

# 琵琶湖におけるウログレナの 増殖状況と赤潮発生条件の検討

滋賀県水産試験場

森田 尚・的場 洋・前河 孝志・吉原 利雄

## 目 的

琵琶湖では昭和52年の春に黄色鞭毛藻類ウログレナ (*Uroglena americana*) による赤潮が初めて発生し、それ以来、昭和60年まで毎年春になると連続して赤潮の発生がみられた。昭和61年には赤潮は発生しなかったが、昭和62年には再び発生が認められた。ウログレナ群体数の増殖状況を把握し、併せて理化学的環境要因の調査を行うことにより、赤潮の発生条件を整理し、発生を予察するために必要な項目を検討する。

## 調査方法

### (1) 調査地点

琵琶湖主湖盆（北湖）をほぼ東西に横断する線上、彦根港口から多景島を通り安曇川河口舟木崎に至る間に7定点を設け、定期観測を実施した。(図1)

### (2) 調査月日及び調査回数

昭和63年4月14日から7月18日までの期間中、計9回

### 実施日

4月14日、28日  
5月6日、16日、26日  
6月2日、15日、27日  
7月18日

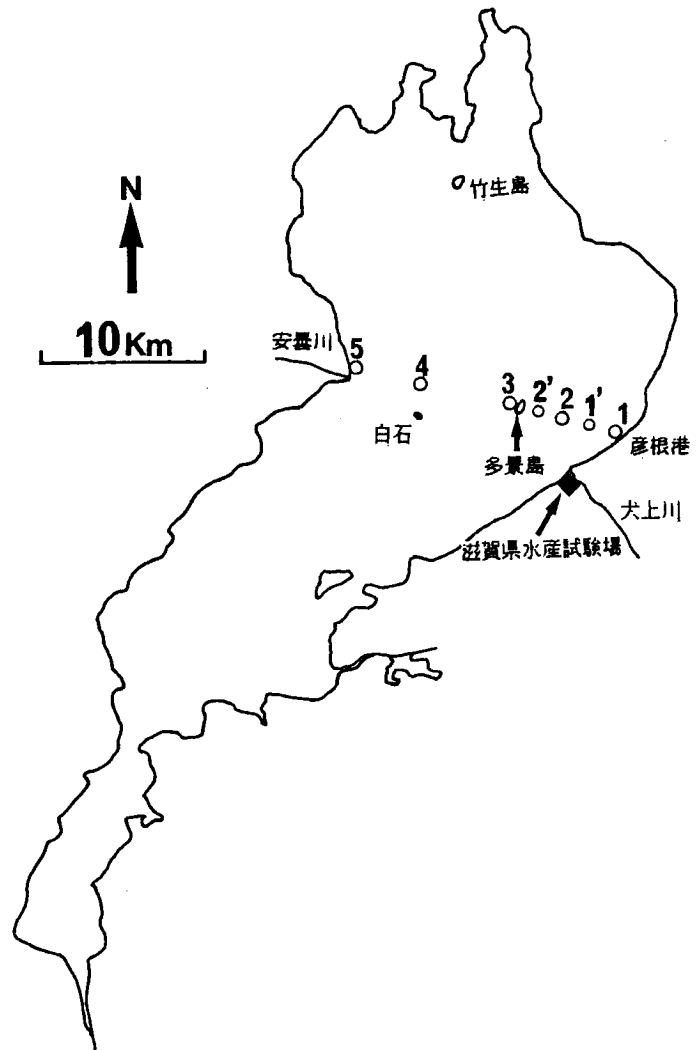


図1 調査地点

### (3) 調査項目及び方法

- 1) 気象 天候、雲量、気温、風向、風速
- 2) 水象 水温（サーミスター電気水温計または棒状水銀温度計）  
透明度（セッキーマル板）  
水色（J I S色表）
- 3) 水質 pH：硝子電極pHメーター  
溶存酸素量：ウィンクラー・アジ化ナトリウム変法  
アンモニア態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）：インドフェノール法  
亜硝酸態窒素（ $\text{NO}_2\text{-N}$ ）：スルファニルアミド・ナフチルエチレンジアミン法  
硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）：ヒドラジン還元法による還元後、スルファニルアミド・ナフチルエチレンジアミン法  
溶存性無機態窒素（D I N）：「 $\text{NH}_4\text{-N}$ 」+「 $\text{NO}_2\text{-N}$ 」+「 $\text{NO}_3\text{-N}$ 」  
有機態窒素（O r g - N）：ケルダール法「 $\text{Kj-N}$ 」-「 $\text{NH}_4\text{-N}$ 」  
総窒素（T - N）：「D I N」+「O r g - N」  
リン酸態リン（ $\text{PO}_4\text{-P}$ ）：モリブデン青法  
総リン（T - P）：過塩素酸・硫酸分解後、中和、モリブデン青法  
ケイ酸態ケイ素（ $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ）：モリブデン青法  
クロロフィルa：アセトン抽出後、吸光度法  
生物化学的酸素要求量（BOD）：J I S法（20℃、5日間）  
全鉄・溶存鉄（T - F e ・ S - F e）：王水分解後、原子吸光分析。溶存態は0.45  $\mu\text{m}$ ミリポアフィルター使用。

#### 4) プランクトン

ウログレナ群体数：採水帰場後、直ちに計数。試水1mlをプランクトン計数板に入れ、顕微鏡下で、40倍から100倍の倍率で検鏡。

## 調査結果

### (1) 今年度のウログレナ増殖と

#### 赤潮の発生状況

昭和52年度以降の琵琶湖における毎年のウログレナ赤潮の発生状況を表1に、昭和63年度の赤潮発生水域を図2にそれぞれ示す。本年度は5月1日に、南湖唐崎沖で、赤潮の兆候が発見され、2日には北湖蓬萊沖で最初の赤潮が発生した。5月6日には調査ライン上の2、2'地点付近で発見した赤潮の他に、南湖でも赤潮が発生し、5月7日及び9日にも同水域で観測された。

本年度の赤潮の発生は時期、発生日数、規模については昨年度とほぼ同じ規模であるが、過去と比べると時期的には発生は例年並でないしはやや早く、終息は早かった。また日数、規模は例年より少なかった。

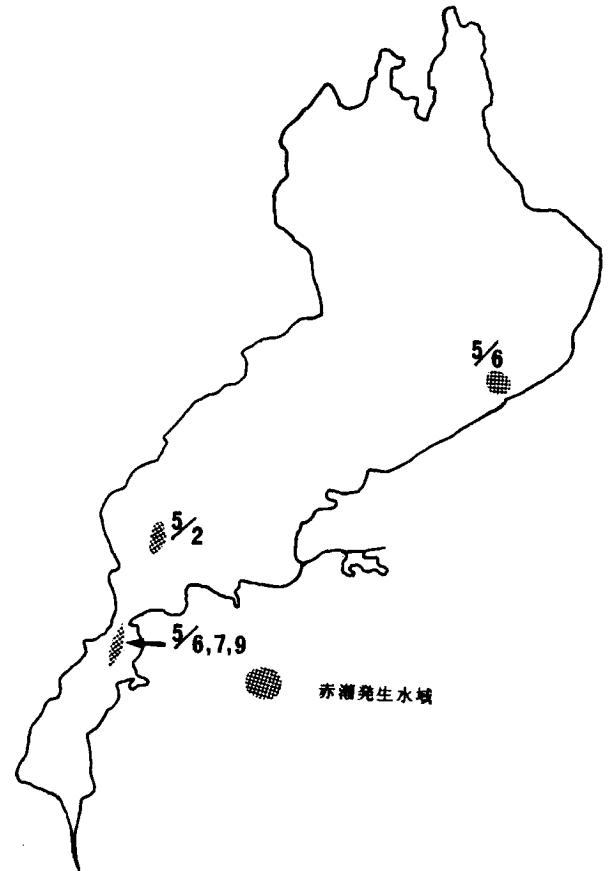


図2 昭和63年度の赤潮発生水域

表1 琵琶湖における赤潮の発生状況（滋賀県環境室とりまとめ）

	発生水域数	累積発生日数	延べ発生水域数
昭和52	9	5	19
昭和53	21	16	88
昭和54	20	17	34
昭和55	13	4	13
昭和56	15	9	40
昭和57	8	7	10
昭和58	8	4	11
昭和59	5	5	8
昭和60	10	8	21
昭和61	0	0	0
昭和62	7	4	10
昭和63	3	4	5

図3に調査ライン上の各地点におけるウログレナ群体数の変動状況を示す。ウログレナ群体の初認日は4月28日で、1、1' および2' 地点で10群体/mlを記録した。5月6日には群体数がピーク（2地点233群体/ml）に達し、2地点と2' 地点を中心とした約1キロ四方の一帯で縞模様状の赤潮を確認した。濃厚な部分では1000群体/ml以上の密度であった。5月16日の調査時にも、まだ50群体/ml以上のウログレナがみられた。5月26日、および6月2日の調査ではウログレナは確認されなかったが、6月15日には4箇所の地点で10~20群体/mlのウログレナがみられ、7月まで極めてわずかながらウログレナ群体の栄養細胞としての生存を確認した。

## (2) クロロフィルa

図4に各調査地点2 m層におけるクロロフィルa濃度の変化を示す。赤潮が発生した地点2、2' では赤潮発生前の4月中旬から下旬にかけて、1.93から2.57  $\mu\text{g}/\text{l}$ であったが、赤潮発生時の5月6日にはそれぞれ14.03  $\mu\text{g}/\text{l}$ 、8.16  $\mu\text{g}/\text{l}$ に増加した。地点1' でも、5月6日には7.15  $\mu\text{g}/\text{l}$ までクロロフィルaが増加した。赤潮発生から10日後の5月16日においてもウログレナはまだ多く、そのことを反映して、地点2及び2' ではそれぞれ5.38  $\mu\text{g}/\text{l}$ 、4.35  $\mu\text{g}/\text{l}$ のクロロフィルaを観測した。5月26日にはウログレナはほとんど見られなくなり、地点2、2' とも、クロロフィルa濃度は1.12  $\mu\text{g}/\text{l}$ に下がった。

しかし、地点1ではウログレナ出現前の4月14日にクロロフィルa濃度が10.03  $\mu\text{g}/\text{l}$ 、ウログレナ赤潮が、完全に終息した後の7月18日には10.00  $\mu\text{g}/\text{l}$ と、ウログレナが優占している時期よりも高いクロロフィルa濃度が観測された。同様に地点1' ではウログレナ赤潮がほぼ終息した後の6月2日に15.23  $\mu\text{g}/\text{l}$ という高いクロロフィルa濃度が観測された。このことからウログレナ赤潮の発生時期には植物プランクトン現存量の大部分をウログレナが占めることにより、ウログレナの増殖に対応して、クロロフィル量も増加するが、その量は、ほかの季節に他の種類の植物プランクトンが増殖することによって増加するクロロフィル量とあまり、大きく変わらないことが示唆された。

## (3) 湖水温の変動

図5に各調査地点の2 m層水温の変動状況を示す。全調査地点の平均水温はウログレナ出現前の4月14日では8.9℃、ウログレナ群体が認められ始めた4月28日には11.2℃、赤潮発生時の5月6日には12.8℃であった。また赤潮発生後の5月16日の段階でも平均水温は12.8℃と変わらなかった。各地点ごとの水温上昇パターンは62年度と同様、多景島をはさんだ東側の各地点（地点1~2'）で上昇が早く、西側の地点（地点3~5）で遅い傾向が認められた。赤潮発生時の2地点の水温は13.3℃であった。

図6に、4月14、28、5月6、16日の地点2における水温の鉛直分布を示す。地点2の水深は約20mであるため、底層水温は、ほぼ20m層水温に相当する。20m層水温は、4月14日には7.4℃、4月28日には9.3℃、5月6日には9.0℃、5月16日には11.0℃であった。表層と底層との水温差は4月14日で1.5℃、4月28日には2.5℃、5月6日には5.1℃、5月16日には2.4℃であった。この時点まででは、まだ明瞭な水温躍層は形成されなかった。

#### (4) 無機溶存態窒素 (DIN) 濃度

無機溶存態窒素は大部分、硝酸態の形で存在していた。図7に各地点2 m層におけるDIN濃度の変化を示す。2地点2 m層における濃度変化を見ると、ウログレナ出現前の4月中旬(4月14日)にDINとして0.16mg/l、ウログレナの群体が認められ赤潮発生直前の4月28日には0.14mg/lであった。赤潮発生時の5月上旬(5月6日)には0.09mg/lまで低下したが、赤潮終了後の5月中旬(5月16日)には0.18mg/lに増加した。

#### (5) リン酸態リン (PO<sub>4</sub>-P) 濃度

図8に各地点2 m層におけるPO<sub>4</sub>-P濃度の変化を示す。2地点2 m層における濃度変化を見ると、ウログレナ出現前の4月中旬には0.002mg/l、赤潮発生前の4月28日には0.001mg/lであった。赤潮発生時の5月6日には0.001mg/l、赤潮終了後の5月16日には0.006mg/lとやや増加する傾向を示した。

#### (6) 濾過態鉄 (S-Fe) 濃度

図9に各地点2 m層における濾過態鉄濃度(ミリポアフィルターHA濾過)の変化を示す。2地点2 m層における濃度変化を見ると、4月中旬(4月14日)に15.3μg/l、4月下旬(4月28日)には15.9μg/lであった。赤潮発生時の5月6日には3.3μg/lに低下し、赤潮終了後の5月16日には16.1μg/lに増加した。しかし、濾過態鉄および全鉄濃度は陸水の流入の影響などによって、大きく変動するものと思われ、各地点間での変動の差がきわめて大きかった。このため、2地点以外では、ウログレナ群体数の増減との間に明確な対応関係を見いだすことはできなかった。

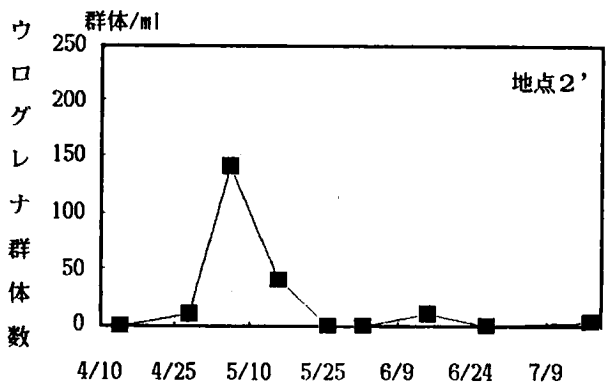
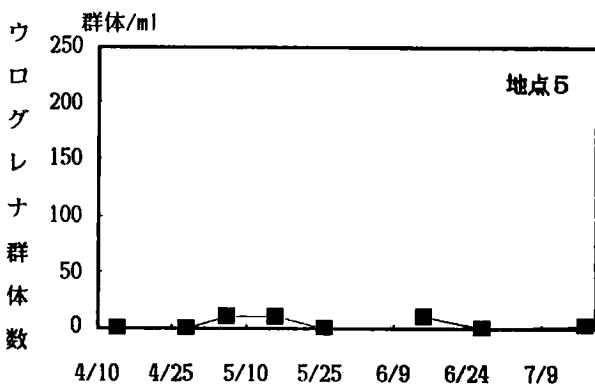
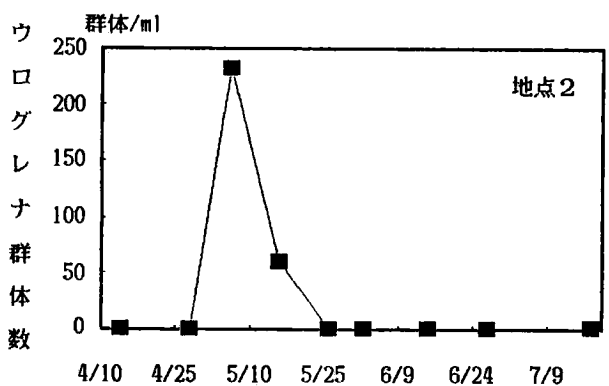
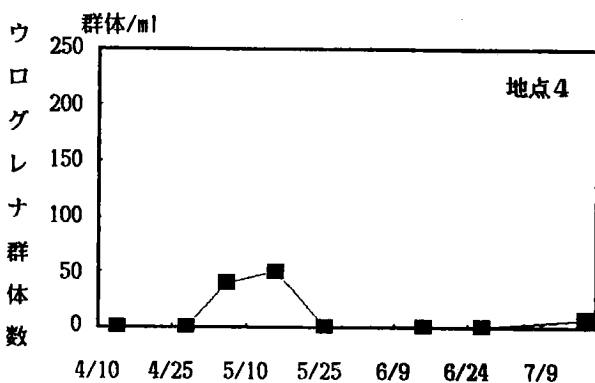
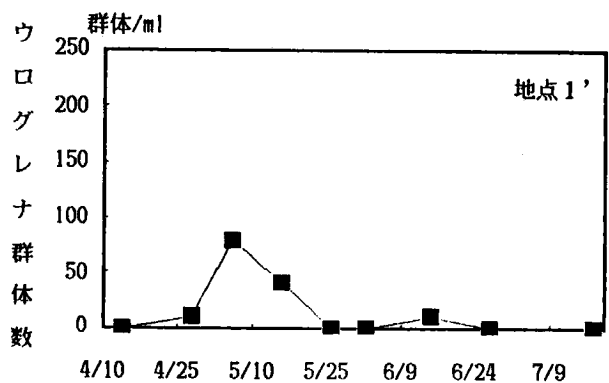
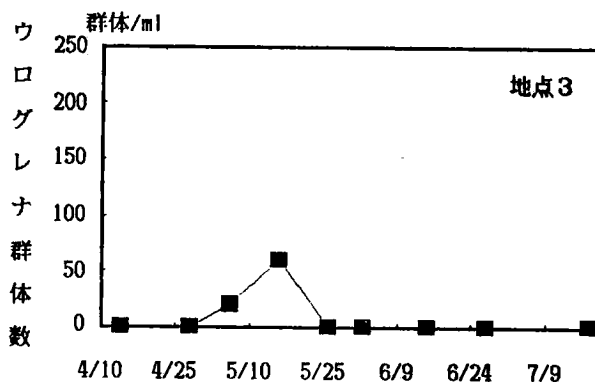
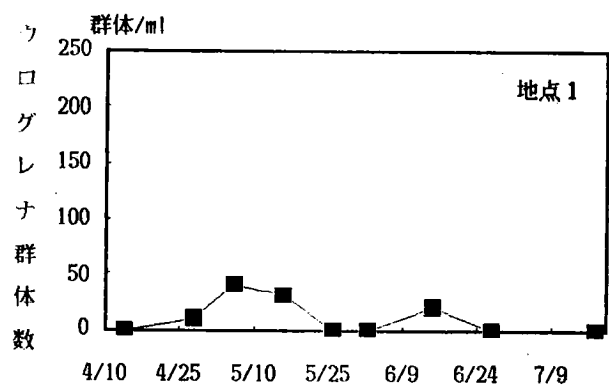


図3 各地点におけるウログレ群体数の変動 (2 m層)

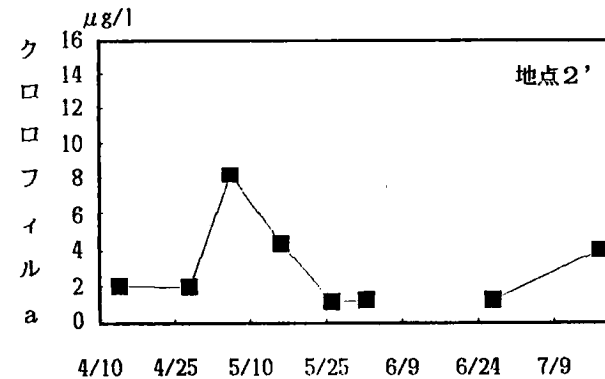
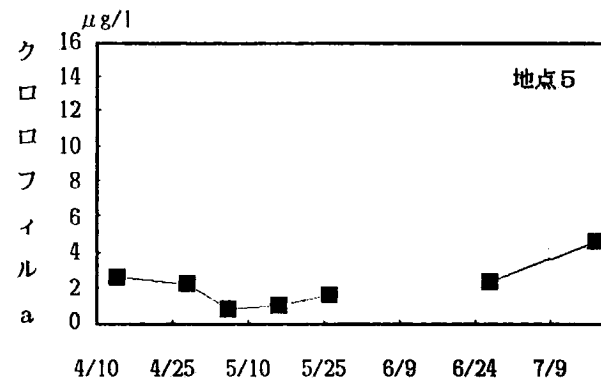
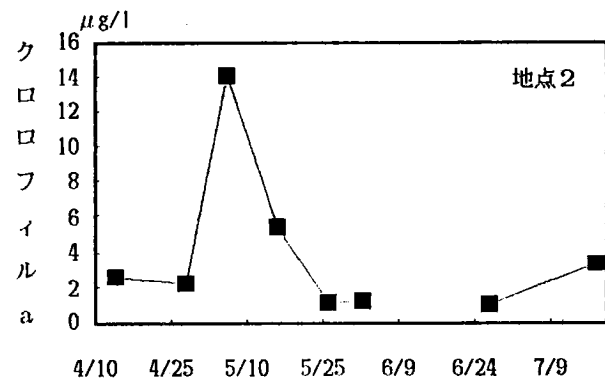
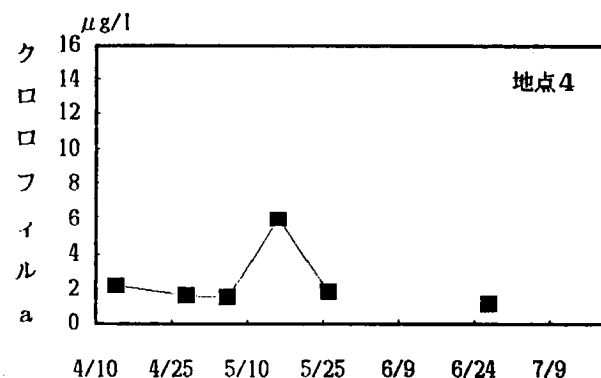
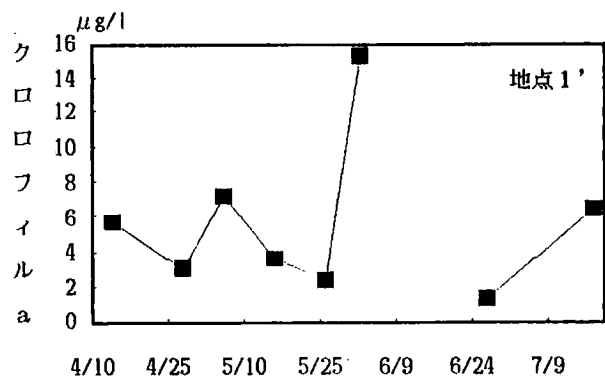
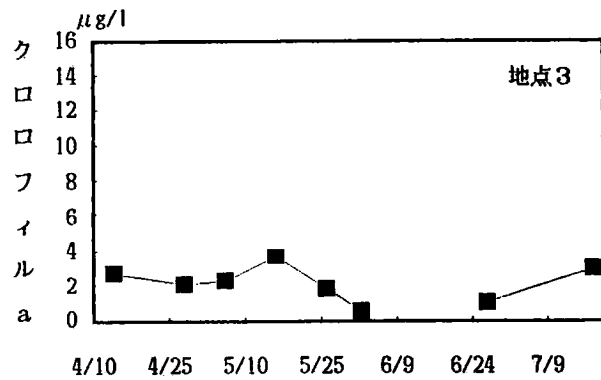
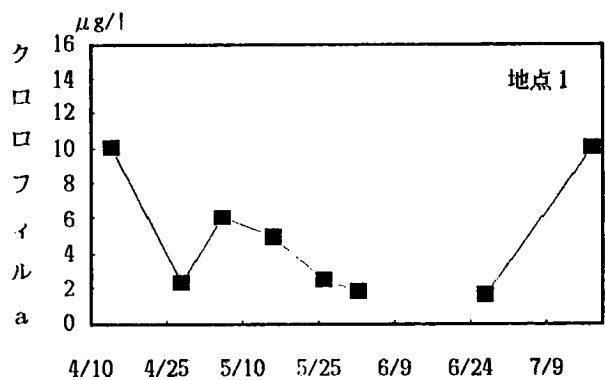


図4 各地点におけるクロロフィルa量の変動 (2 m層)

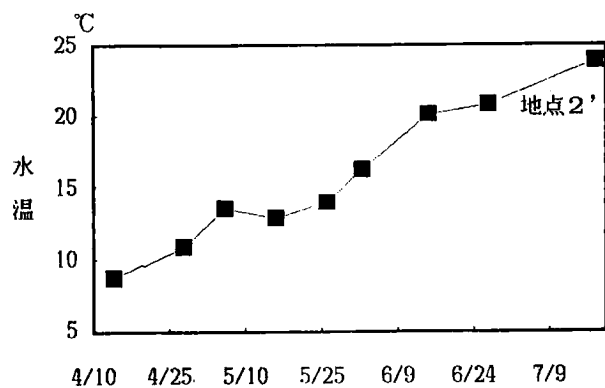
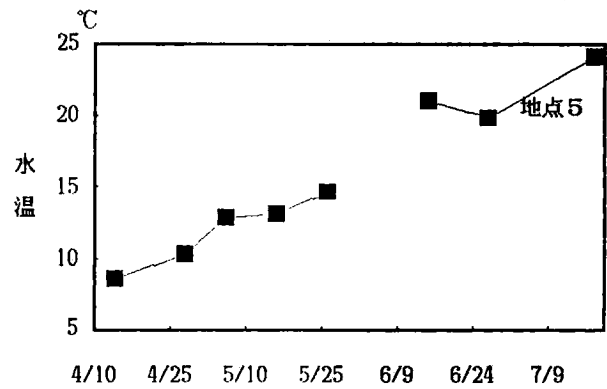
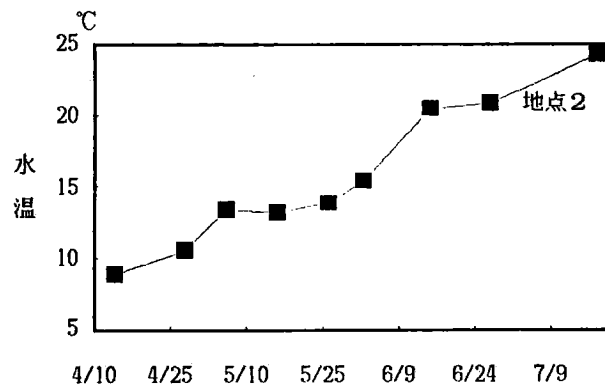
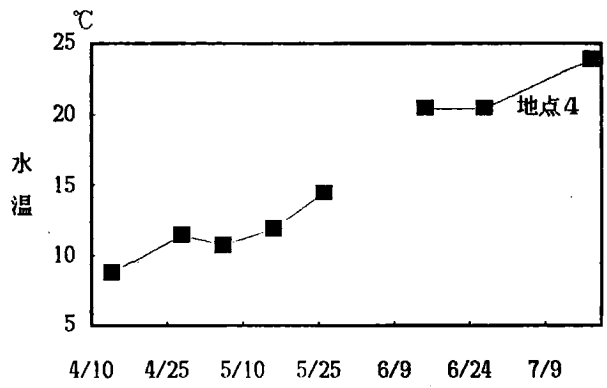
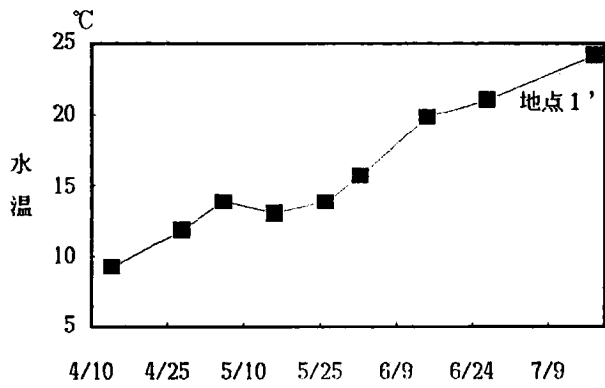
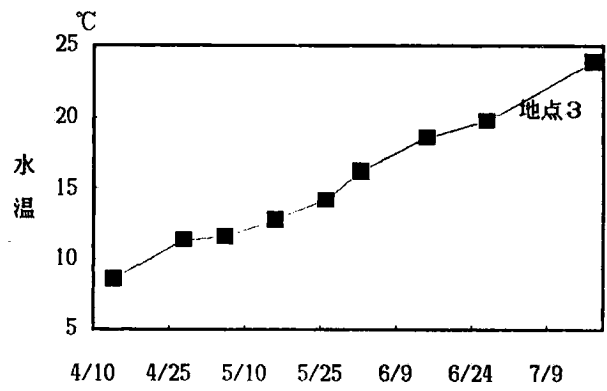
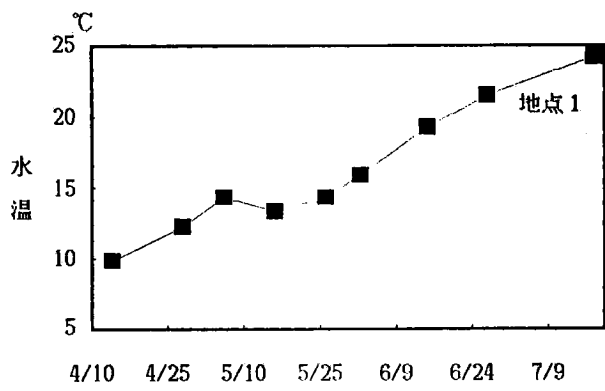


図5 各地点における水温の変動 (2 m層)



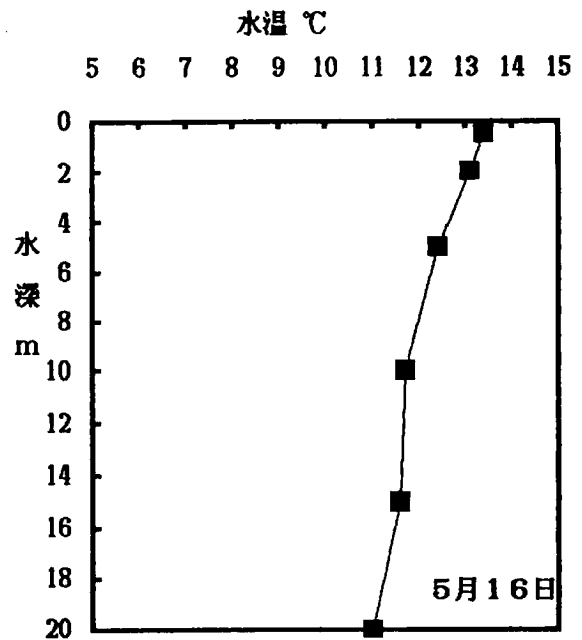
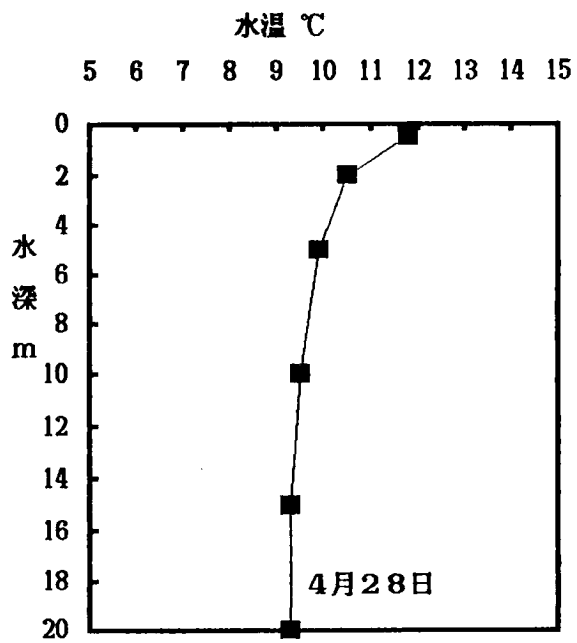
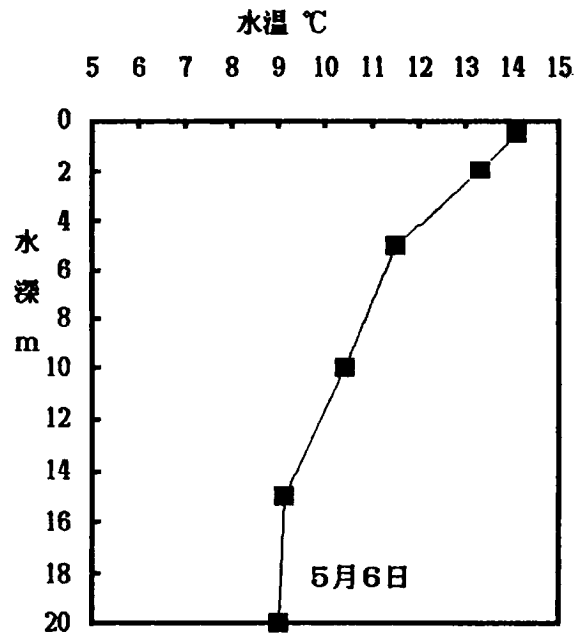
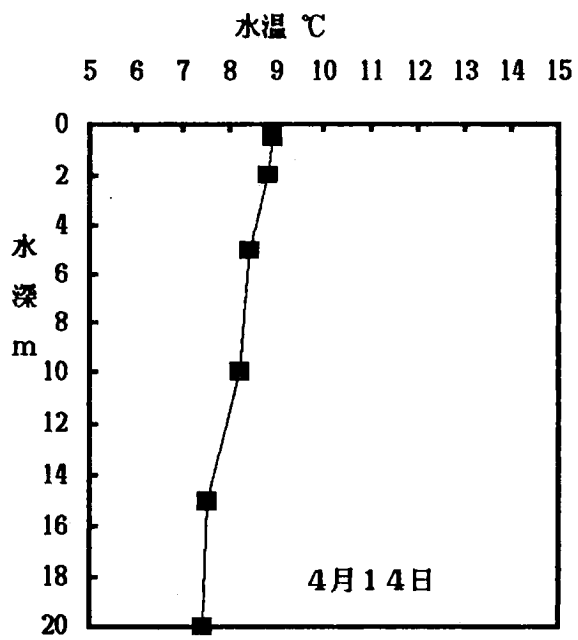


図6 地点2における水温の鉛直分布

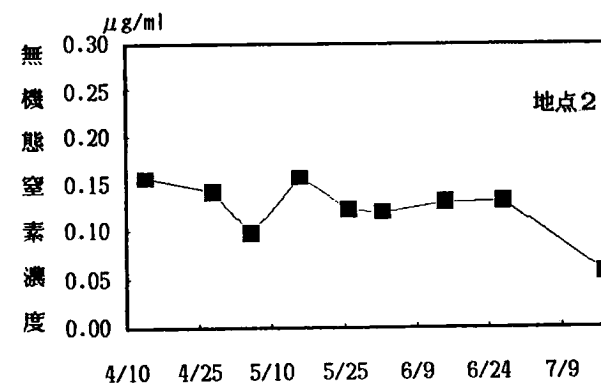
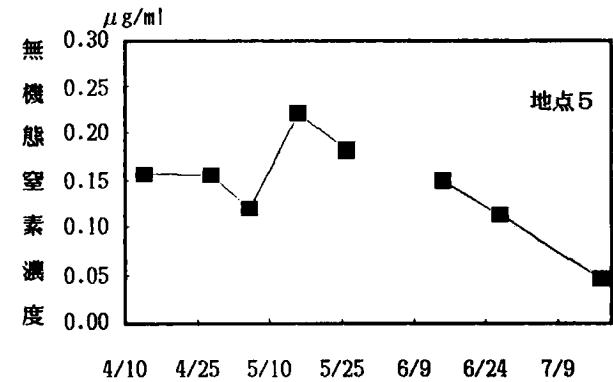
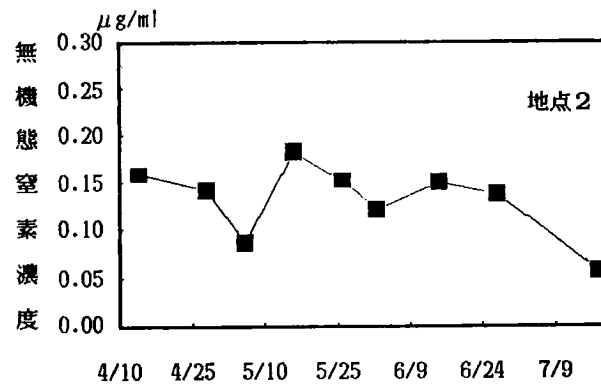
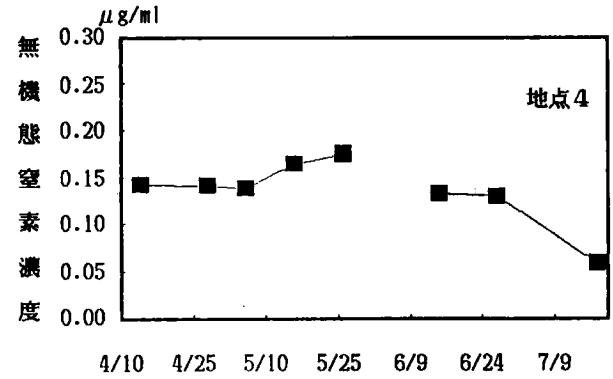
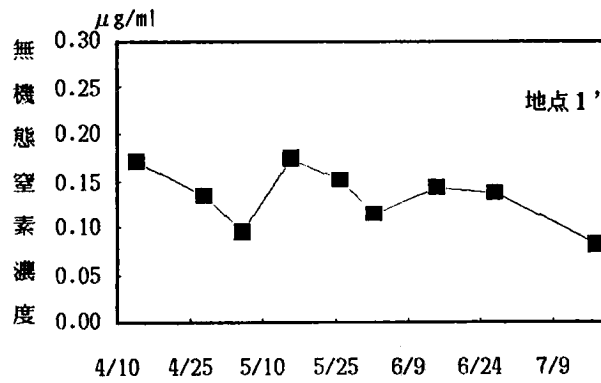
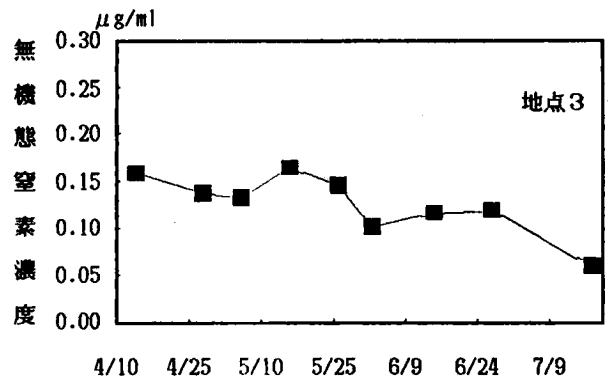
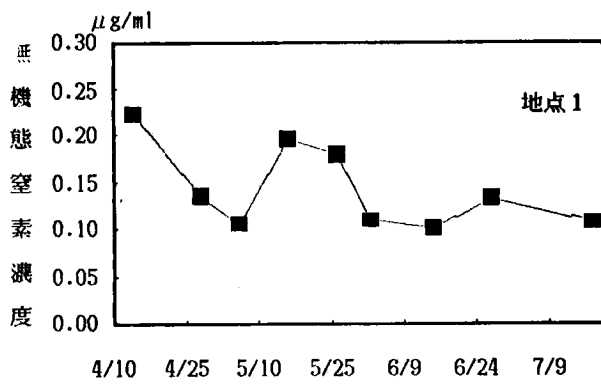


図7 各地点における無機溶存態窒素濃度の変動 (2 m層)

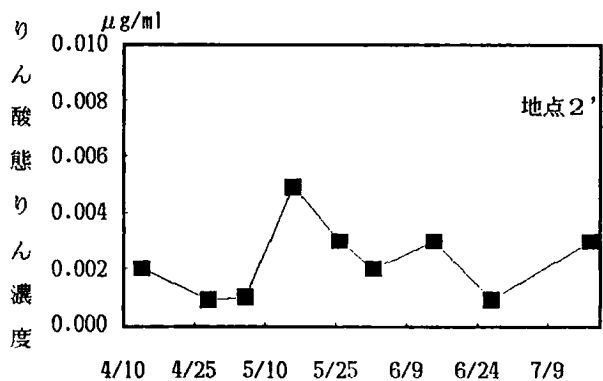
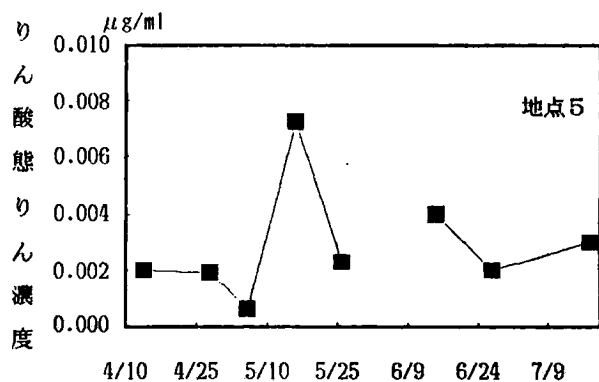
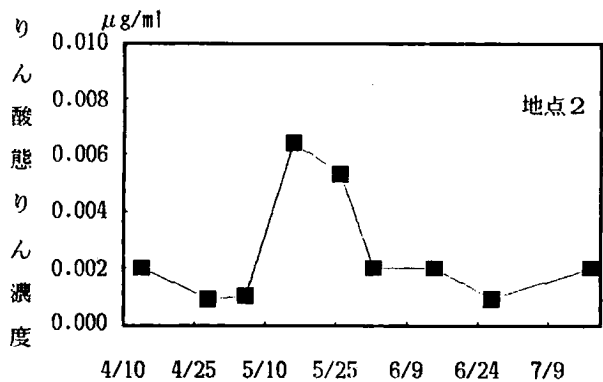
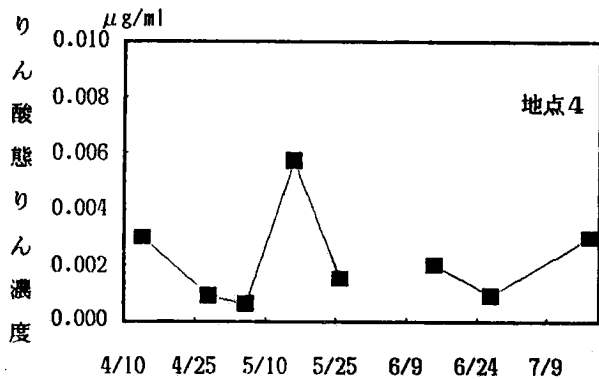
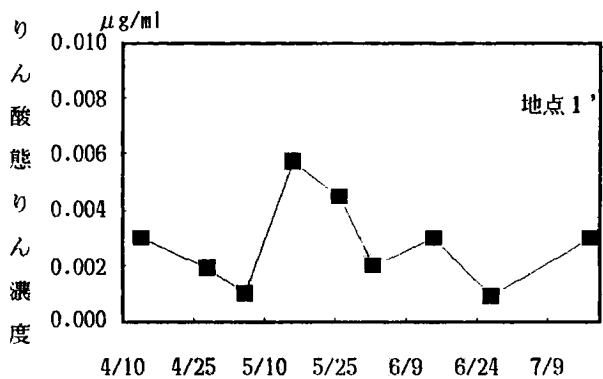
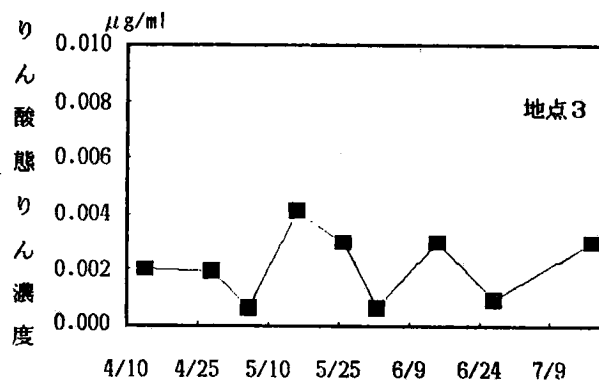
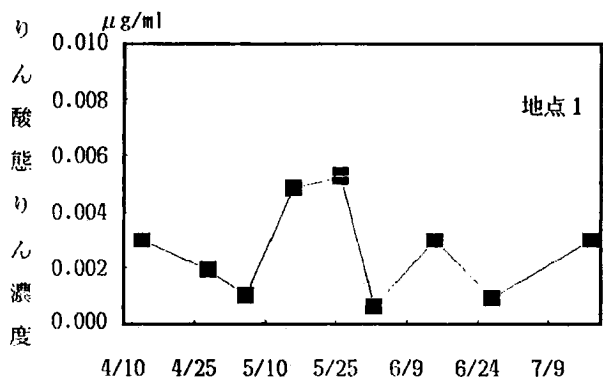


図8 各地点におけるりん酸態りん濃度の変動 (2 m層)

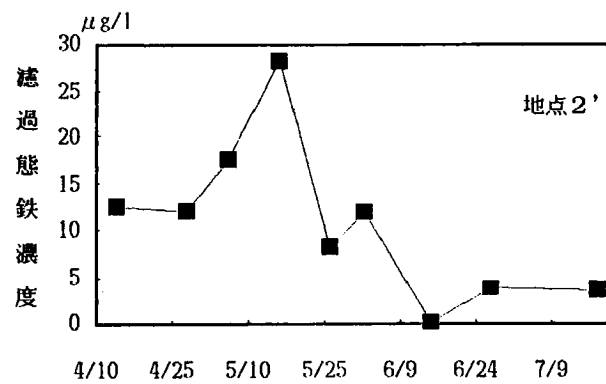
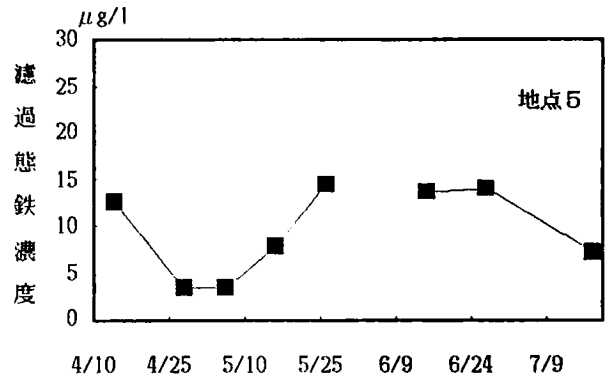
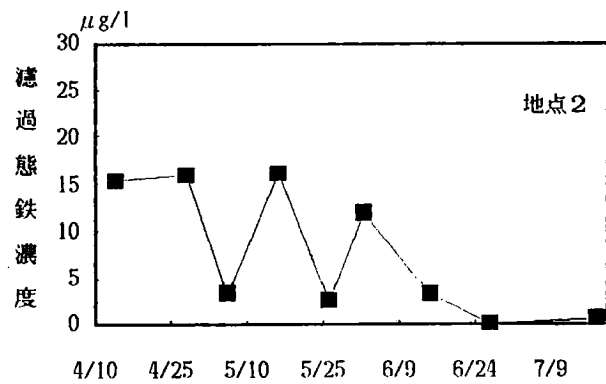
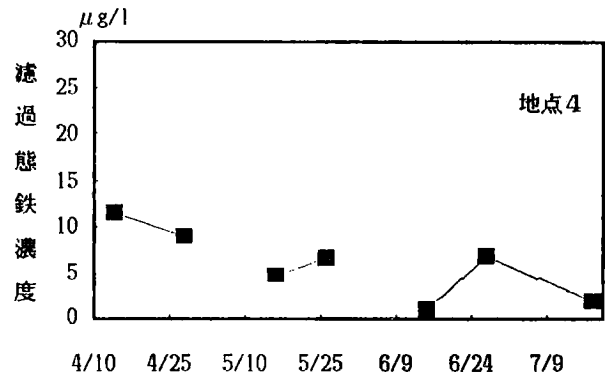
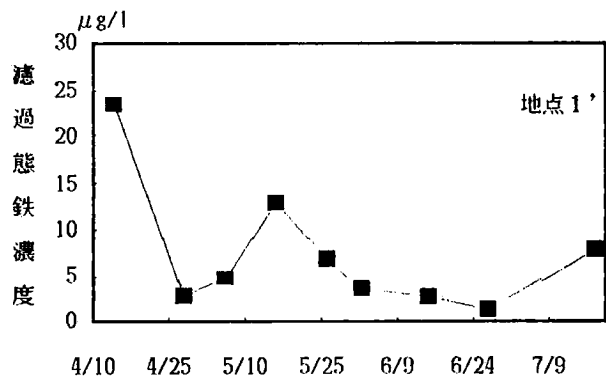
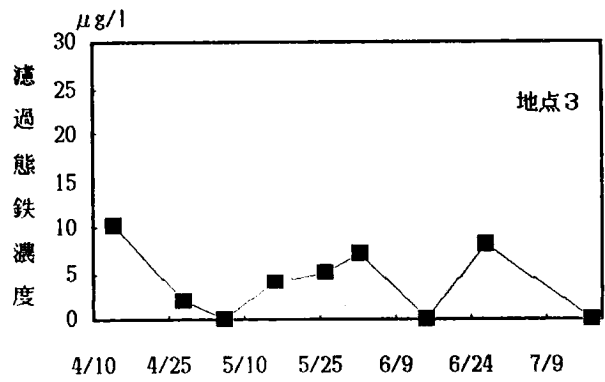
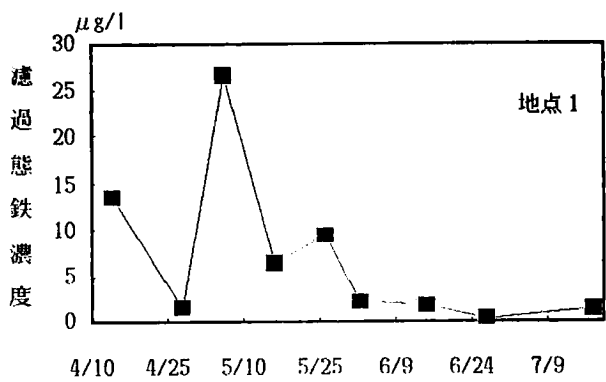


図9 各地点における濾過態鉄濃度の変動 (2 m層)

## 論 議

### (1) 本年度の栄養塩レベル

石田(1987)は培養試験によってウログレナが赤潮形成可能な量に達するために最低限必要な栄養塩濃度を報告している。それによると、窒素濃度は $0.014\text{mg/l}$ であり、通常の琵琶湖水の無機溶存態窒素濃度はこの値より、一桁高い値を維持している。今回の調査でも、無機溶存態窒素は $0.09\sim 0.16\text{mg/l}$ の範囲にあり、 $0.014\text{mg/l}$ よりは常に十分に高い濃度レベルを維持していた。リン濃度については、ウログレナはリン濃度が $0.003\text{mg/l}$ 以下になると、増殖量が急激に減少すると報告されている。この濃度を一つの参考値として、この時期の現場のリン濃度を評価すると、リン酸態リンとして $0.001\sim 0.002\text{mg/l}$ という濃度はウログレナの増殖にとってはやや低めの値であったといえる。また、ウログレナの赤潮形成に最低限必要な鉄の濃度はEDTAでキレートした鉄として、 $13\sim 40\ \mu\text{g/l}$ であると報告されている。今回の調査ではキレート態の鉄という形態では測定しておらず、 $0.45\ \mu\text{m}$ のメンブランフィルター濾過態鉄としての測定結果をもとに考察せざるを得ない。メンブランフィルターで濾過した試水中には溶存態になっていない、微粒子状の鉄も含まれており、測定された鉄の全てが、ウログレナに利用可能な鉄とは考えられない。しかしその点を考慮して評価するとしても、この時期の現場における濾過態鉄濃度 $3.3\sim 15.9\ \mu\text{g/l}$ という値は、ウログレナの赤潮形成のためには下限に近いレベルであったと思われる。

### (2) 過去10ヵ年間の調査結果の比較

彦根港口と安曇川河口を結ぶ、当調査ライン上でのウログレナ調査は、昭和54年度から行われており、63年度までに、10ヵ年間の調査結果が得られた。年度により、調査地点、調査期間、調査項目などが、多少異なっているため、そのままでの比較は困難であるが、便宜的に、1ヵ月を上旬(1日から10日まで)、中旬(11日から20日まで)、下旬(21日から月末まで)の3区分に分け、該当する調査時期のデータ間での比較を試みた。但し昭和54年度については、4月下旬と、6月上旬に該当するデータがなく、昭和61年度と62年度については、6月中旬に該当するデータが得られていない。調査地点については、地点1、1'、2、2'、3、4、5の計7定点全部のデータがそろっているのは、昭和56、60、61、62および63年度の計5か年だけである。昭和54年度と55年度は地点1'と2'の調査が行われていない。昭和57年度は地点3、4、5の調査が行われておらず、昭和58年度と59年度は地点4、5の調査が行われていない。従って、10ヵ年のデータが全部そろっている地点は、地点1と2のみである。

図10-1から図10-10に各年度の全調査地点2m層におけるウログレナ群体数の変化を示した。年度により、ウログレナの出現数にはかなり大きな差が認められる。ウログ

レナの群体数が、300群体/ml以上が赤潮発生の基準になっているが、当調査ライン上の定点観測では、過去10ヵ年の調査で、300群体/ml以上のウログレナは一度も確認されていない。ウログレナ群体数100群体/mlを基準に線を引くと、100群体/ml以上のウログレナ群体が確認された年は、昭和54、56、57、60、63年の5ヵ年である。調査地点数が、年度によって異なることを配慮する必要があるが、これらのいずれの年においても地点2あるいは、その周辺の地点1'、2'付近を中心にピークが確認されている。データが揃っている地点2を代表地点として、過去のウログレナの増殖時期を比較すると、次のように分けられる。5月上旬にウログレナが100群体/ml以上のピークを示した年は昭和54、60および63年、5月中旬から下旬にかけてピークを示した年は昭和56年、5月下旬にピークを示した年は昭和57年。このように、ウログレナの増殖ピークがみられた時期は年度によって多少前後にずれている。特に昭和56年度と、57年度は他の年度に比べてウログレナの増殖が遅い傾向がみられた。

図11に地点2の底層水温(20m層水温)を3月中旬から5月上旬まで各年度間で比較した。3月中旬において底層水温のもっとも低かったのは昭和59年度であるが、この年は当調査ライン上におけるウログレナの増殖は極めて少なかった年である。昭和56年度は60年度、61年度について、3月中旬の底層水温が低かったことが分かる。この傾向は4月中旬でも認められた。ウログレナの赤潮発生に結び付く存在形態として重要なのが、シストとして湖底で越冬休眠しているものなのか、それとも栄養細胞として水中に希薄な密度で存在しているものなのか、なお、知見を集める必要があると思われるが、シストの発芽という要因を考慮する場合、4月以前からの底層水温を監視することが、ウログレナの増殖を予察する上で、重要な項目の一つにあげられる。図12に地点2の表層水温(2m層水温)を4月中旬から5月上旬まで各年度間で比較した。4月中旬の段階では昭和57年度の表層水温が62年度について低かったことが分かる。しかし4月下旬以降、昭和57年度の表層水温は、他の年度に比べて、高い傾向を示しており、ウログレナの増殖が遅れた説明はつけにくい。ウログレナの増殖を予察する上で、水温の変化は重要な要因になるが、表層水温だけではなく、底層水温や、10m層付近の中層水温もあわせて、4月以前の段階から集中的に監視する必要があると思われる。

図13と図14にそれぞれ、地点2の2m層におけるリン酸態リン濃度と0.45 $\mu$ mメンブランフィルター濾過態鉄濃度を4月中旬から5月中旬まで各年度間で比較した。これらの要因はウログレナの増殖を制限する要因になっていると思われる。リン酸態リンは、4月中旬の濃度で比較すると、大規模なウログレナの増殖が認められた60年度や63年度のほうが、増殖量の少なかった55年度や59、61年度に比較して、むしろ低いレベルであった。現場の植物プランクトン個体群に対するリンの供給速度を測定することは現段階では不可能であり、現場の瞬間的な濃度の測定結果からはリンが制限要因になっているこ

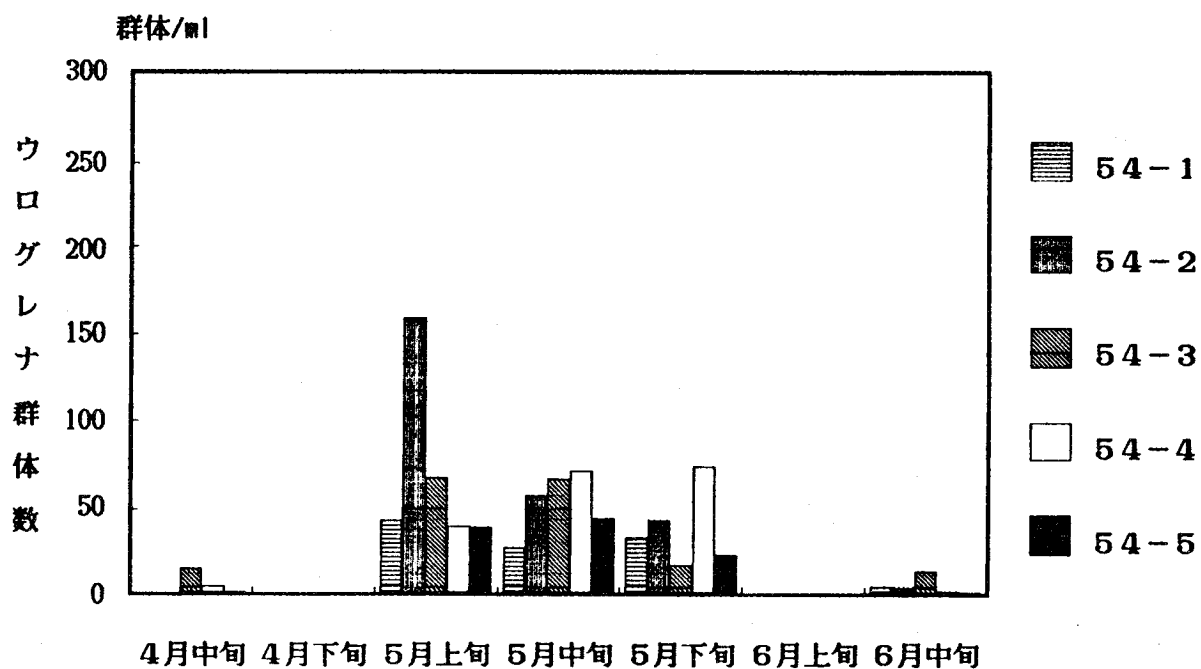


図10-1 昭和54年度、各調査地点におけるウログレナ群体数

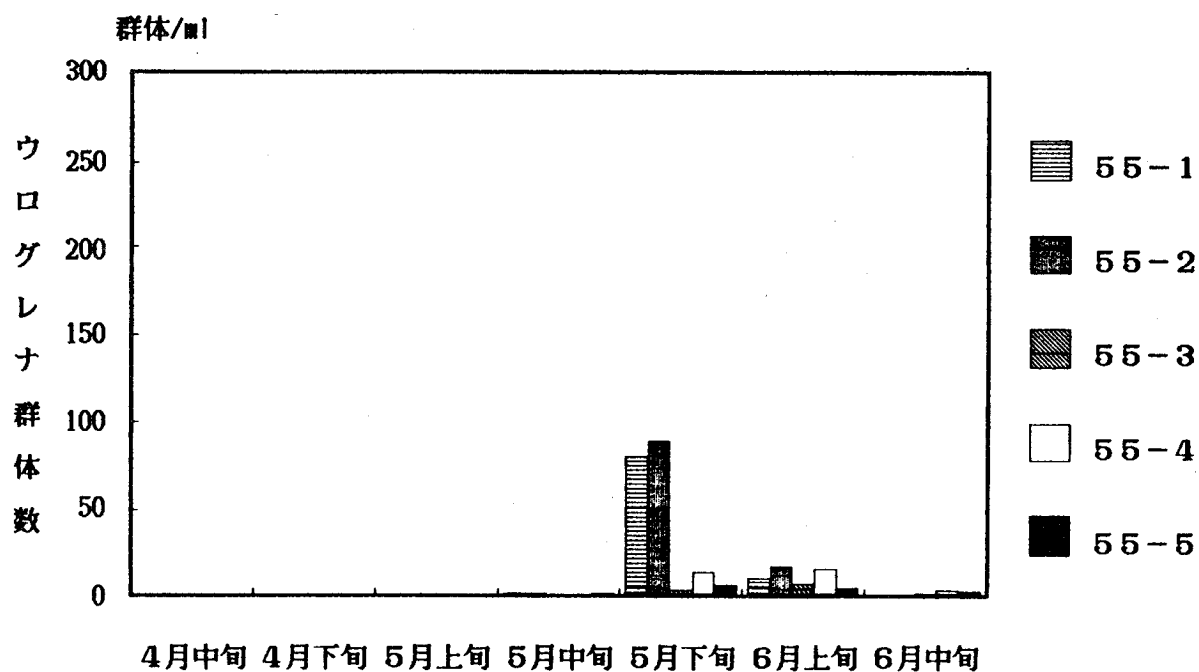


図10-2 昭和55年度、各調査地点におけるウログレナ群体数

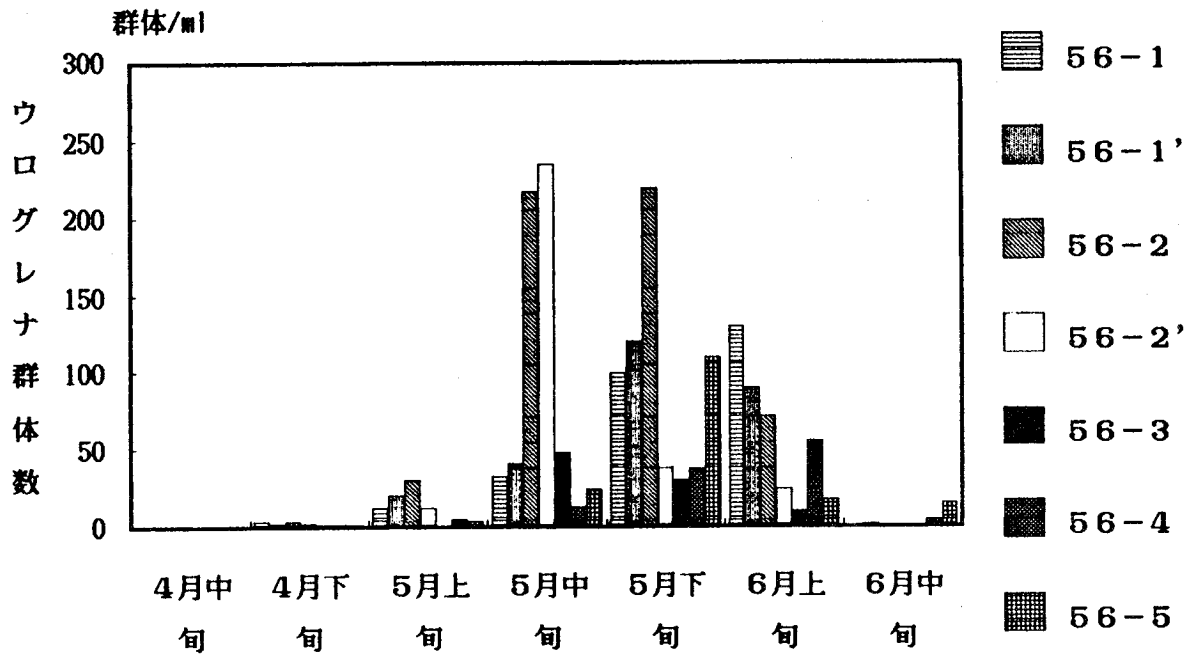


図10-3 昭和56年度、各調査地点におけるウログレナ群体数

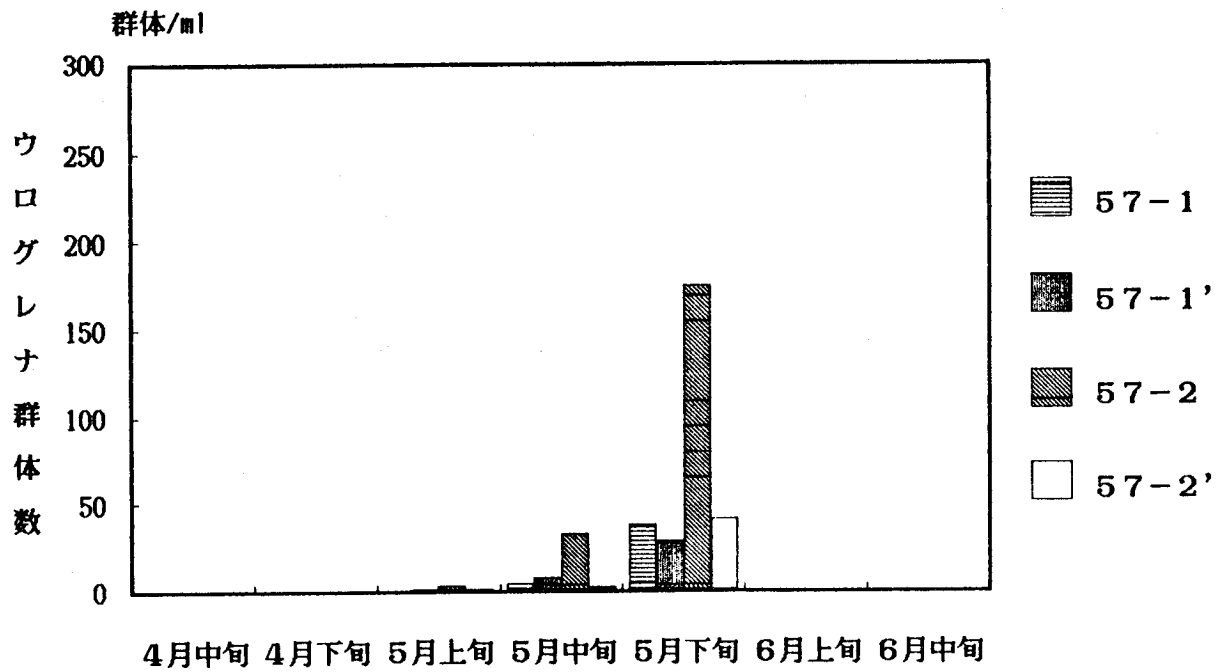


図10-4 昭和57年度、各調査地点におけるウログレナ群体数



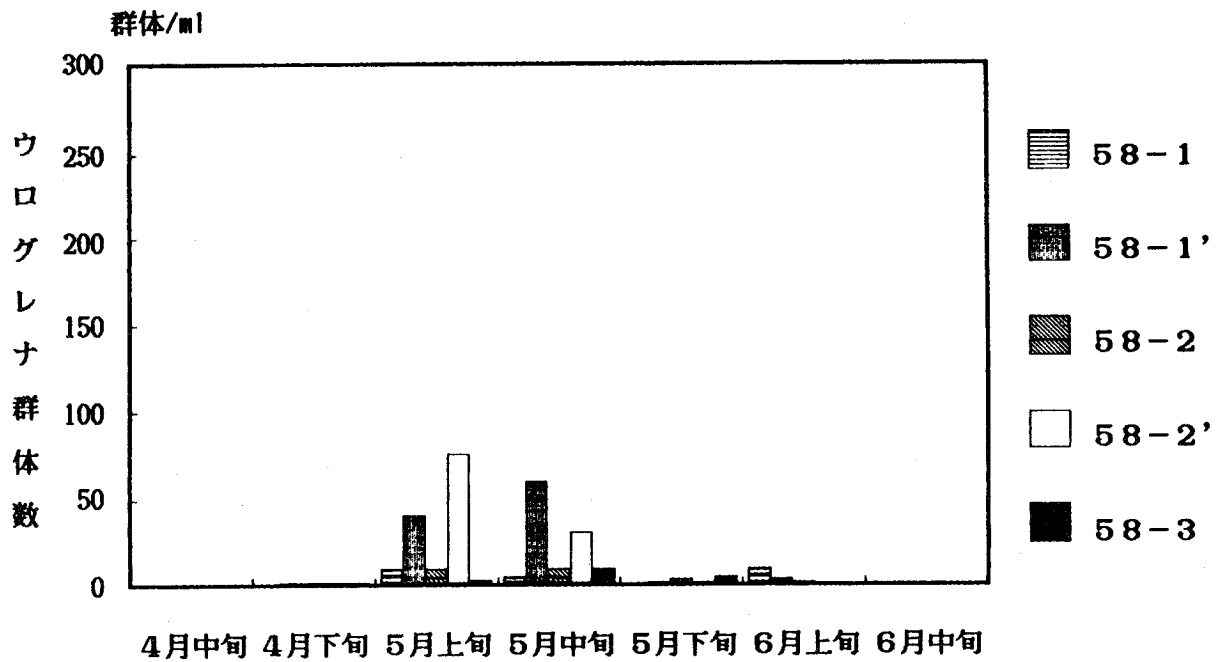


図10-5 昭和58年度、各調査地点におけるウログレナ群体数

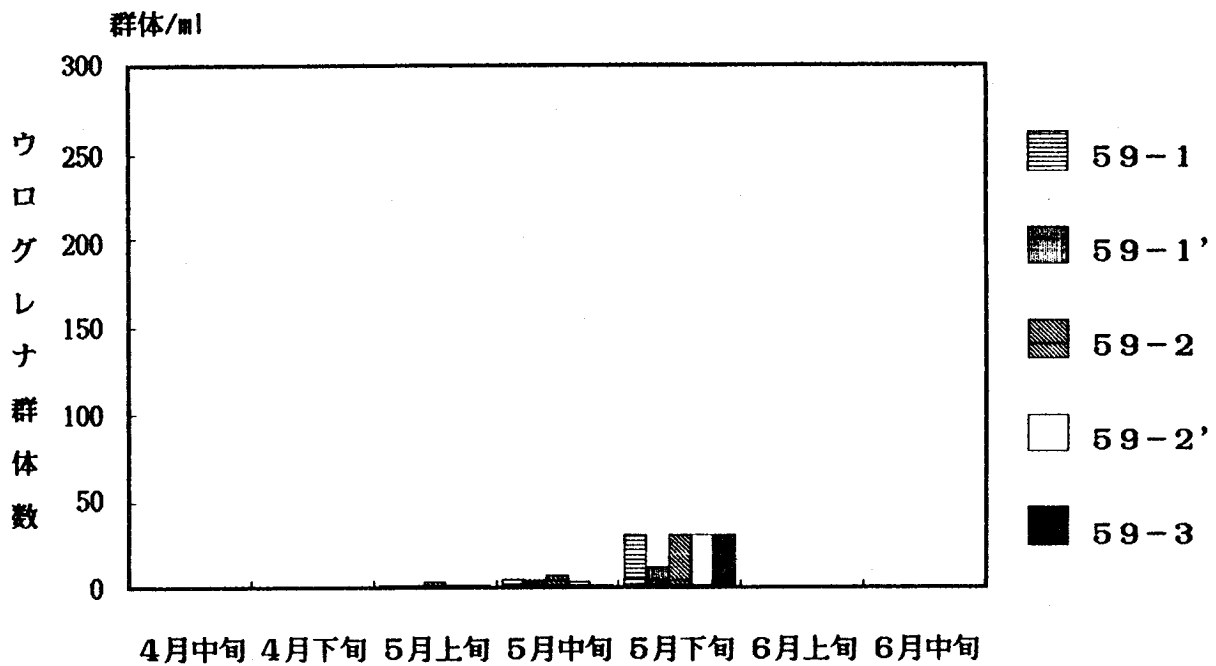


図10-6 昭和59年度、各調査地点におけるウログレナ群体数

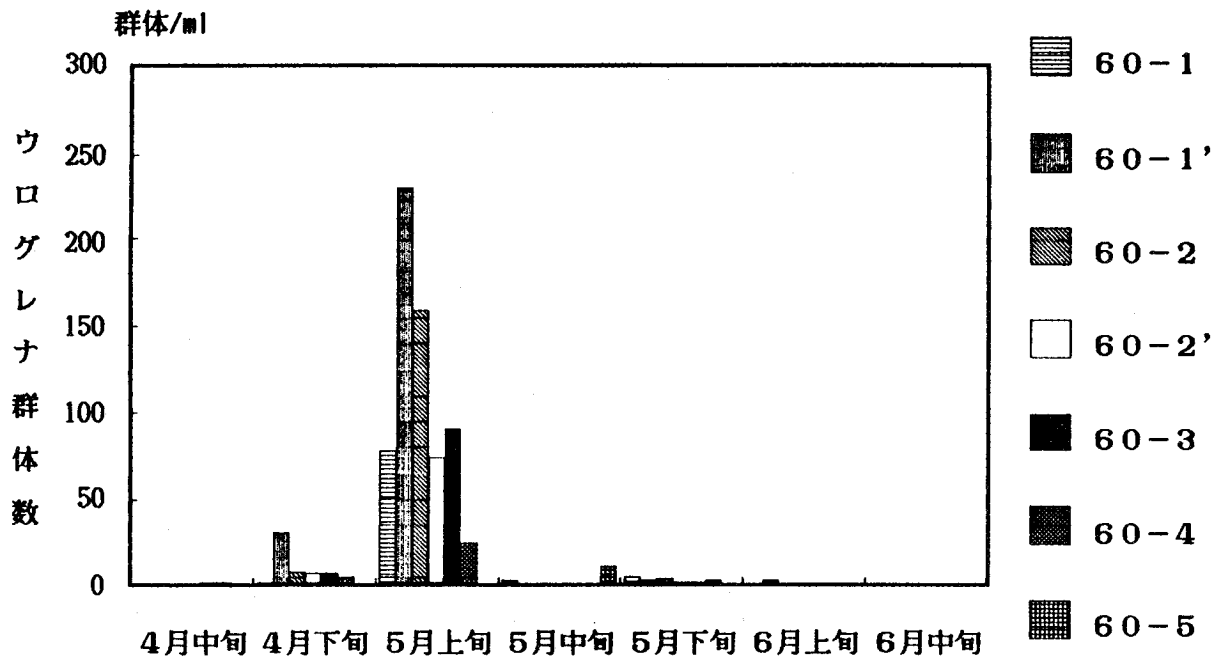


図10-7 昭和60年度、各調査地点におけるウログレナ群体数

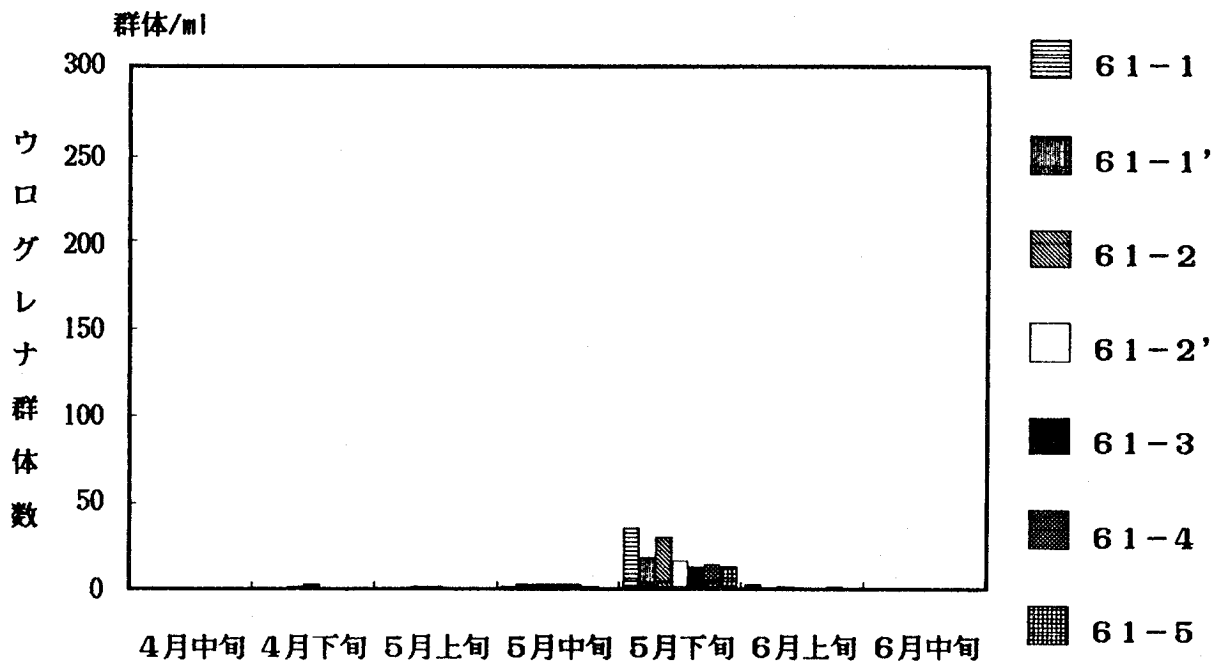


図10-8 昭和61年度、各調査地点におけるウログレナ群体数

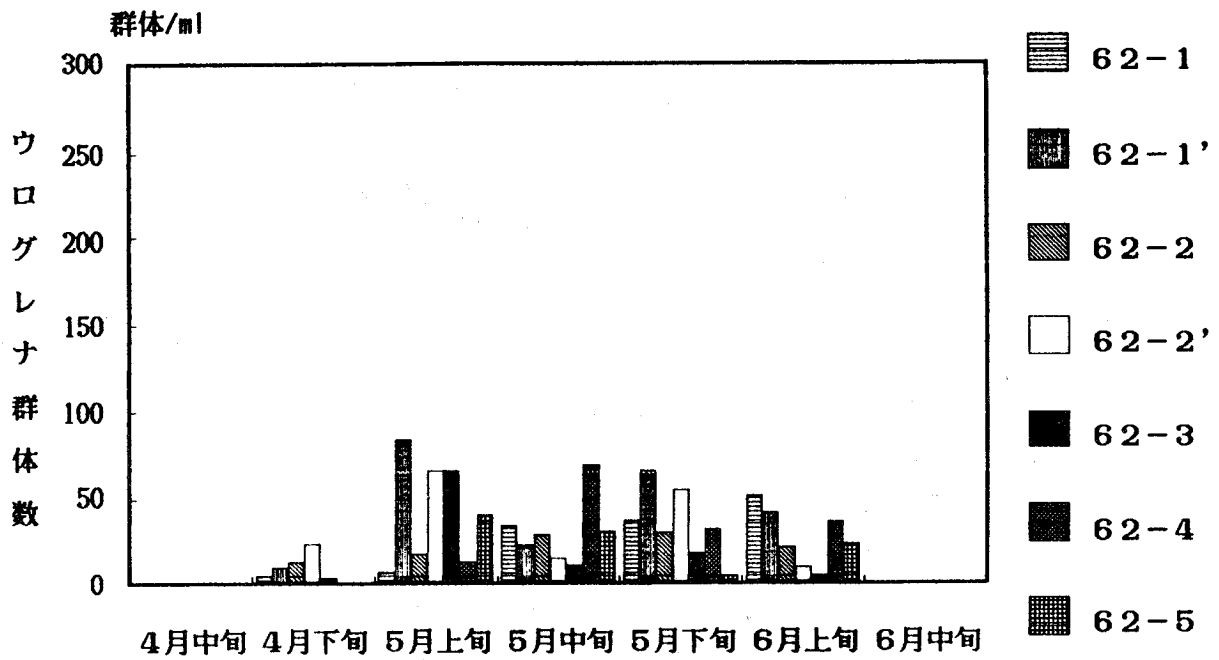


図10-9 昭和62年度、各調査地点におけるウログレナ群体数

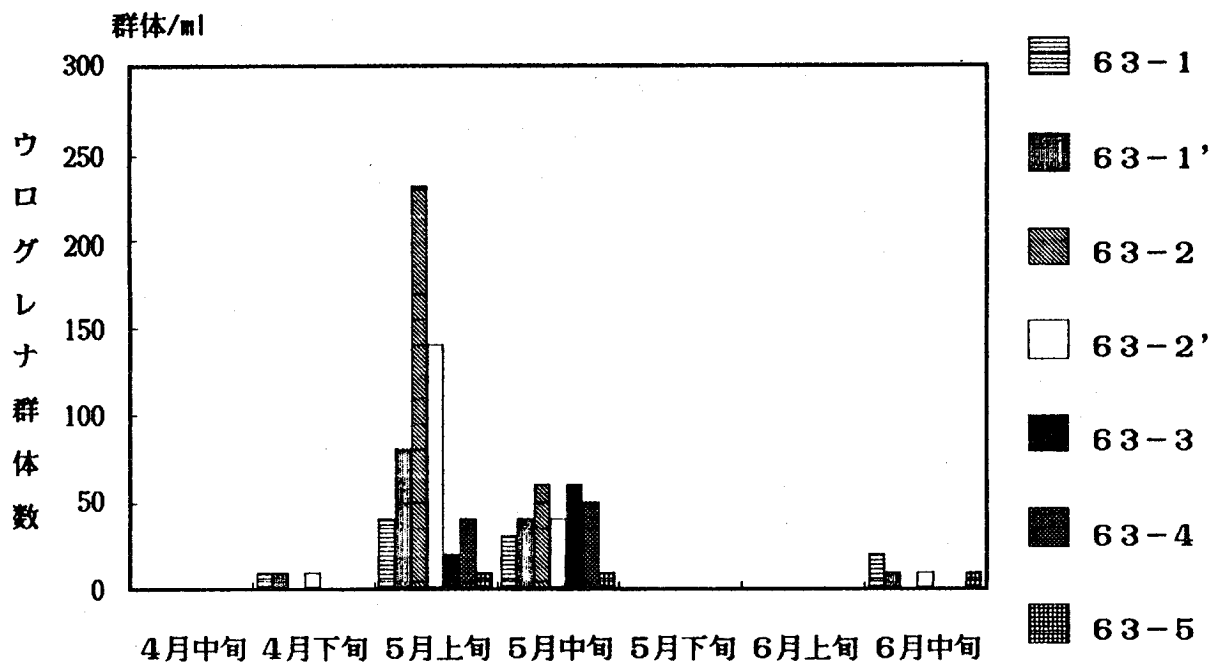


図10-10 昭和63年度、各調査地点におけるウログレナ群体数

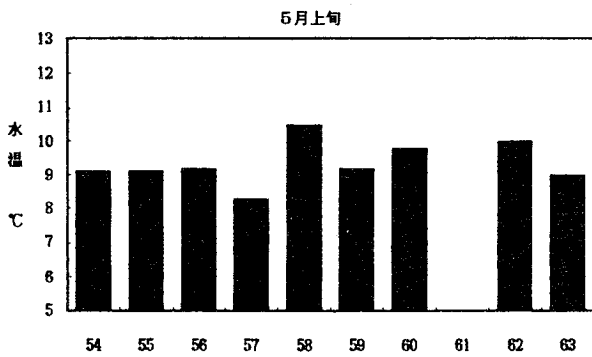
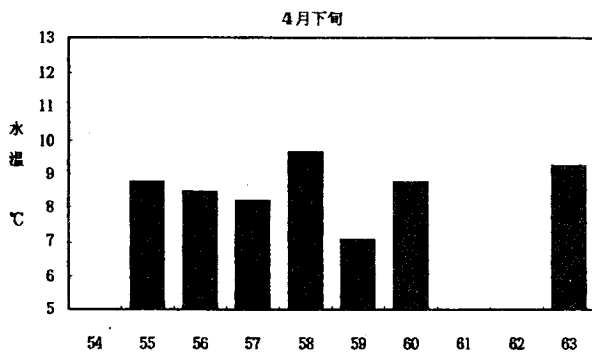
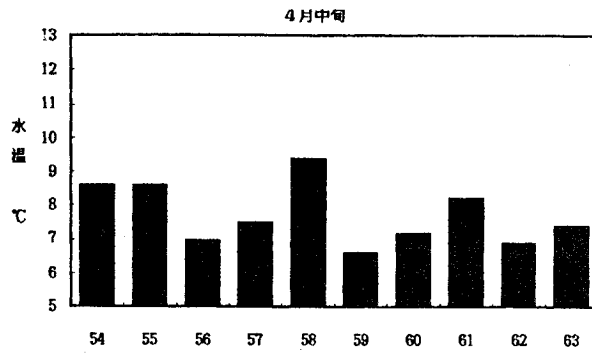
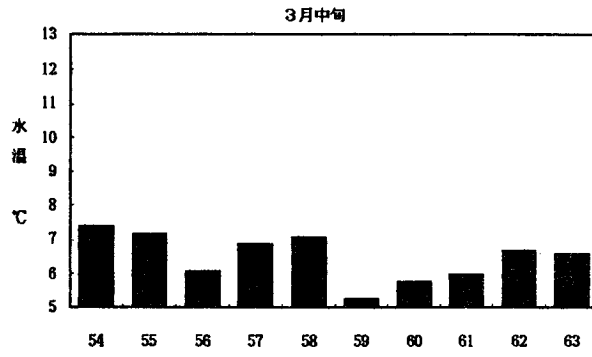


図11 各年度の底層水温の比較 (地点2、20m層)

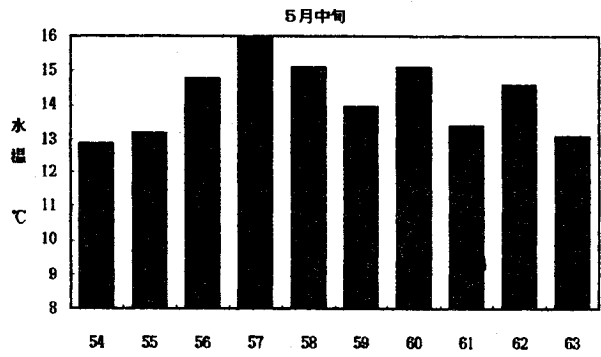
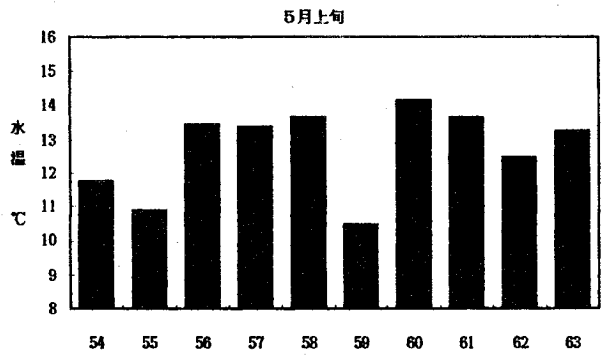
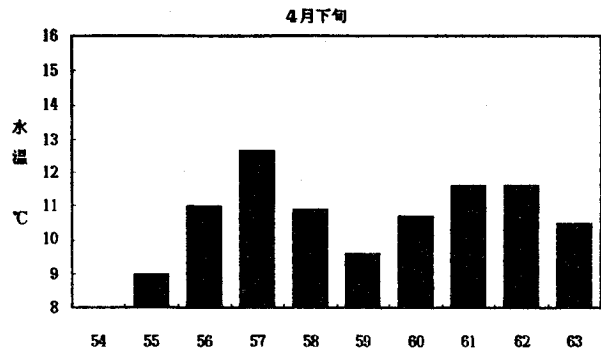
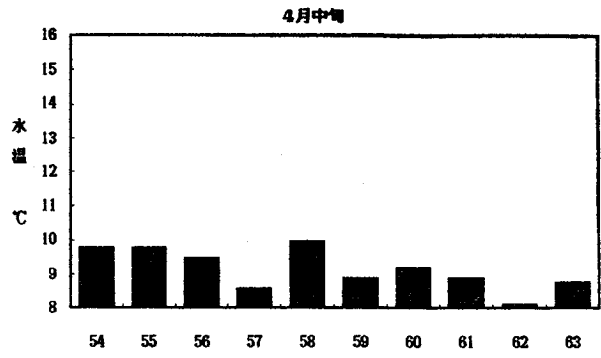


図12 各年度の表層水温の比較 (地点2、2m層)

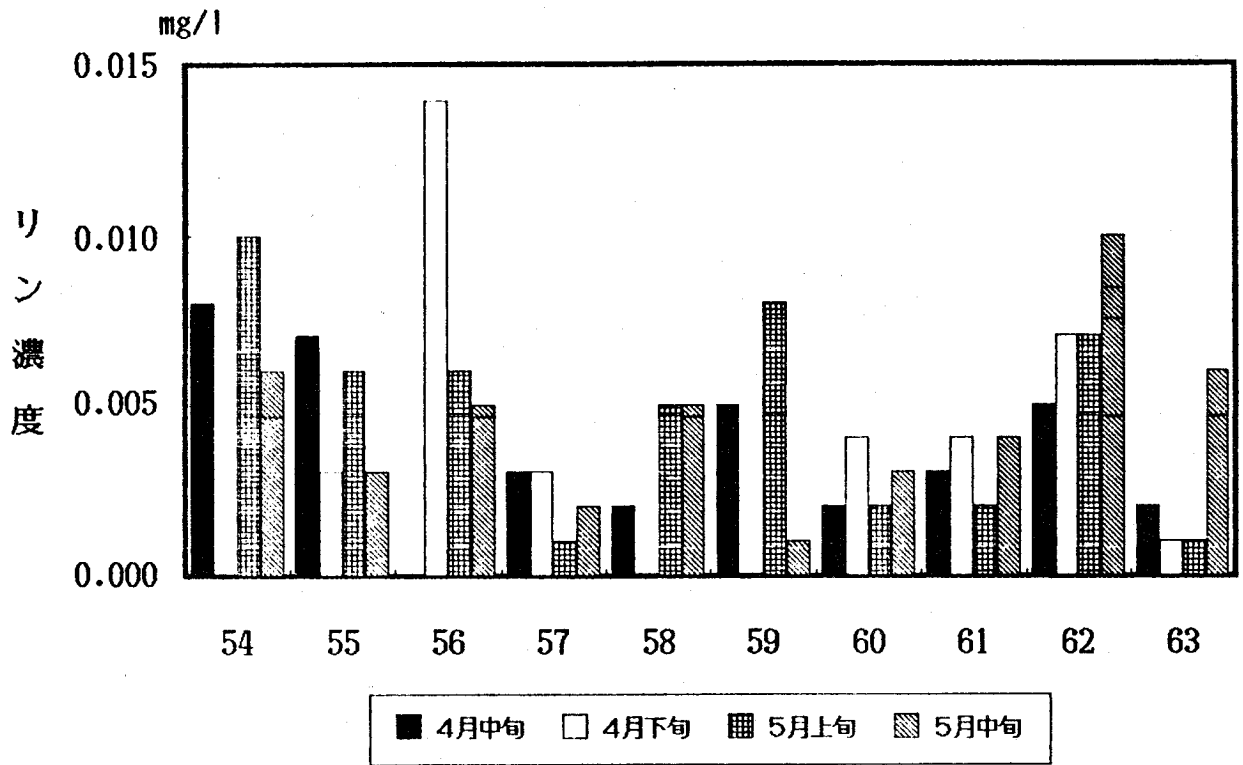


図13 各年度の2地点2m層におけるリン酸態リン濃度

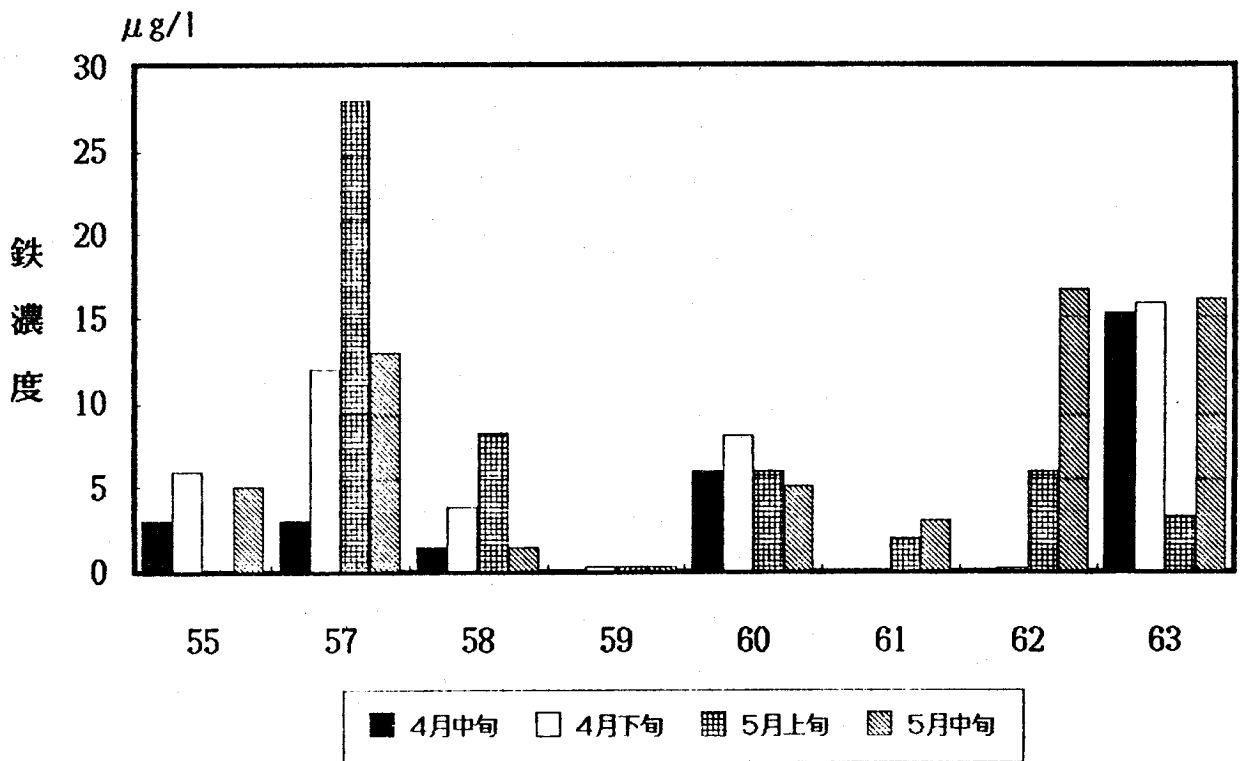


図14 各年度の2地点2m層における濾過態鉄濃度

とは推定できても、それ以上の予察に役立つ情報は得られないと思われる。メンブランフィルター濾過態の鉄濃度は54年度と56年度に測定されておらず、また必ずしもウログレナに利用可能な鉄濃度を反映しているとはいえないが、4月中旬から下旬にかけての濃度が比較的高い年にウログレナの大規模な増殖が起こる傾向が認められる。

## 要 約

- (1) 琵琶湖において淡水赤潮を引き起こす、ウログレナの増殖状況と環境要因の変動状況を把握し、赤潮発生予察に必要な項目を整理するために、琵琶湖北湖に定点を設け4月14日から7月18日にかけて計9回観測調査を実施した。
- (2) 調査定点におけるウログレナ群体の初認日は4月28日であった。5月6日には群体数がピーク（2地点233群体/ml）に達し、地点2と地点2'を中心とした約1キロ四方の一帯で、縞模様状の赤潮（濃厚な部分では1000群体/ml以上）を確認した。
- (3) 5月6日の赤潮発生時における地点2の表層水温は13.3℃であった。
- (4) ウログレナが赤潮形成に結び付くだけの増殖量を得るために必要とされる栄養塩濃度と、今回の調査結果を比較すると、窒素は制限要因になっておらず、リンと鉄が制限因子になっていることが確認された。
- (5) 過去10か年間の調査結果の比較から、調査ライン上で、ウログレナが特に多く増殖した年は、昭和54、56、57、60および63年の5か年であった。

これらの年の水温の上昇パターンなどの明確な特徴は掴めなかったが、赤潮予察のためには、表層水温と共に中層や底層の水温も併せて、4月以前の段階から集中的に監視する必要があることが示唆された。

## 文 献

石田祐三郎（1987）：湖水中におけるウログレナの増殖過程。淡水赤潮（門田 元 編）  
恒星社厚生閣，p.184～204