

ダム貯水池での水環境の変遷によるカビ臭発生について

Research occurrence of the musty odor water environment change in the Dam Reservoir

(株) 福田水文センター 正員 ○杉原 幸樹 (Kouki Sugihara)
(独) 北海道開発土木研究所 正員 高田 賢一 (Ken-ichi Takada)

1. まえがき

ダム貯水池の水環境は上流域からの土砂流入、気象・水理条件により大きく影響を受ける場合がある。北海道恵庭市に位置する漁川ダムは1980年に完成した多目的ダムで、洪水調節と上水道の水源、下流へ安定した流量の供給を目的としている。このダムでは、1993年夏以降毎年のようにカビ臭が発生している。このカビ臭は調査の結果、放線菌からのジェオスミン放出によるものと推定された。

また、ダム貯水池内では年々堆砂が進行し、図-1のように棚状に堆積している現状にあり、2001年末には91万2千m³の土砂がダム湖内に堆積している。

本研究では、鉛直二次元モデル(中津川ら¹⁾)を漁川ダムに適用したモデルをさらに改良し、放線菌の特性及びライフサイクルを考慮したモデルを構築した。このモデルのパラメータ設定のためにカビ臭発生試験を実施した結果とモデルを利用した水質変化シミュレーションを行ったので、その結果を報告する。

2. 水質再現計算について

本研究では、建設省土木研究所²⁾で開発された貯水池鉛直二次元モデルを漁川ダム貯水池に適用した。このモデルは図-2のように貯水池内を鉛直・流下方向に分割し、その分割したボックス内の水理・水質を計算する。運動方程式を(1)、(2)式、連続式を(3)式に示す。

$$X \text{ 方向 } \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{mx} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{mz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$Y \text{ 方向 } \frac{\partial P}{\partial y} = -\rho g \text{ または } \int_y^y \rho g dy \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

ここで、 ρ_0 : 基準密度 (1,000kg/m³)、 P : 水圧 (kg/ms²)、 D_{mx} : 流下方向の運動量拡散係数 (m²/s)、 D_{mz} : 鉛直方向の運動量拡散係数 (m²/s)、 ρ : 流水密度 (kg/m³)、 g : 重力加速度 (9.8m/s²)。x, z はそれぞれ流下方向、鉛直方向の座標 (m)、u, v は流下方向、鉛直方向の流速をさす。

次に、水温の式は以下の通りである。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{Tx} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{Tz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \phi \quad (4)$$

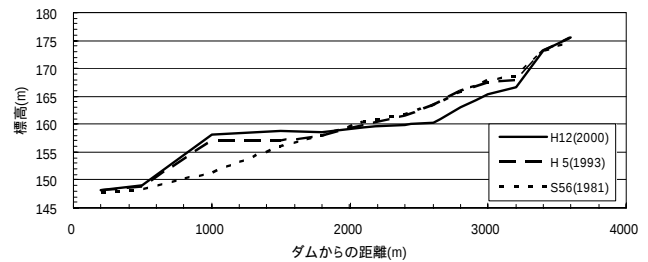


図-1 漁川ダム貯水池縦断形状の経年変化

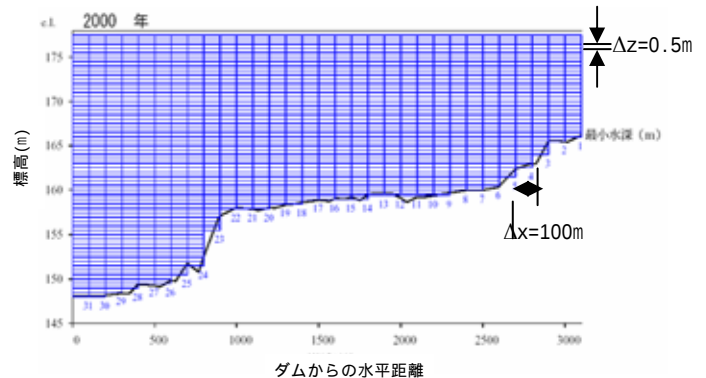


図-2 ボックス模式図

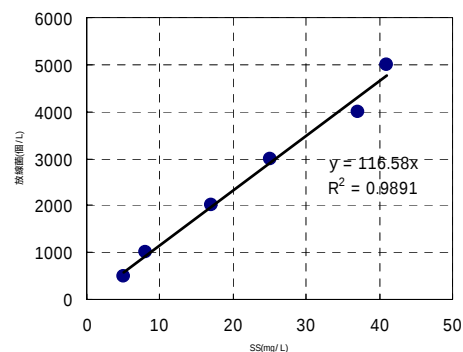


図-3 放線菌量とSSとの関係

SSの基礎式は以下の通りである。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + (v + v_0) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{cx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{cz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (5)$$

ここで、 v_0 : 懸濁粒子の平均沈降速度 (m/s)、 D_{cx} : 流下方向の運動量拡散係数 (m²/s)、 D_{cz} : 鉛直方向の運動量拡散係数 (m²/s)、 ρ : 流水密度 (kg/m³)、 g : 重力加速度 (9.8m/s²)。

以上の貯水池流動、水温、濁質のモデルに加え下記に示す水質モデルの適用を図る。

$$\frac{\partial X}{\partial t} + u \frac{\partial X}{\partial x} + v \frac{\partial X}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial X}{\partial y} \right) + G(X) + S(X) \quad (6)$$

ここで、 X : 水質項目(DO, COD, 放線菌, ジェオスミン)、 A_x , A_y : 水平方向、鉛直方向の拡散係数(m^2/s)、 G : 沈降項、 S : 生産・消費項(生物・化学的变化項)である。

中津川ら¹⁾は、昨年度漁川ダムにおいて上記のモデルを適用し、流動と水温が堆砂前後において大きな差異があることを指摘している。本研究では、さらに定量化した水質項目を同じモデルに組み入れ、カビ臭発臭モデルの構築を目指し、以下の生産消費項を想定した。

$$S(HOU) = G_H \cdot [HO] - D_H \cdot [HO] \quad (7)$$

$$G_H = f(T_w, COD, DO) \quad (8)$$

$$D_H = f(DO) \quad (9)$$

ここで、 $S(HOU)$: 放線菌生産消費速度(個/L/day)、 G_H : 放線菌の増殖関数(1/day)、 D_H : 放線菌の死滅関数(1/day)、 $[HO]$: 放線菌量(個/L)、 T_w : 水温()である。

なお、放線菌の移流拡散項はSSの移流拡散と同じとしているため省略している。以上がカビ臭発臭モデルの構築に必要なパラメータである。後述するカビ臭試験により、各パラメータの数量を定量化した。この放線菌量の評価については次項で述べる放線菌の初期培養の結果、下記の式でSS濃度の物質質量に換算できることがわかった。

$$[HO] = 116.58 \times SS \quad (10)$$

ここで、 $[HO]$: 放線菌量(個/L)、 SS : SS濃度(mg/L)。

次に、放線菌の培養条件におけるジェオスミン生成量の式は以下の通りとなる。このパラメータを求める試験は3.2.3 放線菌の死滅・分解試験で定量化した。

$$S(C_G) = (B(HOG) \times 0.1 + B(HOD) \times 0.9) / V - \mu_B C_G \quad (11)$$

$$\text{ただし、} B(HOG) = \mu_S \cdot S_G [HO_S] / 10,000 \quad (12)$$

$$B(HOD) = f(DO, SS) \quad (13)$$

ここで、 $S(C_G)$: ジェオスミン生産消費速度(ng/L/day)、 $B(HOG)$: 増殖した放線菌のジェオスミン生成関数(ng/day)、 $B(HOD)$: 死滅した放線菌のジェオスミン生成関数(ng/day)、 V : ボックス容積(m^3)、 μ_B : ジェオスミンの分解速度(1/day)、 C_G : ジェオスミン濃度(ng/L)である。 μ_S : カビ臭物質生成速度(1/day)、 S_G : 放線菌1万個当りジェオスミン生成量(ng/個)、 HO_S : 放線菌数(個)とする。なお、 $B(HOD)$ は嫌気条件下で放出するジェオスミン量と、流入する放線菌を見積もるために(10)式の関係からSSが嫌気条件下に入ったときに一方的に放線菌が死滅するものと仮定した。このうち、ジェオスミン生成量については3.2.4. カビ臭物質の生成速度及び生成量試験により定量化を行った。また、ジェオスミンの分解速度については、ダム管理所³⁾で

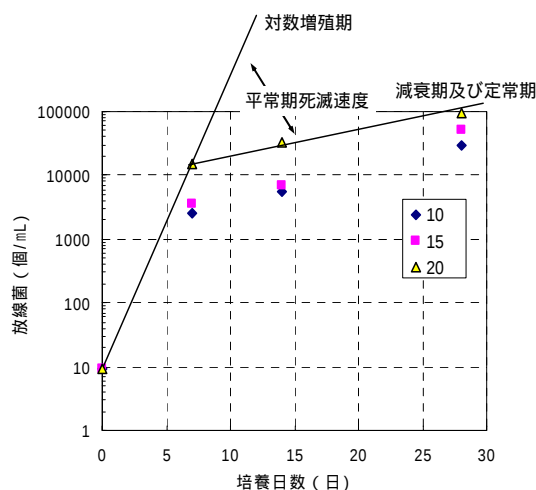


図-4 平常期死滅速度の考え方

表-1 放線菌の増殖速度と死滅速度

温度条件	比増殖速度 (1/d)	死滅速度 (1/d)
1 0	0.787	0.693
1 5	0.915	0.731
2 0	1.019	0.947

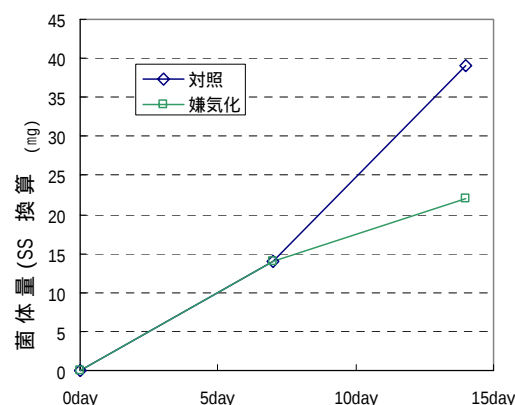


図-5 嫌気化による放線菌量変化

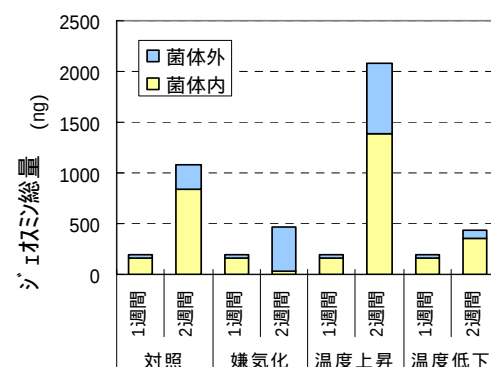


図-6 ジェオスミン生成量変化図

行った試験の結果に基づき、下記の式に示した。

$$\mu_B = 0.0051T^{1.7535} \quad (14)$$

ここで、 μ_B : ジェオスミン分解速度(1/day)、 T : 水温()である。

3. カビ臭発生試験について

3.1 概要

漁川ダム底泥から分離される放線菌を対象に、モデル構築に必要なパラメータを得るため、カビ臭発生試験を実施した。この試験で使用した放線菌はダムサイト・湖心・上流の計3地点、各地点の各2~4試料ずつを底泥から採取・培養し、カビ臭発生に関する各種試験を実施した。

3.2 結果

3.2.1 放線菌の初期培養

まず始めに、官能試験を実施し、各地点で最も発臭能が高い放線菌株を選定し、試験に使用する放線菌株の培養を行った。官能試験の結果、ダムサイトから採取した放線菌株に高い発臭能が確認された。この初期培養試験において、図-2に示すようにSSとの相関が良く、放線菌量をSSで換算できることを確認し、モデルの中で適用した。

3.2.2 放線菌の増殖速度試験

次に、前項で高い発臭能が確認されたダムサイトの放線菌株を用いて放線菌の増殖速度の把握を行った。ここでは、温度条件3条件(10、15、20)を加味した増殖速度試験を実施した。図-3に経時的な放線菌量の変化を示すが、いずれの水温条件においても培養初期(0~7日目)に対数増殖が見られる。そのため、比増殖速度は対数増殖期を対象に算出する。この比増殖速度を表-1に示すが、水温が高いほど比増殖速度が高くなっており、放線菌の増殖は温度に依存することが分かった。

以上の試験から、放線菌の増殖速度については、以下の式で表される。

$$\mu = 0.334 \cdot W_t^{0.3723} \quad (15)$$

ただし、 $0 \leq W_t \leq 30$

ここで、 μ :放線菌の比増殖速度(1/day)
 W_t :水温(°C)

3.2.3 放線菌の死滅・分解試験

次に、対数増殖期にある放線菌を対象として、培養途中で条件を変更し、放線菌の死滅・分解を生じやすい条件を特定した。前項の増殖速度試験で明らかにした放線菌の最も増殖に適した条件を選定し、対数増殖期に到るまで静置培養を行い、対数増殖期に到った時点で培養条件(DO, 温度)を変更した。この死滅速度は、平常期(好気条件下)では図-4に示す対数増殖期から定常期及び減衰期に到る増殖速度の差から求めた。また、嫌気条件下については本試験結果から推定した。

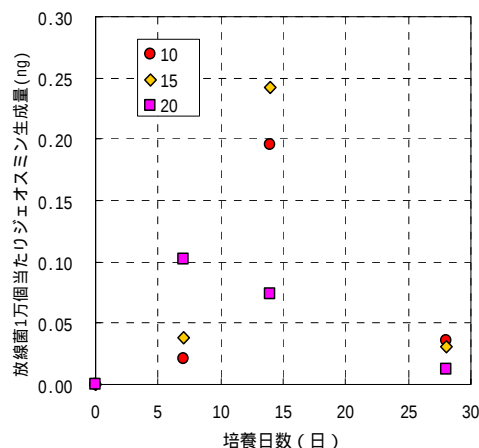


図-7 放線菌1万個当りのジェオスミン生成量

その結果、好気条件下で実施した死滅速度は表-1のようになり、増殖速度試験と同様に水温が高くなるほど死滅速度が大きくなることが認められた。

次に、嫌気条件下で実施した試験は、20°Cの条件下で実施し、SS濃度に換算した放線菌量の変化は、図-5のようにほぼ一定の直線上にあることがわかる。このことから、嫌気条件下における死滅速度として0.954を得た。なお、モデル上では増殖速度を0とし、温度条件に関わらず一律に死滅速度として0.954を与え、一方的に放線菌の死滅が進行するものとして仮定した。

以上の試験から、放線菌の死滅速度については次の式で表される。

$$\text{好気条件下} \quad \mu_d = 0.025W_t + 0.409 \quad (16)$$

$$\text{嫌気条件下} \quad \mu_d = 0.954 \quad (17)$$

ただし、好気条件下では、 $0 \leq W_t \leq 30$

嫌気条件下では温度にかかわらず一定

ここで、 μ_d :放線菌の死滅速度(1/day)

W_t :水温(°C)

各培養条件におけるジェオスミン生成量を図-6に示す。まず、対照試料では2週間目の菌体内ジェオスミンは全生成量の約8割が菌体内に保持されている。次に、温度条件下では温度を25°Cに上昇させた場合、放線菌量が増加していることもあり、2週間目にはジェオスミン量が菌体内には1,387ng、菌体外には688ngのジェオスミンが確認された。逆に10°Cに温度を低下させた場合、2週間目には菌体内に352ng、菌体外に80ngのジェオスミンが確認され、放線菌の活動が温度に依存しており、ジェオスミンの生産量もそれに対応していることが分かる。しかし、2週間後に嫌気化させた試料では菌体内に保持されているジェオスミン量はわずか1割に過ぎず、急激なDO濃度の低下が菌体の死滅・分解を促進し、ジェオスミンが菌体外に多量に放出していることを示唆している。

この試験結果より、放線菌は好気条件下では10%程度、嫌気条件下では90%程度を菌体外に放出していることが分かった。このことから、(11)式に示したジェオスミンの放出モデルも好気条件下と嫌気条件下の2条件を想定している。

3.2.4 カビ臭物質の生成量試験

最後に、カビ臭物質（ジェオスミン）の生成量試験を行った。ダムサイトの放線菌株によるジェオスミン生成量の経時変化は図-7のように得られており、10及び15では培養開始から14日目までは高い生成能を示しているのに対し、20の条件では培養開始から7日目以降は生成能が低下する傾向を示している。また、その生成量はいずれの温度条件においても指数関数的に増加していると判断できる。この試験を行った結果、ジェオスミンの初期生成量を0.001ngと仮定し、放線菌1万個当りのジェオスミン生成量は次式により、算出できる。

$$S_G = 0.001 e^{(0.3738 \ln(W_t) - 0.5089)T} \quad (18)$$

ただし、 W_t :5 W_t 30

ここで、 S_G :放線菌1万個当りジェオスミン生成量(ng/個)、 W_t :水温() T :経過日数(day)

4. ダム貯水池水質変化シミュレーション

4.1 概要

ここでは、中津川ら¹⁾が流動、水温について計算したプログラムを基に、今回はさらにD0とジェオスミンについて前項のカビ臭関連試験で得たパラメータを挿入し、日射量等を考慮した計算を行った。

ここでは、ダム完成直後の昭和56年測量断面と棚状地形が形成された後の平成12年測量断面を用いて、平成12年7月1日の日平均貯水位160.5m、流入量4.2m³/s、放流量5.5m³/s、気温23.0など同一の条件を設定し計算を行って比較を試みた。

4.2 堆砂前後の水質分布の変化

今回計算したD0、ジェオスミンの湖内挙動の結果について、堆砂前後の結果をそれぞれ図-8,9に示す。D0は堆砂前後いずれも躍層が発生していることが図から読み取れるが、堆砂面に沿った部分と湖底で堆砂前後を比較して大きな相違点が見られる。図-8左図の堆砂前では4~5mg/l前後の濃度が広がっているが、右図の堆砂後では2~3mg/lとほぼ無酸素状態に置き換わっている。

この堆砂後の低濃度のD0が広がっていることに対応して図-9のジェオスミンの発生範囲もほぼ重なっていることが分かる。このダム湖内で堆砂による棚状地形が形成されたことによって湖水の循環と水温に変化がみられ、底層の嫌気化とジェオスミンの発生を助長しているのではないかと中津川ら¹⁾が指摘している。また、小林ら⁴⁾は浅い水深の上流部で繁殖した放線菌は、急激に深くなったダムサイト付近で底層の嫌気化により死滅し、ジェオスミンが放出され、カビ臭の発生につながっていると推察しており、これらの見解とほぼ一致する結果を得ることが出来た。

5. あとがき

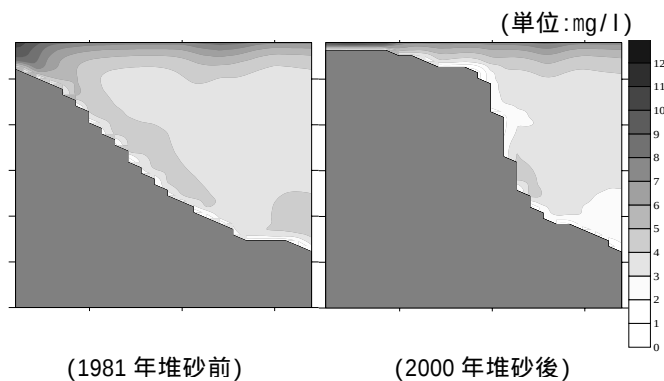


図-8 D0濃度の比較

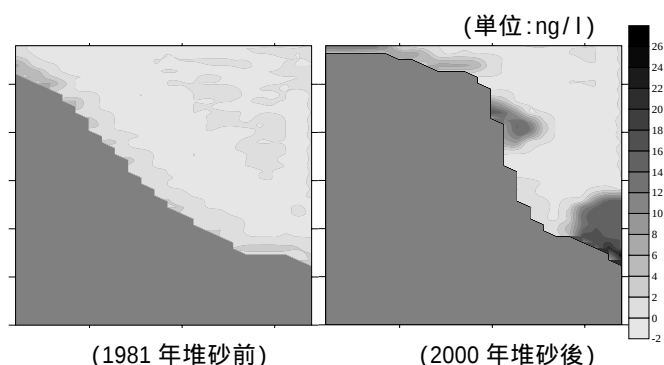


図-9 ジェオスミン濃度の比較

ダム貯水池上流に堆砂による棚状地形が形成されることにより、貯水池内の流動変化、水質分布に違いが出るのが既往調査で定性的に把握されてきた。

本研究では既往調査で得られたデータを基にシミュレーションを行い、堆砂前後で比較した結果、カビ臭発臭メカニズムが既往調査の推察と概ね一致していることがわかった。

今後、このモデルをさらに改良し、精度を高めることにより漁川ダムでの具体的なカビ臭抑制対策に役立てていきたい。

本研究の一部は平成16年度国土交通省北海道開発局受託研究費の補助を受けた。また、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。ここに併せて記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 中津川誠, 高田賢一, 矢挽哲也; 放線菌に由来するカビ臭発生要因の解析, 第38回日本水環境学会年會講演集, pp293, 2003. 3.
- 2) 建設省土木研究所ダム部水資源開発研究室; 貯水池の冷濁水ならびに富栄養化現象の数値モデル(その2), 土木研究所資料No. 443, 1987.
- 3) 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カビ臭調査検討業務報告書, 2002
- 4) 小林睦子, 鹿野愛, 橘治国, 益塚芳雄, 稲澤豊; 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.