

〔環境科学部・生活科学部〕

## 沖縄県の離島 K 島の上水源貯水池における かび臭発生機構に関する研究

環境科学部 環境調査課  
砂川 恵秀 宮良 工  
生活科学部 水道検査課  
伊波 秀敏 山田 義秀  
埼玉大学大学院理工学研究科  
古里 栄一

### 1. 緒言

#### 1-1. 調査研究の経緯

K 島にある Y 浄水場では、水道原水として G 池の表層水を主に利用している。近年、この Y 浄水場の水道原水において、かび臭が発生しており、毎年 5～9 月の間、浄水場流入前の導水ポンプ場において、粉末活性炭を注入することにより、かび臭を除去している状況にある。活性炭でのかび臭除去は、現在のところ、一定の巧を示しているが、より経済的かつ効率的な対応策を検討するため、K 島 G 池におけるかび臭発生機構を解明し、水道原水でのかび臭対策をすることを目的とし、調査研究を実施した。

今回、夏期までの調査分がまとまったので、これを報告する。

#### 1-2. 貯水池かび臭発生機構

一般的には、貯水池におけるかび臭発生機構には、大きく 2 つの因子が係わっていると考えられている。一つは、植物プランクトン的一种である藍藻類の異常増殖によるかび臭発生現象であり、もう一つは、放線菌の影響によるかび臭発生現象である。いずれのかび臭発生現象においても、調査貯水池の「水理状態が解析されていること」「栄養塩類の調査が行われていること」が重要であることから、これらの調査を行い、G 池のかび臭発生機構を解明することとした。

#### 1-2-1. 植物プランクトン（藍藻類）の異常増殖によるかび臭発生現象の事例

日本では、藍藻類の異常増殖によるかび臭発生事例は、数多く報告されており、例として、12,600 糸状体 /ml 存在時におけるかび臭発生の報告など、藍藻類の異常増殖によるかび臭発生現象にはおおよその個体数に関する報告例がある。研究報告等を調べた結果から糸状体では、数千糸状体 /ml、細胞数では、数万 cell/ml 程度の発生が確認されると、かび臭発生が起きていると判断された。

#### 1-2-2. 放線菌の影響によるかび臭発生現象の事例

日本では、放線菌の影響によるかび臭発生事例は少ない。漁川ダムの事例では、200,000～500,000 個 /ml の放線菌存在時にかび臭が発生していたが、他のダムでは、それ以上の放線菌が存在している場合でも、かび臭が発生していないこともあり、放線菌の数を判断基準としたかび臭発生評価は難しい現状にある。しかし、藍藻類の異常増殖が確認されず、かつ放線菌が漁川ダムの事例程度存在しており、かび臭が発生しているならば、原因が放線菌に起因する可能性があることは考えられる。また、放線菌は土壌細菌であることから、底質のかび臭が高濃度であった場合も放線菌による影響ではないかと考えられた。

### 1-3. かび臭対策

かび臭発生機構には、2つの因子（藍藻類と放線菌）が係わっていることと考えられることから、それぞれ両方の視点で解析し、その原因特定によって、より適した対策方法を検討した。

## 2. 調査方法

調査研究の流れは以下の通りである。現地調査において、かび臭状況を確認するとともに、水理状況、栄養状態についても確認し、かび臭原因の検討を行った。

現在の貯水池内におけるかび臭発生原因が藍藻類の異常増殖による可能性と、放線菌による可能性があり、それぞれの可能性を検討し、G池におけるかび臭発生原因を検討した。

上記の通り行ったかび臭発生原因究明によって、対策を検討するという流れを組み立てた。

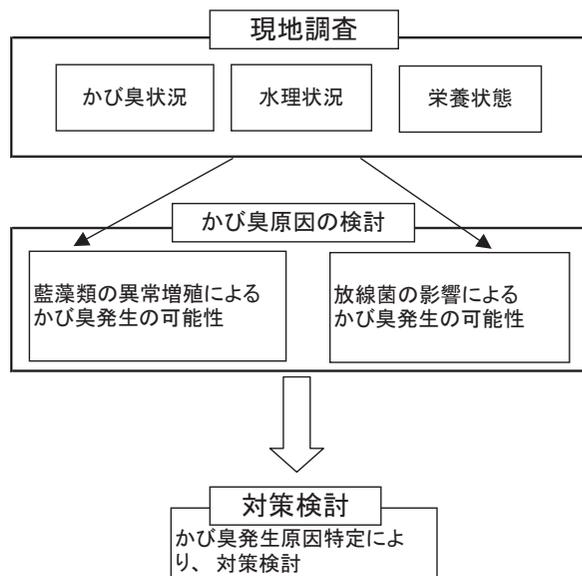


図 2-1. 調査研究フロー

### 2-1. 調査地点

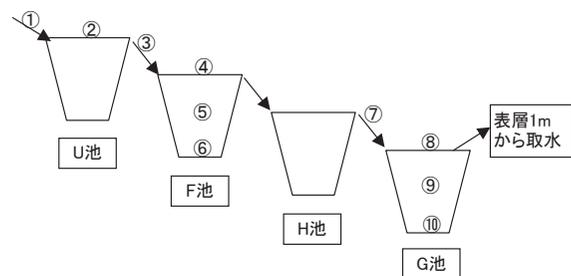
G池は上流に3つの池が存在し、それらの池から越流したものが流入して、G池に貯留されている。

G池に流入する経路は以下の通りである。

G池へはU池流入水（湧水）を源流とし、U池からF池へ、F池からH池へ、H池からG池へと越流流下する。水道原水はこのG池の表層1m

から取水され、Y浄水場へ送られている。

今回の調査では、G池流域のかび臭発生現象を観測するため、可能なかぎり調査範囲を拡大した。G池及びF池については、表層、温度躍層、底層の調査をしたが、H池は池への進入が困難なため、⑦で示したようにH池の越流水をサンプリングした。①、②及び③地点については当初の計画では、調査対象としていなかったため、調査回数が1回少ない結果となっている。



▲ : 水の流れ

調査地点	名称	調査地点	名称
①	U池流入水(湧水)	⑥	F池底層
②	U池表層	⑦	H池(G池流入水)
③	F池流入水	⑧	G池表層
④	F池表層	⑨	G池水温躍層
⑤	F池水温躍層	⑩	G池底層

図 2-1-1 調査地点の概要

### 2-2. 調査項目

G池流域において、かび臭物質である2-MIB及びジェオスミン濃度状況を調査した（以下、2-MIB及びジェオスミンをかび臭と称す）。また、F池及びG池については、鉛直方向にも調査をおこなった。その際、水理状況及び栄養状態についても調査した。

調査項目は以下の通りである。

- ・かび臭状況（2-MIB、ジェオスミン）
- ・水理状況（水温、pH、DO、濁度）
- ・栄養状態（T-N、T-P）

### 2-3. 調査時期

調査時期は、植物プランクトンの一種である藍藻類の総個体変化が見受けられると判断された梅雨前の4月、梅雨時期の6月、夏場の8月を目安とし、調査日は表 2-3-1 に示す通りとした。

表 2-3-1 調査日程

	調査時期	調査日
第1回	梅雨前	平成17年4月26日
第2回	梅雨明け	平成17年6月29日
第3回	夏場	平成17年8月11日

2-4. 分析方法

調査方法は表 2-4-1 の通りである。

表 2-4-1 分析方法

項目	分析方法
水温	
pH	東亜DKK株式会社製ポータブル多項目水質計
DO	WQC-24Iによる現場測定
濁度	
T-N	試験方法Ⅱ.室内試験53-6.3.2 標準法2 ヘルオキソ硫酸カリウム分解-銅・カミウムカラム還元法
T-P	試験方法Ⅱ.室内試験54-3.3.1 標準法 ヘルオキソ硫酸カリウム分解-吸光光度法
2-MIB	試験方法Ⅱ.室内試験18.3.1 標準法 パージトラップガスクロマトグラフ質量分析法
ジェオスミン	試験方法Ⅱ.室内試験18.3.1 標準法 パージトラップガスクロマトグラフ質量分析法

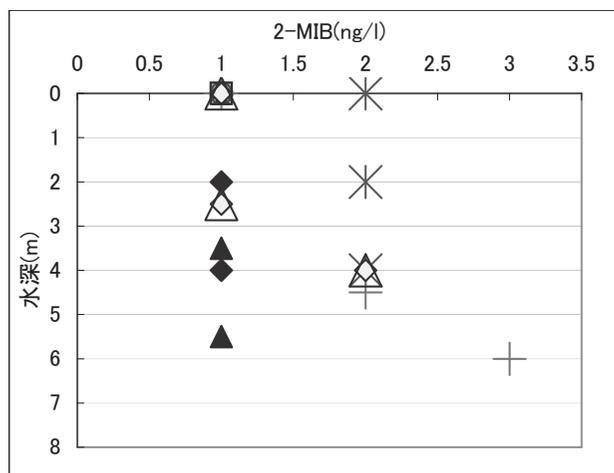


図 3-1-1 水深と 2-MIB の相関

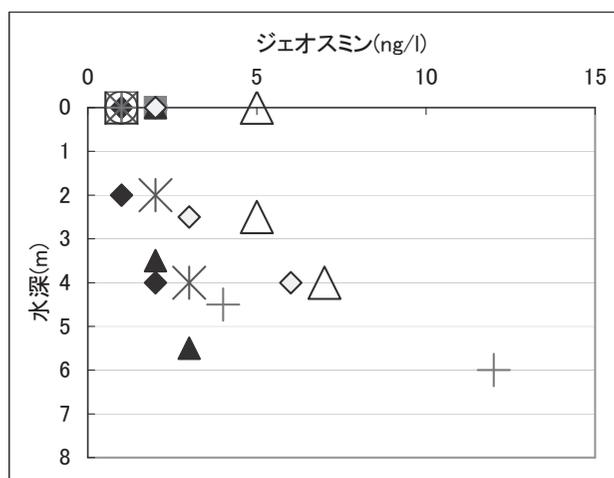


図 3-1-2 水深とジェオスミンの相関

3. 調査結果と考察

3-1. かび臭状況

G 池流域において、かび臭濃度を測定した結果を以下に示す。

図 3-1-1 及び 3-1-2 に見られるように、貯水池内を鉛直的にみると、底層に向かってかび臭濃度が高くなっている傾向が伺えた。

3-2. 水理状況

K 島におけるかび臭発生時期は夏場に集中していることから、夏場の G 池への流入水が G 池のどの部分に流入するのかは、流入する水温と G 池の各層 (0.5m 間隔) を水温測定することにより解析することができる。水源貯水池 G 池及び G 池の上流にあたる F 池の水温、pH、溶存酸素 (以下 DO と略す。)、及び濁度を水深ごとにグラフ化した (図 3-2-1 及び図 3-2-2)。

その結果、G 池及び F 池の水温について見てみると、G 池においては、第 1 回調査時に 3 ~

- ◆ F池 (第1回)
- H池 (G池流入水) (第1回)
- ▲ G池 (第1回)
- × F池 (流入水) (第2回)
- \* F池 (第2回)
- H池 (G池流入水) (第2回)
- + G池 (第2回)
- U池 (第3回)
- F池 (流入水) (第3回)
- ◇ F池 (第3回)
- H池 (G池流入水) (第3回)
- △ G池 (第3回)

4m にかけて温度躍層が形成され、第 3 回調査時に 2.0 ~ 2.5m にかけて温度躍層が形成されていた。また、F 池においては、水深が浅いことから、温度躍層は形成されないのではないかと考えられた。

pH について見てみると、G 池では第 1 回調査時に水深 0.5 ~ 0.8m にかけて低くなる傾向を示し、水深 0.8 ~ 1.5m にかけて高くなる傾向が見受けられた。F 池では、3 調査ともに大きな pH 変動は見られなかった。

DO について見てみると、G 池は 3 調査時ともに DO 躍層を形成しており、更に夏場には底層は貧酸素状態であることが判明した。このことから、

G池の底質は還元状態にあるものと考えられた。また、F池では、第3回の調査時に水深2.5～3.0mにかけてDO躍層が形成されているものの、第1回及び第2回の調査では、DO躍層は形成されておらず、水深も4.5m程度であることから、底質

は比較的良好な状態を保っていると示唆された。

濁度について見てみると、G池の第1回調査時に水深3.5～4.0m付近に濁度ピークが存在した。これは、第1回調査の前々日の降雨の影響であると考えられた。

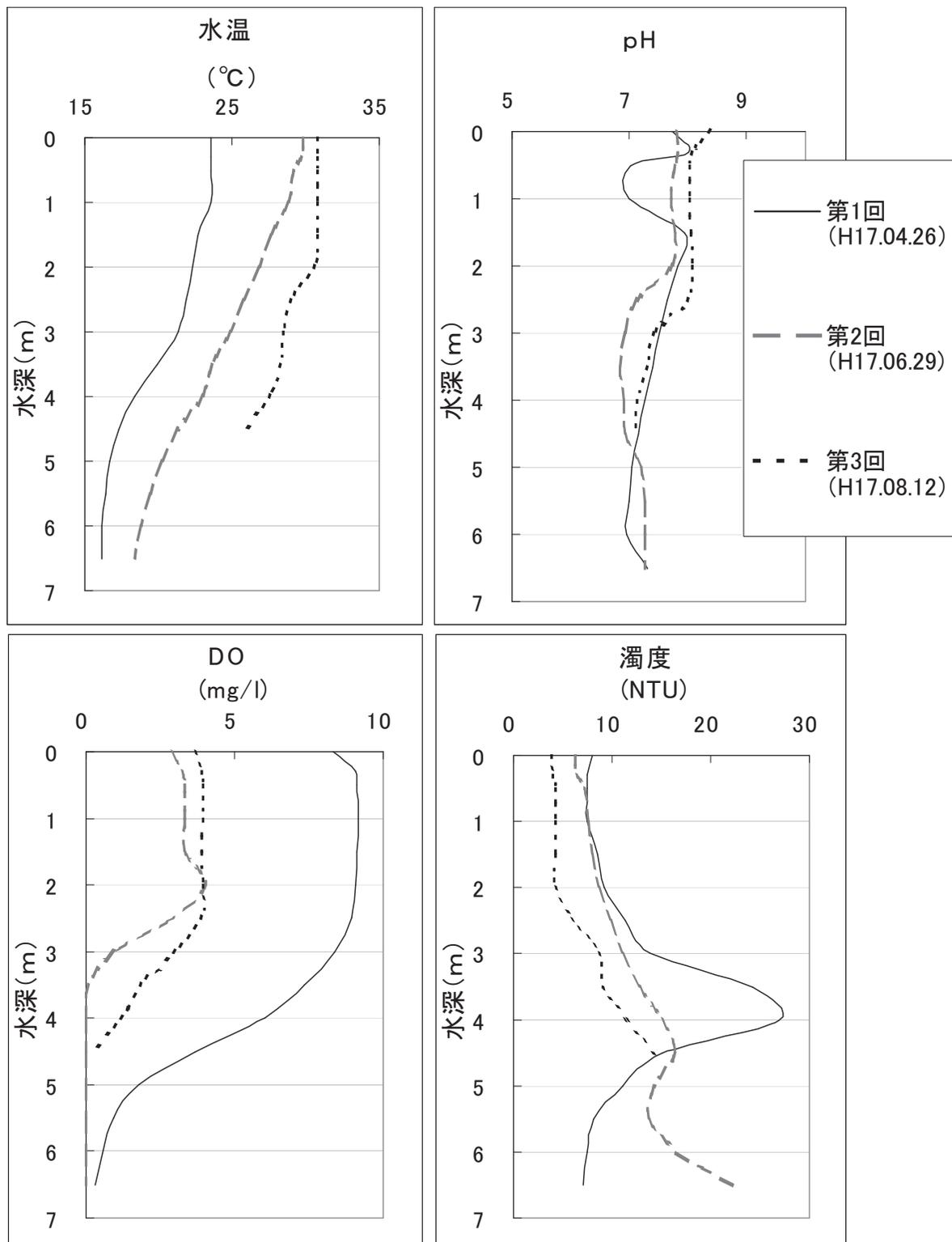


図 3-2-1 G池鉛直水理状態

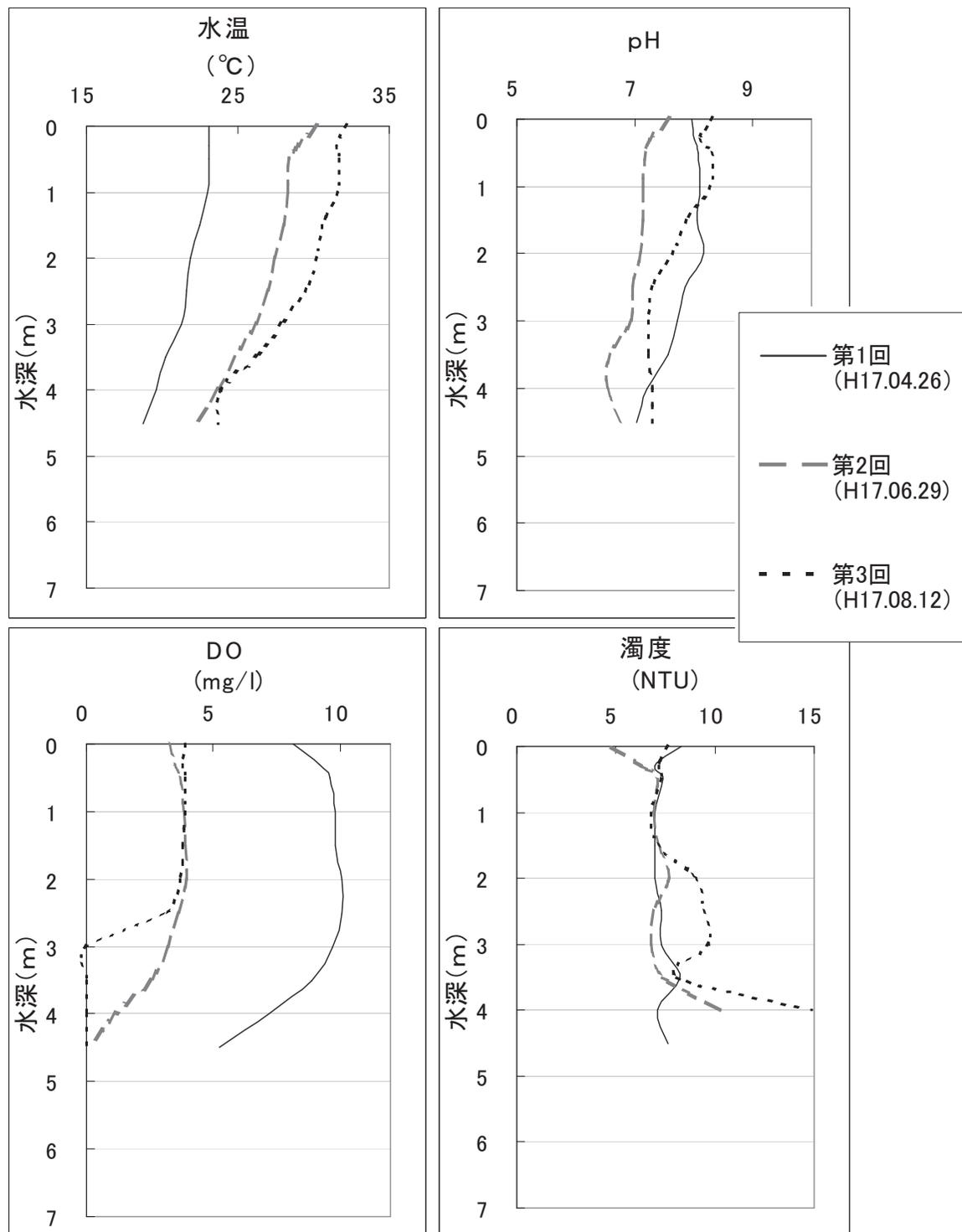


図 3-2-2 F 池鉛直水理状態

G 池及びF 池の鉛直分布状況と、その他、U 池流入水(湧水)、U 池表層、F 池流入水、H 池(G 池流入水)をもとに G 池への流入水の状況を考えるため、G 池流域の各表層部分の水温をグラ

フ化した。図 3-2-3 から各池への流入水は、各池の表層水温と同等であり、平常時における流入水は表層に流れ込むものと考えられた。

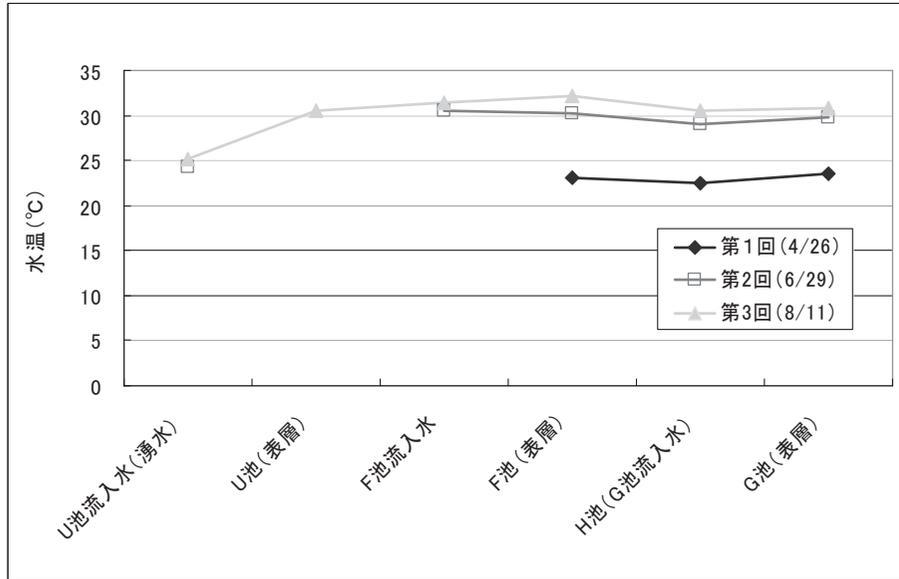


図 3-2-3 G 池流域水温状態

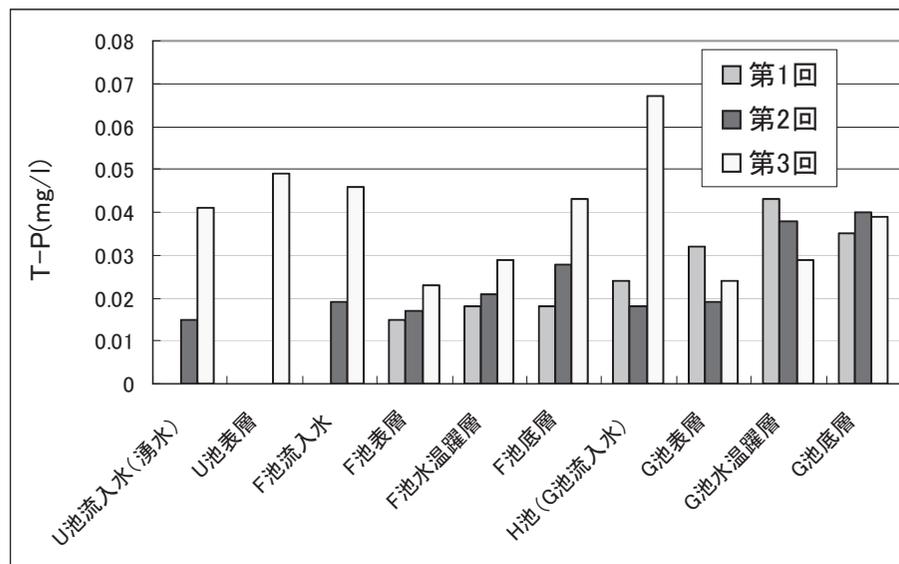
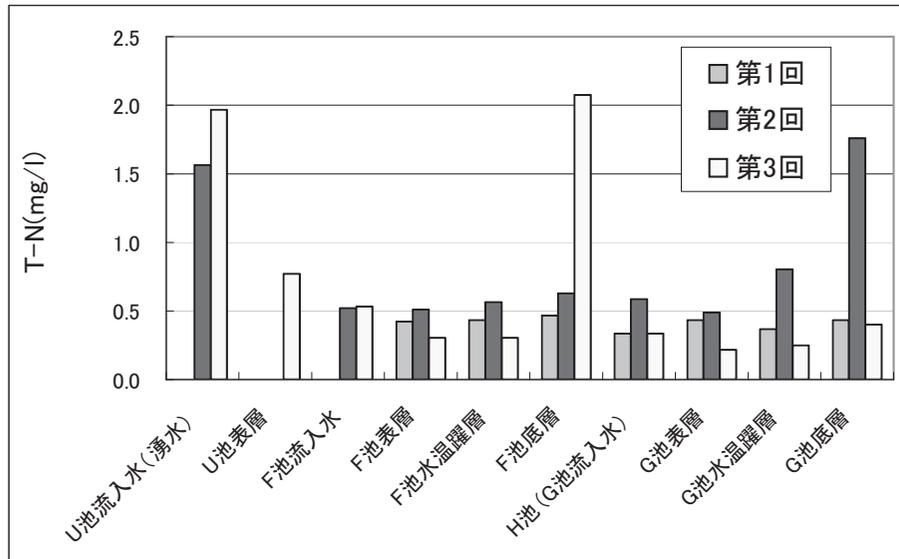


図 3-3-1 各地点の栄養塩類濃度

### 3-3. 栄養状態

調査対象となった G 池流域の栄養状態を判断するため、各地点の水質 (T-N、T-P) を調査した。調査結果は図 3-3-1 に示したように、G 池流域の最上流部に位置する U 池流入水 (湧水) から高濃度の T-N、T-P が検出された。ヒアリング結果から、この G 池流域には多数の採草地があり、液肥や堆肥の施肥をしているとのことであり、湧水に高濃度の T-N、T-P が含まれていることから、肥料の地下浸透による影響ではないかと示唆された。

また、これらの池が水道用水として利用されていることから、湖沼の環境基準と比較してみると

水道用水として利用する全窒素、全リンの値は、0.4 mg/l、0.03 mg/l 以下が適当であることがわかるが、全窒素に関しては、各池の表層が辛うじて基準を満たしてはいるものの、水温躍層及び底層では、基準を超過している状態であった。全リンに関しては、G 池において、水温躍層、底層で基準を超過している状態であった。これらは、水理状況の DO 状態から、底質からの溶出が懸念された。

下表は富栄養化の指標として用いられている表であるが、この表と比較すると、K 島の G 池及び F 池が富栄養状態であることがわかる。

表 3-3-1 貯水池における環境基準

類型	全窒素	全リン	利用目的
I	0.1	0.005	自然環境保全及びⅡ以下に掲げるもの
Ⅱ	0.2	0.01	水道1,2,3級、水産1種、水浴及びⅢ以下の欄に掲げるもの
Ⅲ	0.4	0.03	水道3級及びⅣ以下の欄に掲げるもの
Ⅳ	0.6	0.05	水産2種及びⅤの欄に掲げるもの
Ⅴ	1	0.1	水産3種、工業用水、農業用水、環境保全

表中の単位はmg/lとする

表 3-3-2 湖沼の影響形態

貧栄養形	富栄養形
溶存酸素は深水層でも多い(湖底直上では薄い無酸素層を作ることがある)。水素イオン濃度は表水層が酸素の過飽和を示す場合を除き、ほぼ中性(深水層下部では酸性傾向を示すことがある)。過マンガン酸カリウム消費量は15mg/l以下。窒素化合物は0.2mg/l以下、リンは0.02mg/l以下。	深水層では溶存酸素が消失して無酸素層となることが多い。表水層、変水層では植物の光合成によって著しい過飽和を示すことがある。水素イオン濃度は酸素が過飽和になった場合には強アルカリ性を示すが、深水層では酸性傾向をとる。過マンガン酸カリウム消費量は20mg/l以下。 <b>窒素化合物は0.2mg/l以上、リンは0.02mg/l以上。</b>

[桜井：自然保護を考える (堀江)]

### 3-4. かび臭発生の原因

かび臭結果、水理状況及び栄養状態の結果から、かび臭原因として考えられている「藍藻類の異常増殖によるかび臭現象の可能性」及び「放線菌の影響によるかび臭現象の可能性」について考察した。

#### 3-4-1. 藍藻類の異常増殖によるかび臭発生現象の可能性

植物プランクトンの藍藻類がかび臭原因となる場合、過去の事例から藍藻類の糸状体数が 2,000 糸状体/ml 程度は存在していなければ、かび臭が発生しないのではないかと推測される。

K島G池流域において、かび臭物質が検出されているにも関わらず、表3-4-1及び図3-4-1のようにかび臭が発生すると考えられるほどの藍藻類が異常発生していない。また、藍藻類は光合成を行うことから、藍藻類の影響を受けて発生した

かび臭ならば、光の届く表層により強く現れるはずであるにもかかわらず、第2回及び3回調査ではかび臭がG池底層で高い値を示しており、藍藻類の影響によるかび臭ではない可能性が示唆された。

表 3-4-1 藍藻類の同定結果

第1回調査 平成17年4月

出現した藍藻類	G池	G池	G池	F池	F池	F池
	4月 表層	4月 水温躍層	4月 底層	4月 表層	4月 水温躍層	4月 底層
<i>Chroococcus minutus</i>	4(2)			3(1)		
<i>Synechocystis sp.</i>	4(4)					
<i>Microcystis aeruginosa</i>				210(2)	480(6)	240(2)
<i>Microcystis wesenbergii</i>				270(2)	170(2)	80(2)
<i>Gomphosphaeria lacustris</i>		45(45)				
<i>Anabaena sp.</i>				14(1)		
<i>Oscillatoria splendida</i>					79(4)	
<i>Oscillatoria sp.</i>						24(1)
<i>Phormidium sp.</i>			19(2)	28(1)		
総細胞数(糸状体)/mL	8(6)	45(45)	19(2)	525(7)	729(12)	344(5)

第2回調査 平成17年6月

出現した藍藻類	G池	G池	G池	F池	F池	F池
	7月 表層	7月 水温躍層	7月 底層	7月 表層	7月 水温躍層	7月 底層
<i>Chroococcus sp.</i>		4(2)		25(8)	18(5)	
<i>Coelosphaerium kuetzingianum</i>						
<i>Microcystis aeruginosa</i>					270(1)	670(8)
<i>Myxosarcina burmensis</i>			110(5)	290(8)		83(6)
<i>Oscillatoria sp.</i>					91(5)	
<i>Phormidium sp.</i>						
総細胞数(糸状体)/mL	0(0)	4(2)	110(5)	315(16)	379(11)	753(14)

第3回調査 平成17年8月

出現した藍藻類	G池	G池	G池
	8月 表層	8月 水温躍層	8月 底層
<i>Chroococcus sp.</i>	9(5)		
<i>Microcystis aeruginosa</i>	280(2)	57(3)	790(5)
<i>Microcystis wesenbergii</i>			74(2)
<i>Microcystis sp. (aeruginosa?)</i>	2400(24)	110(2)	320(3)
<i>Myxosarcina burmensis</i>			50(2)
<i>Anabaena sp.</i>	740(42)	170(11)	
<i>Oscillatoria sp.</i>			
<i>Phormidium sp.</i>		57(3)	
総細胞数(糸状体)/mL	3429(73)	394(19)	1234(12)

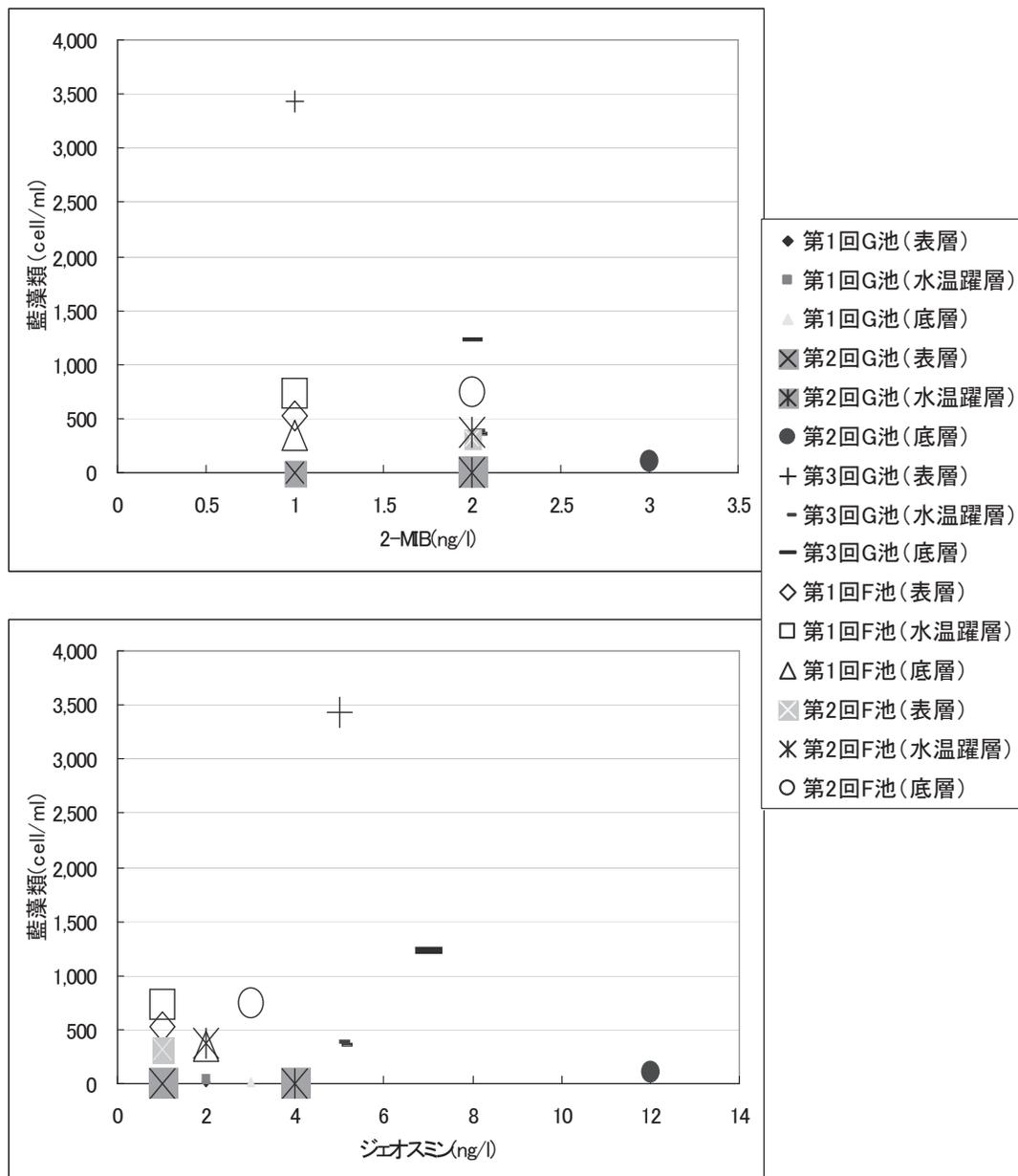


図 3-4-1 藍藻類とかび臭物質の相関

### 3-4-2. 放線菌の影響によるかび臭発生現象の可能性

もうひとつのかび臭発生の可能性として、放線菌による影響が挙げられる。しかし、放線菌によるかび臭発生の事例が少なく、放線菌総数によるかび臭との関係というものは確立されていない。ただし、図 3-4-2 で示したように、放線菌によるかび臭問題が浮上した漁川ダムの事例でみると、放線菌が 200,000 ~ 500,000 個/g 存在した際にかび臭が発生しており、G 池湖底底質、G 池流入

部底質及び F 池湖底底質、F 池流入部底質の放線菌総数は十分に漁川ダムの放線菌総数を上回っているという結果、図 3-4-3 で示したようにかび臭濃度が底層に向かって上昇傾向が見られている結果、底質 100g を各池の表層水 100ml に入れ、溶出させた後にかび臭濃度を測定すると、高濃度のかび臭物質が検出されたことから、かび臭は土壌細菌である放線菌由来のものであると考えられた。

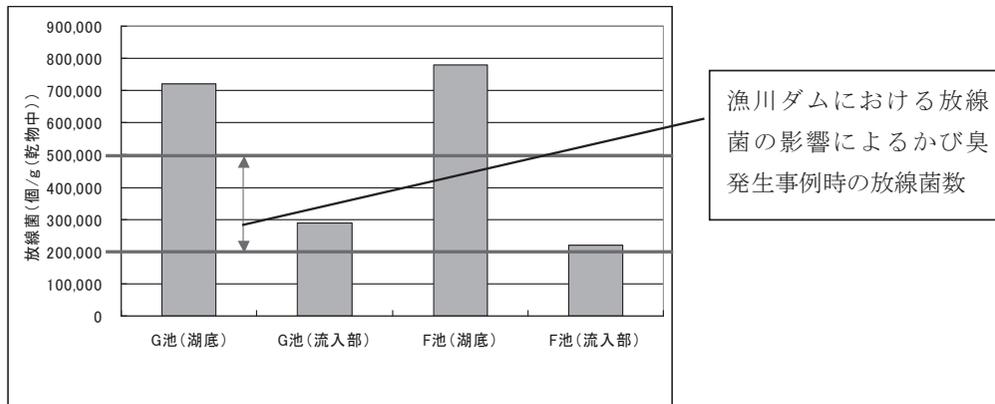


図 3-4-2 G池流域の貯水池等の放線菌数

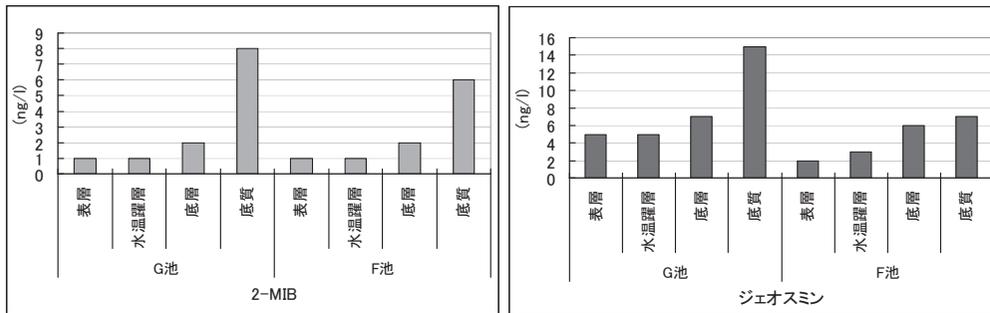


図 3-4-3 底質からのかび臭影響

### 3-5. まとめ

今回の調査結果によって、G池におけるかび臭発生現象は藍藻類の異常増殖によるものが否定され、放線菌の影響によるかび臭発生現象の可能性が高いことが示唆された。

ここで、放線菌の影響によるかび臭発生の主要因については、2つの仮説が考えられる。その主要因について、以下の仮説を示す。

#### 3-5-1. 貯水池流入部からのかび臭物質供給

かび臭物質供給過程で以下の仮説を設定した。

ひとつは、図 3-5-1 に示したようにジェオスミン濃度がG池湖底より、G池流入部のほうが高い値を示していることから、流入部においてかび臭物質が生産され、出水時の際にかび臭物質を含んだ底質を湖底部に押し流すことによるかび臭物質の供給が考えられる。そのイメージを図 3-5-2

に示す(図 3-5-1 の溶出結果は、底質 100g を各池の表層水 100ml に入れ、それを攪拌し、溶出させた後にかび臭濃度を測定した。)

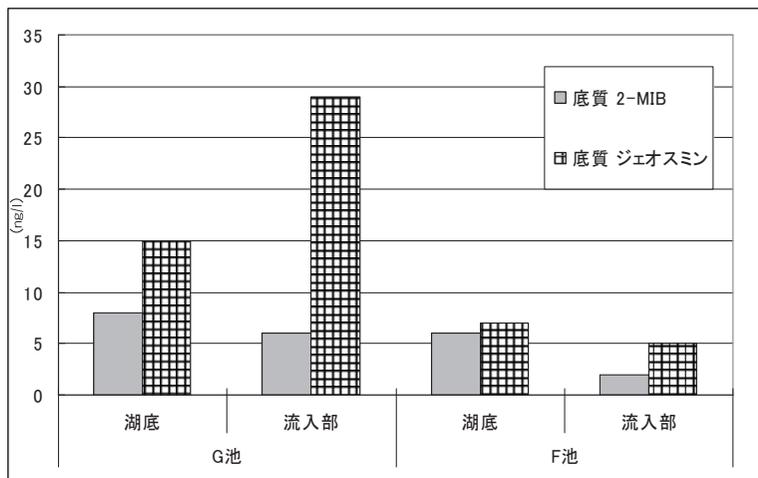


図 3-5-1 底質からのかび臭影響

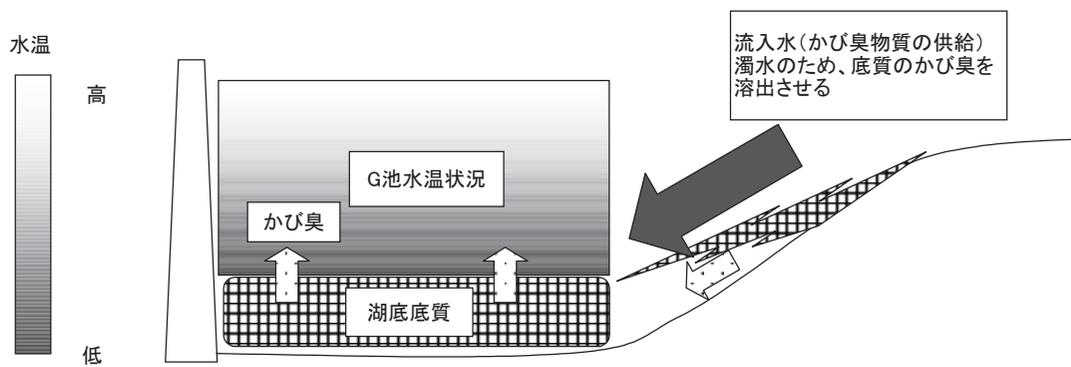


図 3-5-2 G 池における出水時のかび臭物質供給予想

### 3-5-2. 湖内での放線菌死滅によるかび臭物質の溶出

もうひとつは、流入部で生息している好気性細菌である放線菌が、出水時に嫌気状態である湖底に押し流されることにより死滅し、体内のかび臭物質を放出することによるかび臭の発生現象である。

このかび臭発生メカニズムとしては、以下のように考えられる。

- ・放線菌のカビ臭放出のしくみ

放線菌は好気性細菌であり、生存中の放線菌のかび臭放出率は、体内の 10% と言われており、嫌気状態で死ぬ場合には体内のカビ臭をすべて放出すると考えられている。このことから、流入水と一緒に流れてきた放線菌が嫌気状態である湖底に到達すると、放線菌の死滅により体内のカビ臭を放出すると考えられている(漁川ダムの事例)。

- ・嫌気実験での放線菌増減について

嫌気状態で放線菌の増殖速度実験を行った結果、若干の増加現象がみられた。好気性細菌である放線菌が嫌気条件下でも死滅しないことが明らかとなった。漁川ダムの事例でも嫌気条件による放線菌の変化量を調べた結果、放線菌は増加している。

漁川ダムの事例では放線菌の増加速度は、下式で表現できるとしている。

$$\text{放線菌生産消費速度} = \text{放線菌の増加関数} \times \text{放線菌数} - \text{放線菌の死滅関数} \times \text{放線菌数}$$

本式を用いて G 池の好気状態における放線菌の増加速度を予測計算した結果が図 3-5-3 の好気状態のプロットである。嫌気状態での放線菌の増加速度を比較すると、嫌気状態での放線菌数の増加速度は、非常に小さいことがわかる。これは、嫌気状態での放線菌は好気状態との差分が死滅していることを示しており、その差分の放線菌が体内からかび臭物質を放出していると考えられる。

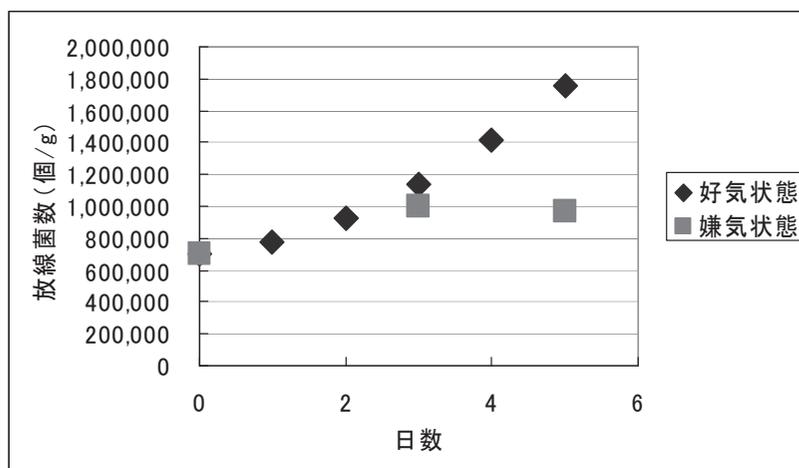


図 3-5-3 放線菌の好気・嫌気状態における経日変化

#### 4. かび臭対策（案）

G池におけるかび臭発生の原因を放線菌とした上で、放線菌の増殖条件であるDO及び栄養塩類濃度との関係を整理し、その後、現状で考えられる対策を検討した。

##### 4-1. DOとかび臭の相関

底層のDOとかび臭濃度の関係は、図4-1-1に示す通りである。これを見ると、DOが2mg/l以下の貧酸素状態では、かび臭濃度は高い傾向にある。

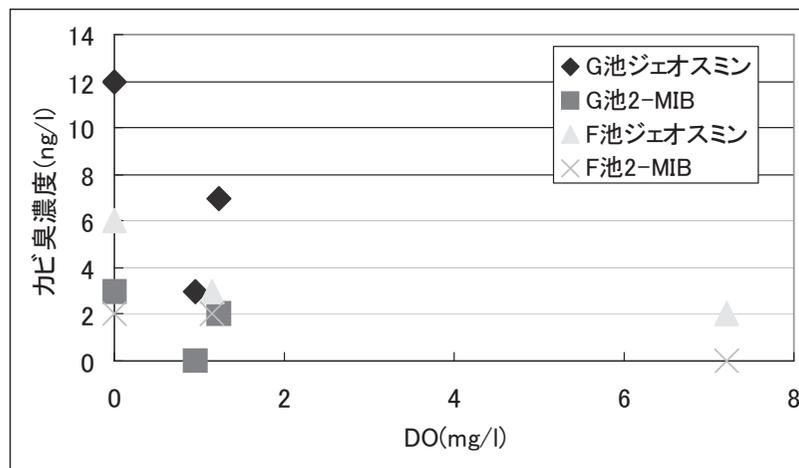


図 4-1-1 DOとかび臭物質の相関

##### 4-2. 栄養塩類とかび臭の相関

放線菌は栄養塩類の欠如により、かび臭物質の生成を減少との報告がある（漁川ダムの事例）G池流域の栄養塩類のT-P、T-Nとかび臭の関係を見ても、図4-2-1に示す通りであり、T-P、

T-Nが高い環境での底層のかび臭濃度は高い傾向にある。特にT-Pとの相関が高いようである。このため池の富栄養化防止が対策として有効である可能性がある。

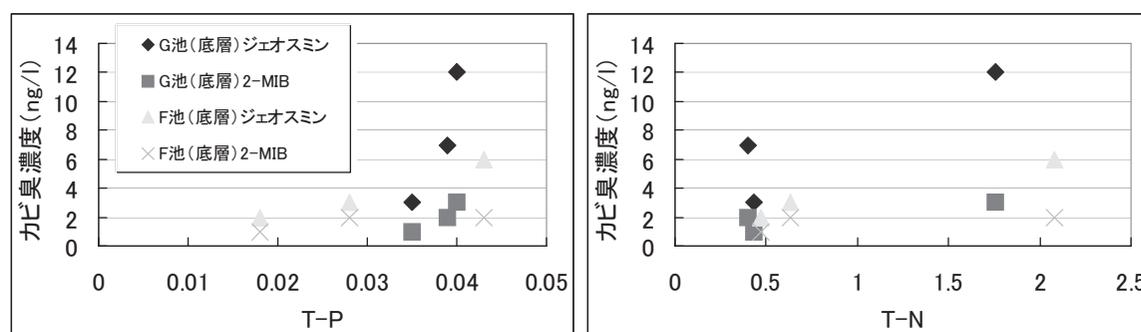


図 4-2-1 栄養塩類とかび臭の相関

##### 4-3. G池内におけるかび臭対策（案）

前述のようにDO濃度が低いとかび臭濃度が高くなり、栄養塩類濃度が高いとかび臭濃度が高くなる現象に加え、かび臭物質が揮発性であること、G池では梅雨前から夏場にかけて水温躍層を形成し、水循環が阻害されていること、DO躍層が形

成され、湖底の底質から栄養塩類が溶出している可能性があることから、G池内における曝気循環がかび臭対策として有効であるものと考えられる。曝気循環によってG池の温度躍層を破壊することによって水の循環をうながし、底層の高濃度のかび臭を希釈及び揮発されやすい環境を形成

することが可能となり、貧酸素層もなくなることで、栄養塩類の溶出も抑制することができる。

今後、曝気循環装置を仮設し、その効果検証実験などを実施してゆくことが望まれる。

## 5. 総括

本研究において、以下の内容が確認された。

- ・ 沖縄県の離島 K 島の上水源貯水池において、かび臭が発生していた。
- ・ 貯水池におけるかび臭発生機構には、植物プランクトンの一種である藍藻類の異常増殖に起因するもの、及び放線菌に起因するものが考えられた。
- ・ G 池流域の貯水池では藍藻類の異常増殖と考えられる数千糸状体 /ml 及び数万 cell/ml は存在せず、数十～数千 cell/ml であったため、藍藻類の影響は無いものと判断した。
- ・ G 池流域の貯水池では放線菌によるかび臭発生事例があった漁川ダムの放線菌数 (200,000 ~ 500,000 個 /ml) と同等の数が存在していることから、放線菌によるかび臭発生現象であると判断した。
- ・ 貯水池における放線菌由来のかび臭発生現象には、「貯水池流入部からのかび臭物質供給」と「湖内での放線菌死滅によるかび臭物質の溶出」が確認された。
- ・ かび臭対策として、下記のことから貯水池の全層循環 (曝気による循環) が有効であると判断した。
  - 1) かび臭物質が揮発性であることから、かび臭物質の揮発を促進し、貯水池内の

かび臭濃度が低下する可能性がある。

2) 貯水池の DO 躍層が無くなることにより、湖底の底質に存在する放線菌が死滅しなくなり、かび臭物質の溶出抑制になる可能性がある。

3) 放線菌は栄養塩類が豊富である環境の場合、かび臭物質を多く生産する傾向にあるので、底層に DO を供給することにより、底質からの栄養塩類の溶出抑制がかび臭物質生産抑制になる可能性がある。

## 今後の課題

- ・ 沖縄県の貯水池でかび臭原因が放線菌であったことから、今後、沖縄県のかび臭発生が起こっている貯水池のかび臭発生機構についても検討し、データの蓄積を行うことによって、放線菌によるかび臭発生現象がどのような環境で起こりうるのかを検討していきたい。

最後に、調査協力をしてくださった関係者の方々、資料を提供してくださった方々にお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 佐藤 敦久、眞柄 泰基 (1996) 上水道における藍藻類害 15-22pp (藍藻類)
- 2) (財)日本水道協会 (1993) 日本の水道生物 182-183pp (放線菌)
- 3) (財)日本水道協会 (2001) 上水試験方法 解説編 875-881pp (放線菌)
- 4) (財)産業環境管理協会 (1999) 公害防止の技術と法規 74-75pp
- 5) 吉武 和人、朝倉 順子 (1986) 放線菌 (Streptomyces) および Phormidium sp. の寺内ダムにおける増殖とカビ臭生成の潜在能力
- 6) 小森 太一、稲澤 豊、鈴木 将 (2003) 漁川ダムにおけるカビ臭発生原因の究明
- 7) (財)日本水道協会 (2001) 上水試験方法 解説編 730-734pp (かび臭に関して)