

ダム貯水池におけるカビ臭発生要因の検討

INVESTIGATION OF THE FACTORS OF MUSTY ODOR IN A DAM RESERVOIR

横山 洋¹・山下 彰司¹
Hiroshi YOKOYAMA and Shoji YAMASHITA

¹正会員 (独) 土木研究所寒地土木研究所水環境保全チーム (〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

In the Takisato dam reservoir, musty odor of 2-Methylisoborneol (2-MIB) has been caused by proliferation of *Phormidium tenue* in summer in some years. The peak of 2-MIB concentration is different by a year and lower than threshold level in some years. Therefore it is difficult to determine the conditions of generation of musty odor.

Proliferation tests of *Phormidium tenue* were carried out to investigate the occurrence condition of outbreak of cells and 2-MIB in the reservoir. In this test, suspended solid level of inflow river, especially phosphorous concentration, affected the growth rate of *phormidium tenue*. Proliferation tests of mixture algae using on-site sample were carried out. The ratio of nitrogen and phosphorous affects the growth rate of *phormidium tenue*. In this test growth rate of *phormidium tenue* was larger under lower N/P

Key Words : *Phormidium tenue*, 2-Methylisoborneol (2-MIB), proliferation test of algae, Suspended solid, ratio of nitrogen and phosphorus(N/P)

1. はじめに

ダム貯水池をはじめとする水道水源におけるカビ臭発生は、多くの事例が報告されている。これらのカビ臭の原因として、汚濁負荷の流入に伴い増殖した藍藻類や放線菌から発生するジェオスミンや2-メチルイソボルネオール (2-MIB) が確認されている。カビ臭物質は低濃度であっても人間に感知されやすい。カビ臭の発生傾向が見られる水源から水道水を供給する事業者にとり、カビ臭の抑制と対策は非常に重要な問題である。

本研究で対象としている滝里ダムは、ダムの完成から3年経過した2002年6月に、2-MIBによるカビ臭が発生し、下流の水道利用者から異臭味に関する苦情が寄せられた。その後の調査により、2-MIBの発生は藍藻類の一種である *Phormidium Tenue* (以下、特に断らない場合「フォルミジウム」と記す) の増殖に起因するものと推定された¹⁾。ダム貯水池における毎年の2-MIB最大濃度は03~04年夏季には閾値(滝里ダムでは5ng/l)を越えた一方、05年及び06年は閾値以下で推移しており、カビ臭発生状況は年ごとに異なっている。現在カビ臭抑制対策として曝気等が検討されており、カビ臭をもたらす条件やその引き金となる因子の把握は重要である。

フォルミジウム増殖による2-MIB発生のメカニズムについては、様々な調査研究が行われている。例えば工藤

らは過去に集中的にカビ臭問題の生じたダム貯水池において、フォルミジウム増殖と2-MIB濃度の関係を検証している。その結果、フォルミジウム現存量増加に適した表層水温条件、フォルミジウム増殖と2-MIB濃度上昇の関連性等、重要な知見が得られている²⁾。また杉原らは滝里ダムを対象に、フォルミジウムの増殖を組み込んだ水質シミュレーションモデルを構築した。藻類増殖に影響を与える因子として水質、水温、湖内流動との関係を検証し、放流口の位置が及ぼす影響についても考察している³⁾。これら既往研究による知見の蓄積により、フォルミジウムによる2-MIB発生特性はかなり明らかにされている。しかし現地における藻類増殖のきっかけを把握するには、現地試料(湖水、流域河川水、藻類)による試験を行い、その特性を把握することが不可欠である。

本研究では、2-MIB発生に強い相関を持つフォルミジウムについて、様々な条件下で藻類増殖試験を行い、藻類増殖やカビ臭発生の引き金となる要因を考察した。これらの試験結果をもとに、カビ臭発生をもたらす因子について検討を行った。

2. 滝里ダムの流域特性

滝里ダム流域の特性について概要を示す(図-1)。滝里ダムには本川である空知川の他、主要支川として富良

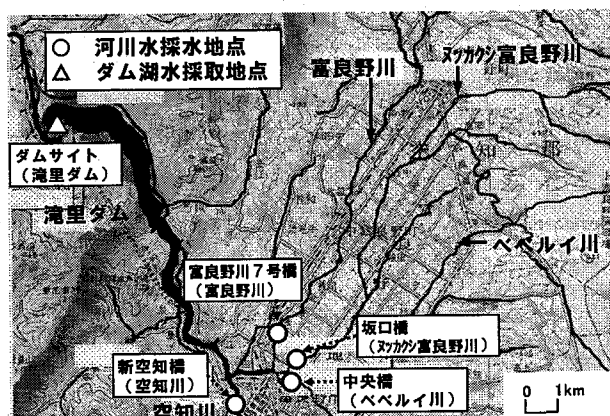


図-1 滝里ダム位置図及び流入河川

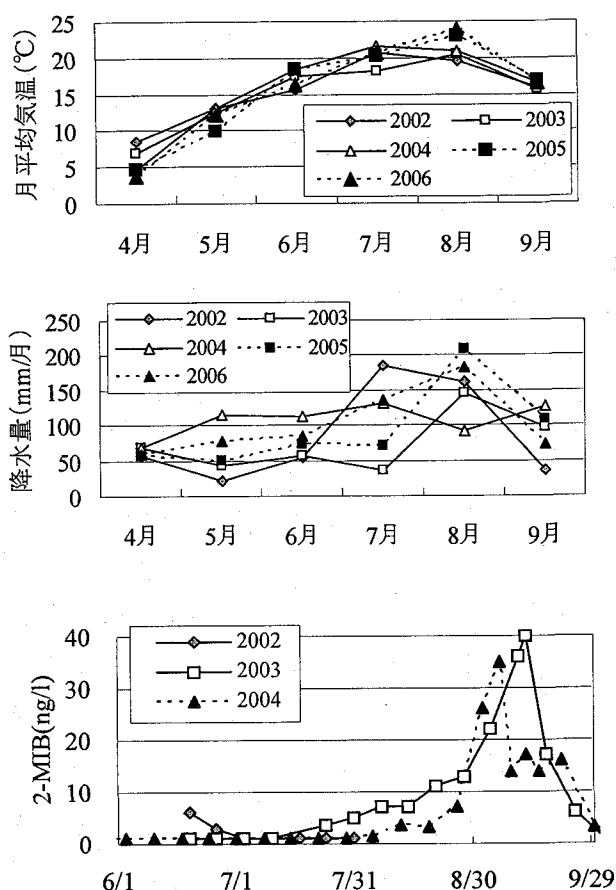


図-2 芦別気温、降水量とダムサイト2-MIB濃度変遷

野川が流入し、その支川としてベペルイ川、ヌッカクシ富良野川が流入している。高田ら⁴⁾によると、空知川流域は森林域がその大半を占めている一方、支川である富良野川流域は農地の占める割合が大きい。河川流量は空知川が富良野川に比べ多いが、アンモニア態窒素、オルトリン酸態リンの各河川における負荷量は、富良野川流域からの流出量が多いことが報告されている。

一般に藻類増殖に影響を与える因子としては、気温、(水温)、日射量、出水による栄養塩供給が考えられる。

図-2は2002～06年における、ダム近傍地点である芦別のアメダス観測値による月平均気温、月降水量⁵⁾、ダムサイト表層における夏季(6月～9月)の2-MIB濃度(滝里ダム管理所による水質観測)を比較したものである。ただし2-MIBは05年においては最大2.2ng/l、06年においては定量下限値(1.0ng/l)以下と、閾値を越えなかったため、この2カ年はグラフから省略した。

カビ臭が確認された年のうち、02年は6月上旬に臭気に関する苦情が寄せられたが、水質調査を始めた6月後半は2-MIB濃度は低下中であり、7月には閾値以下となっている。一方03年、04年は7月下旬から8月にかけて2-MIB濃度が上昇し、9月上旬でピークを迎えている。02年は臭気発生の前月である5月の降水量が他の年に比べ少ない。しかしこのことが、カビ臭発生時期が他の年と比べ早かったことと関係があるかは不明である。またカビ臭発生が見られない05年、06年はカビ臭発生が見られた03年、04年に比べ8月の月平均気温が2～3℃程度高く、月降水量も若干多い。05年は8月下旬及び9月上旬の2回、比較的規模の大きい出水が見られており、このことが同年のカビ臭発生を抑制した可能性も考えられる。一方で03年にも05年と同程度の規模である出水が8月上旬に生じ、この年の8月から9月にかけての2-MIB濃度は閾値以上で推移している。

以上の考察より、過去の出水、夏季気温データからは、滝里ダムの2-MIB濃度に有意な差が生じているか判断することは困難である。気象条件によるカビ臭発生判定には、今後さらなるデータ収集と検討が必要と思われる。

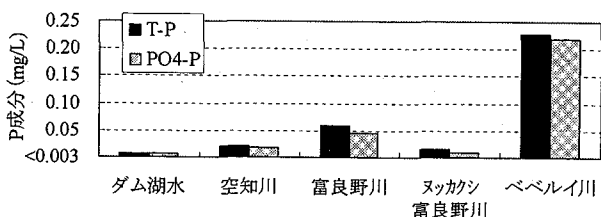
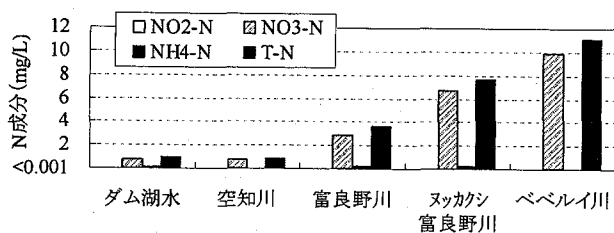
3. 藻類増殖試験

(1) フォルミジウム単種培養試験

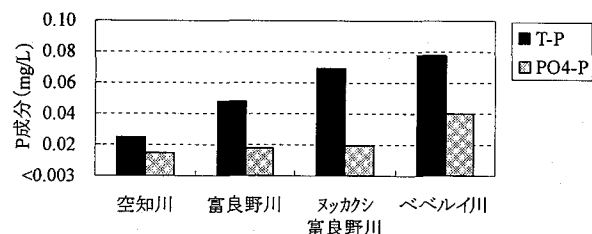
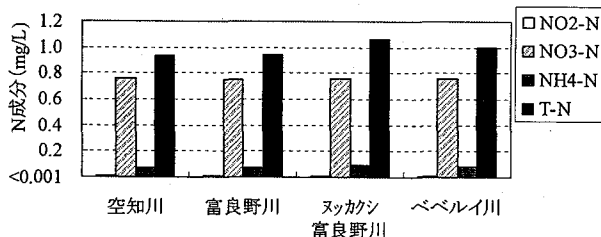
滝里ダムへの流入河川は、ダム湖水への栄養塩供給に大きな役割を占めている。そこで出水時の河川水がダムに流入した場合を想定した試験を行う。湖水に各河川水のSS成分及び溶解性成分を加えた培地でフォルミジウム単種による増殖試験を行い、出水時のSS成分が湖水に与える影響を検証した。

試験に用いた藻類はフォルミジウム標準種(NIES-512; 国立環境研究所)である。河川水採水地点は図-1に示すとおりである。ダム湖水は平水時である2005年9月30日に採水した。河川水は台風の影響による出水時である2005年9月8日に採取している。ダム湖水及び河川水は0.45μmメンブランフィルターでろ過し、SS成分と溶解性成分に分離した。ろ過湖水へのSS添加は全て50mg/lとなるように調整した。培養中の気温は25度に保った。照度は2500lux(白色蛍光灯、明暗12時間周期)である。

ろ過湖水、ろ過河川水及び河川水SSを添加したダム湖水の栄養塩濃度を図-3に示す。ろ過河川水(図-3(a))



(a) ろ過河水

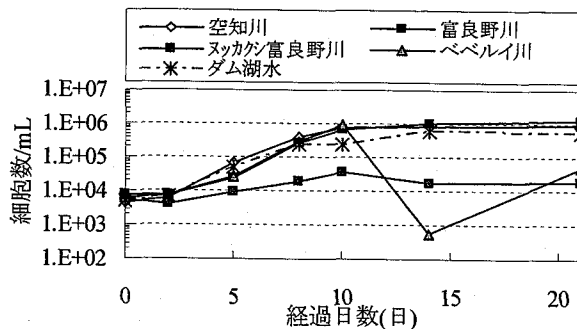


(b) ろ過湖水+SS添加

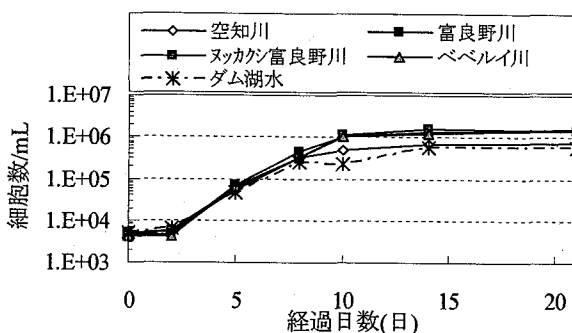
図-3 各試料の栄養塩濃度

の窒素成分濃度は、空知川は湖水とほぼ同じである。富良野川、ヌッカクシ富良野川、ベベルイ川（以下この3河川をまとめて「富良野川流域3河川」と称する）の窒素濃度は空知川と比べて高い。リン濃度はベベルイ川が他河川に比べ特に高く、富良野川もやや高い値を示す。SS添加水（図-3(b)）では、窒素濃度はいずれの河川もほぼ同様の値をとっている。リン濃度は、富良野川流域3河川は空知川に比べて値が高い。オルトリン酸態リンはベベルイ川で特に高い濃度を示している。なお2-MIB濃度上昇傾向とフォルミジウムの増殖傾向はほぼ同一であったことから、本稿ではフォルミジウム増殖特性は細胞数で評価することとした。

まずろ過河水でのフォルミジウム増殖特性を検証する（図-4(a)）。ベベルイ川で14日目に細胞数が急減しているが、その理由は不明である。対数増殖期と見なせる培養開始から10日間については、各試料とも増殖傾向はほぼ同じであり、妥当な試験結果が得られている。そこで以下10日目までの増加特性をもとに議論する。富良



(a) ろ過河水



(b) ろ過湖水+SS添加

図-4 フォルミジウム細胞数変遷

野川とベベルイ川の細胞数はほぼ同じ値で増加している。ダム湖水及び空知川は富良野川、ベベルイ川に比べ増殖の立ち上がり時期は早い。増殖ピーク時の細胞数はヌッカクシ富良野川を除きほぼ同オーダーである。水質特性を見ると、富良野川、ベベルイ川は、ダム湖水、空知川に比べ窒素成分の濃度が高く、リン濃度も高い傾向である。ただし細胞数増加特性への栄養塩濃度の影響は、今回の試験結果から判別するにはデータは十分ではない。ヌッカクシ富良野川の細胞増殖数ピークは他河川に比べ1オーダー以上低い。これはヌッカクシ富良野川上流では温泉水が流入し、河川水が酸性傾向であること（ヌッカクシ富良野川pH=5.6, 他河川pH=6.7~7.6）が原因と考えられる。

続いて流入河川水のSSを添加したフォルミジウム増殖特性について検証する（図-4(b)）。富良野川流域3河川の細胞数はいずれもほぼ同じ値で増加している。空知川での細胞数も試験開始後7日目までは富良野川流域3河川と同じ傾向で増加している。ピークに達した10日目の細胞数は、空知川は富良野川流域3河川に比べ明らかに小さい。窒素濃度は空知川と富良野川流域3河川でほぼ同じである一方、全リン濃度は空知川に比べ富良野川流域3河川は高い値を示す。このことはSS中のリン含有量がフォルミジウム増殖に影響していることを示唆している。

オルトリン酸態リンについては、空知川は他河川に比べやや低い値であるが、オルトリン酸態リン濃度とフォルミジウム増殖特性の関係は、今回の試験データから明

表-1 ダム湖水混合藻類培養試験における
原水の水質及び藻類細胞数

	表層	中層	下層
T-N(mg/l)	0.85	0.84	0.97
T-P(mg/l)	0.023	0.026	0.051
N/P比	37	32	19
Chl-a(mg/m ³)	5.4	3.5	2.5
植物プランクトン 総細胞数(cells/ml)	1437	588	175
Phormidium tenue 細胞数(cells/ml)	0	1.4	0.36

表-2 ダム湖水混合藻類培養試験 設定条件一覧

条件名	水温	N/P比	備考
ケース1	20℃一定	19~37	原水（無調整湖水）
ケース2	20℃一定	23~26 (24)	2003年出水ベース (カビ臭発生)
ケース3	20℃一定	40~45 (41)	2004年出水ベース (カビ臭発生)
ケース4	20℃一定	16~17 (17)	2006年出水ベース (カビ臭非発生)
ケース5	20℃一定	59~64	高N/P比
ケース6	20℃一定	9~10	低N/P比
ケース7	20℃一定	45~53	2週間後栄養塩添加 (04年出水ベース)
ケース8	15℃→20℃	ケース1 に同じ	1週間後水温上昇

※N/P比の（ ）内数字は出水後ダムサイト表層の値であり、各ケースのN/P設定目標値である

瞭な違いは確認できなかった。

なおこの試験で試料を採取した2005年は、現地での2-MIB濃度は閾値（5ng/l）以下で推移している。しかしリン成分が一定以上河川水中に含まれる場合に、フォルミジウム株がダム湖に流入することで、2-MIB濃度が上昇する潜在的可能性があることが示された。

(2) 現地湖水による混合藻類培養試験

前項では、フォルミジウム標準株単種による培養試験を行った。しかし実環境では多様な藻類が混在しており、異なる種の藻類が互いに影響しながら増殖するのが自然である。そこで現地で採取した湖水を対象に混合藻類増殖試験を行い、フォルミジウム増殖が卓越する条件を見出すことを試みた。

試料となる湖水の採取は、ダムサイト地点（全水深25.3m）において2006年9月21日に行った。採水は表層（水深0.5m）、中層（水深12.7m）、下層（水深24.3m）の3層で実施した。採取した湖水の水質及び藻類数を表-1に示す。湖水のT-Nは湖底近傍でやや高い。T-Nの形態としては、全試料とも硝酸態窒素の割合が高く、8割前後を占めた。T-Pは湖底近傍で高い値を示す。採取し

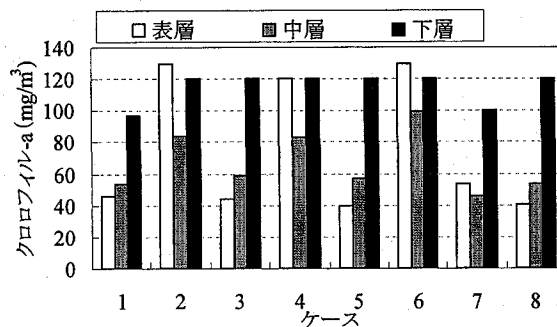
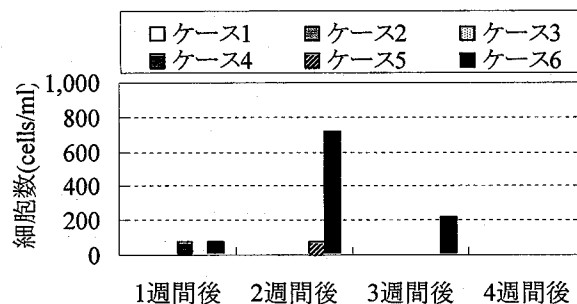
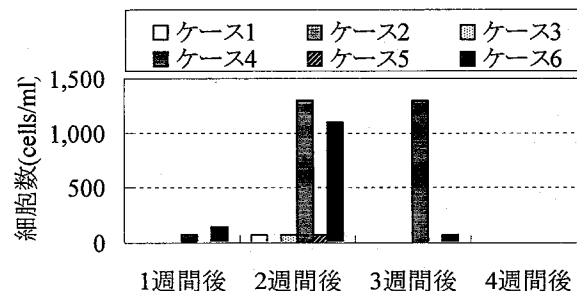


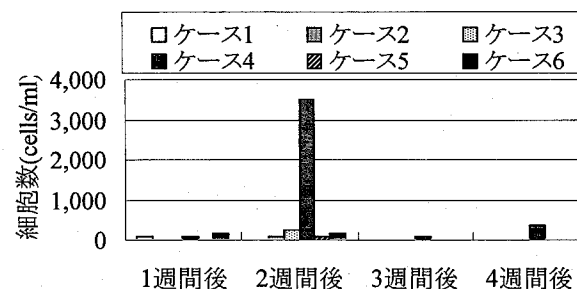
図-5 混合藻類試験クロロフィルa濃度
(試験期間中の最大値で比較)



(a) 表層



(b) 中層



(c) 下層

図-6 N/P比変化によるフォルミジウム細胞数変遷

た原水中の優占種は、珪藻類のCyclotella spp.であり、全細胞数の7割前後を占めていた。この藻類は、現地でも春季、秋季に増加することが確認されている。

試験条件を表-2に示す。ケース1は採取した原水である。藻類増殖に対する影響因子として、藤本らは藍藻類の優占化に重要な環境因子の1つである窒素リン比

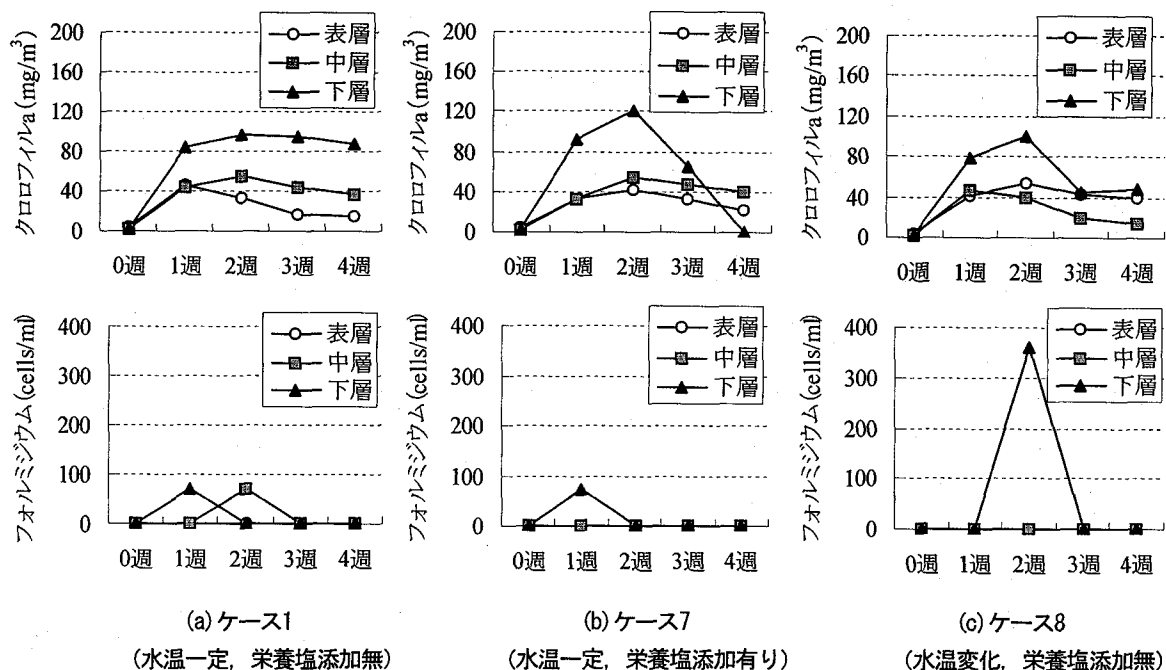


図-7 クロロフィルa濃度変遷

(N/P比)に着目している⁶⁾。そこで本研究でもN/P比による増殖特性の違いを比較検討する。カビ臭発生が見られた2003年、2004年とカビ臭発生が見られなかった2006年の出水時N/P比を参考にしたケース(ケース2~4)、高N/P比(ケース5)、低N/P比(ケース6)について試験を行った。また出水による栄養塩流入、日射による水温上昇等の変化を想定し、培養期間中に栄養塩、水温を変化させるケース(ケース7、8)も実施した。照度条件は5000lux(白色蛍光灯、明暗12時間周期)である。培養期間は4週間であり、試験開始から1週間ごとに採水して分析を行った。T-N、T-P濃度の調整は硝酸カリウム及びリン酸カリウムを用いた。

まず混合藻類全体での増殖状況について、クロロフィルa濃度から考察する。クロロフィルa濃度が最大となる週数は、採取した層、試験条件により異なる。そこで試験期間中における最大値で比較した(図-5)。全体的な傾向として下層で高濃度を示しており、湖底付近の藻類は条件が整えば増殖能力が高いことが示唆される。またケース2、ケース4、ケース6は他ケースと比べ表層及び中層でのクロロフィルa濃度が高くなっている。これらのケースは他ケースよりもN/P比が低くなっており、N/P比が25~30前後を境に増殖特性が異なっている。

続いてカビ臭と密接に関連すると考えられるフォルミジウム増殖状況とN/P比の関係を検証する。図-6はケース1~6の細胞数変遷を示す。増殖開始から2~3週間経過後にケース4と6でフォルミジウム増殖が進行している。両ケースともにN/P比が低い条件である。現地でカビ臭が発生した2003年、2004年出水の水質に合わせたケース2、3はN/P比が高く、フォルミジウムはほとんど増殖していない。藤本らはN/P比が高くなると藍藻類の優占率

が低くなることを全国の湖沼水質データから明らかにしており⁶⁾、本試験でもその傾向が見られた。

増殖試験の途中で栄養塩濃度、水温を変化させたケースについて検証する。図-7はケース1、7、及び8の試験期間中におけるクロロフィルa濃度の最大値である。藻類増殖は培養開始後1週間で対数増殖期を終え、2週間でピークに達している。本試験では、水温変化は培養開始後1週間後、栄養塩添加は2週間後に行った。しかし変化を与えた時期は藻類活性度がピークを過ぎたと考えられ、そのため水温や栄養塩濃度を変化させても増殖特性に違いが生じなかったと考えられる。なおフォルミジウム細胞数は、ケース7の下層で360cells/mlまで増加したが、その他は100cells/ml以下であり、今回の試験では水温や栄養塩の違いによる有意な差は確認できなかった。

(3) フォルミジウム増殖特性の考察

混合藻類増殖試験では、N/P比が低い場合にフォルミジウムの増殖が顕著であった。一方現地湖水のN/P比はカビ臭が発生した03年、04年よりも、カビ臭が非発生である06年の方が低い。N/P比を指標で比較すると、藻類培養試験の結果は現地のカビ臭現象と傾向が一致しない。原因の1つに、季節による湖水の藻類組成や活性度の違いが考えられる。図-8に滝里ダム管理所で実施した03年と06年のダムサイト表層付近における藻類組成を示す。03年は8月下旬から9月上旬、06年は8月中旬に藍藻類の増加が顕著である。一方、06年9月に採取した混合藻類試験用原水では珪素類が主体であり、藍藻類の占める割合は非常に小さい。03年の現地湖水中の総細胞数に占める藍藻の割合も、9月後半には減少傾向であることから、秋季の藍藻類の活性度は低下傾向と推定される。夏季と

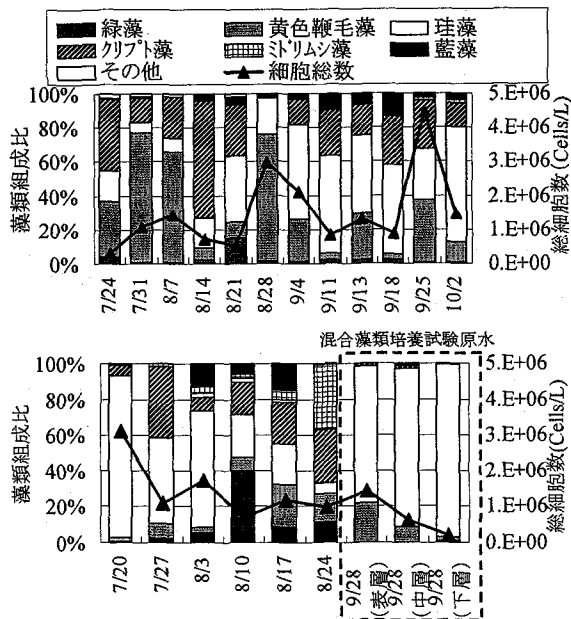


図-8 ダムサイト表層における藻類組成
(上段：2003年、下段：2006年)

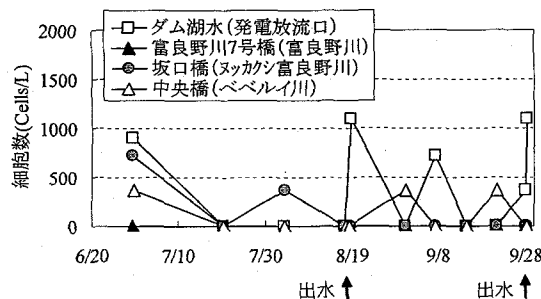


図-9 フォルミジウムの細胞数変遷 (06年)

秋季では藻類活性度や種別間での競争状況が異なると考えられ、今後夏季に採取した試料で藻類増殖試験を行い、現地の藻類増殖状況と比較、考察することが必要である。

続いて湖内のフォルミジウム細胞数と出水の関係を考察する。図-9は06年夏季のダム湖内（発電放流口）及び流入河川（富良野川流域3河川）での *Phormidium tenue* 細胞数の変遷である。発電放流口でのフォルミジウム細胞数は、出水時に増加する傾向が見られた。しかしこの年は *Phormidium tenue* の細胞数が少ないこともあり、2-MIB濃度上昇は見られなかった。一方各流入河川では出水時の細胞数変動は見られない。河川水では一時的にフォルミジウム細胞数の増加が見られるが、これは河床の礫等に付着していたフォルミジウムが剥離した可能性が考えられる。湖内での藻類増殖と流入河川の関係については、今後とも調査の継続が必要と思われる。

また湖水中の栄養塩の形態については、河川水SSのリン濃度が増殖に影響することが示されており、夏季出水後のリン成分の溶存形態が藻類増殖に及ぼす影響も考えられる。手塚ら⁷⁾は微細土粒子が閉鎖性水域の富栄養化

傾向において重要な因子であることを示している。出水後のダム湖内における懸濁物及び栄養塩の形態について整理し、藻類増殖試験の初期条件設定に反映させることが今後の課題である。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) フォルミジウム単種による培養試験を行った。流入河川水SS中のリン成分が多いケースで、フォルミジウムの増殖が促進された。
- 2) 秋季のダム湖水を採取し、混合藻類培養試験を行った。その結果 N/P比が低い条件下でフォルミジウムの増殖が顕著であった。
- 3) 水温や栄養塩濃度の変化が生じる場合を想定し、藻類増殖試験中に培養条件を変化させ混合藻類培養試験を行った。しかし対数増殖期を過ぎて培養条件を変化させたためか、培養期間中の条件変化による影響は把握できなかった。

今後はフォルミジウム増殖能が高いと考えられる夏季湖水で藻類増殖特性を把握し、N/P比以外にも栄養塩の形態等も考慮した藻類増殖因子の検討を行い、カビ臭発生の引き金となる要因の把握を進める予定である。

謝辞：本研究の一部は国土交通省北海道開発局による委託研究費の補助を受けて行ったものである。また同局滝里ダム管理所からは本稿をまとめるに当たりデータ提供等様々なご協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 越後 貞, 吉田裕敏, 田中雅基: 滝里ダムにおけるカビ臭発生の原因調査と防止方策について, 北海道開発局技術研究発表会, 2004 (URL: <http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/gijyutu/>)
- 2) 工藤勝弘, 河上智行, 山田正: ダム貯水池におけるフォルミジウムとカビ臭, 水文・水資源学会誌第17巻4号, 331-342, 2004
- 3) 杉原幸樹, 山下彰司, 高田賢一: ダム貯水池におけるカビ臭発生機構の解析, 河川技術論文集, 第12巻, 2006
- 4) 高田賢一, 杉原幸樹: ダム湖上流域からの流入負荷によるカビ臭発生要因の解析, 北海道開発局技術研究発表会, 2005
- 5) 気象庁HP (URL: <http://www.jma.go.jp/>)
- 6) 藤本尚志, 福島武彦, 稲森悠平, 須藤隆一: 全国湖沼データの解析による藍藻類の優占化と環境因子との関係, 水環境学会誌, Vol. 18 No. 11, 63-70, 1995
- 7) 手塚公浩, 佐藤洋一, 中村玄正: 閉鎖性水域の富栄養化に与えるリン含有微細土粒子の影響, 土木学会論文集No. 804/VII-37, 113-123, 2005

(2007.4.5受付)