

琵琶湖におけるウログレナ 赤潮発生と環境要因との関係

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見られた。昭和61年には赤潮は発生しなかったが、その発生機構はいまだによくわかっておらず、ウログレナ増殖量の監視とその増殖原因の解明が重要な課題になっている。この赤潮の発生前から発生時にかけての期間を重点的に、定点を琵琶湖主湖盆に設けて、水象、水質、プランクトン調査を実施することにより、ウログレナの異常に増殖する原因及び年ごとの赤潮発生状況を明らかにし、赤潮発生対策の一助とすることを目的としている。

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62年4月14日から同年7月14日までの期間中、計9回実施。

実施日

4月14日、28日

5月6日、15日、25日

6月4日、15日、25日

7月14日

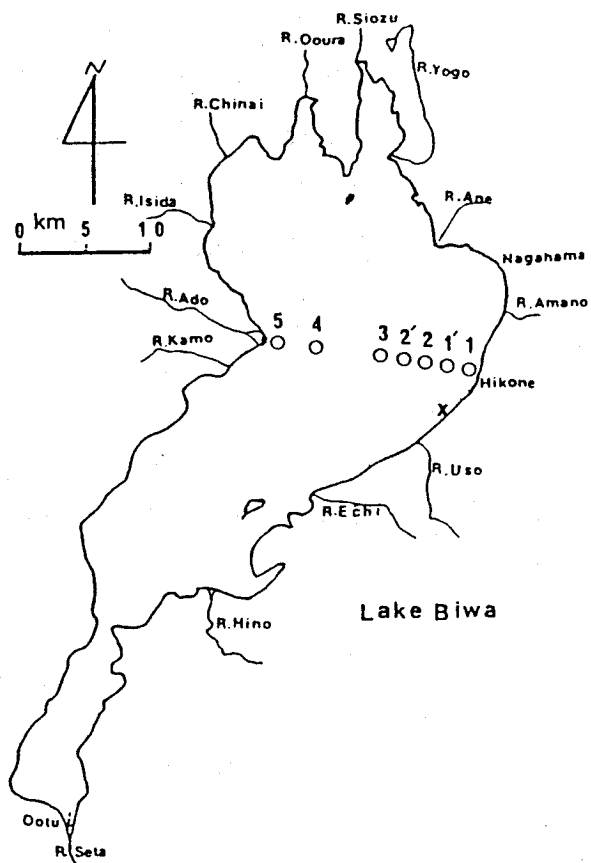


図1 調査地点

(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）
水色（JIS色表）
- 3) 水質 pH: ガラス電極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 ($\text{NO}_3\text{-N}$): Mullin & Riley 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 (DIN): 「 $\text{NH}_4\text{-N}$ 」+ 「 $\text{NO}_2\text{-N}$ 」+ 「 $\text{NO}_3\text{-N}$ 」
有機態窒素 (Org-N): ケルダール法 「 Kj-N 」- 「 $\text{NH}_4\text{-N}$ 」
総窒素 (T-N): 「DIN」+ 「Org-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
生物化学的酸素消費量 (BOD): JIS法 (20℃、5日間)
全鉄・溶存鉄 (T-Fe・S-Fe): 湖水濃縮後、原子吸光分析。溶存態は0.45 μm 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。群体数が1mlあたり1群体以上の時は計数板を使用。それ以下の時は50mlのビーカーに試水を入れ、肉眼観察し群体が確認された場合はピペットで取り出し、顕微鏡での確認を行った。

プランクトン沈澱量: 北原式中層定量用ネット（ミューラーガーゼ××14、口径25cm）を垂直曳し、24時間後の自然沈澱容積を測定。

調査結果

(1) 今年度のウログレナ増殖と赤潮の発生状況

本年度は5月7日に宇曾川河口沖で最初の赤潮が確認されて以来、琵琶湖北湖において4日間、赤潮の発生が確認された。ただし、本調査において設定した調査地点では赤潮の発生は認められなかった。図2に各調査地点におけるウログレナ群体数の変化を示す。いずれの地点でも4月14日の調査ではウログレナはまったく確認されず、地点1から地点3までの間では4月28日以降、地点4及び5では5月6日以降ウログレナの群体が認められた。ウログレナの群体数が最も多く認められたのは、5月6日の地点1'であり、1 ml中に84群体のウログレナが観察された。この地点では5月15日の調査でいったん22群体/mlまで低下した後、5月25日の調査では再び65群体/mlまで増加するという、二山型のピークを示した。同様な変動パターンは、地点2'に於いても認められた。また5月6日のピークは地点3でも認められた。赤潮の発生は5月7日から5月10日までの4日間であったので、5月6日のピークは赤潮の前兆として、湖内各所でウログレナの群体数が増加しつつあった状況を示していると思われる。地点4では5月15日に68群体/mlの比較的大きなピークが認められたが他の地点と比べるとその増加に時間的な遅れがあった。また、地点1、地点2及び地点5では顕著なピークは認められなかった。このことはウログレナの増加が全湖で均一的に起こるものではなく、かなり地点による不均一性があることを示唆している。また地点4及び5では7月14日の調査時点でも微量ながらウログレナの群体が観察された。このことから、今年の赤潮はウログレナの増殖初期に発生したが、赤潮がおさまった後もウログレナの増殖は2カ月余りにわたってゆるやかに続いていたことが示唆される。

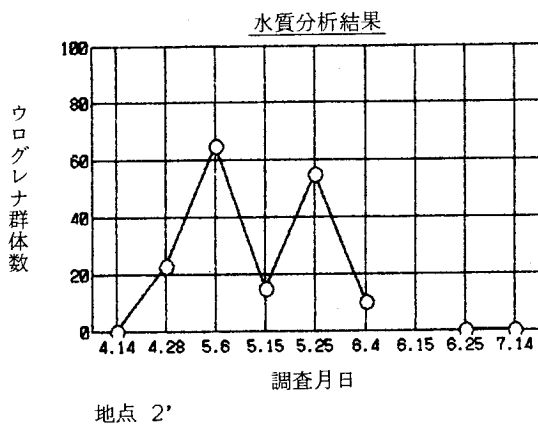
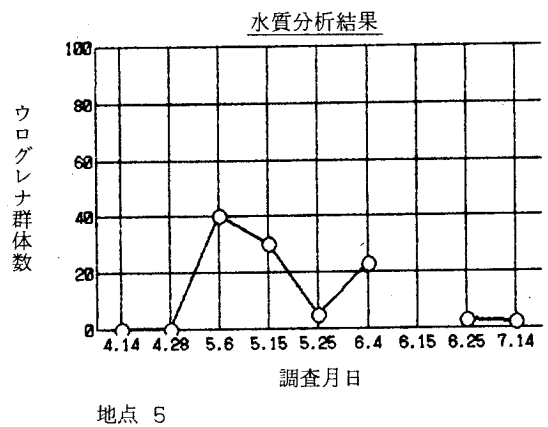
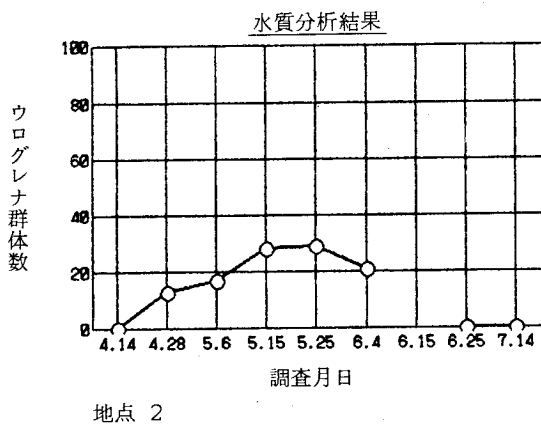
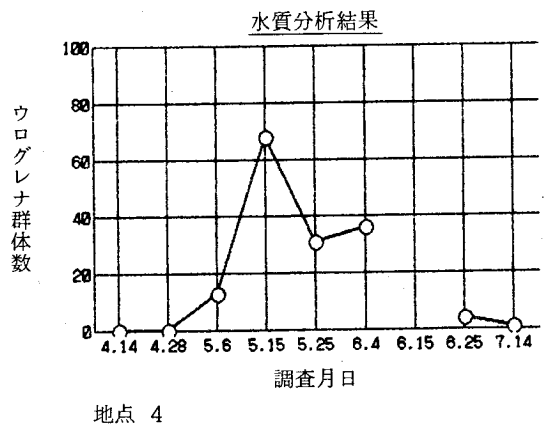
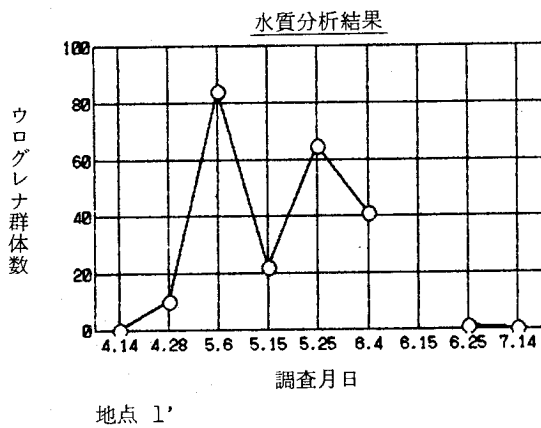
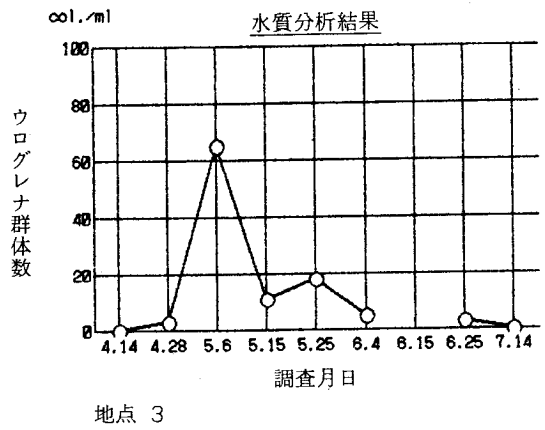
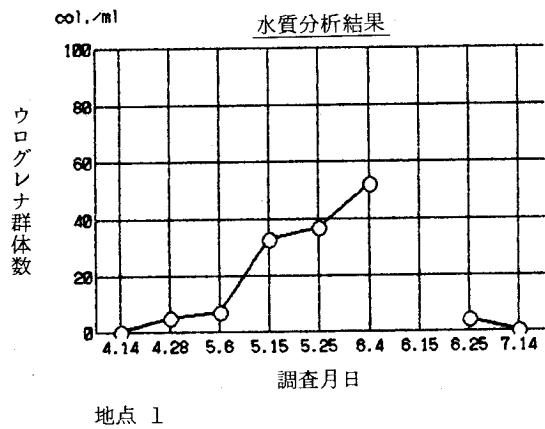


図2 各調査地点におけるウログレナ群体数の変動

(2) 湖水温の変動

2 m層水温の全地点平均値は、ウログレナ出現前の4月14日では8.1℃、ウログレナ群体が認められ始めた4月28日には11.6℃、赤潮発生直前の5月6日には12.4℃、赤潮終了後の5月15日には13.8℃であった。そして、ウログレナがほとんど姿を消した、6月25日の時点では、20.7℃であった。図3に調査期間内の各地点2 m層水温を示す。

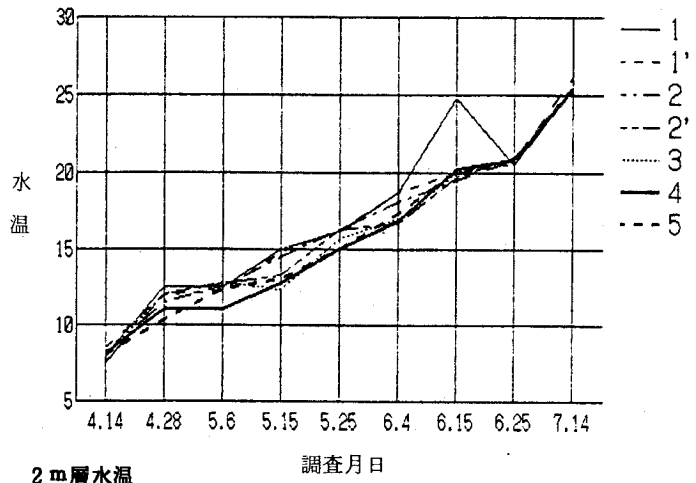


図3 各調査地点における2 m層水温の変化

4月14日から5月6日の間は、地点1、1'、2、2'及び3で、ほぼ同様な水温変動パターンが見られた。一方同時期内における地点4及び5の水温は、やや低めに推移しており、特に5月6日の地点4では他の6地点に比べて、1.2から1.8℃も低い水温を示した。ウログレナ群体数のピークが地点4で他地点よりも遅れて現れたのは、このことに関連しているものと思われる。

図4に調査期間内の地点4における水温の鉛直分布を示す。4月14日の時点では、表層水温が8.4℃、65m層で7.0℃と、ほぼ表層から下層まで一定であり、水温躍層は形成されていなかった。5月6日には表層水温が13.2℃、2 m層で11.1℃、65m層で6.8℃と温度差がみられるようになり、5月15日には10m層付近に明確な水温躍層が形成された。

(3) pH

図5に各地点のpHを示す。平均値で見ると、pHはウログレナ出現前の4月14日には7.18、ウログレナの出現が認められた4月28日の時点では7.80、赤潮発生直前の5月6日には7.91、赤潮終了後の5月15日には、8.15と、赤潮出現時期の前後を通じて、緩やかな上昇パターンを示した。

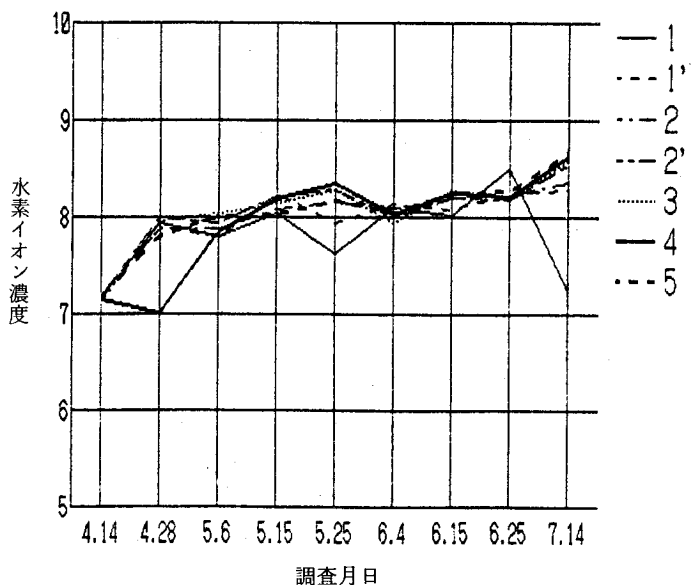


図5 各調査地点におけるpH値の変化

(4) クロロフィル a

図6に各地点のクロロフィル量を示す。調査期間中のクロロフィ

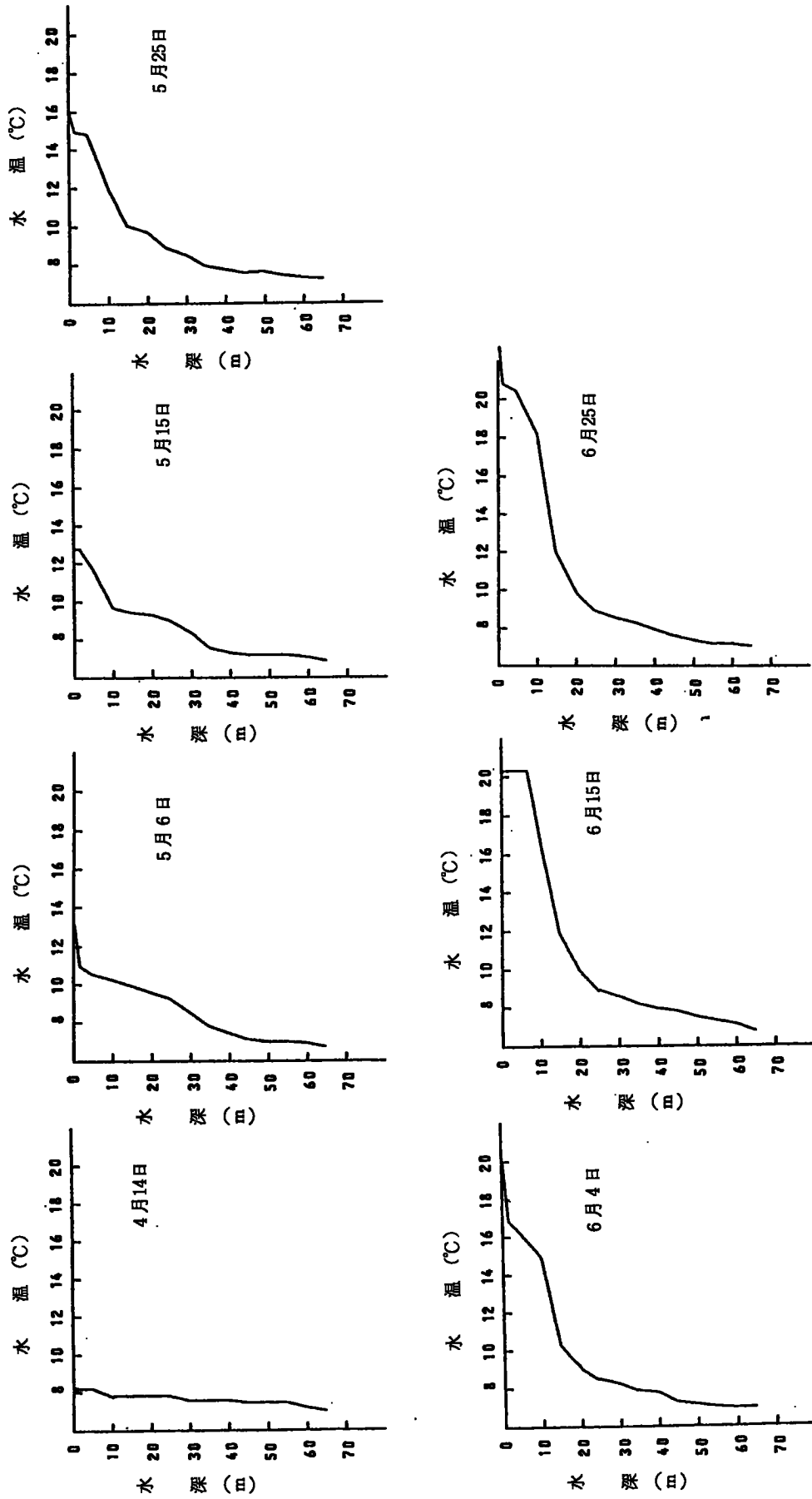


図4 地点4における水温の鉛直分布

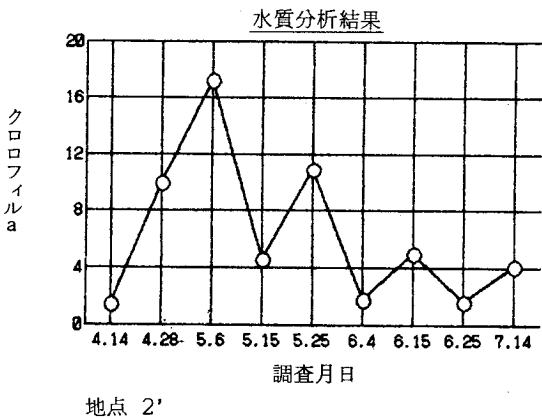
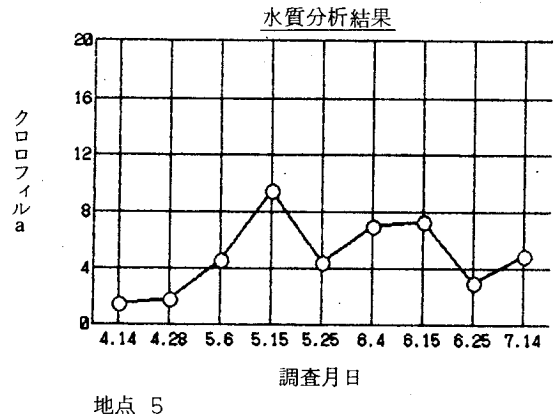
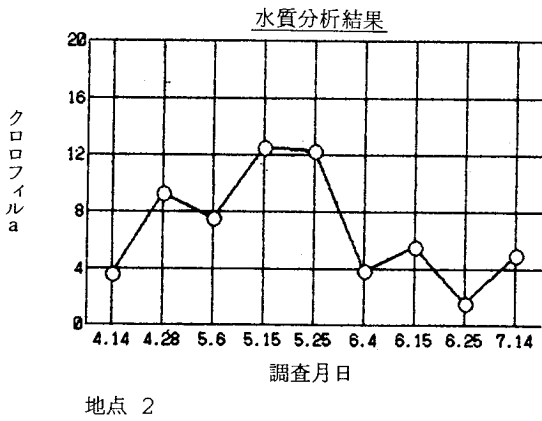
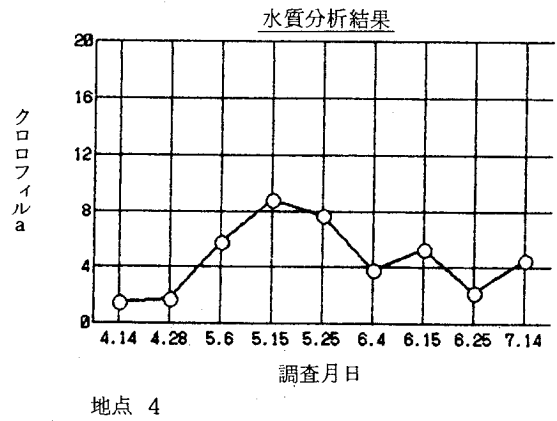
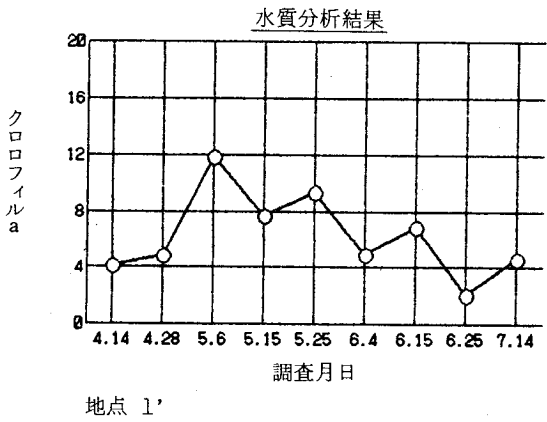
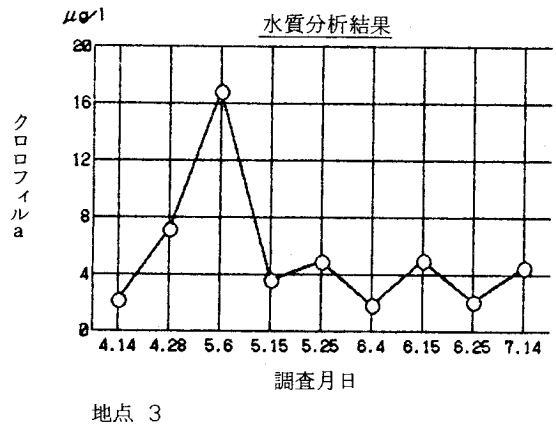
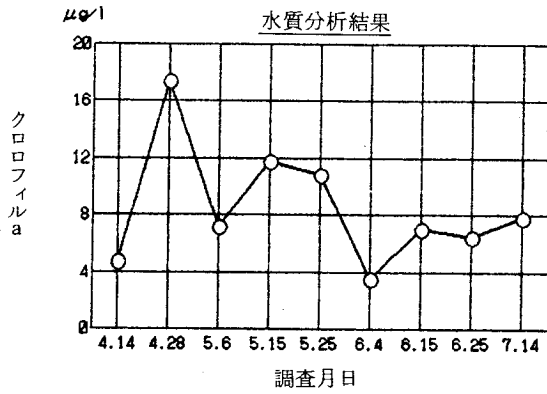


図6 各調査地点におけるクロロフィルa量の変化

ル量は最小値 $1.0 \mu\text{g}/\ell$ 、最大値 $17.4 \mu\text{g}/\ell$ の間で推移した。平均値の推移で見ると、赤潮発生直前の5月6日にクロロフィルは最大値の $10.2 \mu\text{g}/\ell$ を示し、ウログレナの増加がこの時期のクロロフィルの増加に大きく寄与していた可能性を示唆する。ウログレナの特に多く観察された地点1'、2'、3及び4ではウログレナのピークに一致したクロロフィルのピークが

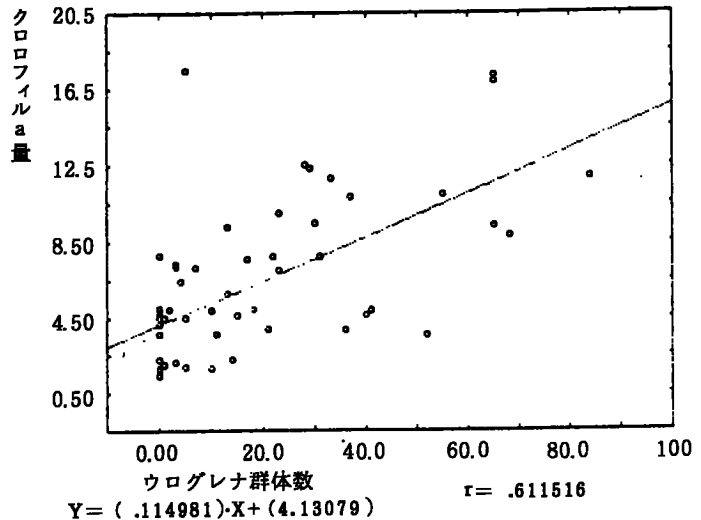


図7 ウログレナ群体数とクロロフィルa量の関係

認められた。しかし、地点1では、ウログレナが出現し始めた4月28日にクロロフィルのピークを示し、ウログレナがピークを示した時期にはクロロフィルは逆に最小値を示しており、ウログレナ以外のプランクトンもクロロフィルの増加に大きく寄与していた可能性を示している。図7に全調査期間を通じてのウログレナ群体数とクロロフィルa量との相関を示す。

(5) プランクトン沈澱量

表1に調査期間中のネットプランクトンの沈澱量を示す。0~10m層のプランクトン沈澱量は4月14日に $1.16 \text{ cc}/\text{m}^3$ であったが、5月15日には $12.6 \text{ cc}/\text{m}^3$ にまで増加した。そして6月15日にも $11.54 \text{ cc}/\text{m}^3$ とほぼ同程度の量が認めら

表1 調査期間中のプランクトン沈澱量

(CC/m^3)

	4月14日	5月15日	6月15日	7月14日
0~10m層	1.16	12.60	11.54
10~20m層	0.73	5.00	4.30
20~40m層	1.30	1.56	1.04
40~75m層	1.50	1.25	0.86	1.52

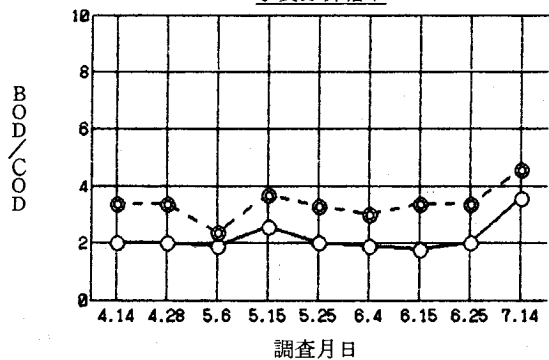
注：7月14日のプランクトン沈澱量は藍藻類の *Aphanothece clathrata* が大量に発生しており、測定不能

れた。7月14日にもかなり大量のネットプランクトンが捕集されたが、浮上性の強い藍藻類の一種 *Aphanothece clathrata* が大量に含まれており、沈澱量の測定はできなかった。ネットプランクトンの中には他の植物プランクトンや動物プランクトンなども含まれるため、ウログレナの増殖だけを反映するものではないが、4月から5月の間にかなり活発な生物生産が行われたことが示唆される。

(6) BODおよびCOD

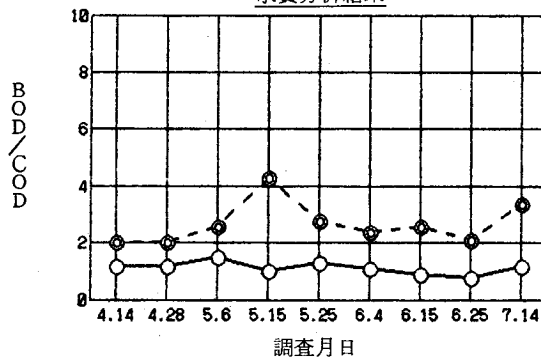
図8に各地点のBOD及びCODの変動を示す。BODとCODはCODの方が、やや高めの値を示したことを除くときわめてよく一致した変動を示した。BODの平均値の推移で見ると、最小値 $0.9 \text{ mg}/\ell$ 、最大値 $2.1 \text{ mg}/\ell$ の間で変動したが、ウログレナ群体数のピークに一致するようなピークは認められなかった。6月15日の地点

水質分析結果



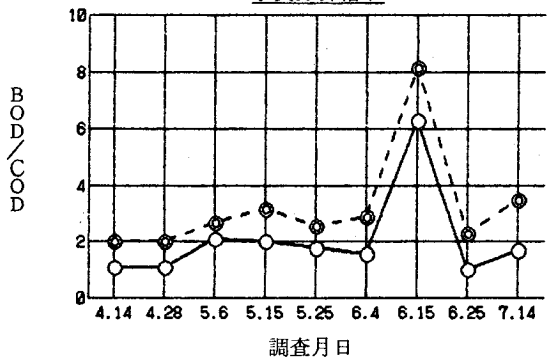
地点 1

水質分析結果



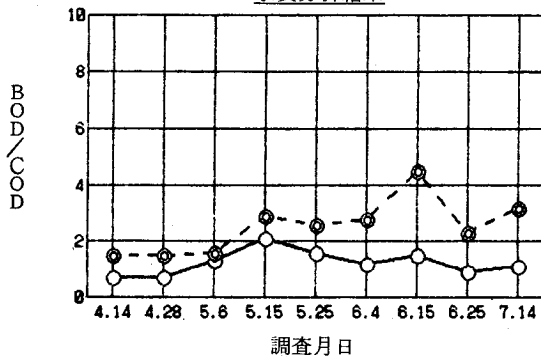
地点 3

水質分析結果



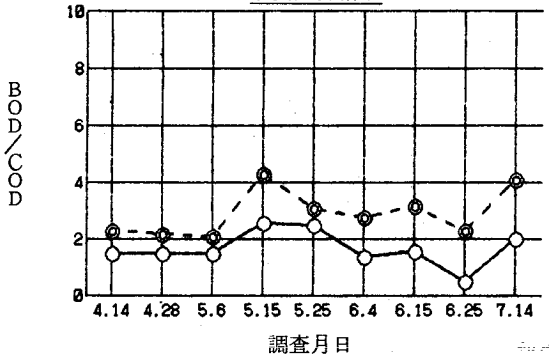
地点 1'

水質分析結果



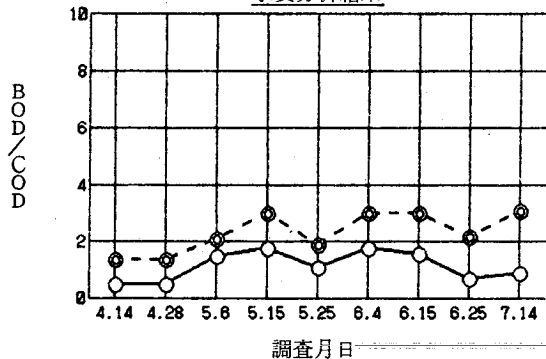
地点 4

水質分析結果



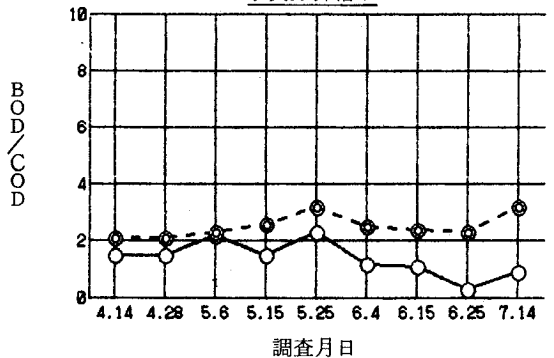
地点 2

水質分析結果



地点 5

水質分析結果



地点 2'

○ — BOD mg/l
 ◎ — COD mg/l

図8 各調査地点におけるBOD、CODの変化

1'においてきわめて大きなピークが認められたが、これはプランクトンの増殖よりもむしろ、陸域からの濁水の流入が関与していたものと思われる。

(7) 栄養塩類等の変動

1) リン成分

図9に各地点における $\text{PO}_4\text{-P}$ およびTPの変動を示す。 $\text{PO}_4\text{-P}$ は $0.01 \text{ mg}/\ell$ 以下の範囲で変動した。地点によってその変動パターンは多少異なるが、5月初旬から6月初旬にかけて徐々に減少する傾向が認められた。一方、TPは地点2'、3、4及び5では余り大きな変動を示さず、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の減少分がプランクトンの生産に使われている状況を示唆していた。しかし東岸寄りの地点1、1'および2ではしばしば高いピークが認められており、陸域からの濁水流入などの影響を受けていたのではないかと思われる。

2) 窒素成分

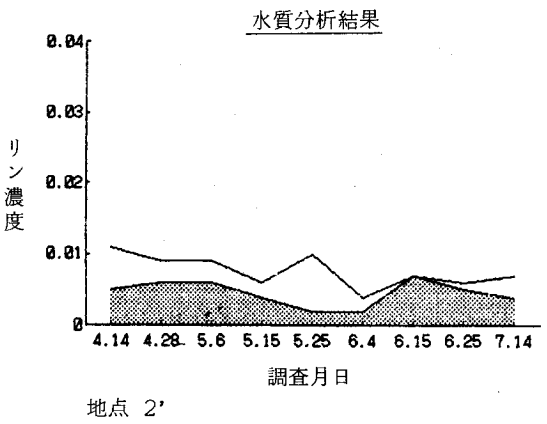
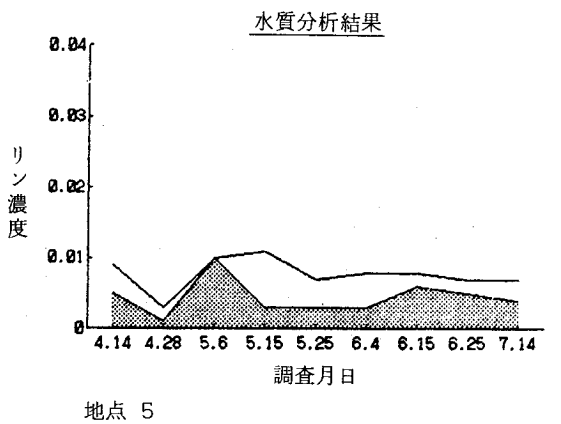
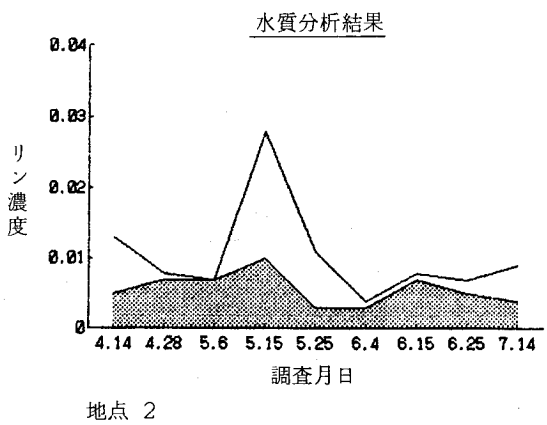
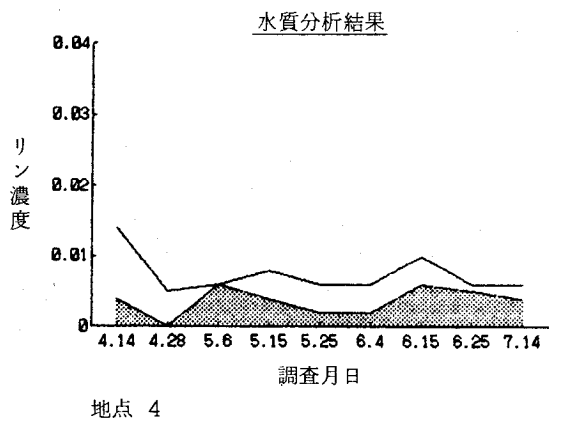
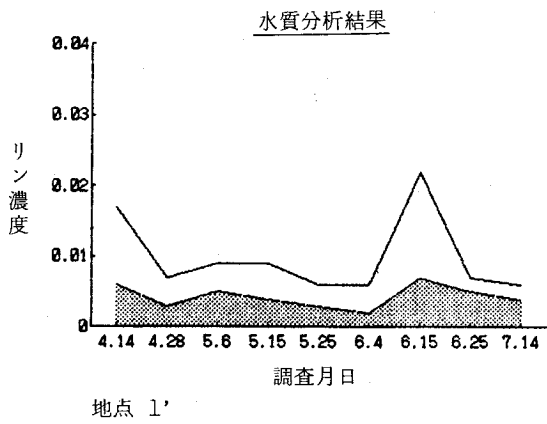
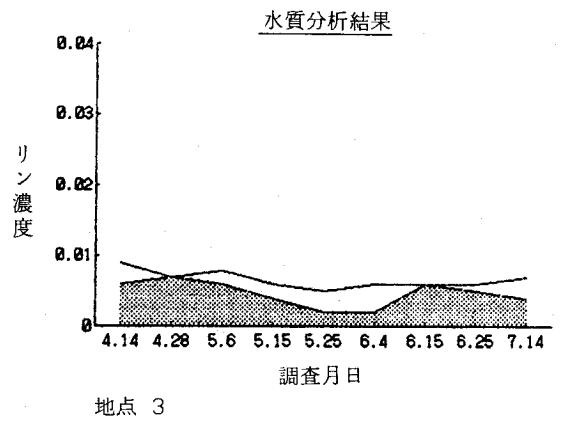
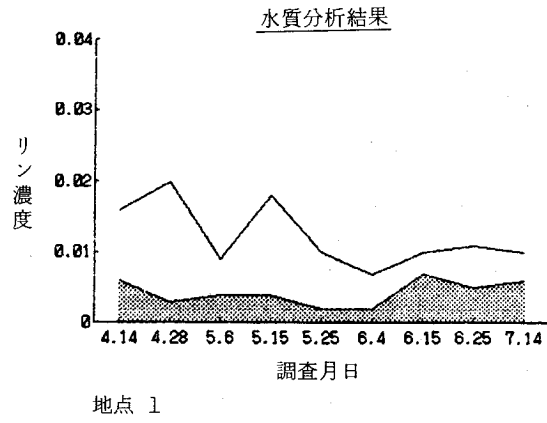
図10に各態窒素成分の変動を示す。4月14日から6月15日までの間はいずれの地点でも、DINの大部分は $\text{NO}_3\text{-N}$ であった。 $\text{NO}_3\text{-N}$ はウログレナの出現前には最小値 0.161 から最大値 $0.180 \text{ mg}/\ell$ の濃度で存在していたが、ウログレナの増殖時期を通じて減少し、5月25日には最小値 $0.061 \text{ mg}/\ell$ 、最大値 $0.083 \text{ mg}/\ell$ となった。そして7月14日には地点1を除いて、ほとんど検出されないレベルにまで低下した。有機態の窒素は各地点で大きな変動を示した。しかし、ウログレナ群体数の増加に対応した変化はあまり認められなかった。

3) ケイ酸

図11に各地点におけるケイ酸の変動パターンを示す。多景島よりも東岸寄りの地点1、1'、2および2'では4月14日に 1.0 から $1.3 \text{ mg}/\ell$ の濃度で存在していたが、多景島以西の地点3、4及び5では4月14日から4月28日にかけては 0.3 から $0.5 \text{ mg}/\ell$ の範囲でしか存在しておらず、地点間による明かな差が認められた。しかし5月6日には西寄りの3地点とも $1.0 \text{ mg}/\ell$ まで増加し、5月15日にはいずれの地点でも一様に高い値が観測された。特に地点1では顕著なピークが認められ、河川からの濁水等の流入による影響があったのではないかと思われる。

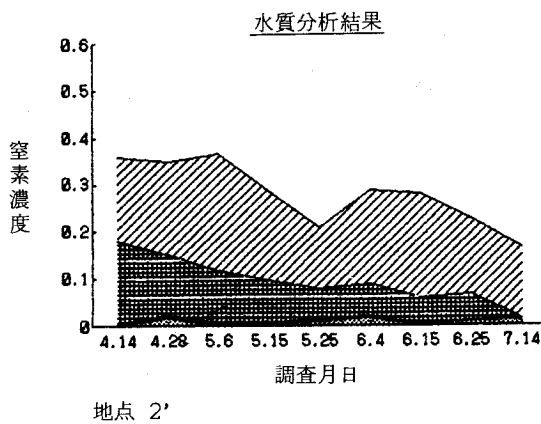
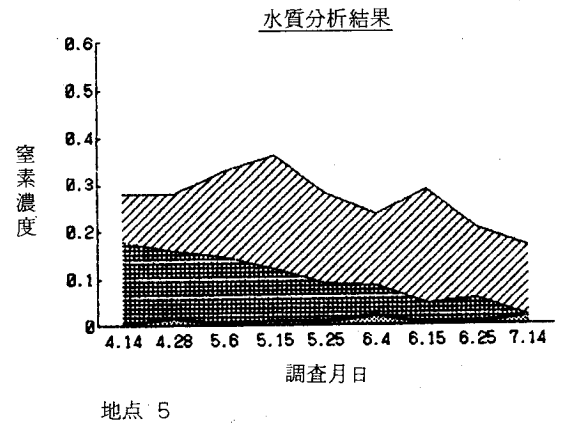
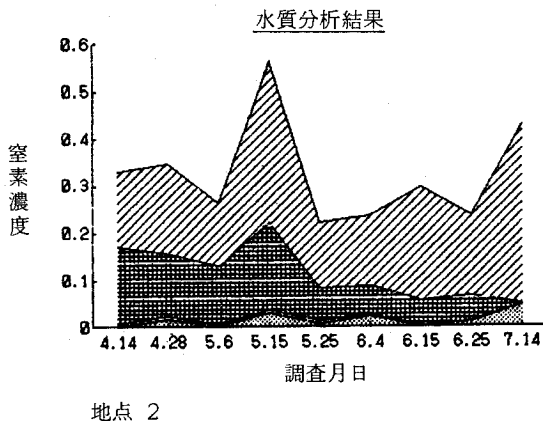
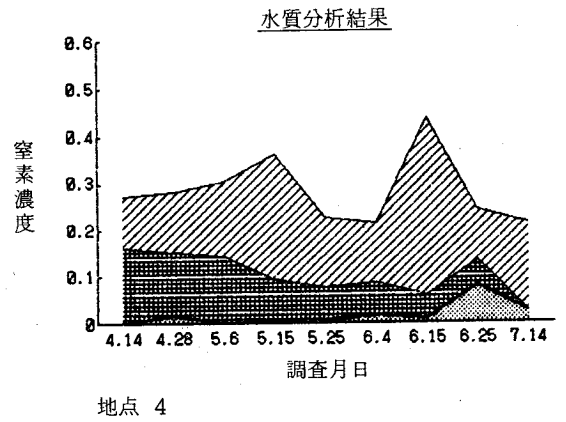
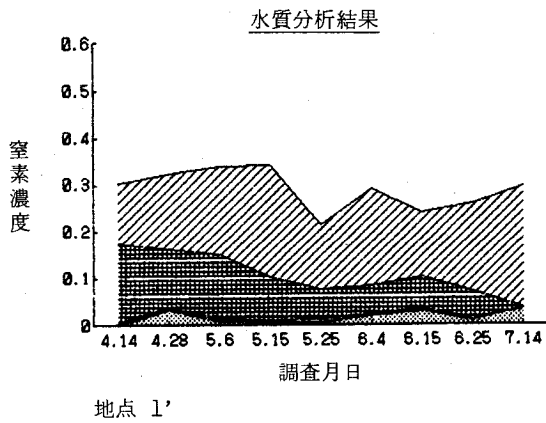
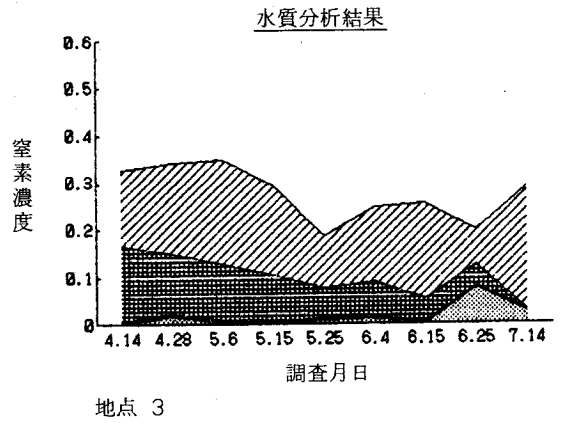
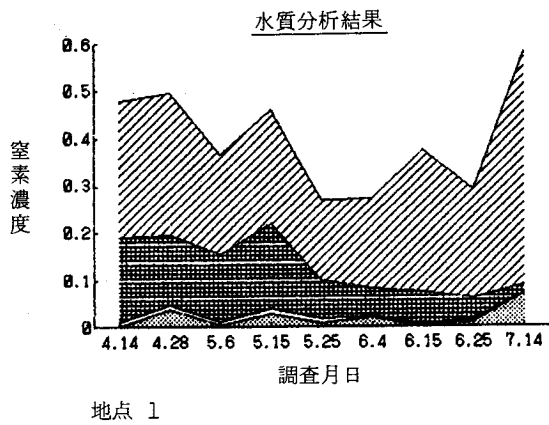
4) 鉄

2 m層におけるT-Feは最小値 $4.35 \mu\text{g}/\ell$ 、最大値 $111.6 \mu\text{g}/\ell$ の間で変動した。またS-Feは $32.47 \mu\text{g}/\ell$ 以下の範囲で推移した。



□ Or-P mg/l
 ■ PO4-P mg/l

図9 各調査地点におけるPO₄-P、TPの変化



Or-N mg/l
 NO₃-N mg/l
 NO₂-N mg/l
 NH₄-N mg/l

図10 各調査地点における各態窒素成分の変化

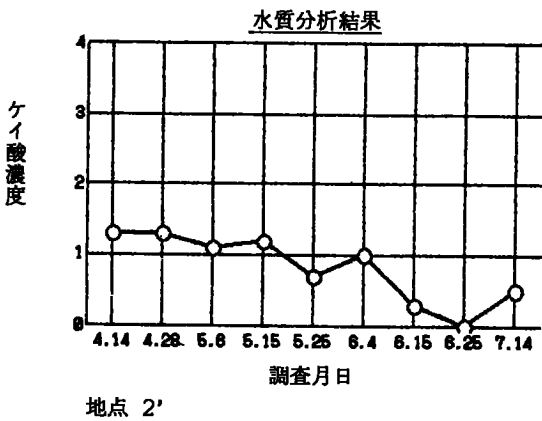
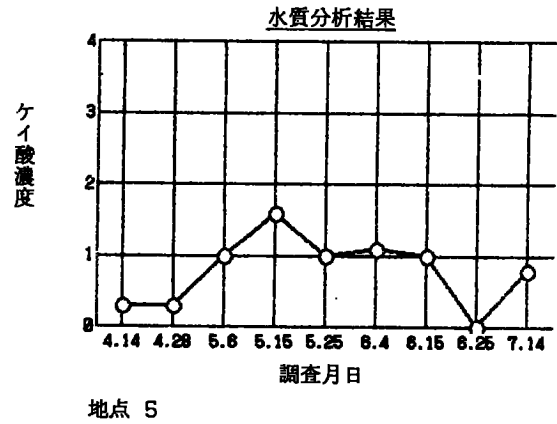
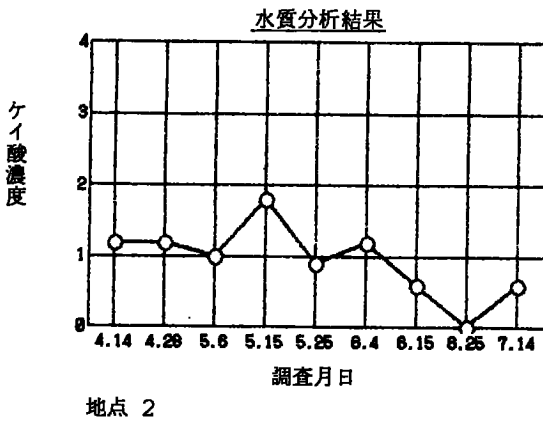
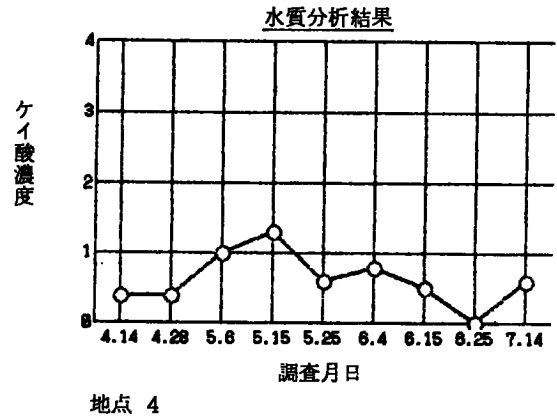
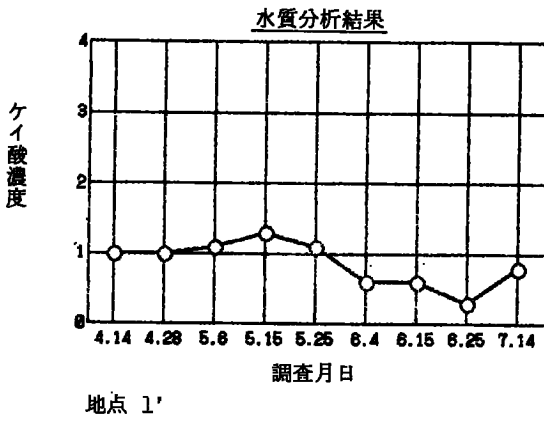
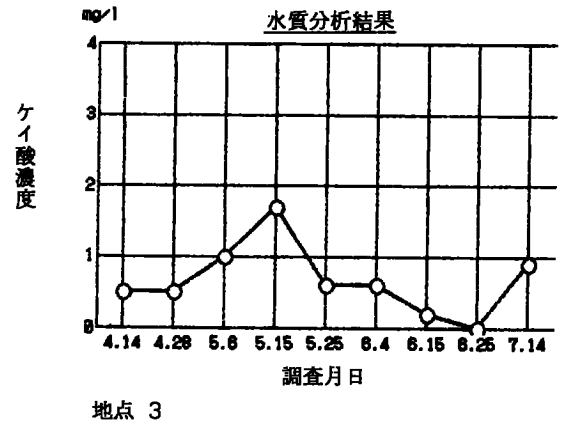
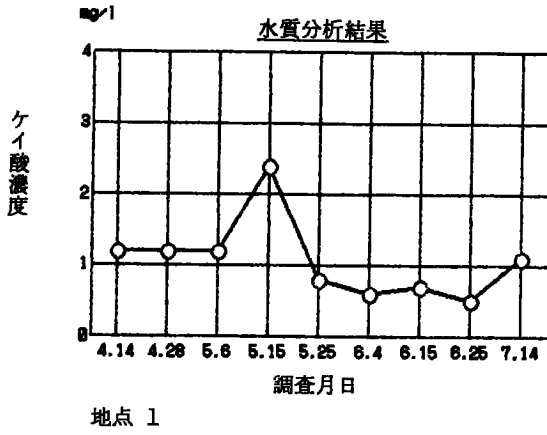
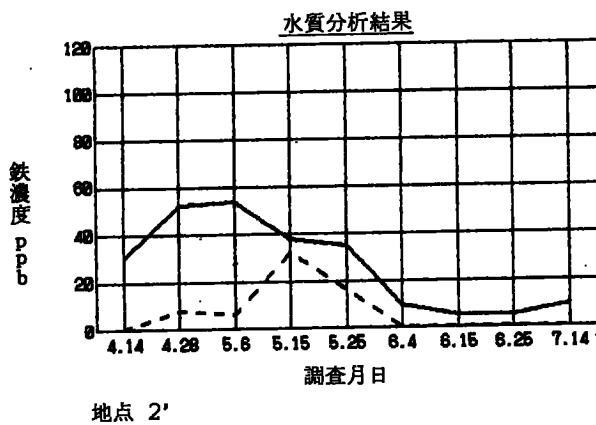
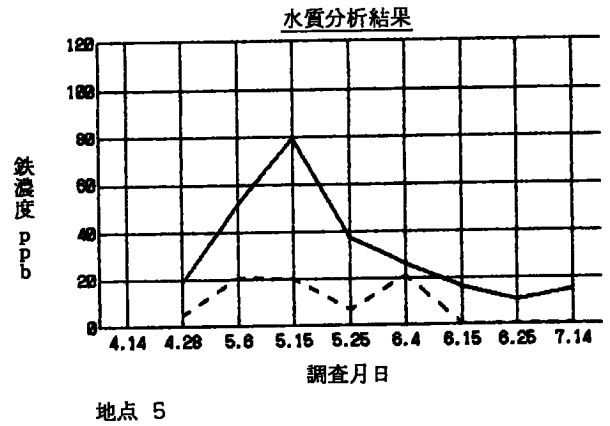
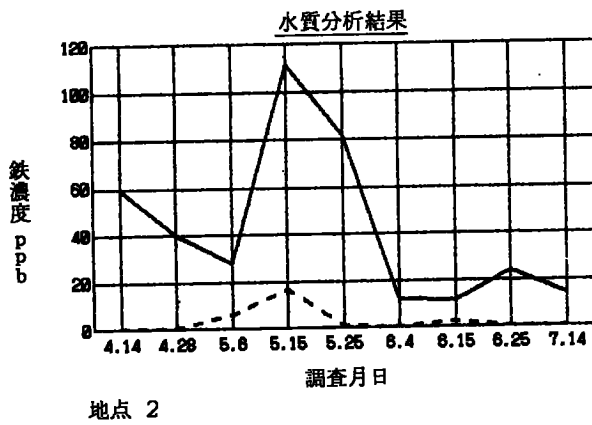
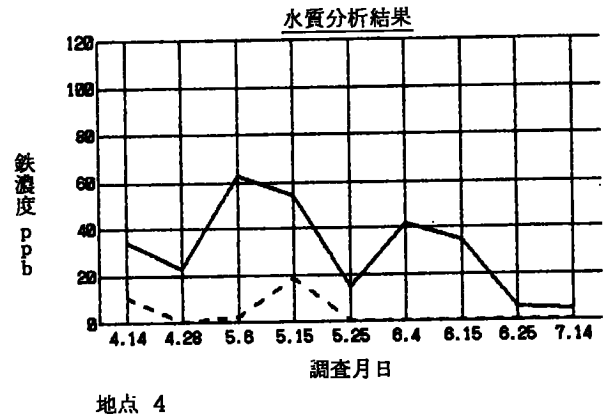
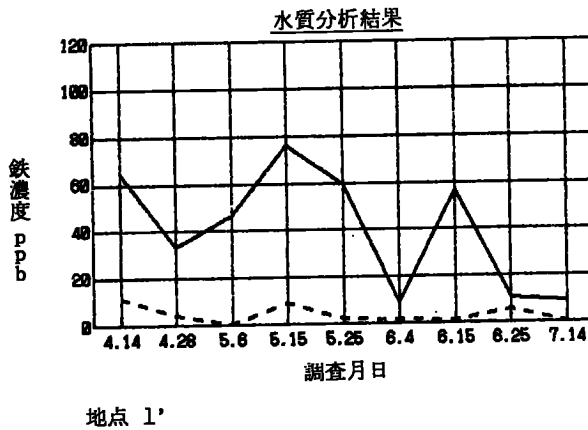
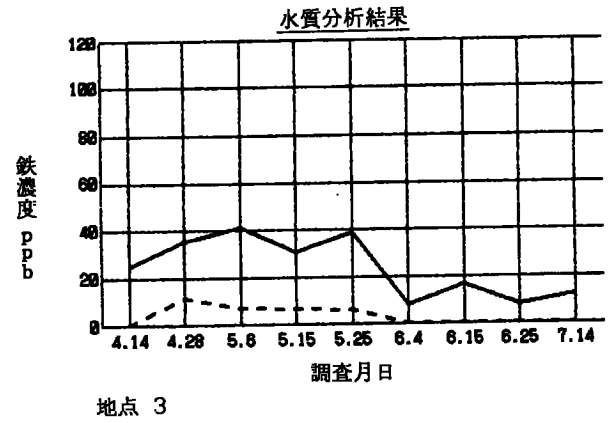
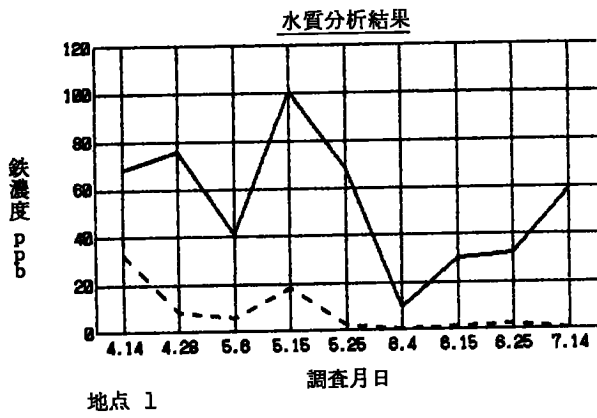


図11 各調査地点におけるケイ酸の変化



— T-Fe
 - - - S-Fe

図12 各調査地点における鉄濃度の変化

図12に各地点におけるT-F eおよびS-F eの変動パターンを示す。T-F eは大きな変動を示したが、5月15日に東岸寄りの地点1、1'及び2と西岸の地点5で特に顕著なピークが認められた。また湖心部寄りの地点2'及び3では4月から5月下旬まで30から50 $\mu\text{g}/\ell$ 程度のT-F e濃度を示していたが、6月以降10 $\mu\text{g}/\ell$ 前後の値に低下した。T-F eの変動パターンはケイ酸の変動パターンとよく似ており、河川からの濁水等の流入によって大きく変動するものと思われる。S-F eはいずれの地点でも5月下旬ぐらいまではごくわずかに検出されていたが、6月以降ほとんど検出されなかった。

論 議

61年度はウログレナ赤潮の発生がみられなかったが、今年度は再び赤潮が発生した。本調査で設定した調査地点では赤潮の発生地域にかからなかったが、 ml あたり最高84群体（5月6日地点1'）のウログレナが確認され、ウログレナの活発な増殖が起こっていたことが示された。地点1'に於ける調査は昭和56年度より行っているが、同地点における結果だけについて比較すると、昭和60年度の ml あたり最高230群体、56年度の最高90群体に次いで、高い値であることがわかる。但し、最高の群体数が観測された地点は毎年異なっており、昭和54年度では地点2の ml あたり159群体（但し地点1'と2'は調査していない）、55年度では地点2の89群体（地点1'と2'は調査していない）、56年度では地点2'の116群体、57年度では地点2の176群体（地点3、4、5は調査していない）、58年度では地点2'の75群体（地点4、5は調査していない）、59年度では地点2、2'及び3の30群体（地点4、5は調査していない）、60年度では地点1'の230群体、61年度では地点1の34群体がそれぞれ最高群体数となっている。年度によって対象とした調査地点が多少異なるため、一様な比較はできないが、最大の群体数は概ね多景島をはさんで東よりの地点で確認されることが多い傾向が認められる。その点に関しては今年度も例年通りの傾向が認められたといえる。

湖水中にウログレナの群体が確認されたのは、4月28日から7月14日までの約2.5カ月間で、最初にウログレナの群体を確認してから、9日後には最初の赤潮発生が確認された。昭和54年以降の調査記録について見ると、ウログレナの湖水中への出現時期は、昭和55年度（5月19日）と、昭和57年度（5月10日）を除いてすべて4月中旬から4月下旬までの間に集中しており、ウログレナの出現時期については今年度も例年通りであったといえる。次にウログレナ群体数のピークが認められた時期について比較すると、昭和54、58、60年度及び今年度は5月初旬にピークが認められた。これに対して、昭和56年度は5月中旬、昭和55、57、59及び61年度は5月下旬にそれぞれピークを示している。

このことから今年度はウログレナが出現初期の短期間内に、きわめて活発に増殖したことがわかる。赤潮の発生期間は4日間でそれ以降も約2カ月にわたって、ウログレナは

湖水中に存在していた。しかし再び赤潮発生にはつながらなかった。従って、今年は、4月末から5月上旬にかけての期間にだけ、赤潮を引き起こすのに必要な要因がすべて揃っていたと考えることができる。

ウログレナの増殖を左右する要因の一つは水温である。今年の結果でも、水温の上昇が遅れがちであった湖心部より西寄りの地点では、東寄りの地点に比べて、ウログレナの出現時期や、群体数がピークを示す時期が遅れる傾向を示した。

昭和54年以降、61年までの調査結果についてみると、ウログレナの群体が湖水中に出現した時期の水温は出現の遅れた昭和55年と57年を除くと、8.7℃から11.3℃の間であった。今年度のウログレナ出現時期の水温は11.5℃で、ほぼ例年通りであったといえる。ウログレナ群体数がピークを示した時期について比較すると、昭和54年には11.4℃で159群体/mlのピークを示したが、一方56、58、59及び60年には14.0から14.4℃の間で最高の群体数を示した。今年度は水温12.4℃で84群体/mlのピークを示したので、例年よりはやや低め、昭和54年に次いで低い水温でピークが認められたことになる。

赤潮の発生しなかった61年度の同時期に於ける水温は約13.8℃であり、過去の結果と比較して、水温上昇が特に遅れていたとは言えない。赤潮発生の要因を考える場合、天候や栄養塩のレベルなど、他の要因を合わせて考察する必要がある。天候に関しては、今年の場合、赤潮発生前に、晴天の日が続いて、ウログレナの増殖に好適な条件をつくっていたものと思われる。この点、昨年のように断続的な降雨によって、増殖途中のウログレナ個体群が照度の低下や一時的な水温の低下および拡散に見舞われた場合と比べて赤潮発生の条件は整っていたと思われる。栄養塩のレベルについてみると、DIN、PO₄-P共に昨年も今年もほぼ平年並みの値であり、大きな違いは認められない。今年の結果でみると、ウログレナの増殖期間を通じて、これらの栄養塩レベルは徐々に低下しており、ウログレナの増殖初期に利用可能な栄養塩が大部分消費されてしまったことが示唆される。5月15日には水温躍層が形成されたので消費された窒素やリンは生産層へ回帰せず、ウログレナの増殖期間の後半では赤潮の発生には至らなかったものとも考えられる。同様なことは、溶存態の鉄についてもある程度は当てはまるものと思われる。しかし、鉄やケイ酸は降雨後などに河川からの濁水流入等に伴って、湖内へ補給される。今年の場合、赤潮終了後にT-Feとケイ酸の大きなピークが認められたが再度の赤潮発生には結び付かなかった。ウログレナの増殖が赤潮発生に至るかどうかには、再補給されない栄養塩類の消費と、濁水流入など、外部から供給される栄養塩類の流入及び、エネルギー供給源としての日射条件および水温上昇のタイミングが大きく関与しているものと思われる。

要 約

- (1) 琵琶湖において発生する赤潮生物ウログレナの増殖と環境要因との関係を明らかにするために、琵琶湖北湖に定点を設け4月14日から7月14日にかけて計9回観測調査を実施した。
- (2) 調査において最初にウログレナ群体を確認したのは4月28日であった。5月6日にはウログレナの最大増殖ピーク（最高84群体/ml）を示し、その翌日から4日間にわたって、北湖内各所でウログレナの赤潮が認められた。
- (3) 調査期間中の湖水温はウログレナの増殖期間中緩やかな上昇傾向を示したが、4月下旬から5月初旬にかけては、湖心部をはさんで、東寄りの方が西寄りに比べて早く上昇する傾向を示した。この影響は、ウログレナの出現時期や、最大増殖時期のずれという形で現れていることが示唆された。
- (4) 栄養塩類のうち $\text{PO}_4\text{-P}$ と DIN はウログレナの増殖期間を通じて徐々に減少する傾向を示した。 SiO_2 と T-Fe は5月15日を中心に大きなピークを示した。これには河川からの濁水流入等の影響があったのではないかと思われる。 S-Fe はウログレナ増殖の初期には特に岸近くを中心に高濃度で検出されたが、5月下旬以降はほとんど検出されなかった。
- (5) 総体的にみて、栄養塩類のレベルには例年と大きな差は認められなかった。
- (6) 例年と同様、多景島より東の地点で最大の群体数が確認された。
- (7) ウログレナ群体の湖水中への出現時期は例年と同様であった。しかしピークに達したときの水温は例年と比較してやや低めであった。