

カビ臭による水質障害について 既往知見のレビュー

矢挽 哲也* 中津川 誠**

1. はじめに

水道水の異臭味被害としては、カビ臭が原因によるものが多く、他にも藻臭、腐敗臭、カナケなどがある。水道水源は、約7割を河川や湖沼などの地表水に依存(残りは伏流水や井戸水といった地下水)し、これを浄水処理場経由で各家庭に給水している。これらの異臭の多くは水道水源である湖沼、貯水池など停滞水域での富栄養化の進行による藍藻類や放線菌の異常発生、増殖が起きることによるものである。カビ臭の原因については、これら一部の藍藻類や放線菌によって生成される2-メチルイソボルネオール(2-Methylisoborneol、以下2-MIBと略記する)、ジェオスミン(Geosmin、trans-1trans-1, 10-dimethyl-1-trans-9-decalol)と言う物質が原因であることが確認されている。

図-1から水道水のカビ臭等の異臭味被害人口は近年減少傾向にあるが、未だ多くの水道利用者が異臭味の被害を受けている状況にある。

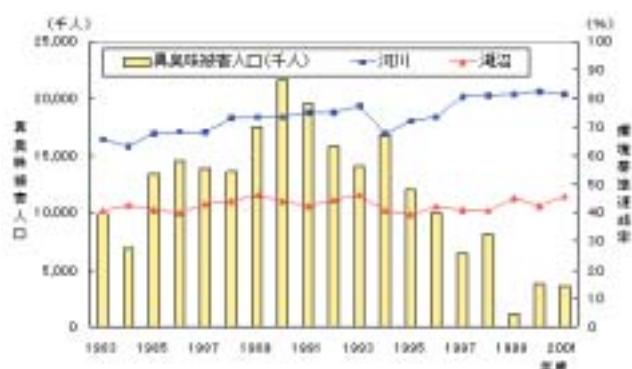


図-1 水道水における異臭味被害の推移
(安全でおいしい水の確保¹⁾より)

カビ臭による異臭問題は、低濃度だとしても人に感知されやすく不快感を与えるものである。また、水道水の供給を行う水道事業者では、カビ臭対策として高度浄水処理の導入、活性炭投入などの対策で過度の負担を強いられているところもあり問題となっている。そこで本報告は、これら異臭問題とくにカビ臭発生についての基礎資料として、既往の知見を取りまとめたものである。

2. 湖沼・貯水池における異臭発生について

湖沼、貯水池における異臭の主な要因としては、「アオコ」の発生によってカビ臭や腐敗臭が発生するものの、「淡水赤潮」の発生によって魚臭や生臭さが発生するもの、土中に生息する「放線菌」によってカビ臭や土臭が発生するものなどがある。以下に「アオコ」と「淡水赤潮」について簡単に発生状況や特徴について表記する。

「アオコ」は琵琶湖(滋賀県)、諏訪湖(長野県)や霞ヶ浦(茨城県)をはじめとする富栄養化が進行した多くの湖沼などで見られる現象で、細胞内にガス胞と言われる「浮き袋」を持った一部の藍藻類(Microcystis属、Anabaena属、Aphanizomenon属、Phormidium属およびOscillatoria属など)が大量に発生することにより起こるものである。ここで問題になっている「富栄養化」とは、生活・産業活動の結果発生する窒素・リンなどの栄養塩が水域に大量に流入し、これらを摂取する藍藻類が短期間に異常に増殖する人為的富栄養化現象のことを指す²⁾。アオコは、「青い粉」をまいたような様相(写真-1)を呈して藻類が水面に浮遊することから命名された用語で「水の華(Water bloom)」とも呼ばれている。



写真-1 アオコ発生状況(右)とミクロキスティス(左)
(ピワズ通信³⁾より)

アオコと呼ばれるようなミクロキスティスの大発生は1960年代になってからみられ、社会的にも注目されるようになったのは霞ヶ浦で1973年にミクロキスティスの記録的な大発生によって、養殖鯉の斃死、水道水の異臭味、浄水障害、湖沼の悪臭などの問題が発生してからであると報告されている⁴⁾。アオコの形成プロセスは、1)アオコを形成する藍藻類が水面近くに集積・浮遊しながら活発に光合成を行う。2)細胞内に炭水化物のような光合成産物の蓄積。3)内部浸透圧が上昇しガス胞が破壊されて下層部への沈降。4)下層部で窒素・リンなどの栄養塩を吸収するとともに低浸透圧下で再びガス胞を形成し浮上して光合成を行うという経過をたどる。このような垂直移動を繰り返して藍藻類の大発生が生じ、アオコが形成されると考えられている⁵⁾。

また近年、有毒アオコの発生が正常な生態系の維持や人間の健康への脅威として問題になっている。有毒アオコが生成する有毒物質には、表-1に示すように肝臓毒(肝細胞に毒素が入ると、細胞の骨組みを形成している中間径線維とアクチン線維を破壊する。骨組みを失った細胞は、空気が抜けた風船のようにしばんてしまう)と神經毒(神經毒は神經細胞のナトリウムチャネルを塞いだり神經伝達物質であるアセチコリンと競合したりして筋肉の収縮を遮断し、呼吸を止める)が知られており、藍藻類によって生成されることがわかっている。

1991年オーストラリアでは、ダーリング川で1,200kmにわたり有毒アオコが発生し、この水を飲んだ家畜が死亡した例が報告されている⁶⁾。日本でも有毒アオコに着目した動態や特性の研究が進められている^{7),8)}。

表-1 藍藻類が生産する有毒物質
(渡辺より⁹⁾、1989年)

藍藻類	毒素	LD ₅₀ (μg/kg)
肝臓毒		
<i>Anabaena flos-aquae</i>	ミクロシスチン	50
<i>Microcystis aeruginosa</i>	ミクロシスチン	50
<i>Microcystis viridis</i>	シアノビリディン	100
<i>Oscillatoria agardii</i>	ミクロシスチン	300~500
<i>Nodularia spumigena</i>	ノデュラリン	30~50
神經毒		
<i>Anabaena flos-aquae</i>	アナトキシン-a アナトキシン-a(S)	200 50
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	アファントキシン	10

ここで、LD₅₀：マウスの腹腔内へ投与した時の半数致死量

アオコの発生に対する対策としては物理、化学、生物学的なコントロール方法があり、湖内のいわゆる内部負荷量とくにアオコの発生に大きく関わる底泥に含まれる栄養物質の削減を目的とした底泥の浚渫¹⁰⁾や改善、湖内に流入する栄養物質の削減においては下水道、浄化槽などの施設の整備・強化が有効である。生物学的な抑制方法として、アオコを効果的に捕食あるいは分解する微生物を添加したり集積させ、バイオマスを減量化することも考えられている⁵⁾。

「淡水赤潮」は、アオコの発生とは異なり、富栄養化がそれほど進行していない湖沼やダム貯水池にて、鞭毛藻類が異常増殖して、水面が黄褐色や赤色に変色(写真-2)し異臭(魚臭、生ぐさ臭)の発生、浄水施設のろ過障害等の問題を引き起こすものである。



写真-2 淡水赤潮発生状況(右)と
ウログレナ・アメリカーナ(左)
(ビワズ通信³⁾より)

淡水赤潮には、黄色鞭毛藻類のUroglena属が優占種となるウログレナ赤潮と渦鞭毛藻類のPeridinium(ペリディニウム)属が湖沼上流に集積して発生する淡水赤潮がある。

ウログレナ赤潮の発生が確認されているのは、琵琶湖北湖(滋賀県)、中禅寺湖(栃木県)、湯の湖(栃木県)、富士五湖の河口湖、精進湖(山梨県)などの数箇所でしか見られていない。これらの湖沼に共通して言えることは、全窒素濃度が0.1mg/L、全リン濃度が0.01mg/L程度の貧栄養湖から中栄養湖に分類される湖沼で、比較的冷涼な地域にある。

中禅寺湖(栃木県)で発生している淡水赤潮¹¹⁾の原因は黄色鞭毛藻類Uroglena americana(ウログレナ・アメリカーナ)の大量発生によるもので、発生時には水道水の異臭味(魚臭、生ぐさ臭)と浄水施設でのろ過障害の問題が生じている。発生時期は5~6月頃で、湖沼の水温が15度のときにウログレナ・アメリカーナの個体数にピークが見られ、20まで上昇すると急激に減少する。中禅寺湖の場合、発現期間は1~2日間の短期間である。水質については、1985~1989年に

おける平均水質調査の結果からOECDが提案した湖沼の富栄養段階を決めるための基準値¹²⁾から判断すると、平均透明度6m以上、T-Pについても平均10μg/L以下、平均クロロフィルa濃度も8μg/L以下で貧栄養湖に相当している。

*Uroglena americana*による淡水赤潮は、風の穏やかな晴天の日が続き、表層水温が上昇した一部の水域に形成される例が多く見られ、曇天および雨天などの表層水温が上昇しない時や荒天などにより表層水温が乱された時期にはほとんど形成されないと報告がされている¹³⁾。

次に永瀬ダム(高知県)の淡水赤潮の例¹⁴⁾についてみると、原因はPeridinium属によるもので、5月中旬ないし6月中旬頃に出現し始め、表層水温が22~28になる7月~8月にピークを迎える。9月中旬ないし下旬には相当量の降雨(多くは台風による)とともに完全に流出して消滅する夏型赤潮がある。一方、長期間にわたり大規模には発生せず、短い周期の消長を繰り返しながら翌年4月頃まで発生が見られる冬型赤潮もある。発生箇所は、ダム湖の上流端付近にみられ、最盛期には上流端から数百m下流にかけて赤潮が一面を覆うようになる。赤潮の発生は年によりかなりの相違があり、梅雨時に正常な量の降雨があり梅雨明けとともに晴天が続く年には大規模に発達しやすいが、梅雨時に降雨が少なかったり、梅雨明けがはっきりしない不安定な天候の年などには小規模で終わることが多い。Peridinium属が原因による赤潮で現在毒性が明確になっているのは相模湖(神奈川県)で、1962年9月に発生したPeridinium polonicumに由来するものに限られている。このとき魚の大量の斃死が発生したが、1962年以降は魚の斃死を伴うPeridinium polonicumが原因による赤潮の発生は見られない。

貧栄養と言われるような湖沼においても、淡水赤潮のような藻類の異常発生により湖沼の景観を損ない、利水障害を引き起こしていることは、富栄養化が徐々に進行していることを示唆している。琵琶湖(滋賀県)では図-2に示すように、1981年から1985年ぐらいまでは、淡水赤潮のほうが発生回数も多く問題にされていた。しかし、それ以後淡水赤潮の発生回数は減少傾向にあり、逆にアオコの発生回数は増加傾向にある。アオコは淡水赤潮よりもさらに富栄養化が進んだ場合に発生しやすいと言われている¹⁵⁾。このことから、生活排水などの汚濁源からの栄養塩の削減や底泥の浚渫などの富栄養化を抑制するための対策を行うことが重要である⁶⁾。

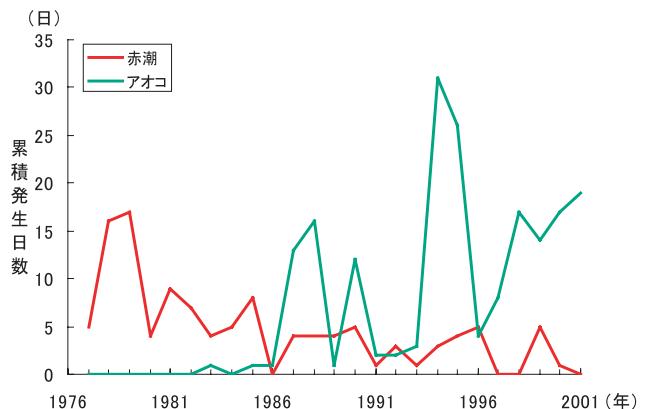


図-2 琵琶湖での淡水赤潮とアオコの発生日数の変化
(滋賀の環境¹⁵⁾より作成)

3. カビ臭の原因生物について

先に記したように「淡水赤潮」由来の異臭は、水道水への影響が異臭物質が揮散しやすいか分解しやすいかは不明であるが被害報告も少なく、また発生箇所も限定されているため、異臭被害はカビ臭によるものが大半を占めている。カビ臭の発生原因は、藍藻類や放線菌によって生成されるカビ臭物質によるものであることが確認されている。以下では、カビ臭の発生原因生物である藍藻類、放線菌についての特徴、生育環境などについて整理してみたい。

3.1 藍藻類について

藍藻類は、光合成色素としてのクロロフィルaを有する単細胞生物であるが、細菌と同様に細胞中に核、葉緑体、ミトコンドリアなどの諸器官を欠く原核生物である。これらのことが他の藻類と大きく違うところで、原核生物の細菌類と同じ仲間と見なされ、最近ではシアノバクテリアまたは藍色細菌と呼ばれることが多い。また、藍藻は環境に適応する能力に優れていて酸素がない条件(植物は光合成により生成される酸素に比べて少ないが呼吸のために酸素を必要とする)でも光の獲得によって光合成ができる。水素分子の酸化エネルギーによって電子伝達系を活用し光合成を行う⁵⁾。また、窒素固定能(空気中の窒素分子(N₂)をアンモニア(NH₃)に還元しグルタミン(アミノ酸の一一種)として異形細胞から運び出され、栄養細胞中でさらに代謝される)を有するものもあり、他の生物の増殖におおいに貢献している。加えて、細胞内にガス胞と言われる“浮き袋”を有する種もあり、浮遊性を示しアオコを形成したりもする。

下記に琵琶湖淀川水系で見られるカビ臭物質を生成する代表的な藍藻類についての特徴¹⁶⁾を示す。

1) フォルミディウム テヌエ(*Phormidium tenue*)

形状の特徴(写真 - 3)は、糸状体はまっすぐかまたはやや曲がり、細胞が長くつながって群体(多数のプランクトンが一つの塊となったもの)の連結部でわずかにくびれている。先端の細胞は長円錐形で、カリプトラ(糸状体の先端細胞の帽子状膨らみ)はない。細胞の幅は1~2 μm(1 μmは1 mmの1,000分の1)、長さは2.5~5 μmでガス胞を持たず、アオコを形成した報告例はない。



写真 - 3 フォルミディウム テヌエ
(学名 : *Phormidium tenue*)
(琵琶湖の主なプランクトン¹⁷⁾より)

生成するカビ臭物質と生成能については糸状体の長さ500 μmを一単位とすると、培養下では0.32pg(ピコグラム, 10^{-12} g)のカビ臭物質(2-MIB)を生成するとされている。琵琶湖におけるフォルミディウム テヌエの出現状況は琵琶湖南湖(滋賀県)、室生ダム湖(奈良県)に発生し、5月中旬~6月上旬頃、水温が19~20℃になった頃から増殖が始まり、2週間から1ヶ月で終息することが多いようであるが、室生ダム湖(奈良県)では、9~10月にも出現しカビ臭が発生した例も報告されている。琵琶湖においての出現数は他のカビ臭原因藍藻類に比べて多いが、一糸状体あたりのカビ臭物質生成能(2-MIB濃度)は他の種に比べ相対的に低いようである。ただし、フォルミディウムによるカビ臭被害は、草木ダム(群馬県)、寺内ダム(福岡県)など多くの湖沼において報告されている¹⁸⁾。

2) アナベナ マクロスpora(*Anabaena macrospora*)

形状の特徴(写真 - 4)は、糸状体を形成する栄養細胞(写真では茶色に見えるもので光合成をして、2分裂によって増える普通の細胞)は球形または楕円形で幅5~6.5 μm、長さ5~9 μm、異形細胞(写真では確認できないが栄養細胞が透明感のある黄緑色に変化

し、厚い壁をつくったものは球形で直径6~6.5 μm、列の中で大きく見える成熟した休眠胞子(写真で黄色く大きく写っているものの中には多くの貯蔵物質で満たされ、外側は厚い膜でできている。種によって形に特徴がある)は光学顕微鏡下で六角形に見え、大きさは幅17 μm、長さ約26 μmである。生成するカビ臭物質と生成能については糸状体の長さ500 μmを一単位にして、培養下では2.8pgのカビ臭物質(ジェオスミン)を生成するとされている。出現状況は、琵琶湖南湖のとくに南部に多く8月~9月に出現する。しかし、琵琶湖においてはこの種の出現数は1985年をピークに減少傾向で1988年以降についてはAnabaena macrosporaに起因するジェオスミン濃度の増加はほとんど見られない。



写真 - 4 アナベナ マクロスpora
(学名 : *Anabaena macrospora*)
(琵琶湖の主なプランクトン¹⁷⁾より)

琵琶湖内で生息が確認することができるAnabaena属の中ではAnabaena macrosporaより、むしろAnabaena affinisの出現数が多く確認されている。ただし、Anabaena affinisは水の華を形成するが、カビ臭物質の生成を行わないことがわかっている¹⁹⁾。

3) オシラトリア テヌイス(*Oscillatoria tenuis*)

個々の細胞形状は、円盤状で幅は4~10 μm、長さは2.5~5 μmである。細胞は青緑色で琵琶湖に出現する株はガス胞を有し顕微鏡下では黒く見える。全体の形状は写真 - 5に示すように細胞がまっすぐにびっしりとつながり、両端は若干曲がっているが細くはならない。

生成するカビ臭物質と生成能については、糸状体500 μmを一単位として、培養下では37pgのカビ臭物質(2-MIB)を生成するとされていて、フォルミディウム テヌエと比較すると約100倍の生成能を有している。出現状況は、琵琶湖南湖とくに赤野井湾(滋賀県)や山田港沖(滋賀県)など東岸に多く見られ、7月中旬から10月にかけて出現している。1991年には赤野井湾(滋賀県)でアオコを形成したという報告もある。

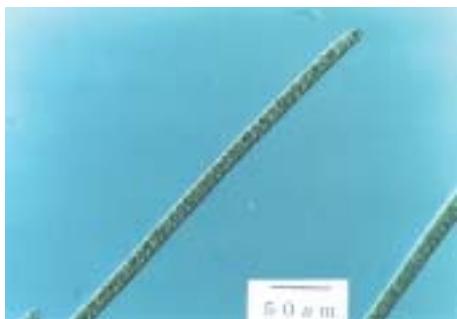


写真 - 5 オシラトリア テヌイス(学名 : *Oscillatoria tenuis*)
(琵琶湖の主なプランクトン¹⁷⁾より)

4) ミクロキスティス エルギノーサ (*Microcystis aeruginosa*)

形状(写真 - 6)は、個々の細胞は球形で直径は、3~7 μmである。各細胞が膜状の粘質体に包まれていないのがこの種の特徴である。たくさんの細胞が集まって群体を形成し、初期には球形に近いが、成長すると不定形になる。



写真 - 6 ミクロキスティス エルギノーサ
(学名 : *Microcystis aeruginosa*)
(琵琶湖の主なプランクトン¹⁷⁾より)

琵琶湖では夏季から秋季にかけて南湖で観察される。また、北湖においても一部の沿岸部水域において最近観測されるようになった。ガス胞を持っているので、水の表面に浮かび上がる性質があり、多く集まるとアオコを形成する。この種類の中には毒性(肝臓毒 : ミクロシスチン)を有するものも報告されている。

以上が琵琶湖で見られるカビ臭原因藍藻類の代表的なものである。

藍藻類の異常増殖は、カビ臭の発生に直結するので、その防止のために藍藻類の優占化と水環境因子について藤本ら²⁰⁾が研究を行っている。藍藻類の優占化に重要な環境要因としては窒素、リン、N/P比(窒素とリンの比率)、水温、深度(容積/面積)、混合度(表 - 2)が挙げられる。これらの項目について全国211の調和型湖沼(生物に必要な条件が適度で、全生産や部分生産が正常で調和的な湖沼のこと)で、富栄養湖沼型、

貧栄養湖沼型、両者の中間型の中栄養湖がある)を対象とした解析を行った結果において藍藻類が優占化する要因としては以下のようなことが報告(一部、東京農大 藤本氏より聞き取り)されている。

- 1) 窒素、リン濃度、N/P比、水温、深度、混合度といった環境因子が重要である。
- 2) すべての湖沼を対象とした場合、藍藻類はN/P比30未満において優占率40%と高く、30以上では著しく低下し優占率は10%以下となる。これは、リンの欠乏が藍藻の優占率に影響があると推察される。富栄養化した湖沼(リン濃度0.035mg/L以上)ではN/P比が15までの範囲ではN/P比の増加にともない藍藻類の優占率が高まる傾向にある。
- 3) 水温の増加とともに藍藻類の優占率が高まり、とくに30 以上で *Microcystis* 属の優占率が急に高まる。
- 4) 藍藻類の優占率は深度が深くなるにつれて低下する傾向である。これは、一般に深度が大きい湖沼は富栄養化が進みにくく、栄養塩類濃度が低く、藍藻類が増殖できないためと考えられる。
- 5) 混合度の増加とともに藍藻類の優占率が高まる傾向にある。このことは比較的水深が小さく混合しやすい湖沼ほど富栄養化しやすいことと関係していると考えられる。また、 *Oscillatoria* 属、 *Phormidium* 属は混合度が高い湖沼で優占化する傾向にある。とくに *Phormidium* 属についてはガス胞を有さないので、光の獲得においてガス胞を有する藍藻類に比べ不利なので、混合しやすい湖のほうが優占しやすいと考えられる。

表 - 2 混合度の算出式について
(藤本ら²⁰⁾より、1995年)

混合度は次式のように湖沼面積から求めた温度躍層の深さを平均深度で割って求めた

$$D = 6.22(S)^{0.15} \quad (1)$$

$$M = D/H \quad (2)$$

ここに、Dは温度躍層の深さ(m)、Sは面積(km²)であり(1)式は湖沼の温度躍層の深さが湖沼面積の平方根に依存することに基づいている。この式は日本の湖沼の形態上の特色を考慮して定義したものである。(2)式のMは混合度、Hは平均深度(m)であり、この式では水面上の吹送流によって混合が行われる深さと相関関係がある温度躍層の深さを平均深度で割ったものを混合度と定義している。この式はEPA(アメリカ環境保護庁)が湖沼の成層の有無を判断するために定義したものである。

3. 2 放線菌について

放線菌(写真 - 7)は、土壤中を主な生息場としている好気性細菌で、詳細には50以上の属に分類されるが、通常、放線菌を土壤から分離した場合に得られる菌体の大多数(9割以上)はStreptomyces属(気菌糸上に長い胞子連鎖を形成する放線菌)に限定される。



写真 - 7 放線菌 (学名: *Streptomyces*)

(左; 平面培地、右; コロニー拡大)

(北海道開発局、1999年、漁川ダム水環境調査業務²¹⁾より)

微生物の代謝産物(生物の作りだす有機化合物)には、人間の生活に利益をもたらすものと不利益をもたらすものが多くあるが、放線菌の2次代謝産物(生物にとって必ずしも必須とされないもの)である抗生物質は、医薬品、飼料等に有効利用されている。しかし放線菌によって生成される臭気物質は、水道水源として利用されている湖沼、ダム貯水池では、水質障害を引き起こす例が見られる。放線菌は原核生物であり細菌の仲間であるが、糸状菌のように菌糸を伸ばして生息する。放線菌の生活史を図 - 3に示すが、胞子の休眠状態から発芽し、一次菌糸(基生菌糸: 培地表面や培地中に生える菌糸)を発達させ、次いで二次菌糸(気菌糸: 基生菌糸から分化し水中に伸長する菌糸)を伸ばす。その後、二次菌糸の先端に胞子が形成され、成熟とともに水中に分散し再び胞子が発芽するというサイクルを繰り返している。

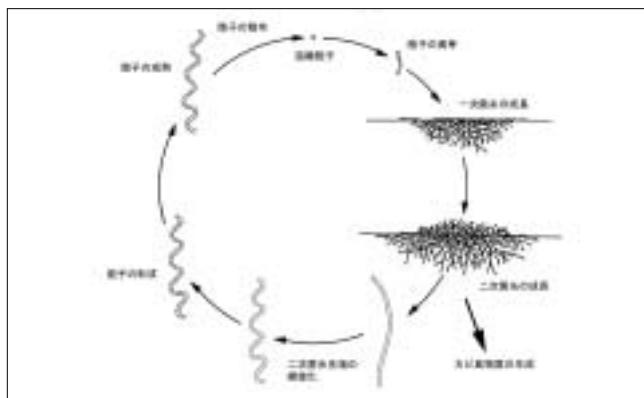


図 - 3 放線菌の生活史

(北海道開発局、1999年、漁川ダム水環境調査業務²¹⁾より)

放線菌の生活史の中でカビ臭物質の生成が行われているのは、二次菌糸の生成時であると言われている。また、この時期に生成されたカビ臭物質は、一部は菌体外に放出されるが大半は菌体内に蓄積されていて、放線菌の死滅もしくは分解の際に菌体外に放出される。

放線菌が生成、放出するカビ臭物質は2-MIB、ジェオスミンである。藍藻類では2-MIB、ジェオスミンの2種のカビ臭物質を1種で生成するものはないが、放線菌は1つの菌体からジェオスミンと2-MIBの2種類のカビ臭物質を生成するタイプと、どちらか一方を生成するタイプに分類され、環境因子等により種類や生成濃度は変化する。

放線菌についての研究例は過去にいくつかあるが、放線菌のみによってカビ臭が引き起こされた例については、霞ヶ浦の報告²²⁾があるものの、他にはほとんど見られない。なお、琵琶湖でのカビ臭被害も発生当初には放線菌が原因ではないかと考えられていたが、1975年頃から藻類の発生が見られるようになり、原因も放線菌から藍藻類に目が向けられるようになった。1981年頃にカビ臭物質の定量方法が開発されてから、藍藻類からカビ臭物質を検出できるようになり、現在では琵琶湖で発生するカビ臭は一般に藍藻類によることが解明された²³⁾。

一方、放線菌について室内培養実験の結果から至適条件等が報告^{24), 25)}されているものについて下記に記す。

杉浦²⁵⁾は、放線菌の増殖最適温度は30℃、カビ臭物質生成最適温度は25℃、pHについてはアルカリ側がよく、とくに高アルカリ側がカビ臭物質の生成を促進するものとされている。栄養因子については、リン、マグネシウム、鉄は少量でカビ臭物質生成を促進し、とくにリンはごく低濃度で2-MIB、ジェオスミンの生成に有効で、自然水域における重要な制限要因物質と考えられている。また、吉武ら²⁴⁾は放線菌のカビ臭物質生成にはビタミンが必要と報告している。

4. カビ臭の原因物質について

藍藻類もしくは放線菌によって生成されるカビ臭物質は、低濃度で問題になる。それは、通常の水質濃度はmg/Lであるが、地下水汚染で問題となっている発ガン物質のテトラクロロエチレンでその千分の一のμg/Lのオーダー、カビ臭物質はそのまた千分の一のng/Lのオーダーで異臭を感じるとされている²⁶⁾。カビ臭の原因物質は2-MIBとジェオスミンだが、2-MIBはカビ臭以外に墨汁臭が、ジェオスミンは土臭と感じられる場合がある。これらのカビ臭物質は、放線菌を除

き藍藻類では同一種は同一の臭気物質しか生成しない。さらに藍藻類の種類によっても生成能が違う。日本でのカビ臭被害は、フォルミディウム・テヌエカオシラトリア・テヌイスが生成する2-MIBによる被害が多く報告されている。人が異臭と感じる閾値も2-MIBが5ng/Lでジェオスミンが10ng/Lとなっている。琵琶湖での藍藻類とカビ臭の変遷¹⁶⁾について例にすると、琵琶湖では時期的な違いの他に、異常長期渴水年だった1994年以前と以降でもカビ臭の発生に違いがある。カビ臭の発生回数(臭気物質が10ng/L以上を検出)、カビ臭物質、最高濃度については異常渴水年以前(1983~1994年)と以降では以下のように示される。

1)異常渴水年前

(5月から7月の発生状況)

5月から7月の赤野井湾、三井寺沖、瀬田川でのカビ臭発生回数、カビ臭物質、検出最高濃度を表-3に示す。

表-3 異常渴水年前の5月から7月のカビ臭発生状況
(琵琶湖異臭調査小委員会¹⁶⁾)

	カビ臭物質	発生回数	最高濃度
赤野井湾	2-MIB	10回	508ng/L
	ジェオスミン	4回	26ng/L
三井寺沖	2-MIB	8回	143ng/L
	ジェオスミン	4回	42ng/L
瀬田川	2-MIB	8回	196ng/L
	ジェオスミン	4回	28ng/L

表-3からわかるように、この時期のカビ臭の原因物質は発生回数、最高濃度から2-MIBによるもののが主で、原因生物は2-MIBを生成するフォルミディウム・テヌエと考えられている。ジェオスミンの発生回数が2-MIBを上回ったのは1991年のみであるが、2-MIBは赤野井湾での10ng/Lが最高で、ジェオスミン濃度も赤野井湾での17ng/Lが最高と発生濃度が低く、発生日数も短く、上水道への影響もなかったのでカビ臭の発生がなかったと言っても良い状態である。

(8月から10月の発生状況)

8月から10月の赤野井湾、三井寺沖、瀬田川でのカビ臭発生回数、カビ臭物質、検出最高濃度を表-4に示す。

表-4 異常渴水年前の8月から10月のカビ臭発生状況

(琵琶湖異臭調査小委員会¹⁶⁾より)

	カビ臭物質	発生回数	最高濃度
赤野井湾	2-MIB	13回	4,400ng/L
	ジェオスミン	11回	695ng/L
三井寺沖	2-MIB	12回	632ng/L
	ジェオスミン	10回	620ng/L
瀬田川	2-MIB	12回	664ng/L
	ジェオスミン	12回	520ng/L

この時期は、大体同じ頃に両カビ臭物質がピークになつていて、ジェオスミンが2-MIB以上の濃度になつたのは1987年のみである。2-MIBとジェオスミンが同時期に発生した場合には感覚上は、ジェオスミン濃度が2-MIB以上であつても日本人の場合2-MIBを敏感に察知すると言われている。琵琶湖異臭調査小委員会で行った臭気閾値濃度試験(表-5、29名、27名参加による2回の試験)の結果(表-6)から2-MIBのほうがジェオスミンより低い濃度で感知される結果が報告¹⁶⁾されている。この時期の2-MIB生成生物は、オシラトリア・テヌイスと考えられている。なお、ジェオスミンの生成生物について1991年以前は、アナベナ・マクロスポーラであったが1991年の発生頃からはアナベナ・スピロイディスに変わってきている。

表-5 臭気閾値濃度試験¹⁶⁾について

集団の臭気閾値濃度の測定は通常3点強制選択法を用いる。三角フラスコに3個を1組にして、その1個にカビ臭のある水を、他の2個には無臭水を入れる。カビ臭物質濃度を変えて3組以上を用意する。組数が多いほど精度はよくなるが、通常は4~5組で試験する場合が多い。この1組を集団で嗅いでもらい、各組で臭気を感じたフラスコを記録してもらう。このとき、臭気が薄くなると判定に迷いが出てくるが、でたらめでも記録してもらう。その結果を集計し、偶然に正解した回答を次式で補正して、対数確率紙に点をとり、近似曲線を引いて、50%の感知濃度を求める。

正しい感知% = (観察した% - 偶然正解を得た%)/(100 - 偶然正解を得た%) × 100
ここで、観察した% = 未補正の試験成績、偶然正解を得た% = 3個から1個を選ぶときは1/3%、4個から1個を選ぶときは1/4%を表す。

表-6 臭気閾値濃度試験結果¹⁶⁾について

(琵琶湖異臭調査小委員会¹⁶⁾)

	1回目	2回目
2-MIB	5.8ng/L	2.4ng/L
ジェオスミン	151ng/L	57.5ng/L

無臭水で調整した資料による試験結果

2)異常渴水年以降

(5月から7月の発生状況)

異常渴水年(1996年)以降、この時期にカビ臭は発生していない。1996、1997年は、フォルミディウム・テヌエが増殖し、2-MIBによるカビ臭が発生してもおかしくなかったが、結果として発生はなかった。

(8月から10月の発生状況)

1997、1998年は、カビ臭の発生はなかった。1999年では2-MIBは最高で赤野井湾の18ng/Lで三井寺沖、瀬田川では、それぞれ12, 14ng/Lを検出したのみであった。しかし、ジェオスミンはこれまでの最高を記録し、西岸の唐津沖で1,700ng/Lであった。次いで東岸の山田港沖で1,300ng/Lを測定している。このようにジェオスミンが突出し、2-MIBが多くならないのは初めてであった。原因生物は、アナベナスピロイディスと推定されている。

以上のように琵琶湖の例では、カビ臭原因物質は生成する藍藻類によって変化し、藍藻類の種類も季節や年度などにより違いがあることがわかる。また2-MIBのほうがジェオスミンに比べ敏感に察知されやすい。

5. カビ臭物質の検知方法

カビ臭が発生した時、原因生物、臭気原因物質の特定、性質、濃度を迅速、的確に把握することが重要である。臭気物質の分析技術としては、近年、回収方法の開発、測定機器の発達により臭気成分の同定と平行して定量化の制度が向上したため、1980年代にはng/Lレベルの濃度にまで測定が可能となった。さらに最近ではコンピューターシステムによる短時間での分析装置が開発されてきた²⁷⁾。以下にカビ臭物質の分析方法²⁸⁾について簡単な特徴について記す。

1) 2-MIB(C₁₁H₂₀O)

2-MIBは、沸点208、分子量168の二環性モノテルペン化合物で、常温で液体の物質である。図-4に構造式を示す。墨汁のような臭いを呈し、臭気の閾値は5ng/Lと言われているが、20人のパネラーによる事例では臭気感知範囲は0.1~115ng/Lと個人差が大きく、ジェオスミンと比較すると低濃度でも感知されるようである。

平成16年4月から施行される水質基準に関する省令において10ng/L以下であることが定められている。

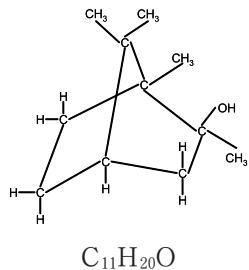


図-4 2-MIBの構造式

2) ジeosmin(C₁₂H₂₂O)

ジオスミンは、沸点254、分子量182の二環性セスキテルペン化合物である。図-5に構造式を示す。カビ臭を呈し、臭気の閾値は10ng/Lと言われているが、20人のパネラーによる事例では臭気感知範囲は12.9~685ng/Lと個人差が大きい。

平成16年4月から施行される水質基準に関する省令において10ng/L以下であることが定められている。

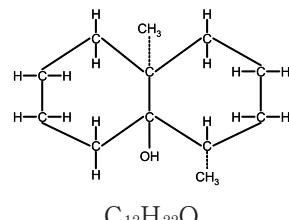


図-5 ジeosminの構造式

これらカビ臭物質の毒性については、急性毒性は水中濃度が低いことから問題ないと考えられている。変異原性についても、2-MIB、ジオスミンともに変異原活性は認められていない。

カビ臭分析方法²⁶⁾は、バージ・トラップ - ガスクロマトグラフ質量分析法および固相抽出 - ガスクロマトグラフ質量分析法が定められている。このうち、バージ・トラップ - ガスクロマトグラフ質量分析法を標準法とし、固相抽出 - ガスクロマトグラフ質量分析法は、環境基準で規制されるジクロロメタンを使用するため参考法としている。表-7にカビ臭物質の分析試験方法一覧を示す。

表-7 カビ臭物質の試験方法一覧
(河川水質試験方法(案)²⁸⁾より、1997年)

	試験方法の名称	定量範囲 ($\mu g/L$)	精度 (CV%)	必要検水量 (mL)	出典
標準法	バージ・トラップ-ガスクロマトグラフ質量分析法	0.005~0.25	20	5~20または100	上水道試験法 ¹⁹⁹³ VI-4 12.2
参考法	固相抽出-ガスクロマトグラフ質量分析法	0.005~0.25	20	500	上水道試験法 ¹⁹⁹³ VI-4 12.3

ページ・トラップ - ガスクロマトグラフ質量分析法は、検水中の2-MIBおよびジェオスミンをページして気相に追い出し、トラップ管に濃縮した後、トラップ管を加熱して対象化合物をガスクロマトグラフ質量分析計に導入し、選択イオン検出法(SIM)またはマスクロマトグラフ法で濃度を測定する方法である。

6. 漁川ダム貯水池におけるカビ臭問題について

6. 1 ダムの概要

漁川ダムは北海道恵庭市西部に位置し、恵庭市街から約15kmと比較的都市部の近い位置に建設されているが、ダム上流の集水地域は森林地域で湖水も澄んでいる。ダムの規模は、集水面積113.3km²、総貯水容量15,300千m³、有効貯水容量14,100千m³を有し、ダム本体の規模および形式は堤高45.5m、堤頂長270.0mのロックフィルダムで、流域一帯の洪水被害軽減、上水道用水の供給ならびに流水の正常な機能の維持を行うことを目的とした多目的ダムである。水道用水の供給は、江別、千歳、恵庭、北広島市に対して行われており、1日最大77,100m³の取水が可能である。また、ダム下流には「えにわ湖自由広場」、「桜公園」、そして上流部には「ラルマナイ自然公園」があり地域住民の憩いの場となっている。

6. 2 漁川ダムにおけるカビ臭発生の経緯

漁川ダム貯水池では、1993年に大規模なカビ臭が発生したが、それ以前も以降も藍藻類の異常繁殖が観測されなかったこと、漁川ダム貯水池内の底泥から分離された放線菌から高いジェオスミンの発臭能が確認されたことから放線菌がカビ臭発生の原因生物であることが特定されている。

漁川ダムの底泥から分離した放線菌について培養試験を行った結果²¹⁾から、漁川ダムの放線菌が一般に

言われている水温(20 ~ 34)よりも低い水温(10以上)で増殖し、カビ臭物質の生成が行われること、放線菌にはジェオスミンと2-MIBを生成するものとジェオスミンのみを生成するものがいることが示された。ただし、漁川ダムの放線菌量は、表-8に示した道内のダムの放線菌量と比較すると、特別に多いわけないことがわかる。

漁川ダム貯水池でのカビ臭発生時期についてジェオスミン濃度が定量下限値(= 5 ng/L)以上検出された時期を発生時期とした場合、発生開始は融雪出水後の洪水期に備え貯水位を下げ始める6月頃からが多く、9月上旬頃には終息している(図-6)。

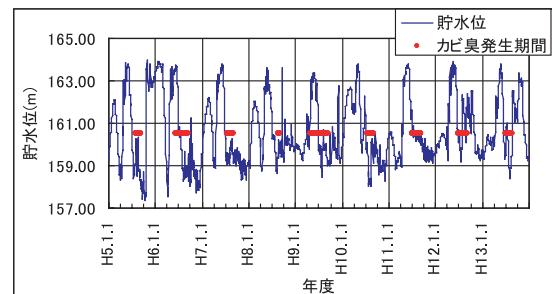


図-6 カビ臭発生とダム貯水位の経年図
(漁川ダム管理所データより)

発生箇所については、杉山ら²⁹⁾によると大きく2通りあり、下流部下層(ダムサイト下層、湖心下層)のみに発生する年と貯水池全域で発生する年に分けられる。どちらも共通してダムサイト下層において頻繁に問題となるカビ臭が発生している。

6. 3 漁川ダムのカビ臭発生プロセスについて

カビ臭発生プロセスについては漁川ダム管理所、杉山ら²⁹⁾、小林ら³⁰⁾の調査、研究から以下のようなカビ臭発生プロセスが推定されている。

1)漁川ダム上流部で水温の上昇に伴い、放線菌の増殖、カビ臭物質の生成が行われる。

表-8 ダム底泥放線菌調査結果
(北海道開発局、1999年、漁川ダム水環境調査業務²¹⁾より)

ダム名	漁川ダム	二風谷ダム	桂沢ダム	金山ダム	岩尾内ダム
採泥地点	湖心	湖心	湖心	湖心	湖心
採泥月日	H11.9.16	H11.9.7	H11.9.13	H11.9.14	H11.9.16
水深(m)	9.8	4.2	19.0	15.0	16.2
泥温(℃)	12.5	20.8	9.2	7.7	7.8
放線菌(個/g)	43,000	28,000	47,000	170,000	35,000
室内試験における発臭の有無	○	○	○	○	○

2)上流部で増殖、カビ臭物質を生成し体内に蓄えた放線菌が下流の下層域に流下、沈降する。

3)下層域では、嫌気化の進行により放線菌が死滅、分解し放線菌体内のカビ臭物質が放出されカビ臭が発生する。

1)については、杉山ら²⁹⁾、小林ら³⁰⁾の報告から漁川ダム上流部では、土砂堆積により棚状の地形が形成されており、その棚が放線菌の増殖に適した環境であることが報告されている。

2)、3)については、吉武ら²⁴⁾の報告から放線菌は生成したカビ臭物質を一部は菌体外に放出するが、そのほとんどを菌体内に保持しており、水中のカビ臭物質が最高濃度に至った時には、放線菌は増殖よりもむしろ死滅、分解が進行している時であることを報告している。

6. 4 漁川のカビ臭対策について

先に記した放線菌によるカビ臭発生プロセスの仮説に基づき、漁川ダム管理所では以下のような対策^{31),32)}を検討、実施し、カビ臭の発生の抑制を図っていることを報告しておく。

1)湖水循環装置の設置

湖水循環装置により、ダム下層を常時好気的に保つことで、放線菌の死滅によるジェオスミンの発生を抑制する。玉川ら³³⁾が湖水循環装置によるカビ臭発生抑制の効果についてシミュレーションによって検討している。

2)棚状に堆砂している部分の掘削

放線菌の増殖、カビ臭物質生成の場となっている棚状の堆積土を掘削し、流入水と下層水の混合促進を図る。堆砂による貯水池内の流動の違いについては、中津川ら³⁴⁾がシミュレーションによって検討しており、堆砂によって底層付近の流動性が悪くなることを示している。

7. おわりに

カビ臭の水質障害は、各種対策の進展により年々被害人口が減少してきている。また、分析技術の進歩でカビ臭原因物質、原因生物の特定については比較的容易にできるようになったが、原因生物の発生予測、発生制御の段階には至っていない。これは、藍藻類の増殖特性、影響因子が自然水中で得られる結果が必ずしも試験室で再現できないからである。自然水中では、カビ臭原因生物のみが生息しているわけではなく、多様な生物が生息しており互いに干渉、影響を受けながら

生息していることも因果関係を複雑化している。また、藍藻類、放線菌ともに個体差や生息環境の違いによりカビ臭物質の生成能力に違いがあることも画一的に判断できない理由である。これらの問題を解決するには、現時点では観測データの蓄積や、生物学的な知見を利用するなどしながらマクロ的な制御策を模索していくべきだと考える。

謝辞

北海道開発局石狩川開発建設部漁川ダム管理所から貴重なデータ・資料を提供して頂いた。また、東京農業大学応用生物化学部醸造科学科の藤本尚志先生には本報告に対し貴重な助言をいただいた。さらに、株式会社福田水文センターにはカビ臭の分析について御教示いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省 土地・水資源局 水資源部,安全でおいしい水の確保 ; http://www.mlit.go.jp/toc_himizushigen/mizsei/
- 2) 橋治国 ; 富栄養化と水質解析,水工学シリーズ95—A—2, pp.A—2—1 ~ A—2—15,1994.
- 3) 国土交通省 琵琶湖河川事務所/独立行政法人 水資源機構 琵琶湖総合開発管理所 ; ビワズ通信, No.30,2001.
- 4) 高村義親 ; アオコの科学用語としての位置, 水環境学会誌, Vol.17,pp.1,1994.
- 5) 杉浦則夫 ; 霧ヶ浦におけるアオコの発生と対策, 水環境学会誌, Vol.17,pp.2 ~ 6,1994.
- 6) 清水達雄,藤田正憲,古川憲治,堀内純一共著 ; 微生物と環境保全,pp.14 ~ 28,2001.
- 7) 山下尚之,松田和成,松井三郎 ; 琵琶湖におけるラン藻毒の動態,日本水環境学会年会講演集,pp.98, 1998.
- 8) 稲森悠平,亀山恵司,杉浦則夫,戎野棟一 ; 有毒物質ミクロキスチンの產生に及ぼす環境因子の影響と解析評価,日本水環境学会年会講演集,pp.214,1999.
- 9) 渡辺信 ; アオコの毒性に関する研究の現状と課題, 水質汚濁研究,12, pp.750 ~ 756,1989.
- 10) 本橋敬之助 ; 水質浄化マニュアル(技術と実例), pp.78 ~ 89,2001.
- 11) 村上敬吾 ; 中禅寺湖の淡水赤潮,水環境学会誌, pp.8 ~ 12,1991.
- 12) OECD ; Eutrophication of Water Monitoring, Assessment and Control,OECD(1982)

- 13) 野村潔 ; 琵琶湖における淡水赤潮について, 水環境学会誌,pp.18 ~ 24,1991.
- 14) 畑幸彦 ; 永瀬ダム湖(高知県)の淡水赤潮,水環境学会誌,pp.25 ~ 29,1991.
- 15) 滋賀県琵琶湖環境部,環境政策課 ; 滋賀の環境200
2. <http://www.pref.shiga.jp/biwako/koai/kankyo/>
- 16) 淀川水質汚濁防止連絡協議会,琵琶湖異臭調査小委員会 ; 琵琶湖異臭調査25年史,2000.7.
- 17) 滋賀県立衛生環境センター,プランクトンホームページ ; <http://www.pref.shiga.jp/biwako/plankton/>
- 18) 河上智行,佐藤直良,工藤勝弘,山田正 ; ダム貯水池におけるフォルミディウムとカビ臭に関する研究、土木学会第58回年次学術講演会,pp.433 ~ 434,2002.
- 19) 中村寿子 ; 糸状藍藻類の種類および形態変化と臭気,用水と廃水,Vol.31,pp52 ~ 59,1989.
- 20) 藤本尚志,福島武彦,稻森悠平,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,pp63 ~ 70,1995.
- 21) 北海道開発局 石狩川開発建設部 ; 平成11年度 直轄堰堤維持の内 漁川ダム水環境調査業務
- 22) 杉浦則夫 ; 霧ヶ浦のカビ臭原因生物と環境要因,用水と廃水,Vol.31,pp20 ~ 25,1989.
- 23) 梶野勝司 ; 琵琶湖の臭気原因生物と水質因子,用水と廃水,Vol.31,pp13 ~ 19,1989.
- 24) 吉武和人,朝倉順子 ; 放線菌の生理活性とカビ臭の生成,用水と廃水,Vol.28,pp10 ~ 15,1986.
- 25) 杉浦則夫 ; 放線菌によるカビ臭物質の生成機構,用水と廃水,Vol.31,pp45 ~ 51,1989.
- 26) ハ木正一 ; 植物プランクトンによる異臭の実態,用水と廃水,Vol.31,pp3 ~ 12,1989.
- 27) 杉浦則夫,院多本華夫,前川孝昭 ; 夏季の霞ヶ浦における異臭の発生要因,用水と廃水,Vol.42,pp7 ~ 12,2000.
- 28) 建設省河川局 ; 河川水質試験方法(案),1997.
- 29) 杉山直樹,小林睦子,益塚芳雄,野口朋毅,橋治国 ; 漁川ダム湖における臭気物質の動態と発生機構,土木学会第55回年次学術講演会論文集,pp.220 ~ 221,2000.
- 30) 小林睦子,鹿野愛,橋治国,益塚芳雄,稻澤豊 ; 漁川ダム湖における臭気物質の発生機構,土木学会第57回年次学術講演会論文集,pp.127 ~ 128,2002.
- 31) 北海道開発局 石狩川開発建設部 ; 平成13年度 直轄ダム周辺環境整備事業の内漁川ダム貯水池水質対策保全工法検討業務
- 32) 北海道開発局 石狩川開発建設部 ; 平成14年度直轄ダム周辺環境整備事業の内漁川ダム貯水池水質対策保全対策工検討業務
- 33) 玉川尊,村椿健治,小倉和紀,三俣晴由 ; 漁川ダムにおけるカビ臭防止対策とその効果について,土木学会北海道支部論文報告集,第60号,pp.838 ~ 841,2003.
- 34) 中津川誠, 矢挽哲也,高田賢一 ; 放線菌に由来するカビ臭発生要因の解析,日本水環境学会年会講演集,pp291,2003.



矢挽 哲也*

北海道開発土木研究所
環境水工部
環境研究室
依頼研修員
(株式会社リブテック)



中津川 誠**

北海道開発土木研究所
環境水工部
環境研究室
室長
博士 (工学)