

プランクトンから水環境をみる

滋賀県立衛生環境センター水質科 一瀬 諭

1. はじめに

陸水生物学では、分類学的に多岐にわたる生物群を生態系の構成員として理解し、その全体像を捉えて行くことが原則である。湖沼に棲息する微小生物には、バクテリアをはじめ植物プランクトン、動物プランクトン、付着藻類、底生動物、貝類の幼生などがあり、これらの微小生物から水環境をみる場合、通常定住生活を営む微小生物(付着藻類、底生動物等)については各種の生態学的情報等の蓄積があり水質判定の指標¹⁻³⁾として用いることも一部可能となってきた。しかし、定住性のないプランクトンについては、各湖沼間における情報のばらつきも多く指標化が難しく、今までの湖沼における水環境は理化学的な水質調査結果を基にした水質評価が中心に論じられてきており、指標化に向けての研究が今後の課題となっている。

近年、各地の湖沼では水質汚濁に伴う富栄養化の進行により、特定のプランクトンの大増殖による様々な問題が頻発するようになった。このような場合は、いつ、どこに、どのような種がどの程度存在しているのかを、速やかに調査する必要がある。また、そのプランクトンが持つ特性や水環境に対する指標性、大増殖に至るまでの経緯等についても調査を行い、その問題に対応する手立てを講じるようにしなければならない。理化学的な調査結果はその時点における水質の情報であるのに対し、生物学的な調査結果はそれ以前の水質を反映したものと考えられることから、水環境をより正確に捉えるためには、理化学的な調査と生物学的な調査とを併せて実施し評価して行く必要がある。

琵琶湖では、近年、プランクトンの大増殖により「淡水赤潮」⁶⁻¹²⁾や「アオコ」⁴⁻⁵⁾また「カビ臭」¹³⁻¹⁴⁾といった諸問題が毎年のように発生している。加えて、これまでは注目されてこなかった「ピコ植物プランクトン」¹⁵⁻¹⁷⁾と呼ばれる $2\mu\text{m}$ 以下の微細な植物プランクトンについても、透明度が低下するまでに増殖する現象がみられるようになってきている。このように琵琶湖のプランクトン相は全般に渡って変化してきている。

滋賀県立衛生環境センターでは、琵琶湖全域の定期的な理化学的な水質調査を1966年から実施しており、また、生物学的調査であるプランクトン調査についても1974年から併せて実施している。

√000418

今回はこれらのデータを中心に紹介すると共に、問題となっているプランクトンからみた水環境についても触れてみたい。

2. 水質とプランクトン(図1: 定点)

植物プランクトンの変動要因には季節やその気象条件、プランクトン間の競争、湖水中の栄養塩濃度などが考えられる。ここでは、主に琵琶湖北部水域(今津沖中央表層)におけるクロロフィルa濃度(Chl-a)や栄養源となる硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、全窒素(T-N)および全リン(T-P)の変動について述べる。

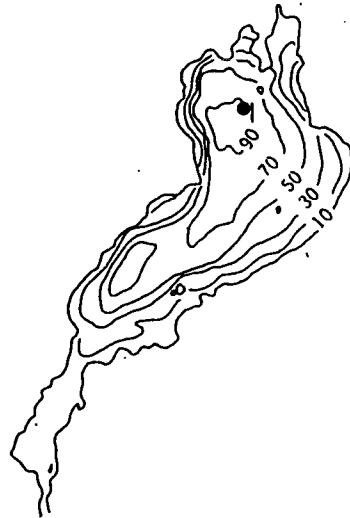


図1 調査地点(琵琶湖今津沖中央●)

(1) クロロフィルa濃度の変動(図2: Chl-a)

クロロフィルa濃度の年変動(1980~1995年)をみると、1980年~1982年までは春季~秋季にかけて $10\mu\text{g/l}$ 以上の大きな2つのピークが毎年認められた。6~7月のピークは淡水赤潮の原因となる黄色鞭毛藻や球形の緑藻等によるものであり、10~11月のピークは大型緑藻によるものであった。1986年~1987年の秋季にも大型緑藻の増加によるクロロフィルa濃度の増加が認められ、また、1992年にも大型緑藻のミカヅキが例年より多く増殖し、クロロフィルa濃度の増加(最高値で $18.4\mu\text{g/l}$)が認められた。

クロロフィルa濃度とプランクトン総細胞数との関係については、その変動が必ずしも一致しないことを我々は報告¹⁸⁾してきた。しかし、クロロフィルa濃度のピーク時のプランクトン優占種をみると、淡水赤潮の原因となる黄色鞭毛藻や大型の緑藻が優占種になっていることが多かった。また、経年的変

動は、年平均で見るとクロフィルa濃度もプランクトン総細胞数も近年徐々に減少する傾向が認められた。

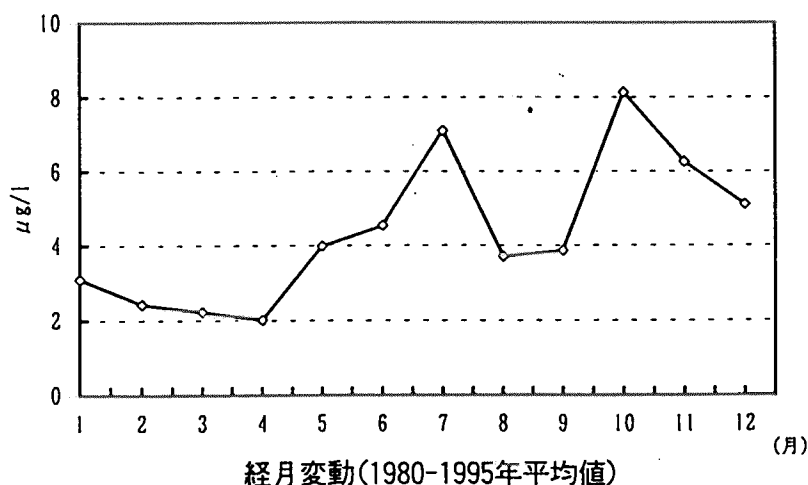
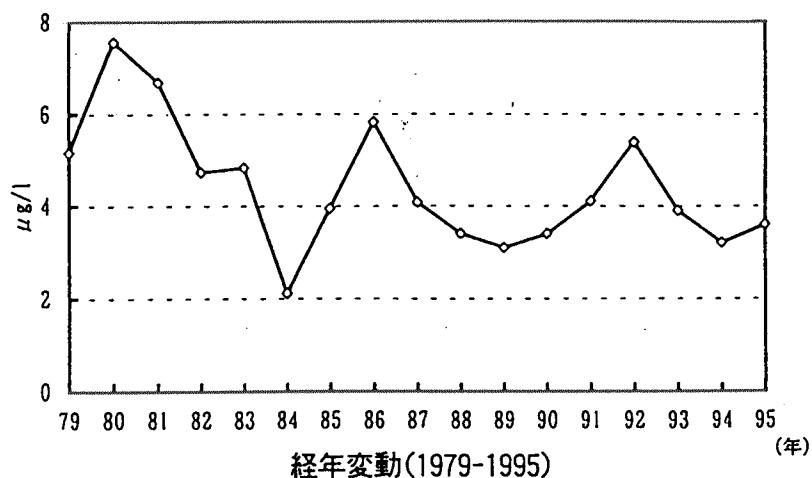


図2 クロロフィル-a濃度の変動(琵琶湖今津沖中央)

(2) 全窒素(T-N)および硝酸態窒素(NO₃-N)の変動 (図3.4: T-N, NO₃-N)

植物プランクトンの栄養素の一つである窒素の変動をみると、T-Nとしては冬季～春季に高濃度存在し、夏季に減少傾向を示し、秋季に再び増加する傾向を示した。1980年および1981年の6月の黄色鞭毛藻増加時には濃度上昇がみられた。NO₃-Nは冬季に多く存在するが、春季に入ると

植物プランクトンの増加等により消費され、夏季には表層部で枯渇する年も多く認められた。また、異常渇水のあった年(1984年、1994年)には早い時期に枯渇した。

NO₃-NもT-Nも1978~1981年にかけてはやや上昇傾向を示していたが、その後は減少または横ばいで推移していた。しかし、1990年以降は緩やかな上昇傾向が認められた。特にNO₃-Nについて増加傾向が顕著であった。

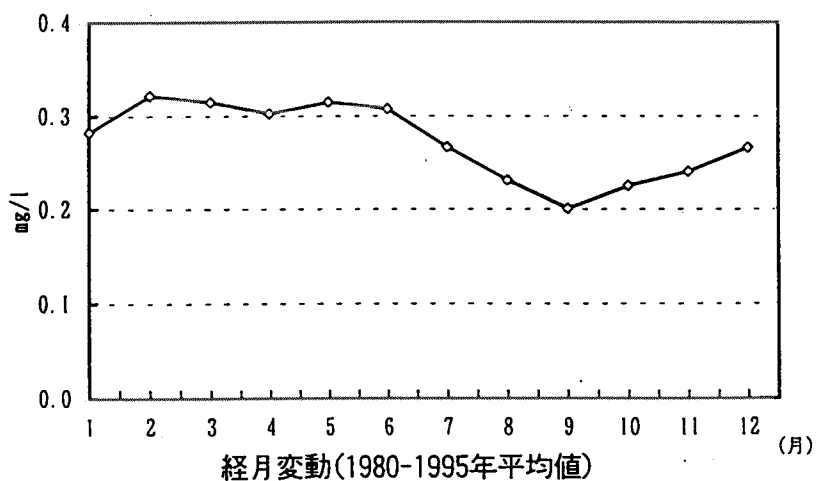
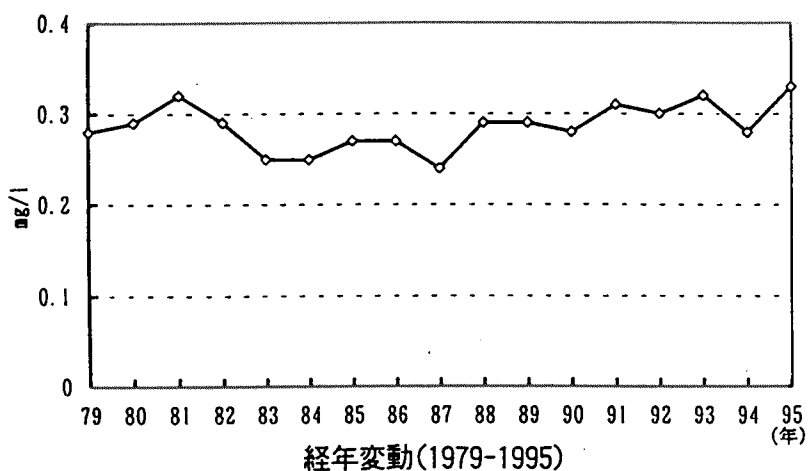


図3 総窒素(T-N)の変動(琵琶湖今津沖中央)

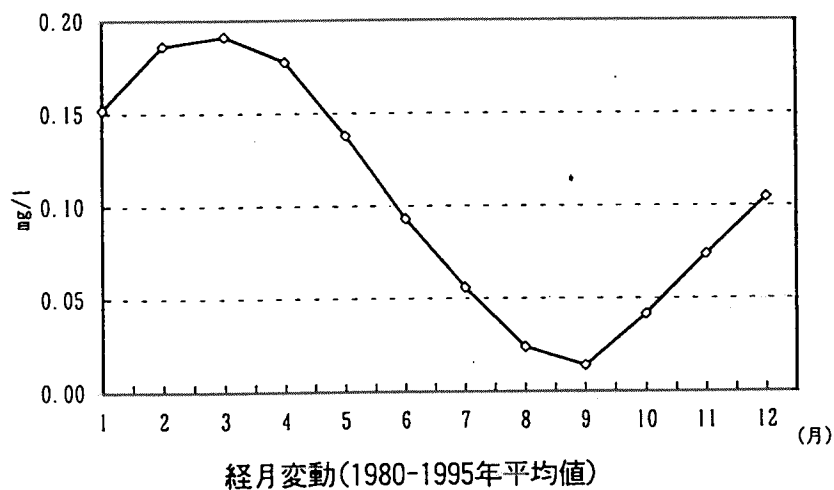
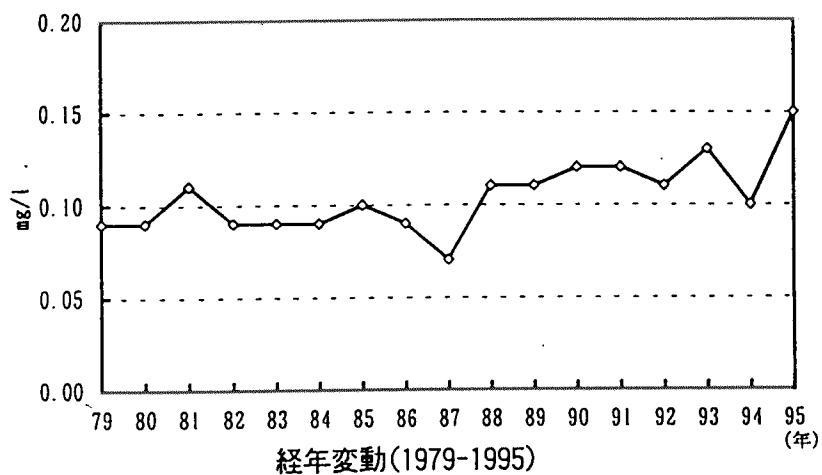


図4 硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)の変動(琵琶湖今津沖中央)

(3) 全リン(T-P)の変動 (図5 : T-P)

窒素とともに重要な栄養素であるリンについて、T-Pの季節変動(1980~1995年平均)をみると、1~4月までは0.006mg/l前後で推移し、その後5~7月には0.008mg/l以上にまで増加した。また、11月以降は減少し0.006mg/l以下となった。経年変動をみると、1979~1984年まで緩やかに減少傾向を示し、その後は、横ばいで1991年まで推移し、1992年以降は再び緩やかな減少傾向を示している。

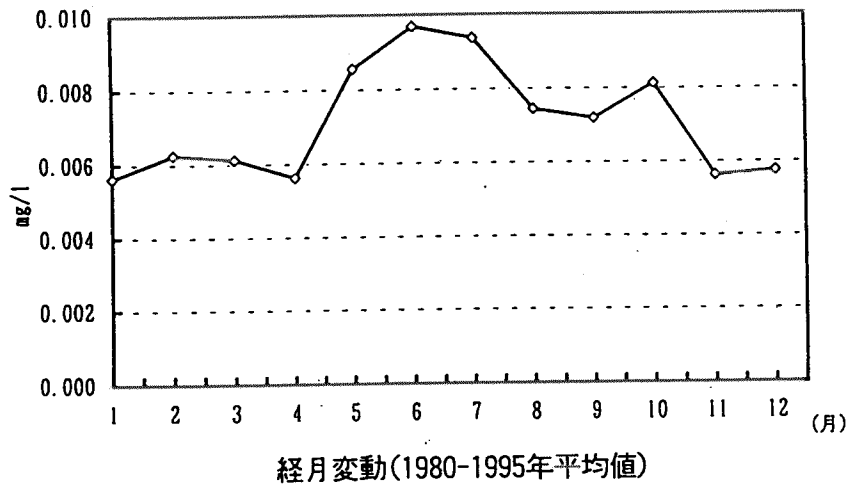
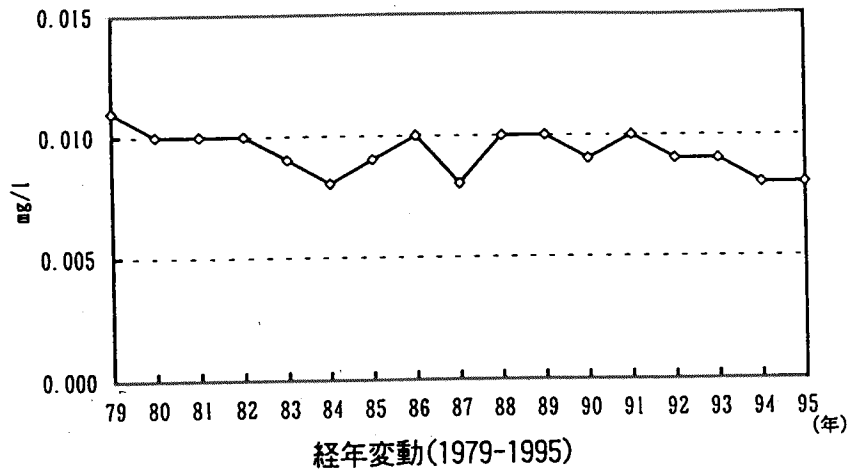


図5 総リン(T-P)の変動(琵琶湖今津沖中央)

(4) NP比(T-N/T-P) (図6: NP比)

1979~1995年のNP比(年間平均値)は、25:1~41:1の値で推移した。1990年までは30:1前後の値であったが、1991年以降、徐々に増加傾向を示し、1995年では40:1以上とその比率が大きくなってきている。また、経月変動をみると1~4月までは50:1以上の値と高かったが、6~10月には30:1にまで低下した。その後、11月以降は再び増加し40:1以上となった。

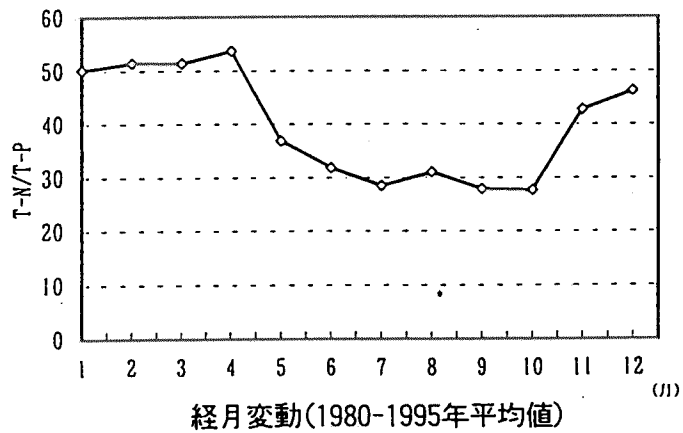
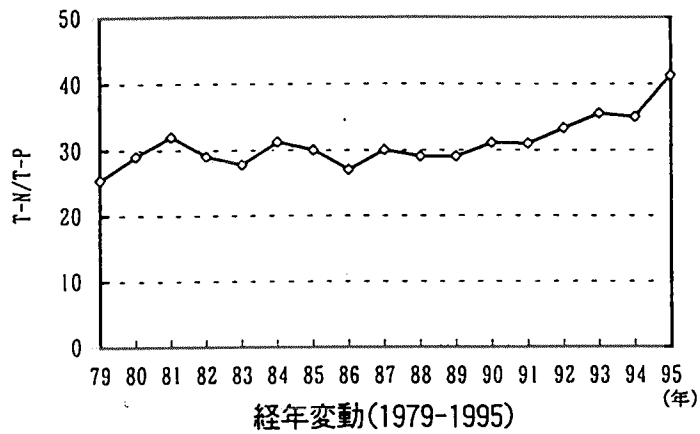


図6 NP比(T-N/T-P)の変化(琵琶湖今津沖中央)

3. 優占種(第1)からみたプランクトン相の変遷(図7.8: 優占種・総細胞数)

1978~1995年までの優占種(第1)の経年変化を大別すると、①季節毎に特定の種が優占した時期(1978~1985年)、②冬季(1~3月)から春季(4~6月)にかけては限られた種が周期的に出現したが、夏季(7~9月)以降は様々な種が早いサイクルで交代を行った時期(1986~1990年)、そして③春季の黄色鞭毛藻綱の増加は毎年みられたが、それ以外の季節は優占種が毎年異なり、その優占種の交代も早かった時期(1991~1995年)の3期間に分けられた。また、1985年以前の優占種に比べ、それ以降の優占種は大きく変化してきており、珪藻の*矽藻* *矽藻*は近年は全く優占種とならなくなった。

測定方法：直接計数による（1mlをプランクトン計数板で計数）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12月													
1978	MS	-	MS	-	FC	-	AFM	-	UA	-	UA	-	PL	PL	PL	PL	PL	PB	PB	PB	PB	PB	PB		
1979	CACA	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	UA	UA	UA	CA	CC	PL	OS	PB	PL	PL	PB	SD	PB	SC	FC		
1980	FC	MS	FC	MS	FC	MS	FC	MS	UA	UA	UA	OO	PL	AG	AG	FC	PB	PL	PL	PL	SD	CC	CC	FC	
1981	FC	FC	MS	MS	MS	MS	FC	MS	UA	UA	UA	PL	PL	PL	CC	SD	SD	PL	SD	SD	FC	FC	FC	PL	
1982	MS	OS	OS	MS	OS	-	MS	MS	UA	UA	UA	PL	PL	PL	PL	PL	SD	PL	PL	PL	PL	FC	PL	PL	PL
1983	MS	AFM	DP	MS	MS	AFM	AFM	CH	UA	UA	SP	PL	PL	PL	PL	CC	OO	OO	PL	PL	FC	-	PL	GV	
1984	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	MS	UA	UA	UA	PL	PL	PL	FC	FC	-	PL	PL	AG	CC	PB	PL	PL	PL
1985	OS	MS	PL	MS	MS	MS	MS	MS	UA	UA	UA	CA	PL	PL	PL	FC	COE	PL	PL	PB	PB	CP	PL	PL	
1986	SC	SC	CP	MS	CP	AFM	AFM	FC	UA	UA	UA	CA	CC	CC	CC	SD	SD	DS	SD	SD	SD	SD	SD	SD	
1987	SD	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	CR	UA	UA	UA	CC	CP	AG	AG	AG	PL	PL	SD	SD	SD	FC	FC	
1988	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	AFM	AFM	UA	UA	SJ	-	PL	PL	BO	GL	AG	AG	AG	AG	SC	SC	
1989	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC	AFM	UA	UA	AFM	CL	CL	BO	MC	DJ	DJ	SC	SC	FC	COS	COS	COS	
1990	CR	PR	COS	CR	AFM	AFM	FC	FC	CR	UA	UA	UA	CO	CO	BO	DI	CC	MT	SC	SC	FC	FC	BO	SC	
1991	SC	SC	SC	COS	AFM	AFM	AFM	FC	CR	UA	UA	UA	FC	FC	PL	PL	CC	PL	PB	SD	COS	FC	FC	CR	
1992	FC	CR	CR	CR	CR	FC	FC	FC	CR	UA	UA	UA	CA	CA	CA	CA	CC	CC	CC	CC	CO	FC	FC	CR	SC
1993	CACA	AFM	AFM	PB	FC	CR	CH	UA	UA	UA	UA	CA	SC	FC	PL	PL	GL	DP	AG	MC	CC	-	FC	COS	
1994	SC	FC	SC	FC	FC	CR	FC	FC	UA	UA	UA	UA	CA	CR	DP	FC	COS	COS	PL	SC	PL	PL	FC	FC	
1995	FC	CR	SD	SD	SD	OO	CR	UA	UA	UA	UA	FC	FC	UA	PL	GL	GL	CC	CC	PL	FC	FC	SD	SD	

- | | | |
|--|---|---|
| MS <i>Gomposphaeria lacustris</i> | SC <i>Stephanodiscus carconensis</i> | MT <i>Monoraphidium tortile</i> |
| FC <i>Chroococcus dispersus</i> | SD <i>Stephanodiscus car. v. pusilla</i> | MC <i>Monoraphidium contorta</i> |
| AG <i>Chroococcus dis. v. minor</i> | FC <i>Cyclotella sp.</i> | CH <i>Chlamydomonas sp.</i> |
| BO <i>Aphanothece clathrata</i> | FC <i>Fragilaria crotonensis</i> | AFM <i>Ankistrodesmus fal. v. mirabile</i> |
| CL <i>Botryosphaerella sp.</i> | AFM <i>Asterionella formosa</i> | PL <i>Planktosphaeria sp.</i> |
| UA <i>Uroglena americana</i> | FC <i>Peridinium berolinense</i> | PB <i>Pediastrum birae</i> |
| PR <i>Pseudokephyryon sp.</i> | CR <i>Cryptomonas sp.</i> | CC <i>Coelastrum cambricum</i> |
| CH <i>Chromulina sp.</i> | DP <i>Dictyosphaerium pulchellum</i> | CO <i>Coenochloris sp.</i> |
| CP <i>Chrysocapsa planctonica</i> | DS <i>Dictyosphaerium subsolitarium</i> | OS <i>Oocystis submarina</i> |
| CR <i>Chrysoamoeba radians</i> | DI <i>Dictyosphaerium sp.</i> | OO <i>Oocystis sp.</i> |
| MS <i>Nelosira solida</i> | SJ <i>Schroederia judayi</i> | COE <i>Coenocystis sp.</i> |
| MS <i>Nelosira italica</i> | DJ <i>Daetyosphaerium jurisii</i> | GL <i>Gloeocystis sp.</i> |
| MG <i>Nelosira granulata</i> | SP <i>Sphaerocystis sp.</i> | COS <i>Cosmocladium constrictum</i> |
| | GV <i>Gloeocystis vesiculosa</i> | CA <i>Glosterium aci. var. subpronum</i> |
| | | SD <i>Staurastrum dor. v. ornatum</i> |

図7 プランクトン優占種の経年変化(琵琶湖今津沖中央, 1978~1995年)

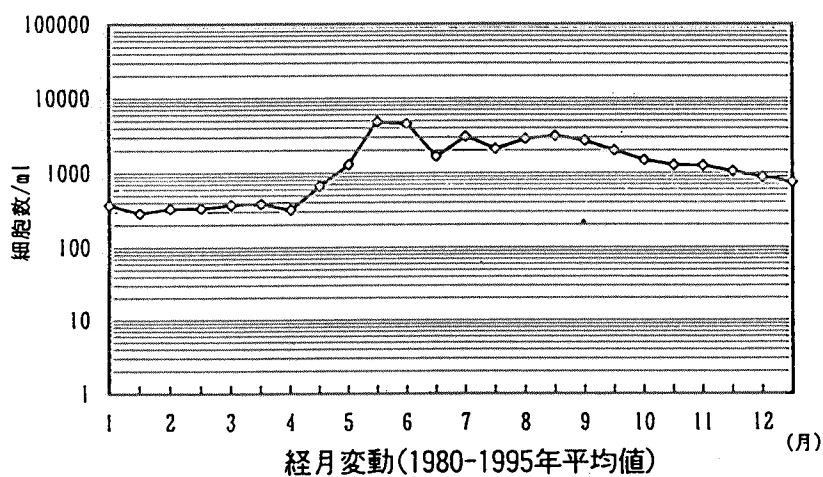
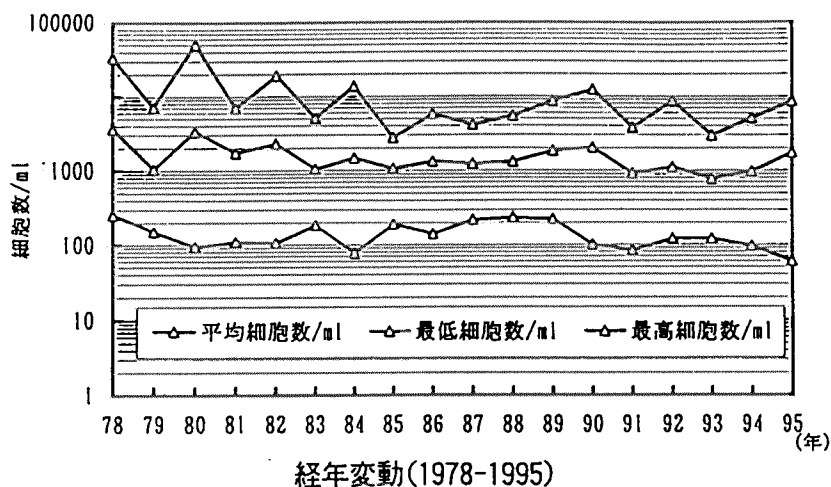


図8 植物プランクトン総細胞数の変動(琵琶湖今津沖中央)

4. 近年減少しているプランクトン (図9: ムシツリダ 経年変動)

琵琶湖古代の地層から現在の地層に至るまで大量に観察され、琵琶湖固有種としても報告¹⁹⁾されている珪藻のムシツリダは、1985年以前までは冬季に琵琶湖北湖全域に分布していたが、近年では激減してほとんど観察されなくなっている。

5. 近年増加しているプランクトン (図10: クリプトモナス 経年変動)

褐色鞭毛藻のクリプトモナスは1978年当時は、ほとんど観察されなかったが、近年徐々に増加傾向を

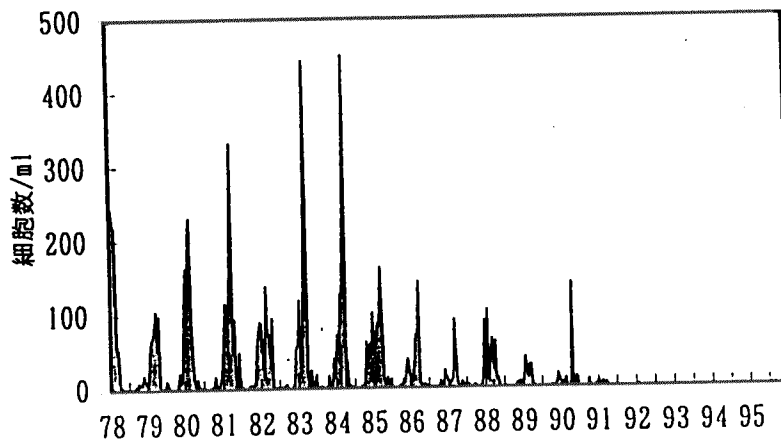


図9 メロシラ ソリダ(*Melosira solida*)の経年変動
(琵琶湖今津沖中央, 1978~1995年)

示している。褐色鞭毛藻に属する種類には、比較的富栄養化の進んだ水域で観察される種が多く今後の消長が注目される。

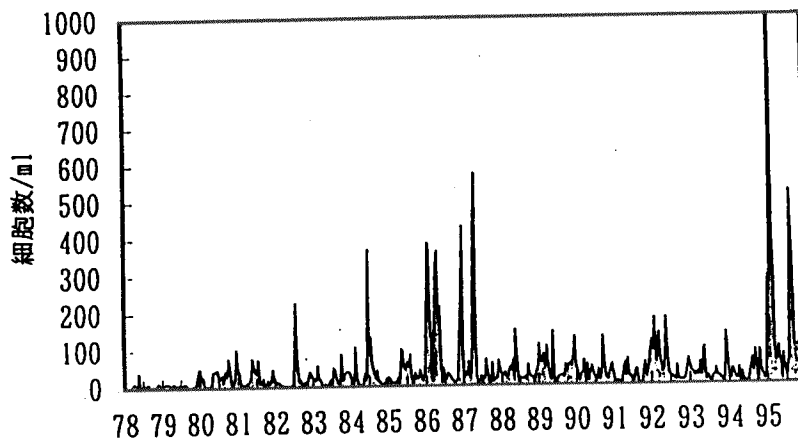


図10 クリプトモナス(*Cryptomonas* sp.)の経年変動
(琵琶湖今津沖中央, 1978~1995年)

6. 植物プランクトンの形態に基づく総体積量

植物プランクトン調査は多くの湖沼において実施されているが、その評価方法はプランクトンの大きさを考慮しない細胞数によるものが中心であり、大型も小型も1細胞として同等に評価しているのが現状である。このため正確な評価には、プランクトンの細胞体積から現存量を求める必要があると考えられた。琵琶湖に出現する主な植物プランクトン156種の平均細胞体積を求め²⁰⁻²³⁾現存量の推定を行った結果について紹介する。プランクトンの細胞体積を簡便に求めるために、形態をAタイプ:円

筒形, 楕円柱, Bタイプ: 球体, 楕円体, Cタイプ: 立方体, 直方体に分類し、顕微鏡による実測値や文献値を用いて平均細胞体積の近似値を求めた。

(1) 植物プランクトン現存量の変動(図11.12: 総細胞数・総細胞体積量)

1994年4月～1995年3月の測定結果について示す。植物プランクトン総細胞数は90～5,300細胞/mlで変動し、最も多かった5月後半にはウグイスが4,400細胞/ml計数され、全体の83%を占めていた。しかし、総細胞体積量で見ると32%程度と少なかった。また、6月後半では、ロードモスが210細胞/ml計数され、全体の44%を占め優占種となったが、この時は体積量の大きいミカヅキが160細胞/ml計数(33%)されており、総細胞体積量としてはこの種が全体の76%を占めており、優占種となっていたロードモスは僅か1.2%であった。また、11月前半にも同様のことが認められた。このように従来行われてきた細胞数のみの調査では、小型のプランクトンの現存量が大きく評価され、大型のプランクトンの変動が見逃される可能性がある。しかし、今回求めた平均細胞体積量を使用することによりそれを防ぐことができることが示唆された。

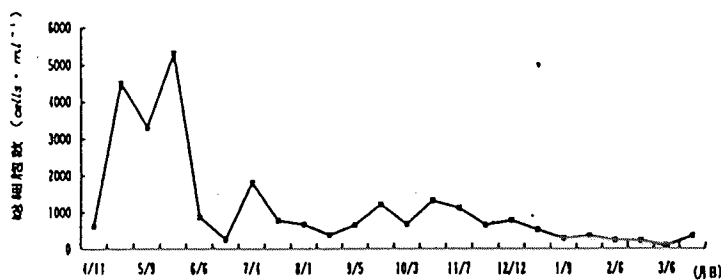


図 1.1 植物プランクトン総細胞数の変動(琵琶湖今津沖中央)
(*Synechococcus* sp. を除く, 1994-1995年)

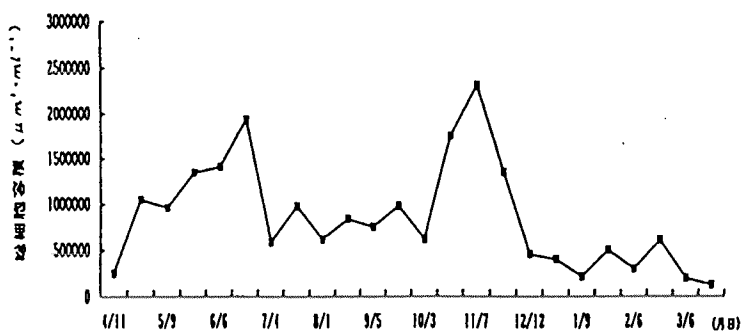


図 1.2 植物プランクトン総細胞体積量の変動
(琵琶湖今津沖中央, 1994-1995年)

(2) クロフィル a 濃度と植物プランクトン現存量(図13:クロフィルa濃度)

調査期間中のクロフィルa濃度は、1.1~7.3 $\mu\text{g}/\text{l}$ で変動し、その平均値は2.9 $\mu\text{g}/\text{l}$ であった。春季に2度、秋季に1度の大きなピークが認められたが総細胞数の変動とはあまり一致しなかった。しかし、総細胞体積量からみたプランクトン現存量の変動とは一致する傾向が認められた。

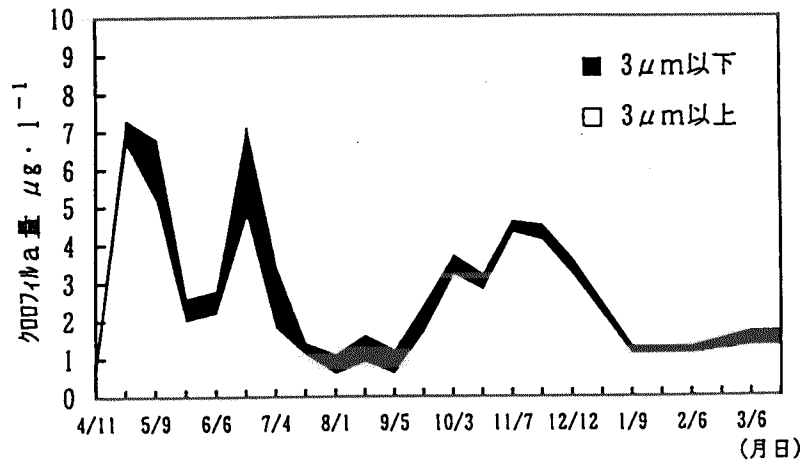


図13 クロロフィル-a濃度の変動(琵琶湖今津沖中央, 1994-1995年)

7. プランクトンの異常発生

淡水域におけるプランクトンの異常発生は、わが国では古くから知られており²⁴⁻²⁵⁾水の華と呼ばれるが、中でも黄色鞭毛藻や珪藻、渦鞭毛藻、ミドリムシ藻が大量に増殖した場合には、その水域が黄褐色、茶褐色、赤褐色、赤色等の水色を呈し、海域での赤潮とその現象が類似しているため淡水赤潮と呼ばれるようになった。また、浮上性の藍藻(偽空胞を有するもの)が増殖した場合は、水面が緑色の粉を散らしたような状態となったり、緑のペンキを流したような状態となることからアオコと呼ばれている。琵琶湖では黄色鞭毛藻による淡水赤潮やアオコがみられる。

(1) 淡水赤潮からみた水環境

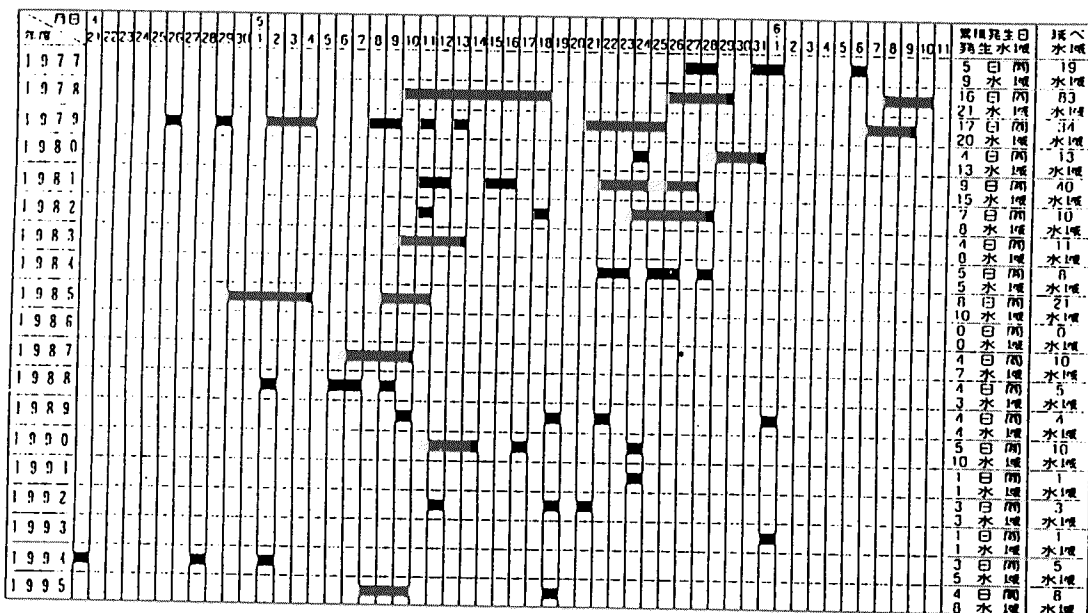
琵琶湖における最初の広範囲にわたる淡水赤潮の発生は、1977年5月であり、琵琶湖中央部や西岸部を中心に発生した。以降、1986年を除き、毎年春季(4~6月)に発生⁷⁻¹²⁾している。原因となる *Uroglena americana*(以下「ウグレナ」という)は、2本の不等長の鞭毛を持ったウリ状の細胞(長さ約8 μm)が、コルムのような球状の群体の表面に配列し、その群体はゆっくり回転しながら移動する。群体の直径は50~500 μm 程度であり、時には単細胞で遊泳しているものもある。発生水域では、湖水は茶褐色を呈し、採水して肉眼でもウグレナ群体が動いているの

が油滴状の点として確認できる。

① 淡水赤潮の変動 (表1: 淡水赤潮発生概要)

ウグケの経月変動をみると、1~3月まではほとんど増加が認められなかったが、4月から徐々に増加が始まり、5月に入ると10~50群体/mlまで増加した。その後、5月中旬から下旬にかけて、多くの地点で100群体/ml以上にまで増加し、この状態が数日間続くと表層付近に集積し淡水赤潮を形成した。6月からは全域で減少傾向を示し、7月ではほとんどの地点で観察されなくなった。

表1 琵琶湖における淡水赤潮発生の経年変化(1977-1995年)



② ウグケの水平分布 (図14: ウグケ分布)

琵琶湖のウグケの水平分布は、各年ともに多少の違いがあるものの、琵琶湖全水域で増加することが認められた。まず、南湖の南部水域で増加が起こり、水温の上昇とともに南湖全域に広がり、その後北湖の南部水域から北部水域へと徐々に広がっていくパターンを示した。

③ ウグケの鉛直分布 (図15: 淡水赤潮発生機構)

淡水赤潮を形成するプランクトンには走光性を有するものが多い。ウグケも走光性があり、日周的な鉛直移動を行っていることも明らかとなっている²⁶⁾。また、北湖における経日的なウグケの鉛直分布は、大きく3期に分けられることを吉田らが報告²⁶⁾している。第1期は、ウグケの増加初期や、増加中の荒天時に起こる現象で、群体数は比較的少なく上下層でほぼ均等に分布するパターンである。湖流や風などにより表層水が移動しても着色現象は全く起こら

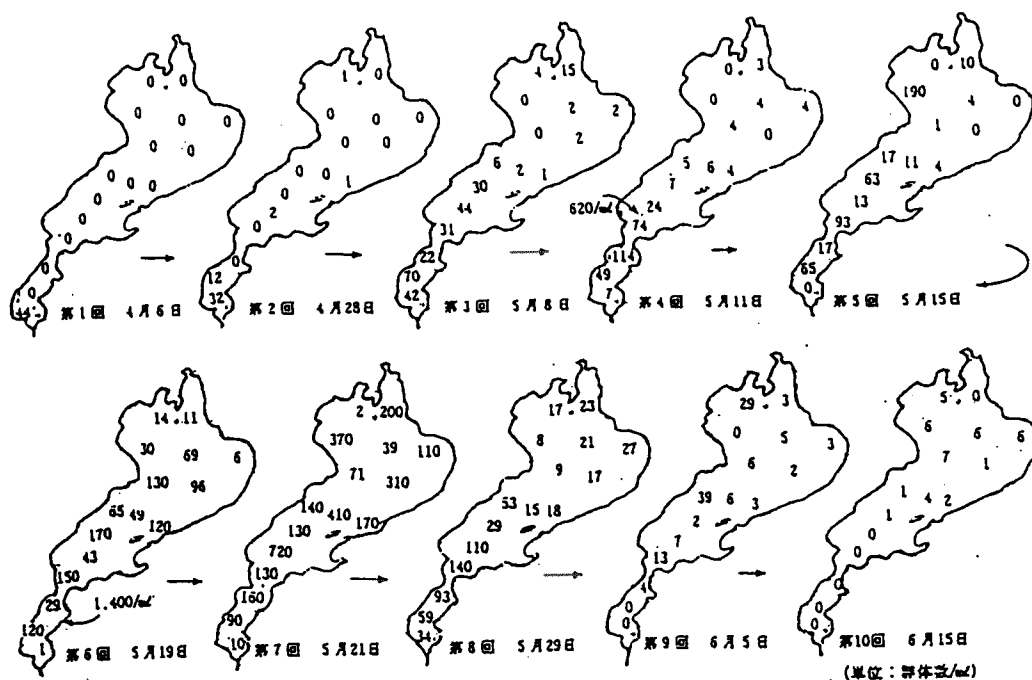


図14 ウログレナ(*Uroglena americana*)水平分布の経日変化(琵琶湖, 1992年)

ない。第2期は、風の穏やかな晴天が続いた後に起こりやすく、表層部より水深2~5m層に顕著なピークを示すパターンである。これは淡水赤潮発生の前兆ないし初期現象で、発生水域ではどんよりと黒茶褐色を呈することが多い。第3期は、第2期が数日間続いた後の発生中によく観察されるもので、ウグケの群体数は表層部に最も多く分布し、発生水域は赤褐色から茶褐色を呈することが多く、生ぐさ臭が感じられる。なお、この時期水深10m以深ではウグケは非常に少ない。

④ 淡水赤潮発生時期のプランクトン相と水質

淡水赤潮の発生前は、冬季の比較的低い水温を好む珪藻や黄色鞭毛藻、褐色鞭毛藻が多く観察された。特に1990年の調査ではホシガクイワが3月~4月にかけて5,000~17,000細胞/mlと大増加を示していたが、ウグケが増加してくると、その他の植物プランクトンは減少した。また、発生後にはプランクトン相は急変し、発生前に見られなかった藍藻や珪藻、緑藻など多くの種類が観察された。このことから、ウグケの異常増殖は、冬季の環境条件を好むプランクトン相から夏季の条件を好むプランクトン相へ移行する季節の変わり目で起こることが推察された。

この時期の栄養塩類は、琵琶湖北湖平均(1980~1995年5月の平均値)でみると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は0.15mg/l、T-N 0.36mg/l、T-Pで0.013mg/lの値であり、 KNO_3 濃度は5.9 $\mu\text{g/l}$ であった。また、この時期の気象条件(彦根地方気象台の気象月報:1980~1995年5月の平均値)は、平均気

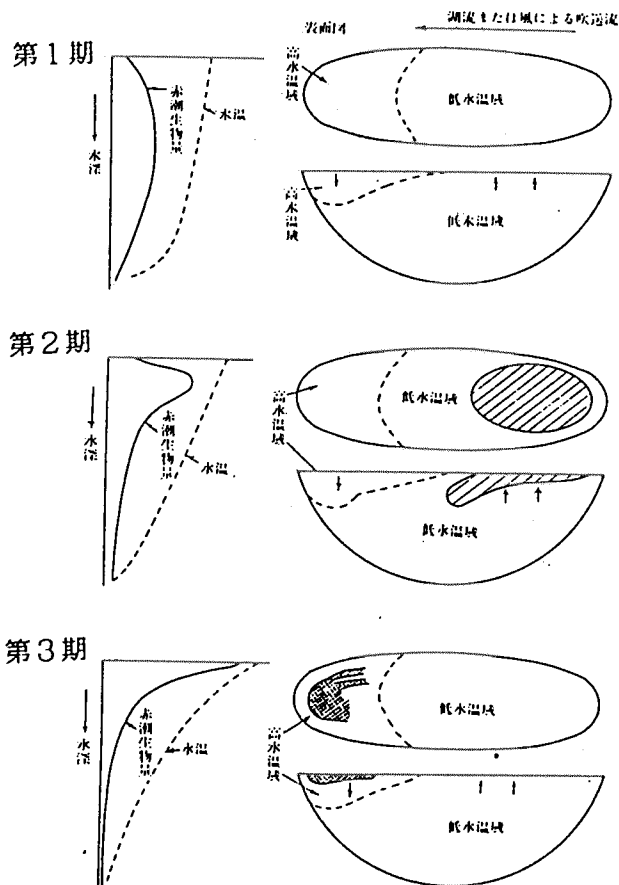


図15 水温および赤潮生物量の鉛直分布と湖流または風による表層高水温域
または表層低水温域の形成と赤潮生物集積域の形成との関係模式図
 (吉田, 1980年)

▨, ▩: 赤潮発生源, |: 湧昇域, |: 沈降域

温 16.8℃、日照時間 202時間/月、降水量は155mm/月であった。

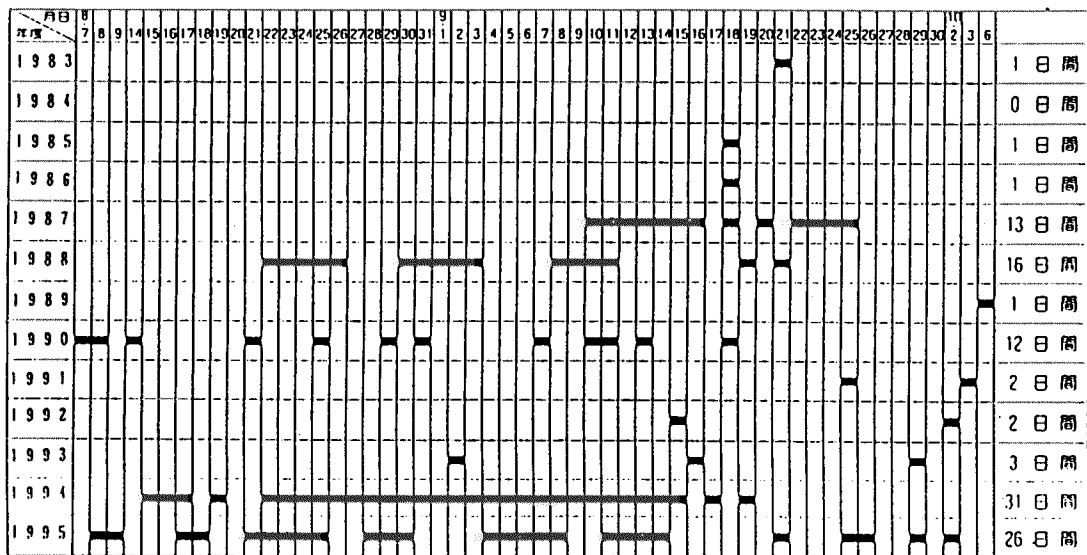
(2) アオコ (水の華) からみた水環境

湖沼の富栄養化が進行すると一部の藍藻が大量に増殖し、水の華 (以下「アオコ」という) を形成することがある。この発生水域では湖水表面にプランクトンが薄膜状あるいは、塊状に浮遊、集積するため、緑色のペンキを流したような状態となり、美観を著しく損ない、特異な臭気を放つことも多い。また、飲用水として利用する場合、浄水処理障害や異臭味障害、またミクロキスティス属等については毒性も憂慮されている²⁷⁾。琵琶湖で観察される藍藻はこれまでに14属34種が報告⁴⁾されている。この中で細胞内に偽空胞(ガス胞)を有しアオコを形成するのはアノキナ属とミクロキスティス属およびオシロトリア属に属する7種であった。

① アオコの変動(表2, 図16: アオコ発生概要・経日変動)

琵琶湖で初めてこの現象が認められたのは1983年9月であり、南湖南部水域の湖岸部であった。この時の主要構成種は、Anabaena属(以下「アハナ」と呼ぶ)とMicrocystis属(以下「ミクロキスティス」と呼ぶ)であった。アオコを形成するプランクトンは、1965年前後から琵琶湖で少数認められるようになった事が報告²⁸⁾されているが、1985年の調査ではアハナについては南湖20地点中16地点で2,000群体/ml以上と非常に多い群体数を計数し、ミクロキスティスについてもこの時期、全域で観察された。また、1993年以前のアオコの発生は、南湖沿岸部に限られていたが、1994年および1995年については北湖の一部の港内や河口部においてもアオコが確認された。当所で行った南湖調査結果(1985年)をみると、アハナは7月までほとんど観察されなかったが、8月に入ると南部水域で観察されはじめ、8月下旬には南湖全域で増加し、9月上旬には多くの地点で2,000群体/ml以上を計数した。また、9月18日には、この種を中心とするアオコが南湖湖岸部で確認された。9月下旬には水温の低下とともに急激な減少傾向を呈し、10月以降は、ほとんどの地点で計数されなくなった。ミクロキスティスは、アハナの増加より約半月遅い9月上旬からみられ、9月中旬には南湖全域で計数された。しかし、その総群体数についてはアハナの1/10以下と少なかった。ミクロキスティスはアハナが消滅した10月中旬に入ってから消滅せず、少数ではあるが南部水域で観察された。

表2 琵琶湖における水の華(アオコ)発生の経年変化(1983-1995年)



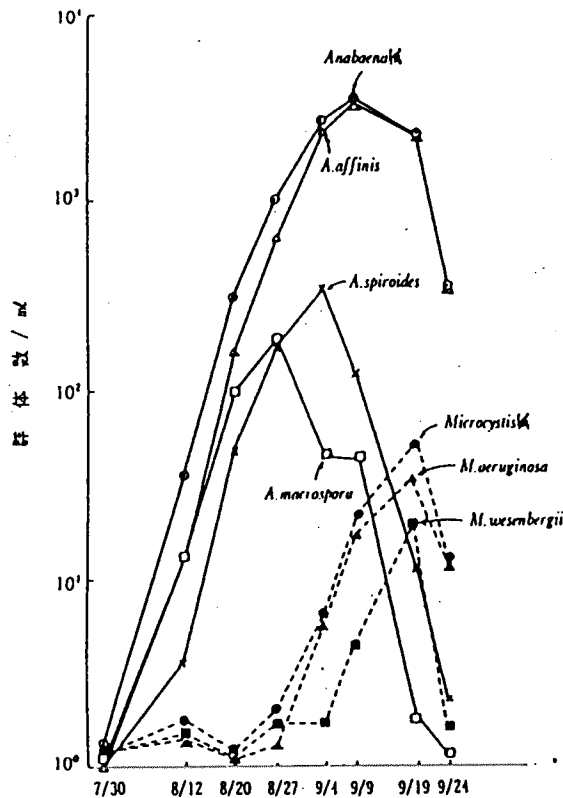


図16 アオコ形成藍藻種の総群体数経日変化(琵琶湖南湖平均, 1985年)

② アオコの平面分布(図17:アオコ平面分布)

アオコを形成するプランクトンの数は、北湖より南湖で多く、また、南湖でも西岸部より東岸部で多い。当所で1985年に行った藍藻の地点別分布調査を例にみると、北湖との境界に近い南湖北部では、藍藻の総群体数が160群体/mlと他の地点と比較して非常に少なく推移しているため、北湖からの藍藻の流入はほとんどなく、発生源は南湖であると考えられた。また赤野井湾については、30,000群体/mlと他の地点よりはるかに多く、また他のプランクトン相についても違いがみられた。これは、この水域が南湖でも水深が浅い湾内の閉鎖性水域に属し、理化学的な水質調査結果⁴⁾をみても他の地点より富栄養化指標項目が高いことおよび湖水が長時間滞留することによると考えられた。アオコが形成された水域および藍藻が特に多く観察された水域を見ると、比較的湖流の影響を受けにくい湖岸の吹きだまり、および湖水が滞留する内湾の一部水域であることが確認された。このことから、南湖内で増加したアナバネやマイクロキスティスが各細胞の持つガス胞等の作用により、湖水の表面に浮上し、これが湖流および風等の物理的な要因によって集積されるためにアオコを形成するものと推察された。

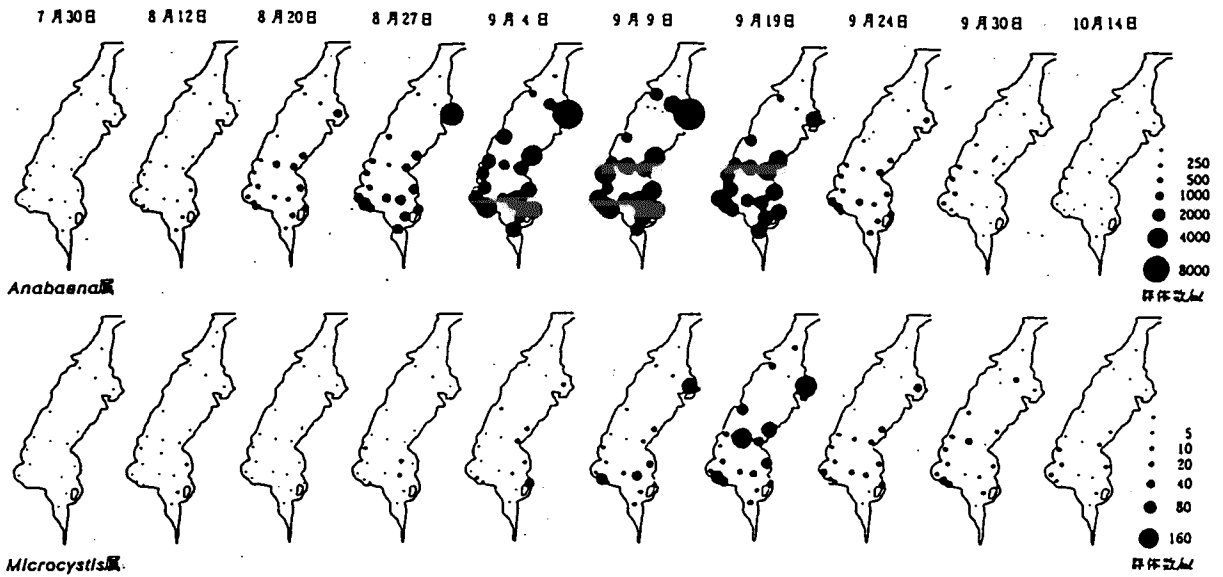


図17 *Anabaena*属および *Microcystis*属の水平分布の経日変化(琵琶湖南湖, 1985年)

③ アオコの鉛直分布 (表3: アオコ鉛直)

浮上性藍藻の増殖期間中における水深別調査結果(1987年)では、0~4mの水深では *Anabaena* や *シロキスチス* の上下層の差は少なく(採水時間10~11時)上層部に特に集積しているような傾向は認められなかった。しかし、湖岸部のアオコ現象が認められた水域では、表層部(水深 0~2 cm)で58,000群体/mlと非常に多くの *シロキスチス* を計数した。しかし、それ以深では表層部の約20分の1(2,800群体/ml)にまで減少しており、アオコの集積は表層部でのみで起こることが推察された。

表3 琵琶湖における水の華(アオコ)発生時の集積事例

膳所浄水場~膳所公園の湖岸(1987年9月25日午前11時採水)

水深(cm)	0~2	2~10	10~30
<i>Anabaena affinis</i>	0	10	0
<i>Anabaena spiroides</i>	40	40	0
<i>Anabaena macrospora</i>	10	0	0
<i>Microcystis wesenbergii</i>	2,400	140	140
<i>Microcystis aeruginosa</i>	58,000	2,800	2,400
<i>Microcystis sp.</i>	200	100	40
<i>Oscillatoria tenuis</i>	10	0	0
	60,660	3,090	2,580

④ アオコ増殖時期のプランクトン相と水質(図18)

アオコ増殖以前のプランクトン相は、珪藻や緑藻などの種が多く観察された。しかし、原因となるプランクトンの増加が始まると、他のプランクトンは減少する傾向が認められた。また、アオコ増殖後のプランクトン相は、増殖前と同様に珪藻や緑藻が多かったが、その出現種がかなり異なっていた。また、種類数についても藍藻の増加時には減少する傾向が認められ、アオコ形成プランクトンが他の植物プランクトン相にかなり影響を及ぼしていることが推察された。

アオコの原因プランクトンがよく増殖する水域の栄養塩類濃度は、琵琶湖南湖東岸部の赤野井湾平均(1983~1995年9,10月の平均値)でみると、NO₃-Nで0.11mg/l、T-Nで0.70mg/l、T-Pで0.073mg/lの値であり、クロロフィルa濃度は44μg/lと高かった。また、この時期(9~10月)の気象条件(彦根地方気象台気象月報:1983~1995年9,10月の平均値)は平均気温、19.9℃、日照時間、157時間/月、降水量は140mm/月であった。

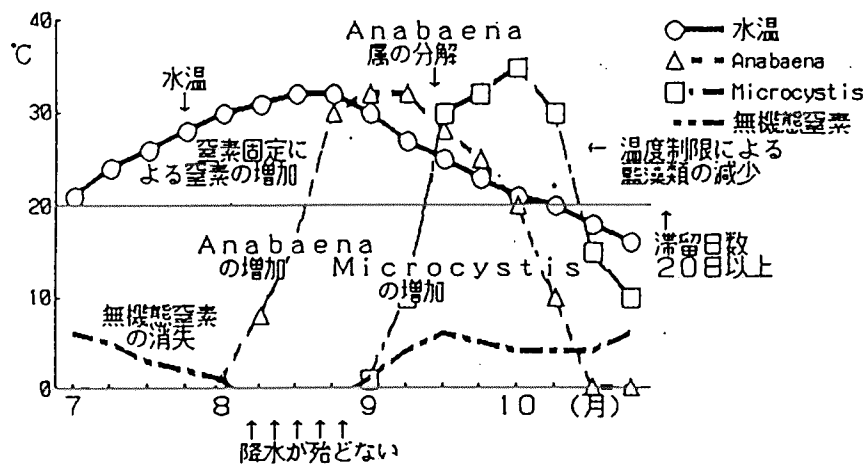


図18 琵琶湖南湖における水の華(アオコ)の発生機構

(3) ピコ植物プランクトンからみた水環境

琵琶湖北湖中央部の夏季の透明度は、通常5m前後であるが、1989年7月では2.5~3mまで低下していた。また、植物プランクトン数(10μm以上)が非常に少ないにもかかわらずクロロフィルa濃度が増加するという現象も認められた。この湖水を落射蛍光顕微鏡および走査型電子顕微鏡を用いて観察した結果、大きさが約1μm程度の植物プランクトン(以下「ピコプランクトン」という)が100万細胞/ml以上も計数され、それらの原因と判明した。以後、ピコプランクトンについて調査を行うこととなった。

① ピコプランクトンの経月変動(図19:ピコプランクトン経月変動)

琵琶湖におけるピコプランクトン数は、年間を通して1000細胞/ml以上存在し、最高値は1989年7月3日の知内川沖中央で4,600,000細胞/mlであった。1990年以後はピコプランクトンの年間最高値は、この値より低く推移した。季節的な消長をみると、年によって変動はあるものの、規則正しいパターンをくり返していた。すなわち冬季は1000~10000細胞/mlと少なく、5月から増加が始まり、6月末~7月に1,000,000細胞/ml程度にまで達し、それ以降は減少していた。

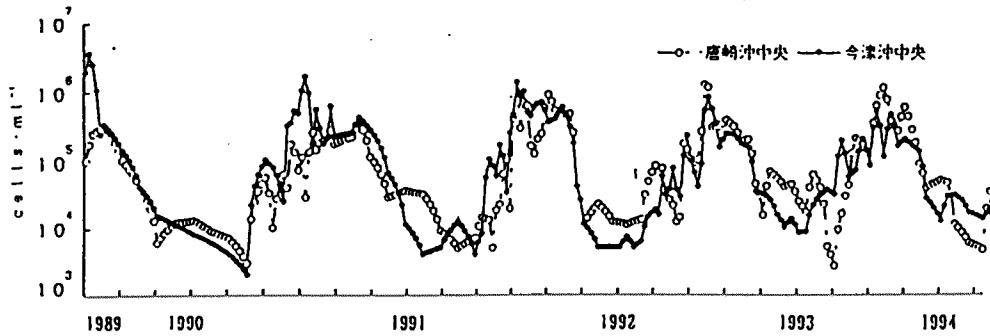


図19 ピコプランクトン総細胞数の経日変動(琵琶湖, 1989-1994年)

② ピコプランクトンの平面分布 (図20: ピコプランクトン平面分布)

琵琶湖におけるピコプランクトンは年間を通して平面的には比較的均一に分布していた。ピコプランクトンは、ウグケ等とは異なり一部水域に集積するようなことはなく、増加は全域で同時に起こった。傾向としては、北湖北部で多く南湖では比較的少なかった。

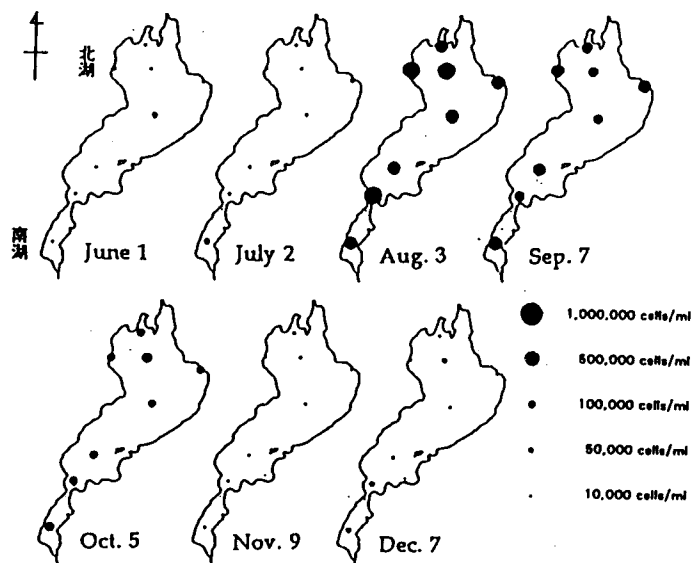


図20 ピコプランクトン水平分布の経日変動(琵琶湖, 1992年)

③ ピコプランクトンの鉛直分布 (図21:ピコプランクトン鉛直分布)

ピコプランクトンは、水温の成層期には表層～15m層に多く分布し、循環期には底部まで一様に分布した。最大増殖時の鉛直分布は、表層部(100%)に比べ5m層(130%)や10m層(150%)に多く存在し、30m層では、表層の約10分の1程度であり、深水層(60m層)においても少ないが存在した。

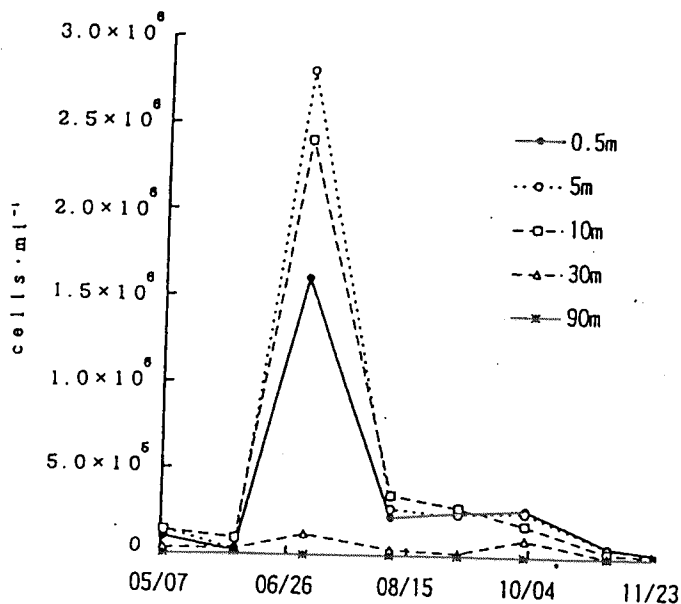


図21 ピコプランクトンの鉛直分布(琵琶湖今津沖中央, 1990年)

④ ピコプランクトン増加時の生物相

ピコプランクトンの増加時に10μm以上のプランクトン相をみると、植物プランクトンや小型の繊毛虫類および輪虫類等が減少傾向を示した。しかし、一部の繊毛虫はピコプランクトンの増殖と同時期に増加傾向を示した。1992年6～7月には琵琶湖全域で大型緑藻のミカヅキが増加(1000細胞/ml以上)し、この時期にピコプランクトン数の減少がみられた。これらのことから、ピコプランクトンの異常増殖には、他のプランクトンの消長も大きく関連している事が示唆された。

ピコプランクトン増殖のピークとなった7月の栄養塩類の状況を見ると、琵琶湖北湖平均(1989～1995年7月の平均値)でみると、NO₃-Nで0.06mg/l、T-Nで0.29mg/l、T-Pで0.013mg/l、また、クロロフィルa濃度は6.0μg/lと南湖や赤野井港内に比べ低かった。なお、この時期の気象条件(彦根地方気象台7月気象月報:1989～1995年の平均値)は平均気温25.5℃、日照時間、162時間/月、降水量は178mm/月であった。

8. 藻類潜在生産力調査 (図22: ミクロシステリスAGP結果)

琵琶湖の富栄養化を評価するためのAGP (Algal Growth Potential) 試験を南湖と北湖の中央部の湖水を試水として実施している。この調査は試水を使用して培養液を作成し、藻類の培養を行い、その増殖特性により試水の藻類生産の潜在力を様々な角度から分析し、湖沼の富栄養化の現状や増殖を制限している栄養塩の推定や流入水が湖沼に与える影響などの把握を行うものである。

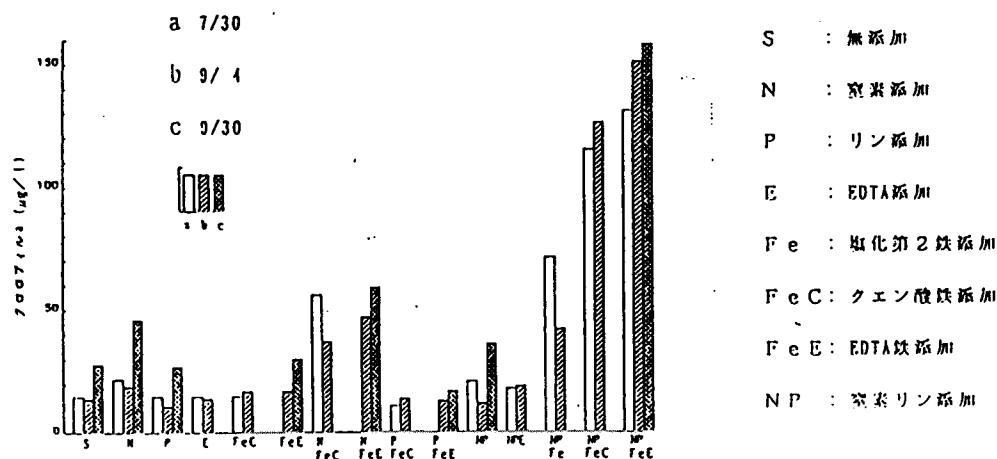


図22 Microcystisを用いたAGP試験(琵琶湖南湖, 1985年: 例)

9. カビ臭調査 (表4: カビ臭原因プランクトン)

湖沼のカビ臭についての最初の報告は、1951年に神戸市千刈貯水池からであり、琵琶湖では1969年に南湖で最初に増殖したことが報告¹³⁾がされている。しかし、北湖からの事例は現在のところ報告されていない(カゲケによる「なまぐさ臭」については発生している)。

カビ臭発生の原因生物としては藍藻および放線菌が考えられるが、琵琶湖では藍藻による報告事例が多い。現在までに琵琶湖南湖でカビ臭の原因生物として報告されているプランクトンは表4に示したアハナやオシロリア、フォルミテウムなどであり、それらが生成する臭気物質にはジオスミン(Geosmin)と2-メチル-イソボルネオール(2MIB)の2種類がある。

おわりに

湖沼における水環境がプランクトン相からみて、将来どのように変化して行くのかは簡単には予察はできない。しかし、湖沼はプランクトンの異常発生や、カビ臭等の発生、プランクトン種の盛衰等を通して水質の異常を私達に訴えかけているようにも思われる。湖沼に棲息する細菌やプロプランクトン

表4 琵琶湖におけるカビ臭発生プランクトン

藍藻の種類	生成臭気物質	発生時期
* <i>Anabaena macrospora</i>	ジオスミン (Geosmin)	8-9月
* <i>Anabaena spiroides</i>	ジオスミン (Geosmin)	8-9月
* <i>Oscillatoria tenuis</i>	2メチルイソボルネオール (2MIB)	8-10月
* <i>Phormidium tenue</i>	2メチルイソボルネオール (2MIB)	5-10月

などの小型のプランクトンから、ジノ類などの大型のものまで、その種類と現存量を絶えず調査し、理化学的な水質調査結果や魚類等のデータと併せて検討し、より総合的に水環境を捉える試みを続けて行く必要があると考える。今後も、これまでに培った基礎資料を基に、琵琶湖の水質汚濁の評価や、淡水赤潮、アオコ、カビ臭などの発生予測等についてもさらに検討を深め、湖沼生態系の保全に役立てて行きたいと考える。

参考文献

- 1) 鈴木 實:淡水指標生物図鑑, 北隆館 (1991)
- 2) 日本生態学会環境問題専門委員会編:環境と生物指標2 (1975)
- 3) 日本水道協会:上水試験法1985:59-146(1985)
- 4) 滋賀県立衛生環境センター:琵琶湖における「水の華」に関する調査報告書 (昭和59年~61年)
- 5) 一瀬 論, 若林徹哉:琵琶湖における「アオコ」モニタリング調査, 滋賀衛環セ所報, 22,103-118(1987)
- 6) 若林徹哉:1977年に琵琶湖で発生した赤潮について, 滋賀衛環セ所報,13,163-164(1977)
- 7) 一瀬 論, 若林徹哉:1978年に琵琶湖で発生した赤潮の分布について, 滋賀衛環セ所報, 14,141-145(1978)
- 8) 一瀬 論, 若林徹哉:1979年に琵琶湖で発生した赤潮の分布と琵琶湖文化館沖および瀬田川流心より採水したプランクトンの隔日調査について, 滋賀衛環セ所報,15,150-158(1979)
- 9) 一瀬 論, 若林徹哉:琵琶湖で発生した淡水赤潮の分布について-1980~1983-, 滋賀衛

- 環セ所報,19,126-135(1984)
- 10) 一瀬 論,若林徹哉:琵琶湖で発生した「淡水赤潮」の分布について-1984~1986-,
滋賀衛環セ所報,21,167-174(1986)
 - 11) 一瀬 論,若林徹哉:琵琶湖で発生した「淡水赤潮」の分布について-1987~1989-,
滋賀衛環セ所報,24, 59-67(1989)
 - 12) 一瀬 論,若林徹哉:琵琶湖における「淡水赤潮」の発生状況およびその原因プランクトンに
ついて-1990-1993, 滋賀衛環セ所報,28, 118-130(1993)
 - 13) 淀川水質汚濁防止連絡協議会琵琶湖異臭調査小委員会:琵琶湖異臭調査10年史-琵琶湖の
かび臭-, 7-33(1988)
 - 14) 根来 健、西川光春、岡山治一、安藤政義:Oscillatoria tenuisによる琵琶湖南湖の
カビ臭, 用水と廃水, 29(7), 3-9,(1987)
 - 15) 一瀬 論,若林徹哉、山中 直et al:琵琶湖におけるヒコプランクトンについて, 日本陸水学会
第56回大会(1991),
 - 16) 一瀬 論、田中勝美、園 正、et al: ヒコプランクトンの異常発生, 日本水産学会,61(6)
932-933(1994)
 - 17) 高村典子、石川 靖、三上英敏et al:日本の湖沼34水域の栄養塩レベルと細菌, ヒコ植物プ
ランクトン, 鞭毛藻(虫)および繊毛虫の密度の関係, Japan, J. Limnol., 57, 3, 245-259(1996)
 - 18) 一瀬 論,若林哲哉, 松岡泰倫et al:琵琶湖の植物プランクトンの形態に基ずく生物量の簡
易推定について, 滋賀衛環セ所報,30,27-35(1995)
 - 19) 根来健一郎:植物プランクトン, 滋賀県植物誌, 275-330,(1968)
 - 20) 宮井 博et al:Bulletin of Plankton Society of Japan,35,(1980-1989)
 - 21) 今村典子et al:国立公害研究所研究報告,第22号(R-22-'81),123-148 (1981)
 - 22) 廣瀬弘幸, 山岸高旺:日本淡水藻図鑑, 内田老鶴圃新社 ,(1977)
 - 23) Hustedt:Bacillariophyta in Susswasser Flora A.Pasher(ed) Gustav Fihcer(1950)
 - 24) 赤潮研究会編:赤潮に関する近年の知見と研究の問題点,石崎書店,
 - 25) 岡市友利:赤潮の研究史, 赤潮の科学, 恒星社厚生閣, 9-28(1987)
 - 26) 門田 元:淡水赤潮, 琵琶湖における淡水赤潮の発生, 恒星社厚生閣,171-246(1987)
 - 27) 村岡浩爾, 渡辺 信 :有毒アオコ870253その研究の必要性一,水,9,18-22(1987)
 - 28) 京都市水道局水質試験年報: 30,301-308(1977)