

児島湖における水質の変動特性*

青山 勲・西崎日佐夫
浦上佳子・森井ふじ

緒 言

この20年来、特に工業開発国における湖や貯水池は、主として人間活動に起因する栄養塩の供給により急速な富栄養化が進行していることが明らかになった¹⁾。主な栄養塩の発生源は下水処理水、産業廃水、農業および都市排水からの流出であることは国際的に共通な事項として認識されている。本研究の対象とする児島湖も基本的には上述した同様な理由により富栄養化が著しく進みつつある湖となっている。特に児島湖流域においては下水処理が不完全であり、し尿処理水が河川を通して湖内へ流入している。さらに流域の後背地には農地も存在するというように、二重・三重に富栄養化の条件が整っている。

現在児島湖の集水域を主たる範囲とする流域下水道建設計画が策定されている。処理場の完成後には児島湖への流入河川水の水質の改善は期待されるものの、処理水は湖内に放流されることになっているので、三次処理が十分に行われなければ、湖内の富栄養化問題にとっては万全の解決策とはなり得ない。

本研究は流域下水道建設前における児島湖内および流入河川水の水質を把握し、事後の影響評価のための基礎資料を収集しておくとともに、海水の流入する特殊な汽水湖における富栄養化の現象を解明するために、水質物質の分布と動態の特徴を明らかにすることを目的とする。

児島湖の概要²⁾

児島湖は瀬戸内海沿岸の児島湾を長さ1,558 mの堰堤で締切って造られた人工淡水湖で、それに流入する笹ヶ瀬川および倉敷川の河口部と湖奥部にある遊水池から成立している。湖の大きさは、奥行き約2.8 km、最大幅約4.3 km、面積は約 $8.2 \times 10^6 \text{ m}^2$ である。1968年に実測されたJIBPの報告によると、湖の平均水深は約1.6 mで、2 m以浅が約75%、3 m以浅が約83%を占めており、最大水深は約9 m、有効貯水量は約 $1.31 \times 10^7 \text{ m}^3$ である。1980年に測定された測深図を第1図に示す。図中の等深線は0.5~1.0 m間隔を表わしている。深度の数値は児島湾側にある飽浦を基準としたものである。湖の締切は1956年2月に完成し、同年7月から湖水位の調節が開始され、弁天、御幸両樋門によって水位調節が行われている。築堤後、既に25年経過しており、堤防の老朽化と漁船や筏の

昭和57年1月18日受理

* 本研究の一部は昭和54年、55年度度文部省科学研究費「環境科学」特別研究（児島湖およびその集水域における水質物質の動態）No. 403538、およびNo. 503524の交付を受けて行われたものである。



第1図 児島湖の等深線 (m)

てはセンサーを直接に所定の深度まで垂下させ、後二者については採水し、船上で測定した。水面から50 cm および湖底から10~20 cm の点での水3ℓを研究室に持ち帰り、蒸発残渣 (DS)、濁度、浮遊物質 (SS)、化学的酸素消費量 (COD)、亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$)、ケルダール窒素 (Kj-N)、オルトリン酸 ($\text{PO}_4\text{-P}$)、全リン (T-P)、アルカリ度、塩素イオン (Cl^-)、硫酸イオン (SO_4^{--})、硫化水素 (H_2S) 濃度を分析した。 H_2S の測定にあたっては船上でフランビンに採水後炭酸カドミウム懸濁液 1 ml を加えて固定した。以下の記述において、表層水とは水面下50cmの水を、底層水とは湖底から10~20cmの位置で採水した水のことである。これらの試料水中の重金属濃度についても分析したが、これについては別に論じた²⁾。



第2図 採水地点

出入時の樋門の開閉に伴う海水の流入により、湖内深層部には海水が停滞している。1956~1965年の10年間平均による河川流入水量は $104 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$ 、流出水量は $103 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}$ と報告されている。湖水の平均滞留時間は渇水期に約200日、豪雨時には約1日、平均12.6日となり、河川水の流入状況によって大きく変動する。

調査方法

1978年4月に予備調査を行い、同年6月以後は冬期を除きほぼ毎月1回、1980年度は隔月に採水した。採水地点は第2図に示した湖内8地点および河川の4地点、計12地点である。各地点において水面、50cm、および1m以深は1m毎に水温、電気伝導度 (EC)、溶存酸素 (DO)、pH、酸化還元電位 (Eh) を前三者につい

結果および考察

1. 水質の季節変化

3年間の分析結果について、水質変動の特徴を項目別に考察する。既に述べたように児島湖の平均水深は1.6 mで全体的には浅水湖ではあるが、水脈筋や樋門近くの地点では3~9 mの水深があり、深いところでは表層水と底層水とでは当然水質の差異があるものと考えられる。また湖内では2つの大きな河川からの流入水による湖流や、閉門時の反流などによって、地点による濃度差が生じるであろうと思われる。そこで、水質の変動を全地点における表層水と底層水それぞれの平均濃度値、および全採水地点のうち、湖流や湖沼形状等を考慮して、変化がみられると予想され、湖水の代表水質を表わす地点1, 4, 6, 10, 12の5地点を特にとりあげて考察する。地点1は樋門前の最深地点、地点4は湖心部、地点6は湖奥部、地点10, 12はそれぞれ倉敷川および笹ヶ瀬川の河口部から約2 km上流部で、これらの2地点は両河川からの流入水質を表わすと思われる地点である。これらの地点の水質変動のうち、地点1, 4, 12の3地点については表層水と底層水、地点6, 10については表層水のみ水質について第3~12図に示す。

(a) 水 温

児島湖表層水の3年間の平均水温は20.2°C、底層水は19.4°C、最低水温は5.0°C、最高水温は30.9°Cであった。湖の水深は浅く、湖流による循環などで水の混合があるため、表層水と底層水、あるいは地点間の差は小さく、年周期をもって変動している。しかし後で述べるように地点1のように水深の深い地点では温度躍層がみられた。

(b) pH

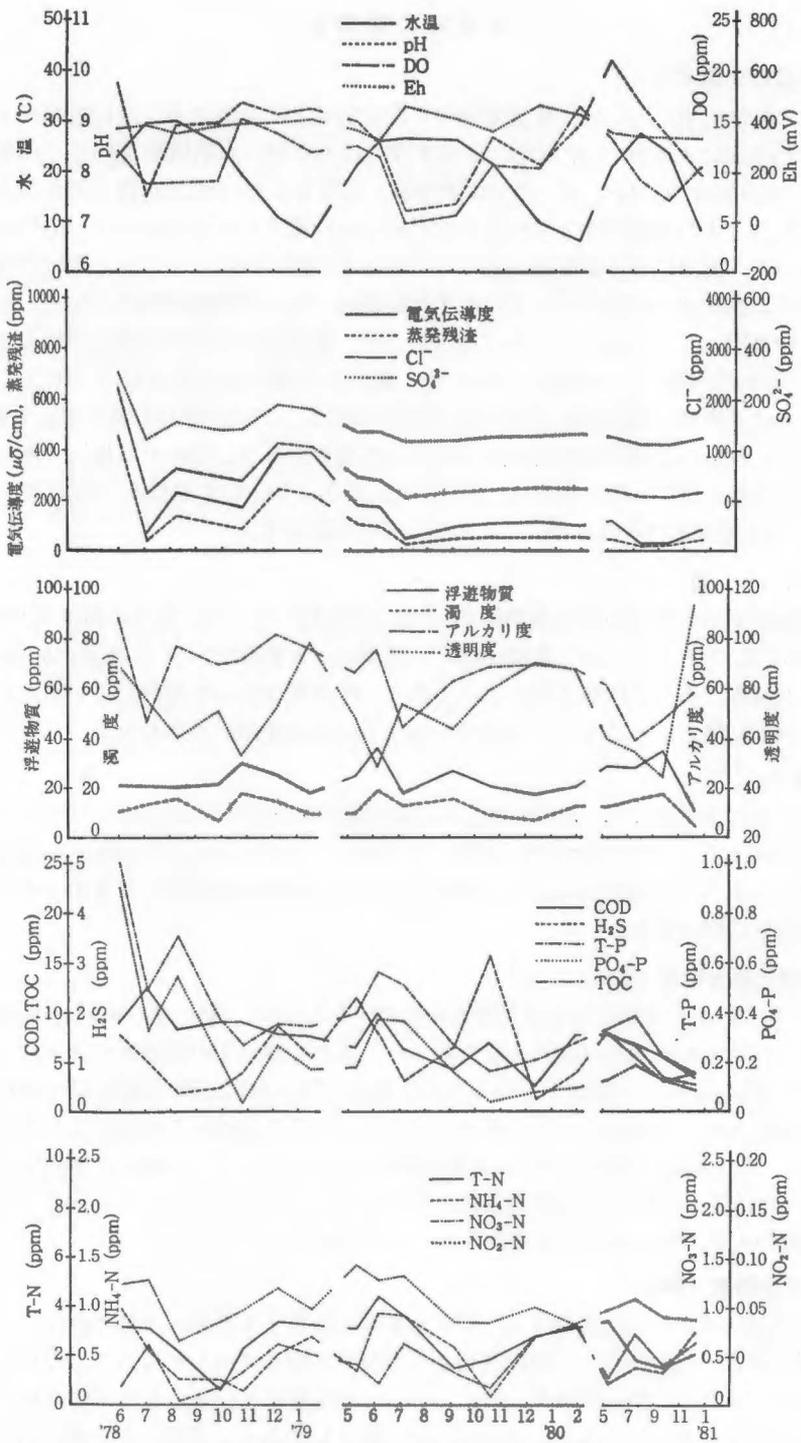
表層水の平均pHは8.7、底層水は8.2と表層水の平均pHが高いのはプランクトンの光合成反応による。この生物作用は湖内と河川部とにおけるpHの差異にも現われており、前者のpHの方が幾分か高かった。湖内のpHは生物作用に起因して変化するので、水温と同様な年周期が認められた。

(c) 酸化還元電位 (Eh)

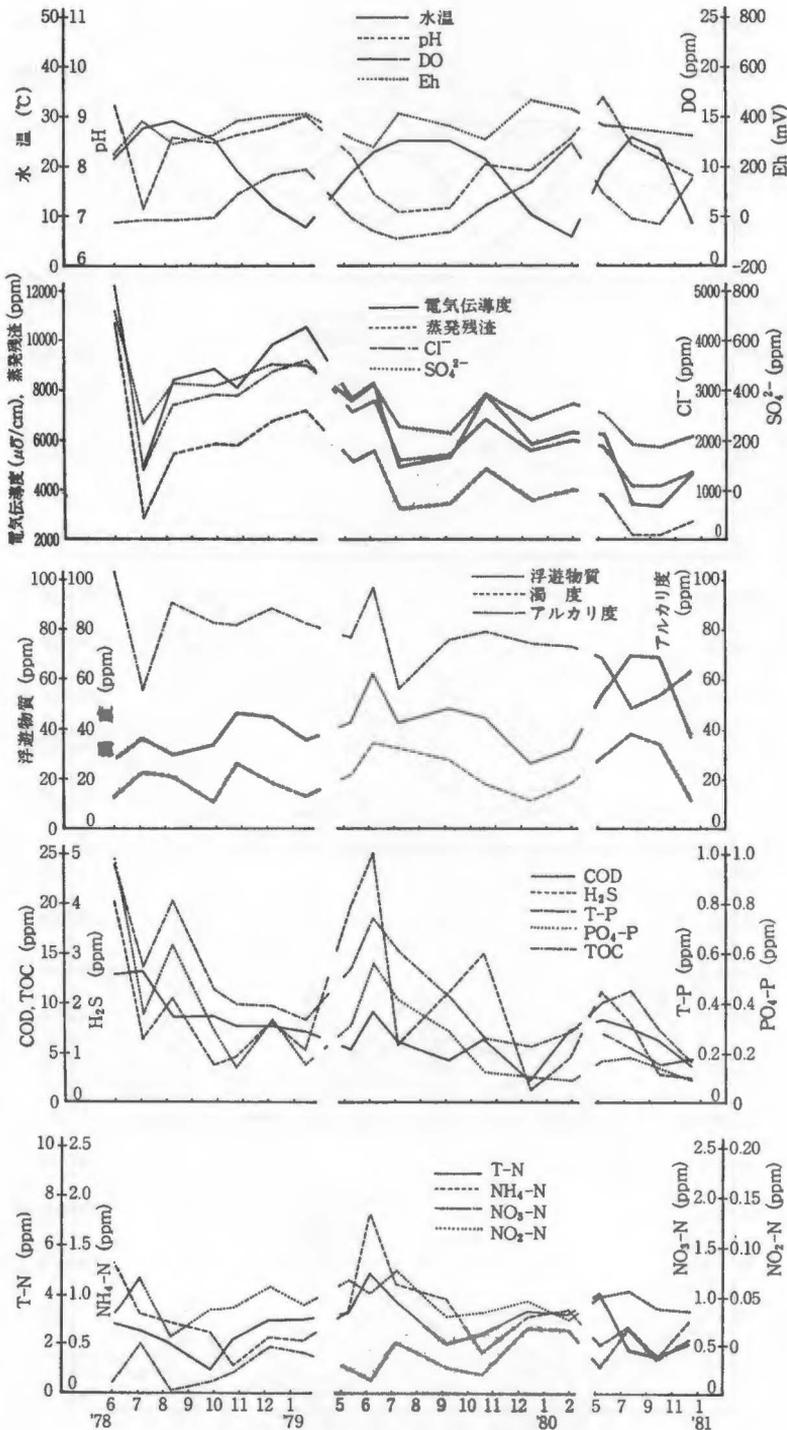
表層水のEhは大気中から十分な酸素の供給があるので、300~400 mVで各地点とも年間を通してほとんど変化は認められなかった。しかし地点1の底層水のように、水深が深く、また底にヘドロの堆積しているような地点では、特に夏期の停滞期には0 mV以下にまで減少した。季節変化でみる限りではEhとDOとは必ずしも対応した変化を示さなかった。この主要な原因はDOは温度や植物プランクトンの活動に直接的な影響を受けやすいのに対し、Ehはそれらの影響を受けにくいことによるものであろう。一般的にDOの変動の大きさ程にはEhは変動しないものである。

(d) 溶存酸素 (DO)

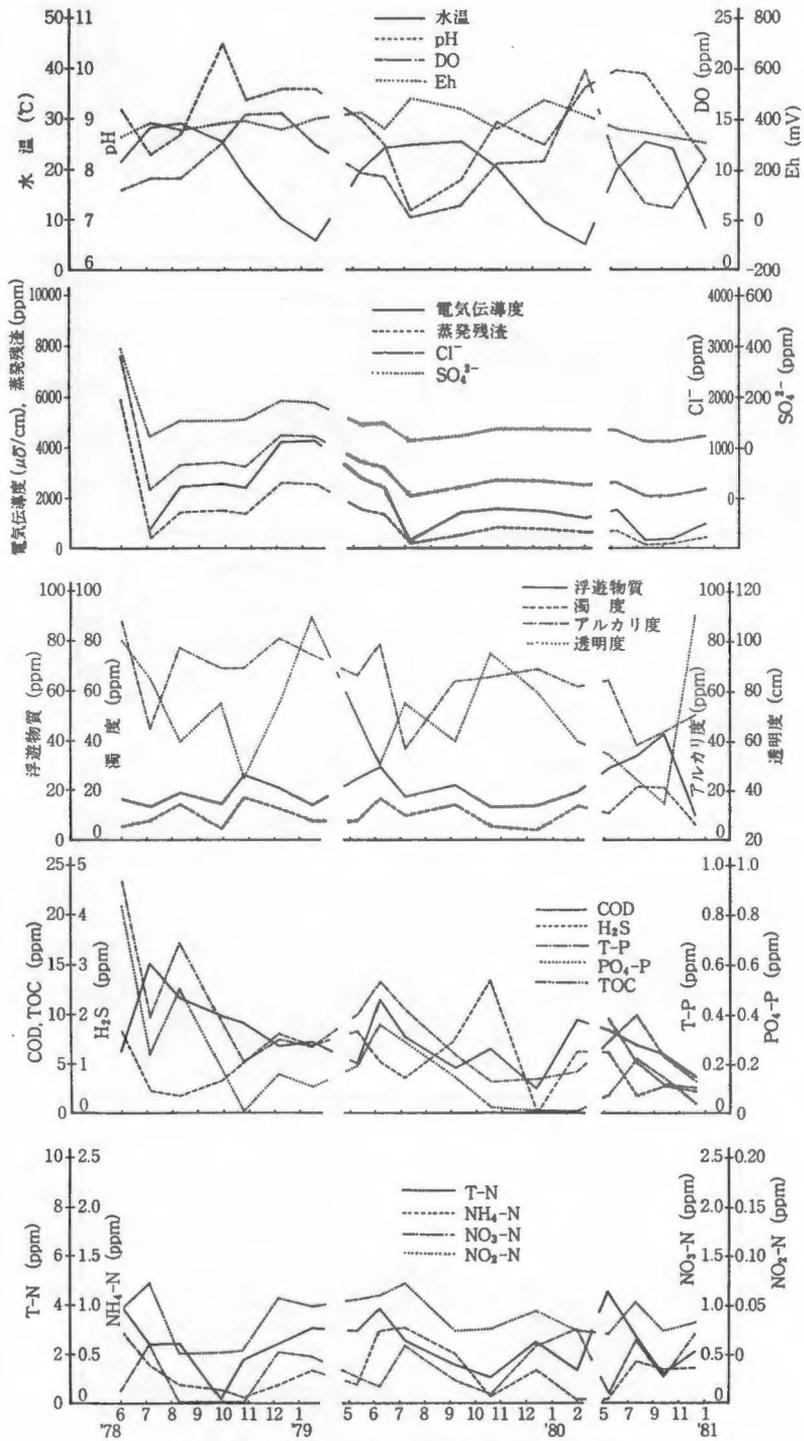
ガスの溶解度は水温に反比例する。DOも水温の変動と丁度逆の季節変動を示した。つまり夏期に低く、冬期に高い。湖内表層水の溶存酸素飽和度は100%近く、ないしはそれ以上の値であった。しかし底層水、特にヘドロの堆積量の多い地点ではDOは低く、底質と水質との界面付近では、ほとんど0に近い値に低下しており、底泥による酸素消費量の大きいことを示した。



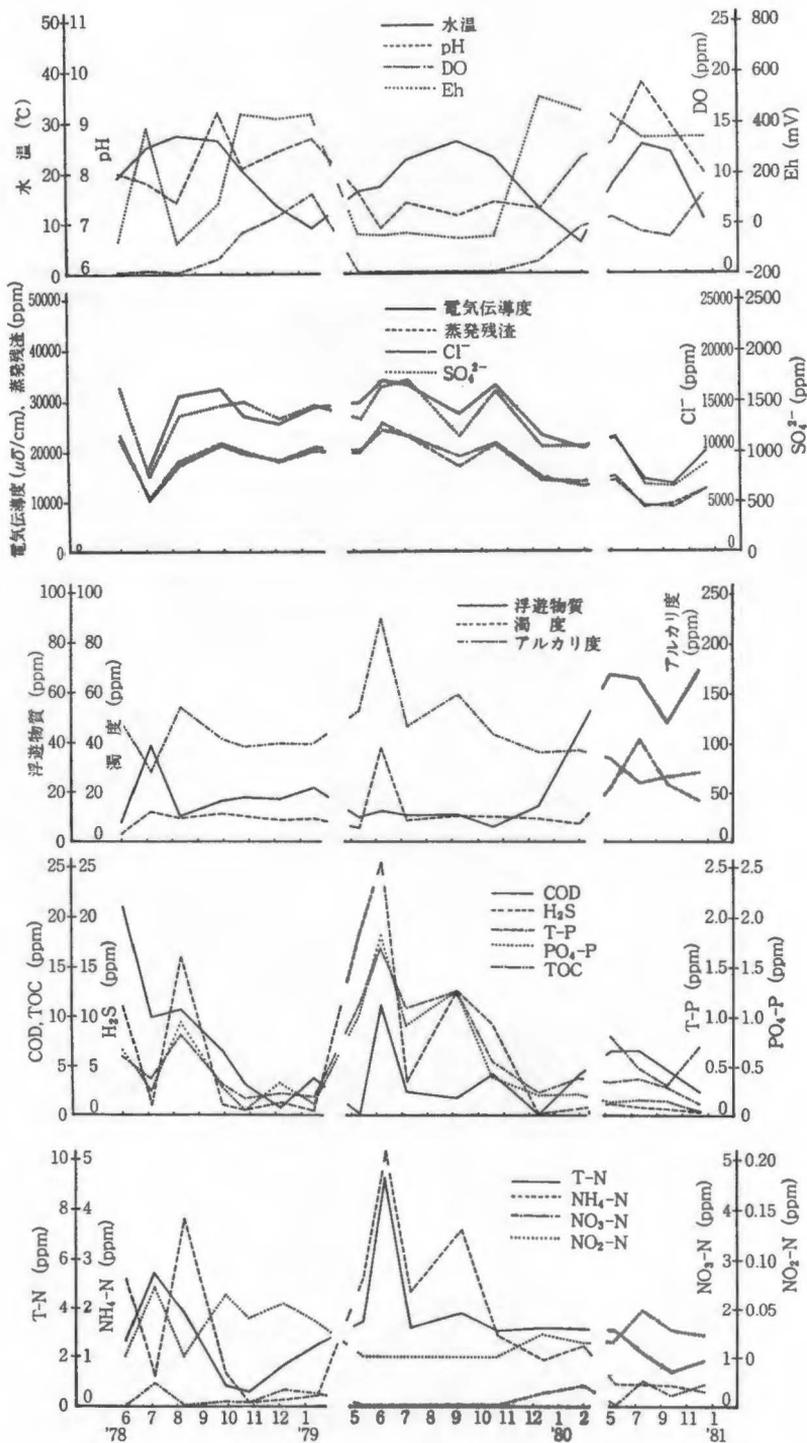
第3図 表層水質の平均濃度月変化



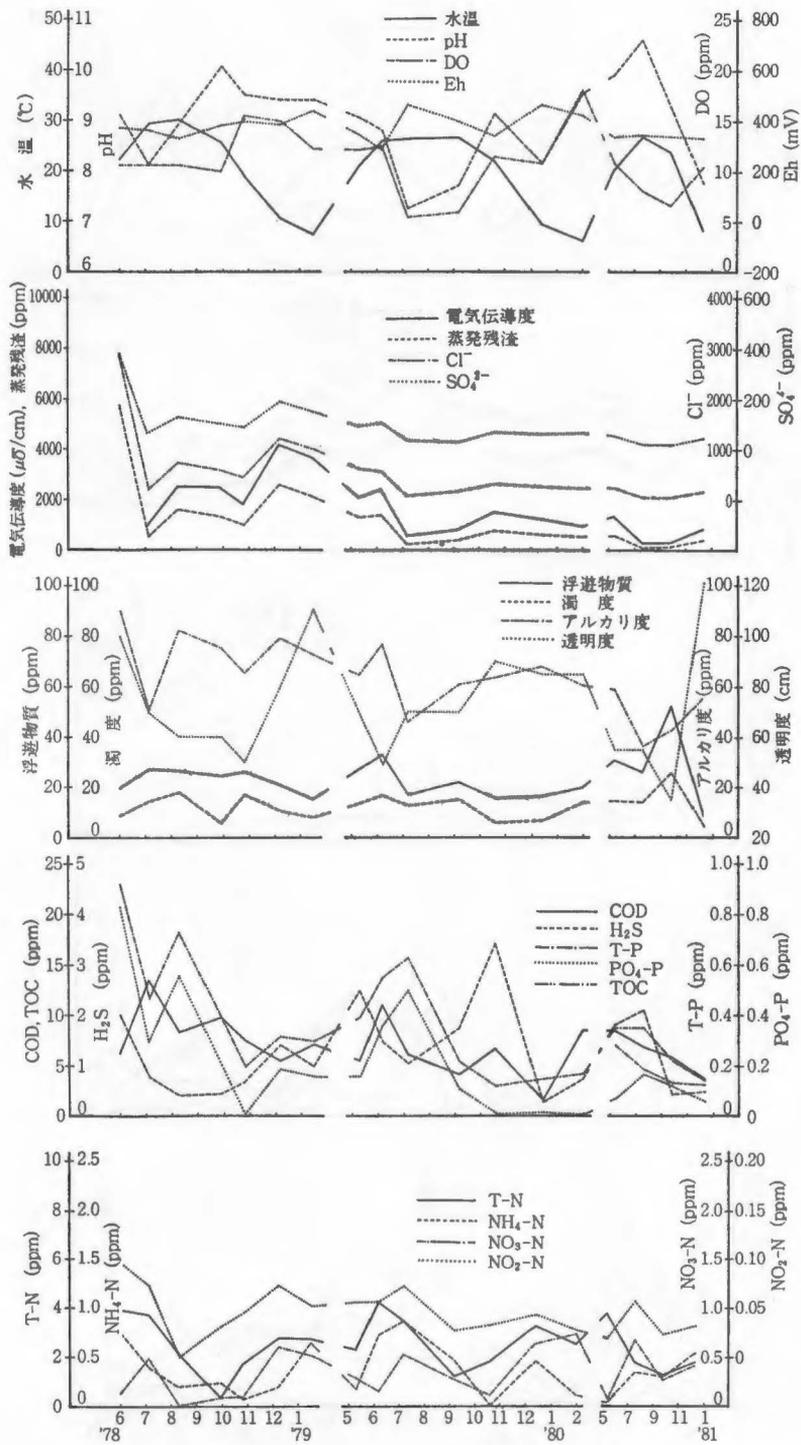
第4図 底層水質の平均濃度月変化



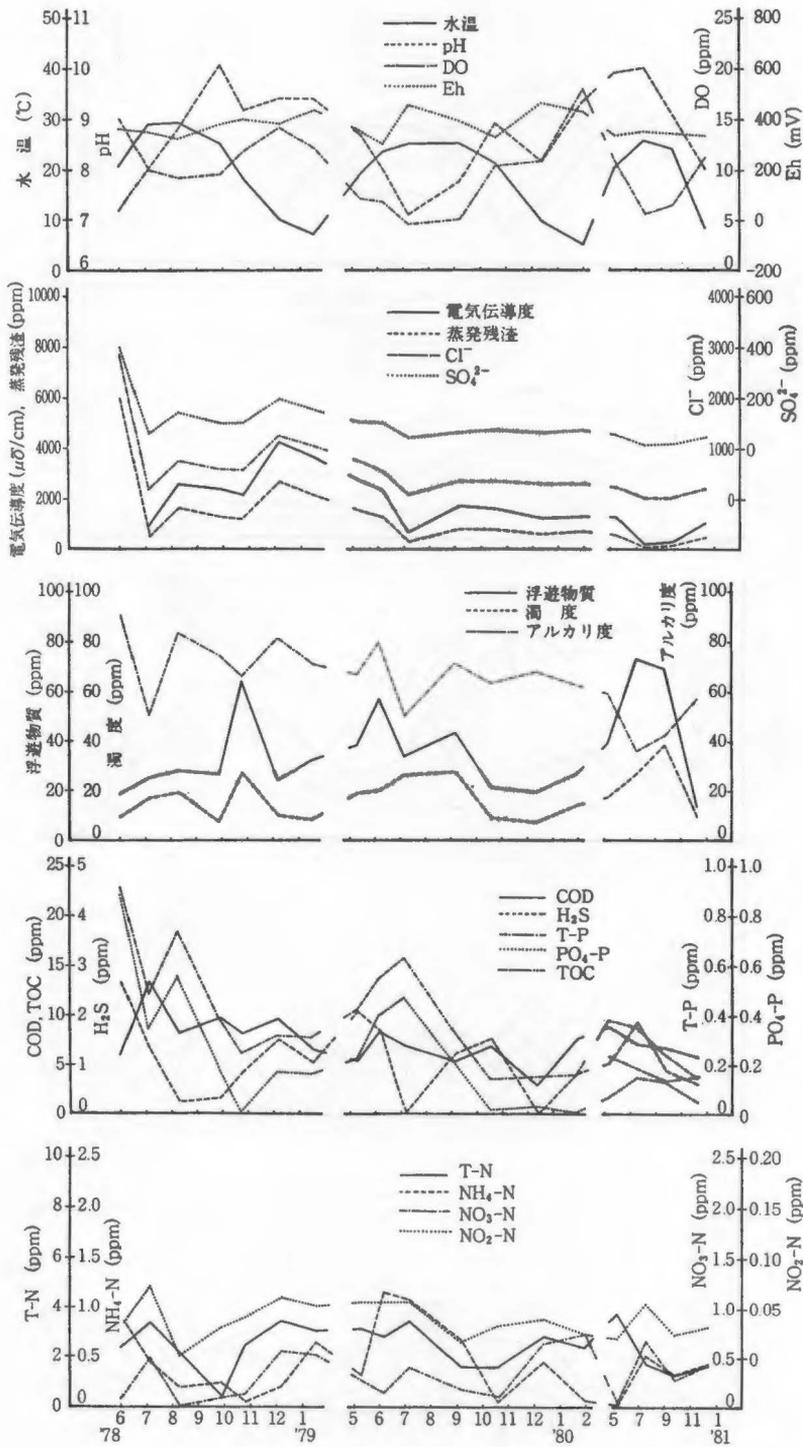
第5図 樋門前(地点1)における表層水質濃度月変化



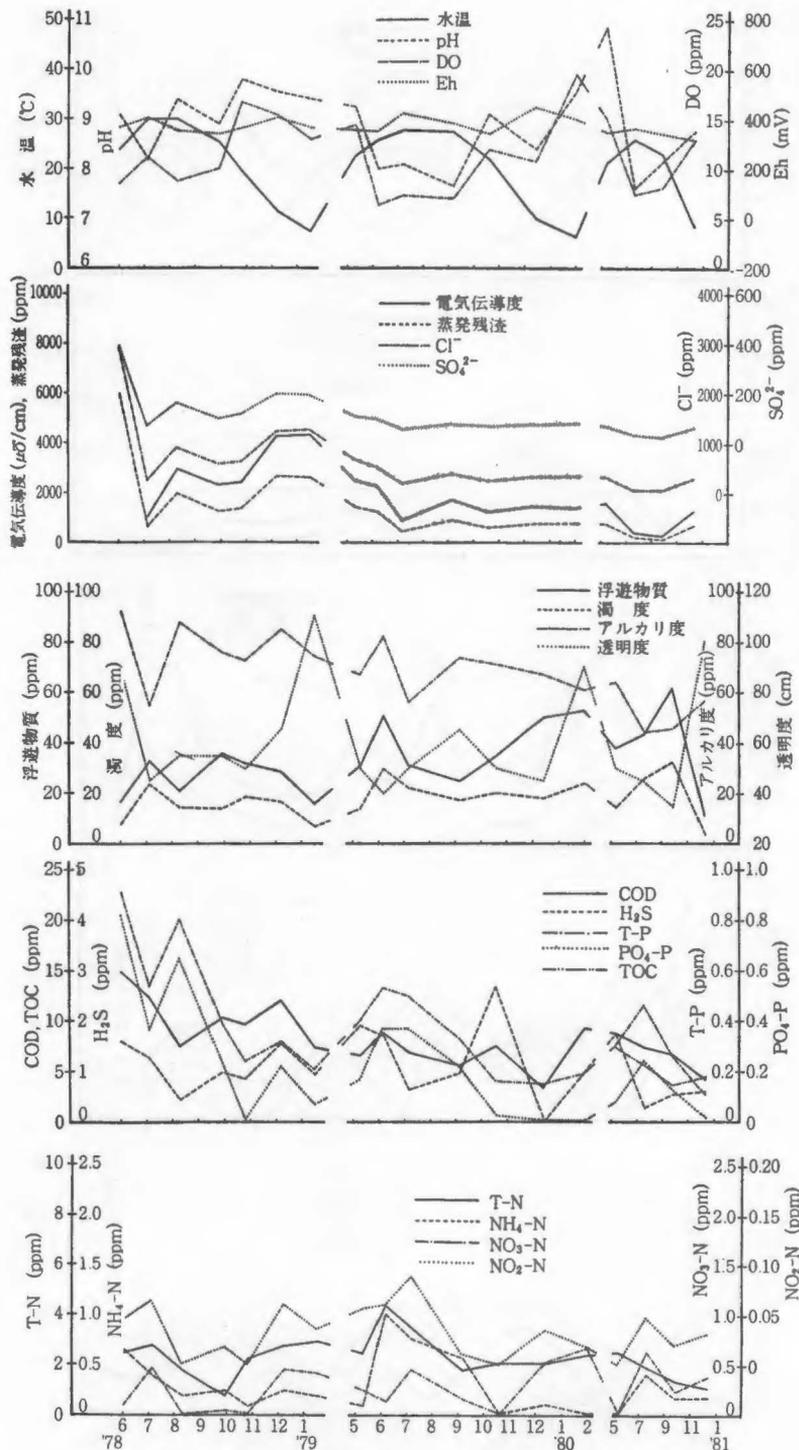
第6図 樋門前(地点1)における底層水質濃度月変化



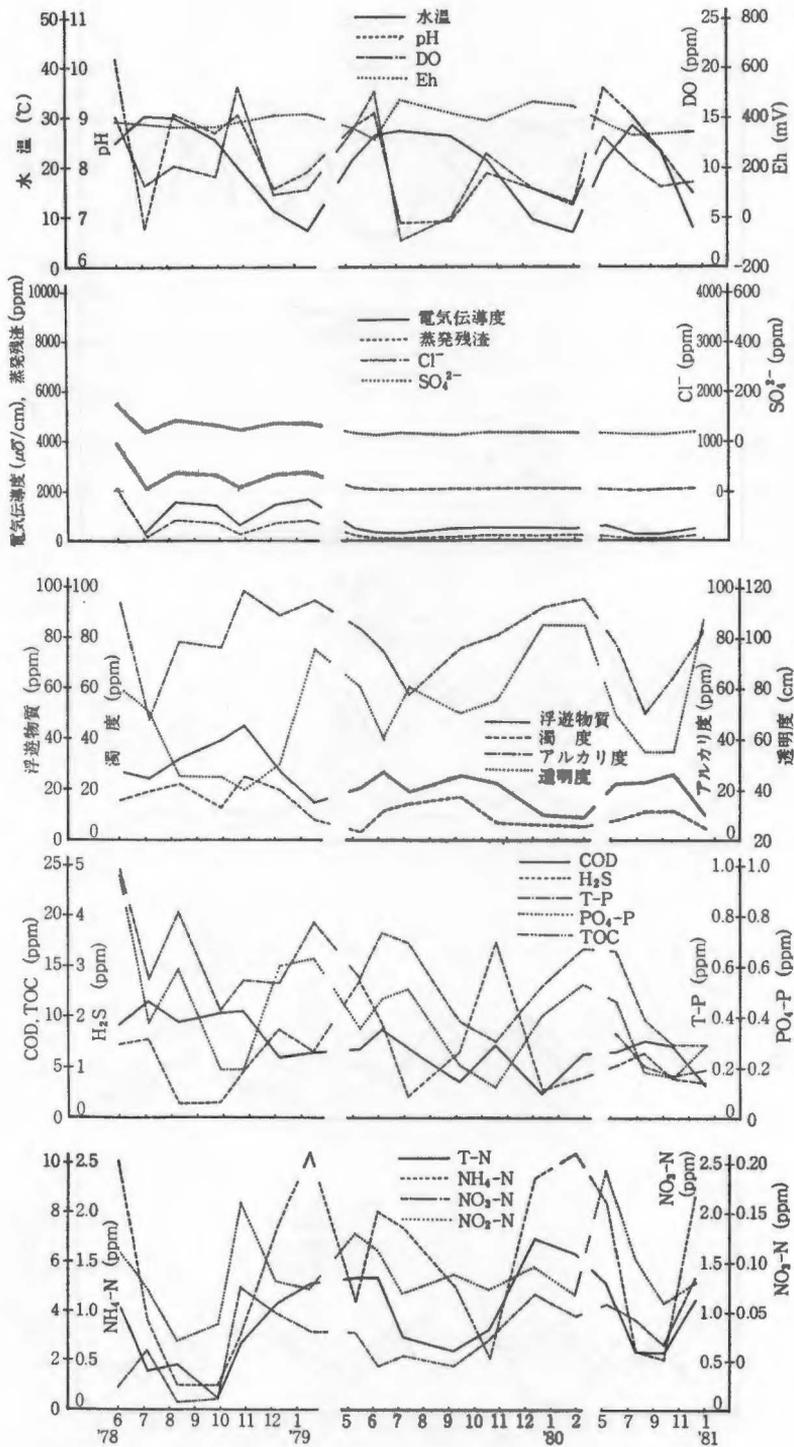
第7図 湖心(地点4)における表層水質濃度月変化



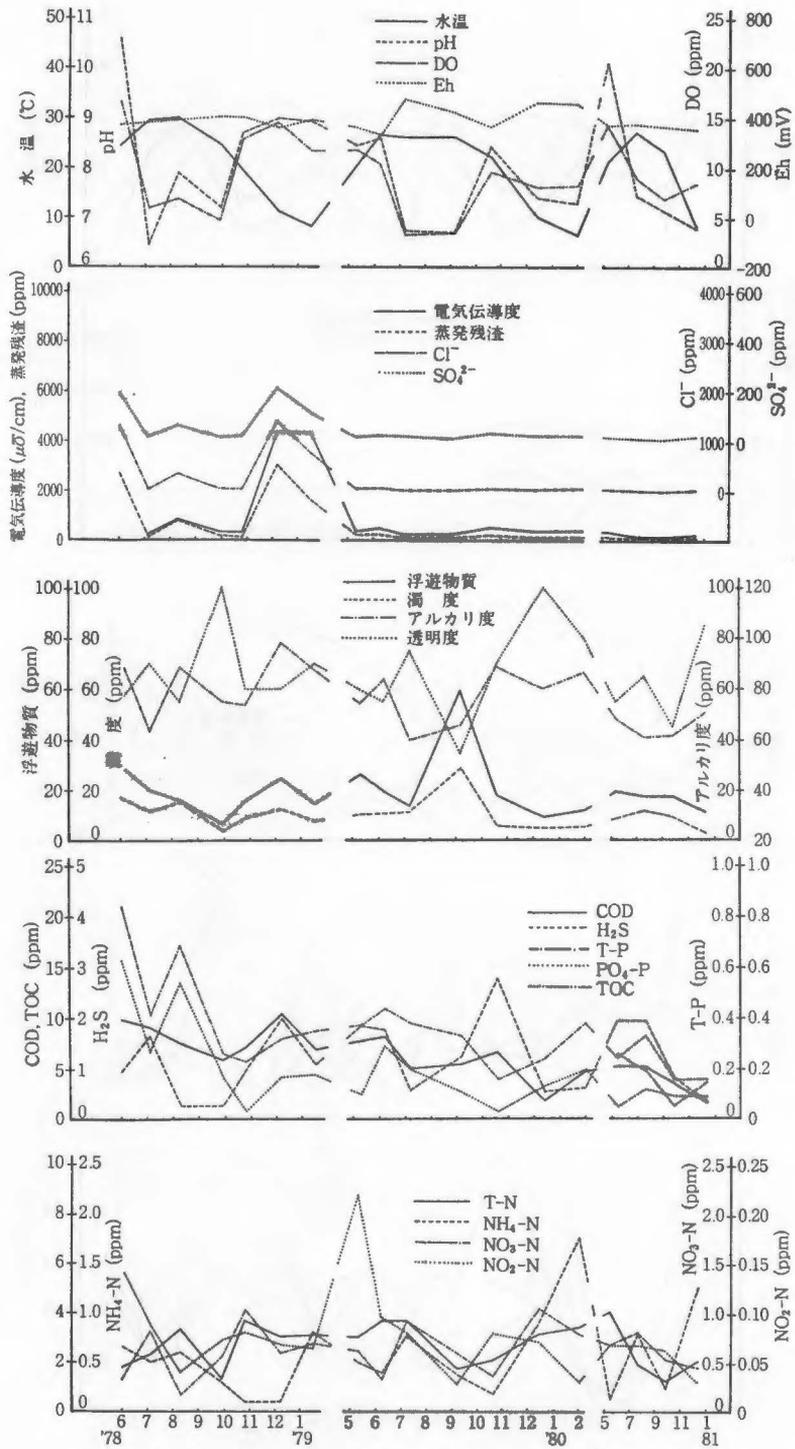
第8図 湖心(地点4)における底層水質濃度月変化



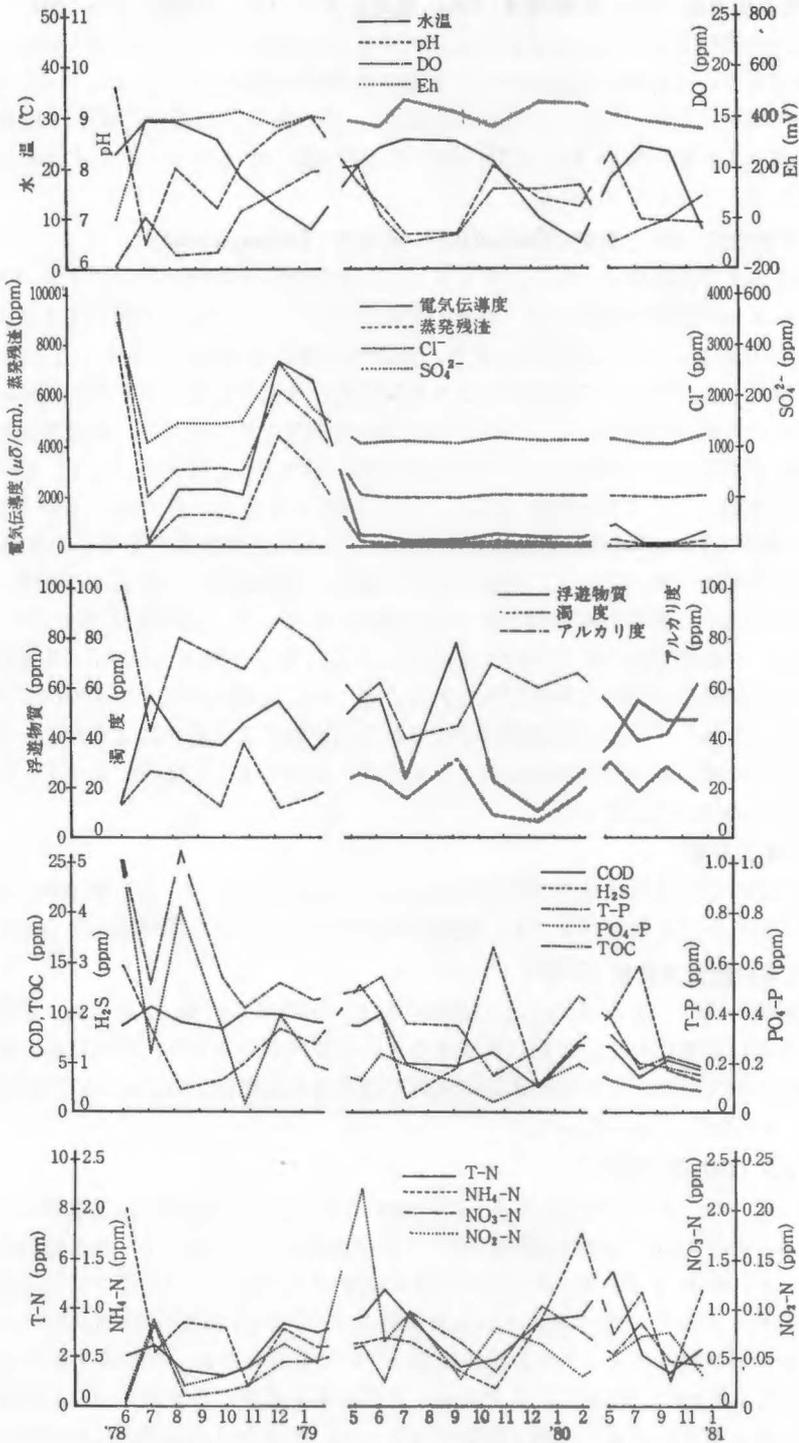
第9図 湖奥部(地点6)における表層水質濃度月変化



第10図 倉敷川（地点10）における表層水質濃度月変化



第11図 笹ヶ瀬川 (地点12) における表層水質濃度月変化



第12図 笹ヶ瀬川(地点12)における底層水質濃度月変化

(e) 電気伝導度 (EC), 蒸発残渣 (DS), 塩素イオン (Cl^-), 硫酸イオン (SO_4^{--})

これらの水質項目はどれも海水起源に依存することが強いので、示された図からわかるように地点あるいは表層水と底層水による濃度の相異は認められているものの、ほとんど同じ変動傾向を示した。地点1の底層水を除き、1979年5月以後の月変化は極めて小さかった。地点1の底層水の EC は 15,000~30,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ もあり、絶えず海水が底部に停滞していることを示している。

(f) 浮遊物質 (SS), 濁度 (Turbidity), 透明度 (Transparency)

SS, 濁度および透明度はシルト, クレイなどの無機質量と植物プランクトンのような有機質量とによって影響を受けるが、前者の変動は河川からの供給, 湖流による底泥の舞い上がりなどの主として物理的要因により、後者は季節的な変動をするものと考えられる。しかし各地点とも季節変化に依存するような周期的な変動はなく、また平均的には表層水より底層水の方が濃度が高いことから、特に SS と濁度とについては、濃度変動の主たる要因は児島湖では生きた植物プランクトンの消長に起因すると考えるよりも、湖流の流動によって引き起こされる底泥質の舞い上がり起因する要素の方が強いものと考えられる。SS と濁度とはほぼ同様な変動傾向を示した。これらと透明度の変化とを比較すると、前者の濃度の増加—減少傾向と、後者の深さの減少—増加傾向とが対応する変動がみられたが、前者に比べて後者の変動割合は大きく増幅されている。透明度は 45~120 cm の範囲で変動し、一般に夏から秋にかけて減少し、冬から春に増加している。SS や濁度と異なり透明度には幾分季節的な特性がみられた。夏—秋に透明度が低くなるのはプランクトンの増殖と、それら生物の分解過程に生成される腐植質による着色によるためと考えられる。また水深の浅い地点の透明度が低くなるのは、前述のように底泥の舞い上がりによる影響が強いためであると思われる。

(g) アルカリ度

アルカリ度の季節変化は他の水質の変化と比べるとゆるやかで、40~80 ppm の範囲で6月から7月にかけて濃度が低下し、夏から秋に高くなるという周期性がみられた。

(h) 化学的酸素消費量 (COD)

湖内表層水の COD は 2~15 ppm の範囲にあり、平均 7.3 ppm であった。季節変化の一般的な特徴は夏期に高く、冬期に低下するという傾向がみられた。湖内はかんがい用水として利用されているが、特に取水期に現行の農業用水基準値 (6 ppm) をはるかに超え、10 ppm 以上になることがあった。

(i) リン ($\text{PO}_4\text{-P}$, T-P)

児島湖は全リン (T-P) 濃度が 0.1~1.4 ppm ときわめて高濃度な富栄養湖となっている。表層水中の平均 T-P 濃度の変動は 6~7月に濃度ピークが現われ、秋から冬にかけて減少している。T-P と $\text{PO}_4\text{-P}$ (オルトリン酸) 濃度の月変化はほぼ同様な変化傾向を示しており、T-P と $\text{PO}_4\text{-P}$ の差で表わされる有機態リン (Org-P) 濃度の年変化は小さかった。この変動傾向は底層水にも、また各採水地点についてもみられた。3年間の平均 T-P 濃度は表層水が 0.388 ppm, 底層水が 0.462 ppm と底層水中濃度の方が高いのは底質からの溶出によるものと考えられる。本稿では述べてないが、底泥中は還元状態にある²⁾のでリンの溶出が促進されやすい。T-P に対する $\text{PO}_4\text{-P}$ の占める割合は全平均値について表層水

で約 61%，底層水で約 65%と、わずかな差ではあるが底層水の方が高かった。この結果も底質からの無機態リンの溶出を示すものであろう。

(j) 窒素 (T-N, NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N)

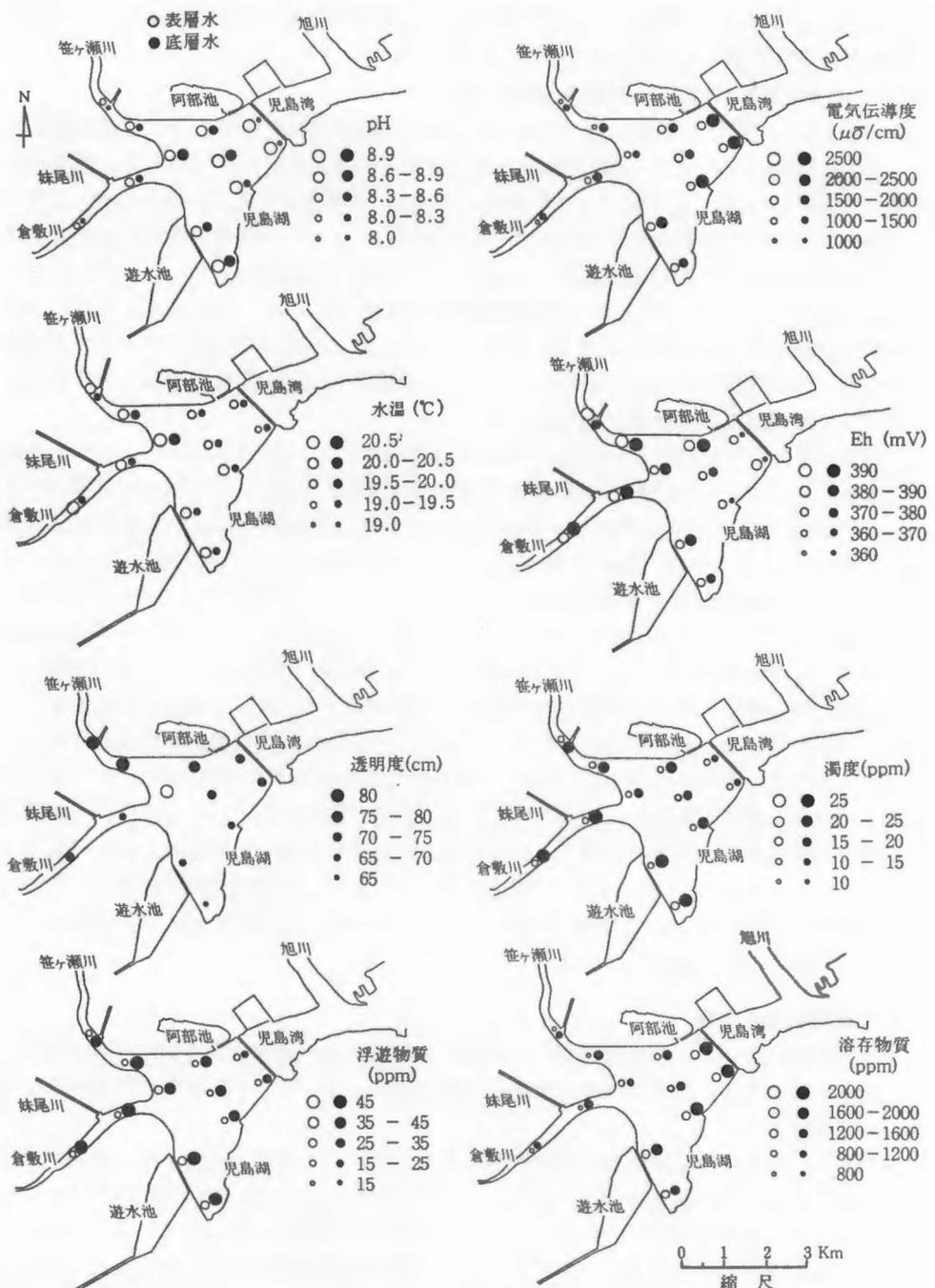
全窒素 (T-N) 濃度は夏期に高くなり、9~10月に最低濃度となり、それ以後再度高くなってゆく傾向がみられた。変動の幅は全地点平均値の月変化についてみると、表層水中濃度で 0.6~4.4 ppm, 3年間の全平均濃度 2.6 ppm, 底層水では 0.95~4.9 ppm, 全平均 2.8 ppm で、リンと同様に幾分底層水中濃度の方が高かった。各態窒素濃度の季節変化は 1 ヶ月程度の遅れや若干の差異はあるもののほぼ同様な変化傾向を示した。T-N に対する無機態窒素 (Inorg-N) の占める割合は季節や採水地点によって当然差異はあるが、全平均値で計算すると表層水で約 34%，底層水では 43%と、比率は異なるが、リンと同様に底層水の方が無機態の占める割合が高かった。有機物の沈降過程における分解、底泥からの溶出などの現象から推測される通りである。

今回観測されたこれらのデータと 1967 年に小林らによって分析されたデータ³⁾と比較してみる。それによると湖内の表層水中の PO₄-P 濃度は 0.035~0.065 ppm, NO₃-N や NO₂-N は両者とも極めて低濃度で、NO₃-N は 0.02~0.10 ppm, NO₂-N は 0.001~0.016 ppm, NH₄-N は 0.15~0.45 ppm, SO₄²⁻ は 19.7~85.2 ppm, Cl⁻ は 124~531 ppm, 濁度は 12.2~23.4 ppm であったと報告されている。また笹ヶ瀬川では、PO₄-P は 0.058 ppm, NO₃-N は 0.03~0.22 ppm, SO₄²⁻ は 10.6~31.5 ppm, Cl⁻ は 15.0~24.8 ppm, 濁度は 6.9~55.3 ppm であった。この 10 年間に於ける湖内の水質変化は NO₃-N, NO₂-N の最高濃度で約 10 倍, NH₄-N で約 4 倍, PO₄-P で約 5 倍, Cl⁻, SO₄²⁻ で約 2 倍に増加している。濁度は分析法が異なるのでいちがいに比較はできないが、数値的には大差はなかった。流入河川水の濃度についても、NO₃-N, NO₂-N は数倍から 5 倍程度, NH₄-N, PO₄-P は湖内と同程度の倍率で高くなっている。これらの数値の比較にみられるように、人間活動に起因する栄養塩による河川汚濁とそれに伴う流入負荷の増加が児島湖の汚濁を一層すすめることになっている。Cl⁻ や SO₄²⁻ 濃度の増加は児島湾との締切堤防の破損や、船の周航時の樋門の開閉に伴い、この 10 年間は逆に少しずつ海水が湖内に浸入し、蓄積しつつあることを示すものである。

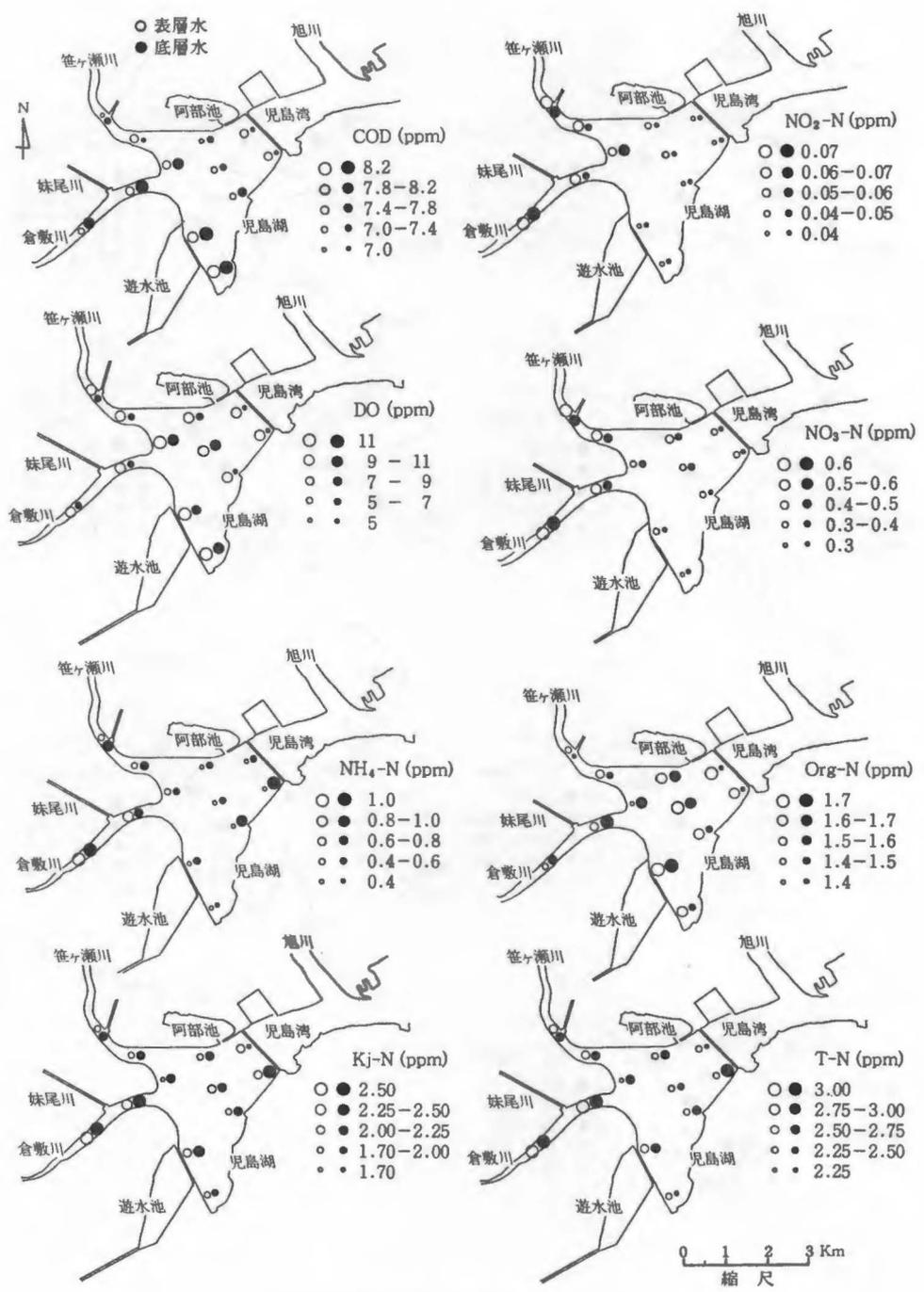
2. 水質の地点分布

各水質項目について、採水地点毎の 3 年間の平均値の地点分布を第 13 (a)~(c) 図に示す。図中白丸は表層水、黒丸は底層水中の濃度を表わしている。以下水質の特徴的な分布について述べる。

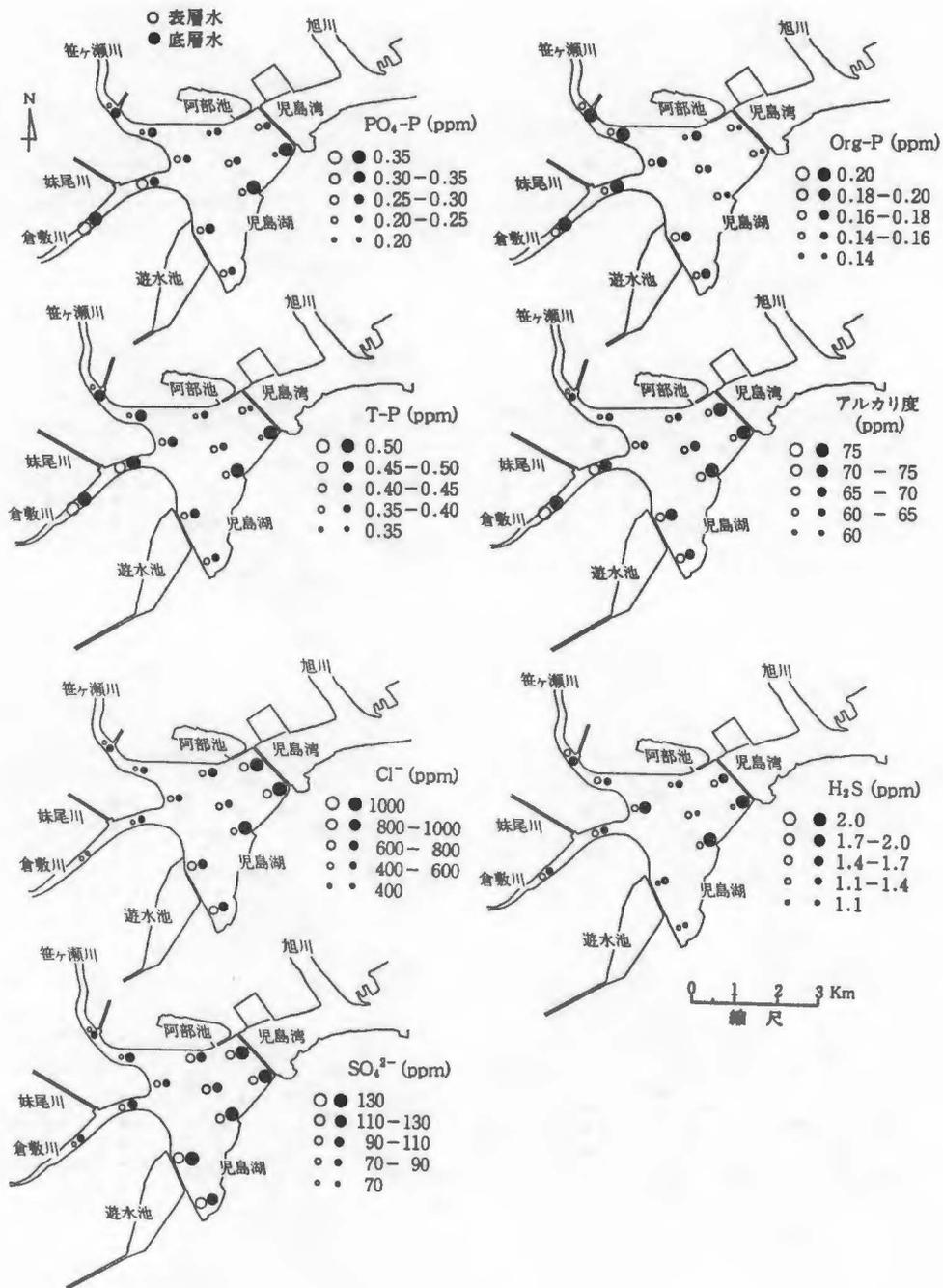
pH については湖内の表層水中濃度は河口部より高い。これは前述のように植物プランクトンの光合成作用の結果である。樋門近くの底層水中の値が低いのは海水が滞留しているためである。海水の影響は EC, Cl⁻, SO₄²⁻, DS 濃度にも顕著に現われている。表層水は笹ヶ瀬、倉敷両河川水の流入による希釈があり、湖内で幾分濃度が高くなるものの大差はない。しかし底層水には地点 6, 7 の湖奥部まで海水が浸入しているのが認められる。Eh は表層、底層水とも河川部で高く、湖内で低くなっている。これは、Eh と DO とは必ずしも対応した変動をしていないとはいえ、河川のような流水部では水の乱れで大気中と水中との間の酸素移動がすみやかに起こるのに対して、停滞水では酸素の供給速度が遅くな



第13(a)図 平均水質の地点分布



第13(b)図 平均水質の地点分布



第13(c)図 平均水質の地点分布

ると底泥による酸素消費等が影響しているものと思われる。水の乱れが水質に影響する他の項目には SS、濁度があげられる。水の乱れによる底質の舞い上がりは特に底層水中のこれらの水質濃度を高める作用として働く。表層水の SS 濃度には地域的な偏りはみられなかったが、透明度は笹ヶ瀬川河口部が平均的に高かった。地点 8 の透明度の値が点線の白丸で記されているのは、この地点の平均深度が約 1 m 弱であったが、湖底までセッキ板が透視され、水深以上の透明度であったことを示している。H₂S の発生は酸化還元電位に依存するが、底層水中の濃度は第 13 図に示された Eh の分布とよく対応している。表層水中の濃度はどの地点も大差がなかった。COD 濃度については、表層水は湖内の中心横断面での濃度が相対的に低く、湖奥部での平均濃度が 8 ppm と他の地点よりも高くなっていた。底層水では倉敷川、湖奥部の地点が高かった。これも水の停滞性が水質濃度に反映しているものと思われる。しかし樋門前は COD 濃度の低い海水が流入しているため停滞域ではあるが濃度は低かった。表層水中の DO はどの地点も平均 10 ppm 前後と変わらないが底層水は深い地点で特に濃度が低下していた。表層水中の各態窒素・リンの濃度分布についてみると、Inorg-N、T-N は河川部での濃度が高く、湖内で減少した。これは湖内での脱窒、プランクトンによる摂取、沈降等によるためと思われる。逆に Org-N は河川部より湖内で濃度が高くなっている。笹ヶ瀬川の河川水の PO₄-P 濃度は他地点より平均値で約 1.5 倍高かった。一方 Org-P 濃度の変化は窒素程の顕著な傾向はみられなかった。底層水についてみると、NO₂-N、NO₃-N は表層水と同様な地点分布がみられたが、NH₄-N は河川部および樋門前の地点 1 の濃度が特に高かった。これは PO₄-P についても同様であった。Org-P は河口部における濃度が特に高かった。

栄養塩濃度や COD 濃度は倉敷川の汚濁が激しいことを示している。これは倉敷川は下水道整備の不十分な倉敷市の市街地排水を受け入れているのに対して、笹ヶ瀬川は一部に総社市の生活排水の流入はあるものの、河川流量が倉敷川の約 3 倍量あり河川流量に対する受容排水の人口比が小さく、流域の大部分は農村地帯であるためと思われる。しかし児島湖に流入する負荷量で考えるなら、流量の多い笹ヶ瀬川の方が寄与率は高くなる。

湖内の水質分布は主として湖流や底泥からの溶出等によって支配されると思われる。特に表層水の場合は湖流が支配的となろう。地点毎の各種水質の分布様式を個々の水質濃度から一般的な特徴を類推することは困難である。そこで分析した水質項目に対して、採水地点間の濃度相関を総合的に把握するために濃度相関マトリックス法¹⁾による解析を試みた。濃度相関マトリックスは以下のようにして求められる。まず各試料毎に対象とする一組の水質項目について、そのうち 2 種の水質濃度比をすべての組合せについて計算し、これを三角行列で表わす。これを一つの試料に対する濃度比マトリックスと呼ぶ。この濃度比マトリックスを全ての地点の試料について計算し、2 つの試料の各行列要素の値の比をとり、この比がある一定の範囲内にあるものの割合を 2 地点間の相関数と呼ぶ。さらに全ての地点間の組合せについて相関数を求め、これを三角行列で表わしたものが濃度相関マトリックスである。この相関数の有意性を判断する基準つまり評価基準は、ある値 M を設定し、濃度比マトリックスの要素の値 X_{ij} が $1/M \leq X_{ij} \leq M$ の範囲にあるものの比率から決定される。M の値としては慣用的に 1.3 あるいは 1.5 の数値がとられている。この相関数が 1 に近い程 2 地点のサンプル間の相関が高いことを示す。これは対象とする水質

分析項目に対する水質の構成比の類似性つまり全体的な相関性を表わすものであるから、非変質性水質の場合には2地点間の水質に対して、同一汚染源の影響範囲や、汚濁発生源の質的な違いを判断する一つの基準になる。また同一の汚染源で変質性水質の場合には、2地点間における水質の変質の程度を総合的に表示しうることも可能であると考えられる。この濃度相関マトリックス法の適用例は重金属の分布特性の解析に用いられることが多い。表層水および底層水の濃度相関マトリックスの計算結果をそれぞれ第1, 2表に示す。各表の対角線の右側は各態窒素およびリンの水質8項目についての計算結果を、また左側はそれらを含む20項目についての計算結果である。マトリックスの各要素の上段は $M=1.3$ 、下段は $M=1.5$ に対する相関数を表わしている。表層水の水質8項目について計算された相関数の値をみると、一般的に湖内の8地点間および地点9と10, 11と12などの地点間の値が高い。これは表層水は吹送流によって比較的短時間に移流、混合するためであろうと思われる。例外もなくはないが、河川部と湖内各地点との間の相関数は低い。これは既に述べたように、河川と湖内とは水質の変化を起こさせる要因が同一でないことによるものと思われる。水質20項目について計算した相関数についても数値上の

第1表 表層水平均濃度の相関マトリックス

地点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		1.00	0.821	1.00	1.00	0.929	1.00	0.500	0.357	0.214	0.464	0.429
		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.786	0.500	0.429	0.643	0.500
2	1.00		0.643	1.00	1.00	1.00	1.00	0.464	0.321	0.179	0.464	0.393
	1.00		0.964	1.00	1.00	1.00	1.00	0.786	0.500	0.393	0.607	0.464
3	0.921	0.863		0.821	0.714	0.643	0.643	0.571	0.429	0.286	0.607	0.464
	1.00	0.974		1.00	0.893	0.750	0.857	0.821	0.607	0.500	0.929	0.679
4	0.979	0.974	0.932		0.964	0.857	1.00	0.607	0.393	0.214	0.500	0.429
	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00	1.00	0.893	0.571	0.464	0.679	0.500
5	1.00	1.00	0.837	0.942		1.00	1.00	0.500	0.321	0.179	0.464	0.393
	1.00	1.00	0.953	1.00		1.00	1.00	0.750	0.571	0.393	0.536	0.464
6	0.774	0.811	0.663	0.732	0.816		1.00	0.429	0.179	0.143	0.429	0.393
	0.879	0.889	0.795	0.932	0.963		1.00	0.571	0.500	0.321	0.500	0.464
7	0.989	1.00	0.842	0.979	1.00	0.932		0.464	0.250	0.179	0.429	0.429
	1.00	1.00	0.942	1.00	1.00	0.984		0.750	0.607	0.357	0.643	0.536
8	0.537	0.500	0.653	0.684	0.495	0.442	0.553		0.714	0.464	0.679	0.571
	0.784	0.753	0.874	0.916	0.768	0.679	0.784		0.821	0.643	0.929	0.821
9	0.368	0.368	0.453	0.416	0.332	0.263	0.347	0.674		0.643	0.464	0.464
	0.505	0.479	0.621	0.600	0.484	0.489	0.516	0.858		0.929	0.679	0.643
10	0.263	0.237	0.274	0.279	0.258	0.211	0.263	0.316	0.489		0.393	0.357
	0.347	0.342	0.363	0.347	0.326	0.289	0.337	0.426	0.674		0.536	0.536
11	0.453	0.458	0.495	0.474	0.442	0.363	0.437	0.684	0.711	0.389		1.00
	0.511	0.511	0.663	0.642	0.500	0.432	0.547	0.916	0.863	0.579		1.00
12	0.437	0.432	0.447	0.447	0.400	0.305	0.405	0.489	0.637	0.537	0.900	
	0.463	0.458	0.500	0.468	0.458	0.432	0.479	0.742	0.858	0.705	0.989	

右上欄：水質成分 (NO₂-N, NO₃-N, NH₄-N, Org-N, T-N, PO₄-P, Org-P, T-P) を用いた計算値

左下欄：水質20成分 (NO₂-N, NO₃-N, NH₄-N, Org-N, T-N, PO₄-P, Org-P, T-P, 濁度, SS, COD, EC, DS, アルカリ度, Cl⁻, SO₄²⁻, pH, DO, Eh, 水温) を用いた計算値

各行列要素の上段は評価基準 $M=1.3$ 、下段は $M=1.5$ に対する相関数を表わす

第2表 底層水平平均濃度の相関マトリックス

地点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		0.214	0.214	0.179	0.321	0.143	0.143	0.107	0.179	0.357	0.179	0.214
		0.393	0.214	0.250	0.571	0.214	0.321	0.214	0.286	0.393	0.250	0.250
2	0.337		0.464	0.393	0.500	0.321	0.643	0.357	0.536	0.357	0.393	0.321
	0.468		0.571	0.750	0.679	0.750	0.821	0.500	0.679	0.536	0.643	0.500
3	0.184	0.258		0.964	0.321	0.679	0.714	0.679	1.00	0.393	0.786	0.643
	0.242	0.363		1.00	0.500	0.893	0.929	0.893	1.00	0.607	0.964	0.893
4	0.163	0.311	0.863		0.357	0.929	0.821	0.750	0.750	0.429	0.679	0.393
	0.263	0.416	0.974		0.429	1.00	0.929	0.929	0.929	0.536	0.929	0.750
5	0.274	0.263	0.321	0.321		0.357	0.536	0.179	0.357	0.286	0.357	0.286
	0.395	0.353	0.468	0.432		0.536	0.607	0.357	0.536	0.500	0.464	0.429
6	0.137	0.211	0.595	0.758	0.321		0.821	0.571	0.750	0.250	0.750	0.429
	0.221	0.411	0.805	0.816	0.426		1.00	0.679	0.893	0.464	0.786	0.500
7	0.163	0.258	0.789	0.679	0.405	0.795		0.571	0.929	0.321	0.643	0.429
	0.289	0.353	0.942	0.884	0.542	0.937		0.571	1.00	0.357	0.929	0.607
8	0.137	0.242	0.505	0.611	0.226	0.426	0.400		0.500	0.536	0.571	0.643
	0.232	0.347	0.800	0.921	0.347	0.568	0.558		0.679	0.571	0.786	0.750
9	0.189	0.200	0.679	0.526	0.337	0.516	0.563	0.505		0.429	0.929	0.571
	0.258	0.295	0.889	0.747	0.479	0.774	0.805	0.726		0.643	1.00	0.786
10	0.189	0.184	0.284	0.263	0.332	0.221	0.268	0.379	0.374		0.536	0.714
	0.274	0.289	0.442	0.363	0.447	0.326	0.363	0.526	0.558		0.786	0.893
11	0.184	0.221	0.795	0.579	0.384	0.489	0.589	0.600	0.895	0.389		0.821
	0.268	0.321	0.989	0.842	0.474	0.711	0.811	0.811	0.995	0.568		1.00
12	0.168	0.211	0.632	0.500	0.368	0.416	0.474	0.716	0.684	0.474	0.889	
	0.242	0.316	0.842	0.705	0.447	0.589	0.658	0.816	0.874	0.668	0.995	

右上欄：水質8成分の計算値

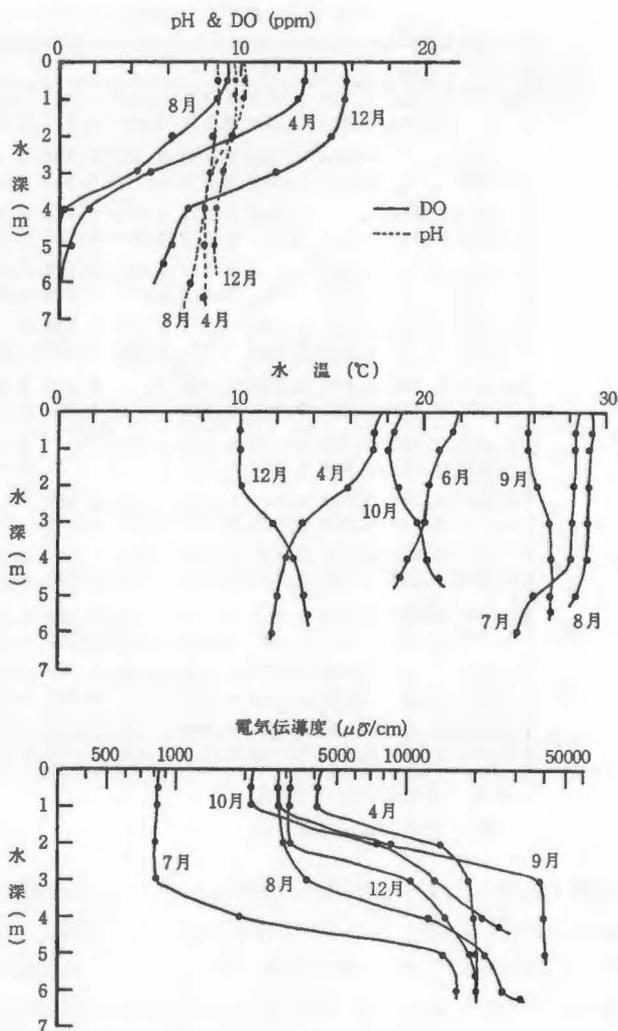
左下欄：水質20成分の計算値

差異はあるがほぼ同様な傾向が認められた。この20項目の水質の中には、それらの変動要因は必ずしも同一ではないにもかかわらず、窒素とリンだけの8項目の場合と同様な傾向が認められたのは3年間の水質平均値を用いて相関数を計算したためかも知れない。季節毎の平均値、あるいは1回の採水時の分析値を用いて計算すると異なった様相になったかも知れない。水質項目の特性を考慮して、組合せを変えることによって相関数がどう変わるか、またその場合相関数をどう評価すべきかについては今後検討をすすめる積りである。第2表は底層水の水質から求めた濃度相関マトリックスである。底層水の場合は採水地点によって水深が1~7mと異なるので、単に水の流動だけから相関数の大小を論じることにはできない。むしろ底泥の質と周囲の環境条件およびそれらによって影響を受ける底泥からの水質物質の再溶出等によって底層水の水質が決定されると考える方が妥当であろう。それ故に相関数のもつ意味も、上述の底質、環境条件、再溶出さらに流動等の点から論じられなくてはならない。しかし現時点ではまだこれらの指標と相関数との関係を十分に説明しうるに足るデータはない。計算に用いる水質成分が8項目の場合と20項目の場合とで表層水と同様に大差は認められなかった。

3. 水質の垂直分布

1978年に観測された地点1におけるpH, DO, 水温, ECについての垂直分布を第14図

に示す。地点1におけるECの値は観測日にどれだけの量の海水が浸入していたか、海水と湖水との混合度によって著しい差が生じている。その値から判断すると、季節にかかわらず、水深1~3mの間に密度差による明確な変水層があることが認められた。DOについても同様な現象がみられたが、pHは表層から底層にかけて季節を問わずゆるやかに減少していた。水温についてみると、12月の冬期停滞期における温度躍層がみられたが、一般的に湖沼でおこる夏期停滞期の明確な躍層は認められず、また本来春の循環期であるべき4月に躍層がみられるなど特異な垂直分布が観測された。しかし5月の観測時には表層から底層まで3度程度の温度差しかなかった。1979年以後では4月の観測は欠測しているが、他の月については1978年度とはほぼ同様な傾向であった。



第14図 地点1における水質の垂直分布

た。地点2も樋門前の場所で、水深は地点1より約1m浅い程度で、物理的な環境条件も類似しているため、水質の垂直分布も大差なかった。他の地点の大部分の水深は2mより浅く、表層から底層までほとんど水質は変わらなかった。しかし水深が約2m以上ある地点では、底層水のDOは明らかに表層より低下しており、ECは増加していた。各採

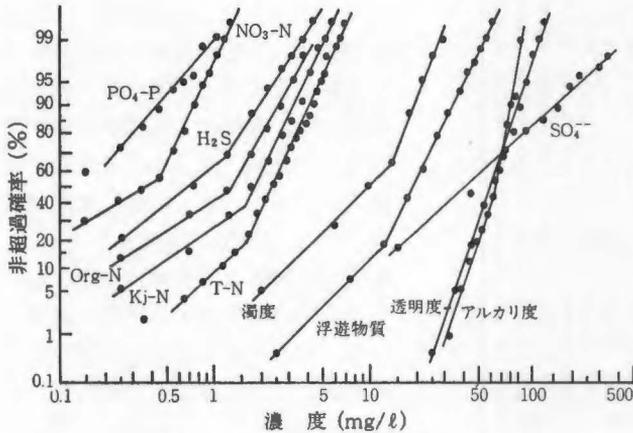
第3表 採水地点の平均水深観測値

地点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
水深(m)	5.9	5.3	4.1	1.5	3.0	1.2	1.8	1.0	1.9	1.9	2.2	1.9

水地点の観測時の平均実測水深を第3表に示しておく。

4. 水質の統計的構造

既に述べてきたように河川水や湖沼水の水質は季節的に、また一日のうちでも時間的にも変動するものである。このように変動する水質に対してその水域としての代表性を把握しようとするとき、単に平均値だけでなく、水質の変動幅や出現頻度の分布、あるいは水質間の相関関係など、水質変動の統計的構造を把握しておくことも重要である。ここでは3年間の全データについて、その変動範囲を水質毎に適当な濃度幅で分割し、各々の出現頻度を求めて確率紙上にプロットした。これを第15図に示す。これによると透明度と SO_4^{--} 濃度は対数確率紙上で直線になった。



第15図 水質の確率分布

つまりこれらの水質の出現頻度分布は対数正規分布に従うことが予想される。他の多くの水質項目は非超過確率が20~50%の間に屈折点を有する2つの直線で表わされる分布形をなした。

水質の低濃度部と高濃度部とでは水質変化を起こさせ

る機構や要因に差異があるのかも知れない。水質変動の機構をその素過程の解明を通して解析することは必ずしも容易でないので、全体的な特徴を把握する場合には統計的な手法が有効であると考えている。第4表には水質18項目間の単純相関係数の計算結果を示す。表中右上欄は表層水の、左下欄は底層水の12地点平均値の月変化に対する相関係数値である。ここで相関数0.468以上の値は危険率5%で統計的に有意となる。水質の地点分布の項で考察したように海水起源の水質項目 $\text{EC-Cl}^- - \text{SO}_4^{--} - \text{DS}$ 等は相互に特に高い相関関係が認められるのは当然である。透明度—濁度—SS間あるいは水温—DO, pH—DO等の相関係数の有意性についても説明を要しない。これらについては表層水、底層水ともに同様な結果であった。水中のDOと $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度との間にはそれぞれ正負の相関係数値が得られたが統計的には必ずしも有意性は認められなかった。 H_2S 濃度は表層水では他のどの水質項目とも有意な相関性はみられなかったが、底層水では $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, SSと正相関が、Eh, $\text{NO}_3\text{-N}$, DOと負の相関が認められた。

これは溶存酸素の低下に伴うEhの減少、リンの底泥からの溶出、 $\text{NO}_3\text{-N}$ から $\text{NH}_4\text{-N}$ への還元など一連の現象の反映であると考えられる。これらは湖沼における各水質項目の地点平均値の月変化に対する変動の相関性を検討したものであるが、個々の水質の化学的な関係を検討するためにはデータの平均化操作をせず全部の生の測定値について相関係数を計算した方が良いかもしれない。これについては別の機会に論じたい。

第4表 見島湖湖水の水質相関係数

	水温	透明度	pH	Eh	DO	電気伝導度	蒸発残渣	濁度	浮遊物質	COD	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	トルカリ度	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	H ₂ S
水温	-0.720	-0.205	-0.319	-0.601	-0.382	-0.369	0.463	0.413	0.418	0.142	-0.520	-0.313	0.562	-0.394	-0.374	-0.403	0.110	
透明度	0.685	-0.283	0.295	0.046	0.083	0.076	-0.794	-0.879	-0.464	-0.186	0.473	0.379	-0.351	0.019	0.091	0.104	-0.122	
pH	-0.386	-0.025	-0.372	0.702	0.415	0.390	0.095	0.389	0.235	-0.183	-0.218	-0.539	-0.215	0.373	0.394	0.387	-0.251	
Eh	-0.513	0.371	0.074	0.274	-0.134	-0.014	-0.153	-0.345	-0.302	0.069	0.469	0.354	-0.153	-0.047	-0.006	0.019	-0.376	
DO	-0.903	0.596	0.524	0.497	0.370	0.358	0.054	0.228	0.210	-0.055	0.134	-0.165	-0.421	0.497	0.356	0.397	-0.186	
電気伝導度	-0.216	-0.046	0.497	-0.163	0.240	0.995	0.029	0.045	0.045	0.177	-0.039	-0.210	-0.073	0.171	0.776	0.995	0.986	0.081
蒸発残渣	-0.174	-0.140	0.495	-0.164	0.211	0.985	0.058	0.038	0.187	-0.011	-0.162	-0.050	0.219	0.219	0.750	0.999	0.993	0.075
濁度	0.546	-0.767	-0.240	-0.180	-0.565	-0.391	-0.295	0.771	0.481	0.176	-0.339	-0.208	0.003	0.426	0.027	0.036	0.065	0.093
浮遊物質	0.327	-0.623	-0.017	-0.321	-0.382	-0.250	-0.167	0.813	0.415	0.274	-0.182	-0.208	0.096	0.066	0.138	0.017	0.002	-0.371
COD	0.460	-0.427	0.075	-0.227	-0.194	0.182	0.270	0.280	0.172	0.161	0.191	-0.281	-0.212	0.425	0.027	0.180	0.204	0.112
NO ₂ -N	0.083	-0.121	-0.287	0.254	-0.261	-0.246	-0.168	0.375	0.359	0.415	0.274	-0.339	-0.208	0.026	0.036	0.065	0.065	0.093
NO ₃ -N	-0.505	0.508	-0.117	0.739	0.457	-0.556	-0.546	-0.050	-0.054	-0.274	0.377	-0.564	0.554	-0.275	-0.019	-0.047	-0.273	0.371
NH ₄ -N	0.198	-0.205	-0.621	-0.221	-0.422	-0.192	-0.155	0.424	0.251	0.049	0.237	-0.014	0.554	-0.275	-0.435	-0.160	-0.135	-0.247
PO ₄ -P	0.639	-0.517	-0.308	-0.494	-0.650	0.203	0.249	0.364	0.077	0.439	0.044	-0.562	0.564	-0.275	-0.123	-0.062	-0.050	-0.366
トルカリ度	-0.141	-0.182	0.279	-0.323	0.114	0.850	0.826	-0.280	-0.189	-0.004	-0.454	-0.657	0.107	0.338	0.850	0.744	0.759	0.097
Cl ⁻	-0.237	-0.095	0.508	-0.147	0.229	0.986	0.979	-0.319	-0.174	0.086	-0.226	-0.535	-0.166	0.187	0.820	0.962	0.992	0.063
SO ₄ ²⁻	-0.212	-0.112	0.513	-0.110	0.282	0.974	0.988	-0.311	-0.219	0.273	-0.215	-0.505	-0.196	0.216	0.820	0.962	0.992	0.063
H ₂ S	0.328	-0.535	-0.147	-0.674	-0.463	0.206	0.222	0.475	0.527	0.170	0.142	-0.535	0.515	0.491	0.391	0.213	0.173	0.048

右上方欄：表層水の相関係数、左下方欄：底層水の相関係数

本研究は昭和53年6月から3年間、見島湖およびその流入河川である笹ヶ瀬、倉敷河主要河川の河口部における水質変動の特性、その統計的性質について述べたものである。見島湖には絶えず海水の流入があり、そのため湖底深部には海水が停滞し、季節を問わず密度差による成層をなす地点があった。湖内浅水部では、湖流による垂直方向の水の乱れのため、夏・冬にも成層は認められなかった。本湖の水深は浅く、また滞留時間も短かいために、水質の季節的な変動は、湖内における湖沼特有の生物・化学的な現象よりも、流入河川の水質の影響を受けやすい。しかし湖底の窪地をなしている深部や、ヘドロの堆積しやすい地点では、溶存酸素濃度の低いと、窒素、リン濃度が高くなることなど、湖底泥の水質におよぼす影響が認められた。水質の濃度相関マトリックスの計算値から各採水地点間の水質の構成比の類似性が推測された。この値からも、特に表層水は吹送流によって比較的短時間に湖内における湖水の移流、混合がおこることも推測された。分析した水質20項目全部をこのマトリックスの計算に用いた場合も、そのうち窒素、リンに関する8項目だけを用いた場合も大差は認められなかった。観測した3年間に於ける水質の出現頻度分布を調べると、大部分の水質項目は対数確率紙上で、非超過確率が20~50%の間に屈折点を有する2つの直線で表わされる分布形をなした。水

摘 要

質項目間の相関分析では、EC-Cl⁻-SO₄²⁻-DS 間、透明度—濁度—SS 間、水温—DO 間、pH-DO 間、DO-NO₃-N 間等に有意な相関があることが確認された。

文 献

1. Anders, O. U., 1972. Ratio matching - A statistical aid for discovering generic relationships among samples. *Anal. Chem.* 44: 1930-1933.
2. 青山 勲, 西崎日佐夫. 1981. 湖沼における重金属の分布と動態. *生態化学* 4: 3-15.
3. JIBP-PF 分科委員会. 1973. 日本陸水群集の生産力に関する研究. *JIBP-PF 業績*. 212-261.
4. 環境庁水質保全局水質管理課. 1980. OECD 陸水モニタリング協力計画総合報告書 (原案). 67頁. 公害対策技術同友会.
5. 木羽敏泰, 寺田喜久雄, 本浄高治, 松本 健, 飴野 清. 1975. 濃度相関マトリックスによる河底でい試料の相関性の検討. *分析化学* 24: 18-25.