

2007年~2011年における門池の水質の変化

芳野 恭士*、芳野 文香、芳野 広起、竹口 昌之
沼津工業高等専門学校 物質工学科 (〒410-8501 沼津市大岡 3600)
*k-yoshino@numazu-ct.ac.jp

Change of Water Quality in Kado-ike Pond from 2007 to 2011

Kyoji YOSHINO, Ayaka YOSHINO, Hiroki YOSHINO, Masayuki TAKEGUCHI
Numazu College of Technology (3600 Ooka, Numazu, Shizuoka 410-8501, Japan)

Abstract

In this study, we monitored changes in the water quality in Kado-ike, an irrigation pond in Numazu City, Shizuoka, every year in August from 2007 to 2011. In Kado-ike, the water color was dark green, and algal bloom was seen mainly at points southeast and northwest. Cyanobacteria and spirogyra were observed under a microscope. The pH of the water at any point in Kado-ike was 8 or more alkaline, making it suitable for the proliferation of algae. The chemical oxygen demand tended to be high on the southeast side. Various nitrogen and phosphorus compounds, which would be the main causative materials of eutrophication, were thought to flow mainly from the north side of the pond. It is necessary to take positive measures for water quality purification by using the improvement of a water cycle; removal of the contaminants by activated carbon, carbon fiber, and some plants; and other techniques.

Key words: Water quality, Eutrophication, Kado-ike

1. 緒言

静岡県沼津市の北東の丘陵地域にある門池は、沼津工業高等専門学校のすぐ西側にあり、上津池をもとに江戸時代に農業のための灌漑用溜池として整備されたものである。大正時代に起こった関東大震災の後、その東側を流れる一級河川の黄瀬川（一級河川である狩野川の支流）の水量が減少したため、牧堰用水の水を農業用に補うために再整備された。現在の門池の周囲は約 1.3km、面積は約 13.5ha、深さは約 5~6m であり、沼津市により管理されている。周辺の農耕地の減少により、

農業への利用は減る一方、公園として整備され観光やレクリエーション価値が高まっている（図 1）。しかしながら、近年、富栄養化によるものと考えられる水質の悪化が著しく、毎年夏季になると淡水赤潮の一種であるアオコが発生して水の緑色化と臭気が問題となっている[1]。田畑からの余剰肥料の流出や生活排水によって起こる河川や海、沼湖の富栄養化では、赤潮（主に黄色鞭毛藻類の *Uroglena* spp.や渦鞭毛藻類の *Peridinium* spp.[2,3]）やアオコ（主に *Microcystis* spp.[4]や *Anabaena* spp.等の微小の藍藻類と緑藻類[5]）が繁殖することが



図1 現在の門池の概観
上段は採水地点②周辺，下段は採水地点④周辺の様子で，公園および周回の散策路が整備されている。

知られている。

そこで、門池の2009年から2011年までの毎年8月における水質の変動について検討を行った。また、2011年8月については、10日間の気候の変化に伴う水質の変化についても検討した。なお、本研究で報告する結果の一部は、「沼津高専門池環境調査隊！[1]」の活動によるものを含む。

2. 実験

2.1 2007年～2011年での採水年月日

静岡県沼津市の門池において、2007年～2011年の8月に採水を行った。それぞれの採水日は以下の通りである。

- 1) 2007年8月11日15時：気温32℃、晴れ。
- 2) 2008年8月13日10時：気温33℃、晴れ。
- 3) 2009年8月22日14時：気温32℃、晴れ。
- 4) 2010年8月11日14時：気温32℃、晴れ。
- 5) 2011年8月15日10時：気温34℃、晴れ。

2.2 2007年～2011年での採水地点

図2に示す門池およびその周辺の①～⑫の12ヵ所で、表層の水を採取した。図2中の矢印は、水の流れの方向を示す。ただし、2007年の地点②、⑦～⑫、2008年の地点⑧～⑫については、採水を行わなかった。それぞれの地点の概要を以下に示す。

- ① 門池の南側にある浪人川への放水用水門付近。
- ② 門池の南西側の水域。
- ③ 門池の北西側にある渡戸川放水路への放水口付近。
- ④ 門池の北西側の水域。
- ⑤ 門池の北側の水域。
- ⑥ 門池の北東側にあるビオトープを通る小川からの水の流入口付近。
- ⑦ ⑥に流れ込む小川。川上の地域は住宅地や農地、森林、工業用地等。
- ⑧ 門池の東側を流れる一級河川、黄瀬川から引かれた牧堰用水からの水の流入口付近。
- ⑨ 門池の南東側の水域。
- ⑩ 牧堰用水から分岐した水路。周辺は住宅地。
- ⑪ 牧堰用水の取水口からすぐ下流の黄瀬川。
- ⑫ 門池から放水される浪人川。周辺は住宅地。

2.3 2007年～2011年での水質の分析

採水した水について、直径5cmの白色の円筒状容器に5cmの高さになるよう入れ、その色の濃さを目視により12段階で評価するとともに、そのpHを測定した。また、共立理化学研究所社製パックテスト®を用いて、化学的酸素要求量(COD)、アンモニウム態窒素($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、硝酸態窒素($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、リン酸態リン($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)を測定した。水中の植物プランクトンについても観察を行った。

2.4 2011年における10日間での水質の変化の測定

2011年8月15日の採水後、16日、20日～23日の5日間に降雨があり、気温も15日の34℃から21日～23日の平均で24℃に低下した。そこで、

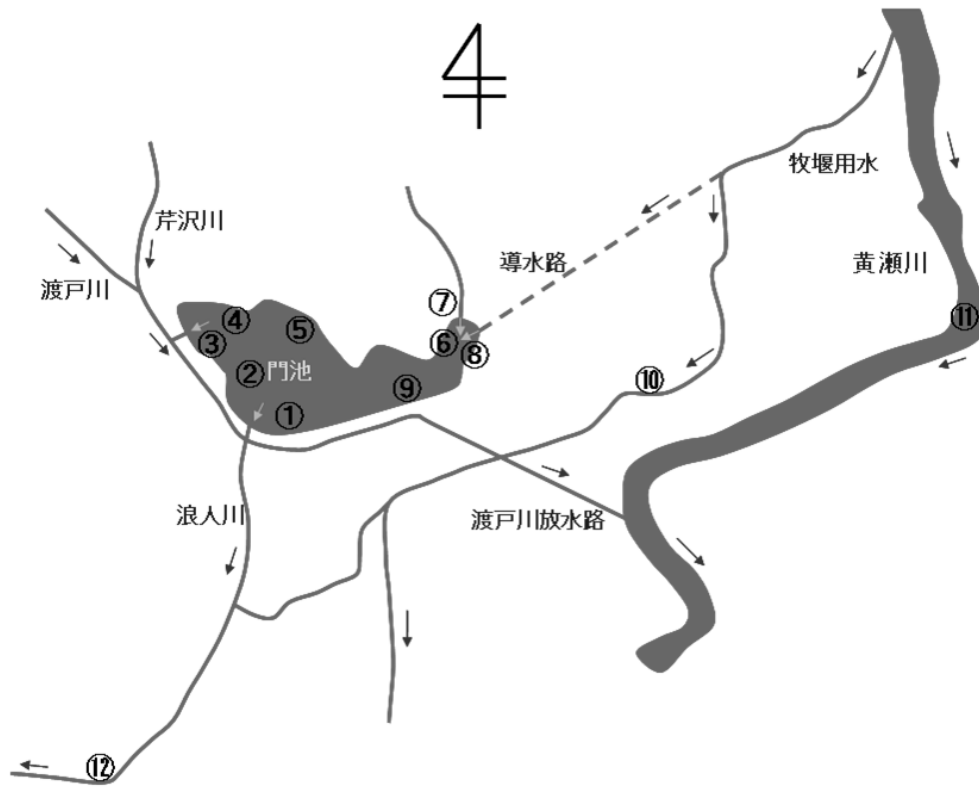


図2 2007年～2011年での門池の採水地点
矢印: 水の流れの方向.

この天気の変動が門池の水質におよぼす影響について検討するため、24日11時（気温31℃、晴れ）に地点⑦および⑧において採水した。この水試料について、2.3項と同様の分析を行った。

3. 結果および考察

3.1 2007年～2011年での採水地点の水色等

門池では、近年、夏になると淡水赤潮のためにその水色が緑色化する。最近では、暖冬傾向のためか、冬の間も緑色が維持されることもある。

図3Aに、目視において最も水色の濃い地点を最高の12として水色の濃い順を示す。各地点での3～5年間の平均値を示した図3Aから、緑色が濃いのは門池の北西～北側の地点④と⑤であることがわかる。また、それに続いて地点①～③の水色が濃い。門池の水は北東側の地点⑥と⑧に外部からの流れ込みがあり、地点①と③から外部

に流れ出するため、全体としては北東側から南西側に向かって水が移動しているものと予想される。北西～北側の地点④と⑤は、この水の流れから外れて水の循環がよくない場所と考えられることから、アオコが滞留しやすいものと考えられる。

また、水の流出口近くの地点①～③の水色も濃いことから、全体として水の流れに沿ってアオコが蓄積している可能性が考えられる。明確な流れのある川あるいは側溝である地点⑦、⑨～⑫では、水色は薄かったが、地点⑦では油膜や泡が見られた。

2009年と2010年の調査で強い臭気を感じたのは、地点①～④、⑥、⑧、⑨であった。

地点⑤と⑧でヘラブナの死体を見かけたが、門池では釣りが盛んなので、この地点で死んだものが死んでから移動したものは不明である。2010年には、地点③と④の付近で多くのヘラブナが水

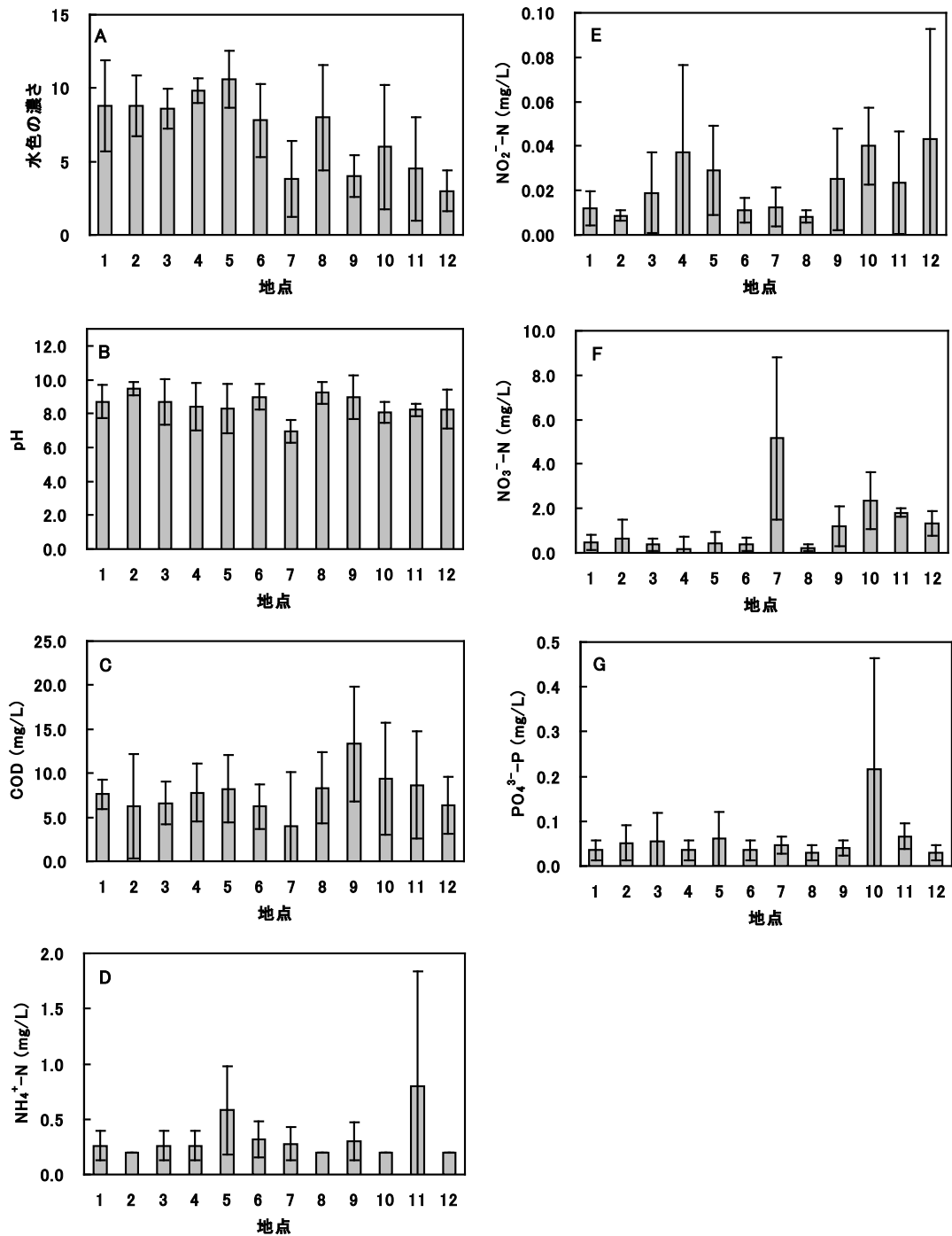


図3 2007年～2011年での門池の採水地点ごとの水質測定結果
 A: 水色, B: pH, C: 化学的酸素要求量, D: アンモニウム態窒素, E: 亜硝酸態窒素, F: 硝酸態窒素, G: リン酸態リン. 平均 ± 標準偏差.

面に集まっているのが観察された。

3. 2 2007 年～2011 年の水中の植物プランクトン

門池の水の緑色化の原因は、その富栄養化のた

めのアオコの大量発生によるものと考えられる。アオコが繁殖すると水中の酸素が消費され、他の動物に酸素欠乏などの影響をおよぼす。また、*Microcystis* spp.の中にはマイクロシスチンのような

毒素を出すことで、他の動物に影響を与えるものもある。アオコは、カビ臭などの臭気の問題を生じることもある。門池でも、アオコによる酸素欠乏や臭気の発生が起こっている可能性がある。そこで、門池の水について実体顕微鏡による観察を行った。3～5年間、門池の中のすべての地点で、図4に示すような藍藻類やアオミドロが観察された。以前に、門池のアオコはその色調と顕微鏡観察から *Microcystis* spp.である可能性が報告されて

いるが確定はされていない[1]。また、マイクロシスチンの発生の有無についても今後の検討課題である。

3.3 2007年～2011年の水質

アオコが発生しやすい条件としては、弱風、水温 15～30℃、pH6～9、窒素やリン等の栄養が豊富であること、などが挙げられる。そこで、5年間の門池の水質について測定し、その結果を表1に示すとともに、各地点の5年間の平均値を図3

表1 2007年～2011年での門池の採水地点ごとの水質測定結果

年	地点											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
水色の濃さ												
2007	12	11	10	9	8	7	6					
2008	10	7	8	11	9	12	6					
2009	6	7	10	9	12	8	5	11				
2010	5	11	8	10	12	6	1	4	3	9	7	2
2011	11	8	7	10	12	6	1	9	5	3	2	4
pH												
2007	8.5		8.5	8.5	8.5	8.5						
2008	8.2	9.0	9.1	6.6	6.6	9.0	6.9					
2009	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	6.5	9.5	9.5	8.0	8.0	8.5
2010	7.5	9.5	6.5	7.5	7.0	8.0	6.5	8.5	7.5	7.5	8.0	7.0
2011	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	7.9	9.7	9.9	8.7	8.7	9.3
COD (mg/L)												
2007	8.0		5.0	5.0	8.0	8.0						
2008	8.0	0.0	6.0	8.0	4.0	6.0	0.0					
2009	6.0	4.0	4.0	8.0	13.0	2.0	0.0	6.0	20.0	13.0	10.0	5.0
2010	10.0	14.0	10.0	13.0	11.0	8.0	13.0	13.0	13.0	13.0	14.0	10.0
2011	6.0	7.0	8.0	5.0	5.0	7.0	3.0	6.0	7.0	2.0	2.0	4.0
NH₄⁺-N (mg/L)												
2007	0.2		0.2	0.2	0.5	0.5						
2008	0.5	0.2	0.5	0.2	0.2	0.2	0.5					
2009	0.2	0.2	0.2	0.5	1.0	0.5	0.2	0.2	0.5	0.2	2.0	0.2
2010	0.2	0.2	0.2	0.2	1.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
2011	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
NO₂⁻-N (mg/L)												
2007	0.02		0.02	0.02	0.02	0.02						
2008	0.01	0.01	0.05	0.10	0.05	0.01	0.02					
2009	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.05	0.10
2010	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05	0.01	0.01	0.01	0.05	0.02	0.01	0.02
2011	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01
NO₃⁻-N (mg/L)												
2007	0.8		0.8	0.8	0.8	0.8						
2008	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	4.8					
2009	0.8	0.4	0.4	0.4	0.8	0.4	5.0	0.4	1.8	1.6	1.6	1.2
2010	0.4	1.9	0.3	0.1	0.6	0.4	1.0	0.1	1.6	3.8	1.9	0.8
2011	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	9.8	0.2	0.2	1.6	1.9	1.9
PO₄³⁻-P (mg/L)												
2007	0.05		0.05	0.05	0.05	0.05						
2008	0.07	0.07	0.17	0.07	0.17	0.07	0.07					
2009	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.05	0.05
2010	0.02	0.10	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.05	0.50	0.10	0.02
2011	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.02	0.02	0.10	0.05	0.02

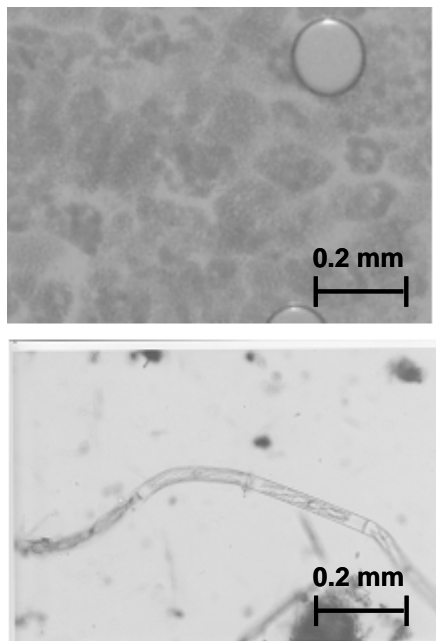


図4 門池で観察された植物プランクトン
上段は藍藻，下段はアオミドロ。

に示す。

図 3B に pH の測定結果を示す。3～5 年間の平均値では、図 3B に示すように、地点⑦の水のみ pH6.95 とほぼ中性であったが、それ以外の地点はすべて pH8 以上のアルカリ性であった。また、門池外である地点⑦、⑩～⑫は、その他の門池内の地点に比較して水の pH が低かった。従って、門池内の水は流入後に pH が高まっているものと考えられる。中でも pH が 9 前後と高かったのは、地点②、⑥、⑧であった。水のアルカリ性化の原因としては、大量に発生したアオコによる光合成で水中の二酸化炭素が消費されたことによる可能性がある。特に地点②では、その pH が上昇したことで、アオコがさらに増加し易い環境になっているものと思われる。門池は小規模の灌漑用溜池ではあるが、「生活環境の保全に関する環境基準（湖沼）」の基準を参照した場合、表層水としての pH8.5 以下の地点は④と⑤のみであり、良い水質とは言い難い。

図 3C には COD の測定結果を示す。3～5 年間

の平均値では、図 3C に示すように、地点⑨が高く地点⑦で低かった。その他の地点ではあまり差が見られなかったが、地点⑦の水が流れ込こむ地点⑥、門池の水の流出口近く地点②、門池から流出した地点⑫の水の COD は若干低い傾向が見られた。「生活環境の保全に関する環境基準（湖沼）」の基準を参照した場合、類型 C の 8mg/L 以下という条件を満たす地点は①～④、⑥と多かった。

図 3D にアンモニウム態窒素の測定結果を示す。3～5 年間の平均値では、図 3D に示すように、強い汚染の目安となる 0.5mg/L を超える地点は⑤と⑪のみであったが、これらの地点は年度間のバラツキが大きく、必ずしも常に高い値を示しているわけではない。その他、0.2mg/L を超えた地点は①、③、④、⑥、⑦、⑨であった。

図 3E に亜硝酸態窒素の測定結果を示す。3～5 年間の平均値では、図 3E に示すように、汚染の目安である 0.02mg/L を超える地点は④、⑤、⑨、⑩、⑫であった。

図 3F に硝酸態窒素の測定結果を示す。3～5 年間の平均値では、図 3F に示すように、汚染の目安である 2mg/L を超えた地点は⑦と⑩であった。しかし、地点⑦での年度間のバラツキは大きかった。門池内では地点⑨の値も高めであった。以上の 3 種の窒素量を合計した場合、「生活環境の保全に関する環境基準（湖沼）」の類型 V の全窒素 1mg/L 以下という条件を満たさなかった門池内の地点は、⑤と⑨であった。ただし、今回求めた窒素量には有機態窒素は含まれていない。また、地点⑦の窒素量が 5.44mg/L と目立って多かった。従って、門池に流れ込む窒素は地点⑦の小川からの硝酸態窒素が多く、その上流の広域の住宅地、農地、工業用地等から集まってくるものと予想される。また、広大な森林があることから、その汚染源の特定は難しいものと考えられる。そして、門池に流入した窒素は主に地点⑤と⑨に滞留して、その地点の水質の悪化をもたらすものと思われる。

図 3G にリン酸態リンの測定結果を示す。3～5 年間の平均値では、図 3G に示すように、門池内のすべての地点で「生活環境の保全に関する環境基準（湖沼）」の類型 V の全磷 0.1mg/L 以下という条件を満たしていた。類型 IV の全磷 0.05mg/L 以下という条件を満たさなかった門池内の地点は、③と⑤であった。ただし、今回の測定値はリン酸態リンで、全磷の一部と考えられる。窒素の場合と異なり、特に門池への水の流入口付近でリン酸態リンの高い地点が認められず、その汚染源は明確ではなかった。

3. 4 2011 年における 10 日間での水質の変化

2011 年 8 月 15 日の採水後、5 日間の降雨が続き、気温が 34℃から 24℃に一時的に低下した。そこで、その後晴れて気温が 31℃となった 8 月 24 日の地点⑦と⑧の水質を測定し、8 月 15 日と比較した。これらの地点は、門池に外部から水が流入する場所である。

図 5 に示すように、地点④、⑤、⑦、⑧での観察で、降雨により門池の水が増加し水色が僅かに薄くなった。しかし、地点⑦では油膜の増加が見られた。水質については表 2 に示すように、地点

⑦と⑧の両方で pH が僅かに低下した。一方で、COD はどちらも増加しており、地点⑦で油膜が増加していたことから、雨水とともに様々な物質が流れ込んだものと考えられる。また、水の流入により、水の循環が良くない門池の深層の堆積物等が攪拌されて表層に移動した可能性もある。アンモニウム態窒素と亜硝酸態窒素の量は、地点⑦および⑧ともに降雨による変化はなかった。これらの窒素量は、3～5 年間で地点⑦と⑧で特に高い値は見られていない。これに対し、硝酸態窒素の量は地点⑧では降雨による変化はなかったものの、地点⑦では低下した。地点⑦の硝酸態窒素量は 3～5 年間で高く、ここから門池の北部の広域の窒素含有化合物が流れ込んでいる可能性があるが、降雨によりその値が低下したことはこの推測を支持するものと考えられる。同様に、地点⑧でのリン酸態リンの量は降雨で変化しなかったが、地点⑦では減少した。従って、リン含有化合物の流入も、主に地点⑦から起こっている可能性がある。以上の結果から、5 日間程度の降雨によって増水しても、門池の水質には大きな影響が見られないものと考えられる。

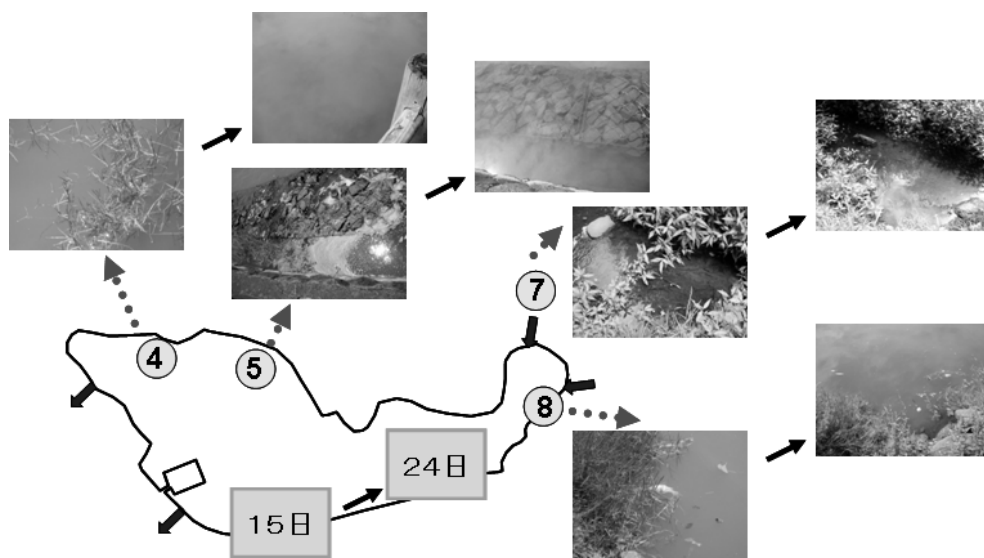


図5 2011年における10日間中の降雨による水の変化

表2 2011年における10日間中の降雨による水質の変化

	地点⑦		地点⑧	
	2011年 8月15日	8月24日	8月15日	8月24日
pH	7.94	7.43	9.9	9.52
COD (mg/L)	3	4	5	8
アンモニウム態窒素 (mg/L)	0.2	0.2	0.2	0.2
亜硝酸態窒素 (mg/L)	0.02	0.02	0.005	0.005
硝酸態窒素 (mg/L)	10	5	0.2	0.2
リン酸態リン (mg/L)	0.05	0.02	0.02	0.02

4. まとめ

2007年～2011年の8月における門池の水質等について検討し、その北西側および南東側の水の流れから外れていると予想される地点を中心に、富栄養化が起こってアオコが発生していることがわかった。また、発生したアオコは水流に従って移動し、南西側の流出口周辺に滞留しているものと考えられる。富栄養化の原因となる窒素含有化合物の多くは、主に門池の北側から流れ込んでおり、リン含有化合物の流入箇所は明確ではなかったものの、やはり北側からの流入の可能性が高いものと予想された。アオコや栄養塩の門池内での移動には水の流れが大きな影響を与えるものと考えられ、今後とも門池内での水流について把握する必要がある。岡村ら[6]は、最近、門池における水流について2次元でのシミュレーションを試みている。

また、5日間ほど降雨が継続したところ、pHや硝酸態窒素、リン酸態リンの量がその流入口で低下したが、増水による希釈効果はわずかであった。一方、CODの増加から、あらたな汚染物質の流入や池底の汚染物質の攪拌も起こったことが予想された。今回の調査では、門池と周囲の河川の水質に著しい違いが見られない傾向があった。これは、門池に流入した河川水が比較的そのまま表層を移動しており、その表層水を採取したためである可能性がある。門池の富栄養化の実態をより把握するためには、その中層や底層の水質について

も調査するとともに、鉛直方向の水の移動状況を検討する必要があるものと思われる。

このような富栄養化を防止するための方策として、現在の門池では年に数回の水の入替えを行っている。しかし、十分な効果が認められたとは感じられず、今後、水中攪拌機による鉛直循環やエアレーションなど[3,4]、他の水処理法についても積極的に検討する必要があるものと考えられる。我々は、これまでに門池の水を使用して、活性炭または水耕栽培用のフロートに入れた植物による浄化実験を試行してきた。2010年7月12日に地点⑨より採取した水500mLを用い、これにジェックス社製活性炭40gを入れたものと入れないものを用意し、穴の開いたラップで覆い9日間野外に放置した。その結果、活性炭を入れた方の水のCODと亜硝酸態窒素は、入れなかった場合のそれぞれ77%と20%に低下した。また、2009年には門池の地点⑧付近から採取した水を39Lの容器に入れ、グラジオラス (*Gladiolus gandavensis*) あるいはカトレアクローバー (*Trifolium burchellianum*) を入れたフロートを載せて58日間栽培したところ、未処理水の亜硝酸態窒素と硝酸態窒素が0.1および0.5mg/Lであったのに対し、植物栽培を行った群ではそれぞれ検出されなかった[7]。門池の地点⑥にはビオトープも設置されているが、枯れた植物は吸収した栄養塩を放出してしまう可能性がある。しかし、フロートを用いた植物の水耕栽培は安価で小規模に

でき、景観の向上に加えて枯れた植物の回収が容易といった利点がある。沈水植物であるキンギョモ (*Ceratophyllum* spp.) [8]やオオカナダモ (*Egeria densa*) [9]、球根植物であるチューリップ (*Tulipa gesneriana*) やサフラン (*Crocus sativus* L.) [10]、さらにはクレソン (*Nasturtium officinale*) やインパチェンス (*Impatiens walleriana*) [11,12]についても水質浄化の効果があることが知られている。このような水質浄化の手法についても、今後継続的に検討する必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 竹口昌之, 蓮実文彦, 押川達夫, 佐藤崇徳, 平田陽一郎, 志田誠吾, 川口友之, 門池の水質 ～門池環境調査隊! 3年間の取り組み～. 沼津高専研究報告, vol.43, pp.283-286 (2009).
- 2) 石田祐三郎, 淡水赤潮. 水質汚濁研究, vol.14, pp.270-275 (1991).
- 3) 岸本幸雄, 旗持和洋, 前田広人, 鉛直循環による淡水赤潮発生対策について. 日本水産学会誌, vol.62, pp.3-11 (1996).
- 4) 芹沢 浩, 雨宮 隆, 伊藤公紀, 相模湖と津久井湖におけるアオコ異常発生現象の数理モデル解析. 技術マネジメント研究, vol.9, pp.1-14 (2010).
- 5) 辻村茂男, 湖沼におけるラン藻の個体群動態解析に向けた取り組み. 日本プランクトン学会報, vol.55, pp.51-54 (2008).
- 6) 岡村尊史, 大島 茂, 松本祐子, 水質改善に向けた門池内流れの数値解析. 沼津高専専攻科研究発表論文集, No.11, pp.29-32 (2013).
- 7) 芳野恭士, 蔭山夏美, 笠井彩菜, 篠根宏崇, 鷺巣浩己, 植物による水質浄化に関する予備的研究. 沼津高専研究報告, vol.44, pp.293-298 (2010).
- 8) 藤田和男, 北村雅美, 斉藤直己, 水生植物(沈水植物)の水質浄化効果に関する実験. 岡山県環境保護センター年報, vol.30, pp.17-24 (2006).
- 9) 高柳 周, 長谷川 博, 沈水植物用栽培システムの開発. 近畿作物・育種研究, vol.50, pp.67-70 (2005).
- 10) 山口 聡, 井上啓祐, 村上ゆき枝, 大橋広明, 上堂秀一郎, フローティングガーデンによる水面緑化と水質浄化(第2報) サフランとチューリップの生育と水質浄化作用. 園芸学会雑誌 別冊, vol.68, p.478 (1999).
- 11) 平野浩二, 井上 充, 花きの水耕栽培による水質浄化に関する研究 インパチェンスによる T-N-T-P 吸収速度について (その1). 日本水処理生物学会誌 別巻, vol.14, p.87 (1994).
- 12) 笹田康子, 石原 暁, 土取みゆき, 冠野禎男, 水生植物を活用した水質浄化実験(第1報)-豊稔池の水質浄化の試み-. 香川県環境保健研究センター所報, vol.2, pp.47-56 (2003).