

漁川ダムにおけるカビ臭発生の 原因究明と対策について

RESEARCH ON PREVENTION MEASURE FOR MUSTY ODOR IN THE IZARIGAWA DAM RESEVOIR

玉川 尊¹・村椿健治²・小倉和紀³・三俣晴由⁴

Takashi TAMAGAWA, Kenji MURATSUBAKI, Kazunori OGURA, Haruyoshi MITSUMATA

¹正会員 国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部漁川ダム管理所 (〒061-1400 北海道恵庭市漁平)

²³⁴非会員 国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部漁川ダム管理所 (〒061-1400 北海道恵庭市漁平)

The Izarigawa Dam has no specific source of contamination in its catchment area. However, musty odor generation has been noticeable since 1993, and consumers of the dam water requested urgent countermeasures. Investigations conducted since 2001 to determine the cause of musty odor have found that the characteristics of accretion sand in the dam reservoir caused the activation of actinomycetes, and the musty odor was caused by geosmin released from their fungus bodies that had died after reaching the deep anaerobic part of the dam site. Full-scale countermeasures to prevent musty odor commenced in 2003. The accretion sand which caused the musty odor generation was excavated and removed, and a lake water circulation system was introduced to make the deep part of the dam site aerobic. The countermeasures were effective, resulting in a reduction in geosmin to below the level required to conform to water quality standards. This paper presents the achievements.

Key Words: musty odor, dam reservoir, characteristics of accretion sand in dam reservoir

1. はじめに

漁川ダムの集水域には特定の汚濁源がない。しかし、H5年より顕著にカビ臭が発生し、水道利用者より早急な対策が求められていた。そこでH13年よりカビ臭の発生の原因を究明した結果、ダム上流域から流出してくる土砂がダム貯水池内に堆積し、この土砂の棚上で放線菌が繁殖している。また、貯水池の深層部は嫌気化されており、好気性の放線菌はこの深層部に沈降すると希薄な酸素のため死滅する。その結果、菌体内に生成されたジェオスミンが水中に拡散し、これが漁川ダムのカビ臭発生のメカニズムであることを解明した。

カビ臭の防止対策として、放線菌の繁殖域となっている堆砂土を除去する必要がある。このためH13年より5ヶ年計画で堆砂掘削を実施している。一方、堆砂土の形状が要因でダムサイトの深層部に形成された嫌気層を改善する必要がある。そこで深層部に人為的に酸素を供給して好気化する方法として、間欠曝気による湖水循環装置の導入を検討した。これらの検討結果よりカビ臭の高い改善効果が期待できることが判明した。

以上の防止対策を踏まえてH15年より本格的な改善事業を実施した結果、漁川ダムで初めてカビ臭の発生を抑

止することが可能となった。

本論文は漁川ダムにおけるカビ臭の原因究明から防止策に至る検討の結果と、防止対策の実施効果における検証の成果について報告する。

2. 漁川ダムの概要

漁川は千歳川最大の支流であり、流路延長は46.8km、流域面積113.3km²、湛水面積1.1km²である。

漁川ダムは、千歳川水域総合計画の一環として恵庭市漁平に昭和55年に完成した多目的ダ

ムであり、堤高45.50m、堤頂長270.0m、総貯水量15,300千m³のロックフィルダムである。図-1に位置図を示す。

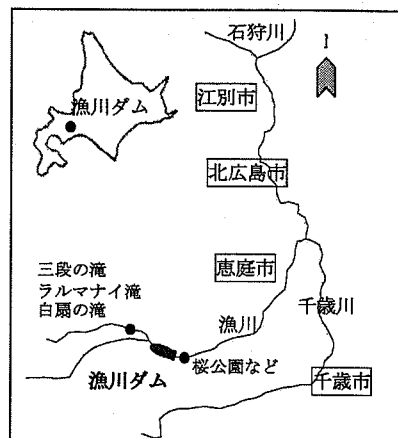


図-1 漁川ダムの位置図

3. カビ臭発生の原因究明¹⁾

(1)カビ臭物質の特定

一般にカビ臭物質には 2MIB(2-メチルイソボルネオール)とジェオスミンの2種類がある。漁川ダムの発生物質は調査の結果、ジェオスミンであることが判明した。図-2 に化学構造式を示す。

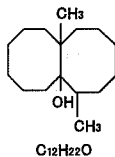


图-2 化学构造式

ジェオスミンを生成能とするのは藻類か放線菌である。しかし、ダム貯水池内では自然界からの栄養塩類程度のため藻類の発生は少ない。また、ジェオスミン濃度に比べて2MIB 濃度が希薄なため放線菌によるカビ臭と推定された。

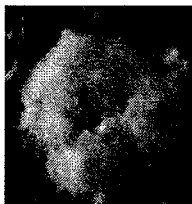


圖-3 放線菌

放線菌はペニシリンなどの抗生物質として広く知られており、自然界では土壌細菌としてどこにでも存在する。図-3 にコロニー状の放線菌を示す。

(2) 道内主要ダムとの比較

漁川ダムが、高濃度の放線菌によってカビ臭物質を発生させているのであれば理解しやすい。しかし、図-4 に示すように道内ダムのカビ臭調査から比較した結果から、漁川ダムの放線菌が顕著に高い値を示してはいなかった。

このため、カビ臭発生の要因をダム貯水池内の特異性に起因しているものと考え、長年堆砂量が増加している堆砂土の形状に着目した調査を行った。

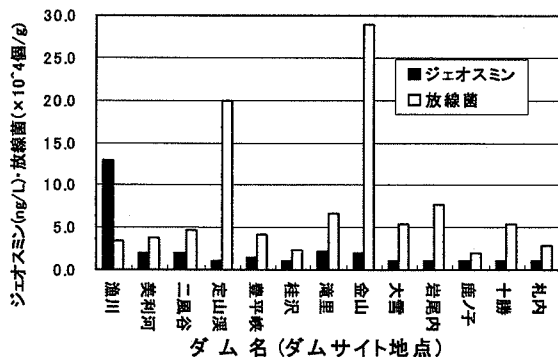


図-4 道内ダムのカビ臭調査

(3)貯水池内の現況

漁川ダムは完成の翌年、S56 年 8 月洪水で計画堆砂量 120 万 m^3 の 30%に相当する約 36 万 m^3 が堆積した。その後、毎年 3 万 m^3 程度の流入があり、H13年の累積堆砂量は約 87 万 m^3 に達している。図-5 に堆砂量の経年変化を示す。

漁川ダムの堆砂形状の特性は、テラス状の堆砂棚が縦断的に不連続な形状で発達し、棚と制限水位(161m)との水深差は2～3m となっている。さらに、堆砂棚の下流端からダムサイトまでは13～15mの深度が続くため水循環が鈍く、嫌気層を形成している。図-6に貯水池の縦断形状を示す。

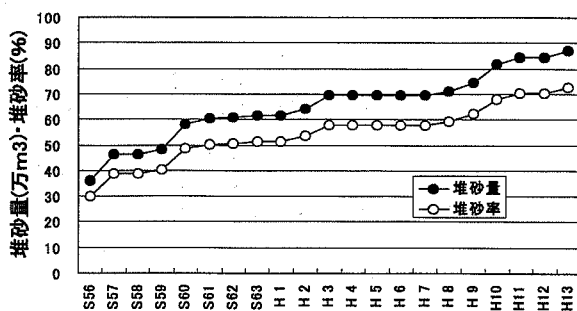


図-5 堆砂量の経年変化

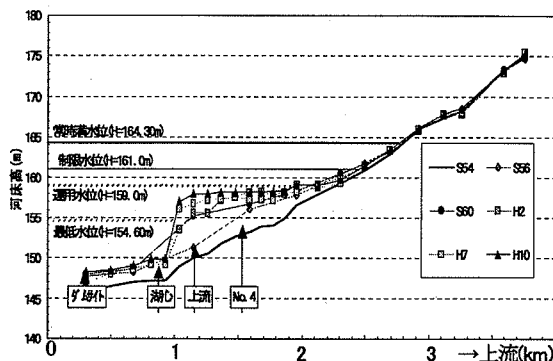


図-6 貯水池の縦断形状

(4)カビ臭発生メカニズム

カビ臭発生の要因をダムの堆砂状況に着目して調査した結果、棚上に放線菌が高濃度で分布していた。また、貯水池の最深部であるダムサイト底層の DO を融雪期から降雪期まで観測した結果、融雪出水後の5月中旬から9月中旬にかけて顕著な低下が見られた。図-7 にダムサイト底層の DO 変化を示す。

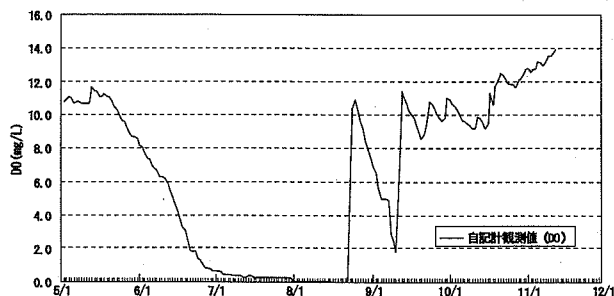


図-7 ダムサイト底層の DO 変化

これらの要因から漁川ダムのカビ臭発生メカニズムは次のように推定された。

- ①ダム上流部より流入してきた放線菌が、堆積土砂の棚上の浅水部で日光により水温が上昇しているため活性化して増殖する。
- ②増殖された放線菌は移流して、嫌気化された深水層に沈降して死滅する。
- ③放線菌は体内にジェオスミンを生成しており、死滅によって細胞内部から放出されて貯留水に拡散される。
- ④拡散されたジェオスミンは、ダム下流の水道施設を通じて供給され利水者の苦情を招く。

以上の結果から、発生メカニズムを図-8の模式図で

示す。

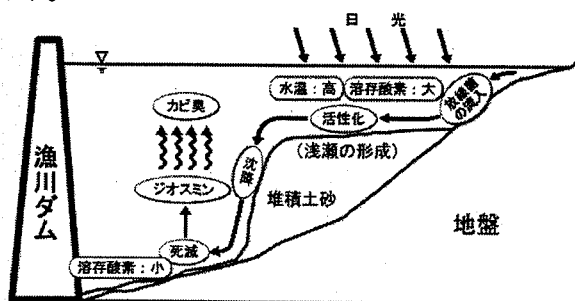


図-8 カビ臭発生の模式図

4. カビ臭の防止対策の検討²⁾

(1)堆積土の掘削除去対策

カビ臭発生のメカニズムを踏まえ、カビ臭発生の防止対策として第1に検討する項目は、放線菌が活性化し繁殖域となっている堆積土の掘削除去である。

この効果は放線菌の繁殖域を広範囲に除去するため生態能力が低下する。また、土砂の除去により流入河川水と湖水の混合促進が図られ、貯水池最深部の好気化と希釈効果を高めることができる。さらに、掘削によって河床横断の勾配が緩やかになるため、河床面の土粒子が流出しにくくなり懸濁粒子に着生する放線菌の下流移動を抑制する効果もある。

(2)湖水循環装置の導入

貯水池深層部の嫌気層を改善するため、人為的に溶存酸素を供給して好気化を図る必要がある。この手段として間欠曝気型の湖水循環装置の導入を検討した。

この装置の曝気作用により、深層部の酸素改善が行われると伴に、間欠動作が湖水全体の循環機能を果たす。また、平行して検討されている堆砂掘削によって、流入河川水との混合・希釈の促進を図ることができる。

以上のカビ臭の防止対策を図-9の模式図に示す。

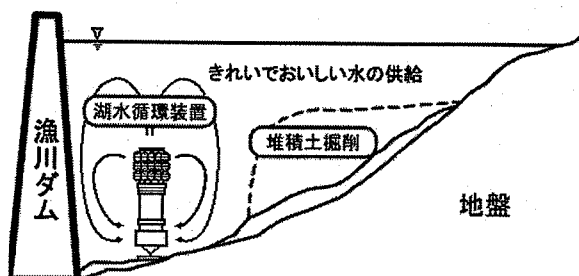


図-9 カビ臭防止対策の模式図

5. 防止対策における水質改善効果の予測

(1)水質の目標値の設定

貯水池のカビ臭発生期間におけるジオスミンとDOの関係を図-10に示す。DOの変動が4～6mg/L

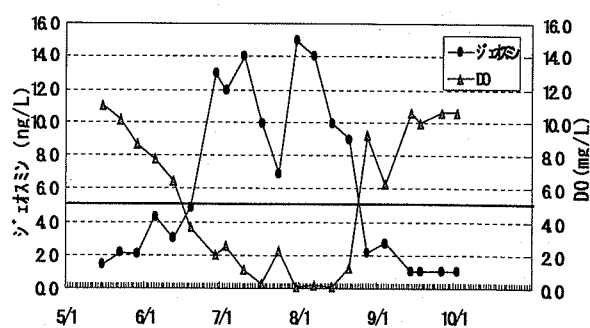


図-10 ジオスミンとDOの関係

に低下した時、ジオスミンが急激に上昇し、この時の濃度は4～6ng/Lであった。このジオスミンの濃度は、利水者から苦情が起きた時に水道供給機関が測定した最小濃度と同程度であった。

従って、ジオスミン5ng/L以下をカビ臭の改善目標値とし、貯水池内の好気化に必要なDOを5mg/L以上に保つことが防止対策の目標値として設定した。

(2)鉛直二次元生態系モデル構造

貯水池水質予測モデルは、図-11に示すように流下方向に100m間隔、鉛直方向に1m間隔で分割した二次元貯水池形状モデルを基に水理・水温の解析、および富栄養化解析を行う鉛直二次元生態系モデルを基礎モデルとした。これに、新たに放線菌の増殖、ジオスミンの放出過程を考慮した仮定を追加し、放線菌とジオスミンの放出量の解析を行った。

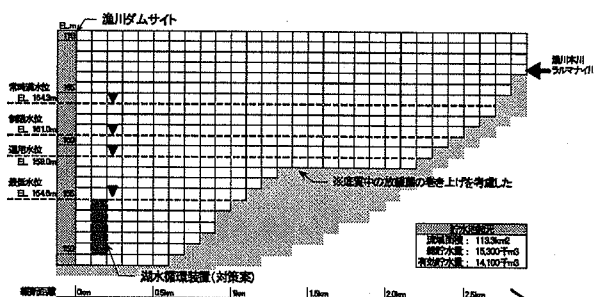


図-11 鉛直二次元地形モデルのイメージ

(3)堆砂掘削による効果予測

表-1に年別の堆砂掘削量を示す。H16年は計画でこれを合計すると約46万m³となり、堆砂の除去率は52%に達する。図-12に貯水池内の放線菌の濃度分布と年別の堆砂掘削の範囲を示す。

表-1 年次別堆砂掘削量

	掘削量			全堆砂量
	V(m ³)	S(m ²)	h(m)	m ³
H13	34,500	24,019	1.4	872,500
H14	118,700	43,563	2.7	
H15	214,900	84,344	2.5	
H16	91,400	68,982	1.3	
計	459,500	220,908	2.1	除去率 52%

この図から年別の堆砂掘削範囲に分布する放線菌数を算出し

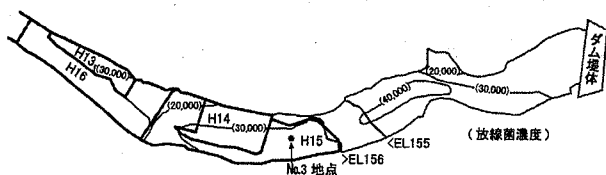


図-12 放線菌の濃度分布と年別の掘削範囲
たのが表-2である。この表から放線菌の除去率は約43%と推定される。

前述の予測モデルを用いて堆砂掘削によってDO及びジェオスミンの変化を推定した一例が図-13である。

DOは中層のEL.154～151で最も高い効果を示し、その濃度は1.2～1.9mg/Lの上昇値となった。同様にジェオスミンの濃度は2.4～5.5ng/Lの低下を示している。

表-2 放線菌の除去率

	放線菌数(×10 ⁶ 個)	
	掘削区間内	全域内
H13	0.108	3.096
H14	0.299	
H15	0.615	
H16	0.311	
計	1.333	除去率 43%

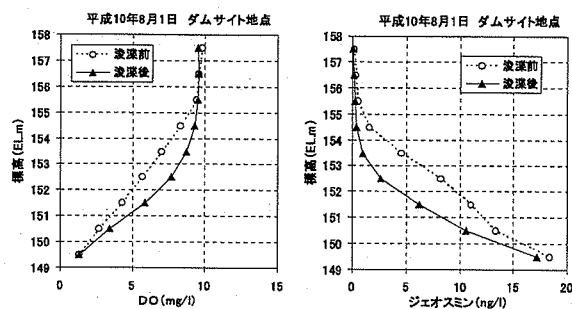


図-13 堆砂掘削によるDO、ジェオスミンの濃度

(4)湖水循環装置による効果予測

ジェオスミンの改善目標値5ng/L以下を得るため、次の2ケースの設定条件で予測を行った。

【ケース1】運転：5mg/L<DO>8mg/L：停止

【ケース2】運転：8mg/L<DO>9mg/L：停止

図-14にダムサイト底層での水質変化を示す。

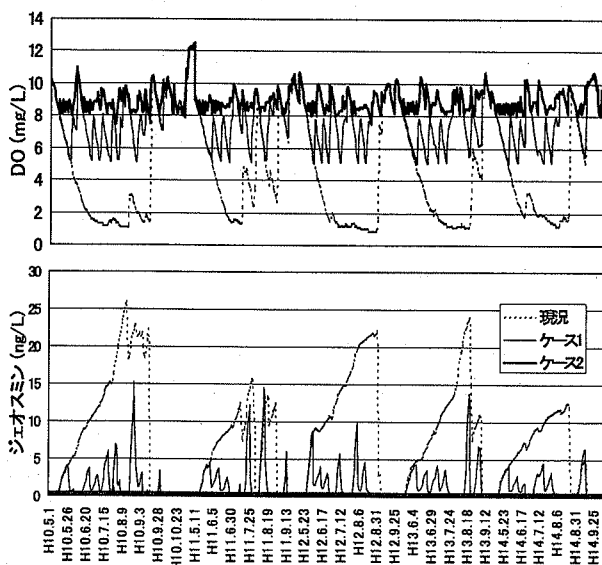


図-14 湖水循環装置による水質変化

また、表-3に予測濃度と改善率を示す。ケース1では、DOが7.2mg/Lに上昇し、ジェオスミンは2.0ng/Lまで減少する。ケース2ではDOの改善率が70.1%でジェオスミンは0.0ng/Lとなった。これはDOが8mg/L以上では放線菌の増殖は有っても死滅傾向が鈍化してジェオスミンの放出を抑制するためと考えられる。

表-3 予測濃度と改善率

	(単位)	現況	ケース1	ケース2
	(mg/L)	2.6	7.2	8.9
DO	改善率(%)		61.7	70.1
ジェオスミン	(ng/L)	11.4	2.0	0.0
	改善率(%)		75.5	100.0

(5)堆砂掘削と湖水循環装置の併用による効果予測

漁川ダムでは、堆砂掘削と湖水循環装置の併用による防止対策を検討した。そこで堆砂掘削による場合と湖水循環装置を併用した場合における水質シミュレーションを行ってみた。図-15にダムサイト地点の全層における水質変化を示す。

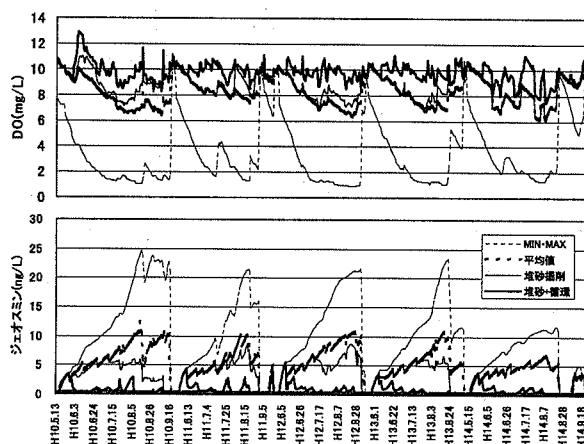


図-15 堆砂掘削と湖水循環装置による水質変化

表-4に予測結果の水質濃度と改善率等を示す。

表-4 堆砂掘削と湖水循環装置による予測結果

水質項目		既往データ		堆砂掘削		堆砂+循環	
		日数	MIN	改善率	濃度	改善率	濃度
		n	mg/L	%	mg/L	%	mg/L
溶存酸素(DO)	H10	132	2.9	8.1	13.7	9.1	24.7
	H11	116	4.3	8.7	7.0	9.2	16.6
	H12	102	2.8	7.9	8.5	8.4	25.1
	H13	110	3.3	8.3	8.6	8.8	23.6
	H14	137	4.2	8.3	1.5	8.4	15.8
	平均	119	3.5	8.3	7.9	8.8	21.1
ジェオスミン	H10	124	24.8	6.6	35.3	3.9	82.1
	H11	96	21.6	5.4	26.3	4.5	77.8
	H12	96	21.7	6.9	34.4	5.3	84.2
	H13	102	23.5	5.7	50.6	4.1	83.7
	H14	117	11.1	4.3	12.9	4.3	74.4
	平均	124	24.8	5.8	31.9	4.4	80.4

DOの改善率は堆砂掘削で約8%(0.5mg/L)、併用では約21%(1.6mg/L)であった。また、ジェオスミンの改善率は堆砂掘削で約32%(1.4ng/L)、併用で約80%(4.7ng/L)であった。

この結果、ジェオスミンの改善目標値である5ng/L以下の達成が可能となった。

6. 防止対策の実施とその効果の検証 ³⁾⁴⁾⁵⁾

(1)カビ臭濃度の簡易予測方法

カビ臭発生が6月から9月に起きていることから当該年の発生濃度を事前に簡易予測する方法を検討した。

パラメーターは、諸文献 ⁶⁾より放線菌が懸濁性粒子等に着生して繁殖する。そこで、ジェオスミン 10ng/L 以上の発生年の懸濁物質に関与する融雪出水前後の水文データを用いて重回帰分析を行った結果、次式が得られた。

$$C=3.63+1.45 X_1+2.54X_2+0.12X_3-0.80X_4$$

C：ジェオスミン濃度(ng/L)

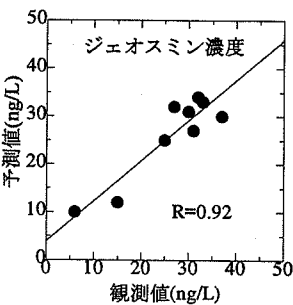
X₁：5月の流入量 12m³/s を超過した日の平均流入量 (m³/s)

X₂：5月上旬の日最低気温の平均値(℃)

X₃：5月上旬の堆砂土中央地点の平均水深(m)

X₄：4・5月の放流量(百万 m³)

この式を用いてカビ臭が顕著であったH5年以降のジェオスミンの観測値と予測値を比較したものを図-16に示す。



(2) H15年の予測結果

この式から H15 年の予測値を算出した結果、ジェオスミン濃度は 28ng/L 程度と予想された。この予測値は H5 年をやや下回る濃度であった。図-17 にその結果を示す。

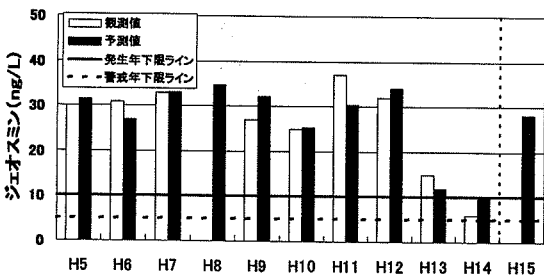


図-17 カビ臭発生の簡易予測結果

(3)湖水循環装置の稼働状況と水質結果

a)稼働状況

H15 年 6 月に湖水循環装置を設置した。表-5 にその稼働状況を示す。

表-5 湖水循環装置の稼働状況

回	開始	停止
①	6/3(15:00)	6/4(13:00)
②	6/13(9:00)	6/13(14:00)
③	6/23(13:40)	7/4(16:10)
④	7/14(14:30)	7/24(16:30)
⑤	8/20(16:00)	9/16(9:00)

①は設置の動作確認、②は装置の安定性確認のための試運転。従って試験運用の実稼働は③からとなっている。③の稼働条件はジェオスミン濃度が 5 ng/L に上

昇したため稼働した。④は DO が 5 mg/L を下回ると予想されたため。⑤は DO の低下が限界に達してから稼働させ、どれだけの稼働時間で貯水池内の水質の復元が図れるかを試みた。

b)水質結果

湖水循環装置の稼働によって底層のジェオスミン濃度の抑制効果について調査した結果を図-18 に示す。

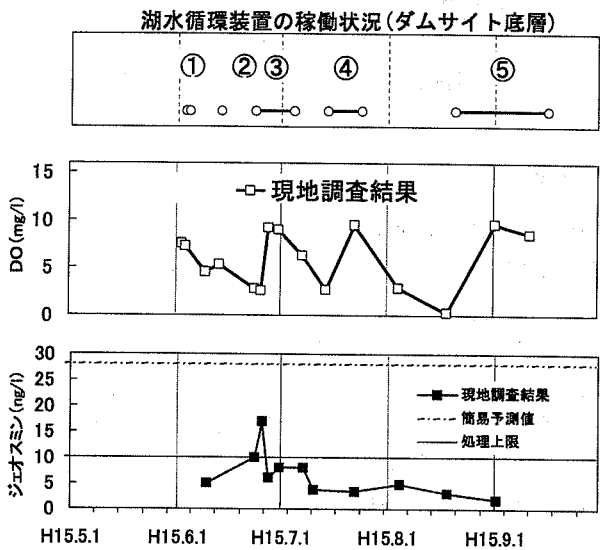


図-18 湖水循環装置による水質変化

図-19 に③の稼働による水質日変化の一例を示す。

DO は稼働 2 日目まで微増であったが、4 日目で表層の濃度に回復した。また、ジェオスミンは 2 日目に一時上昇したが、4 日目から回復されている。

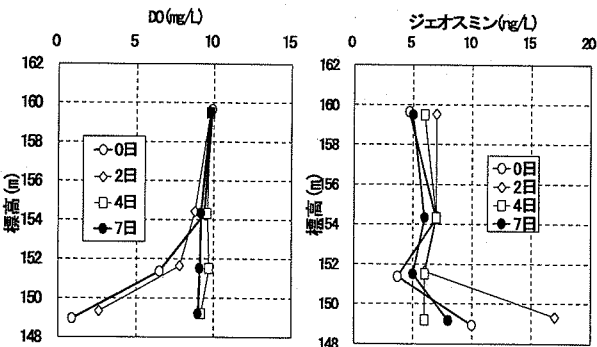


図-19 水質の日変化

c)水道用水への影響について

湖水循環装置によって貯水池内の放線菌の死滅が抑制されジェオスミンの発生が減少することが図-18 によって検証された。

しかし、貯水池からの放流水に残存する放線菌が下流の水道施設に取水された後、浄水処理過程でジェオスミンを発生する可能性が懸念された。この影響を検討するため、水道原水のジェオスミン濃度 ⁸⁾を調査した結果が図-20 である。図中には、既往のデータを参考に加えて比較している。

調査結果から水道原水のジェオスミンは既往濃度より低い 3ng/L 以下のレベルで推移していた。

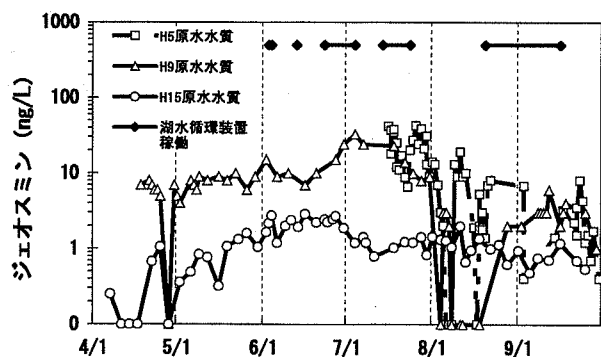


図-20 水道原水のジェオスミン濃度

7. 考察

特定の汚濁源を有しない漁川ダムのカビ臭の発生原因が、短期間で堆積した流入土砂により放線菌が活性化したことであると判明した。

カビ臭の防止対策における堆砂掘削と湖水循環装置の改善効果を水質予測した結果、堆砂掘削では、ダムサイトの底層まで及ばないが中層で DO の上昇効果があり、ジェオスミンの改善率は約 32%を示した。また、堆砂掘削による対策は、副次的な効果として有効貯水量の回復に寄与している。

堆砂掘削と湖水循環装置を併用した効果では、ダムサイトの嫌気層を破壊して好気状態に変え、DO 濃度は 3.5mg/L(MIN)から 9.9mg/L まで改善されることが解った。この DO の改善効果によりジェオスミン濃度が 24.8ng/L(MAX)から 1.1ng/L まで抑制できる。この濃度は防止対策の目標値であった 5ng/L 以下を十分クリアできるものであった。

ジェオスミンの簡易予測法を見出したが、パラメータの根拠が現時点で明確ではない。しかし、予測値と観測値には高い相関があるため勘弁な予測法の一つとして便利な方法である。

湖水循環装置の試験運用では、稼働が 10 日間程度の場合は、装置停止後に DO の低下が起きている。しかし、26 日間の連続稼働では回復した DO が 1 週間以上も持続されることが解った。この効果は湖水循環装置の運用にあたって考慮すべき条件である。

湖水循環装置の実施効果は、ジェオスミン濃度が一時的に上昇するもののそれ以後は 5 ng/L 以下で推移していた。このレベルは貯水池としての水質基準がないが、平成 16 年 4 月 1 日より施行される水道基準値である 10ng/L 以下を十分満足するレベルであった。

ジェオスミンの一時上昇の理由は、底層上部の浮泥に付着していた放線菌の分解によってジェオスミンが浮泥中の間隙水に溶出したものが湖水循環装置により巻き上げられたものと思われる。

水道用水への影響調査では、浄水処理過程の前段に位置する水道原水で、ジェオスミン濃度が減少しているため施設への影響はないことが判明した。

8. あとがき

漁川ダムは近隣市町村の水道水源となっている。平成 5 年からカビ臭が顕著に発生したため、特にダム下流の恵庭市は他に水源を持たないため、漁川ダムが唯一の生活用水であるとの危機意識から国に水質保全の要請を行ってきた。また、市民団体等もダム湖を取り巻く環境保全活動を実践しており、国もこれらの後押しを受け平成 13 年より貯水池水質保全事業を本格的に着手した。

その結果、堆砂掘削対策の進捗とともに湖水循環装置の試験運用を平成 15 年 6 月から開始して以来、初めて漁川ダムでカビ臭の発生を防止することができた。

この効果の実績はまだ単年度のものであり、今後も継続した防止対策を実施して効果の向上を図って行く必要がある。しかし、土砂の流入はこれからも続くため根本的な対策が必要である。その間、放線菌の活性化が再燃することも懸念されるが、今回設置した湖水循環装置の能力が高いため、ある程度の負荷があっても効果が維持されるものと思われる。

謝辞：本報告にあたって石狩東部広域水道企業団のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 小森太一、稲澤豊、鈴木将：漁川ダムにおけるカビ臭発生原因の究明、第 46 回北海道開発局技術研究発表会概要(ダム・砂防部門)、調査計画、ダ-17、2003. 2
- 2) 鈴木将、稲澤豊、三田村宏二：漁川ダムのカビ臭の改善方法と防止対策、第 46 回北海道開発局技術研究発表会発表概要集(ダム・砂防部門)、調査計画、ダ-18、2003. 2
- 3) 小倉和紀、村椿健治、三俣晴由：漁川ダムにおけるカビ臭発生の防止対策とその効果について、第 47 回北海道開発局技術研究発表会概要(ダム・砂防部門)、調査計画、ダ-6、2004. 2
- 4) 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、平成 15 年度年次技術研究会(VII部門)、2004. 2
- 5) 小倉和紀、村椿健治、三俣晴由、玉川尊：漁川ダムにおけるカビ臭の防止対策と水質改善効果について、第 38 回日本水環境学会年会講演集、p249、2004. 3
- 6) 「異臭味水対策の指針」；1979. 12 日本水道協会
- 7) 「生物起因の異臭味水対策の指針」；1999. 5 日本水道協会
- 8) 石狩東部広域水道企業団：水質測定記録より
(2004. 4. 7 受付)