

第1章 緒 言

1. 1 はじめに

三方五湖と北潟湖は日本海に面し、潮位の変動に影響を受ける汽水湖である。この汽水湖は、水質の変化と多様性のため豊富な動植物の生態がみとめられ、貴重な生態系として重要視されてきた。とくに、三方五湖は、その水質の違いによって四季折々のさまざまな色合いを見せ、優れた景観を呈することから若狭湾国定公園に指定されている。また、北潟湖は、吉崎御坊への歴史的な舟の道として栄え、北端の鹿島の森と海岸の丘陵に囲まれたのどかな湖である。また、両湖ともオジロワシやオオワシの飛来する貴重な自然である（図1-1、1-2）。

近年、水質の富栄養化が進み、動植物プランクトンが増殖して水質の悪化が著しい。県ではこうした湖沼水質を改善するため、各種下水道の整備をはじめ、生活雑排水対策、農業排水対策等の負荷源対策や、底質の浚渫や水生生物の栽培等の湖内対策を実施してきたが、なかなか水質改善に結びつかない。

特に、三方湖と北潟湖は富栄養化の程度は同じレベルにありながら、北潟湖はアオコがほとんど発生しないのに対し、三方湖では例年著しいアオコの発生がみられ、その景観上の問題や腐敗したときの悪臭の発生に加えて、最近になってアオコの毒素も問題となっており、両湖のアオコ発生機構の違いについて解明が求められている。

環境科学センターでは、平成9年と10年の5月から10月まで、両湖のプランクトンの違いと変化を毎週精密調査し、合わせて水質調査も実施した。また、そのデータについて11年に多変量解析等による解析を行い、さらに12年には藻類の培養試験によるアオコ増殖抑制因子の解明を実施した。

これらの成果について、湖沼水質保全対策事業・アオコ除去技術開発事業報告書としてまとめたので報告する。

1. 2 三方湖と北潟湖の概要

1. 2. 1 三方湖と北潟湖の水質の状況

両湖とも春になると気温とともに水温が上がりはじめ、夏に最大値を示して冬に最小値をとる規

則正しい変化をし、水温の値もほぼ類似している。この水温の上昇に伴いプランクトンの活動が活発になる。

また、汽水湖であるため日本海の水位に従って海水が遡上し、春から秋にかけて塩分濃度が上がり、秋を過ぎると低下し始め、冬に降雨による陸からの押し出し効果も重なり最低値となる。ただし、北潟湖は3月末から8月末までの間、開田橋樋門による海水の遡上防止により、この間の塩分の上昇は少なく、9月の樋門開放とともに急激に海水が遡上する。

塩分濃度は、三方湖は奥部にあるため最大値は塩素イオン濃度で1,000から2,000mg/ℓ程度であるが、北潟湖では2,000から6,000mg/ℓと高くなり、年度によりその変動も大きい。しかし、冬には両湖とも100mg/ℓ以下の淡水になる。

プランクトンの活動によりCODやクロロフィルが増加するが、三方湖では水温の最も高い夏に最大値を示すのに対し、北潟湖では初夏の6月に最大値を示すことが多い。

富栄養化の指標となる全窒素と全リンも同様の傾向がある。ただし、北潟湖南湖の窒素化合物については冬期に特に多くなり、全窒素濃度も最大値を示すことが多い。

1. 2. 2 アオコの発生状況

水質の富栄養化が進行すると動植物プランクトンが増殖して水の華を形成し、景観上の問題や腐敗したときの悪臭やカビ臭が問題になり、最近になってアオコの毒素も問題となっている。調査対象の三方湖と北潟湖も富栄養化が進行し、水の色も緑から黄褐色を呈しており、観光客や周辺住民の苦情も絶えない。しかし、両湖ともCODや窒素、リン、クロロフィルなど富栄養化の程度は同じレベルにありながら、特に藍藻が水面に膜状ないしスカム状に浮遊するいわゆるアオコを形成する状況が異なっている。そこで、これまでの調査記録からアオコの発生状況を述べる。

北潟湖は、昭和48年に調査を開始して以来、プランクトンの組成は珪藻の占める割合が多く一年中褐色から緑褐色を呈している。年によってOsci-



图 1-1 三方五湖

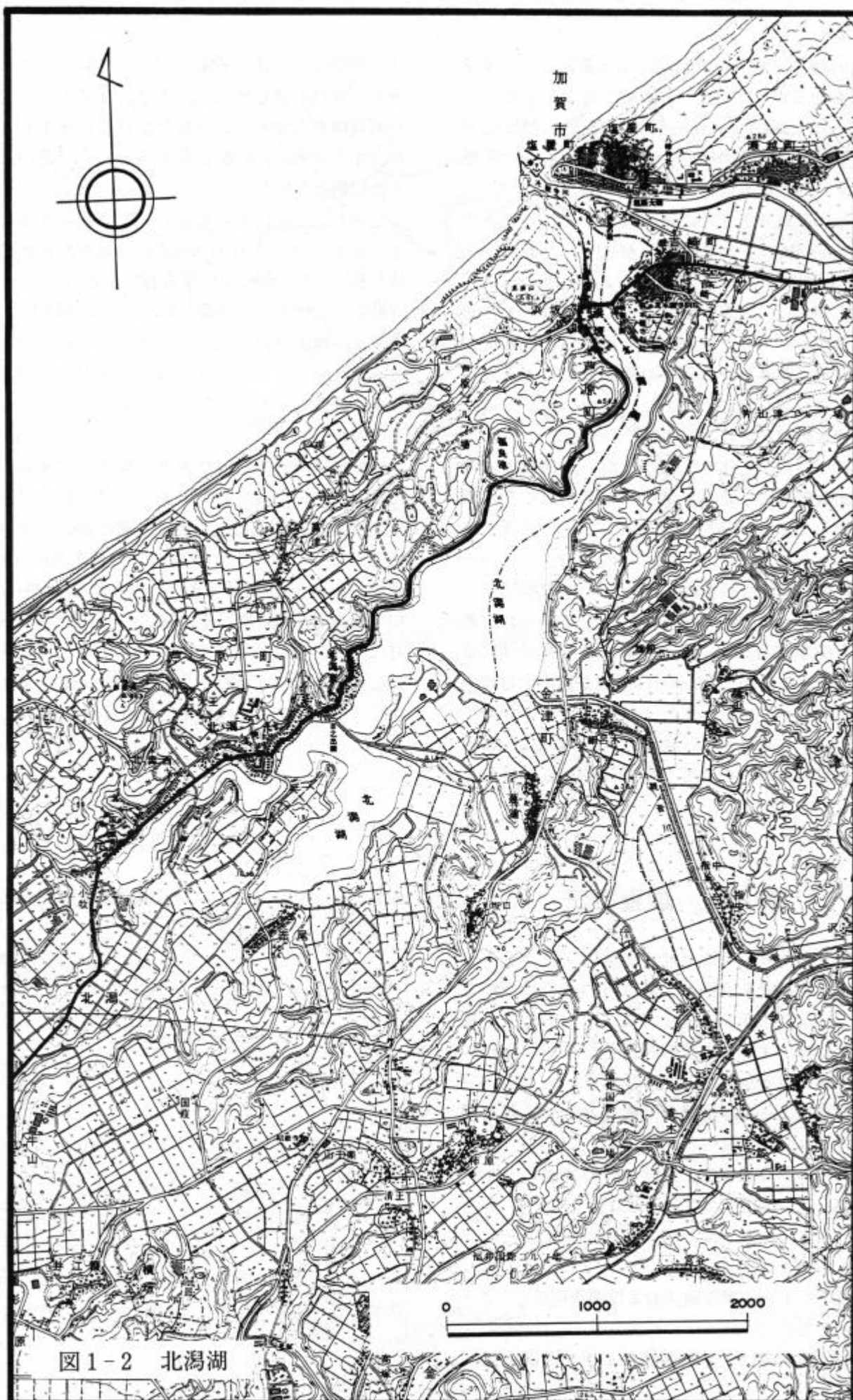


图 1-2 北潟湖

*Ilatoria*属や*Phormidium*属による藍藻が優占することもあるが、アオコの原因となることの多い*Microcystis*属や*Anabaena*属はほとんど出現せず¹⁾、これら藍藻の密度も三方湖よりもかなり低くアオコの形成もほとんど認められたことがない。ただし、平成9年9月に湖心部でかすかな筋状の*Anabaena*属のアオコ形成²⁾が見られた記録がある。

三方湖では、調査の歴史も古くアオコ発生と思われる記述があり、菊池³⁾や宮地⁴⁾らによれば、昭和6年に藍藻類による水の華が繁殖し大きな塊となって浮遊したこと、また、昭和31年9月には藍藻の水の華が現れ透明度が下がったこと⁵⁾が記述されているが具体的な報告はない。地元の人では「20数年前に早瀬川と浦見川を深くして、10数年前からアオコが出るようになった。」との話がある⁶⁾。

最初の具体的な報告は、青木ら⁷⁾の昭和60年7月に*Microcystis*属によるアオコ発生があり、61年7月と63年10月に*Anabaena*属によるアオコに変わり、61年ごろから*Microcystis*属が減少する傾向があると述べている。また、62年度はアオコ発生は見られず、非アオコ形成種である*Lyngbya*属の発生が見られた。その後、規模は異なるが例年ア

オコが発生し、特に平成3年⁸⁾と5年⁹⁾のアオコ発生の規模が著しかった。また、9年のアオコ発生も規模が大きく、三方湖と水月湖に発生したアオコが7月末に日向湖と久々子湖にまで流出し大きな問題となった¹⁰⁾。

しかし、平成11年に入ってアオコがほとんど発生しなくなり、7月に*Anabaena*属がかすかに点状や筋状に局部的に存在する程度であった。

発生したアオコの種類も*Microcystis*属をはじめ、*Anabaena*属や*Planktothrix*属等いろいろであった。これらのアオコ以外にもプランクトンが異常に多くなることもあったが、アオコを形成することとはなかった。

最も規模の大きかった平成5年度のアオコの発生状況については⁹⁾、例年より水温が低く7月中旬の降雨の後*Planktothrix*属が湖全面にマット状に発生し、その後プランクトンの種を*Anabaena*属や*Microcystis*属に変え、色相も変えながら8月中旬過ぎまで続いた。その後、一旦弱まった後9月に入って再び活発となり、*Anabaena*属を中心として*Microcystis*属や*Planktothrix*属のマット状やスカム状アオコの大発生が10月まで続いた。

第2章 調査方法

平成9年から11年にかけて湖沼のプランクトン調査と水質調査を実施し、これらの結果についてアオコの発生因子の推定を行なった。また、平成12年度にはアオコの増殖抑制因子を解明するために、藻類の培養試験による検討を加えた。さらに、高等植物による湖水改善の可能性として、北湯湖におけるヒシの水質への影響について検討した。

これらの調査地点を三方湖について図2-1、北湯湖について図2-2に示した。

2.1 プランクトン調査

プランクトンの調査地点および調査回数を表2-1に示した。

また、11年度は三方湖東部および北湯湖南部、

表2-1 プランクトンの調査地点および調査回数

調査地点	9年度		10年度	
	調査回数	備考	調査回数	備考
三方湖	東部	6	33	5~10月は週1回
	西部	5	12	月1回
	成出	12	12	月1回
	南部		12	月1回
	北部		12	月1回
北湯湖	南部	33	5~10月は週1回	
	湖心	12	月1回	
	日の出橋	12	12	月1回
	昭和橋	12	月1回	

表2-2 水質調査地点および調査回数

調査地点	9年度		10年度	
	調査回数	備考	調査回数	備考
三方湖	東部	6	33	5~10月は週1回
	西部	6	12	月1回
	成出	12	12	月1回
	南部		12	月1回
	北部		12	月1回
北湯湖	南部	33	5~10月は週1回	6
	湖心	33	5~10月は週1回	6
	日の出橋	33	5~10月は週1回	12
	昭和橋	33	5~10月は週1回	6

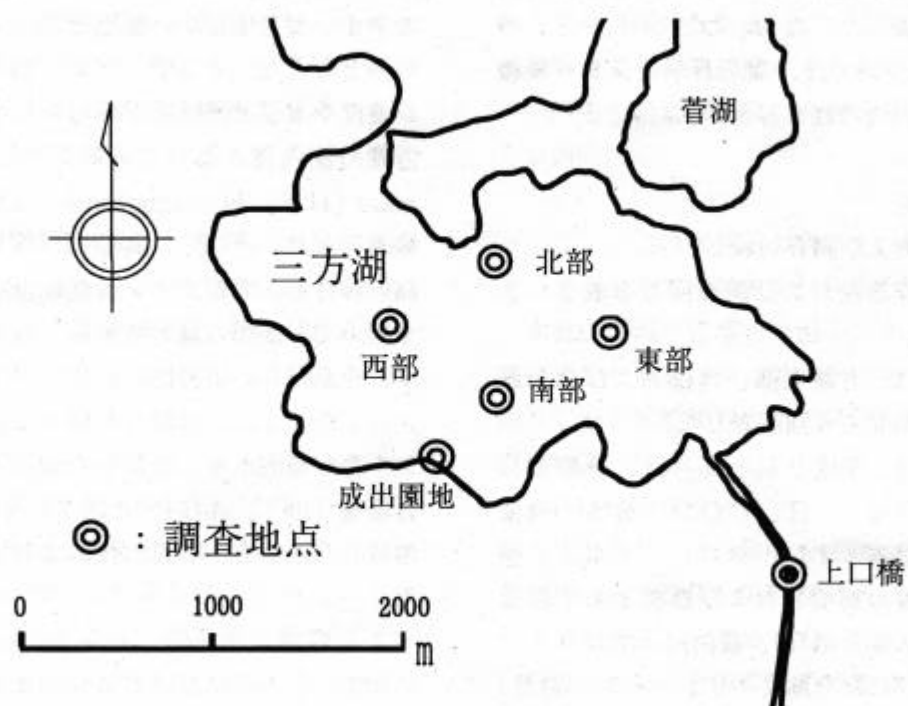


図 2-1 三方湖



図 2-2 北潟湖

日の出橋で常時監視にあわせて6回調査し、北潟湖湖心で2回調査した。なお、プランクトンの調査結果の詳細については、環境科学センター年報に報告しているのでこれを参照されたい。²⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾

2. 2 水質調査

(1) 調査地点および調査回数

水質調査の調査地点および調査回数を表2-2に示した。

また、11年度は三方湖東部、西部および北潟湖で常時監視にあわせて6回調査した。

(2) 調査項目は、平成9年と10年は、一般項目として水温、透明度、pH、COD、SS、全窒素、全燐のほか塩素イオン、クロロフィル、各態の窒素および燐等の28項目および農薬として殺虫剤(ジクロルボス等8項目)、殺菌剤(クロロネブ等11項目)ならびに除草剤(モリネート等17項目)の計36項目、その他にアルミニウムや鉄、カルシウム等の金属イオン22項目について測定した。なお、11年度は、一般項目のみである。

2. 3 藻類の培養試験によるアオコ増殖抑制因子の解明調査

北潟湖では毎年9月から、湖の北部に位置する開田橋の水門が開き、海水が湖に遡上して、10月から12月の間は湖沼水中の塩素イオン濃度が急激

に上昇する。この現象と冬期の低水温が、北潟湖でアオコが発生しない要因となっているのではないかと考えた。そこで、アオコの増殖と塩素イオン濃度や水温との関係を明らかにするために、三方湖で優占種となっている *Microcystis aeruginosa* (以下、*M. aeruginosa*) を使用して培養試験を行った。そして、実際に、塩素イオン濃度が高い10月と、塩素イオン濃度が低い8月の湖沼水を用いて、藻類の最大増殖量(以下、AGPと記す)を測定し、阻害性の有無、およびその影響を比較した。また、採取した様々な植物プランクトンを含む湖沼水を、滅菌した湖沼水に植種する混合培養(以下、AGP^Mと記す)を行い、優占的に増殖した藻類を、培養前後および湖沼間で比較した。

2. 4 北潟湖におけるヒシの水質への影響について

北潟湖南湖の南部、日の出橋、昭和橋および塩尻橋において、平成10、11年にヒシの消長を観察して水質測定値との比較を行い、高等植物による湖水改善の可能性を検討した。

調査期間 平成10年4月から12月および11年4月から12月

なお、詳細については、環境科学センター年報に報告しているので参照されたい。¹⁴⁾

第3章 結果の概要

3. 1 プランクトン調査

3. 1. 1 植物プランクトン

三方湖のプランクトンは6月から10月の暖候期に密度が高くなり、北潟湖は逆に冬期や初夏の時期に高く、その密度は発生時期によっても異なるが、三方湖の方が北潟湖の約3倍程度と高かった。

プランクトンの種類は、三方湖では5月と2、3月に珪藻や緑藻が一部に増えるが、その他の時期には藍藻がほとんどを占めている。これに対し、北潟湖では5月から7月にかけて珪藻が優占し、8月から12月にかけては密度は小さいが藍藻と珪藻が増加する。特に8月から9月に藍藻と珪藻、

緑藻が同程度の密度となり、それ以外の時期にはほとんど藍藻が優占し、北潟湖の方が三方湖よりプランクトンの多様性に富んでいる。

三方湖の大半を占める藍藻については、5月のはじめに非アオコ形成種である *Coelosphaerium* 属が優占したが、その後 *Microcystis* 属が増加し8月から9月にかけて優占種になってアオコを形成した。*Microcystis* 属の優占する前の6月から9月にかけて *Anabaena* 属が比較的多くなり8月には優占種となった。10月以降には *Planktothrix* 属が増加し、冬期はこれが優占種となる。

他方、北潟湖では5月と7月、12月から3月の

非アオコ形成種である *Oscillatoria* 属が優占し、*Planktothrix* 属も密度は低いが増加する。このように、三方湖では藍藻のアオコ形成種がほとんどを占めるのに対し、北潟湖では藍藻でも非アオコ形成種が多く、珪藻や緑藻も出現するのが特徴的であった。

プランクトンの持続時間は、夏期に大量に発生した場合に、両湖ともほとんどの場合約1週間以内であり、比較的早いサイクルで消長が起きている。

3. 1. 2 動物プランクトン

三方湖の動物プランクトンは袋形動物が多く、4月から7月にかけて肉質鞭毛虫が優占するのが目立った。総個体数のうち最も優占率の高いものは調査ごとに異なっており、特徴的な動物プランクトンとして鞭毛虫と繊毛虫の *Monodinium* 属と *Vorticella* 属がある。北潟湖では袋形動物の輪虫綱が出現個体数の大半を占め、その出現種数も三方湖より多く、その増殖したときのピークは輪虫の特定種と関係付けられ、*Brachionus* 属の3種が特徴的だった。

優占種および出現種の違いからも、両湖の動物プランクトン相における輪虫綱の重要性では、北潟湖は三方湖に比較して大幅に上回っているものと考えらる。

また、三方湖でアオコの発生していた時期に肉質鞭毛虫門の鞭毛虫綱が100%近い優占率を占め、アオコの *Microcystis* 属群体の周辺に存在し、*Microcystis* 属の単体細胞を取り込んでいるところが観察され、アオコの減少や衰退に関係することが推定された。なお、動物プランクトン増殖の持続時間は、大量に増殖した夏期のときは植物プランクトンの藍藻と同様に約1週間程度である。

3. 1. 3 動物プランクトンと植物プランクトンの関係

三方湖の動植物プランクトンの周期を比較すると、大量に増殖した8月から9月の藍藻と袋形動物はほぼ1週間であった。これはプランクトン調査を毎週行なった貴重な結果である。しかもそのピークが1週間ずれていることが多く、動物プランクトンと植物プランクトン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考えられ興味深い。

3. 2 湖沼の水質およびアオコ発生因子の解析

3. 2. 1 湖沼の水質からみた両湖の違い

水温は湖沼の物理的な因子であり、プランクトンの発生や増殖に深い関係があるが、両湖とも冬期5℃から夏期30℃の間で規則的に変化しており、湖沼の違いはなかった。

pHは植物プランクトンの光合成のようすを示す指標と成り、1日間でも変動が予測され、pH 7~10の間で推移し明瞭な傾向はないが、三方湖の方が北潟湖より高めであった。

CODおよび全燐の値の変動は類似しており、両湖の富栄養化レベルが同程度であることを示している。全窒素濃度は、冬期に北潟湖南湖で明らかに高くなるが、これは硝酸態窒素が特に増加し、有機態窒素に変換されずに残っているためであり、この時期を除いた春期から秋期の全窒素の値はほぼ同じである。

クロロフィルは、北潟湖の方が4月から6月にかけて高い傾向を示したが、この時期のプランクトンの組成が異なるためで、三方湖に比較して緑藻と珪藻が多いことによると考えられる。

塩素イオンは、両湖とも通常1,000mg/ℓ以内で推移しているが、10月から12月に日の出橋で3,000mg/ℓにも及んだが、これは開田橋に設けられた海水遡上防止の水門が開放されるためである。この高い塩分のプランクトン組成に対する影響の可能性について、「第3章2 藻類の培養試験によるアオコ増殖抑制因子の解明」に記述した。

3. 2. 2 アオコ発生因子の解析

三方湖のアオコ発生因子を解明するために、平成9年と10年度の調査項目についてクラスター分析および主成分分析を行なった。

この結果、アオコ形成種の増殖は、水温、COD、日射量、pH、DO%と関係が深く、次いで鉄、アルミニウム、亜鉛ならびに除草剤からも影響を受けていると認められた。しかし、北潟湖と

三方湖との地点の違いは、水温等や鉄等のグループからはずれるため、影響が小さいと解析されたが、今後さらに生物学的な検討が必要である。

また、アオコ形成種と緑藻、珪藻は磷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、両湖の制限因子は磷の可能性が高いことがわかった。これは石田らのAGPの結果¹⁵⁾¹⁶⁾や山口らのMBODの結果¹⁷⁾と一致している。

多変量解析および底質中の金属分析の結果から、三方湖と北潟湖のアオコ発生状況の違いは鉄の錯化物質(フミン物質)の影響を受けている可能性も推察された。

3. 3 藻類の培養試験によるアオコ増殖抑制因子の解明

3. 3. 1 *M. aeruginosa*の増殖に及ぼす塩素イオン、温度の影響

塩素イオン濃度1,250mg/l以下では*M. aeruginosa*は順調に増殖し、2,500mg/lを超えると増殖量や比増殖速度が低下し、5,000mg/lではほとんど増殖がみられなかった。塩素イオン濃度2,500mg/l以上では、海水より塩化ナトリウムで調整した方が増殖阻害率は高くなり、海水中には塩素イオンによる増殖阻害を緩和する物質が含まれている可能性が考えられた。

温度の影響については、30℃では盛んに増殖し、20、25℃でも30℃より低めに推移したものの、順調に増殖した。15℃では微増し続けたものの、最大増殖量は極端に減り、20℃以上が*M. aeruginosa*の増殖に適した温度であると考えられた。

三方湖(三方湖東部)の塩素イオン濃度は、年間平均468mg/lと低く、水温が20℃を超える5月から10月が*M. aeruginosa*の増殖期間であるのに対し、北潟湖では10月から11月の塩素イオン濃度は2,500mg/lを超え(北潟湖心)、その期間の増殖阻害率は42%以上と予想されるため、増殖が可能なのは5月から9月と推測された。

3. 3. 2 AGP、AGP^M試験

AGP試験では、8月は北潟湖より三方湖で塩素イオン濃度1840mg/lと比較的高かったにも関わらず、栄養塩を添加した北潟湖のAGPは三方湖より少なくなり、三方湖の高い塩素イオン濃度よ

り、北潟湖に存在する塩素イオン以外の増殖抑制物質が影響していた可能性が考えられた。10月の塩素イオン濃度は、三方湖の1,890mg/lに比べ、北潟湖では4,540mg/lと高く、栄養塩を添加した北潟湖のAGPは三方湖より非常に少なくなった。この塩素イオン濃度における増殖阻害率はそれぞれ28%、88%となり、これを反映していると考えられた。

AGP^M試験では、8月の両湖で培養後の増殖量や出現数にあまり差がみられなかったが、10月にはやや差がみられ、8月よりは両湖で性質が異なっていると示唆された。

3. 4 高等植物による湖水改善の可能性

—北潟湖におけるヒシの水質への影響について—
三方湖の東部湾内部および北潟湖南湖の奥部には春から秋にかけてヒシが繁殖するが、浅い湖では、濁度の高い状態と高等植物が繁殖して透明度の高い状態の二つの平衡状態をとる可能性があり¹⁸⁾、この関係を湖沼の制御に利用する可能性¹⁹⁾が知られている。

そこで、北潟湖昭和橋のヒシの繁殖状況を調査した。その結果、ヒシは5月から10月にかけて繁殖し、CODやSS、全窒素、全磷が他の地点より低下した。これはヒシの繁殖により日光が遮られるためにプランクトンの増殖を抑えられ、また、栄養塩がヒシにより吸収されたためであると考えられ、高等植物ヒシによる透明度の高い平衡状態を維持したと考えられた。

しかし、この平衡状態は継続することなく、秋に枯損した後、前の状態に戻ってしまった。したがって、ヒシによる透明度の高い平衡状態を保つためには、ヒシの分解物を湖水に回帰させないために秋に枯損する前に収穫することにより可能となることが考えられる。

参考文献（第1章～第3章）

- 1) 青木啓子ほか：北潟湖の水質と植物プランクトンについて，福井県公害センター年報，17，115-124，1987.
- 2) 片谷千恵子ほか：北潟湖・三方湖におけるプランクトンの季節変動について（第1報），環境科学センター年報，27，90-96，1997.
- 3) 菊池健三：水月湖に於ける動物性プランクトンの垂直分布に及ぼす溶解酸素の影響，陸水学雑誌，1，32-37，1931.
- 4) 宮地伝三郎：死層を持つ若狭の水月湖，理学界，30，289-303，1932.
- 5) 福井県水産試験場事業報告，昭和31年12月，福井県
- 6) 青木啓子ほか：三方湖に発生したアオコについて，福井県公害センター年報，18，135-137，1988.
- 7) アオコ発生解明調査報告書，環境センター，1995年3月.
- 8) 青木啓子ほか：福井県三方湖で発生したアオコ，環境センター年報，21，78-88，1991.
- 9) アオコ発生解明調査報告書，環境センター，1995年3月.
- 10) 第2回三方五湖水利等調整緊急対策検討委員会ワーキング会議資料，平成9年9月.
- 11) 片谷千恵子ほか：北潟湖・三方湖におけるプランクトンの季節変動について（第3報），環境科学センター年報，28，70-77，1998.
- 12) 松崎雅之ほか：北潟湖・三方湖におけるプランクトンの季節変動について（第2報），環境科学センター年報，27，97-103，1997.
- 13) 松崎雅之ほか：北潟湖におけるプランクトンの季節変動について（第4報），環境科学センター年報，28，78-88，1998.
- 14) 塚崎嘉彦ほか：北潟湖におけるヒシ（*Trapa* sp.）の水質への影響に関する研究，環境科学センター年報，29，103-106，2000.
- 15) 石田敏一ほか：A G Pによる北潟湖の富栄養化調査，福井県環境センター年報，20，159-165，1990.
- 16) 石田敏一ほか：福井県三方湖におけるA G P試験，福井県環境センター年報，21，96-100，1991.
- 17) 山口慎一ほか：M B O D法による湖沼の制限因子の調査について，福井県公害センター年報，16，151-156，1986.
- 18) 高村典子：生態系を理解した湖沼保全に結びつけるために，湖沼環境の変遷と保全に向けた展望，1-4，2000，国立環境研究所.
- 19) M.Schfferほか：Trends in Ecology and Evolution，8，275-279，1993.