

第4章 湖沼の水質およびアオコ発生因子の解析

4.1 調査の概要

三方湖と北潟湖は富栄養化による汚濁が著しく進行しており（富栄養化の程度は同じレベル）、特に三方湖は例年植物プランクトンが大量増殖する、いわゆる「アオコ」が発生し、漁業への影響や景観の悪化等を招いている。対照的に北潟湖は、一年中褐色から緑褐色を呈しているが現在までに大量のアオコが発生した記録はない。

この両湖の違いの原因を把握し、湖沼水質保全対策事業に資することを目的として、平成9～10年度の2カ年計画で水質および動植物プランクトンの詳細な現地調査を実施した。この調査は、動植物プランクトンを中心とした過去に例の無い短い間隔での調査である。また、アオコ発生因子の解析評価には、平成11年度の常時監視結果も追加して検討した。

4.2 調査方法

4.2.1 調査地点および調査時期

三方湖の調査地点を第2章の図2-1および北潟湖の調査地点を図2-2に示した。なお、解析には、三方湖の代表地点として三方湖東部を、北潟湖の代表地点として日の出橋の結果を用いて解析した。

調査期間は平成9年4月から平成10年3月までは、主に北潟湖を、平成10年4月から平成11年3月までは、三方湖を中心に調査した。なお、アオコの発生が著しくなる5月から10月までは、各週ごとに調査、他の月は1から2回/月の頻度で調査した。

また、追加解析に用いた平成11年度の常時監視は、4月および6、8、10、12、2月の6回である。

4.2.2 湖水の調査項目および調査方法

調査項目および調査方法については下記に示す。

4.2.2.1 一般項目

水温および透明度、pH、DO、COD、SS、全窒素、全磷、塩素イオン、クロロフィル、各態窒素ならびに各態燐等28項目をJIS K0102等

に従い分析した。

4.2.2.2 農薬

殺虫剤のジクロロボス等8項目および殺菌剤のクロロネブ等11項目、除草剤のモリネート等17項目の計36項目について、固相抽出ーガスクロマトグラフ質量分析法で分析した。

4.2.2.3 植物プランクトン

試料にグルタルアルデヒド固定液を添加（1V/V%）、静置濃縮後、プランクトン計数板を用いて1ml当たりの細胞数として求めた。

4.2.2.4 動物プランクトン

試料50lをNXXX25番（40μm）のプランクトンネットを用いてろ過し、グルタルアルデヒド固定液を添加（3V/V%）静置濃縮後、プランクトン計数板を用いて1l当たりの個体数として求めた。

4.2.2.5 金属

試料を1μmのグラスファイバーフィルターでろ過し、塩酸酸性（0.1Nに調整）としたもの（ろ過処理）、および、硝酸・過塩素酸で灰化したもの（酸分解処理）とに区別し、アルミニウム等22項目について、ICP発光分析法で分析した。

4.2.3 気象データ

降雨量、および全天日射量は、アオコが影響を受けていると想定される調査日および前々日までの3日間の合計を福井地方気象台発表の「福井県気象月報」より福井および敦賀局のデータから求めた。

4.2.4 底質の調査項目および調査方法

湖水中の微量金属濃度に影響を与えると想定される底質の金属（珪酸等無機物質を含む）については今まで調査されていない。そこで、三方湖東部および北潟湖南部で平成10年6月にエクマンバージを用いて底質を採取した。なお、水質の代表地点として選んだ日の出橋地点の底質は、湖水の流れ等から良好な底質が採取できなかったため、北潟湖の代表として北潟湖南部を選んだ。

採取した底質は、3,000rpmで20分間遠心分離し、上澄み液を0.45μmメンブランフィルターでろ過後、塩酸（0.1Nに調整）を加えて間隙水試料とした。

底質部分は、風乾後、粉碎して16meshのふるい

処理したものを硝酸・過塩素酸で灰化分解した後、定容して金属分析に供した。また、水分含量および強熱減量も求めた。

分析法は、ICP発光分析で行った。また底質については蛍光X線分析も行った。

4.3 結果と考察

4.3.1 目視によるアオコ発生状況

調査を開始した平成9年度および平成10年度のアオコ発生状況は著しく、三方湖においては6月ごろから発生が見られ8月ごろにはピークとなり三方湖のあらゆる地点で大きなマット状のアオコが見られた。特に、湖岸では吹き寄せられたアオコの集積が見られた地点（成出園地）もあった。

しかし、平成11年度はアオコ発生は少なく、例年アオコの集積が見られた湖岸でも7月の中旬に筋状のアオコを確認しただけでその後、目視による確認はできなかった。

4.3.2 水質の経時変化からみた両湖の違い

図4-1に三方湖東部および日の出橋における水質の主な項目である水温およびpH、COD、全窒素、全リン、全クロロフィル、塩素イオンの経時変化を示した。

物理的な因子である水温は、両湖とも冬季の5℃から夏季の30℃を規則的に変化し、地点の差は認められなかった。

pHは、7～10の間で推移し、三方湖東部は日の出橋より若干高めである。

CODおよび全リンの経時変化は、両湖の負栄養化レベルが同程度であることを示している。

全窒素において、冬季での日の出橋の値は三方湖東部より高い（この時期の平均濃度は、1.32mg/ℓ）。これは、懸濁態窒素（プランクトン等）の平均濃度が0.32mg/ℓと両湖ともほぼ同じなのに対し、溶存態窒素の濃度が0.97mg/ℓと高く、そのうち硝酸態窒素が0.71mg/ℓを占めているためである。しかし、硝酸態窒素が増加する原因については、まだ明らかにされていない。夏季における全窒素の値はほぼ同じである。

全クロロフィルは、4～6月にかけて日の出橋が高い値を示した。これは、発生した植物プランクトン相（日の出橋は、緑藻、珪藻が多い）の違

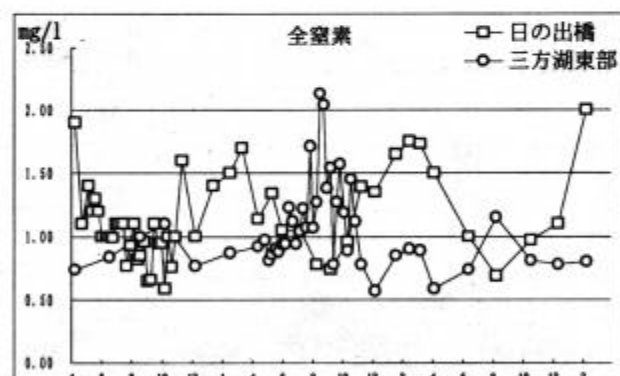
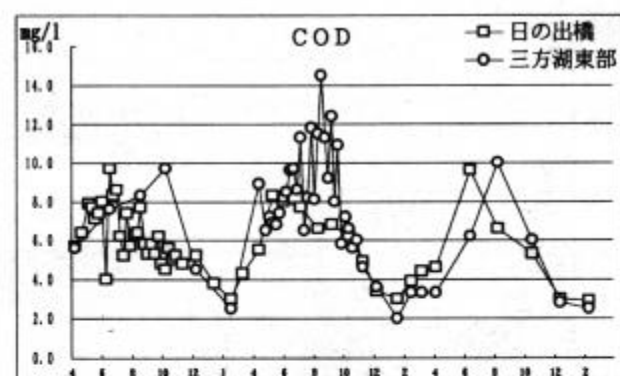
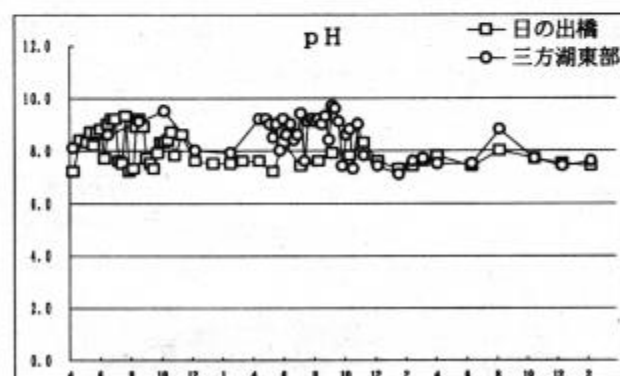
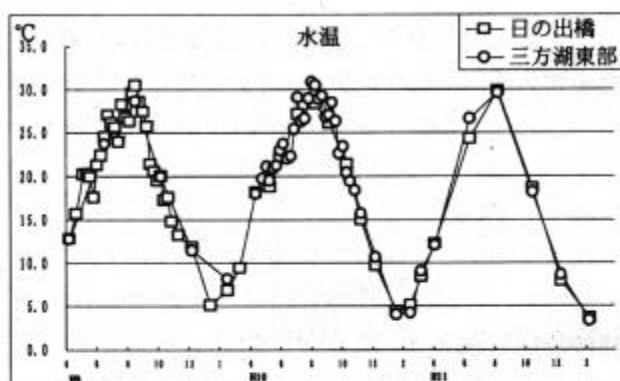


図4-1 水質の経時変化(1)

いによるものである。また、三方湖東部における経年変化は、平成9年から10年の夏季において約60～100 $\mu\text{g}/\ell$ で推移していたが11年度は最大でも50 $\mu\text{g}/\ell$ でありアオコ発生の規模が小さかったことを裏づけている。

塩素イオンは、両湖とも通常1,000 mg/ℓ 以内に推移しているが、10月から12月にかけての日の出橋は最高3,000 mg/ℓ にもおよぶ塩素イオンを示した。これは第2章の図2-2に示した開田橋に設けられた水門により海水の遡上が調節されているため、4～8月までの間は水門が閉じられているが9月には水門が開放され、その結果、10月～12月にかけて塩素イオンが上昇した。

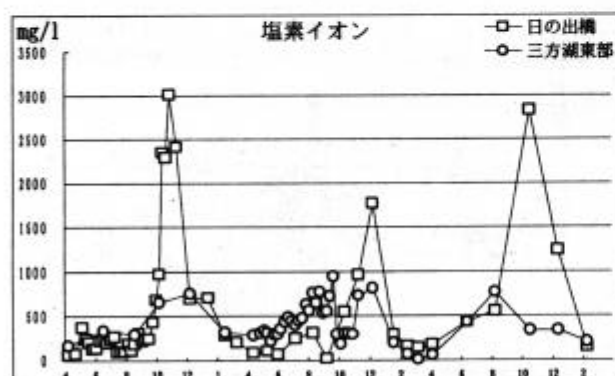
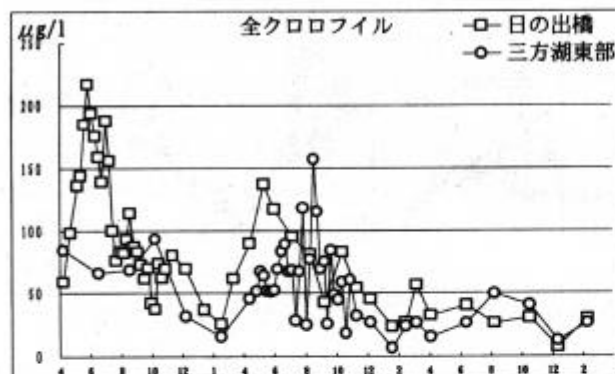
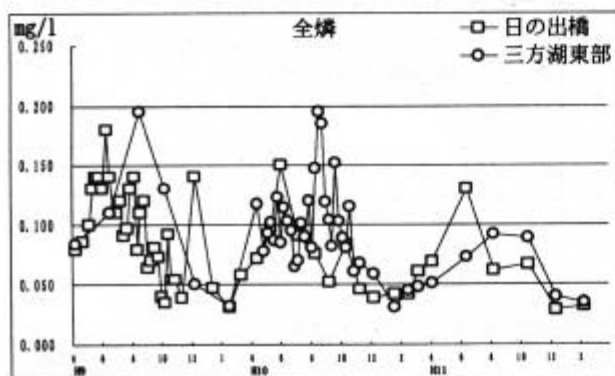


図4-1 水質の経時変化(2)

この塩素イオン濃度の違いが、両湖のプランクトン組成の違いとして現れている可能性があり、検討した結果を「第5章 藻類の培養試験によるアオコ増殖抑制因子の解明」に示した。

4. 3. 3 植物プランクトンの経時変化からみた両湖の違い

図4-2に、網別に集計した主な植物プランクトンである藍藻および珪藻、緑藻の経時変化を示した。また、表4-1には、3年間の細胞数の平均値を示した。

藍藻は、三方湖東部で多く出現する傾向があった。日の出橋も出現しているが細胞数の平均値は三方湖東部の1/5程度であった。

ちなみに、三方湖東部ではアオコ形成種の *Microcystis* 属および *Anabaena* 属が出現し、また、冬季には *Planktothrix* 属が多く出現した。アオコ形成種以外の藍藻では *Merismopedia* 属および *Coelosphaerium* 属、*Ocillatoria* 属が出現していた。

日の出橋では、アオコ形成種および非形成種が共に出現しているが出現量は少なくアオコを形成するまでにいたらなかった。

珪藻は、日の出橋で多く出現する傾向があった。三方湖東部も一時期多く出現した時もあったが細胞数の平均値は日の出橋の1/4程度であり、藍藻と逆の傾向が見られた。

ちなみに、三方湖東部では *Cyclotella* 属が、日の出橋では *Cyclotella* 属および *Skeletonema* 属の出現が多かった。

緑藻は、平成9年度および11年度は日の出橋が、やや高めであったが10年度はあまり差がなく、細胞数の平均値でもほぼ同じであった。

表4-1 植物プランクトンの細胞数

(3年間の平均値)

単位: cells/ml		
	日の出橋	三方湖東部
藍 藻	23,000	120,000
珪 藻	13,000	3,000
緑 藻	3,100	2,500
合 計	39,000	130,000

ちなみに、三方湖東部では *Sphaerocystis* 属および *Dictyosphaerium* 属、*Scenedesmus* 属が、日の出橋では *Dictyosphaerium* 属および *Scenedesmus* 属の出現が多かった。

三方湖東部における細胞数の合計値は130,000cells/mlであり、日の出橋における合計値39,000cells/mlと比べても非常に多く、特に藍藻の細胞数が非常に多いことがわかった。

三方湖東部における藍藻の経年変化は細胞数の平均値で見ると、平成9年度から11年度にかけて、85,000から120,000、190,000cells/mlと増加の傾向にあった。

特に、平成10年の8月には最高値525,000cells/mlを示しが、そのうちの約45%である239,000cells/mlが非アオコ形成種の *Merismopedia tenuissima* であった。

図4-3に藍藻のなかで、細胞中にガス胞を持つアオコ形成種の経時変化を示した。アオコ形成種においても、三方湖東部の経年変化は細胞数の平均値で見ると、79,000から83,000、107,000cells/mlと上昇傾向にあるが、藍藻の中のアオコ形成種の占める割合は、93%から69%、56%と減少する傾向にあった。

平成11年度は、アオコ形成種であっても優占種が *Microcystis* spp. から *Planktothrix* spp. に変化がみられ *Planktothrix* spp. の平均細胞数は、72,000cells/mlと多く、アオコ形成種の67%を占めていた。この時の *Planktothrix* spp. の最高値は10月で、267,000cells/mlであった。このことが、マット状アオコの出現がなかった一要因と思われる。

4. 3. 4 動物プランクトンの経時変化からみた両湖の違い

図4-4に、門別に集計した動物プランクトンである肉質鞭毛虫および繊毛虫、袋形動物、節足動物の経時変化を示した。

肉質鞭毛虫および繊毛虫は、三方湖東部および日の出橋とも夏季に出現しているが、出現頻度は単発的で統一性が無く、個体数の多い時でも1,000N/l程度であり3年間の平均値は100N/l以下であった。袋形動物および節足動物も三方湖東部および日の出橋で夏季に多く出現し、出現個体数は多かった。三方湖東部および日の出橋の地点の違いは変動がある

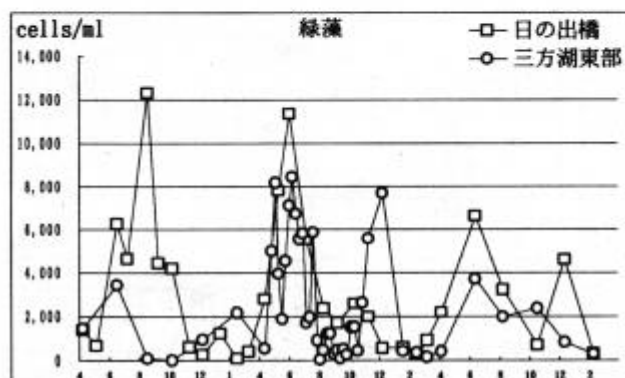
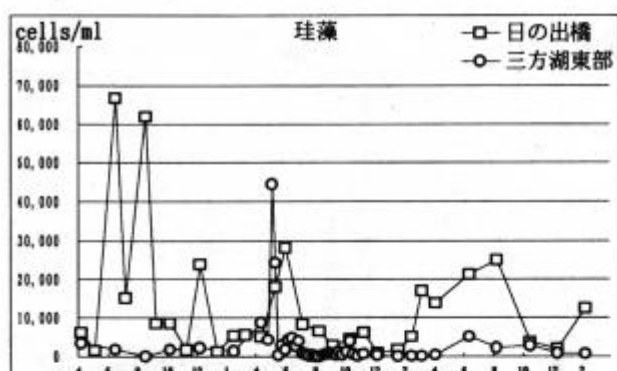
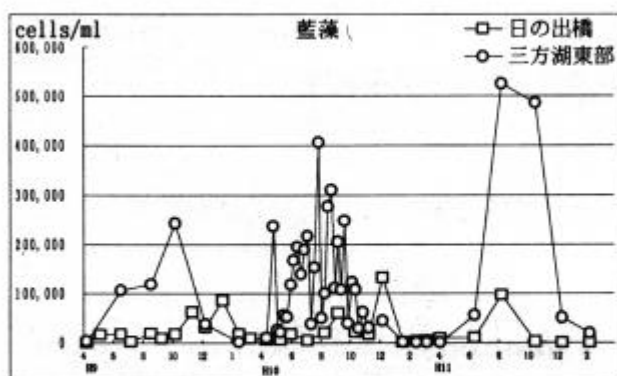


図4-2 植物プランクトンの経時変化

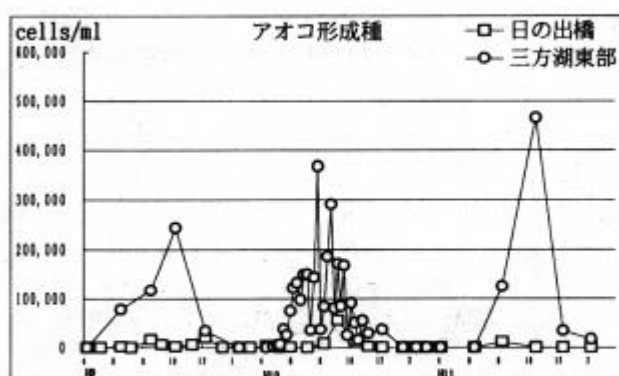


図4-3 アオコ形成種の経時変化

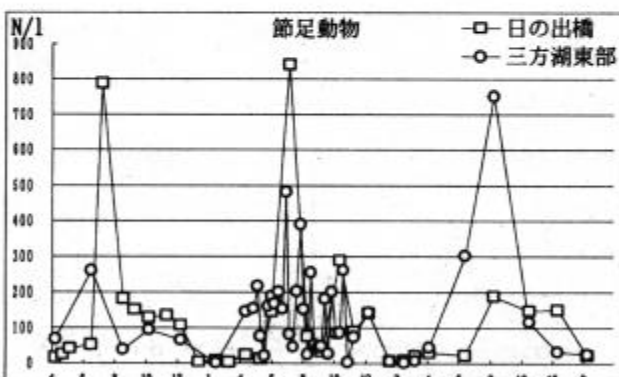
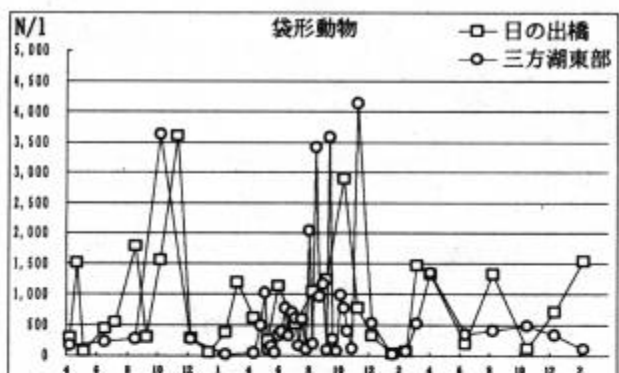
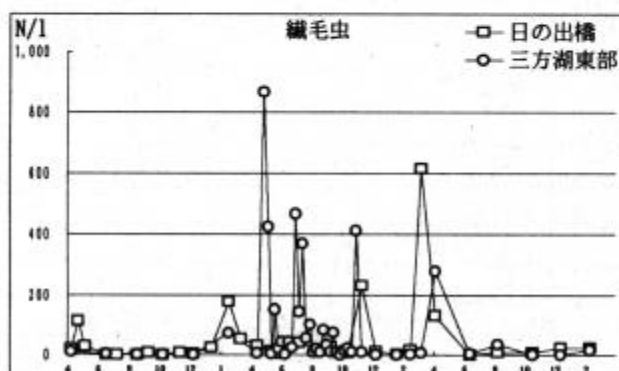
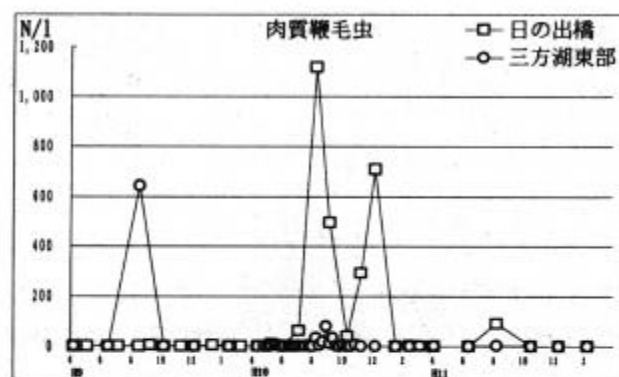


図 4-4 動物プランクトンの経時変化

ものの袋形動物の3年間の平均値で見ても三方湖東および日の出橋の個体数は730N/lおよび880N/lと、ほぼ同じで差は認められなかった。

また、袋形動物の出現個体数は、節足動物の両湖の平均個体数130N/lと比べて非常に多く、動物プランクトンの多くは、袋形動物が占めていることがわかった。

ちなみに、動物プランクトンの主な優占種は、三方湖東部は、動物性鞭毛虫綱および繊毛虫門の *Monodinium* 属および *Vorticella* 属が挙げられ、*Microcystis* 属群体の周囲に付着して大量に出現していることが確認された。

日の出橋では、肉質鞭毛虫の *Diffugia* 属および輪虫綱の *Brachionus* 属が出現し、両湖に共通に出現するプランクトンとしては、輪虫綱の *Keratella* 属および *Polyarthra* 属、*Synchaeta* 属と節足動物の *Nauplius* 属が優占した。

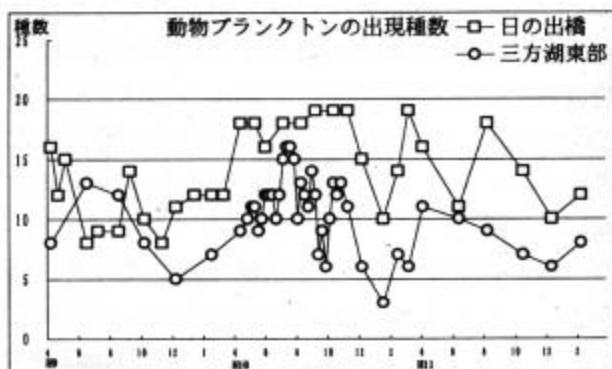


図 4-5 動物プランクトンの出現種数の経時変化

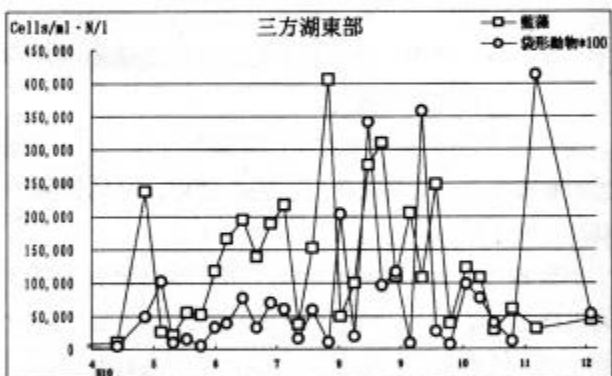


図 4-6 藍藻と袋形動物の経時変化

図4-5に動物プランクトンの出現種数の経時変化を示した。その結果、変動があるものの日の出橋が動物プランクトンの出現種数が多く、多様性に富んでいるとがわかった。

4. 3. 5 動植物プランクトンの変遷

図4-2の藍藻および図4-4の袋形動物の経時変化において、毎週調査を実施した平成10年度の区間を見ると、三方湖東部の動植物プランクトンの変化は、概ね1週間置きに増殖と衰退を繰り返していた。そこで、図4-6に三方湖東部における藍藻および袋形動物の変化を重ね合わせると、概ね藍藻が増殖した後に袋形動物が増殖するといった増殖と衰退が繰り返されていた。これは、袋形動物と藍藻との捕食関係を表しているように見える。

しかし、群体を形成している藍藻は動物プランクトンにより容易に捕食されないとされることから、両者の間に細菌等の介在を示す可能性も示唆された。¹⁾

4. 3. 6 多変量解析

北潟湖と三方湖の違いの原因を把握するためクラスタ分析および主成分分析を試みた。

4. 3. 6. 1 クラスタ分析

クラスタ分析は、説明変数の値だけで類似す

表4-2 クラスタ分析に用いたカテゴリー

カテゴリー	項目の詳細	カテゴリー	項目の詳細
地点	地点区別	他鞭毛	その他の鞭毛藻
採取月	採取月	ミドリムシ	ミドリムシ藻
水温	水温	緑藻	緑藻
透明度	透明度	肉鞭毛	肉質鞭毛虫
PH	pH	纖毛虫	纖毛虫
COD	COD	袋形動物	袋形動物
SS	SS	節足動物	節足動物
窒素	T-N, NH ₄ -N, NO ₃ -N等	A-ME1	A-Me(Na, K, Ca, Mg, Sr)
Cl	Cl	A-ME2	A-Me(Li, Ba, Mn, In)
DO%	DO%	A-AL	A-Al
クロロフィル	全クロロフィル	A-FE	A-Fe
燐	T-P, PO ₄ -P等	A-NI	A-Ni
日射量	全日射量	A-ZN	A-Zn
殺虫剤	殺虫剤	D-AL	D-Al
殺菌剤	殺菌剤	D-ME2	D-Me(Li, Ba, Mn, In)
除草剤	除草剤	D-BI	D-Bi
アオコ形成	藍藻(アオコ形成種)	D-FE	D-Fe
藍藻	藍藻(非アオコ形成種)	D-ME1	D-Me(Ne, K, Ca, Mg, Sr)
黄鞭毛	黄色鞭毛藻	D-TI	D-Ti
珪藻	黄色植物(珪藻)	D-ZN	D-Zn
渦鞭毛	渦鞭毛藻	D-SI	D-Si

樹状図 42 変数

最近隣法

1-r (相関係数)

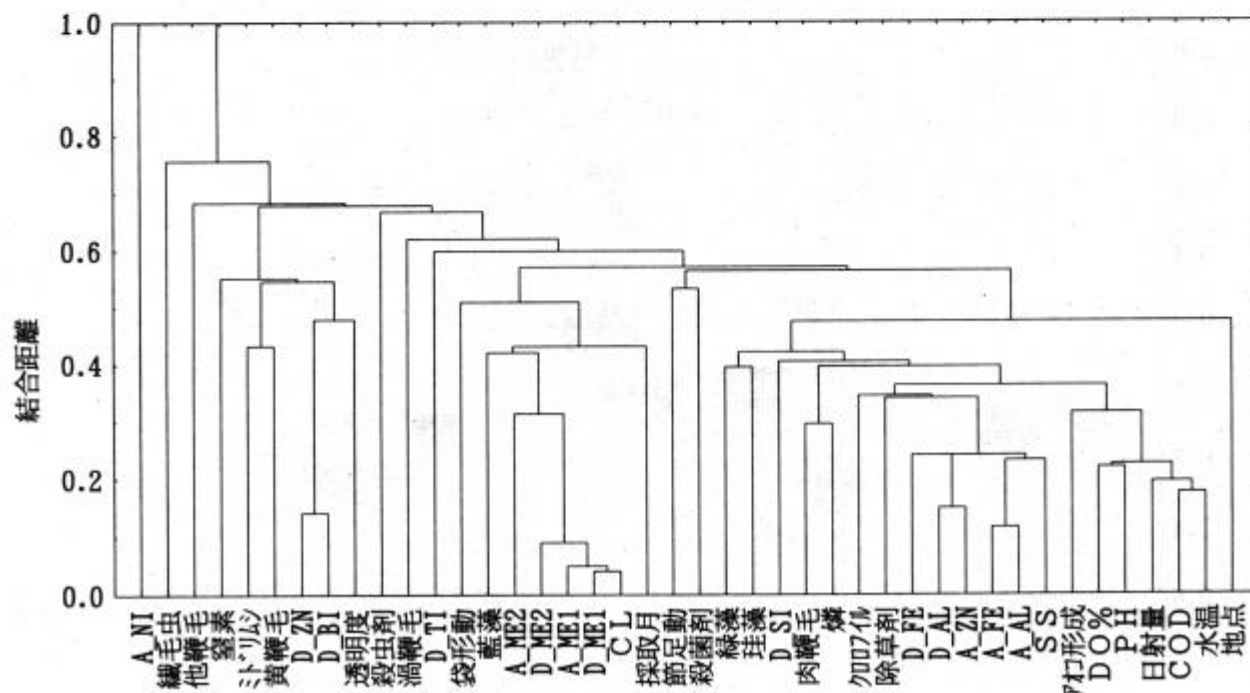


図4-7 クラスタ分析結果

① アオコ形成種は、水温およびCOD、日射量、pH、DO%と最も関係が深く、次いで、鉄、アルミニウム、亜鉛、除草剤から

④ 塩素イオンの変動は、海水に含まれる陽イオン (Na、K、Ca、Mg、Sr) の変動と連動し、さらに、採取月 (海面の年間変動)³⁾ に関係している。

分析結果の表記の仕方についてはクラスター分析と同じである。

因子1では、透明度は正の相関が強く、負の相関領域には、富栄養化の指標である珪藻および緑藻、COD、SS、燐等が集まり湖沼水質の汚濁の状態を表していると推察できた。すなわち、アオコ形成種は、Aゾーン内に含まれる項目に影響を受けやすく、クラスター分析で得られた水温およびCOD、日射量、pH、DO%との関係とも概ね一致した。

因子2では、塩素イオンや海水中に含まれる陽イオン(Na、K、Ca、Mg、Sr)は正の相関が強く、特に、Bゾーンにこれらの項目が集中していることから海水の潮汐現象による影響を表していると推察できた。

ただし、第二主成分までの累積寄与率は35%と通常主成分分析で検討する場合の値より低かった。

4. 3. 7 底質

底質中に含まれる金属が湖水中の微量金属濃度に影響を与えることも想定されるので、三方湖東部および北潟湖南部の底質中の金属(珪酸等無機物質を含む)について調査した。

表4-4 間隙水の分析結果

	三方湖東部	北潟湖南部
Al (mg/ℓ)	0.08	2.42
Ba (mg/ℓ)	0.05	0.15
Be (mg/ℓ)	<0.001	<0.001
Bi (mg/ℓ)	<0.02	<0.02
Cd (mg/ℓ)	<0.001	<0.001
Co (mg/ℓ)	<0.002	<0.002
Cr (mg/ℓ)	<0.02	<0.02
Cu (mg/ℓ)	<0.1	<0.1
Fe (mg/ℓ)	0.2	2.1
Ga (mg/ℓ)	<0.005	<0.005
In (mg/ℓ)	0.06	0.03
Mn (mg/ℓ)	1.10	0.72
Ni (mg/ℓ)	<0.005	<0.005
Sr (mg/ℓ)	0.19	0.10
Ti (mg/ℓ)	<0.05	<0.05
Zn (mg/ℓ)	0.007	0.038
Li (mg/ℓ)	0.007	0.005
Ca (mg/ℓ)	16	7
K (mg/ℓ)	13	6
Mg (mg/ℓ)	28	10
Na (mg/ℓ)	210	62
Si (mg/ℓ)	11	18

表4-3 蛍光X線分析結果

単位 (%)

項 目	三方湖東部	北潟湖南部
Fe ₂ O ₃	17.1	12.5
BaO	2.34	—
TiO ₂	1.51	0.991
MnO	0.202	0.130
ZrO ₂	0.068	0.119
V ₂ O ₅	0.066	—
ZnO	0.060	0.053
CuO	0.050	0.040
NiO	0.026	0.048
Rb ₂ O	0.022	0.011
PbO	0.019	0.007
SrO	0.010	0.033
Y ₂ O ₃	0.008	0.048
Br	0.004	0.006
SiO ₂	78.5	86.0
合 計	100	100

表4-5 底質の分析結果

	三方湖東部	北潟湖南部
Al (mg/g)	<0.002	0.48
Ba (mg/g)	0.0015	0.0033
Be (mg/g)	<0.0001	<0.0001
Bi (mg/g)	<0.0006	<0.0006
Cd (mg/g)	<0.0001	<0.0001
Co (mg/g)	<0.0001	<0.0001
Cr (mg/g)	<0.0006	<0.0006
Cu (mg/g)	<0.003	<0.003
Fe (mg/g)	0.004	0.292
Ga (mg/g)	<0.0002	<0.0002
In (mg/g)	0.0016	0.0009
Mn (mg/g)	0.034	0.027
Ni (mg/g)	<0.0002	<0.0002
Sr (mg/g)	0.006	0.003
Ti (mg/g)	<0.002	<0.002
Zn (mg/g)	0.0002	0.0013
Li (mg/g)	0.0002	0.0007
Ca (mg/g)	0.47	0.22
K (mg/g)	0.37	0.18
Mg (mg/g)	0.84	0.30
Na (mg/g)	6.56	1.64
Si (mg/g)	<0.003	<0.003
水分含量 (%)	5.14	6.80
強熱減量 (%)	11.5	16.1

4. 3. 7. 1 底質の主な成分

北潟湖南部および三方湖東部から採取した底質の主な成分を知るために蛍光X線分析を実施し、各元素の酸化物量の割合として求めた。結果を表4-3に示した。

2地点のデータのための詳細な検討はできないが、三方湖東部および北潟湖南部の項目間の相関係数は、0.997と非常に良かった。また、生物の増殖に関係が深いと考えられる金属の鉄およびマンガン、亜鉛、銅、珪素について三方湖東部と北潟湖南部の濃度比を求めると0.9から1.6であり、2地点間にあまり違いは無いと推察した。

4. 3. 7. 2 底質の微量元素

三方湖東部および北潟湖南部から採取した底質および底質の間隙水について微量元素元素をICP発光分析を用いて求めた。

結果を表4-4、5に示した。「4. 3. 7. 1 底質の主な成分」と同様に項目間の相関係数を求めると、間隙水で0.972、底質で0.916であった。

北潟湖南部と三方湖東部における濃度比を見ると、間隙水では、鉄が10倍、亜鉛が5.4倍、アルミニウムが30倍と高く、底質でも鉄が78倍、亜鉛が8倍、アルミニウムが240倍（アルミニウムは、三方湖の検出限界値で計算）といずれも北潟湖南部の濃度が高いことがわかった。

これら微量元素は、植物プランクトンの増殖に必要な元素であり、特に鉄は、アオコ形成種である *Microcystis* spp. にとって重要な元素の一つである。

しかし、今井らは⁴⁾、霞ヶ浦から分離・精製されたフルボ酸を用いて、溶存フミン物質の *Microcystis aeruginosa*（以下、*M. aeruginosa*と記す）の増殖に及ぼす影響を評価し、フルボ酸は *M. aeruginosa* の増殖を著しく抑制したとしている。

このことから、北潟湖南部において底質および間隙水中の鉄濃度が高いにもかかわらずアオコの発生が見られない原因としては、鉄の錯化（フミン物質）物質の濃度が高い可能性も考えられ、アオコ除去技術を確立するためには、鉄、アルミニウム、亜鉛など、金属のフミン物質の錯化状態の把握が必要である。

4. 4 まとめ

北潟湖・三方湖の富栄養化による汚濁現象の違いを水質の経時変化および動植物プランクトンの経時変化と変遷から求めた。さらに、多変量解析と底質分析からもアオコ増殖の制限に関わる因子を解析した。

その結果、

- ① 日の出橋と三方湖東部の塩素イオン濃度は、10月～12月にかけて日の出橋の値が極端に高く、この塩素イオンの違いが、アオコ発生状況の違いとして現れた。
- ② 動植物プランクトンの変遷から、袋形動物と藍藻との捕食関係を表しているように見えた。しかし、群体を形成している藍藻は動物プランクトンにより容易に捕食されないとされることから、両者の間に細菌等の介在を示す可能性も示唆された。
- ③ アオコ形成種は、水温およびCOD、日射量、pH、DO%と最も関係が深く、次いで、鉄、アルミニウム、亜鉛、除草剤からも影響を受けているものと推察できた。
- ④ 三方湖と北潟湖との地点の違いは、水温等や鉄等のグループから外れ、影響が少ないと解析された。
- ⑤ 窒素、燐の影響度は、燐がアオコ形成種および緑藻、珪藻のグループに属しているのに対し、窒素は独立しているため、両湖の制限因子は燐の可能性が強い。
- ⑥ 塩素イオンの変動は、海水に含まれる陽イオン（Na、K、Ca、Mg、Sr）の変動と連動し、さらに、採取月（海面の年間変動）に関係している。
- ⑦ 多変量解析および底質中の金属分析結果から三方湖と北潟湖のアオコ発生状況の違いは、鉄、亜鉛の濃度に影響を受けることが推察された。

参考文献

- 1) 中野伸一：湖沼有機物動態における微生物ループでの原生動物の役割, 日本生態学会誌, 50, pp. 41-54, 2000
- 2) 新村秀一：パソコン楽々統計学, (株) 講談社, pp. 148-180, 1998
- 3) 加藤賢二ほか：福井県の汽水湖における湖水面の変動関数について, 福井県環境科学センター年報, 22, pp. 56-60, 1992
- 4) 今井章雄ほか：溶存フミン物質の藍藻 *Microcystis aeruginosa* の増殖に及ぼす影響, 水環境学会誌, 22, 7, pp. 555-560, 1999