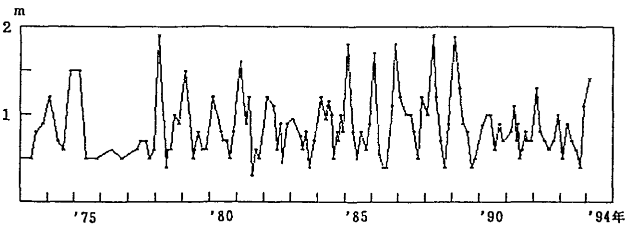
第3章　考　　察

富栄養化状態の指標として従来から透明度が用いられている。三方湖の透明度は、歴史的な結果として昭和31年12月の福井県水産試験場報告によると表－８のようで

表－８　三方湖の透明度
（福井県水産試験場　昭和31年）

測定日	透明度 範囲　m	透明度 平均値 m
S26. 8. 27	－	0. 5
S27. 8. 7	1. 66～ 1. 15	1. 34
S28. 8. 24	0. 85～ 0. 70	0. 77
S31. 9. 4	1. 65～ 1. 35	1. 50

あり、「水温の低下は透明度にも関係し、植物プランクトンの繁殖を抑制して……平均 1.5で例年より大きく……その後９月中旬に入り気温の上昇によって藍藻の水の華が現れ多少透明度を減じた。」とあり、アオコが発生し



図－11　三方湖の透明度(1973～1994年)

ていたとうかがわれる。常時監視結果では三方湖東部の透明度は図－11のようである。三方湖の水質を富栄養化の評価指標に照らし合わせると、表－９，－10のようであり、富栄養から過栄養の状態と考えられる。また、田川らは[8]、Chl-aとT-N, T-Pとの回帰式について一般湖沼の式(坂本)と比較し、三方湖においては燐は十分にあり、窒素が湖内の生産を制限していると推定している。

しかし、アオコ発生については、三方湖よりも汚濁が著しく富栄養化した北潟湖では塩分濃度が高く、プランクトン種も異なるためか、顕著なアオコの発生報告を聞かない。また、第５章　５．１に示すように、単に富栄養化だけではなく種々な因子が関与してアオコのプランクトン異常増殖が発生していると考えられる。したがって、アオコの発生現象を考察するにあたり、アオコ発生機構を富栄養化状態と区別する必要がある。アオコ発生機構は、さらにアオコのプランクトンが①増殖する機構と、②凝集し消散する機構の二つに分けられるが、②については、観察の記録(第２章　２．３．８)にとどめた。

この章では、アオコのプランクトン発生現象、湖水質、アオコ発生と水質の関係、アオコのプランクトン増殖機構の順に考察する。

表－９　三方湖水質と富栄養化段階の判定基準(EPA)

パラメータ	三方東 *	貧栄養	中 栄 養	富 栄 養
全 リ ン(μg/l)	71	<10	10～20	>20～25
ｸﾛﾛﾌｨﾙa(μg/l)	35	<4	4～10	>10
透 明 度(m)	0. 8	>3. 7	2. 0～3. 7	<2. 0

*1989～93年の平均値

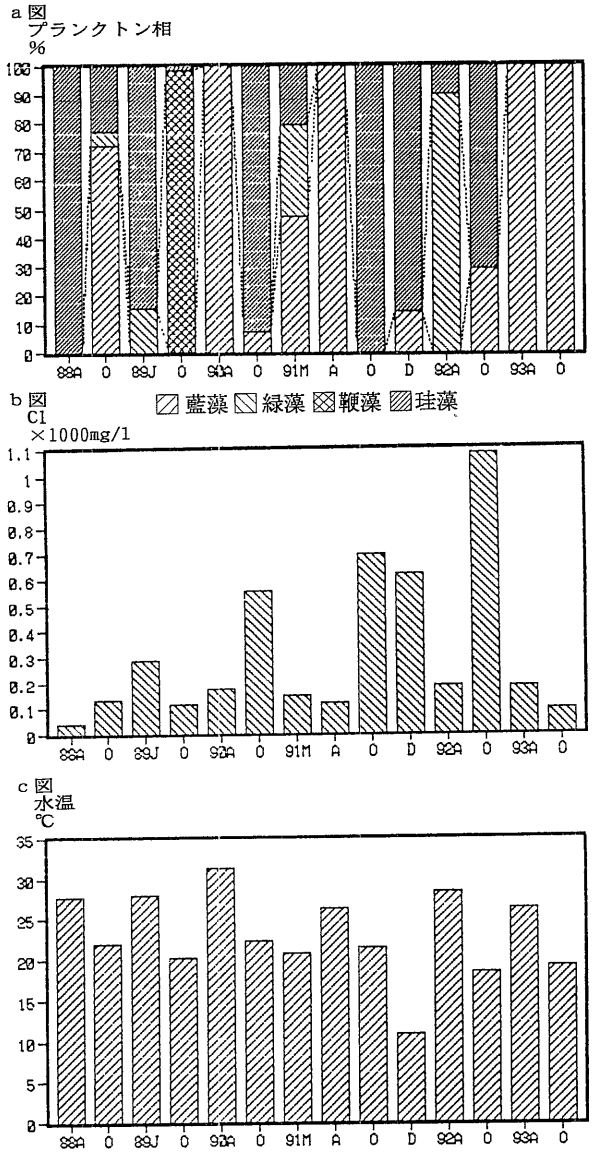
表－10　三方湖水質と栄養度の判定
（夏期平均値：６～９月）

栄養度		全窒素 mg/m³	全りん mg/m³	ｸﾛﾛﾌｨﾙa mg/m³	透明度 m
貧 栄 養		<400	<15	<3	>4. 0
中 栄 養		400～600	15～25	3～7	2. 5～4. 0
富 栄 養		600～1500	25～100	7～40	1. 0～2. 5
過 栄 養		>1500	>100	>40	<1. 0
三方東	過去 5年	835	86	45	0. 73
三方東	過去10年	809	88	42	0. 75
三方東	過去21年	800	107	38	0. 70

３．１　アオコのプランクトン発生現象

３．１．１　プランクトン常時監視調査結果

1988年度からの植物プランクトンおよびClと水温の常時監視調査結果（三方東）についてまとめた(図－12)。なお、このプランクトンについては採取水の全計数であり、今回の静置後に浮上したアオコのプランクトン計数値とは性格が異なる。



図－12 プランクトン相とClおよび水温の対比（三方東⑥, 1988～1993年）

a図はﾌﾟﾗﾝｸﾄﾝ相、b図はCl濃度、c図は水温を示す。

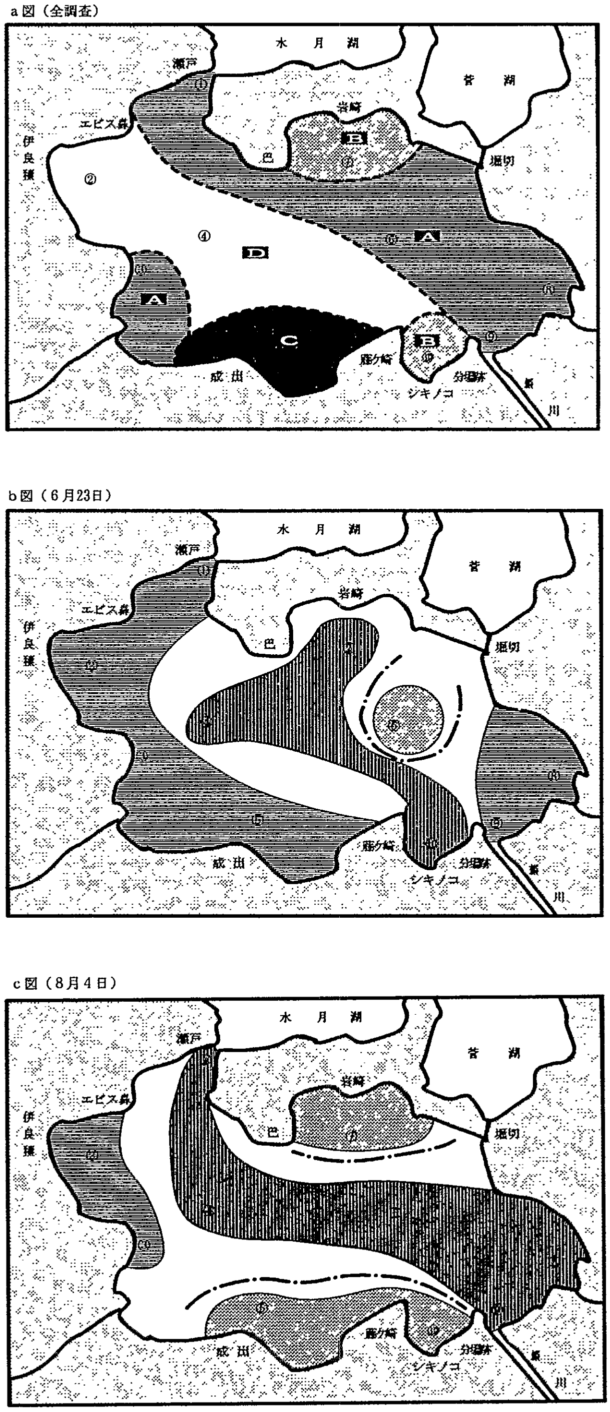
プランクトン相（a図）とCl（b図）を対比すると、Clが500mg/1以上（90_0, 91_0, 91_D, 92_0）のとき珪藻が優占している。反対に、藍藻が優占している(88_0, 90_A, 91_M, 91_A, 93_A, 93_0）ときのClは200mg/1以下である。また、プランクトン相と水温（c図）を対比すると、水温25°C以上のときのプランクトン相は、1988～89年は珪藻が優占していたが、1990年以降（92年を除いて）は藍藻が優占している。

また、過去10年間の水質項目間相関図と1991年のアオコ発生との比較でも[40)]、三方湖に特異な水質が生じてアオコが発生したわけではないとしている。

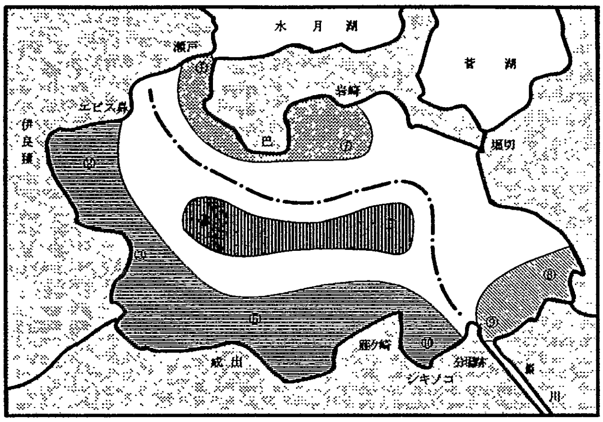
したがって、今後、塩分が低く水温が高いときは、藍藻の異常増殖（アオコ発生）が十分考えられる。

3．1．2 アオコのプランクトン水平分布

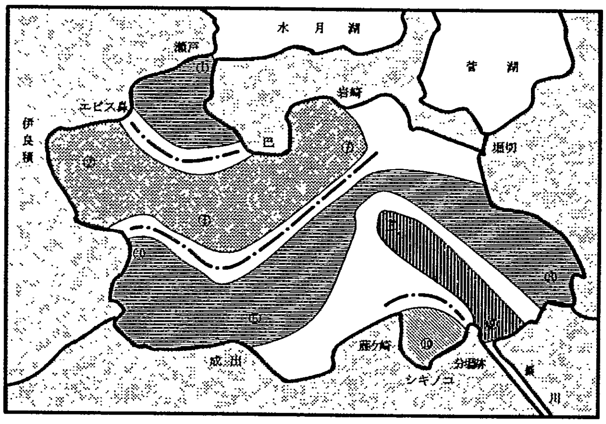
アオコのプランクトンとして、Microcystis、Anabaena、Oscillatoria、Aphanizomenonの4種類について計数値があり(付表－1)、湖内にアオコの発生しやすい場所があるかも知れないとの思慮で、平成5年度の全計数値をもとに湖内10地点の水平クラスター分析を行い(図－13)、A(①③⑥⑧⑨)、B(⑦⑩)、C(⑤)およびD(②④)の4グループに分けた（a図）。これに、Aphanizomenonのみ出現の6月8日の調査を除いて各調査日ごとにクラスター分析を対比した。6月23日は⑥と他のグループ(b図)、



d図（9月7日）



e図（9月21日）



図－13　アオコのプランクトンによる10地点のクラスター分析（平成５年度）
非類似度：ﾕｰｸﾘｯﾄﾞ平方距離　階層化：最短距離法

８月４日は⑤⑦⑩とその他（ｃ図）、９月７日は①⑦⑧⑨とその他（ｄ図）、９月21日は②④⑦⑩とその他（ｅ図）に大別され、グループ分けパタンは調査日ごとに大きく異なった。さらに、４種の藍藻組成比を地点間で比較すると、調査日ごとに標準偏差(std)は異なるが、大きくても20％であった(表－11)。組成比は地点間で大きく変わらないことから、ある特定地点がプランクトン増殖面で特異性を持つとは考えられず、プランクトン水平分布からアオコ発生場所を特定することは困難であり、また、グループ分けの大きな要因は他にあると考えられる。

各地点の湖内配置を考慮し、三方湖を楕円形にした場合、②⑤⑦⑧⑩は奥まっている、水の流れや滞留の状況がある、また調査時ごとの風の吹き溜り状況などにより、プランクトンの地点間の相違が生じたものと思われる。

表－11　平成５年度プランクトン組成比（％）

avg:10地点平均，std:標準偏差

調査日	n=10	Miscrocystis	Anabaena	Oscillatoria	Aphanizomenon
6月 8日	avg	0	0	0	100
	std	0	0	0	0
6月23日	avg	0	1	9	90
	std	1	1	6	6
8月 4日	avg	0	70	29	0
	std	0	14	14	0
9月 7日	avg	10	75	15	0
	std	4	18	20	0
9月21日	avg	7	83	2	8
	std	8	20	2	12

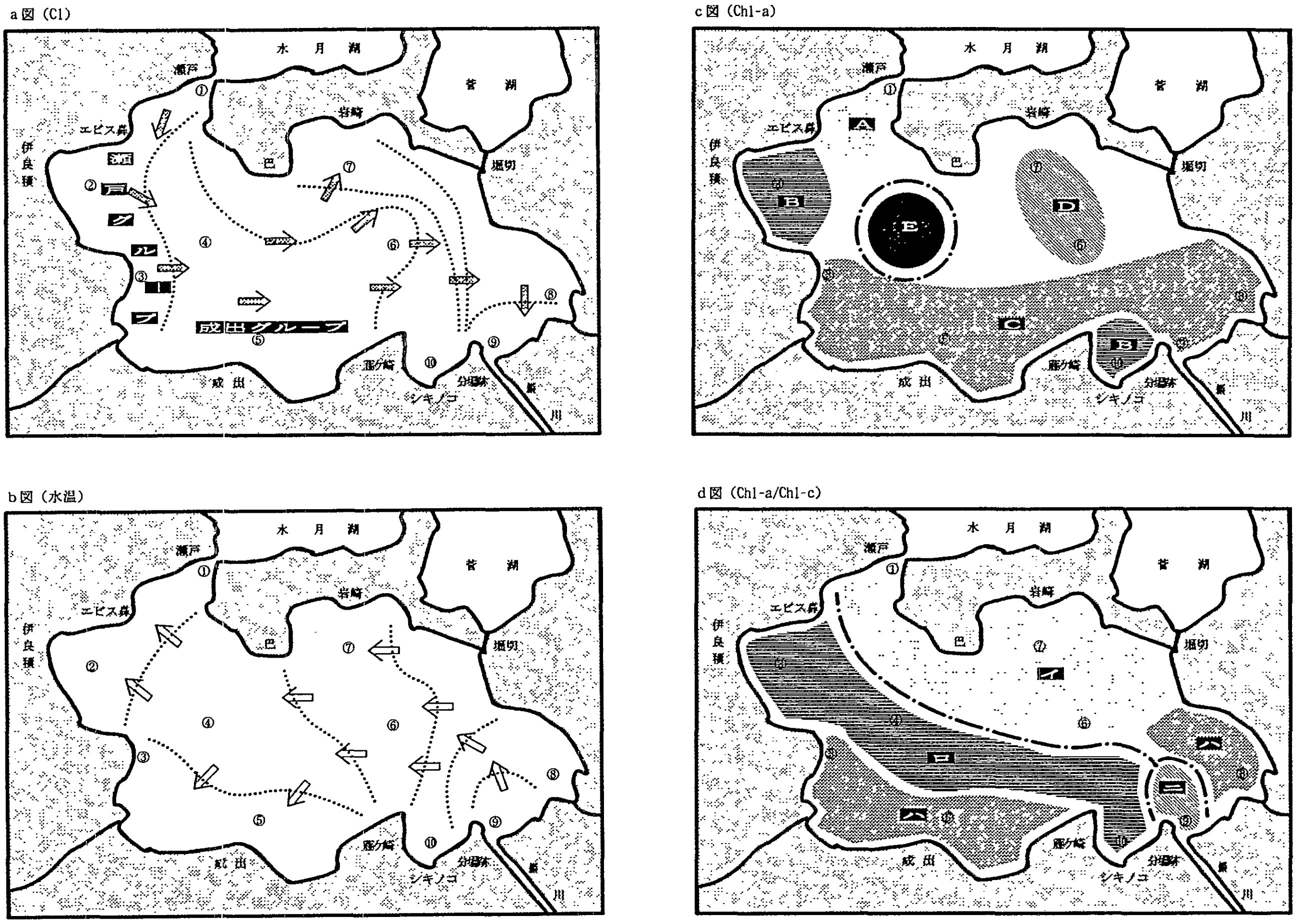
したがって、ａ図のグループ分けでは、湖地形により地点の平均的傾向が４つに分かれ、Ａグループは河川流入や他の水塊との接触に関係するのに対し、ＢとＣおよびＤグループは湖固有の湖水滞留性状に関係すると考えられる。しかし、これらグループはプランクトン生育条件としての水や風の動きを示しているため、生育プランクトンの組成比に微妙な影響差を生じさせる原因を示すとも考えられる。

３．２　湖水質の解析

３．２．１　水質の水平分布

地点ごとの水質キャラクターを探るために、10地点のデータが揃っている平成５年度の５回の調査データ（６月８日、６月23日、８月４日、９月７日および９月21日）でCl、水温、湖内部生産指標としてのChl-aおよびChl-a/Chl-c比の4項目についてクラスター分析を行った（図－14）。

ａ図にはClのクラスター階層を破線で示した。①②③の瀬戸グループ、④⑤⑥⑩の成出グループの類似性が強い。③が瀬戸グループに、④が成出グループに入り、さらに⑦は⑥の属する成出グループから少し外れていることから、塩分は水月湖から反時計回りに遡上することをうかがわせる。ｂ図には水温のクラスター階層を破線で示した。Clとは逆に⑨を起点として、⑧、⑩、⑦、⑥の順に、①に向かって変化し、水塊が大きいために緩衝力があり変動の少ない湖特有の水温状態に近づいている。



図－14　水質による10地点のクラスター分析(平成５年度)
非類似度：ﾕｰｸﾘｯﾄﾞ平方距離,　階層化：最短距離法

地元の漁業者の実感、「鰣川の水は、河口から堀切へ直進し、転向して三方湖北岸を西進し、瀬戸から水月湖へ抜ける。また、水月湖の水は、伊良積、田井島を通り、成出から藤ケ崎へ、さらにシキノコへ上がる」と一致する。

一方、ｃ図のChl-ａのクラスターは、Ａ（①)、Ｂ(②⑩)、Ｃ（③⑤⑧)、Ｄ（⑥⑦)、Ｅ（④)の５グループに分けられ、特にＥグループがＡ～Ｄのグループと大きく離れた。Ｂ、Ｃグループのように離れた地点間に類似性が見られることから、近接作用的な湖水移動によるものではなく、他の要因が考えられる。Chl-ａ分布はアオコの濃淡を示しているから、Ａ～Ｄは、水月湖や鰣川との水域境界的性格や、地形的に奥まったところの水塊の停滞などが考えられる。すなわち、三方湖の地形と風が作り出すアオコ集積のタイプ分けと考えられる。また、ｄ図の藍藻と珪藻の組成比差を考慮したChl-ａ/Chl-ｃ比では、イ(①⑥⑦)、ロ(②④⑩)、ハ(③⑤⑧)、ニ(⑨)の４グループに分けられた。鰣川河口から瀬戸にかけて三方湖を南北に分ける線が想定され、これを挟んでイとロとに分けられ、これの外側にハが位置している。また、ここでも、鰣川水流や、また地形的に奥まったところの湖水塊の停滞が考えられる。ところで、ｄ図は図－13－ａとグループ分けパタンが類似している。イ・グループの形状は鰣川水流と塩分遡上がプランクトン生育に影響を与え、藍藻と硅藻の組成比差を生じたことを示している。このように考えると、図－１３－ａのＡグループがﾊｽ川河口の延長上だけでなく別所川河口にも離れ島のようにあることや、ｄ図のハグループが観音川地先と別所川地先にあることの理由付けができるように思える。

３．２．３　水質の垂直分布

湖水深図（図－２）から見ると三方湖は全体的に水深は 1.5m前後である。しかし、鰣川河口で1.25mと浅く、③田井島で 2.5mを、①瀬戸では5mを越える地点もある。水質水平分布解析の補足としてDO、塩分、水温の垂直分布について検討した。

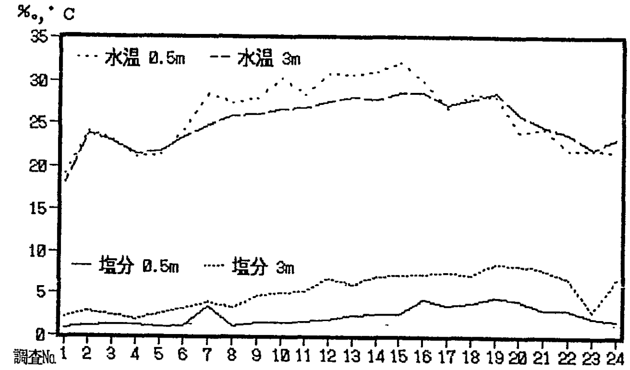
[平成5年度の解析]

三方湖は水月湖を通じて塩分が供給される。付表－3－1，2を見ると、①瀬戸から⑨鰣川河口にかけて、徐々に塩分濃度が低下している。塩分濃度は 0.5～1.5mまではほぼ均一で、2mには湖底へ進入した塩分形跡が見られる。6月は表層の塩分が1～2‰。(Clは600～800mg/l)と高いが、降雨のためか7月以降は低くなっており、9月に入り瀬戸3mでいくぶん塩分が高くなってきても、表層は低いままであった。水温は表層から1.5mあたりまで一定温度であり、これより深いところではやや低い。これは塩分躍層のために、日射の影響をうける表層からの熱伝播が弱いためと思われる。水温は6月17日頃から急激に上がり始め、8月4日に最高水温になった。8月4日の①瀬戸の2.5m以深で幾分高いのは、水月湖を通しての海水温度の影響と思われる。DOは下層ほど低く、特に湖底部は極端に低くなるが、有機物分解の影響と思われる。とくに、③田井島の6月17から23日のように塩分の高い状態では低く、塩水中での活発な微生物活動によるDO消費のためと考えられる。

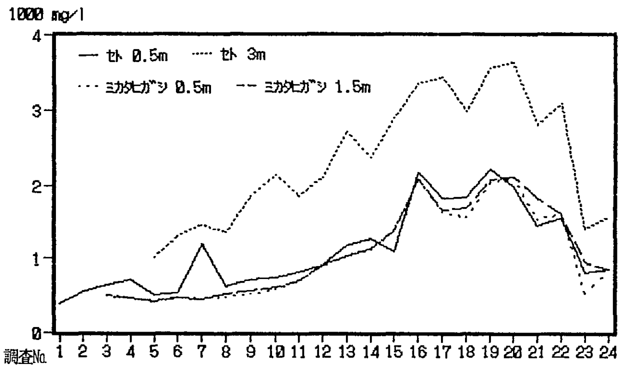
8月2日から3日にかけて44mmの降雨があり、この後の8月4日の調査結果を検討した。鰣川上口橋での水温が20.2°C（常時監視調査結果）に対して、⑨河口～①瀬戸までの湖面表層水温は25.0～26.3°Cであり、水温の低い河川水が湖底へ進入している。このとき、1.0～1.5mの水温を比べると、⑨河口(23.5-19.8°C)・⑧観音川(24.5-22.3°C)・⑥三方東(24.2-23.6°C)・⑦北岸(24.9-24.6°C)が低く(平均23.4°C)、①瀬戸(25.4-25.4°C)・②伊良積(25.5-25.2°C)・③田井島(25.3-25.2°C)・⑤成出(25.2-25.1°C)が高い(平均25.3°C)。これは鰣川の水が、水温の高い三方湖水の中へ噴流的に三方湖の北部へ直進したのち、湖内へ拡散していることをうかがわせる。このことは、北岸と成出について塩分濃度を比較したとき、北岸の方が成出よりも幾分低いことから、瀬戸から三方湖南岸に沿って塩分が遡上していることと対応する。これらのことは、6月23日の水温および塩分の垂直関係をみても同様である。

[平成6年度の解析]

5年度とは対照的に塩分が高かった。瀬戸は塩分源の水月湖の影響を最初に受ける。この表層0.5mと下層3mの値を検討した（図－15)。塩分3mからはNo.4（6月21日）あたりから徐々に上昇傾向にあり、これが今年度の三方湖水に大きな影響を与えている。塩分は上下層ともNo.19（9月6日)にピークとなっている。水温3mはピークが9月6日で塩分と同じ挙動をしているのに対し水温0.5mはNo.15(8月9日)にピークとなっている。瀬戸表層は、下層からの塩分と三方湖内の水温の影響を受けており、水が混合されていると考えられる。

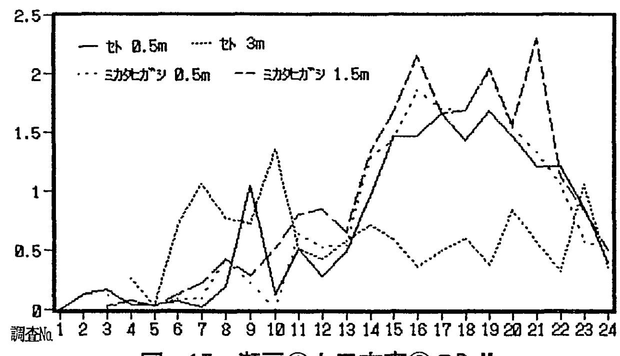


図－15　瀬戸①上層、下層の塩分と水温
塩分(‰)と水温(℃)



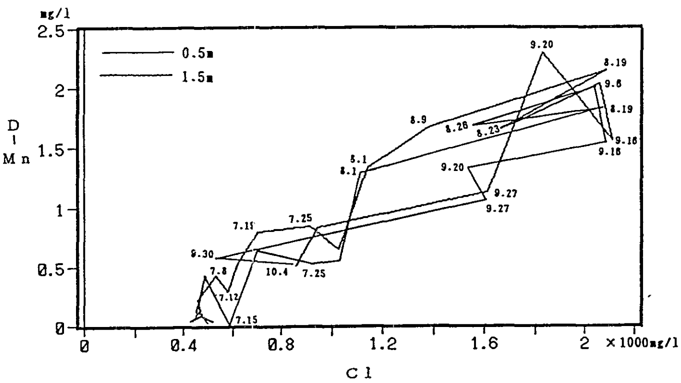
図－16　瀬戸①と三方東⑥のCl

次に図－16をみると、瀬戸と三方東の上層と下層でClの挙動は4地点とも似ている。しかし、図－17のD-Mnでは、No.5（6月24日）あたりまでは4地点でD-Mnの差はないが、その後塩分の上昇傾向が強まり、まず瀬戸3mで底層からのD-Mnの溶出が始まる。No.12(7月25日)以降、三方東0.5m，1.5mと瀬戸の0.5mはClとD-Mn濃度の挙動が似ているが、瀬戸3mのみは挙動が異なりD-Mnが低めの傾



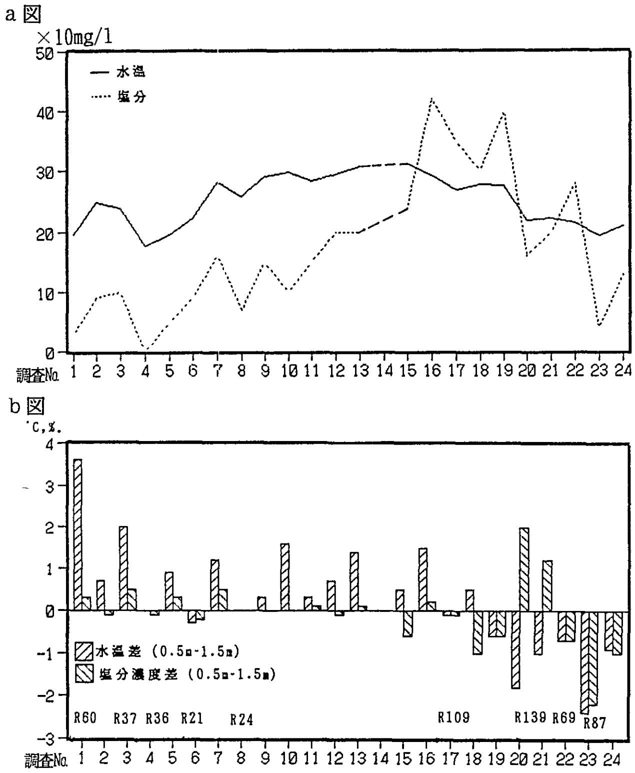
図－17　瀬戸①と三方東⑥のD-Mn

向が続いている。ここで図－18の三方東における8月1日から8月19日までのClとD-Mnの挙動は、0.5mと1.5mが平行しており、下層から上層へのD-Mnの拡散を示していると考えられる。また、8月21日、9月16日の大雨が過ぎ、秋雨の時期になると、No.22（9月27日）からNo.23（9月30日）までの塩分降下期にはD-Mn濃度が上下層で一致しており、湖水の混合を示し、また、瀬戸0.5mもこの影響を受けていると考えられる。



図－18 三方東⑥上層、下層のD-MnとClの相関図（平成6年度）

図中の数値は月．日を示す。



図－19 鰣川河口の水温と塩分の推移（平成6年度）

a図は表層(0.5m)、
b図は表層と下層の差(0.5m-1.5m)
Rは降水量mm/日を示す。

表－12 三方湖水質の相関係数（平成5，6年度）

平成5年度 (n=8)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		WT	pH	COD	D-COD	ss-COD	SS	Cl	Chl-a	Chl-c	T-N	D-N	ss-N	NH4-N	NO3-N	T-P	D-P	ss-P	PO4-P	D-Fe	D-Mn
1	WT	1.00	0.70	0.45	-0.20	0.52	0.37	-0.25	0.21	-0.32	0.08	-0.64	0.19	-0.18	-0.92	0.23	0.03	0.36	0.03	-0.64	-0.40
2	pH		1.00	0.66	-0.50	0.79	0.62	-0.49	0.60	0.12	0.33	-0.57	0.46	-0.61	-0.59	0.13	-0.33	0.59	-0.35	-0.73	-0.65
3	COD			1.00	0.24	0.97	0.96	-0.44	0.93	0.68	0.80	0.11	0.85	-0.09	-0.48	0.73	0.26	0.98	0.23	-0.25	-0.50
4	D-COD				1.00	0.01	0.17	0.16	0.11	0.39	0.42	0.69	0.34	0.68	-0.03	0.61	0.71	0.26	0.72	0.39	0.23
5	ss-COD					1.00	0.95	-0.49	0.93	0.61	0.72	-0.05	0.79	-0.25	-0.49	0.61	0.10	0.95	0.07	-0.34	-0.57
6	SS						1.00	-0.43	0.95	0.73	0.76	0.17	0.79	-0.13	-0.40	0.67	0.19	0.95	0.15	-0.09	-0.47
7	Cl							1.00	-0.51	-0.20	-0.71	-0.18	-0.74	-0.17	0.23	-0.53	-0.33	-0.55	-0.32	0.06	0.97
8	Chl-a								1.00	0.83	0.83	0.25	0.85	-0.11	-0.18	0.67	0.20	0.94	0.16	-0.06	-0.52
9	Chl-c									1.00	0.74	0.62	0.69	0.05	0.28	0.56	0.24	0.70	0.21	0.29	-0.15
10	T-N										1.00	0.55	0.99	0.31	-0.16	0.87	0.57	0.87	0.55	0.09	-0.67
11	D-N											1.00	0.43	0.69	0.49	0.56	0.66	0.24	0.65	0.80	0.01
12	ss-N												1.00	0.21	-0.26	0.85	0.51	0.90	0.48	-0.04	-0.73
13	NH4-N													1.00	0.12	0.60	0.93	0.00	0.94	0.63	-0.00
14	NO3-N														1.00	-0.29	-0.08	-0.42	-0.08	0.58	0.38
15	T-P															1.00	0.84	0.80	0.82	0.23	-0.46
16	D-P																1.00	0.34	1.00	0.46	-0.20
17	ss-P																	1.00	0.32	-0.12	-0.57
18	PO4-P																		1.00	0.45	-0.18
19	D-Fe																			1.00	0.28
20	D-Mn																				1.00

平成6年度 (n=24)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		WT	pH	COD	D-COD	ss-COD	SS	Cl	Chl-a	Chl-c	T-N	D-N	ss-N	NH4-N	NO3-N	T-P	D-P	ss-P	PO4-P	D-Fe	D-Mn
1	WT	1.00	0.38	0.56	0.57	0.42	-0.34	0.38	-0.31	-0.57	-0.39	-0.50	0.38	-0.45	-0.60	-0.15	-0.22	-0.11	-0.46	-0.31	0.39
2	pH		1.00	0.52	0.15	0.61	-0.07	0.04	0.28	0.11	-0.34	-0.43	0.31	-0.61	-0.39	-0.40	-0.52	-0.29	-0.64	-0.58	-0.02
3	COD			1.00	0.74	0.92	0.27	0.35	0.21	-0.09	-0.09	-0.33	0.71	-0.34	-0.34	0.17	-0.15	0.27	-0.30	0.05	0.45
4	D-COD				1.00	0.42	0.12	0.26	-0.13	-0.28	0.00	-0.12	0.38	-0.40	-0.22	0.14	0.04	0.15	-0.15	0.22	0.38
5	ss-COD					1.00	0.30	0.32	0.36	0.03	-0.13	-0.37	0.73	-0.23	-0.33	0.15	-0.22	0.27	-0.31	-0.07	0.38
6	SS						1.00	0.15	0.53	0.41	0.53	0.42	0.26	0.15	0.41	0.73	0.39	0.77	0.31	0.59	0.23
7	Cl							1.00	0.01	-0.28	0.05	-0.06	0.32	-0.14	-0.17	0.36	-0.09	0.48	-0.30	0.03	0.94
8	Chl-a								1.00	0.88	0.46	0.31	0.36	-0.00	0.34	0.46	0.21	0.49	-0.04	0.00	0.04
9	Chl-c									1.00	0.54	0.49	0.08	0.02	0.54	0.36	0.33	0.33	0.17	0.04	-0.24
10	T-N										1.00	0.94	0.03	0.21	0.88	0.67	0.69	0.58	0.55	0.46	0.16
11	D-N											1.00	-0.31	0.27	0.96	0.56	0.69	0.43	0.66	0.45	0.03
12	ss-N												1.00	-0.20	-0.38	0.24	-0.10	0.34	-0.40	-0.05	0.35
13	NH4-N													1.00	0.34	0.23	0.23	0.20	0.59	0.32	-0.10
14	NO3-N														1.00	0.49	0.63	0.37	0.73	0.44	-0.06
15	T-P															1.00	0.75	0.97	0.45	0.62	0.47
16	D-P																1.00	0.55	0.66	0.56	0.01
17	ss-P																	1.00	0.32	0.56	0.58
18	PO4-P																		1.00	0.65	-0.17
19	D-Fe																			1.00	0.22
20	D-Mn																				1.00

これら一連のClに関する挙動のなかで、D-Feは別挙動を示し、D-Mnのみ塩分の挙動と一致する。鉄はマンガンと比べて100倍の錯形成能があり、したがって酸化環境から還元環境へ移行するときMn^{2+}がFe^{2+}よりも先に溶出する。三方湖底に塩分が進入するとき、塩水中の大量のバクテリアにより底質の有機物が分解されて還元環境になり、大量のマンガンが溶出するものと思われる。

河口における表層と下層の水温差、塩分差の時系列では（図－19)、前期調査No. 1からNo. 8までは＋側、無降雨期間の中期調査No. 9からNo. 16までも＋側、後期調査No. 17からNo. 24までは－側の傾向が見られる。前期は降雨後に湖内温度よりも低い鰣川流水が塩分の高い河口湖水の下層へ進入していることが分かる。これは、前述した５年度の湖水流の知見とも一致する。中期では降水もなく表層と下層の塩分差はなく日射により表層が暖められている。前期とは反対に、後期は塩分濃度が高いため湖水比重が高く、また降雨による河川水量が多いため噴流が形成され、鰣川流水は塩分・水温が高い河口の表層に広がったと思われる。

３．２．３　水質項目間の相関

平成５年度と６年度の相関係数を表－12に示した。５年度はCOD、SS、T-N、T-P、Chl-ａの項目間の相関が強く、懸濁態に絞った項目間ではさらに強く表れて、アオコが直接水質に関与したと考えられる。一方、Clはこれらと負の相関となり、増殖阻害を示唆していた。また、D-FeとD-Mnとの相関は強くないが、D-FeはD-N、NH_4-N、NO_3-Nと正の相関、D-MnはClと強い正の相関が認められたことは、D-Feは河川水から流入し、D-Mnは塩分遡上と関係すると思われる。

６年度はCOD、SS、T-N、T-P、Chl-aの項目間の相関は強くなく、高い水温が続いた時期に塩分も加わってプランクトン成長が阻害され、水温に対するChl-ａ，Chl-ｃは負の相関となったと思われる。５年度と異り、だらだらしたアオコ発生は水質全体の変動に対して直接には影響しなかったと考えられる。しかし、ClのD-Mnとの関係は５年度同様に強かった。

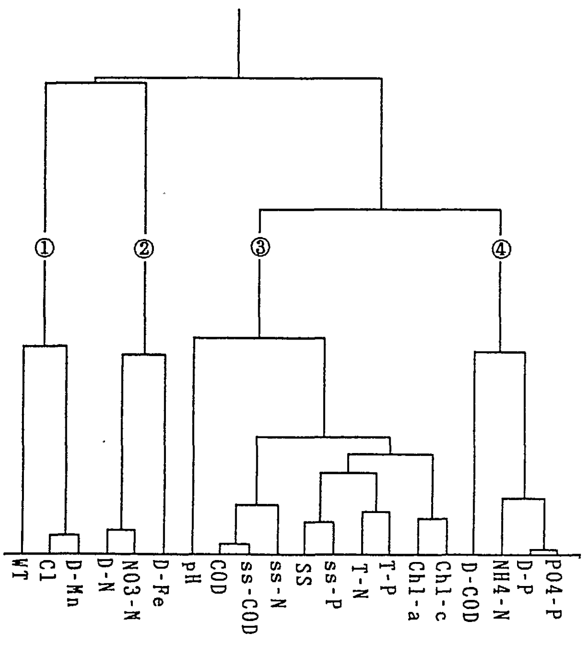
水質項目間の特性を明確にするため、５年度と６年度のデータをまとめ、項目ごとにＴスコア値に変換して項目間のクラスター分析を行った（図－20）ところ、

①（水温、Cl、Mn）

②（D-N、NO_3-N、D-Fe）

③（pH、COD、ss-COD、ss-N、SS、ss-P、T-N、T-P、Chl-a, Chl-c）

④（D-COD、NH_4-N、D-P、PO_4-P）



図－20　水質項目間のクラスター分析
（非類似度はﾕｰｸﾘｯﾄﾞ平方距離を用い、階層化は最長距離法による）

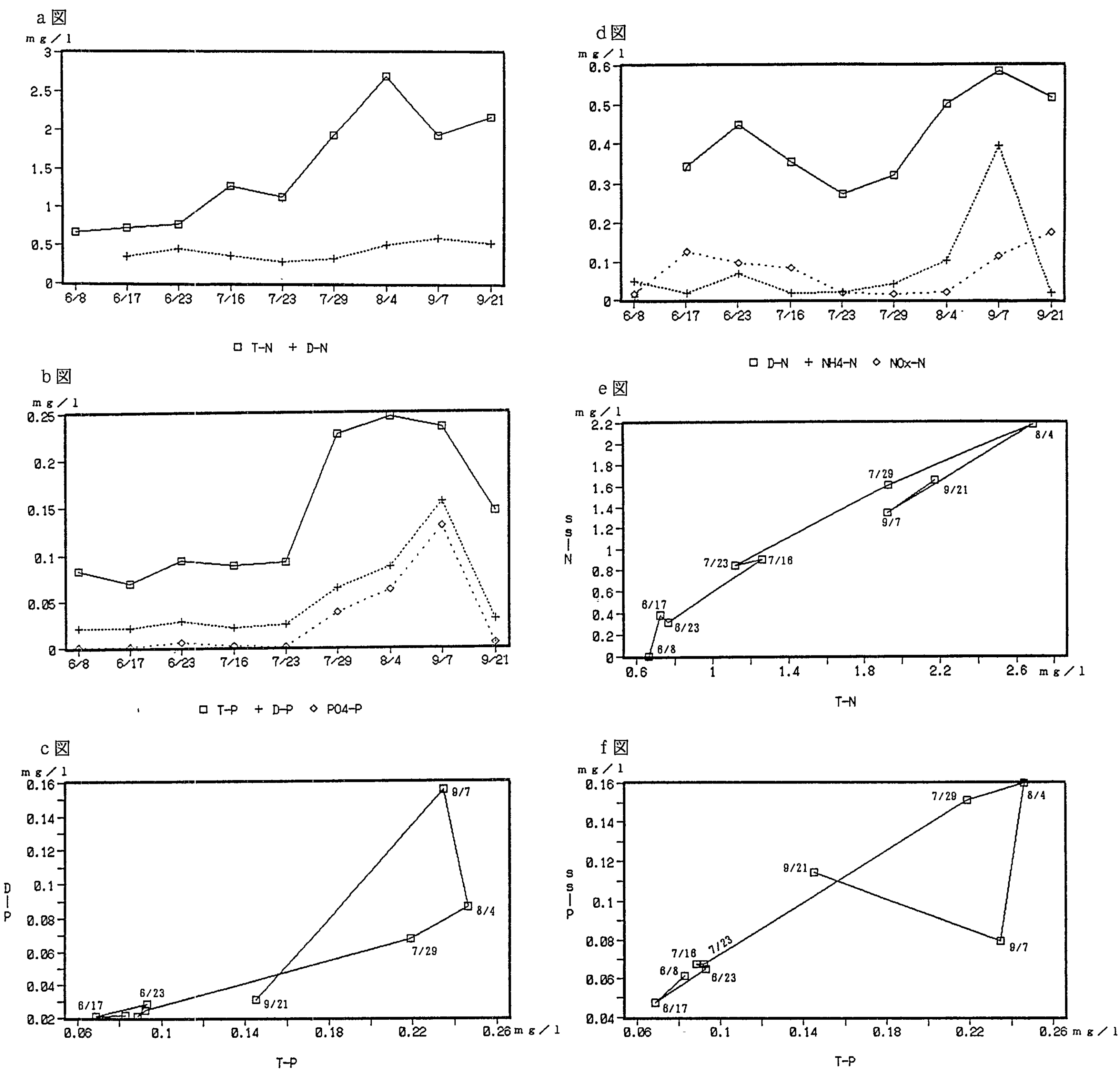
の４グループに分けられた。経験的に、また上記の考察をもとに項目特性を考慮し、①はプランクトンの増殖・阻害を決定する成分(および、この相関成分)、②は降雨影響の成分、③はプランクトン増殖の成分、④はプランクトン分解の成分と考えた。

３．３ アオコ発生と水質の関係

アオコのプランクトン発生について、湖のどこかにアオコ発生源があるのではないかとの考えで水平分布調査を行ったが、アオコの水平分布は調査日ごとに異なり、湖地形に影響された風や河川水流の影響が認められるものの、プランクトン組成比に地点間差はなく、今回の調査データでアオコ発生場所を決定するのは困難であり、むしろ、三方湖全体がアオコ発生箇所と考えた方が無難と考える。しかし、Chl-ａ/Chl-ｃ比では流入河川水が湖内プランクトンの生育に何等かの影響を与えていると考えられた。この章では、アオコ発生状況を水質やプランクトン相と比較した。

３．３．１　平成５年度の水質とアオコ

５年度の中～後期のアオコ大発生（Anabaenaが優占）に対応して、COD、Chl-a、T-N、T-Pが上昇し、後期はアオコの臭いが湖周辺一帯で強かった。このときのアオコと栄養塩の関係を検討した（図－21)。T-Nの上昇に比べ



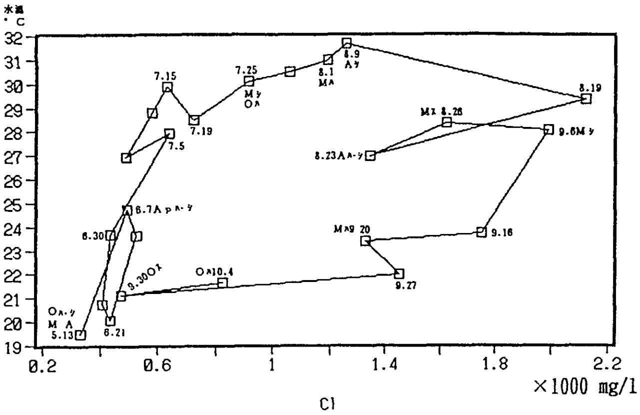
図－21　水質によるアオコ発生遷移解析（平成5年度）

D-Nの上昇はほとんどない(ａ図)が、D-PはT-Pの上昇と追従している(ｂ図)。このときD-Pの成分の大半はPO_4-Pである。９月７日の調査では、アオコの臭いが湖周辺一帯で強かったことを考えると、８月４日から９月７日の間でプランクトンの腐敗・分解によるPO_4-Pの上昇(ｃ図)が考えられ、現に、ｄ図ではNH_4-Nが高い。ｅ図、ｆ図で時間を追って見ると、６月８日から８月４日まで、藻体を示すss-Nやss-Pの増加とともに湖内のT-NやT-Pが一次関数的に増加している。この後、９月７日の調査のりんに注目するとss-Pが突然小さくなっている。T-Pのうち懸濁(ss-)態が減少し(ｆ図)、溶存(D-)態(ほとんどPO_4-P)に変化している(ｃ図)。また、ｅ図では窒素量が減少している。ss-Nの減少量は0.85mg/l、ss-Pの減少量は0.081mg/lであり、この減少量のN/P比は10.5で、プランクトンの一般的組成比と等しく、アオコの分解に対応したと考えられる。

３．３．２　平成６年度の水質とアオコ

平成６年度は調査頻度が高く、プランクトン遷移解析を行った（図－22)。

５月13日には３種のプランクトンが共存していた。６月７日のネットプランクトンでは塩分の上昇のためか、



図－22　水質相関図上のプランクトン消長(平成６年度)
横軸はCl、縦軸は水温、図中の数値は月．日を示す。ﾌﾟﾗﾝｸﾄﾝについては、MicrocystisをM、AnabaenaをA、Oscillatoria(好塩分)をO、AphanizomenonをApで、消長をﾊで発生、ｼで消滅、ｽで衰退を示す。

５年度６月にCl約700mg/lでAphanizomenonが優占したように、瞬間的に Aphanizomenonが発生した。この後一時的に水温が下がったが、６月下旬の水温上昇とともにAnabaenaが優占的に増加し、この後を追ってMicrocystis(1)が増え始めた。しかし、７月25日には高塩分・高水温のためかMicrocystis(1)が計数的に消滅（濃縮プランクトンでは捕集された）し、反対にOscillatoriaが発生し始めた。その後も高水温が持続したまま塩分がさらに上昇し、８月１日には新たにMicrocystis(2)が発生したが、今度はAnabaenaが消滅した。８月19日にはClは2000mg/lを越え、Microcystis(2)は衰退傾向になった。８月21日の降雨により塩分が下がり、８月13日には瞬間的にAnabaenaの発生があったが、８月26日には再び塩分が上昇し、Microcystis(2)とAnabaenaは共に消滅し、９月６日にはOscillatoriaのみとなった。９月20日になると塩分も下がり(Clが1300mg/l)、Microcystis(3)が再び発生しOscillatoriaをしのいで優占し、９月30日に塩分がさらに下がるとOscillatoriaは減退した。しかし、10月４日には塩分も上昇し再びOscillatoriaが優占となってきた。これらプランクトン種相互の関係から、Microcystisは塩分阻害が２段に分かれており、塩分に馴れる性質があるように思え、AnabaenaはClが1300mg/l以下でないと生育できないようであり、８月以降のOscillatoriaは他の３種と比べて相対的に塩分に強く、Clが800mg/l以上では他のプランクトンを抑制して生育すると考えられた。以上のプランクトン相の遷移過程で、Microcystisを(1),(2),(3)に分けて表現したが、検鏡ではMicrocystis aeruginosaが大多数であった。しかし、水質環境要因との兼ね合いから、Microcystis の他の種についても検討する必要がある。

D-Mnは塩分の上昇とともに濃度が上昇したため、同様にプランクトン遷移解析をおこなった。しかし、７月25日に消滅したMicrocystisが、８月１日にD-Mnが上昇しMicrocystisが出現したこと、また反対に、９月６日に消滅して以降、D-Mnが減少して９月20日に発生したこと、この相反する事実を考慮すると、塩分上昇によるマンガン溶出現象にプランクトンの発生消滅が単に並行したのみであり、マンガン濃度上昇がプランクトン発生を促進したとは考えにくく、D-Mnの濃度増加刺激を契機とするプランクトン消長はなかった。一方、D-Feは調査期間中は 0.2mg/l前後と低く、プランクトン消長との関係の有無については検討できなかった。しかし、相崎によると[57]、湖底からの供給で十分であるため、今後の現地でのD-MnおよびD-Fe検討は不用と思われる。

３．４　アオコのプランクトン増殖機構

ここでは、環境要因とアオコのプランクトン増殖との関連を検討し、アオコ発生機構を提示した。

３．４．１　増殖速度関数

降雨、日射、湖内の無機窒素およびりん濃度、水温を因子とする増殖速度関数について検討した。平成４年度の富栄養化汚濁解析[50]同様に、プランクトン量Ｍを取り扱った。式は以下のとおりである。

$\Delta M = Gp \cdot M$ ＝単位時間増殖量

Gp ＝増殖速度

$Gp = \mu_{max} \cdot FNP \cdot FI \cdot FT$

μ_{max} ＝最大比増殖速度（定数 0.98）

FNP＝栄養塩関数

$= \{Cn/(0.069+Cn)\} \cdot \{Cp/(0.0025+Cp)\}$

Cn, Cp:無機窒素，無機りん濃度

FI ＝照度関数

$= I/(2.26+I)$　　　I:照度

FT ＝水温関数

$= 0.116+0.0088T+0.00106T^2$

T:水温

増殖速度関数に、以下の平成５，６年度の環境因子を入力した。

[日射量および降雨量]

日射量は、平成５年度、６年度の福井気象台の日値(付表－６）を用いた[25]。降雨量は平成５年度、６年度の美浜の日値（付表－６）を用いた。

[湖内の無機窒素および無機りん濃度]

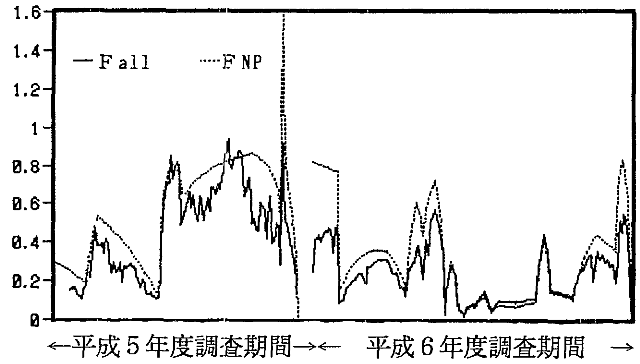
実測値および実測値間の直線内挿による計算値を用いた。

［水温］

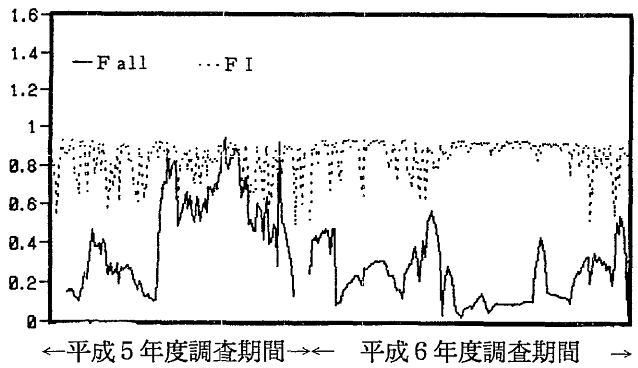
平成５年度は自動水温計の値（付表－５）を用いた。６年度は、実測値および実測値間の直線内挿による計算値を用いた。

以上の環境因子を入力し、ＦNP、ＦＩ、ＦTの関数値を図－23に示し、Ｇｐの変動部分をまとめてＦall=ＦNP×ＦＩ×ＦTとし、ＦNP、ＦＩ、ＦTと比較した。ＦNPは大きな変動があり、Ｆallの挙動を特徴づけている（ａ図)。ＦＩは、光合成の最適照度Iopは一般に12.5～14.6MJ/m^2（半飽和定数はIop/6=2.26）とされているが、調査期間中

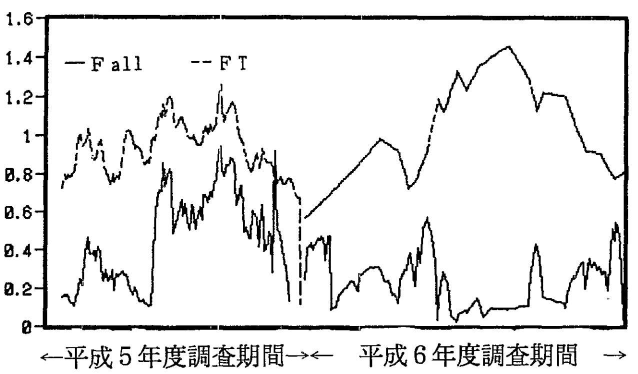
ａ図



ｂ図



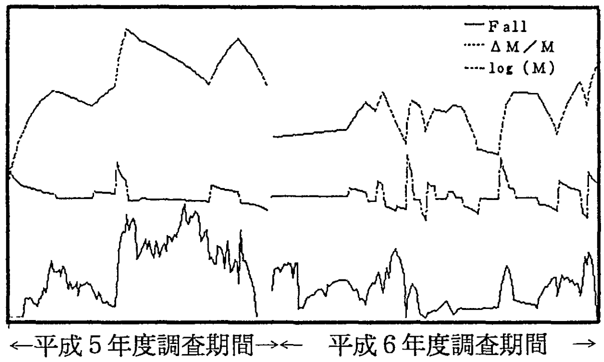
ｃ図



図－23　増殖速度関数の寄与の比較

Fallは、栄養塩関数FNP、照度関数FI、
水温関数FTを乗じた関数である。

の日射量はほぼこれを満たし、日射量の変動はＦallに微細変動を付けているにすぎず、プランクトン増殖変化に大きな影響を与えないと考える（ｂ図)。ＦTは、平成５年度はＦallと似ているが、６年度は似ていない(ｃ図)。結局、全体的にＦallはＦNPと挙動が一致し、増殖速度関数は無機栄養塩変動による大きな影響を受けていると考える。



図－24　増殖関数FallとＭ(ｸﾛﾛﾌｨﾙa)との比較

次に、プランクトン量ＭにChl-aを用い、ΔＭ／Ｍ(すなわちＧｐ)、および、log（Ｍ）（すなわちGp×t+c）を計算し、この時系列をＦallと対比した（図－24)。ΔＭ／Ｍに対してlog(Ｍ)は積算関係であり、log(Ｍ)の上昇勾配部分がΔＭ／Ｍの山と一致する。これらとＦallの対応は、時系列傾向として局部的に似ているが、細部の一致はあまりよくない。これは、増殖速度関数に他の環境因子を考慮していないためと考える。

３．４．２　プランクトン相遷移を取り扱う増殖速度関数

平成６年度を例にとると、アオコのプランクトン優占種は５月から10月にかけてAnabaena→Microcystis→Oscillatoria→Microcystis→Oscillatoriaへと順次遷移しており、湖のプランクトン生育に及ぼす因子の変遷に従っていると考えられる。水温や塩分の生育影響はプランクトン種ごとに異なる。これは、第２章　２．３．７と対応し、以下ではプランクトン種ごとに箇条書きにまとめる。

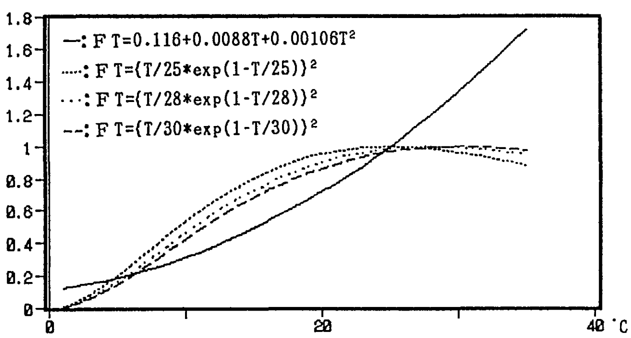
Miscocystisは、５月当初から水温の上昇とともに徐々に増加し、７月下旬で第一の山となった。ここまでは塩分の影響をほとんど考えなくてよい。８月の初旬から徐々に衰退傾向になり、これは塩分濃度の上昇と一致している。９月になると降水量も多くなり、塩分濃度が幾分下がり、再び優占化した。この消長は、ほぼ塩分挙動に対応する。

Anabaenaは、Microcystisよりも低温で増殖が始まる。5月当初から7月下旬まで第一優占であり、Clが1200mg/lまではMicrocystisよりも塩分に強い。しかし、Clが1200mg/lを越えるとMicrocystisよりも弱く、8月9日以降衰退した。8月23日の降雨により一時的に塩分が下がると復活した。しかし、9月末の塩分低下時にはMicrocystisとの競合関係で発生が抑制された。

Oscillatoriaは、5月当初に見られたものの、直ちに消えた。7月中旬にMicrocystisの一時的な衰退と同時に再び発生し始め、10月の調査終了まで優占した。5月は塩分の低い時期の発生であり、7月下旬からは塩分の高い時期の発生である。この条件の異なる時期の Oscillatoriaは種類が異なることが検鏡により判明した。7月下旬以降は塩分が上昇したことにより、生育条件がMicrocystisやAnabaenaよりも相対的に有利になり、優占種になったと考える。ここでは、高塩分下のOscillatoriaのみを検討する。

このようなプランクトン消長に関する環境因子の関数として、種ごとに修正水温関数と塩分関数を作成し、プランクトン相遷移を取り扱う増殖速度関数とした。

［修正水温関数[65]］は最適温度To以上でプランクトン種ごとに温度関数ＦT-m, ＦT-o, ＦT-aを作成し、ＧｐのＦTを修正した（図－25)。

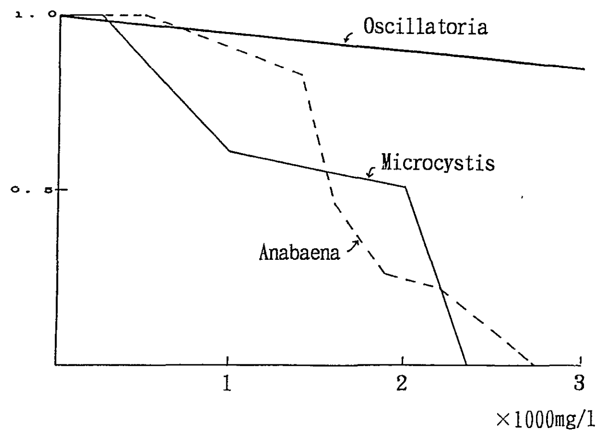


図－25　水温関数(ＦT)

ＦT= $\{T/To \times \exp(1-T/To)\}^2$　　T :湖水温

Microcystis	ＦT-m	(To=30)	To:最適温度
Anabaena	ＦT-a	(To=25)	
Oscillatoria	ＦT-o	(To=28)	

［塩分関数］は、塩分阻害を配慮するために、南条ら[61]の塩素イオン濃度に対応するMicrocystis、Anabaenaの増殖量をもとに、簡単な関数ＦCl-m, ＦCl-a を作成し、また、ＦCl-oは石田[36]のOscillatoriaのＡＧＰ試験結果をもとにＦCl-oを作成し(図－26)、Ｇｐに組み入れた。



図－26　塩分関数(ＦCl)

Microcystis

Cl mg/l	ＦCl-m
0 - 225	1
225 - 1000	1-0.39/775(Cl-225)
1000 - 2000	0.61-0.10/1000(Cl-1000)
2000 - 2360	0.51-0.51/360(Cl-2000)

Anabaena

Cl mg/l	ＦCl-a
0 - 500	1
500 - 1400	1-0.17/900(Cl-500)
1400 - 1600	0.83-0.37/200(Cl-1400)
1600 - 1900	0.46-0.20/300(Cl-1600)
1900 - 2200	0.26-0.04/300(Cl-1900)
2200 - 2700	0.22-0.203/500(Cl-2200)

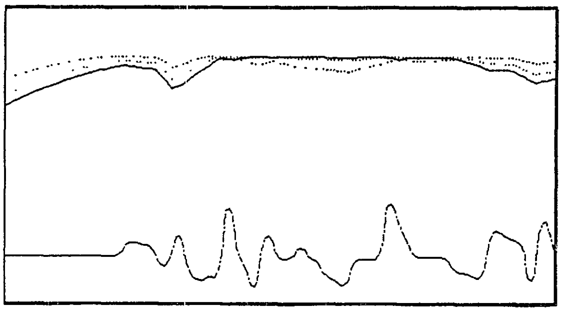
Oscillatoria

Cl mg/l	ＦCl-o
0 - 4000	1-0.2/4000Cl

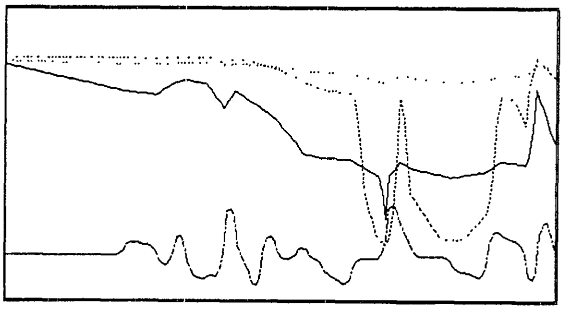
これらはいずれも増殖量をもとに計算してあり、塩素イオン濃度が0のときを1として関数を作成した。なお、ここで用いる塩素イオン濃度は、実測値および実測値間の直線内挿による計算値を用いた。

修正水温関数、塩分関数を6年度に適用し、Microcystis, Anabaena, Oscillatoriaごとに図－27に示した。修正水温関数は相互に類似しており、最適温度30°CのMicrocystisを除いて、Anabaena, Oscillatoriaは8月の高水温障害が表現されている。しかし、現地観察の印象では、

a図



b図



図－27 プランクトン種ごとの水塩、塩分関数 （平成６年度５～10月）

ａ図は水温関数、ｂ図は塩分関数で、ΔＭ／Ｍと対比した。関数の添え字-m、-a、-oは、それぞれMicrocystis、Anabaena、Oscillatoriaを示す。

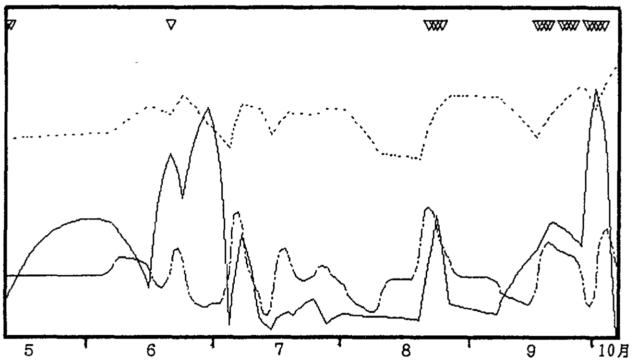
例えば20°Cと25°Cの温度差の効果をがさらに明瞭に出されるべきと思われ、今後の検討の余地は十分にある。一方、塩分関数はMicrocystis, Anabaena, Oscillatoriaでそれぞれ特徴的な時系列を示しており、図－５－ｂの８月23日の状態をよく説明している。しかし、９月中旬以降のAnabaenaの不十分な増殖については、これだけでは説明がつかない。

以上で用いた関数は瞬間的な取扱いである。しかし、アオコのプランクトン発生は瞬時の要因のみに左右されるものではなく、プランクトンの生態にも配慮しなければ、プランクトン増殖やアオコ発生を説明できない。これについて、平成５年度に、７月末以降のAnabaenaの優占的増殖が９月末まで他の種をおさえた例、また、６年度に、８月23日に復活したAnabaenaが高塩分濃度に復帰したために減退し、OscillatoriaやMicrocystisが優勢となり、９月27日以降塩分が低下してもOscillatoriaやMicrocystisにより成長を阻まれた例があり、プランクトン間の増殖競争の説明が必要である。例えば、AnabaenaとMicrocystisの増殖の拮抗について、Anabaenaは自身で窒素固定を行うが、 Microcystisは固定能を持たないため、窒素濃度が比較的低く水温が低いときはAnabaenaから増殖することが一般に言われる。また、窒素、りんを添加しローラー瓶中で培養する現場法では、Microcystisは窒素を添加した方がりんを添加するよりも増殖量が多くなり、Anabaenaは反対にりんを添加したほうが窒素を添加したときよりも増殖量が多くなる[18] 結果があり、初発のAnabaenaに集積した窒素をMicrocystisが利用して増殖することも見られる[40]。

このように、平成６年度の９月中旬以降は、降雨刺激が繰り返し湖面に与えられ、窒素が湖内に十分あり、Microcystisに好都合な環境となり、AnabaenaよりもMicrocystisが優占したものと考えられる。

３．４．３　アオコのプランクトン増殖の再現

平成６年度について、プランクトン相遷移を取り扱う増殖速度関数に加えて、４日間積算雨量40mm以上を増殖刺激として▽をプロットし、増殖速度関数とクロロフィル濃度の関係を図－28に示した。なお、簡略のため、ここではＦＩを除外した。



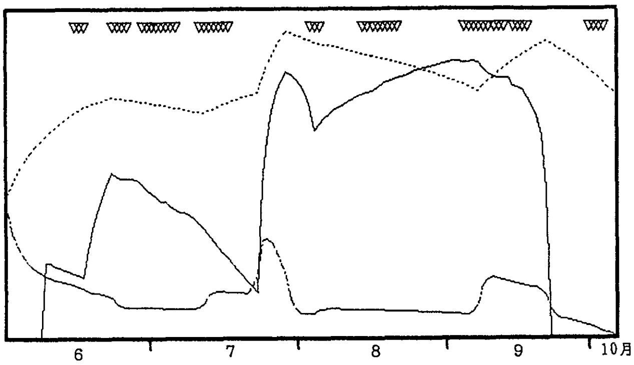
図－28 プランクトン相遷移増殖速度関数による アオコ増殖の再現（平成６年度）

—— : Σ＝(ＦT-m・ＦCl-m+ＦT-a・ＦCl-a+ＦT-o・ＦCl-o)ＦNP
········ : log（M）　　▽：４日積算雨量が40mm以上
-·-·-· : ΔＭ／Ｍ（スムーズ処理）

３種のプランクトン増殖速度関数の合計（Σ）は、６月を除いてΔＭ／Ｍとほぼ一致し、増殖速度関数によりプランクトン増殖（Chl-a）が再現された。また、９月中旬以降は▽プロットがこみあい、Microcystisの優占化と一致し、▽プロットは概念的ながら生態的取扱いの意味を持つことになる。

同様に、５年度については図－29に示した。調査頻度が低く、また、６月に優占したAphanizomenonについての関数的配慮がないため、ΣとΔＭ／Ｍの一致は全体的

に低いが、7月後半からのアオコ大発生はプランクトン増殖として再現された。



図－29　プランクトン相遷移増殖速度関数による
アオコ増殖の再現（平成5年度）

——：Σ＝(FT-m・FCl-m+FT-a・FCl-a+FT-o・FCl-o)FNP
……：log（M）　▽：4日積算雨量が40mm以上
－・－：ΔM／M（ｽﾑｰｽﾞ処理）

3．4．4　生態関数の概念

アオコのプランクトン増殖は不十分ながら増殖速度関数により再現された。しかし、3．4．2に示したように、プランクトンが増殖した結果により新たな環境状況が生まれ、これによってまたプランクトン相の遷移が生じることの生態的取扱いを考慮する必要がある。この数量的モデル化は今後の検討課題であるが、これを「生態関数」と定義する。この生態関数に盛り込むべき内容としては、①種間の競争関係（発生の先・後、他種の生育抑制、動物プランクトンや細菌等への抵抗力）、②環境刺激の応答能（例えば、降雨現象は湖に水温変化や塩分変化を起こすのみならず、プランクトン増殖に何らかの刺激因子として働くと経験的に思われる）、③栄養比率（例えば、窒素りん比）などが考えられる。また、生態関数は増殖速度関数として導入すべきと考える。

なお、湖水質評価でプランクトン量はクロロフィル濃度で表すのが一般的であり、ここで、プランクトン増殖と測定計測との関係を整理した。プランクトン計数値からは直ちに組成比（プランクトン相）が計算される。また、プランクトン藻体の測定であるクロロフィル濃度も、換算係数があればプランクトン計数値から直ちに計算される。すなわち、増殖速度関数→プランクトン計数値→プランクトン相・クロロフィル濃度の順でプランクトン増殖の測定計測関係が成立する。増殖速度関数を原因とし、プランクトン計数値、プランクトン相、クロロフィル濃度は増殖結果である。

したがって、今回のプランクトン計数値が量的には相応的な値であるため示すことができなかったが、まず第一に生態関数を含めた増殖速度関数とプランクトン計数値とを対比し、この後にクロロフィル濃度と対比して、湖生態および水質を考察すべきと考える。