

多摩川上流に位置する奥多摩湖の富栄養化に
及ぼす釣りレジャーの影響に関する調査研究

2014年

牧野 育代
東北大学環境保全センター 助教

矢作 裕司
芝浦工業大学工学部 教授

目 次

1 .	はじめに	1
2 .	調査研究の背景	2
3 .	対象地の釣りレジャーに関する現状	2
4 .	調査研究方法	3
	4.1. 現地調査	
	4.2. 水質分析	
	4.3. 釣り餌の抽出液の作成	
	4.4. 生物試験	
	4.5. 添加培養試験	
	4.6. 藻類遺伝子解析	
5 .	結果	8
	5.1. 釣り餌抽出液体物の成分分析	
	5.2. 流入河川および湖沼における水質分析	
	5.3. <i>Microcystis aeruginosa</i> を対象にした AGP 試験	
	5.4. アオコ形成種の遺伝子解析	
6 .	考察	17
	6.1. 釣り餌の投入による富栄養化への影響	
	6.2. 受熱期の釣りレジャーがアオコの発生に及ぼす影響	
	6.3. 対象地におけるアオコ形成種の起源の推定	
	6.4. <i>Microcystis aeruginosa</i> の増殖に伴う有機物の大量生産 が閉鎖水域に及ぼす影響	
7 .	まとめ	23

引用文献 · · · · · 25

1. はじめに

多摩川最上流域に位置する奥多摩湖は都民の水道水源の水質形成に深く関与している。このため、奥多摩湖集水域では水道原水の水質保全の一環として特定環境保全下水道を完備し、下水は浄化センターにおいて高度処理している。また、奥多摩湖ではアオコの侵入防止を目的として湖の流入部に分画カーテンを設置したり、表層水を底層に輸送するなどの水質保全策を実施している。このように奥多摩湖集水域全体で水環境に関する保全に取り組んだ結果、アオコの発生は大幅に減少しており、現在では一部の流入部に限られ小規模に発生するに止まっている。奥多摩湖における主なアオコ形成種はミクロキスティス (*Microcystis*) 属とアナベナ (*Anabaena*) 属との主に 2 種類の藍藻である。これらの藍藻は捕食されにくくガス砲を有し¹⁾、栄養素の確保や光環境に合わせ表層と底層の間を浮遊する能力が備わっている²⁾。このように、*Microcystis* 属と *Anabaena* 属とは他の藻類と比べ成長維持に有利な能力を備えていることから、再び奥多摩湖においてアオコの増加とならないよう、継続した水質保全策が重要となる。一方、奥多摩湖周辺では観光人口の増加、観光施設の充実に伴う都市化が進んでおり、水環境への影響が懸念される。特に奥多摩湖および流入河川では釣りレジャーが盛んであり、釣りに関する奥多摩湖への影響については、都民の水源の保全を考える上で検討していかなくてはならない。

本研究調査では、水源の水質保全の立場から釣りレジャーに着目し、釣り行為が富栄養化とそれによって顕著になる *Microcystis* 属と *Anabaena* 属の増殖に与える影響について、生物試験の手法を用いて検討・考察した。以下には、3年にわたる奥多摩湖およびその流入河川の調査研究の結果に基づき、奥多摩湖の富栄養化に及ぼす釣りレジャーの影響に関してまとめ、報告するものである。

2. 調査研究の背景

筆者らはこれまでに下水道整備が奥多摩湖に及ぼす影響について調査し、下水処理水の河川への放流は *Microcystis* 属と *Anabaena* 属の増殖に關与するものの、全体的な寄与量は少ないことを明らかにした³⁾。さらに、出水時において水源林地帯から流入する土壌粒子由来のリン化合物が *Microcystis* 属と *Anabaena* 属の増殖に關与する可能性があることを突き止めた⁴⁾⁵⁾。しかしながら出水の機会は限られており、リン化合物が日常的に供給されるツールは他に存在するであろうことが考えられた。

こうした調査研究の遂行過程で、奥多摩湖での釣りの人工餌（釣り餌として水溶きし丸く形成した状態）の盛んな投入の現状を目の当たりにし、4月～10月にかけてレジャー客が釣りを目当てに訪れることを事前調査で知りえた。ある釣り人は、1日の釣りに使う人工餌が5kg～10kg程度であると話しており、釣り餌に含まれる栄養分は全て直接的に奥多摩湖に投入されているということになる（表-1）。2007年6月のある1日あたりの釣り人はおおよそ50人程度であった。夕方まで釣りを続けており、その人数からしてもかかる時間からしても釣りによる奥多摩湖への直接的な栄養塩類の供給は少なからずあることが予測された。

3. 対象地の釣りレジャーに関する現状

奥多摩湖集水域は東京水道水源林上流域に位置している。集水域面積の95%以上が森林被覆でかつ勾配が急（標高2,100m-500m程度）である。奥多摩湖へと流入する主要流入河川には溪流釣りや釣り堀、温泉、民宿、キャンプ場など観光施設が点在する。このような都市化に伴う水源水質への影響を考慮し、山梨県および東京都が連携して水源保全策を実施している。たとえば、1981年より始まった下水道設備工事は1987年に、小菅川流域と丹波川流域とで完成した。

小菅川にはヤマメ、イワナ、ニジマス、ウグイを対象とした溪流釣り場（釣り堀）がある。また、餌釣り（一般）区間、餌釣り禁止（キ

ヤッチ&リリース) 区間を設置しており、釣りの解禁期間は3月から9月までであるが、擬似餌であることを条件にニジマスは10月以降2月まで遊漁できる(平成24年度)。丹波川にはヤマメ、ニジマスを対象とした溪流釣り場があり、釣りの解禁期間は3月～11月である。奥多摩湖においては、ダムサイト、浮橋での釣りは禁止されている。2010年～2013年の奥多摩湖は、調査毎で確認した釣り人が3人～10人程度であり、事前調査した2007年に対して大幅に減少していた。釣り人のほとんどはヘラブナ、ブラックバスを対象にしていた。ある釣り人は、「奥多摩湖でアオコが発生した時期までは多くのヘラブナが釣れたが、いまは釣れなくなったため釣り仲間が減った」と話しており、現状では奥多摩湖への釣り餌の直接の投入量は減少しているものと考えられる。

4. 調査研究方法

4. 1. 現地調査

図-1に現地調査における定点観測地点を示した。調査は奥多摩湖および流入河川について行った。水質分析および生物試験のために採水した試水は、ただちにクール冷蔵扱いの宅急便で送り、翌日あるいは翌々日には実験室に届くようにした。また、釣りレジャーの状況に関しては釣り人へのインタビューも試みた。なお、奥多摩湖については、2011年の貯水量の大幅な減少によりしばらくの間は調査が予定通りに実施できなくなったことなどから中断したが、貯水量の回復に伴い2012年3月以降に定期的な調査を再開した。

表-1 主な淡水系の魚類と釣り餌の種類

魚 類	釣り餌	餌の主成分
バス	人工餌(ねり餌)	魚や虫の粉末・藻・うどん粉・たんぱく質・酵素など、ほとんど有機成分を配合
鯉	人工餌(ねり餌)	
公 魚	人工餌(ねり餌)	
笹 鮒	人工餌(ねり餌)	
虹 鱒	生き餌	ミミズ・ユ虫

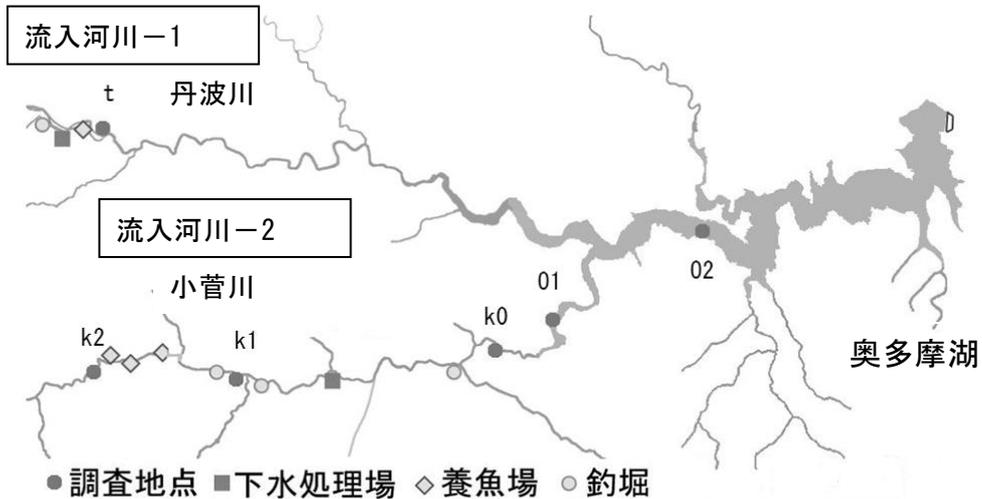


図-1 調査流域と試水採水地点

表-2 調査地点の概要

定点調査地点	記 号	備 考
流入河川-1	t	人為的影響の見られる下流
流入河川-2	k2	人為的影響の少ない上流
	k1	釣り堀よりわずかに下流
	k0	末流
流入部	o1	湖沼流入部
湖心	o2	浮橋

4. 2. 水質分析

表-3 に水質測定項目を示す。現地では水温、pH を測定し、その他の項目については送った試水を実験室で分析した。分析項目には、藻類の増殖の検討に必要な栄養塩類のうち、窒素化合物 (NO_2^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、T-N)、リン化合物 (PO_4^{2-} 、TP)、および全有機炭素 (TOC) を選んだ。また、一部の試水については化学的酸素要求量 (COD_{MN}) を測定した。分析方法は上水試験法⁶⁾および JIS K 0102 に準じ、単位は mg/L である。窒素化合物については、亜硝酸イオン (NO_2^-)、硝酸イオン (NO_3^-)、アンモニウムイオン (NH_4^+) の各濃度をイオンクロマトグラフィー法で測定した。総窒素 (T-N) 濃度はペルオキシ二硫酸カリウム分解法より測定した。リン化合物については、リン酸イオン (PO_4^{2-}) 濃度をイオンクロマトグラフィー法で、総リン (T-P) 濃度をアスコルビン酸還元モリブデンブルー法で定量した。なお、各イオン物質は水質データとして表す際に窒素化合物 ($\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$)、リン化合物 ($\text{PO}_4\text{-P}$) として算出した。

表-3 水質測定項目

項目	単位	分析方法	備考
水温	°C	上水試験法 あるいはJIS K 0102	現地にて測定
pH	-		
全窒素(T-N)	mg/l		実験室にて測定
亜硝酸性窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)			
硝酸性窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)			
アンモニア性窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)			
全リン(T-P)			
リン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)			
全有機炭素(TOC)			
化学的酸素要求量(COD_{MN})			

4. 3. 釣り餌の抽出液の作成

表-4 に生物試験（AGP 試験）に用いた釣り餌を示す。釣り餌は 3 種類とも乾燥状態において 5g ずつ分取し、滅菌した蒸留水に投入してそれぞれ 5g/L になるよう調整した。それを静止させ 24 時間後に濾紙（JIS P 3801 5 種 B）で濾過したものを釣り餌 A～C の抽出液とした。調整後の釣り餌抽出液は、先述の水質分析と同様に窒素化合物（ NO_2^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、T-N）、リン化合物（ PO_4^{2-} 、TP）、TOC および COD_{MN} を測定した。

表-4 生物試験に用いた釣り餌（人工練り餌）の種類

	釣り餌	主原材料
淡水釣り用配合餌	A	麩、養殖用ペレット、グルテン、魚粉加工品、クロレラ、香料
	B	麩、さなぎ粉
	C	麩、クロレラ、香料

4. 4. 生物試験

奥多摩湖で確認される植物プランクトンのうち *Microcystis* 属を生物試験の対象とした。2012 年 6 月～10 月に湖水を採水して顕微鏡観察した結果、藻類の構成は *Microcystis* 属と *Anabaena* 属との 2 属でほぼ占められており、相対的に *Microcystis* 属の現存数が多かったことから、*Microcystis* 属の継代株（NIES-1164, *Microcystis aeruginosa*）を国立環境研究所より購入し、以下に述べる培養試験に用いた。なお、その継代株はもともと奥多摩湖で採取されたものである。

表-5 に生物試験の条件を示す。生物試験は植物プランクトンの増殖能力を評価する AGP 試験（Algal Growth Potentials; 藻類生産潜在能力）を試みた。AGP 試験とは、対象とする藻類の細胞を接種した試水に栄養

塩や金属の濃度条件を変えて添加し、最適条件下で培養することでその藻類の増殖を促進したりその反対に増殖を制限したりする物質を特定する試験である。本 AGP 試験では、*Microcystis aeruginosa* (*Microcystis a.*) に対する釣り餌抽出液の添加実験を行った。基本的な試験方法については上水試験方法⁶⁾に準じ、その他の文献^{7) 8)}も参考資料として用いた。

表-5 生物試験 (AGP 試験) の条件

項目	培養試験の条件
試水前処理	加熱分解法
	濾過法(定量濾紙および孔径0.2μ m GF/Fフィルター)
供試藻	<i>Microcystis aeruginosa</i>
試水	2012年6月～10月に各調査地点より採水
試水量	90ml-150ml
振とう速度	50rpm
初期細胞密度	5×10^3 cell/ml
培養温度	25±3°C
照度	3,000lux±1,000lux (暗環境12時間)
増殖量測定	3日-10日おきに分光蛍光光度計でChl-aを測定し、その値を細胞数および乾燥重量に変換
添加物質	乾燥させた釣り餌の5%濃度抽出液 (0.5wt%)

4. 5. 添加培養試験

Microcystis aeruginosa 継代株に対する添加試験は、3.3に記載のとおり調整した3種類の釣り餌抽出液を用いて行った。釣り餌は実際に釣り人が奥多摩湖に投入していたもののうちから、一般的に販売されている淡水用配合餌を選んだ。培養期間は基本的に3～6週間とし、一部の検体についてはそれ以降も継続して観察して藻類起源の有機物の検討に用いた。

4. 6. 藻類遺伝子解析

湖沼の富栄養化における代表的な現象はアオコの発生であり、その発

生に影響を及ぼす原点が内部（湖）に存在するのかそれとも外部（流入河川）に存在するのかを明らかにするためにはアオコ構成種の起源の把握が重要である。そこで、流入河川の上流～湖沼に生息する藻類を特定する遺伝子解析を行った。水質調査と同じ地点の河床あるいは水面の懸濁物質を採取し、それを遺伝子解析用のサンプルとした。表-6 に解析の手順を示した。なお、定性 PCR 解析においては、プライマーペア「CYA359F と CYA781R(a)」および「CYA359F と CYA781R(b)」を使用し、Boutter ら⁹⁾に記載の反応組成およびサーマルイクリングの方法を用いた。

表-6 遺伝子解析の手順

手順1	<i>Microcystis</i> 属および <i>Anabaena</i> 属の株譲渡 国立環境研究所より <i>Microcystis</i> および <i>Anabaena</i> を購入 (コントロールとして用いる)
手順2	河川および湖の試水中の藻類ゲノムDNAを抽出 2012年6月-10月に取得した河床と湖表層水およびコントロールについて、ゲノムDNAを抽出する
手順3	リアルタイムPCR解析 抽出したゲノムDNAに対する河床および湖表層水サンプルについて定性PCRを行う

5. 結果

5. 1. 釣り餌抽出液体物の成分分析

表-7 に、釣り餌 A～C の抽出液における窒素化合物 (NO₂-N、NO₃-N、NH₄-N、T-N)、リン化合物、有機物 (COD_{MN}) および全有機炭素 (TOC) の分析の結果を示した。窒素化合物は、釣り餌 A 抽出液の T-N 濃度 (25.45mg/L) が最も高く、最も低い釣り餌 C 抽出液 (5.20mg/L) の約 5 倍であった。一方、NH₄-N 濃度は釣り餌 A 抽出液が最も低く (0.41mg/L

釣り餌 B および C 抽出液はほぼ同じ濃度（1.35mg/L および 1.30mg/L）で、釣り餌 A 抽出液の約 3 倍であった。NO₃-N 濃度および NO₂-N 濃度はいずれも低く、またリン化合物はどの釣り餌抽出液においても T-P 濃度と PO₄-P 濃度との間の差が小さく、リン化合物の多くは PO₄-P で占められていた。COD_{MN} は 170 mg/L～373mg/L、TOC は 129 mg/L～207 mg/L であり、TOC に対して COD_{MN} が 1.3 倍～1.8 倍程度高い値を示した。

表-7 釣り餌（淡水釣り用配合餌）抽出液の成分分析

N.D : 定量限界以下. 単位 : mg/L

釣り餌	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	T-N	T-P	COD _{MN}	TOC
A	N.D.	0.035	0.41	8.50	25.45	10.05	373	207
B	N.D.	0.100	1.35	7.00	16.40	10.65	197	138
C	N.D.	0.090	1.30	6.00	5.20	7.00	170	129

* 釣り餌 1g を 200mL の蒸留滅菌水に添加して 24 時間後にろ過した抽出液を分析した。

5. 2. 流入河川および湖沼における水質分析

連続した月のデータを取得した 2012 年 3 月～2013 年 5 月の定点観測地点における窒素化合物（NO₂-N、NO₃-N、NH₄-N、T-N）の分析値を図-2、リン化合物（PO₄-P、T-P）の分析値を図-3、および全有機炭素（TOC）の分析値を図-4 に示した。なお、水質分析値が定量検出限界値以下（N.D）のデータは図から除いた。

t 地点は、調査地点のうちで最も窒素化合物、リン化合物の濃度が低く水質が安定した。窒素化合物の最大値が T-N で 0.778mg/L、リン化合物の最大値は T-P で 0.021mg/L であった。NO₂-N、PO₄-P は年間を通じて定量限界値以下の<0.005mg/L、NH₄-N は最大値が 0.041mg/L、NO₃-N では 0.380mg/L といずれも低い濃度であった。TOC は他の地点と同様に 7 月にピーク（17mg/L）があった後はしばらく低濃度で推移していたが、

1月に3.8 mg/Lの小さなピークを示した。

k2地点では、窒素化合物の最大値がT-Nで0.857mg/Lであり、t地点とほぼ同じ程度であったが、調査期間を通してNO₂-N、NO₃-N、NH₄-Nにおいてt地点よりわずかに高い濃度で推移していた。リン化合物は、6月にピーク(0.081mg/L)を示した後は低濃度で推移した。TOCは7月(23.9mg/L)にピークがあった後はしばらく低濃度で推移していたが、2月に3.0 mg/Lの小さなピークを示した。k1地点は窒素化合物の最大値が6月のT-Nで、5.785mg/Lとデータの中で最も高濃度を検出した。同じく6月にNH₄-Nも4.600mg/Lと高濃度であった。リン化合物は、8月のT-Pが0.247mg/L、12月のPO₄-Pが0.200mg/Lと高い濃度であった。また、ほぼ毎月、T-PあるいはPO₄-Pを検出した。窒素化合物とリン化合物は全体的にt地点、k2地点のそれよりも高い濃度で推移した。TOCは7月(29.7mg/L)と8月(11.3mg/L)にそれぞれピークがあった後はしばらく低濃度で推移していたが、2月に5.92 mg/Lの小さなピークを示した。k0地点は窒素化合物の最大値が9月のT-Nで1.218mg/Lを示した。NO₂-N、NO₃-N、NH₄-Nは6月を除きk1地点とほぼ同様の濃度で推移した。リン化合物は多くの月でT-PあるいはPO₄-Pを検出した。TOCは7月(19.0mg/L)にピークがあった翌月の8月からは低濃度で推移していたが、2月に7.0 mg/Lの小さなピークを示した。

O1地点は、窒素の最大値が8月のT-Nで5.100mg/L、5月にも4.033 mg/Lとk1地点の最大値(5.785mg/L)とほぼ同レベルの高濃度を示した。また、8月と4月はNH₄-Nもそれぞれ3.420mg/Lと2.100mg/Lと高濃度であった。リン化合物は、8月のT-Pが0.572mg/Lと最も高く、5月の0.498mg/Lが続いて高かった。また、8月はPO₄-Pも高く0.465mg/Lを検出した。TOCは7月(24.8mg/L)と8月(34.1mg/L)にそれぞれピークがあった後はしばらくは低濃度で推移していたが、2月に7.1 mg/Lの小さなピークを示した。O2地点は、窒素化合物の最大値がT-Nで0.908mg/Lとt地点とk地点とはほぼ同じ程度であった。NO₂-N、NO₃-N、NH₄-Nもほぼ同様の濃度で推移した。リン化合物は年間を通じて低濃度で推移し、t地点と同様の挙動を示した。TOCは7月(25.1mg/L)にピークがあった後は低濃度で推移した。

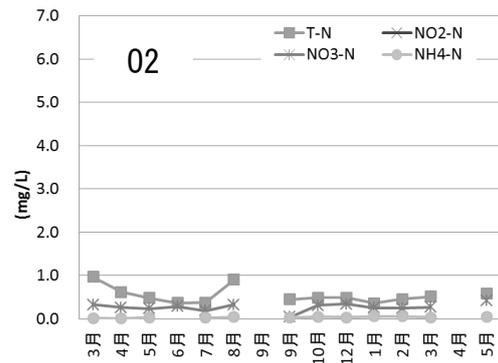
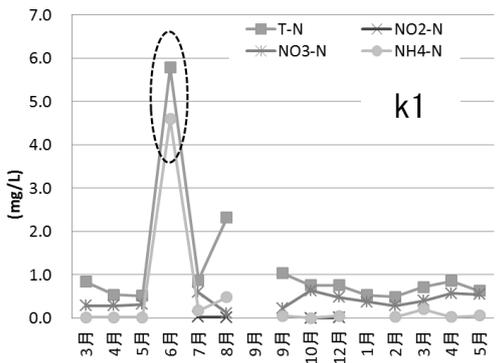
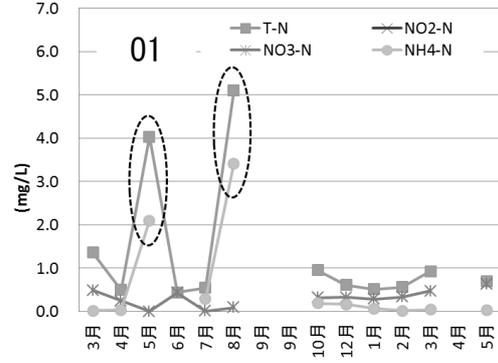
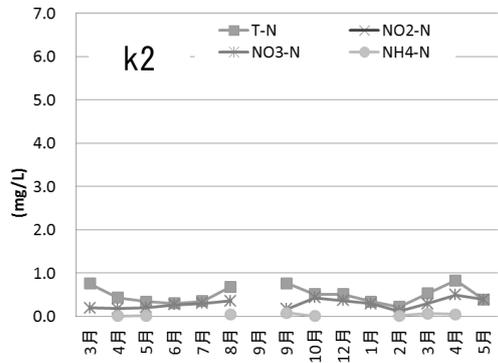
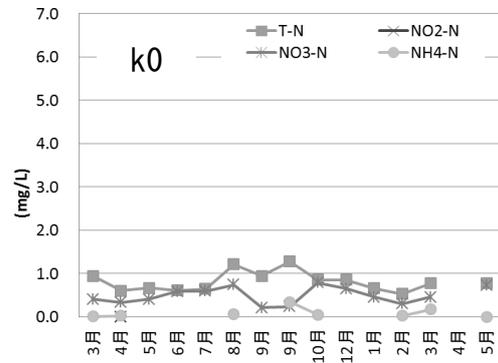
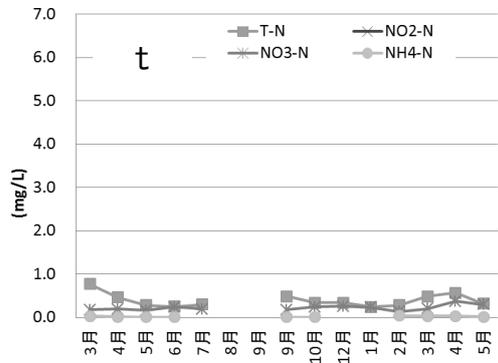


図-2 調査地点ごとの窒素化合物の分析値

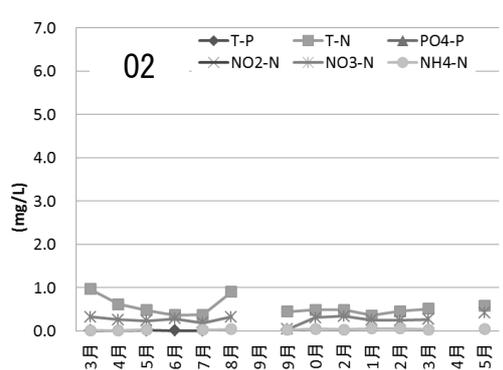
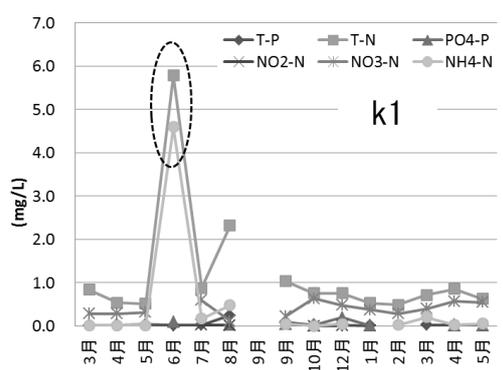
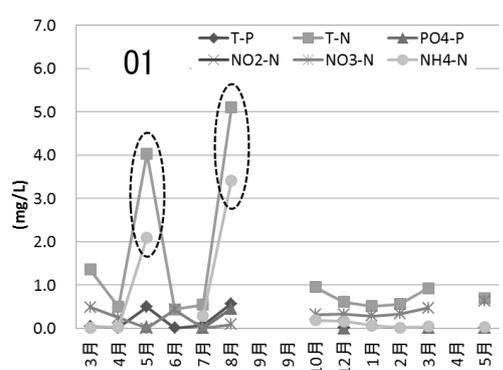
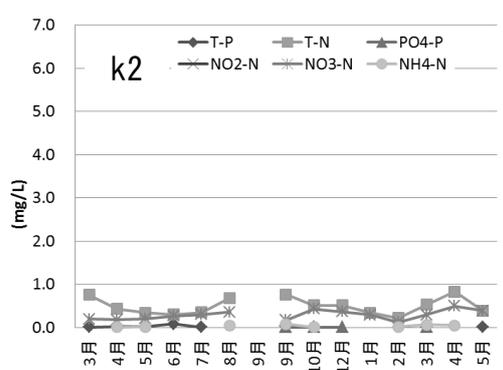
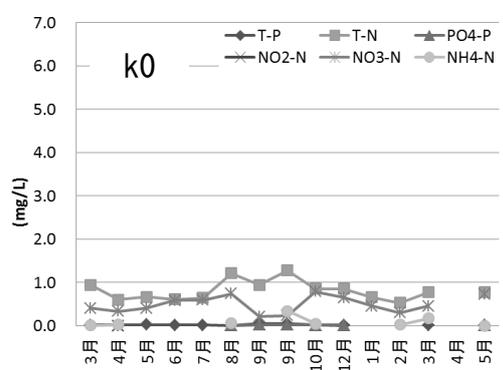
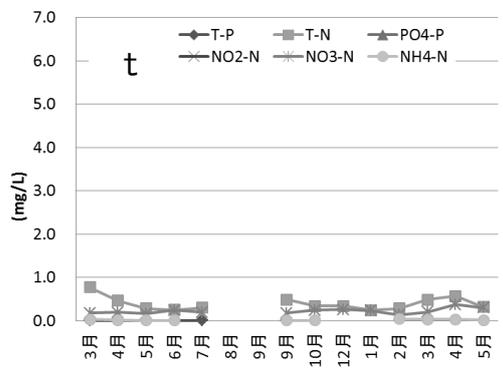


図-3 調査地点ごとのリン化合物の分析値

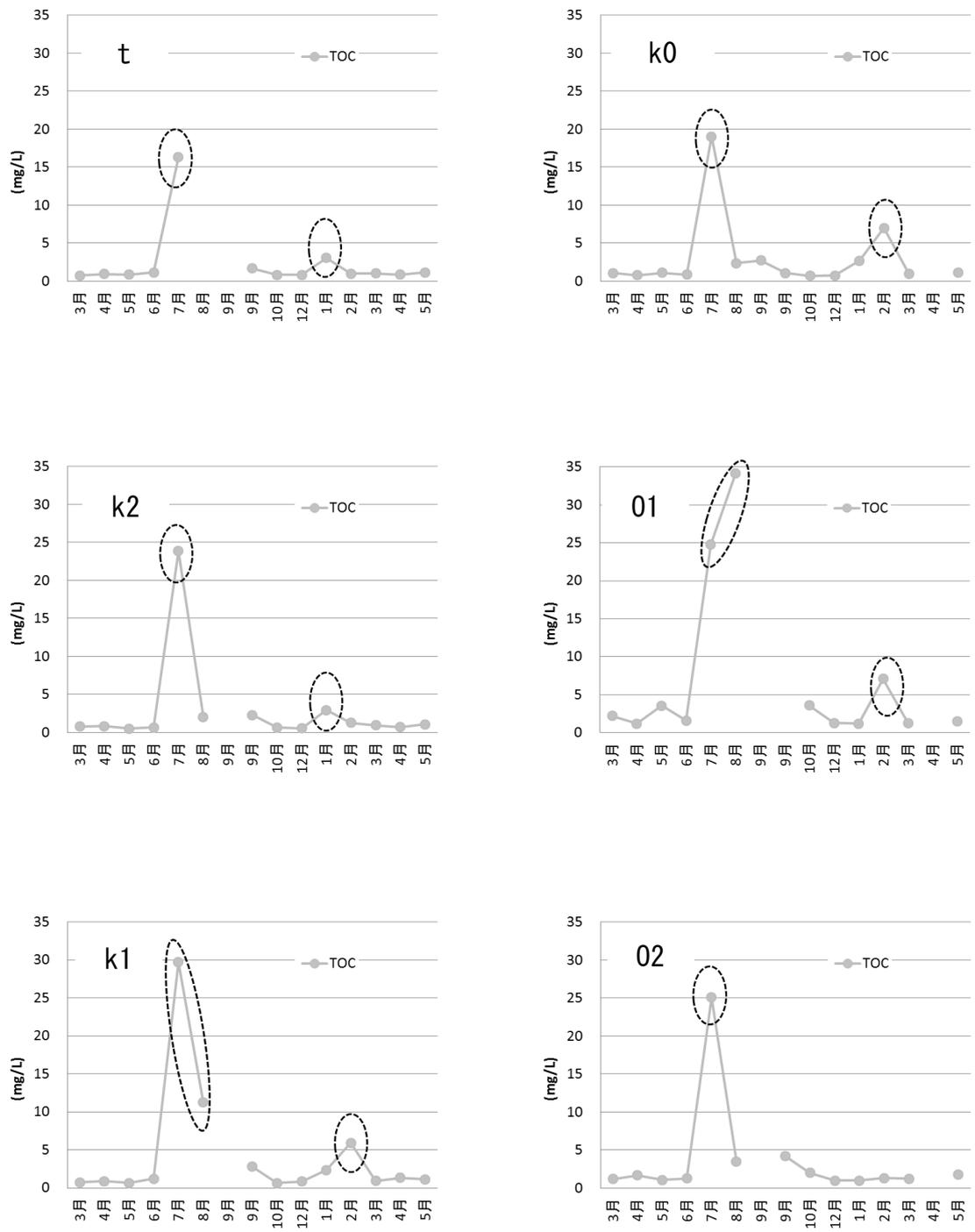


図-4 調査地点ごとの全有機炭素の分析値

5. 3. *Microcystis aeruginosa* を対象にした AGP 試験

図-5 に、各検体の供試藻類 *Microcystis aeruginosa* の最大増殖量（乾燥重量ベース）を示した。なお、釣り餌添加試験については、予備試験で *Microcystis aeruginosa* が増殖しなかった k2 地点の試水に対して釣り餌抽出液を 10mg/L 添加したものを釣り餌添加試験の検体とした。また、k1 地点の 6 月は窒素、リンの濃度が高かったことからその影響を除く目的で、k1 地点については 6 月と 7 月を対象とし 2 検体にした。その他の検体は全て 6 月に採水した試水を用いた。

t 地点、k2 地点、O1 地点、O2 地点の検体は、増加がほぼ見られなかった。一方、k1 地点の 6 月の検体は 7.8 mg/L、また 7 月の検体は 7.3 mg/L と月により増加量に多少の差はあるものの、他の河川調査地点と比べ最も増加を見せた。釣り餌 A 抽出液の添加検体は、試験開始後 15 日前後から様相が大きく変化し、ピンク色を帯びた柔らかな塊の懸濁物質が増殖しはじめた。その上澄みの水を顕微鏡で観察すると、四方に線状の繊維のような物質が折り重なるように拡がり、細胞はその繊維と繊維との隙間を縫う様に分散していた（図-6）。細胞は増殖している様子が伺えるものの、このように細胞以外の物質が大量に存在するため正しく乾燥量を測定することができないおそれがあり、試験 3 週目に測定不能と判断した。釣り餌 B 抽出液の添加検体は、試験開始 15 日前後から細胞が増殖した時に見られる深い緑色になったが同時に細胞外有機物の透明な寒天質状物質が大量になり *Microcystis aeruginosa* とともに集積して固まり、底に沈みだした。そのため、この時点で試験を終了して乾燥重量を測定した。乾燥重量は 11.4 mg/L であった。釣り餌 C 抽出液の添加検体は、試験開始 10 日前後から一時的に薄いピンク色を帯びたが 20 日を過ぎたあたりから細胞が増殖した時に見られる深い緑色に変化した。25 日を過ぎたころから柔らかな塊の粘性質の懸濁物質が増殖してきたため、この時点で乾燥重量を測定した。乾燥重量は 13.4 mg/L であった。

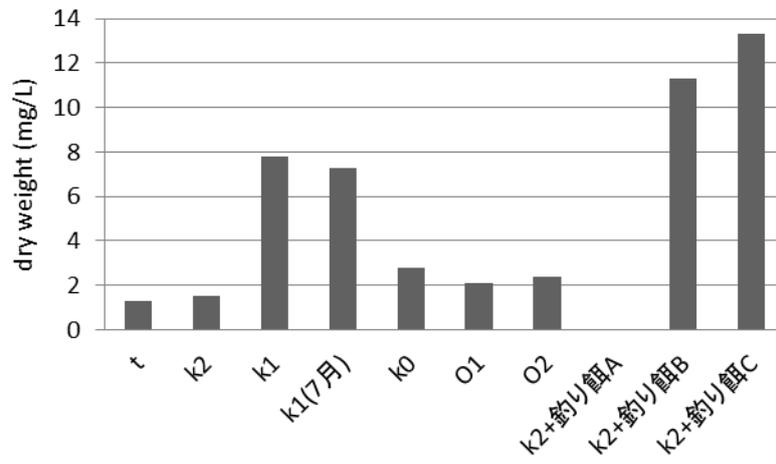


図-5 AGP 試験の結果

釣り餌抽出液 A の検体は測定不可能として、図に値を記載していない。

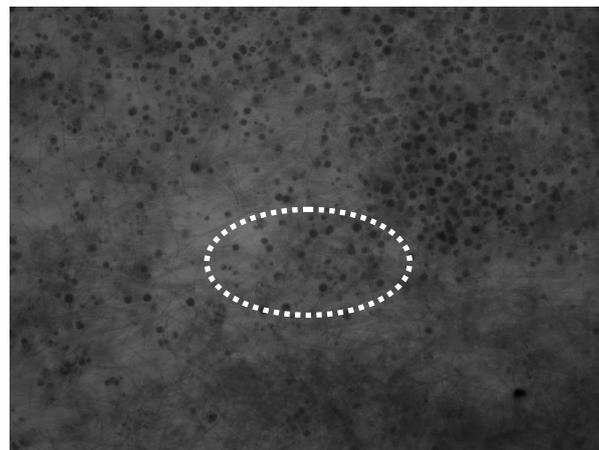


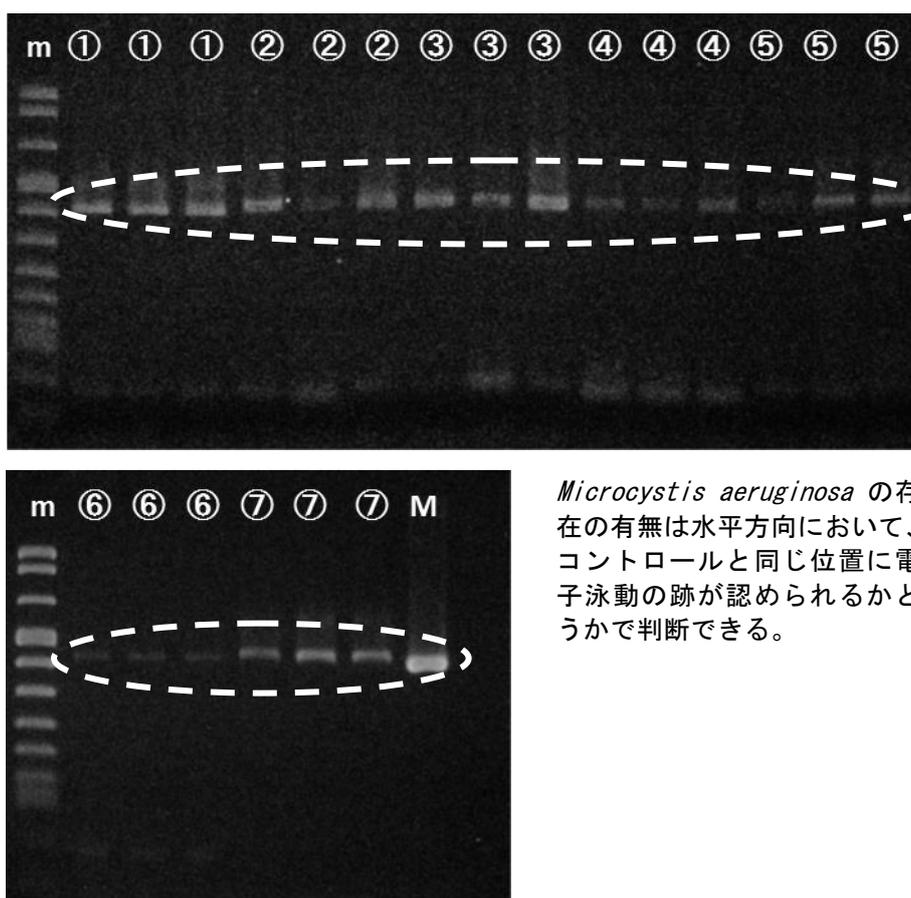
図-6 釣り餌 A 抽出液を添加した AGP 試験検体の顕微鏡写真(グレースケール)

丸の囲みは細胞と細胞の間に繊維質が織り込まれている様子が特に確認できる。

5. 4. アオコ形成種の遺伝子解析

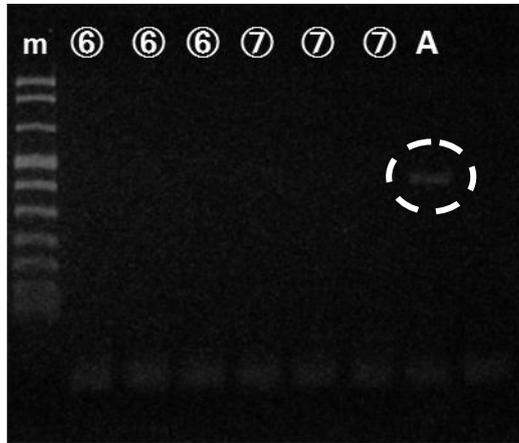
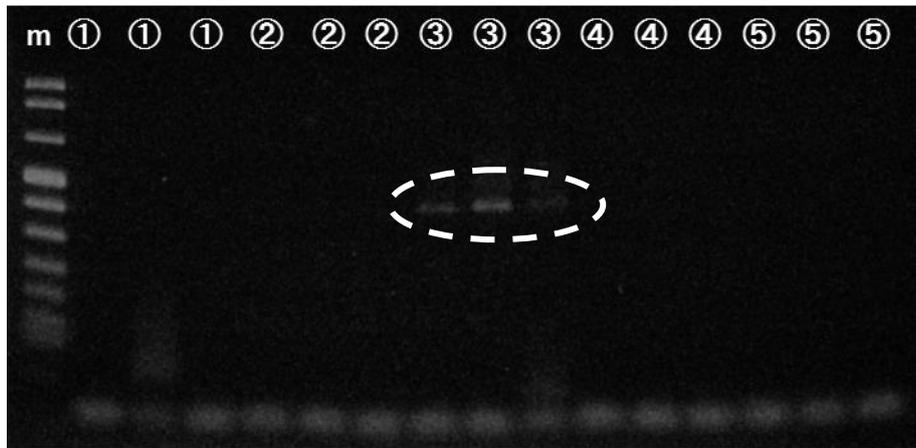
図-7 と図-8 に、*Microcystis* 属 (*Microcystis aeruginosa*) と *Anabaena* 属 (*Anabaena flos-aquae*) との電気泳動写真を示した。各サンプルは3回ずつ測定した。①は O1 地点、②は k0 地点、③は k1 地点、⑤は k2 地点、⑥は t 地点である。また、比較のためにその他の流入河川の流入部と末流を④と⑦として測定した。なお、m は分子量マーカーⅧ (ロシュ・ダイアグノスティックス社製)、M は *Microcystis aeruginosa* のコントロールサンプル (NIES-1164)、A は *Anabaena flos-aquae* のコントロールサンプル (NIES-823) である。

Microcystis aeruginosa は①～⑦の全てにおいて検出された。*Anabaena flos-aquae* は③ (k1 地点) でのみで検出された。



Microcystis aeruginosa の存在の有無は水平方向において、コントロールと同じ位置に電子泳動の跡が認められるかどうかで判断できる。

図-7 *Microcystis aeruginosa* を対象にした電気泳動写真



*Anabaena flos-aquae*の存在の有無は水平方向において、コントロールと同じ位置に電子泳動の跡が認められるかどうかで判断できる。

図-8 *Anabaena flos-aquae*を対象にした電気泳動写真

6. 考察

6. 1. 釣り餌の投入による富栄養化への影響

人為的影響の少ない地点 (t、k2) と湖心 (O2) との水質の傾向は似ており、窒素化合物、リン化合物といった富栄養化に影響する栄養塩類は比較的低濃度で推移し、年間を通じて安定した水質を保っていた。一方、人為的影響を受けている地点 (k1、k0) と流入部 (O1) では、栄養塩類が季

節によっては突起した高濃度を有していた。対象地の集落の規模は小さく下水道は完備されている。工場はなく農地も小規模であり、河川への廃水の流入など水質汚濁化を生じさせる一般的な土地利用は見当たらない。しかし、対象河川の水質調査の結果は、極めて高濃度な窒素化合物（T-Nで5.785mg/L、NH₄-Nで4.64.6mg/L）を検出し、リン化合物も高い濃度（T-Pで0.247mg/L、PO₄-Pで0.200mg/L）を検出した。このように高い濃度の栄養塩類を観測したのは釣り堀近傍であるk1地点であった。表-8に、釣り餌0.1gを蒸留水で1Lにした場合における釣り餌A~Cと針谷ら¹⁰⁾による釣り餌5種類の水質分析結果を示した。本調査の釣り餌分析結果と針谷らの分析結果とでは、T-Pはほぼ同様の分析値であったが、T-N濃度とCOD_{MN}に差があり、本試験の方が10倍~20倍程度、濃度が低い傾向になった。針谷らはよくすり潰した釣り餌を試験に用いているが本調査では釣り餌はそのままの状態を滅菌蒸留水に添加しただけであり、この違いが濃度に影響したものと考えられる。

表-8 釣り餌0.1gを1Lの蒸留水に溶かした場合の水質分析結果

単位：mg/L

本調査の釣り餌抽出液の分析結果 (蒸留水に溶解させ静止状態で24時間後にろ過)	釣り餌	T-N	T-P	COD _{MN}
	A	0.51	0.20	5.4
	B	0.33	0.21	3.1
	C	0.10	0.14	4.0
文献*の釣り餌分析結果(よくすり潰して蒸留水に懸濁させた釣り餌)	A(バラケ調節)	2.9	0.13	45
	B(クワセえさ)	3.7	0.46	38
	C(集魚)	2.3	0.66	50
	D(クルテン系)	2.0	0.14	37
	E	5.9	0.62	43

* 針谷ら¹⁰⁾に一部加筆.

針谷¹⁰⁾らは別所沼において釣りの実態調査を行い、土日祭日の釣り人は年間平均100人で釣り餌の使用は一人当たり約140g、平日は年間平均50人で釣り餌は60gであり、これを年間釣り餌投入量にすると約2400kg

であると報告した。2010年の奥多摩湖では調査毎で確認した1日当たりの釣り人は3人～10人程度、釣り堀を含む流入河川では0人～10人程度であり、4月～10月の7ヶ月間が釣りのシーズンである。本調査では毎月の現地調査を平日、休日のどちらかで行っており、年間の釣り人の人数は明確にはできないが、1日当たりに確認した人数からすると針谷らの調査とほぼ同様あるいはそれ以上の人数が流入河川あるいは湖沼で釣りをしていると考えられる。本調査で用いた釣り餌A～Cは一袋に300g～330g入りで売られている。表-8の分析結果をもとに算出すると、一袋全てを使い切ると窒素(T-N)が1,527mg、そのうちNH₄-Nとしては78mg、また、リン(T-P)が少なくとも420mg、そのうちPO₄-Pとしては360mgが河川あるいは湖沼に投入されることになる。本試験では、釣り餌の抽出液のみ用いてAGP試験を行い、釣り餌そのもの(固形物)は試験の対象にしなかったが、河川、湖沼においては水溶きした固形物の状態で投入しており、針谷らがよくすり潰した釣り餌を分析した結果であるT-N濃度、T-P濃度およびCOD濃度が、河川、湖沼に投入される実際の栄養塩濃度に近いと考えられる。

対象地における上流の河川水(k2地点)は、年間平均でNH₄-N濃度が0.023mg/L、PO₄-P濃度が0.005 mg/L以下と、きれいな水源の河川水質を保っている。たとえば、釣り餌Aが一袋投入された場合、河川上流の水質レベルに戻すためには、NH₄-N濃度において15,600倍の希釈、PO₄-P濃度においては720,000倍の希釈を要する。河川においては日々新しく流れてくる河川水により希釈されているが、その河川水は下流の湖沼に到達する。この時、釣り餌の固形物として流れ込み、その重さから沈殿し底泥化することで、富栄養化の長期的な原因となるおそれがあり、釣り餌の投入には慎重になる必要があるものと考えられた。

6. 2. 受熱期の釣りレジャーがアオコの発生に及ぼす影響

2012年ではO1地点の一部でアオコの発生が確認できたが、同地点・同年の試水を用いたAGP試験においては、*Microcystis aeruginosa*の細胞増殖はほぼ見られなかった(図-5)。一方、k1地点ではアオコの発生は確認できなかったが、同地点・同年の試水を用いたAGP試験においては、*Microcystis aeruginosa*の高い細胞増殖が確認できた。このことは、流入部(O1地点)で見られたアオコ現象は湖沼の水質ではなく、流入する河川の水質に増殖を促す強い原因が存在することを示唆するものである。AGP試験の結果は、河川の上流～末流の3地点のうち、釣り堀近傍(k1地点)においてのみ明らかな*Microcystis aeruginosa*の細胞増殖が確認された。対

象地の釣り堀では成魚を扱っており成長や維持のための餌は与えておらず、釣り堀に投入される餌の多くは釣りレジャーに付随する釣り餌である。対象地の上流河川の試水（k2地点）に釣り餌抽出液を添加したAGP試験の結果は、釣り餌が *Microcystis aeruginosa* の細胞増殖に明らかに強く関与していることを示していた。

釣り餌A～Cにおいては、水に添加し静止状態にして放置していても窒素化合物、リン化合物、有機物が多く溶け出した（表-8）。4月～9月の釣りレジャーのシーズン中は継続的に流入河川に投入されていると考えられる。また、この時期は受熱期にあたり、水生生物が活発化する時期とほぼ一致する。これらのことを考え合わせると、釣りレジャーにより4月～9月にかけて釣り餌由来の窒素化合物、リン化合物等が継続的に河川に投入されて閉鎖水域の湖沼流入部に到達し、その場に生息する藻類に利用されるものの、最終的には、熱に強い受熱期において他の藻類よりも成長に有利な *Microcystis* 属が優占種化することになり、流入部においてアオコの発生に至ったと推測された。

6. 3. 対象地におけるアオコ形成種の起源の推定

対象地では、*Microcystis* 属の他に *Anabaena* 属の出現も確認されている。*Anabaena* 属は *Microcystis* 属に比べて発生している貯水湖は少ない。貯水湖で発生したアオコは風（気流）、鳥類などによって外に運ばれ広く分布することが *Microcystis* 属の遺伝子解析によって明らかにされた¹¹⁾。本調査でも、*Microcystis* 属（*Microcystis aeruginosa*）と *Anabaena* 属（*Anabaena flos-aquae*）の遺伝子解析を行い、*Microcystis aeruginosa* は河川の上流、中流、末流に至る全観測地点で検出され、河川流域に広く分布している状態を確認した。対象地は勾配が急で河川や湖沼は谷間に位置することから、気温の時間単位の変化に伴う気流が生じやすい地形である。*Microcystis* 属は鉛直運動するが日中には水面近傍に位置する傾向が強く、気流が生じた際に運ばれて分布するものと考えられた。

一方、*Anabaena flos-aquae* は、中流に位置する k1 地点でのみ検出された。k1 地点より上流または下流（末流）において検出されなかったことは、気流が生じた際に運ばれるような外部からの侵入ではなく、河川内部の特定の場所にその起源が存在することを示唆したものだ。遺伝子解析では、定性は明確にされたものの、遺伝子解析のサンプルに不純物が多く入っていたため定量測定は困難であり、データ化はできなかった。今後は、地点ごとの *Microcystis* 属を定量し、レジャー活動や観光資源等との関係も含めて検討する必要がある。*Anabaena* 属については、特定の場所

の浮遊物や魚を含む水生生物を対象に、さらに詳しい遺伝子解析を行うことで起源を特定できる可能性がある。

6. 4. *Microcystis aeruginosa* の増殖に伴う有機物の大量生産が閉鎖水域に及ぼす影響

表-9 に、AGP 試験前後の釣り餌 A~C の抽出液添加検体、O1 地点の検体について、COD_{MN} 濃度を測定した結果を示した。AGP 試験前は検体の調整直後に測定したもので、AGP 試験後は試験が終了して 3 ヶ月後に測定したものである。AGP 試験前の釣り餌 A~C の抽出液添加検体は、27.2mg/L、16.2mg/L、15.1mg/L、また、O1 地点の検体では 3.2 mg/L であった。AGP 試験後の釣り餌 A~C の抽出液添加検体は、554.8mg/L、285.7mg/L、431.4mg/L、また、O1 地点の検体では 71.6 mg/L であった。

AGP 試験において試験開始時に加えた *Microcystis aeruginosa* 1mL を 1mg に換算すると、内容量は 150mL であるので検体中の *Microcystis aeruginosa* 濃度は約 6.7mg/L となる。O1 地点の試水の COD_{MN} 濃度は 3.2 mg/L、*Microcystis aeruginosa* 1mL は約 6.7mg/L、それら以外に有機物源となるものは O1 地点の検体に含まれていない。しかしながら、試験開始前には合わせても 10mg/L 程度の有機物含量であったのに対し試験後には 69.2 mg/L に増加しており有機物は約 10 倍になっていた。これがほとんど細胞増殖を伴っていないことを考えると、10 倍に増加したほとんどが *Microcystis aeruginosa* 由来の生物代謝に伴い生じた細胞外有機物と考えられる。湖沼に生息する *Microcystis* 属は細胞容積量の平均 78 倍の粘質鞘を細胞間に有する¹²⁾。粘質鞘は透明な寒天状物質で細胞外有機物であり、特に藍藻は粘質鞘を有する種が多く、70 種中、53 種で (73%) で粘質鞘が確認されている¹³⁾。本 AGP 試験では継代株の *Microcystis* 属を用いているが、この場合は実験室レベルの培養で粘質鞘を細胞間に生じることはほぼないとされている。しかし、釣り餌抽出液の添加検体においては継代株を用いた場合でも厚く透明な粘質鞘を確認した。一瀬らの試験結果に従えば、*Microcystis aeruginosa* の細胞が 1mg/L 増加すると粘質鞘は 78mg/L (78 倍) になる。AGP 試験において最も測定が容易であった釣り餌 C の抽出液添加検体は、乾燥重量が 13.4 mg/L、COD_{MN} 濃度が 431.4 mg/L であり、細胞が 1mg/L 増加した場合の有機物量は約 32.2mg/L (約 32 倍) と算出される。

他方、一瀬ら¹²⁾ は、近年の湖沼の COD 濃度の増大は粘質鞘を形成する藻類の増加によりもたらされるとし、特に、*Microcystis* 属による影響が大きいとした。また、琵琶湖では *Microcystis aeruginosa* とその粘質鞘の塊が

長期溶解せず、水深 90m の湖底に沈んでいることが報告されている¹⁴⁾。粘質鞘は重くて湖底に沈むような有機物の塊である。その有機物の一部は難分解性有機物とされており、難分解性有機物の増加は湖底の溶存酸素の低下や藻類の出現種の変化をもたらすことから有機汚濁物と位置づけられている¹⁵⁾。AGP 試験において釣り餌 B 抽出液添加検体は試験開始 15 日前後から細胞が増殖した時に見られる深い緑色になったが、同時に粘質鞘が大量に生じ *Microcystis aeruginosa* とともに集積して底に沈みだした。さらに、3 ヶ月後には粘質鞘の強度が増し硬くなってプラスチックの底に張り付く状態になり、難分解性を帯びた有機物に変化した様子が伺えた。AGP 試験の最中の COD_{MN} 濃度は測定していないので明確にはならないものの、底に沈んだ大きな塊の粘質鞘は支持体となり有機物を豊富に保持しているが、その有機物が水中に溶解しないために液体（検体）中の COD_{MN} 濃度が低く抑えられたことが考えられる。一瀬らの結果よりも低い倍数になった原因には、このような難分解性有機物の生成による影響があるものと考えられた。

AGP 試験では、釣り餌抽出液が媒介になって *Microcystis aeruginosa* の細胞増殖（図-5）と有機物の大量生産が同様に生じていたことが COD_{MN} 濃度の変化より確認された。AGP 試験においてピンク色を伴うなどの現象は、通常の栄養素の添加（窒素化合物、リン化合物、鉄化合物など）では見たことのない現象である。湖沼の富栄養化の現象としてはアオコの発生が挙げられるが、釣り餌が関与するアオコの発生では、同時に湖底において有機物汚濁が生じることを示唆するものであった。以上より、釣り餌の投入は河川や湖沼の栄養塩類の増加をもたらし、特に湖沼のような閉鎖水域においては水質汚濁の長期化にも影響することがアオコ形成種を媒介にした生物試験より伺えた。

表-9 AGP 試験前後の検体中の COD_{MN}, TOC の測定結果

単位 : mg/L

時 系	測定検体	COD _{MN}	Microcystis aeruginosa由来の COD _{MN} を差し引く
AGP試験前	釣り餌抽出液A 添加	27.2	-
	釣り餌抽出液B 添加	16.2	-
	釣り餌抽出液C 添加	15.1	-
	O1	2.2	-
AGP試験後	釣り餌抽出液A 添加	554.8	485.4
	釣り餌抽出液B 添加	285.7	216.3
	釣り餌抽出液C 添加	431.4	362.0
	O1	71.6	-

測定（試験）検体： k2 試水 140mL に釣り餌抽出液 10mL と植え継ぎ
Microcystis aeruginosa 1mL を投入して調整した。

7. まとめ

本研究調査では、水源の水質保全の立場から釣りレジャーに着目し、釣り行為が富栄養化とそれによって生じる *Microcystis* 属と *Anabaena* 属の増殖に与える影響について、現地調査と生物試験（AGP 試験、遺伝子定性試験）の手法を用いて検討・考察した。

対象地の河川では、練り餌や生き餌の投入禁止区分を設け、釣りの期間も限定している。しかしながら、釣りレジャーが盛んな時期は受熱期にあたり、その受熱期に最も増殖しやすい藻類が *Microcystis* 属や *Anabaena* 属であることは、工場や農地の排水の流入がほとんどない対象河川において、結果的に釣り行為がアオコの発生を促す強い要因になり得ることを示唆するものであった。また、遺伝子解析において *Anabaena* 属は釣り堀のみで検出し、水の流れの影響を受けていないことから、魚やその他の水生生物を含めた個体を対象にした遺伝子解析手法を試みる必要があった。一方、*Microcystis* 属の起源は特定されなかったが、どの地点からも *Microcystis* 属を検出したことは、複数あるいずれの流入部でも *Microcystis* 属が増加する可能性があることを示唆するものであった。現状では、一部の流入部のみで発生するに止まっておりそのことを踏まえると、流入部に直結する

河川の水環境がアオコ発生に直接的な影響を及ぼすことが考えられた。他方、*Microcystis* 属は他の藻類と比べ、成長、増殖による細胞外有機物の生産量が多い。釣り餌抽出液を栄養素と見立て *Microcystis* 属に添加した結果、大量の細胞外有機物が発生したことは、釣り餌が富栄養化のみならず、長期的な水質汚濁にも強く関与することを推察させるものであった。

本調査研究では、釣り餌（練り餌）の投入は河川の栄養塩濃度の増加をもたらし、また、受熱期の釣りレジャーは湖沼の富栄養化現象に深く関与することが明らかとなった。今後はこれらの結果に基づき、良水確保と観光の両立に向けた水環境保全に関する研究を行うつもりである。

引用文献

- 1) Colin S. Reynolds, Rod L. Oliver b & Anthony E. Walsby : Cyanobacteria dominance: The role of buoyancy regulation in dynamic lake environments, New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 21, 379-390, 1987.
- 2) G. G. Ganf : Diurnal Mixing and the Vertical Distribution of Phytoplankton in a Shallow Equatorial Lake (Lake George, Uganda), Journal of Ecology , Vol. 62, No. 2, 611-629 , 1974.
- 3) 寶 馨・牧野育代：とうきゅう環境財団 学術 No.281, 2008.
- 4) 牧野育代・矢作裕司・大井秀一：河川流域における平水時と出水時の流出成分特性に関する分析化学的考察，水工学論文集，54 巻，1369-1375, 2010.
- 5) 牧野育代・矢作裕司：異なる河川利用形態に起因する貯水池アオコ形成藍藻種の成長選択に関する研究，土木学会論文集（水工学），Vol.68, No.4, 1651-1656, 2012.
- 6) 日本水道協会：上水試験方法，2001.
- 7) Vollenweider R., Kerekes J. : Eutrophication, monitoring, assessment and control. Final Report, OECD cooperative program monitoring of inland waters, 1982.
- 8) 国立環境研究所：藻類の培養試験法による AGP の測定，国立公害研究所研究報告第 26 号，1981.
- 9) Boutte, C., Grubisic, S., Balthasart, P. & Wilmotte, A.: Testing of primers for the study of cyanobacteria molecular diversity by DGGE, J Microbial Methods, 65(3), 542-550, 2006.
- 10) 針谷さゆり，若山正夫，東島正哉，五井邦宏：別所沼の水質浄化に関する調査（第 1 報），埼玉県公害センター研究報告[17], 45-57, 1990.
- 11) 中野伸一，奥田昇，天野一葉，大林夏湖，小林由紀，田中拓弥，程木義邦，渡邊信，田辺雄彦，近藤竜二，廣石伸互，高尾祥丈，片岡剛文：アオコの分布拡大に関する生態・分子系統地理学的研究，日本生態学会第 57 回全国大会講演要旨，245, 2010.
- 12) 一瀬諭，古田世子：琵琶湖における藍藻の増加と難分解性有機物生成に関わる一考察，日本水処理生物学会第 46 回大会要旨集，20, 2009.
- 13) 一瀬諭，古田世子，岸本直之：部輪湖の内部生産を考量した難分解有機物の一考察，日本陸水学会第 74 回大会要旨集，139, 2009.
- 14) 一瀬諭：湖内生産および分解の変化と難分解性有機物を考慮した有機汚濁メカニズムの解明，平成 22 年度環境省環境研究総合推進費成果発表会，2010.

- 15) 国立環境研究所：湖沼において増大する難分解性有機物の発生原因と影響評価に関する研究，国立環境研究所特別研究報告 SR-36-2001, 2001.

多摩川上流に位置する奥多摩湖の富栄養化に及ぼす
釣りレジャーの影響に関する調査研究

(研究助成・学術研究VOL. 43—NO. 307)

著 者 牧野 育代

発行日 2014年11月1日

発行者 公益財団法人とうきゅう環境財団

〒150-0002

東京都渋谷区渋谷1-16-14 (渋谷地下鉄ビル内)

TEL (03) 3400-9142

FAX (03) 3400-9141

<http://www.tokyuenv.or.jp/>