

貯水池形状がカビ臭発生に及ぼす影響

Effects of reservoir shape on musty odor occurrence

杉原幸樹¹・中津川誠²・高田賢一³

Kouki SUGIHARA, Makoto NAKATUGAWA, Ken-ichi TAKADA

¹正会員 (株) 福田水文センター (〒001-0024 札幌市北区北24条西15丁目2-5)

²正会員 工博 (独) 北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

³正会員 (独) 北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

The Izari River Dam reservoir has a distinctively shaped bottom, and the Takisato Dam reservoir has a distinctively shaped shoreline. We conducted observations and two-dimensional vertical model simulations in order to (1) identify the effects of shape on flow regime, water temperature, and water quality components, (2) examine the behavior of ray fungi and blue-green algae, which cause musty odor, and (3) understand how odoriferous materials, geosmin and 2-methyl-isoborneol (2-MIB), are formed and released. For the Izari River Dam it was found that water flow toward the surface intake predominates when there were riffles at the upstream part of the reservoir (data of 2000); thus, vertical circulation was weaker when there were riffles than when there were not (data of 1981). This suggests that the release of geosmin involves stagnancy of flow, followed by formation of an anaerobic layer and then death of ray fungi. For Takisato Dam it was found that the increase of water temperature, the proliferation of blue-green algae and generation of 2-MIB are promoted in stagnant water areas at the upstream and downstream parts of the reservoir. The stagnant area forms because the water velocity decreases at the wider part of the reservoir and because the reservoir narrows and curves at the middle. By understanding the relationship between reservoir shape and water flow, a possible way of limiting the musty odor was found.

Key Words : Musty odor, geosmin, two-dimensional vertical model, Izari River Dam reservoir, Takisato Dam reservoir

1. はじめに

水道水の原水を供給している北海道の漁川ダムではカビ臭の発生が問題となっているが貯水池上流域に特定の汚濁源がなく、その発生機構や対策について解明が待たれていた。漁川ダム貯水池においては1993年頃から顕著にカビ臭が発生しはじめ、これまでの調査によると、湖内の富栄養化によるものではなく、堆砂によって棚状の地形が形成されたことで増殖した放線菌に起因するものと推察されている¹⁾。漁川ダムにおいては現在、調査結果に基づいて実施された対策事業によりカビ臭の発生が抑制されている²⁾。

一方、現在カビ臭の発生が問題となっている貯水池に同じく北海道の滝里ダムがある。滝里ダムにおいては2002年よりカビ臭が発生し、その原因は藍藻類の繁殖によるものと推定されている。滝里ダム貯水池の上流域には人為的な汚濁負荷源があって、それが水質悪化の原因と考えられるが、水域は極端に富栄養化しているわけで

はなく、貯水池のどのような要因がカビ臭発生を助長しているかを解明する必要がある。いずれのダム貯水池も下流地域の水源となっており、地域住民にとってはカビ臭の早期抑制が重要な課題である。

そこで本研究はカビ臭発生に影響する要因として貯水池の形状に注目し、観測結果とシミュレーションを通してカビ臭原因生物の増殖要因について検討を行ったものである。

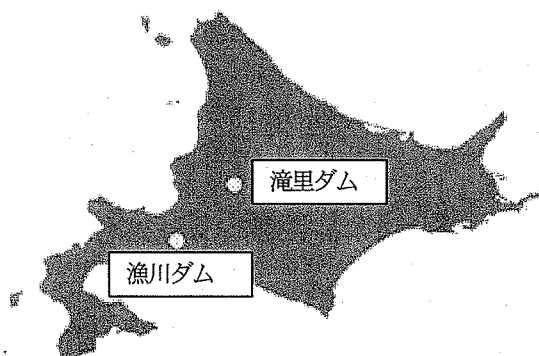


図-1 対象ダム位置図

2. 対象ダム

(1) 漁川ダム

図-1に本研究で対象とした漁川ダム、滝里ダムの位置図を示す。漁川ダムは恵庭市に位置し、流域面積113.3km²、湛水面積1.1km²であり、下流に恵庭市、北広島市、千歳市、江別市を有し、総貯水容量15,300千m³のロックフィルダムである。集水域はほぼ森林であり、特定の汚濁源は存在しない。しかし、図-2に示す最深河床の縦断形状のようにダム建設時の1981年とカビ臭発生が顕著であった1993年以降を比較すると堆砂により棚状の地形が形成されていることがわかる。また2000年河床形状において常時満水位と棚状との水深差は2~3mで、ダムサイトから約1km上流までの間で水深15m程に急激に変化しており、鉛直方向の河床形状に大きな特徴がある。

(2) 滝里ダム

一方、滝里ダムは芦別市に位置し、流域面積1,662km²、湛水面積6.8km²であり、下流に芦別市、赤平市、歌志内市、砂川市、滝川市を有し、総貯水容量108,000千m³の重力式コンクリートダムである。集水域は森林、農用地、住宅地であり、滝里ダムに流入する河川（空知川、富良野川）によりその割合が大きく異なっている。上流域に農用地が多い河川（富良野川）があるため、湖内の水質をみると富栄養化傾向にある。また図-3に滝里ダムの平面形状を示すが、湖心部は川幅が1,000mに達するが堤体に向かう途中に川幅が400mほどの狭窄部があり、さらに堤体付近で急激に屈曲する形状をしており、平面方向の河川形状に大きな特徴がある。

3. 貯水池シミュレーション

貯水池水質モデルは森北ら³⁾の鉛直2次元モデルをもとに地形形状やカビ臭発生機構を加味したモデルを作成した⁴⁾。モデルは図-4に示すように貯水池を分割し、各コントロールブロックにおいて差分計算を行った。

漁川ダムのシミュレーションでは流下方向に100m（図-4の Δx ）、鉛直方向に0.5m（図-4の Δz ）、川幅を10m~600m（図-4の B_{in} ）としたコントロールブロックを設定し、カビ臭発生を考慮したモデル（図-5）を各コントロールブロックに適用した⁴⁾。このときの計算項目は流速、水温、SS、DO、COD、放線菌数、ジェオスミン濃度とし、初期条件として2000年度定期水質調査でのダムサイトにおける実測値を水平方向に同一と仮定して与えている。流入量・放流量、気象条件は2000年度ダム運用月報の値を用い、流入濃度は $L-Q$ 式により与えた。計算期間は2000年7月1日から1週間とした。

滝里ダムのシミュレーションでは $\Delta x=200m$ 、 $\Delta z=1m$ 、 $B_{in}=10m\sim1100m$ のコントロールボックスを設定し、放流口の位置を考慮して計算を進めた（図-3中、発電放

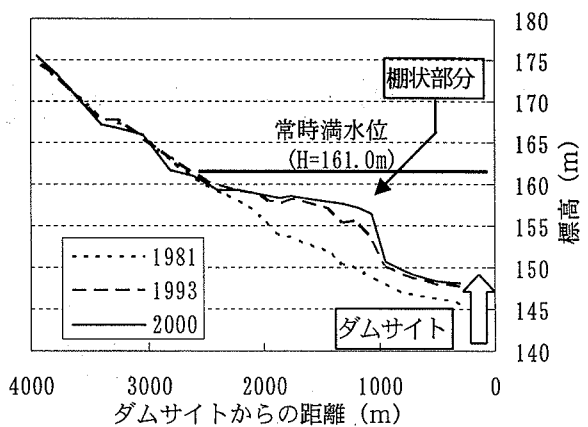


図-2 漁川ダム縦断形状

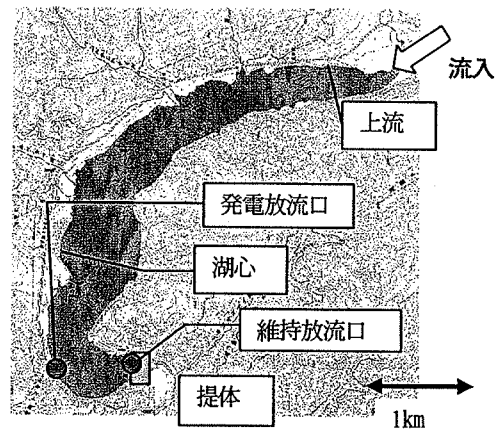


図-3 滝里ダム平面形状

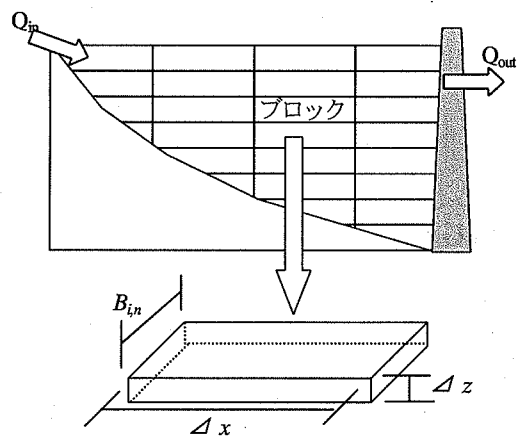


図-4 貯水池モデル概要

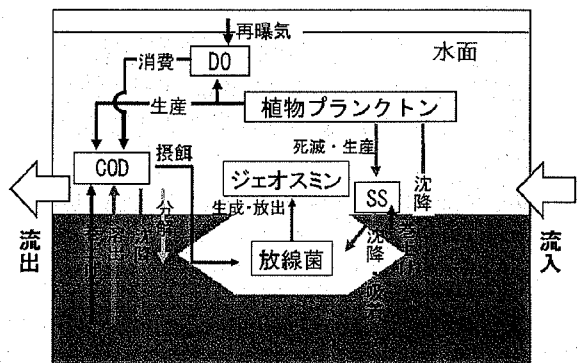


図-5 カビ臭発生モデル概要

流口、維持放流口の2箇所)。このとき計算項目は流速、水温、SSとし、計算期間は2004年9月8日から1週間とした。

4. 漁川ダムにおける考察

(1) ジェオスミン発生状況

まず、2000年のダムサイト底層における水質調査結果よりD0とジェオスミンの2000年における経時変化を図-6に示す。これより夏季に底層のD0低下に対応してジェオスミンの発生量が増加していることが明らかであり。その他調査の結果、漁川ダムにおけるジェオスミン発生の機構は図-7に示すように起こっていると推察されていた⁵⁾。その機構は①放線菌が流入し、堆砂棚で増殖する。②増殖した放線菌はダムサイト底層の貧酸素域に沈降し、死滅する。③死滅した放線菌が菌体内に保持していたジェオスミンを放出し、発臭する。放線菌はごく一般的な好気性土壌菌であり、この発臭機構の中で最も重要なのは貧酸素水塊がどのように形成されるかである。

(2) シミュレーション結果

そこで漁川ダムにおけるカビ臭計算では、ダム建設時の1981年断面とカビ臭発生が顕著であった2000年断面を用いて比較を行った。1981年当時の水質データは調査が行われていないために存在しない。そのため両断面に2000年時における流入量、水質、気象条件を適用して計算を行った。なお、取水位置は2000年度のダム管理所での運用にあわせ水面追従で水深1m（図-8中ではEL=159m）に設定している。図-8にD0の計算結果を示す。図は計算開始（2000年7月1日）より1週間後のものである。両断面ともに底層より嫌気化が進行していることがわかるが、2000年断面のほうがより顕著に嫌気化していることが明らかとなった。これは棚状地形の形成により流入水の水平方向の流れが卓越して、鉛直方向の流れが弱くなることに起因していると考えられる。このため鉛直方向の混合が抑制され、D0の供給が阻害されることにより嫌気化が顕著になったと考えられる。

図-9に流動計算の結果より得られたEL=158mの断面における移動流量を示す。移動流量の正の値は上向き、負の値は下向きの流れを示し、図中の実線と破線は各々2000年と1981年の河床形状を表している。EL=158mはほぼ棚と等しい標高であり、移動量解析は流況が定常になった2000年7月2日の値を用いた。このときの流入量は4.2 m³/s、放流量は5.5 m³/sである。

表-1 移動流量

	1981年	2000年
総量 (m³/s)	5,600	2,140
+値 (m³/s)	3,300	1,300
-値 (m³/s)	-2,300	-840
断面積 (m²)	251,550	112,000

*EL=158m断面

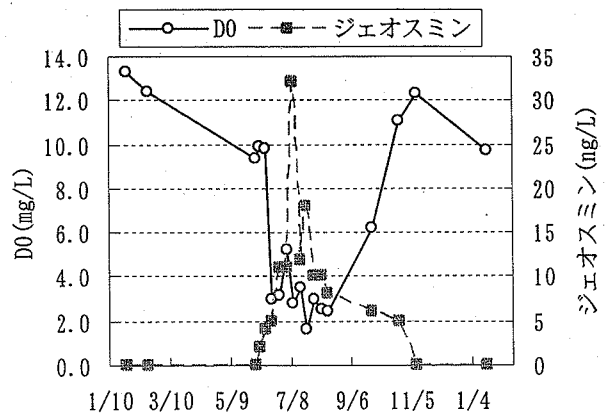


図-6 ダムサイト水質分析結果（2000～2001年度）

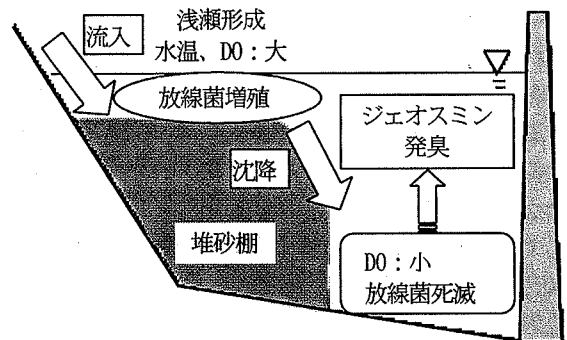


図-7 カビ臭発生の模式図

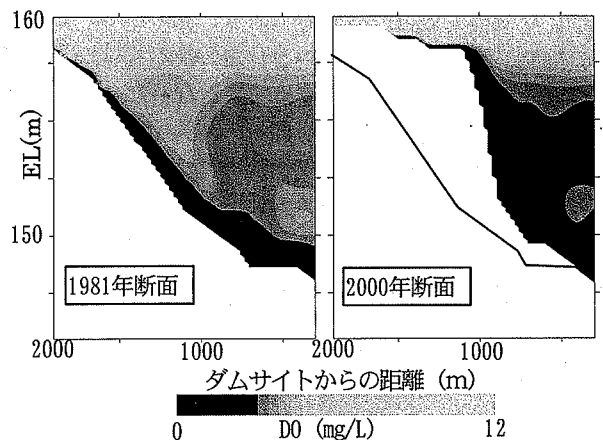


図-8 D0計算結果

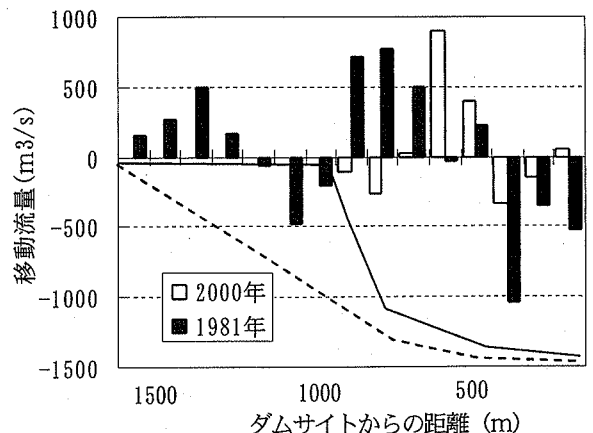


図-9 移動流量比較

(破線：1981年断面模式図、実線：2000年断面模式図)

移動流量を表-1にまとめる。この結果より1981年断面においては正負ほぼ均等に湖水の鉛直交換が行われ、移動総量も5,600 m³/s（平均鉛直方向流速2.7cm/s）でD0の供給が活発に行われることを示唆している（断面交換量は1,000 m³/sと推定される）。一方、2000年断面においては各コントロールボックスでの移動量も減少し、1981年に比べ移動総量が1/3程度（平均鉛直方向流速2.0cm/s）に減少していた。このことは流れが放流口に向かって直進し、鉛直方向の湖水循環が抑制されていることを表している。

また、図-10にジェオスミン濃度の計算結果を示す。図はD0計算結果と同じく2000年7月8日のものを示す。1981年断面では底層付近にのみ高濃度のジェオスミンがみられ、湖内に拡散している様子はない。これは湖内のD0が高く維持され、底泥と接触するところで放線菌が増殖するためである。一方、2000年断面では底層、および棚の側面から高濃度のジェオスミンが分布していることがわかる。これは湖内のD0が低くなるに従い、底泥で増殖していた放線菌と流入してきた放線菌が死滅してジェオスミンを放出するためである。

この結果より棚状地形の有無によりカビ臭発生に大きな違いがあることが明らかとなった。発臭機構は図-7で示した機構を裏付けるものであり、棚の形成、鉛直循環の抑制、嫌気化、発臭という一連の流れによってカビ臭問題がおこることを支持する結果となった。

この結果をもとにカビ臭抑制の対策としては棚状地形の掘削、あるいは鉛直循環の促進による底層へのD0供給が効果的であることが示唆された。実際に漁川ダムにおいてはダムサイトでの湖水循環装置の設置、堆砂掘削によりカビ臭の抑制に効果をあげている²⁰。

5. 滝里ダムにおける検討

(1) 現地機器観測結果

滝里ダムにおけるカビ臭発生は2002年より顕著になり、その原因は現在調査中であるが、現段階ではフォルミジウムに代表される藍藻類の繁殖によるものと考えられている⁹⁾。そこで、ダム湖内でプランクトンがどのように分布しているかを確認するためにSTDクロロテック計（アレック電子、ACL208-PDK）を用いて図-11に示す側線上3点（左岸、流心、右岸）において鉛直方向に0.1m間隔で、クロロフィルa、水温、濁度の測定を行った。観測日は2004年9月9日でダムサイトにおけるカビ臭物質濃度が最も高いときであった。図-12に各側線の平均クロロフィル濃度を縦断コンター図にしたものを示す。ここから水深2mほどにクロロフィルaの高濃度帯がみられ、特に湖心、ダムサイト付近で高い値が観測されていた。またNo.1～No.2の底層付近にも高濃度域がみられる。このときの観測された濁度はクロロフィルaと分布形状が異なり、クロロフィルaの観測値は濁度の影響を受けて

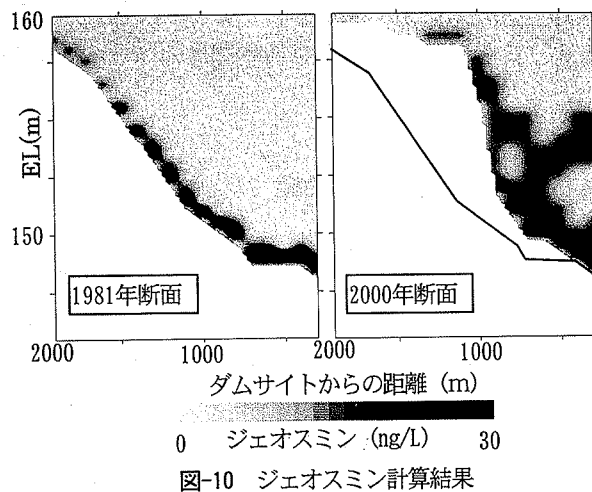


図-10 ジェオスミン計算結果

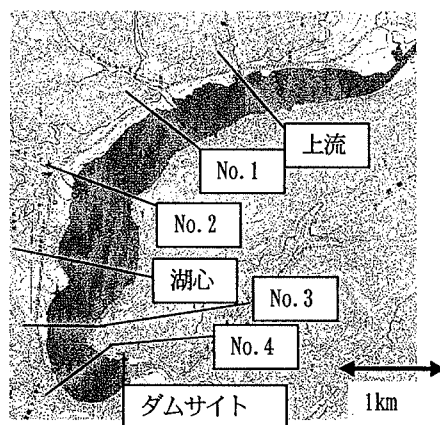


図-11 調査地点位置図

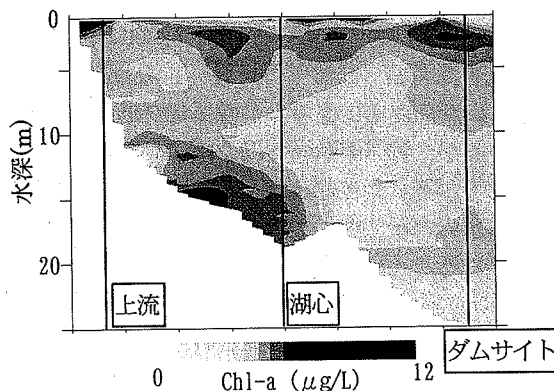


図-12 STDクロロテック計で計測されたクロロフィルa濃度（2004.9.9）

いないと考えられる。さらに水温の分布とクロロフィルaの分布を比較すると、表層付近では高水温帯とクロロフィルaの高濃度帯が一致しており、水温が高いほど藻類の増殖が促進されることを示唆している。一方、底層付近の高濃度帯については付着性藻類と考えられるが、その詳細は不明である。

この結果をふまえ水深2.5mにおける平面的な分布を確認するために測定値より平面コンター図を作成した。なお補間はクリギング法により行った。結果を図-13に

示す。図よりクロロフィルaと水温がほぼ同様の分布をしていることがわかり、ダムサイト付近においては湖心に比べ若干低水温であるがクロロフィルaのたまりが確認される。また、濁度は上流で最も高くダムサイトに向かい低下する分布をしており、クロロフィルaの分布とは異なっていた。クロロフィルaと水温の分布より滝里ダム貯水池内において注目すべき地点は、図-11に示したNo.1～No.2の間右岸寄り、狭窄部上流左岸寄り、ダムサイト付近の3地点である。

まず、図-13中のNo.1(kp55.6)～中間(kp55.2)～No.2(kp54.8)の間は横断的な河床変動が大きく左右岸で河床標高に偏りがある。図-14に2002年の横断測量結果を示す。観測日の水位(EL=147.8)では右岸側が水深6mほどで、左岸側が水深15m程度であった。日記計観測結果をみると右岸側に高水温帯があり、浅瀬の影響(図-14中間断面の網掛部分)と考えられる。また狭窄部上流、ダムサイトは流動の停滞による水温上昇、クロロフィルa濃度の増加が影響していると考えられる。

(2)貯水池シミュレーション

現地観測により貯水池内での大まかな水温、クロロフィルa濃度の分布を把握した結果、湖内の流動の影響が大きいことが示唆された。カビ臭抑制対策の検討を行うために鉛直2次元モデルによって湖内の流動、水温の再現を試みた。滝里ダムでは提体に維持放流口、提体から上流800m右岸地点に発電放流口と2つの放流口を有している。そのため流下途中の放流口において放流量を考慮した連続式を満たすように流速を求めた。また放流口における水温は流入熱フラックスは全て消費され、放出熱フラックスは隣接するコントロールボックスの平均に等しくなるように与えた。

加えて狭窄部が存在することから、2002年横断測量結果(約200m～300m間隔で測量)を補間して一律200m間隔の断面形状を与えた。計算開始日時時は2004年9月2日とし、計算期間は1週間とした、また、気象データは2004年9月の時間平均の値を与えた。図-15に2点放流(維持放流、発電放流の2点、放流口位置は図-3参照)のパターンの流速ベクトル図を示す。ここで運用流量は2004年9月8日～15日の日平均で流入量61.7m³/s、放流量59.77m³/s(維持放流8.97m³/s、発電放流50.8m³/s)であり、発電放流は時間当たりの放流量は0～66.5m³/sの範囲となっていた。実際の放流量を用いて計算すると、発電放流口の水位が維持できないという計算上の問題が発生したため、シミュレーションにおいては流入量6.0m³/s、維持放流量0.9m³/s、発電放流量5.1m³/sと実績の1/10の条件で与えた。また、取水位置は水位に追従させて水深1mとしている。図-15より放流口に向かい表層の流れがあるが、発電放流量が大きいためにダムサイトとの間で流れが停滞している結果となった。同時に湖心部で川幅が大きくなることにより流れが弱まり、狭窄部

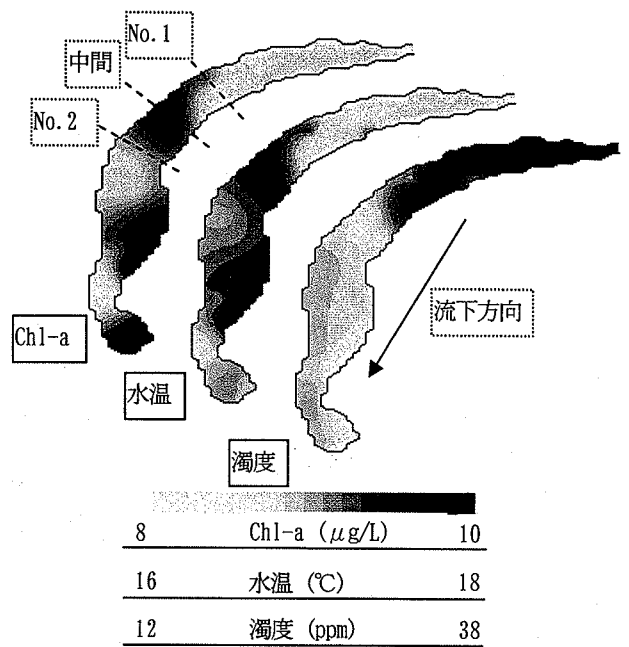


図-13 日記計平面コンター図

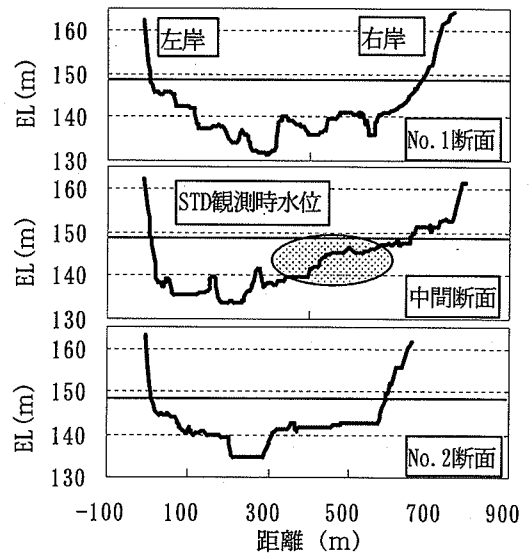


図-14 横断測量結果

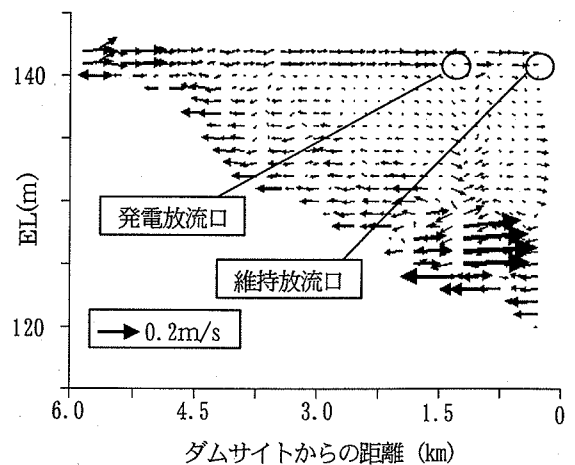


図-15 滝里ダム貯水池の計算ベクトル図

と発電放流口により鉛直方向に複雑な流れが生じている。この川幅を考慮した地形要因により流動が抑制される箇所が湖心～狭窄部、ダムサイトの2箇所であることがわかる。この結果は実測のクロロフィルa分布（図-13）の高濃度域と一致しており、この流動計算結果をもとに湖水水質の再現を行い、水質形成要因の対策検証を試みた。

(3) 水温シミュレーション

現地観測結果よりクロロフィルと水温がよく対応していたことから、プランクトンの分布を把握するためには水温分布が重要である。図-16に放流条件を変えた場合と現地観測との水温分布を示す。(A)は現地観測結果(2004.9.9観測)、(B)は2点放流(発電放流量 $5.1\text{m}^3/\text{s}$ 、維持放流量 $0.9\text{m}^3/\text{s}$)、(C)は維持放流のみ(流入量、放流量ともに $6\text{m}^3/\text{s}$)、(D)は維持放流のみ(流入、放流(発電放流量と維持放流量を一括)を実測値(期間平均 $60\text{m}^3/\text{s}$)にあわせたもの)の各条件でシミュレーションを行った。計算は2004年9月2日開始とし、現地観測にあわせて結果は2004年9月9日のものを表している。(A)と(D)を比較すると(D)では狭窄部により高水温域が2分されており、ダムサイト付近の表層水温が湖心下流に比べ低くなっており、実測のように河床に沿うような分布形状にはなっていない。次に(C)と(D)を比較すると、条件は流量の違いのみで流量を小さく、すなわち流速を遅くすると表層水温が上昇する結果を得た。また(A)と(B)を比較すると分布形状はほぼ一致しており、現状にあわせた2点放流を考慮することにより、水温分布の傾向を再現することが可能であることが確認された。

この結果より、流動が停滞する部分を解消し、表層水温を低下させることでプランクトンの増殖が抑制され、カビ臭が抑制されると考えられる。そのためには狭窄部付近、ダムサイトの流動を下流方向に促進あるいは強化することが水質の改善に効果的であると考えられる。

6. まとめ

上流域に汚濁源がない、もしくは富栄養化の顕著でない貯水池のカビ臭問題について貯水池形状に着目して、シミュレーション解析を行った。本研究により以下のことが明らかとなった。

貯水池におけるカビ臭発生には貯水池形状の影響が大きく、特に流動が重要な要因である。漁川ダムにおいては棚状地形による鉛直方向の流動、滝里ダムにおいては貯水池幅の変化による水平方向の流動がカビ臭発生と関係している可能性が示唆された。

また、シミュレーションにより地形条件などの感度分析を行うことにより、カビ臭抑制対策の効果を検証することが可能となった。漁川ダムにおいてはカビ臭発生モデルを構築し、棚の掘削、湖水循環装置の導入など鉛直方向の流動を回復することが有効であり、滝里ダムにお

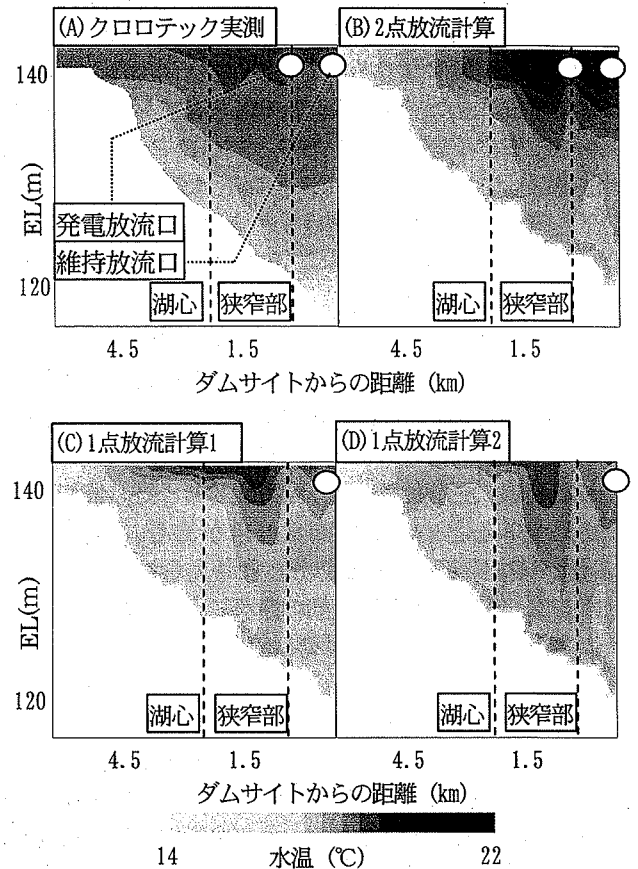


図-16 滝里計算水温コンター図

いては2点放流モデルにより、狭窄部の拡幅、放流量の改善など停滞水域の流下促進が有効であることが示された。今後の課題として2点放流時における計算上の安定性を高め、プランクトンの生態系モデルを導入してより具体的な対策検証を行うことが必要と考える。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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発生の原因究明と対策について, 河川技術論文集, 第10巻, pp. 531-536, 2004.
- 3) 森北佳昭, 畑考治, 三浦進; 貯水池の冷濁水ならびに富栄養化現象の数値解析モデル(その2), 土木研究所資料, 第2443号, 1987.
- 4) 杉原幸樹, 高田賢一; 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, 平成16年度土木学会北海道支部論文報告集, 第61号, II-54, 2005.
- 5) 北海道開発局 石狩川開発建設部; H14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保全対策工検討業務.
- 6) 北海道開発局 石狩川開発建設部; H16年度直轄堰堤維持の内 空知川水質調査業務

(2005. 4. 7 受付)