化学的酸素要求量		○	○	○	○	○		○	○	○	○	○
リン酸態リン	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●
総リン		●	●	○	●	●		●	●		●	●
ケイ酸	○	●	●	○	●	●		●	●	●	●	●
硝酸態窒素	○	●	●		●	○		●	●		●	●

は、多変量解析手法の数量化Ⅱ類によるもので、この手法は、ある数値にならないような変量（例えば、赤潮が発生するとか発生しないような分類尺度）などを、0と1に置き換えて行う判別分析である。したがって、数量化Ⅱ類のような判別解析によって、ある程度の赤潮の定性的な前兆、あるいは傾向的な特性は捉えられたものと考えられる。しかし、本研究においては、図-3~5にみられるように、すべてのデータが数値化されて表現されていることから、植物プランクトンによる赤潮の予測としてクロロフィル-a量の定量的な予測を試みるものとする。

ここでは、目的変数と説明変数の時間レベルをずらした重回帰分析による予測、および、カルマン・フィルタによる予測を実施した。なお、これらの予測に関しては、植物プランクトンによる赤潮が最も典型的に発生し、かつ、第1主成分による情報の集約度の最も大きかった60年度前半の表層のデータを用いて解析を実施した。

5.1 重回帰分析によるクロロフィル-a量の予測

前章で重回帰分析によるクロロフィル-a量の算定を行い、かなり良い精度で測定値と近似させることができた。しかし、前章で用いた方法は、説明変数の選択が計算機の中での変数増減法による選択のために、それぞれの測定期間により選択される変数も異なるので、クロロ

フィル-a量を予測するには適さない。また、目的変数と説明変数との時間レベルが同じであるために、目的変数の予測とはなっていない。

そこで、本節では、説明変数の項目を固定するとともに、説明変数と目的変数の時間レベルをずらすことにより、重回帰分析による赤潮の予測手法について検討した。

赤潮の予知を行うに際して、まず、赤潮が発生する海域の環境指標はどのように変化しているのかについて調べた。図-19に示すのは、昭和60年7月14日~17日の水質項目の測定結果を拡大して詳しくみたものである。クロロフィル-aの増大する12~24時間前にリン酸およびアンモニア濃度のピークが存在していることがわかる。この結果から、リン酸およびアンモニアなどの12時間~24時間前の栄養塩濃度の増加が赤潮発生の前兆となることが予想される。

そこで、まず、60年度の表層・前半の観測結果を用いて重回帰分析によるクロロフィル-a量の予測を試みた。説明変数としては表-25の結果から、水温、塩分、リン酸態リン、および、アンモニア態窒素とした。DO、COD、pHなどはクロロフィル-a量と非常に良い相関を示しているが、これらは、植物プランクトンによる赤潮の発生の結果、その濃度が増加するという水質指標である

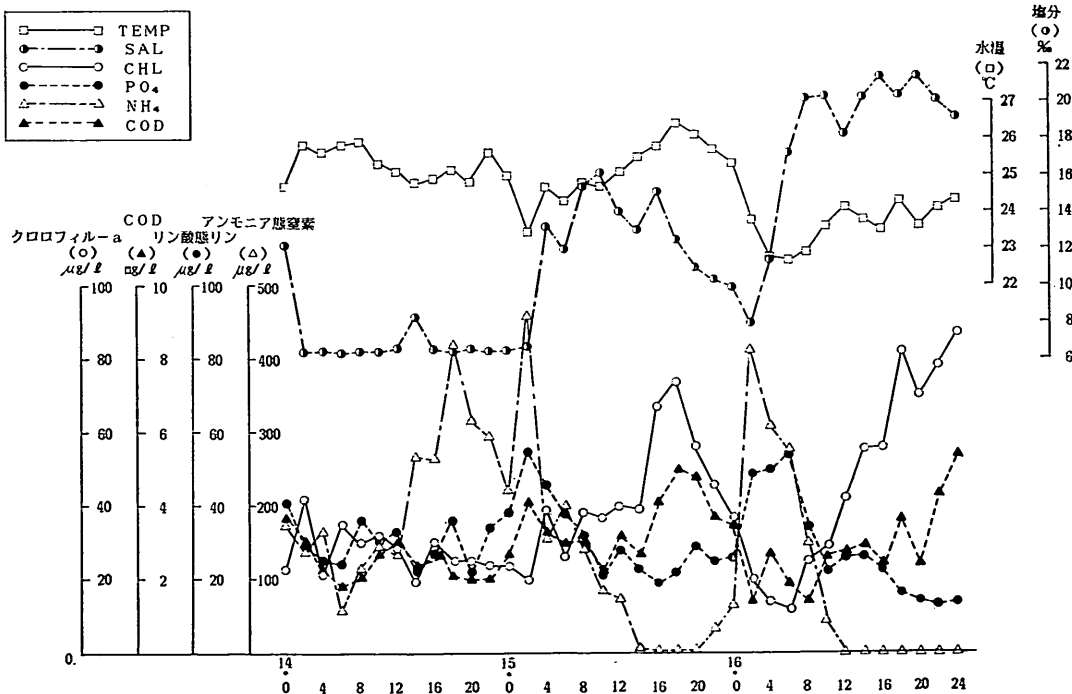


図-19 赤潮発生時の栄養塩の挙動 (60年7月14日~17日, 表層データ)

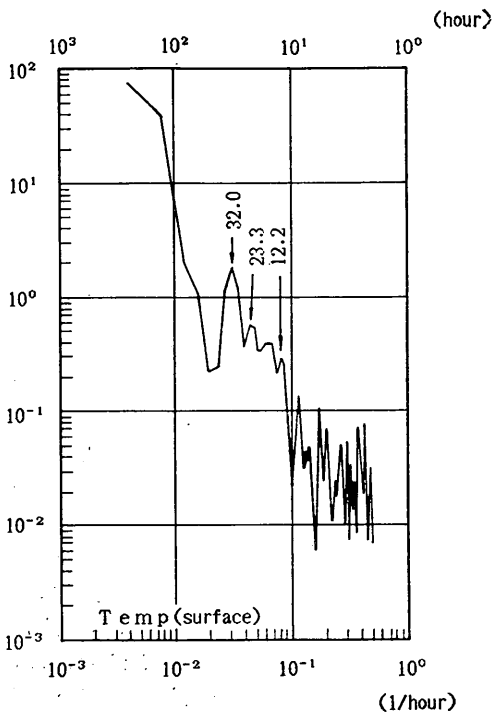


図-20 (1) スペクトル密度分布 (水温・表層・60年前半)

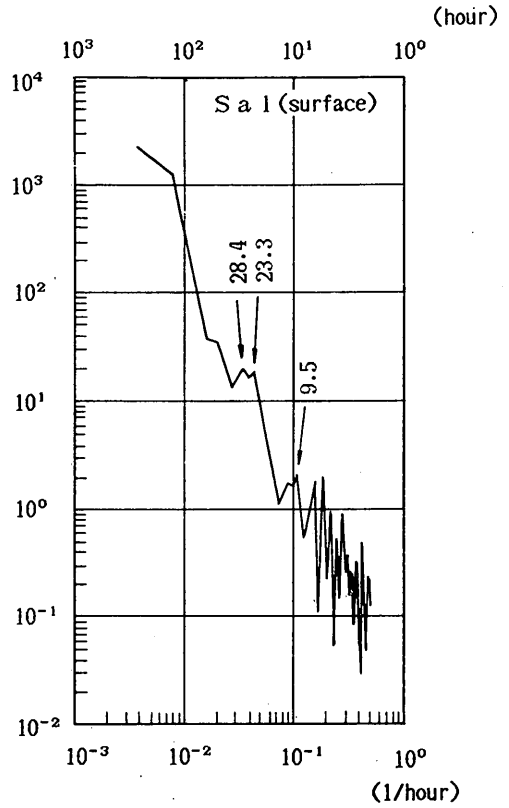


図-20 (2) スペクトル密度分布 (塩分・表層・60年前半)

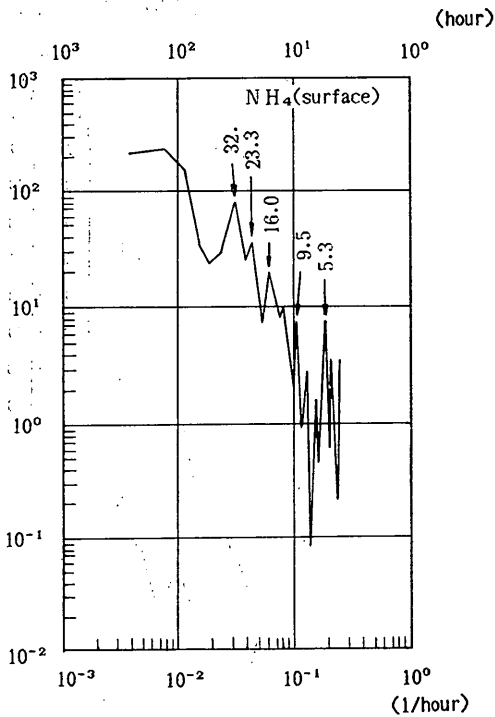


図-20 (3) スペクトル密度分布 (アンモニア態窒素・表層・60年前半)

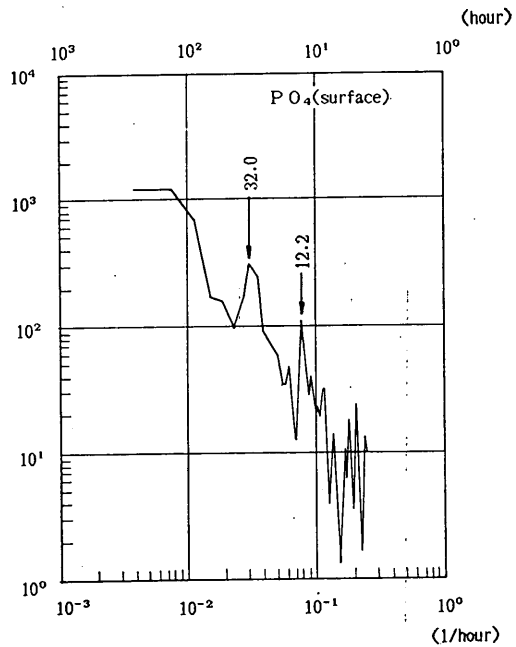


図-20 (4) スペクトル密度分布 (リン酸態リン・表層・60年前半)

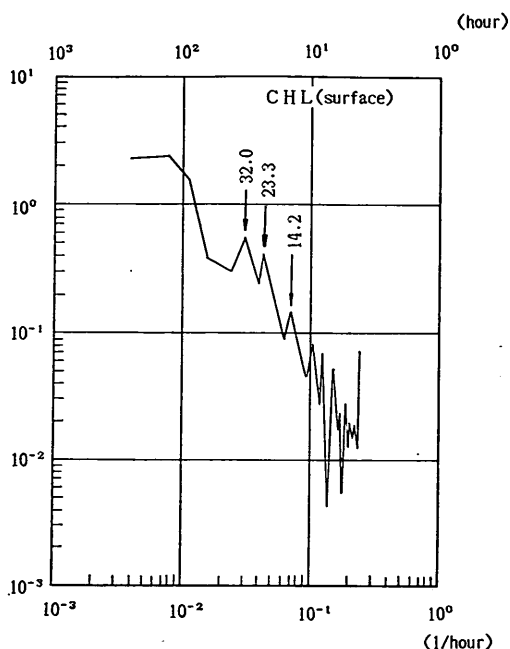


図-20 (5) スペクトル密度分布 (クロロフィル・
表層・60年前半)

ために、結果を説明する指標とはなりえても、予測データの説明変数として使うのは適さないと考えられ、ここでは除外してある。これらの予測を行う前に、まず、代表的な水質項目の周期特性について若干の検討を加えた。図-20(1)~(5)に示すのは、水温、塩分、アンモニア、リン酸、クロロフィル-aの変動のスペクトル密度分布である。これらの図から、全般的にみて、半日周期の12時間付近、1日周期の24時間付近、および32時間付近にエネルギーのピークが存在することがわかる。12時間と24時間周期のエネルギーのピークについては潮汐の影響、あるいはクロロフィル-aの増殖が太陽光の光合成によることなどから説明できるが、32時間のピークについては、その他の気象・海象条件の変動によるものと思われるが、原因がよくわからない。

つづいて、これらの説明変数とクロロフィル-aとの相互相関を図-21に示す。これらの図において、横軸の時間が正の場合は、クロロフィル-aに対して前の時間レベルでの値の相互相関係数であることを示している。例えば、リン酸あるいはアンモニアとクロロフィル-aとの相互相関関数図をみると、 $t=0$ では負の相関を示し、約24時間の周期で振動しているパターンを示してい

る。したがって、約12時間付近に波形の山のピークがきている。また、クロロフィル-aとCODとの相互相関では正の相関を示し、赤潮の結果、CODが増加しているようすがわかる。

以上の結果から、植物プランクトンによる赤潮予測の方法として、0時間前、12時間前、24時間前、32時間前、48時間前の水温、塩分、リン酸、アンモニアのデータを用いて、重回帰分析によるクロロフィル-a量の予測を行った。その結果を表-26に示す。また、表-26に示された偏回帰係数から算定したクロロフィル-a量の値と測定値との比較を図-22~26に示す。これらの結果を

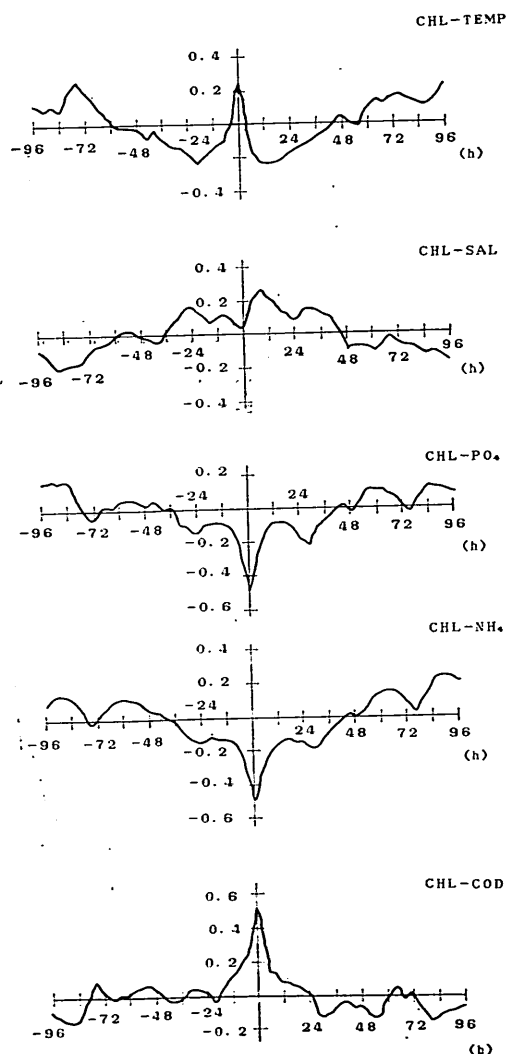


図-21 クロロフィル-aと水温、塩分、 PO_4-P 、 NH_4-N 、
CODとの相互相関 (60年前半・表層)

表-26 重回帰分析による偏回帰係数と相関係数

LAG	水 温	塩 分	アンモ ニ ア	リン酸	R
0時間	0.1465	0.0105	-0.0357	-0.0199	0.836
12	0.0337	0.0861	0.0169	-0.0067	0.610
24	0.0647	0.0418	-0.0033	-0.0115	0.555
32	0.0246	0.0468	-0.0227	-0.0002	0.486
48	0.1478	0.0594	0.0265	-0.0029	0.465

みると、0時間前および12時間前のデータを用いた場合には、クロロフィル-aの実測値をかなり良く追隨しているものと思われる。しかし、クロロフィル-aが急激に増加した場合については再現できていない。これらは、図-18(1)に示した結果と比べると若干近似度が落ちている。時間をさらにずらして24時間前、32時間前、48時間前となると、実測値の増加傾向、減少傾向はあっているが、その近似度はかなり悪くなっている。実測値と予測

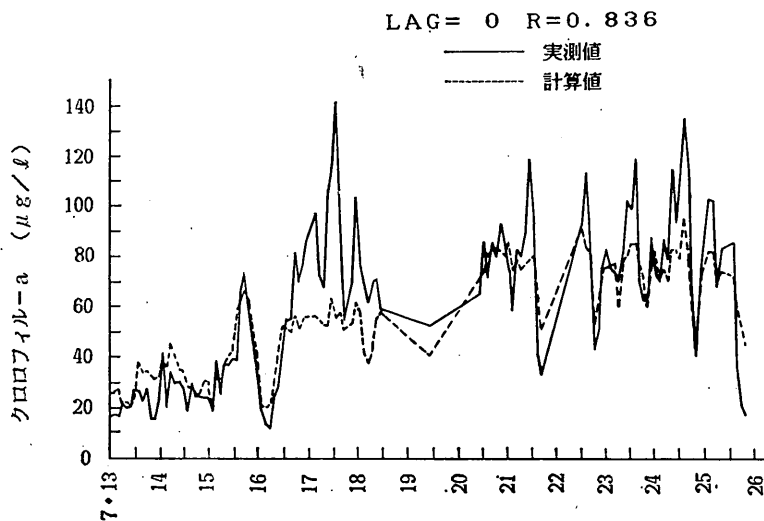


図-22 重回帰分析によるクロロフィル-aの予測結果
(60年前半・表層—LAG=0, R=0.836)

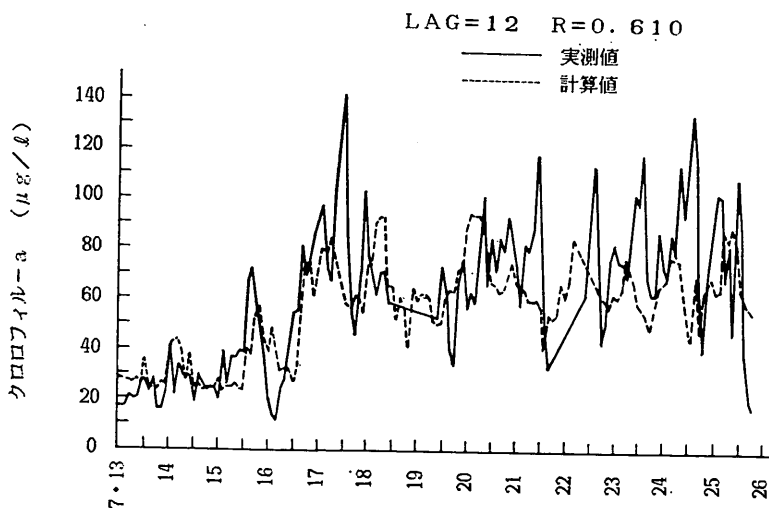


図-23 重回帰分析によるクロロフィル-aの予測結果
(60年前半・表層—LAG=12時間, R=0.610)

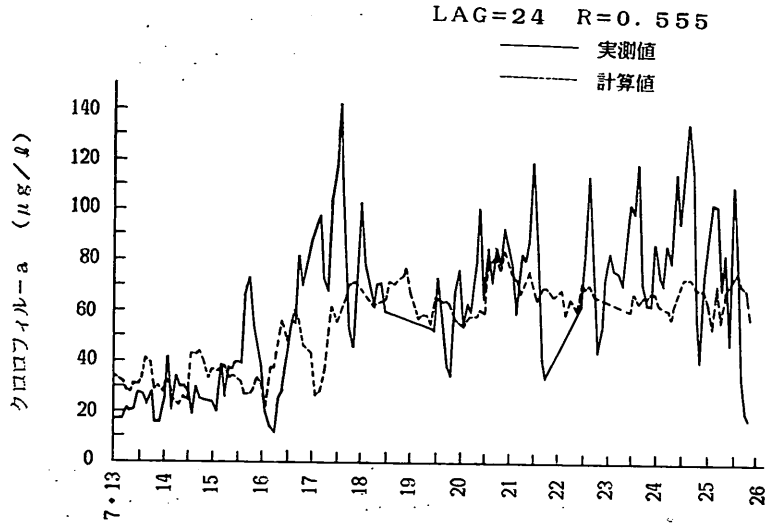


図-24 重回帰分析によるクロロフィル-aの予測結果
(60年前半・表層——LAG=24時間, R=0.555)

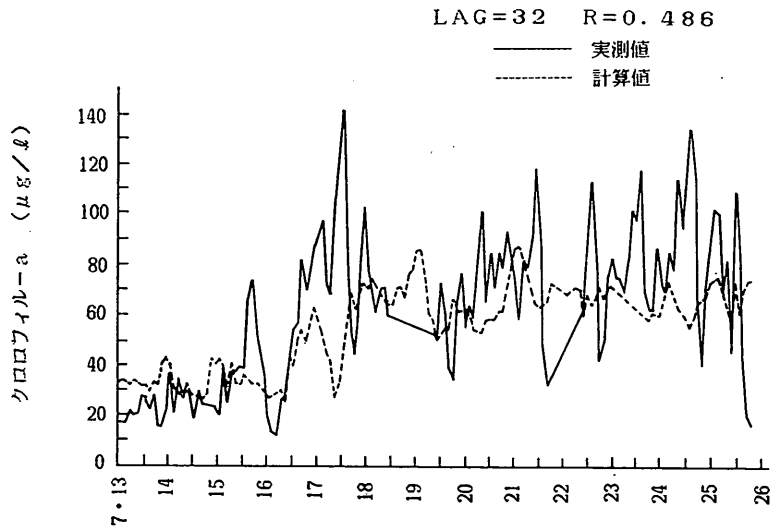


図-25 重回帰分析によるクロロフィル-aの予測結果
(60年前半・表層——LAG=32時間, R=0.486)

値との相関係数も表-26に示しているが、0時間前で $R=0.836$ 、12時間前で $R=0.610$ となり、時間がづれるにしたがって、相関係数の値も小さくなる傾向にある。0時間前と12時間前の偏回帰係数の値をみると、0時間前の偏回帰係数の符号は、水温と塩分が正でアンモニアとリン酸が負となっている。これに対して、12時間前の偏回帰係数は、アンモニアが負から正に変っている他は同じ符号となっている。このことから、12時間前のデータ

を用いてのクロロフィル-aの予測は、アンモニア態窒素の濃度が前兆となって表れていると考えられ、リン酸態リンの挙動はあまり前兆となっていない。したがって、本調査時の植物プランクトンによる赤潮発生過程において、窒素が制限因子であったものと考えられる。

5.2 カルマン・フィルターによるクロロフィル-a量 の予測

赤潮予測のもう一つの方法として、クロロフィル-a量

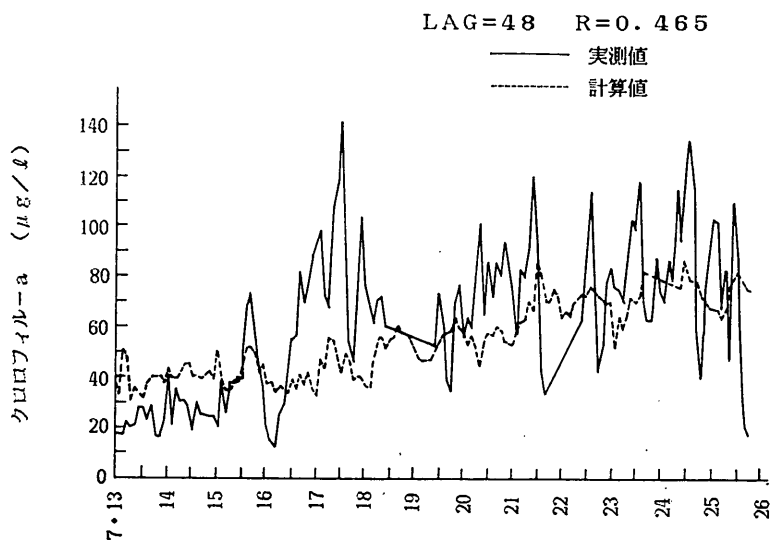


図-26 重回帰分析によるクロロフィル-aの予測結果
(60年前半・表層——LAG=48時間, R=0.465)

の時系列データを用いて、カルマン・フィルターによるクロロフィル-a量の推定を行った。

カルマン・フィルターの手法を用いた例としては、たとえば、日野ら²⁴⁾による洪水予測、あるいは Beck²⁵⁾による BOD の予測等をあげることができる。日野らによる洪水予測は、降雨量と河川流量との関連から行うもので、その時点時点での降雨特性および河川流量特性から、制御理論としてのカルマン・フィルターを用いて洪水予測を行っている。また、Beck による BOD の予測は、溶存酸素と BOD の関係式に、太陽光のエネルギー、水温等の関係式を用いて状態方程式を作り、拡張カルマン・フィルターを用いて、BOD-DO の予測を行っている。

本論文においても、赤潮の予測手段として、NあるいはPなどの栄養塩類の挙動、水温、塩分などの水質項目の挙動によるクロロフィル-a量の予測を試みたが、測定値にかなりの欠測がみられることなど、また、データの蓄積が十分でないために、満足な結果が得られたものとは言い難い。ここでは、その他の予測手段として、クロロフィル-a量の時系列データから、カルマン・フィルターによるクロロフィル-a量の予測を行った。ここで用いたアルゴリズムは、予測計算を繰返し実行しても比較的安定な U-D 分解によるカルマン・フィルターを用いた。また、状態方程式、およびカルマン・ゲインの設定は、クロロフィルの時系列データより行った。

その結果を図-27に示す。これは、60年度の前半、表

層のデータについてである。この図において、実線で示すものが実測値のクロロフィル-a量であり、破線で示すのが、カルマン・フィルターによる2時間後のクロロフィル-a量の予測値である。この結果をみると、初期の7月17日ごろまでは、予測値が実測値をよく追従しているが、それ以降は上下に大きく揺れ動いている。この原因としては、実測値そのものに、大きな変動があり、その影響が予測値の算定に反映しているものと思われる。その結果として、全体的な傾向はよく似ていると思われるが、予測値の方が大小の振れ幅が大きく、実測値の増減に対して、その変化が大きすぎるという結果となったものと思われる。カルマン・フィルターによる予測は、データの時系列特性から将来を予測するもので、赤潮のような突発性の現象を予測するまでには、まだほど遠い状態であると思われる。しかし、この種の研究は緒についたばかりであり、今後、更に一層の検討を要する項目であると思われる。

6. まとめ

運輸省第三港湾建設局の実施した水質自動観測機器の開発調査に伴って実施された連続水質データを用いて、多変量解析による水質データの解析を行った。これらのデータ解析を通じて得られた知見をまとめると、以下のようになる。

- ① 水質項目の分布特性は、自然的因子に関する項目は原データで正規分布特性を示し、赤潮のような突発性

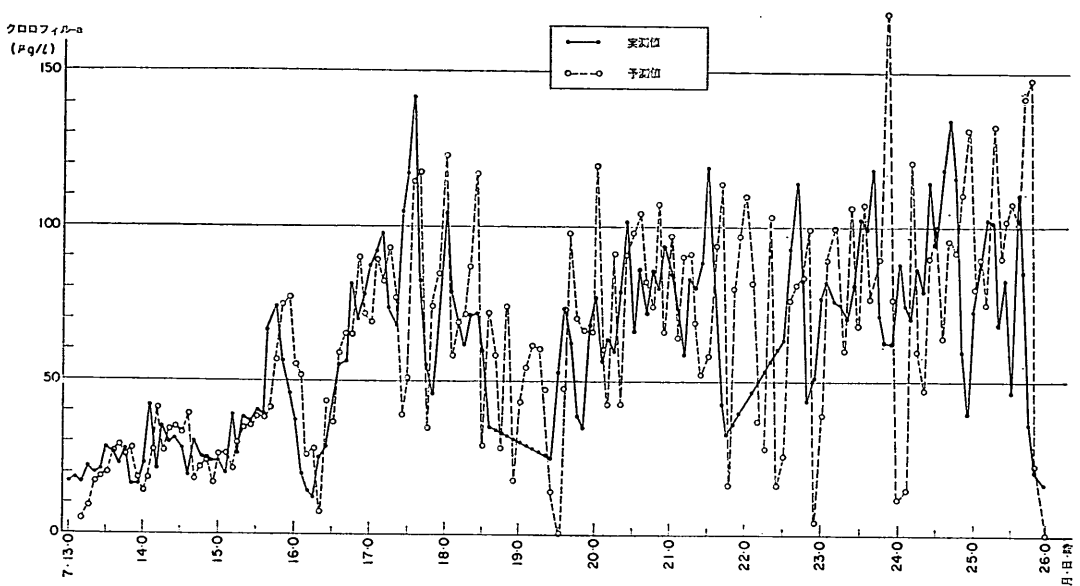


図-27 カルマン・フィルターによるクロロフィル-aの予測結果(60年前半・表層)

- の現象を示す項目は対数正規分布特性を示している。
- ② 赤潮状態の指標としてクロロフィル-a量(蛍光強度より算定)を用いた。クロロフィル-a量の増加している時は、COD, DO, pHの値が上昇し、 NH_4 , PO_4 等の栄養塩濃度が減少している。これは、海水中の植物プランクトンがNとPの無機栄養塩を摂取して繁殖し、その結果として有機物としてのCODの増加、および光合成活動によるDOとpHの上昇である。
 - ③ 主成分分析の結果、表層、4m層とも第1主成分は植物プランクトンによる赤潮に関する特性を示し、第2主成分は河川起源の水塊を示す特性値と考えることができる。また、第1主成分のスコアは、赤潮時の水質特性を表すよい指標であると考えられる。
 - ④ 変数増減法による重回帰分析法は、クロロフィル-a量の推定に有効である。
 - ⑤ 重回帰分析、クラスター分析、相関分析より、クロロフィル-a量に関連する水質項目は、正の相関としてDO, SS, COD, 負の相関として NH_4 , PO_4 が重要である。
 - ⑥ 重回帰分析によるクロロフィル-a量の予測は、12時間前のデータを用いた場合、ある程度可能である。12時間前の NH_4 の濃度に植物プランクトンによる赤潮の前兆となりうる可能性がある。
 - ⑦ カルマン・フィルターを用いたクロロフィル-a量の予測に関しては、実測値と比較してある程度の傾向は得られたが、まだ値の振れ幅が大きく不安定であ

る。更に一層の検討を要する。

赤潮の予知を目的としたデータ整理を行ったが、まだ、水質データの統計処理の段階であり、不満足な点も多い。また、本報告に用いたデータは、1つの測点からのデータである。しかし、実際には海水の流れによる栄養塩の輸送、あるいは底層からの栄養塩の溶出等の移流・拡散効果を考えた測定が必要であろう。今後は、更に多くの水質の時系列データを集め、赤潮発生メカニズム等を考慮しつつ、赤潮の予知に関する研究に邁進する予定である。

最後に、本データを提供していただいた運輸省第三港湾建設局神戸機械整備事務所の関係者の方々、および、水質自動観測機器開発の調査委員会の関係者の方々に深く感謝致します。

(1987年3月31日受付)

参考文献

- 1) 奥野忠一・久米均・芳賀敏郎・吉澤正：多変量解析法——改訂版——，日科技連，430p., 1981.
- 2) 伊藤伸一・宇都宮暁子・節田節子・内藤昭治：多変量解析法の水質汚濁研究への応用——多摩川について——，水質汚濁研究，第4巻，第2号，pp.91~95, 1981.
- 3) 吉見洋・岡敬一・井口潔・関根廣子：相模川水系の水質解析について，水質汚濁研究，第5巻，第4号，pp.193~199, 1982.
- 4) 海老瀬潜一・勝部利之：多変量解析法による貯水池水質の評価，土木学会論文報告集，No. 269, pp.81

- ～94, 1978.
- 5) 宗宮 功・藤井滋穂：富栄養化した湖沼の水質データの頻度分布特性，第19回衛生工学研究論文集，pp.93～98, 1983.
 - 6) 鈴木正明・大内 東・小峰 淳・福岡二郎・加地郁夫：主成分分析による水質データの解析——東京湾における栄養塩，クロロフィルなどの変動——，海と空，第56巻，第4号，pp.161～169, 1981.
 - 7) 古川滝雄・西田政司・高野昭男：富栄養化海域でのクロロフィル-aの濃度と環境因子の解析，福岡市衛生試験所報，Vol. 10, pp.37～46, 1985.
 - 8) 大内 晟：広島湾の赤潮予察システムについて，広島県水産試験場報告，第14巻，pp.31～38, 1984.
 - 9) 村上和男・森川雅行：多変量解析法による海域の水質データの検討，港湾技研資料，No. 479, 38p, 1984.
 - 10) 村上和男・堀江 毅・森川雅行・三好英一・白井正生・加藤道康・佐藤英治：東京湾口における水質汚染実態調査—その2—，港湾技研資料，No. 507, p. 96, 1984.
 - 11) 岩井重久・住友 恒・松岡 譲：水質データの統計的解析，森北出版株式会社，p. 53, 1980.
 - 12) 片山 徹：応用カルマンフィルタ，朝倉書店，p. 198, 1983.
 - 13) 春名 攻・池淵周一・亀田弘行：確率・統計解析，土木学会編新体系土木工学2，pp.243～300，技報堂出版，1981.
 - 14) 昭和58年度水質自動観測装置開発に関する調査研究報告書，運輸省第三港湾建設局神戸機械整備事務所，昭和59年3月.
 - 15) 昭和59年度水質自動観測装置開発に関する調査研究報告書，運輸省第三港湾建設局神戸機械整備事務所，昭和60年3月.
 - 16) 昭和60年度水質自動観測装置開発に関する調査研究報告書，運輸省第三港湾建設局神戸機械整備事務所，昭和61年3月.
 - 17) 星野洋右・佐藤昭三郎・坂井 正・吉田多摩夫：主成分分析法を用いた新設ダム湖の水質解析，水質汚濁研究，第7巻，第9号，pp.561～569, 1984.
 - 18) 赤潮に関する近年の知見と研究の問題点，水産研究叢書33，赤潮研究会編集委員会，日本水産資源保護協会，274p, 1980.
 - 19) 赤潮——発生機構と対策，水産学シリーズ34，日本水産学会編，恒星社厚生閣，143p., 1980.
 - 20) 大内 晟：広島県奥部における赤潮予報研究の現状，沿岸海洋研究ノート，第20巻，第1号，pp.33～42, 1982.
 - 21) 深沢典彦・石丸 隆・高橋正征：大阪・谷川港における *Olisthodiscus luteus* による赤潮の形成機構 I，光合成活性，1980年日本海洋学会春季大会講演要旨集，pp.289～290, 1980.
 - 22) たとえば，Kremer, J. N. and S. W. Nixon: A coastal marine ecosystem, — Simulation and Analysis —, Springer-Verlag, 217p., 1978.
 - 23) 昭和59年度赤潮予察調査報告書，三河湾における水温上昇期の鞭毛藻類赤潮の発生とその拡大，愛知県水産試験場，135p., 昭和60年3月.
 - 24) 日野幹雄・石川和秀・宍戸達行：カルマン・フィルターによる洪水予測の2・3の例，第19回水理講演会講演集，pp.77～82, 1975.
 - 25) Beck, M. B.: Modelling of dissolved oxygen in a non-tidal stream, Mathematical Models in Water Pollution Control, A. James ed., John Wiley & Sons, pp.137～166, 1978.