芹川ダムの下流で2-MIBが高濃度で検出された 2014年のダム周辺の水質特性について

横 田 恭 平^{1), ㊦}

Impact of Serikawa Dam on Water Quality Downstream: Significance of High 2-MIB Concentration in 2014

Kyohei YOKOTA^{1), ㊦}

¹⁾ Department of Civil and Environmental Engineering, National Institute of Technology, Oita College, 1666 Maki, Oita 870-0152, Japan

Abstract

Musty odor occurred in tap water with Oita River as its source in October 2014. Oita city disclosed that the problem was due to plankton in the Serikawa Dam, which is on a tributary of the Oita River. This study was aimed at elucidating the cause of the problem by comparing water quality in 2014 with that in previous years. 2-Methylisoborneol (2-MIB) showed a high concentration in the Serikawa Dam and downstream in 2014. It was found that thermal stratification was absent from November 2014 to January 2015 because no temperature difference between the upper and lower layers was detected. On the other hand, the ammonia nitrogen concentration remained high, $2.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, from November 2014 to January 2015. Iron and manganese ions showed the same pattern as ammonia nitrogen in 2014. This suggests that, in 2014, 2-MIB negligibly decomposed as a result of oxygen depletion caused by the high ammonia nitrogen concentration in the Serikawa Dam Reservoir. It is likely that 2-MIB reached farther downstream without being decomposed.

Keywords: 2-MIB; Musty odor; Thermal stratification; Ammonia nitrogen; Oxygen depletion

1. はじめに

カビ臭の発生要因としては、ダムによる停滞水域の存在により植物プランクトンが増殖しやすい環境が揃い、大量に発生した植物プランクトンが死滅することでカビ臭の原因である2-MIB(2-メチルイソボルネオール)とジェオスミン(ジオスミン)が水道法による水質基準を超えて発生することが知られている^{1)~3)}。しかしながら、ダムがどのような環境下において、ダムの下流域までカビ臭の影響が残存するのかについては不明瞭な点が多く、下流の水道水源でカビ臭が発生した原因を解明できていないのが現状である^{4)~7)}。

2014年10月9日に大分川を水源とする水道水からカビ臭が発生し、大分市の調査によると水道法の水質基準を超える2-MIBとジェオスミンが検出されたと発表がなされた⁸⁾。カビ臭の発生源としては大分川の支流である芹川に位置する芹川ダムで、このダムにおいて2-MIBを産み出す植物プランクトン「フォルミジウム」が多量に繁殖していることが原因で、下流の水道水源において水質基準を超える2-MIBが検出されたと2014年11月25日に大分市によって公表された。そこで、本研究では芹川ダムに注目し、カビ臭の発生要因を化学的な

指標を用いて考察することを目的とする。

2. 研究対象地と分析方法の概要

2.1 研究対象地

研究対象地の大分川(調査地点1~11)、芹川(調査地点12~22)、2019年完成予定の大分川ダムが建設されている七瀬川(調査地点23)について図1に示す。さらに図2に芹川ダム周辺を拡大した図を示す。大分川は、上流に由布院温泉が確認されている河川である。また芹川は大分川の支流であるが、その芹川の上流には日本一の炭酸泉である長湯温泉がある。その長湯温泉の下流に芹川ダムが建設された。芹川ダムは治水や利水に加え、電力確保の観点から建設されたダムで1957年より運用が開始されている。型式は重力式コンクリートダムで一般的に建設されている種類のダムである。基礎岩盤からダム天端までの高さ(堤高)は52.20 m(標高338.2 m)で堤頂長は193.0 m、有効貯水容量は2230万 m^3 である。取水口は標高313 m付近にあり、発電用最低水位は標高319 mである⁹⁾。ダム内の調査地点17と18の2ヶ所は、水深ごとに3ヶ所で調査がなされており、採水する水深については、全水深を3等分した水深で採水されている。調査日によって全水深が変動するため、

1) 大分工業高等専門学校都市・環境工学科 〒870-0152 大分市牧1666

㊦ 連絡先: yokota@oita-ct.ac.jp

それに伴い採水する水深、取水口の水深も調査日によって変動する。大分県の HP によると計画堆砂面の標高が 307 m、取水口の標高が 313 m、そして全水深が 24 m より深いことから、取水口の水深については 18 m より深い位置にあると考えられる⁹⁾。本研究では表層を 0～10 m、中層を 10～20 m、下層を 20～30 m とした。

本研究室での水質調査は 2013 年 6 月から実施しており、対象期間としては 2013 年 6 月～2015 年 1 月とした。調査地点の 1, 3, 6, 12, 15～18, 23 に関しては、大分県と大分市が調査したデータを使用している^{8,9)}。芹川ダムとその放水口の調査地点 15, 17, 18 は、大分県により 2003 年から継続的に調査・分析が実施されている。水温は 2003 年から、クロロフィル a は 2010 年から、全リンは 2008 年から、溶存酸素 (DO) は 2008 年から、アンモニア態窒素は 2011 年から調査がなされており、本研究では 2015 年 3 月までを対象とした。アンモニア態窒素を分析した理由としては、芹川ダムが酸化状態か還元状態かを把握するために行った。調査地点 1, 3, 6, 12, 16, 23 は、大分市により 2-MIB とジェオスミンを 2009 年から継続的に調査・分析が実施されている。本研究では 2014 年 12 月までを対象とした。

2.2 分析項目及び分析方法について

本研究で採取した試料の溶存成分は、イオンクロマトグラフ (ダイオネクス社製: IC-1000) 法にて NH_4^+ を分析し、ICP 発光分光分析 (島津製作所社製: ICPS-8100) 法にて Fe と Mn を分析した¹⁰⁾。アンモニア態窒素は、 NH_4^+ から計算して求めた。本研究では全量分析を

行っているため、現場でのろ過を実施していない。分析の前処理として Millipore 社製の Hydrophilic PES 0.45 μm のフィルターでろ過を行った。なお、ICP 発光分光分析法に関しては、濃硝酸を約 1% になるように添加後、1 日以上静置してから上記と同じフィルターを用いてろ過した後に、分析を行った。

本研究で使用する大分県と大分市が提供する水温、2-MIB、クロロフィル a、全リン、DO、アンモニア態窒素のデータについて、水温は棒状温度計測定法、2-MIB は HS-GC-MS 法、クロロフィル a は上水試験方法 IV-4.25 に定める方法、全リンは工場排水試験方法の規格 46.3、DO は同じく工場排水試験方法の規格 42、アンモニア態窒素は同じく工場排水試験方法の規格 42.6 の流れ分析法に基づき分析がなされている¹¹⁾。

3. 結果

3.1 2-MIB の測定結果について

図 3 は、調査地点 1, 3, 6, 12, 16, 23 の 2009 年から 2014 年 12 月までの 2-MIB の結果である。定量下限値の $0.001 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ より濃度が低い場合、図上では $0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ と表記した。水道法による水質基準は $0.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下であるが、2013 年までの測定においては水質基準を超える地点は調査地点 16 のみであった。しかしながら 2014 年において調査地点 12 と 23 以外は、2-MIB の濃度が水質基準を超過しており、調査地点 16 の芹川ダムにおいては 2011 年の $0.25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ をさらに超える $0.28 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ の濃度が検出された。芹川ダムの下流に位置す

図1 研究対象地

図2 研究対象地 (芹川ダム周辺地域)

図3 2-MIB濃度について⁸⁾

る調査地点1, 3, 6においても水質基準を超える濃度を示し、特に調査地点6においては $0.028 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ と高い濃度を示した。このことから2014年は極端に2-MIBの濃度が高いことが分かった。

図4は、調査地点1と3の水道水源で2014年10月9日にカビ臭が発生した以降の詳細な結果である(2014年10月11日～12月12日)。10月11日の調査地点1で $0.006 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、調査地点3で水質基準の $0.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ を示し、その後は濃度が増加傾向にある。そして最も濃度が高いのは11月18日に調査地点3で観測された $0.088 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ である。その後は減少傾向にあり、11月22日を過ぎると水質基準以下となり、そして水質基準を超えることはなかった。また調査地点1は調査地点3の下流に位置するが、2-MIB濃度は、調査地点1の方が常に低い傾向を示した。

以上のことから2014年の2-MIBの濃度は、過去6年間の結果から見て最も濃度が高く、特に2014年11月に水質基準を大きく超えることが分かった。また下流の調査地点1の方が2-MIBの濃度が減少傾向にあることも分かった。

3.2 芹川ダムの水温について

芹川ダムでは2003年より水温の調査がなされている。図5, 6は表層と下層との水温差の変化を2003～2009年と2010～2015年に分けて示している。2009年と2010年を境に傾向は変わっており、2003～2009年においては3～10月まで表層から下層までの水温差が生じているが、11月には解消されている。それに対し2010年以降に関しては、3～11月まで水温差が生じる場合、

図4 調査地点1と3での2-MIB濃度(2014年10月11日～12月12日)⁸⁾

図5 表層と下層との水温差(年別:2003～2009年)⁹⁾

9月まで水温差が生じ11月には水温差が 0°C に近づく場合がある。11月まで水温差が生じるのは主に調査地点17で、9月まで水温差が生じるのが調査地点18である。この傾向は2014年まで継続している。11月まで水温差が 5°C 以上を示した場合でも、翌年の1月になるとその水温差がほぼ 0°C となり、水温差は解消される。2015年1月においても水温差はほぼ 0°C となった。

以上のことから芹川ダムにおいて、2009年までは3月より水温差が生じ始め10月まで水温差が生じ、2010年以降は調査地点17または調査地点18のいずれかで11月まで水温差が 5°C 以上確認することができた。そして11月に水温差が 5°C 以上ある場合でも、1月になると水温差がほぼ 0°C となるという傾向にあることが分かった。

3.3 芹川ダムのクロロフィルaの濃度について

図7は、芹川ダム内の調査地点17と18でのクロロフィルaの月変化を年別(2010～2015年)に分けた結果である。ダム内でのクロロフィルaは、すべて表層での結果である。クロロフィルaは植物プランクトンの総量の目安となる指標である。2010年7月において最大値は $180 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ を示した。2-MIBが高濃度で検出された2014年の結果を確認すると、7月に $53 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ と高い濃度を示した。しかしながら2013年の7月は $70 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、2010年の7月は $50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ であり、2014年と同等かそれ以上の濃度結果を2014年以外で示すことがあった。7月以外でも2012年の3月に $77 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、2011年11月に $70 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ と2014年より高い濃度を示す場合が数多く確認された。次に各月の結果を見ると2014年が最大値を示すことはなく、1～11月において、最大値は2014年ではなく、

図6 表層と下層との水温差(年別:2010～2015年3月)⁹⁾

図7 調査地点17と18のクロロフィルaの月変化(年別:2010～2015年3月)⁹⁾

別の年であることが分かる。以上のことから、2014年のクロロフィル a は他の年と比較して決して高い結果ではないことが分かった。

3.4 芹川ダムの全リンの濃度について

図8は、芹川ダム内の調査地点17と18での全リンの月変化を年別（2008～2015年）に分けた結果である。ダム内の全リンは、表層・中層・下層の結果である。2009年の5月に約 $0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ と高い濃度を示し、2010年の7月、2011年の7月、2012年の3月、2013年の1月においては、 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ を超える濃度を示した。2-MIB が高濃度で検出された2014年においては、全リンの濃度が常に $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下を示し、他の年と比較して高い濃度を示さなかった。しかしながら、2015年1月は、 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ を超える $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ の濃度を示した。

3.5 芹川ダムの溶存酸素（DO）の濃度について

図9は、芹川ダム内の調査地点17と18でのDO濃度の月変化を年別（2008～2015年3月）に分けた結果である。ダム内のDOは、表層・中層・下層の結果である。年間を通して7月に最も濃度が高くなる傾向にあり、また最大値と最小値の差も最大となる。3月、8月には確認できないが、5～11月に関してはDOの濃度が $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ に近い値を示す場合がある。DOの濃度が $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 近くを示すのは2014年に限らず、2008～2013年においても確認することができる。2015年は1月においても、 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ に近い値を示すものがあつた。DOの濃度が $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 近くを示すのは、調査地点17の下層の結果である。

以上のことから調査地点17の下層ではDOの濃度が

$0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 近くを示すことがあるが、2008～2015年3月までのDOの濃度を確認すると、2014年は他の年と比較して濃度に特異な傾向を示さなかった。しかしながら2015年1月においては、これまでにない傾向が確認でき、濃度が $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ に近い値を示した。

3.6 芹川ダムのアンモニア態窒素の濃度について

図10～12は、芹川ダム内の調査地点17と18でのアンモニア態窒素の月変化を年別（2012～2015年）、場所別（調査地点17と18）、層別（表層、中層、下層）に分けた結果である。年、地点、そして各層の濃度を平均していないため、同じ年、同じ場所、同じ層に2つ以上のデータが示される場合がある。図10によると2012～2014年の1～3月の濃度は $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下と低い濃度を示していることが分かる。その後、5月から濃度が上昇

図10 調査地点17と18のアンモニア態窒素の月変化（年別）⁹⁾

図8 調査地点17と18の全リンの月変化（年別：2008～2015年3月）⁹⁾

図11 調査地点17と18のアンモニア態窒素の月変化（場所別）

図9 調査地点17と18のDOの月変化（年別：2008～2015年3月）⁹⁾

図12 調査地点17と18のアンモニア態窒素の月変化（層別）

し始め、11月に最も高い濃度を示した。2014年11月においても高い濃度を示し、約 $1.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ まで上昇した。一方で5月からの濃度が $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下と低い結果を示すことがあった。2015年1月において異なる点は、2014年までの傾向のように1月に $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下まで減少せず、11月の濃度よりも高い $2.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ の結果を示したことである。この2015年1月に濃度が高かった場所は図11と図12の結果から調査地点17の下層であることが分かる。さらに5月から濃度が上昇し始めたが、その地点も調査地点17の下層であることが分かる。ただし例外として2012年8月においてのみ調査地点17の中層が最も濃度が高い結果となった。

以上のことからアンモニア態窒素の濃度は調査地点17の下層において11月まで高い傾向を示し、2015年の1月においてのみ、さらに濃度が高くなることが分かった。

3.7 河口からの距離とアンモニア態窒素の濃度について

図13は大分川と芹川の河口からの距離とアンモニア態窒素の濃度との関係である。対象とした期間は2013年6月～2015年1月である。本研究では上流を河口からの距離30～50 km、中流を15～30 km、下流を0～15 kmとする。大分川の上流でアンモニア態窒素の濃度が $0\sim0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ を示すが、中流では定量下限値の $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下を示すことが多くなり、 $0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ を超えることはなかった。河口からの距離が15 km以下の下流になると、アンモニア態窒素の濃度が上昇し、最大で $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ を超える濃度が検出された。

芹川に関しては芹川ダム付近で $0.73\sim2.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ の範囲で高い濃度を4回示すことがあった。この結果は大分川の上流より高い濃度であった。この4回を除くと、 $0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ を超えることがなく、大分川の中流とほぼ同じ濃度となった。

以上のことからアンモニア態窒素に関しては、芹川ダム内、大分川の上流と下流でのみ高い傾向を示し、それ以外に関しては $0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ より低い濃度を示し、多くの試料は定量下限値の $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 未満であることが分かった。

3.8 芹川ダム周辺のアンモニア態窒素の年間変化について

図14は、調査地点5、13、14、19～22における2013年6月～2014年12月までのアンモニア態窒素の結果である。すべての地点で濃度が検出されるが、全体

的に定量下限値未満を示している。特に2013年12月～2014年4月の期間は、常に定量下限値未満を示す。アンモニア態窒素の濃度が最も高いのは、調査地点22の $0.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ である。図13の河口からの距離とアンモニア態窒素の濃度の関係で芹川ダムと大分川の下流は、 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ を超えるサンプルが確認されたことから見ても、 $0.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ という数字は、極端に濃度が高いわけではないことが分かる。

以上のことから対象とした調査地点5、13、14、19～22のアンモニア態窒素は、芹川ダムと大分川の下流の濃度と比較して、濃度が低くなることが分かった。

3.9 鉄とマンガンの調査地点17での変化について

図15に調査地点17での鉄とマンガンの濃度を層別（表層、中層、下層）に分けた結果を示す。対象とした期間は2014年1月～2015年1月である。2014年1月～5月までは、どの地点においても $0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ を超えることがなかった。しかしながら、9月以降は下層において濃度が上昇し、2015年1月に最も濃度が高くなり、鉄が約 $1.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、マンガンが $4.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ を示した。表層と中層に関しては濃度に大きな差はなく、鉄イオンが $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下、マンガンは $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下を常に示した。

以上のことから調査地点17の下層においては、9月以降にFeとMnの濃度が上昇し、2015年1月においては、FeとMnの濃度が最も高くなった。

4. 考察

調査地点1の2-MIBは、調査地点3の濃度より常に低い値を示した。調査地点1は調査地点3より約8 km

図13 大分川と芹川の河口からの距離とアンモニア態窒素の濃度との関係

図14 芹川ダム周辺のアンモニア態窒素の濃度変化

図15 調査地点17での鉄、マンガン濃度の変化（層別）

下流に位置することから、流れる過程で2-MIBが分解され、濃度が減少した可能性がある。調査地点1と3の途中で合流する七瀬川の流量は、換算して1割程度の影響力しかなく、また七瀬川にある調査地点23の2-MIBの濃度はほぼ定量下限値未満であることから、2-MIBの濃度に大きな影響力はないものと思われる。例えば11月18日に調査地点3で観測された2-MIB濃度が $0.088 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ で、調査地点1が $0.040 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ であったことから、もし七瀬川の影響を受けている場合、仮に1割の影響力だとすると濃度は $0.079 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 程度になっていると考えられる。しかしながら本来の数値とは $0.039 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ の開きがあることから、七瀬川の影響は少ないものと考えられる。植物プランクトンが死滅し、それが分解される過程で2-MIBは放出することが知られている。この2-MIBは化学式 $\text{C}_{11}\text{H}_{20}\text{O}$ で表わされる有機物であることが知られている^{12~14)}。その有機物が分解・吸着により2-MIBの濃度が減少したと考えられる。

2014年において調査地点12と23のみ、2-MIBの濃度が水質基準を超過しなかった。調査地点12は芹川ダムの下流に位置し、調査地点6より上流にある。実測値として下流の調査地点6の2-MIB濃度の方が高い傾向を示した。調査地点12の濃度が調査地点6より低い理由について考察する。すでに示した図2に水力発電用のパイプを示している。芹川ダムは発電目的で建設されたため、水力発電用のパイプが存在する。芹川ダムからパイプを通じて調査地点15に流れる。そして調査地点15から調査地点13の下流までパイプを通じて流れていく。また調査地点14と15の間にもパイプがあり、それが調査地点13と14の間に流れ込む。このパイプに関しては、大分川の調査地点7と8の間からの水も含まれている。よって芹川ダムから流れてきた水は、この大分川からの流入水により希釈される可能性がある。またパイプによって芹川ダムからの流量が制限される場合があるため、それにより希釈率は高くなる可能性もある。芹川ダムからの放流水は、芹川と大分川が合流し、調査地点6に到達する。この調査地点6は、堰によって水が止められている。よって調査地点6は停滞水域であるため、芹川ダムからの負荷はその堰によって溜められる。このことから、パイプにより芹川ダムからの放流水の流量が制御され、そして濃度が希釈される。しかしながら調査地点6に停滞水域があることによって、結果として芹川ダムの負荷量がそのまま調査地点6に流れることとなり、調査地点6で調査地点12を超える2-MIB濃度が検出されたと考えられる。図3の2-MIBの結果から、下流の調査地点6は芹川ダムの調査地点16より低い濃度を示したことからも、大分川上流からの流入水によって希釈されている可能性がある。しかしながらこれらは、芹川ダムからの負荷量から考察をしていないこと、パイプを通る流量がはっきりしないこと、大分川上流で2-MIBの濃度が検出される可能性があることなど多くの不明瞭な点があることから、本研究では調査地点12の2-MIB濃度が下流の調査地点6より低い理由について明確に示すことができなかった。

2010年以降、調査地点17において11月まで表層と下層との水温差が生じていることから、11月まで水温成層が維持されている可能性がある。そして翌年の1月

になると、表層と下層との水温差がなくなるため、11月～翌年の1月の間で水温成層が破壊され、表層と下層が循環し始めると推測できる^{15~17)}。このことは、アンモニア態窒素の濃度が11月では最大値を示し、翌年の1月には定量下限値未満となったことから推測することができる。水温成層が起こっている場合は下層で酸素が非常に少ない環境下になることも知られている。よって底質からのアンモニアの溶出により濃度が上昇し、酸素の少ない環境であるためアンモニアは酸化せず、そのままの状態でダムの下層に残った可能性がある。また一般的ではないが酸素が少ない環境下では微生物の作用により硝酸イオンが窒素(N_2)やアンモニウムイオンに変化することが知られていることから、ダムの下層が還元的な状態であるため、濃度が上昇した可能性もある¹⁸⁾。2015年1月はこれまでの傾向と異なり、調査地点17の下層においてアンモニア態窒素の濃度は、2015年1月においても2014年11月より高い $2.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ となった。2010～2013年においては11月まで調査地点17の下層で濃度が高い傾向を示したが、翌年の1月は濃度がほぼ定量下限値以下にまで減少した。2015年1月のアンモニア態窒素の濃度は11月より高いことから、調査地点17の下層(20～30 m)は、11月以降においても水温成層が破壊されず、1月まで継続した可能性がある。

芹川ダムで高い2-MIB濃度が検出されたことから、表層で死滅した植物プランクトンから2-MIBが放出されたと考えられる。放出されなかった2-MIBは植物プランクトンと共に下層に沈降したと考えられる。2013年までは11月になると水温成層が破壊されたことによって酸素が供給され、2-MIBが分解する環境が揃うものと考えられる。しかしながら2014年の11月以降についてはその環境が揃わず、分解されないまま下流に流れ、流下過程で若干ながら2-MIBは分解されるが、調査地点1と3の水道水源にまで影響した可能性がある。調査地点12については、水力発電用のパイプの影響により、2-MIBの濃度が低くなった可能性があるが、不明瞭な点が多く残されている。

2014年に大量の植物プランクトンが発生し、それが分解されないまま下流に影響した可能性があるが、2014年のクロロフィルaと全リンの濃度は、2013年以前の濃度と比較しても高い傾向を示すことがなかった。このことから2014年の植物プランクトンの量は例年並みかそれ以下であると推測することができる。しかしながら植物プランクトンの種構成による水質の変化を確認していないため、クロロフィルaのみではカビ臭の原因を特定することができないと考えられる。調査地点17の下層において2015年1月まで鉄とマンガン濃度が高い傾向を示した。これは下層に沈殿している酸化鉄や酸化マンガンなどが還元し溶出したことが考えられる。そして本来ならば11月以降の水温成層の破壊により酸素が供給され、イオン状態の金属が沈殿するが、酸素が少ない状態が続いたため、11月よりさらに濃度が高くなったと考えられる。アンモニア態窒素の濃度が下層で高かったことから、鉄とマンガンの濃度が高かった理由は、溶出によるものである可能性がある。これらのことから酸素が例年以上に少ない環境が2014年11月～2015年1月まで続いたため、植物プランクトンや2-MIBの分解

に使われる酸素量が例年に比べ少なく、それらが水質基準の濃度以下まで分解されないまま大分川の下流まで影響が残った可能性がある。2015 年まで酸素が少ない環境が続いた要因について考察するため、図 16 に長湯（図 1）で観測された雨量の月変化を年ごとに分けた結果を示す¹⁹⁾。対象とした期間は 2010 年 1 月～2015 年 3 月で、雨量が観測されなかった日のデータ（0 mm・day⁻¹）は、記載していない。2010 年～2014 年 1 月までの結果を見ると、最大値として 2011 年 11 月に 120 mm・day⁻¹を示すこともあった。それ以外として 30 mm・day⁻¹以下の雨量が観測されているが、その多くは 10 mm・day⁻¹前後であった。次に 2014 年 11 月～2015 年 1 月は、11 月に最大値として 26 mm・day⁻¹の結果を確認することができるが、それ以外に関しては 15 mm・day⁻¹以下の結果を示し、2010～2013 年の結果と比較して、それほど大きな差異を確認することができなかった。2015 年 1 月に 17～28 mm・day⁻¹の結果を確認することができるが、これらは 1 月の水質調査後に観測された結果である。よって芹川ダムの上流に位置する雨量観測結果からは、水温成層に影響したという根拠を導くことができなかった。

以上のことから芹川ダムでは溶存酸素量の少ない環境が 2015 年 1 月まで続き、その芹川ダムから排出された 2-MIB が水道基準の濃度まで減少せず、下流の水道水源まで到達したと考えられる。

本研究で解決できなかったのは、「なぜ 2015 年 1 月においても調査地点 17 の下層において溶存酸素量が少ない環境が続いたのか」についてである。2010 年以降は決まって翌年 1 月になると酸素量が上昇する。これについては表層と下層の水温差の結果から原因を考察することができた。しかしながら、2015 年 1 月においては水温差がほぼない環境下においても溶存酸素量が少ない環境であったため、これまでの要因では説明をすることができなかった。

また本研究で分かっていることは「大分川の上流の影響はなかったのか」についてである。大分川と芹川の合流後については 2-MIB の調査が実施されており、芹川においても調査が実施されている。しかしながら芹川と合流するまでの大分川においては、調査が実施されていない。大分川の上流域では芹川と同様にアンモニア態窒素の濃度が高い結果を示した。よって大分川の上流の影響がないとは断定することができないと考えられる。

最後として「調査地点 12 の濃度が下流の調査地点 6

より減少したこと」である。問題点としては、芹川ダムからの負荷量を用いて水質を考察していないこと、水力発電用パイプからの流量がはっきりしないこと、大分川の上流で 2-MIB の濃度が検出される可能性があることである。

5. おわりに

本研究では 2014 年にカビ臭が発生した原因について化学的指標を用いて推測することを目的とした。2014 年は、大分川でカビ臭の原因となる 2-MIB が例年と比較して高濃度で検出された。カビ臭が発生した上流の芹川ダムでは、2014 年のクロロフィル a と全リンの濃度が 2013 年以前の濃度と比較しても高い傾向を示すことがなかったため、植物プランクトン量は例年並みであったと推定できる。2010 年以降の傾向から考えると 2014 年の芹川ダムにおいては、表層と下層の温度差が少ないことから、11 月～翌年の 1 月の間で水温成層の破壊が進行していると思われる。特にダムサイトに近い調査地点 17 でこの傾向は顕著に確認することができ、水温成層の破壊の証拠として翌年の 1 月のアンモニア態窒素は濃度が減少したこと、DO の濃度が大きく上昇することからも水温成層の破壊が進行したと推定することができる。しかしながら 2014 年と 2010～2013 年が異なる点は、2014 年においては翌年の 1 月においても例年のように水温成層が破壊しておらず、調査地点 17 の下層においてアンモニア態窒素と DO の濃度が 11 月より上昇し、酸素の少ない状態が 1 月まで続いたものと考えられる。鉄、マンガンの濃度が 1 月においても高い傾向を示したことからも還元的な状態であったと推測することができる。これらのことから芹川ダム内では、酸素の少ない環境が 2015 年 1 月まで続いたため、2-MIB の分解に使われる酸素量が例年と比較して少なく、2-MIB が水質基準の濃度以下まで分解されないまま大分川の下流まで影響が残った可能性が示唆された。

今後の課題としては、2015 年 1 月において表層と下層との水温差がほぼなくなったにも関わらず、なぜ貧酸素の環境が続いたのかを解明することである。例年は水温差がなくなると、アンモニア態窒素の濃度は低くなる。これが解明できない限り今後もカビ臭の発生原因物質が下流まで到達する可能性が示唆されることから、課題解決は急務であると考えられる。

また、本研究では大分川と芹川の合流地点から下流域と芹川のための 2-MIB の結果で考察を行っている。大分川において合流地点より上流においては 2-MIB の分析が実施されていないため、芹川ダムのみが原因と判断することはできないと考えられる。なぜなら、大分川の上流でアンモニア態窒素の高い地点が確認されたためである。さらに調査地点 12 の 2-MIB の濃度が上流の芹川ダムと下流の調査地点 6 より低いことから、大分川上流から合流地点までの 2-MIB の調査も必要であると考えられる。

謝 辞

本研究は、平成 26 年度の一般社団法人九州地方計画協会「炭酸成分を多く含む長湯温泉がダムの水質に与える影響について」(代表:横田恭平)及び平成 27 年度の「芹

図 16 長湯での雨量観測結果の月変化 (年別: 2010 年 1 月～2015 年 3 月)¹⁹⁾

川ダムでのカビ臭発生原因の特定及びエアレーションの効果の検討」(代表:横田恭平)の援助を受けて行われた。芹川ダムの調査・分析データについて大分県生活環境部環境保全課にご協力いただいた。分析データについては大分市水道局にご協力いただいた。分析データの整理については都市・環境工学科の安藤りほ氏にご協力いただいた。この場をかりて謝意を示す。

(原稿受付 2015 年 3 月 9 日)

(原稿受理 2015 年 7 月 30 日)

参 考 文 献

- 1) 杉浦則夫, 矢木修身, 須藤隆一(1983)放線菌(*Streptomyces*)のカビ臭発生能に及ぼす各種環境因子の影響, 水質汚濁研究, **6** (2), 77-86.
- 2) 石橋良信, 佐藤敦久, 今野弘, 後藤光亀(1984)釜房湖のカビ臭発生要因の分析と流動特性, 衛生工学研究論文集, **20**, 83-94.
- 3) 木村文宣, 本間隆満, 前田充典, 松川正彦(2013)上流域からのカビ臭物質および原因藻類の流入がダム貯水池のカビ臭現象に及ぼす影響, ダム工学, **23** (1), 39-49.
- 4) 河原長美, 名合宏之, 高杉滋(1995)旭川ダム貯水池の富栄養化機構と下流への水質伝播, 環境技術, **24** (4), 9-12.
- 5) 河原長美, 名合宏之, 高杉滋, 安部文博(1995)旭川ダム貯水池の富栄養化と渇水の水質に及ぼす影響に関する研究, 環境工学研究論文集, **33**, 253-261.
- 6) 荒井治, 高須修二(1997)ダム湖の水質対策の動向, ダム工学, **7** (2), 90-97.
- 7) 松本光弘, 浅野勝佳, 氏家英司, 北田善三(2003)奈良県におけるダム湖の酸性化調査, 環境技術, **32** (4), 318-327.
- 8) 大分市HP, 水質関連情報, <http://www.city.oita.jp/www/genre/00000000000000/10000000000567/index.html> (2015年3月時点).
- 9) 大分県HP, 公共用水域及び地下水の水質測定結果, <http://www.pref.oita.jp/soshiki/13350/suiki.html> (2015年3月時点).
- 10) 社団法人日本分析化学会(2011)改訂六版分析化学便覧, pp.158-160, 丸善出版, 東京.
- 11) 並木博(2014)JIS使い方シリーズ詳解工場排水試験方法[JIS K 0102:2013], pp.84-89, 一般社団法人日本規格協会, 東京.
- 12) 青山幹, 富田伴一, 茶谷邦男(1993)放線菌のカビ臭産出におよぼす増殖温度の影響, 衛生化学, **39** (3), 207-212.
- 13) 工藤勝弘, 河上智行, 山田正(2004)ダム貯水池内における影響塩および植物プランクトンの挙動について, 水文・水資源学会誌, **17** (2), 134-149.
- 14) 工藤勝弘, 河上智行, 山田正(2004)ダム貯水池の滞留時間と藻類増殖に関する実験的考察, 水文・水資源学会誌, **17** (6), 607-617.
- 15) 矢島啓, 吉川栄, 石黒潤(2006)ダム貯水池における選択取水設備を用いた水温成層コントロールに関する研究, 水工学論文集, **51**, 1391-1396.
- 16) 長尾正之, 鈴木淳(2010)国内9ヶ所のダム湖における水温傾向の評価に関する予備的研究, 陸水学雑誌, **71**, 27-36.
- 17) 藤田豊, 高橋迪夫, 長林久夫, 安田禎輔, 木村喜代治(1992)福島県裏磐梯地区の湖沼群における水温成層の気候と水質諸量の輸送に関する現地観測, 水工学論文集, **36**, 205-210.
- 18) 武田育郎(2012)よくわかる水環境と水質, pp.41-50, オーム社, 東京.
- 19) 国土交通省HP, 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/> (2015年3月時点).

〔論文要旨〕

2014年10月に大分川を水源とする水道水からカビ臭が発生し, その発生源は大分川の支流である芹川に建設された芹川ダムが原因であると大分市によって公表された。そこで, 本研究では芹川ダムでの2014年とそれ以前の水質特性を比較し, カビ臭が発生した原因について化学的指標を用いて推測することを目的とした。カビ臭の発生原因である2-MIBは, 2014年に芹川ダムをはじめ, 下流域でも高い濃度を示した。芹川ダムでの表層と下層の水温差から, 11月から翌年1月までの間で水温成層は破壊されていると考えられる。しかしながら, 2014年のアンモニア態窒素の挙動は, 11月まで2013年までと同じ傾向を示したが, 翌2015年1月は異なり, 2014年11月よりさらに濃度が上昇する結果となった。以上のことから2014年は, ダム内で貧酸素の状態が長く続いたことにより, 本来は分解される2-MIBも完全には分解されない状態で下流にまで到達した可能性がある。

キーワード: 2-MIB; カビ臭; 水温成層; アンモニア態窒素; 貧酸素