

ダム貯水池におけるカビ臭発生機構の解析

Analysis of the Mechanism of Musty-odor Occurrence in a Dam Reservoir

杉原幸樹¹・山下彰司²・高田賢一²

Kouki SUGIHARA, Syouji YAMASHITA, 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 (独) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

There have been reports of abnormal odor and taste of water from dams throughout Japan. To investigate this phenomenon, we conducted observations and two-dimensional vertical model simulations at Takisato Dam on the Sorachi River in Takisato Town for three purposes: (1) to examine flow regime, water temperature, water quality components, and behavior of the blue-green algae that cause mustiness; (2) to understand how the odoriferous material 2-methyl-isoborneol (2-MIB) is formed and released; and (3) to propose and evaluate water quality improvement measures. It was shown that stagnation develops where the reservoir widens and where it narrows and curves at the middle. This stagnation causes water temperature increases, which in turn cause blue-green algae proliferation and 2-MIB generation. The simulation indicates that algae proliferation can be controlled by blocking sunlight. Flood-time calculations suggest that floods suppress algae proliferation.

Key Words : Musty odor, 2-methyl-isoborneol, two-dimensional vertical model, Takisato Dam reservoir

1. はじめに

ダム貯水池など、停滞性水域における異臭味問題は多くの報告例があり、その原因がプランクトンなどの生物に起因する場合は富栄養化と密接な関係にある^{1), 2), 3)}。しかし、現在カビ臭の発生が問題となっている北海道の滝里ダムは富栄養化が顕著ではない。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、貯水池内の水質は極端に富栄養化しているわけではなく、むしろ清浄といえる。そのため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。滝里ダム貯水池は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機構を明らかにし、カビ臭抑制の効果的な対策を検討することを目的として、現地観測、シミュレーションモデル構築、シミュレーションによる感度分析を行い、カビ臭原因生物の増殖要因について検討し、カビ臭抑制対策の一例について解析を行ったものである。

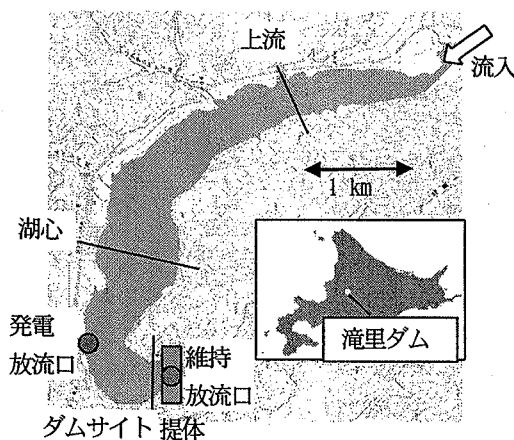


図-1 滝里ダム平面形状と位置図

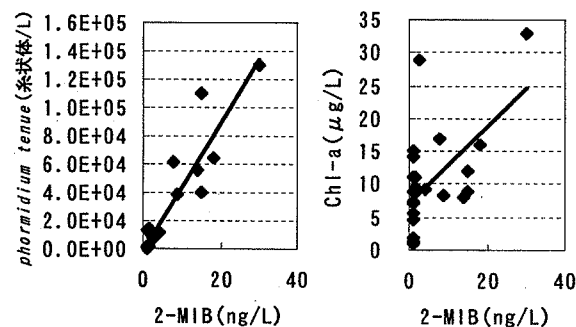
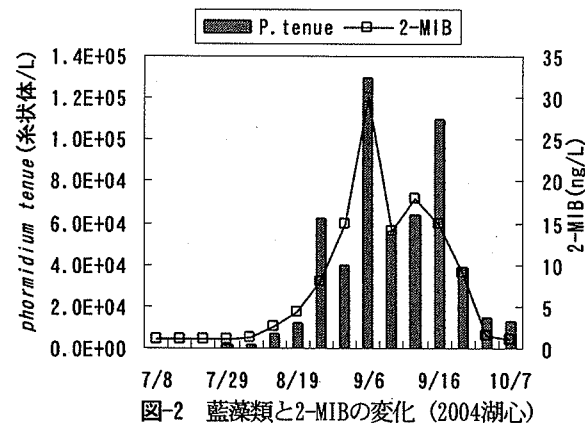
2. 対象ダム

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、湖内の水質の経年変化をみると徐々に悪化しているが、現段階では富

栄養化してはいない。また図-1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。

2. 水質状況

滝里ダム貯水池においては2002年よりカビ臭が発生しはじめ、2003年からカビ臭問題が顕著になっており、そのカビ臭原因物質は2-メチルイソボルネオール（以下2-MIB）である。2-MIBによるカビ臭は原因生物が植物プランクトンである藍藻類であることが知られており³⁾、滝里ダムにおける藻類組成調査から藍藻類の*Phormidium tenue*が原因生物と考えられる。図-2に2004年度の滝里ダム湖心、水深0.5mにおける*Phormidium tenue*と2-MIBの時系列変化、図-3に2-MIBと*Phormidium tenue*、Chl-a濃度との相関図を示す。図-2から8/20頃より藍藻の増殖が活発になり、それに伴い2-MIBが増加していることが分かる。2-MIBのピークは9/6に得られ、同時に*Phormidium tenue*のピークでもあった。このことから両者の相関を取ると図-3の（左）に示すように、非常によい相関関係が得られた。さらにChl-a濃度と2-MIB濃度にも相関関係が確認され（図-3（右））、*Phormidium tenue*の指標としてChl-a濃度を用いることが可能であると思われる。これらの観測結果より藍藻の増殖を抑制することが重要であり、その対策を検討するために鉛直2次元モデルを構

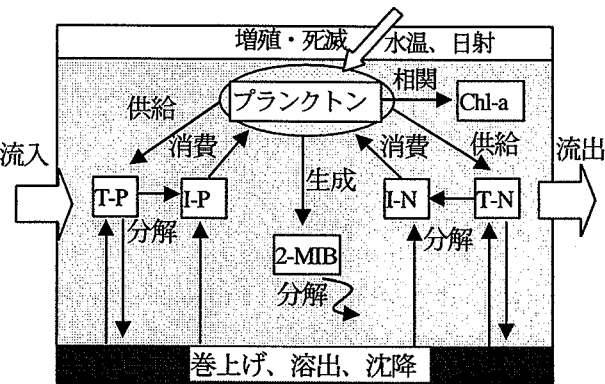
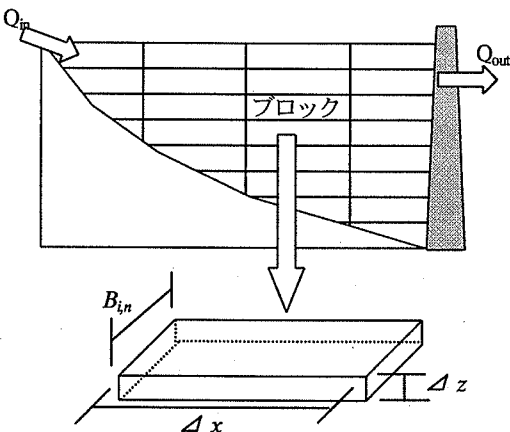


築し、様々の解析を行った。

3. 貯水池シミュレーション

貯水池水質モデルは森北ら⁴⁾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^{5),6)}。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。

滝里ダムのシミュレーションでは流下方向に200m（図-4の Δx ）、鉛直方向に1m（図-4の Δz ）、川幅を10m～1100m（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生態系モデル（図-5）を各コントロールブロックに適用した。このときの計算項目は流速、水温、SS、全リン濃度、全窒素濃度、無機態リン濃度、無機態窒素濃度、プランクトン数、クロロフィルa濃度、2-MIB濃度とした。また、各項目の計算式は奥川ら⁷⁾のモデル基礎式やパラメーターを参考とした^{8),9)}。さらに滝里ダムでのパラメーターは室内試験により決定した^{10),11),12)}。流れの計算においては放流口を発電放流口と維持放流口の2箇所（図-1参照）設定し、鉛直方向にも各々独立に水深位置を設定できる仕様に改良した。なお滝里ダムにおける発電放流量は計算期間平均で70 m³/s、維持放流量は9 m³/sであった。初期条件として2003～2005年度定期水質調査（観測地点はダムサイト、湖心、上流（図-1参照）、各地点鉛直方向に3水深）での水質分析結果（各年9月1日に近接のもの）を各



地点間で水平方向は上流方向に向かい同一と仮定し、鉛直方向は水深方向に向かい同一と仮定して与えた。流入量・放流量は2003～2005年度ダム運用日報の値を用い、流入濃度は $L-Q$ 式により与えた。気象条件は2003～2005年度のダム管理所でのデータを用いた。計算期間は各年9月1日から2週間とした。

4. 滝里ダムにおける現況再現計算

(1) 時系列計算結果

計算値の再現状況を確認するため、代表点として湖心を選択し、湖心表層（水深0.5m）における定期水質分析、クロロテック計（アレック電子、ACL104）による機器連続観測（設置水深0.5m）の結果と比較した。図-6に水温、図-7にChl-a濃度、図-8に2-MIB濃度、図-9に無機態窒素とリン、図-10に全窒素と全リンの計算値、機器観測値、化学分析値の時系列変化を示す。図-6の水温変化は夜間における冷却効果の見積もりが十分ではないものの、ほぼ現況を再現していると考えられる。図-7のChl-a濃度は室内試験結果^{11), 12)}より藍藻細胞数と一次相関関係があり、計算上は*Phormidium tenue*単種として取り扱っている。このChl-a濃度変化は機器観測値で2つのピーク（9/6、9/13）を有しており、計算結果も2つのピーク（9/5、9/10）が現れたが、一段目のピーク位置に約1日、二段目のピーク位置に約3日の時間的ずれが生じている。これは、プランクトンを藍藻単種と仮定して計算させているため、他種プランクトンとの競争が加味されていないこと、無機態栄養塩が枯渇していることが考えられる。また図-8の2-MIBはプランクトン数に強く依存するため、Chl-aと同様に計算値のピーク位置に近い問題がある。さらに図-9、図-10に窒素、リン濃度の比較を示しているが、無機態リン、全窒素、全リンはほぼ実測値に一致しているものの、無機態窒素が計算上、枯渇してしまっている。これは気液界面での窒素収支、藻類代謝による無機態窒素の供給を加味していないことが原因と考えられる。現地観測結果より滝里ダムにおいては無機態リンが制限因子になっており、水温が19℃以上のときに藻類増殖が活発になることがわかる。しかし、計算結果のChl-a濃度における二段目のピーク（計算上9/10）は現地観測に沿わない窒素因子によるものであることから、以後の検討は一段目のピーク（計算上9/5）を中心に行うものとする。

(2) 鉛直計算結果

次に鉛直方向の再現状況を確認する。時系列と同様に湖心を代表点とした。また、比較日時は計算結果については2004年9/5のもの、定期水質分析結果は2004年9/6のデータを用いた。図-11に水温、図-12に全リンと無機態リン、図-13に全窒素と無機態窒素、図-14にChl-a濃度と2-MIB濃度の計算値と水質分析値の鉛直分布の比較図を示す。図-11の水温は表層付近で日射量の増加に伴い

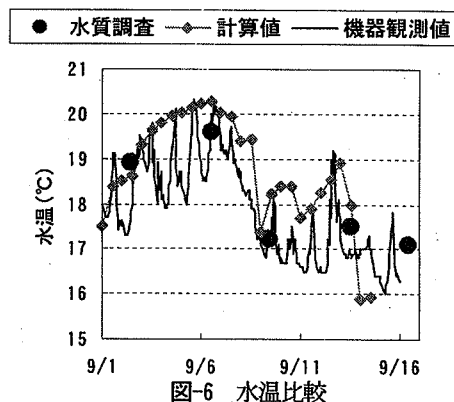


図-6 水温比較

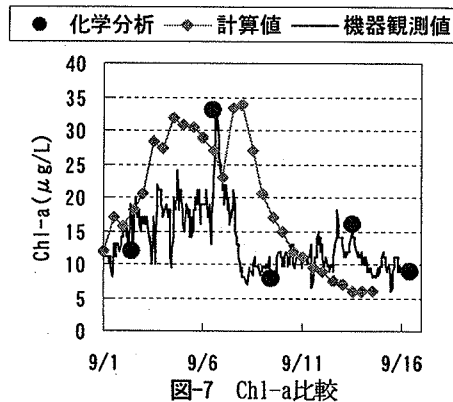


図-7 Chl-a比較

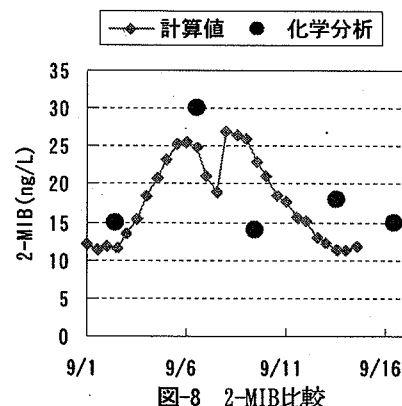


図-8 2-MIB比較

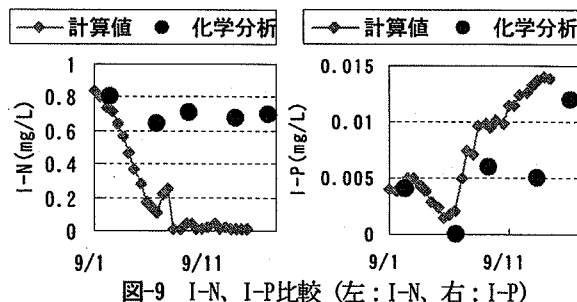


図-9 I-N、I-P比較（左：I-N、右：I-P）

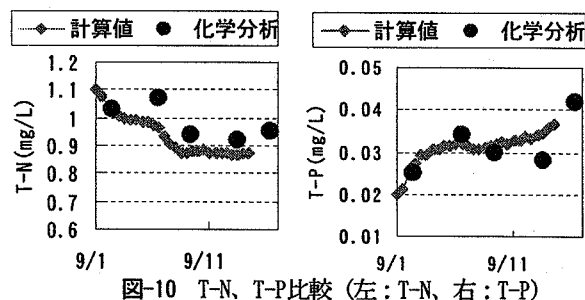


図-10 T-N、T-P比較（左：T-N、右：T-P）

上昇しており、下層では透過光量の減少により水温が低下している。図-12と図-13の栄養塩濃度は表層付近の日射量が多く、水温も高いところで藍藻類の増殖が盛んなため無機態栄養塩の消費が進行して、無機態栄養塩濃度が減少するが、有機態栄養塩は藍藻類の代謝等により供給され濃度の増加が確認される。また底層付近では巻上げ、溶出により栄養塩類が供給され濃度の増加が確認される。図-14のChl-aは日射量、水温、栄養塩濃度により表層から底層にかけ減少傾向を示している。2-MIBはChl-aと相関関係があるためChl-a濃度と同様の分布形状を有していた。日射量の減少と水温の低下によりChl-aの減少が再現されており、Chl-aの減少にともなう2-MIBの減少がほぼ定量的に表現できることが分かった。これらの結果より日射量増加、水温上昇に伴い栄養塩が十分であればプランクトン数、Chl-a濃度が増加し、2-MIB濃度の増加、無機態栄養塩の消費・減少、プランクトン死滅という連鎖が起こっていることがわかる。このように窒素の収支とモデルへの反映という改善点は残されているものの、時系列変化、鉛直分布ともに藍藻を中心とした

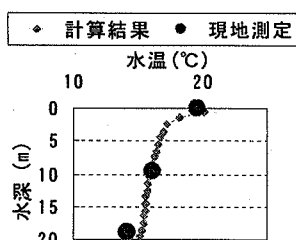


図-11 水温鉛直分布比較

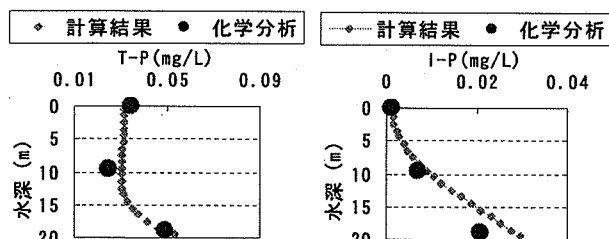


図-12 T-P、I-P鉛直分布比較 (左: T-N、右: I-P)

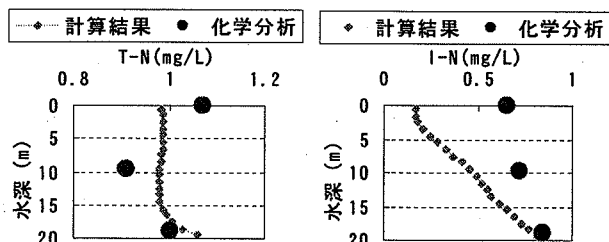


図-13 T-N、I-N鉛直分布比較 (左: T-N、右: I-N)

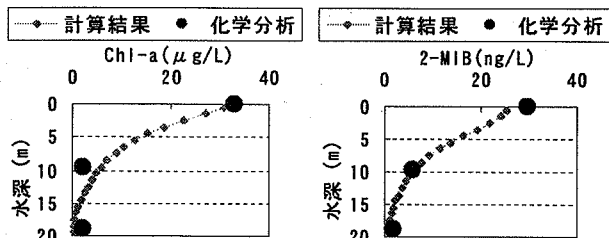


図-14 Chl-a、2-MIB鉛直分布比較 (左: Chl-a、右: 2-MIB)

生態系モデルがほぼ定量的に構築できたといえる。

(3) 鉛直二次元空間分布

次に空間的な分布の再現性を確認する。図-15に2004年9/9にSTDクロロテック計(アレック電子、ACL208-PDK)を用いて測定したChl-aの縦断分布(観測点は図-1中3側線と側線間3等分線上(計7側線) LCR)、図-16に本モデルでの2004年9/9の計算結果を示す。時系列の考察より2004年9/9は実測と差があるが、9/8に降雨があったことから、流況の影響があると考え、9/9の同一日の分布比較を行うこととした。まず上流側の水深の浅いところでChl-aの高濃度帯がみられ、上流から湖心の間で鉛直方向に高濃度帯が表層付近から水深5mほどの間で広く分布している。次いで湖心から狭窄部の間に表層付近から水深3mの間で高濃度帯がみられる。実測値に比べ計算値は濃度の絶対値に差があるものの計算値による鉛直分布は特徴をよく再現しているといえる。一方、狭窄部から堤体にかけて実測では表層付近にChl-aの高濃度帯があるが、計算結果では濃度の低下が大きくなっている。これは平面的な屈曲(図-1参照)が加味されていないこと、計算上発電放流口の流出は隣接するブロックから均等になるよう設定しているために実際より狭窄部から堤体にかけての流動が活発に見積もられていることが考えられる。以上のことから、おおむね本モデルは十分な機能を有していることが確認されたので、カビ臭抑制対策とその効果検証を感度分析により検討を行った。

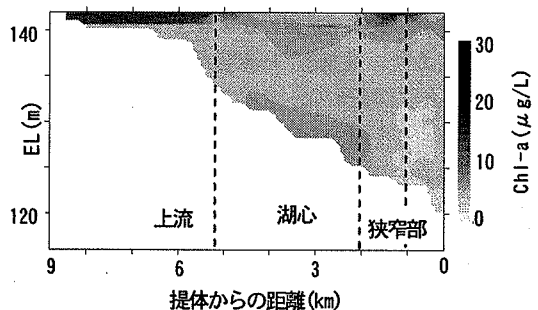


図-15 クロロテック計観測結果(2004年9/9)

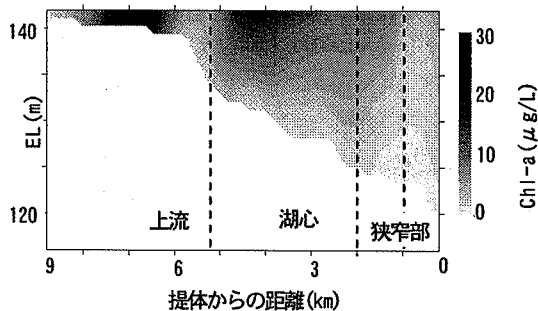


図-16 再現計算結果(2004年9/9)

5. 感度分析

(1) 取水位置による影響

滝里ダム貯水池においては2002年にはじめてカビ臭が発生し、2003年からカビ臭問題が顕著になりはじめ、2003年、2004年と下流利水者から8月下旬～9月上旬にカ

表-1 滝里ダム運用諸量

年	取水位置	最大流入量 (m ³ /s)	報告件数
2003	底層	179.73 (9/10)	多
2004	表層	143.84 (9/1)	少
2005	表層	993.32 (9/8)	無

*流入量は各年8/15～9/15の最大流入量で括弧内は日付

ビ臭の報告があり、2005年はカビ臭報告がなかった。この3ヵ年での貯水池での取水位置、夏季最大流入量、カビ臭報告数の有無を表-1にまとめる。2003年と2004年は藍藻増殖の盛んな9月上旬の最大流入量はさほど変化がなく取水位置（発電放流口位置は維持放流口位置追従で運用）が異なるのみで湖内の2-MIB濃度は閾値を越えるものであったが、下流利水者からのカビ臭報告件数に差が生じていた。また2005年は2004年と同じ取水位置で運用しており、9月上旬に出水がありカビ臭の報告はなかった。このことからカビ臭の発生は取水位置や流入量に強く影響を受けており、その効果について検討した。まず、取水位置を底層と表層の場合の影響について2003年9月の計算結果をもとに比較を行った。計算期間は2003年9/1～9/15で、比較日は底層取水時にChl-a濃度のピークを与える9/7とした。図-17に水温分布の比較を示す。底層取水時には表層取水時と比べ、湖内全体の水温が0.5～1℃上昇し、特に狭窄部から提体にかけての水温上昇が顕著であることがあきらかとなった。この水温上昇にともないChl-a濃度も増加する結果が得られた。次に図-18に2-MIB濃度の分布図を示す。底層取水時には湖心上流、ダムサイト付近で表層取水時に比べ2-MIB濃度の上昇がみられ、カビ臭発生が顕著であることを示す結果であった。この結果より底層取水することにより温度成層は破壊されるが、表層付近の流動停滞、湖内の水温

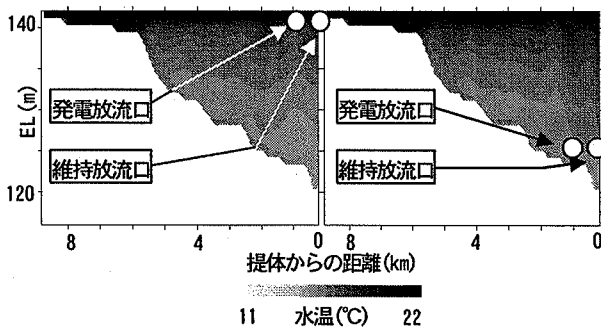


図-17 水温分布比較 (左：表層取水、右：底層取水)

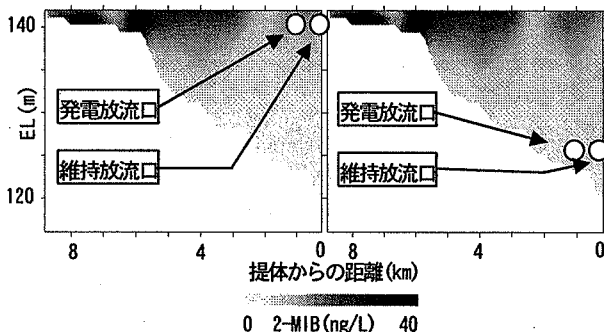


図-18 2-MIB分布比較 (左：表層取水、右：底層取水)

上昇により藍藻増殖が活発になることが明らかとなった。特に滝里ダムでは狭窄部、発電放流口の影響でダムサイトに顕著な相違が確認された。

(2) 出水による影響

次に出水前後で湖内のChl-a濃度の分布がどのように変化するのかを確認するために2005年9月の出水データを入力し計算を行った。計算期間は2005年9/1～9/15で9/8 5時に流入量のピークを迎えている。このとき維持放流量は9 m³/s、発電放流量は150 m³/sであった。図-19にダム管理日報より流入量の推移、図-20に水温計算結果、図-21にChl-a濃度計算結果を示す。計算結果は2005年9/8 13時、2005年9/12 13時のもので取水位置は2005年度の運用にあわせ表層取水に設定したものを図化している。この結果より平常時の約2倍の発電放流をしていることから表層の発電放流口に向かう流れが卓越し、水温は表層から低下していく傾向が確認された。またChl-a濃度は発電放流口に集中するように移動していることが確認でき、流入量ピーク後には湖内の全体でほぼ0となった。この出水により湖内の冷却効果、既存藻

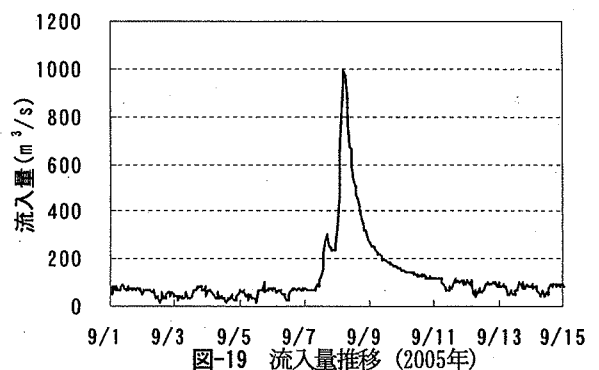


図-19 流入量推移 (2005年)

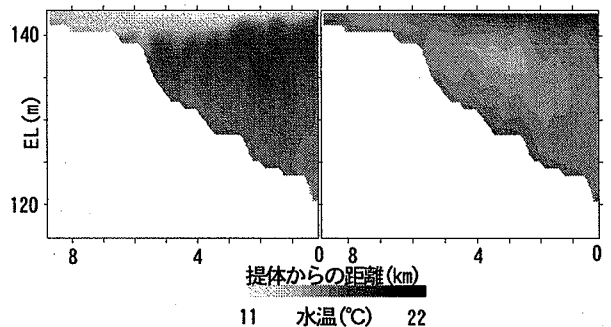


図-20 水温分布比較 (左：9/8、右：9/12)

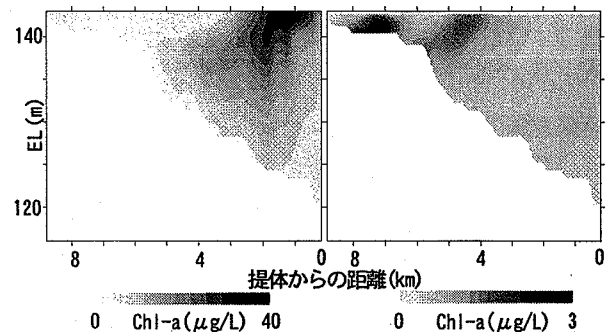


図-21 Chl-a濃度分布比較 (左：9/8、右：9/12)

類の流出が起こり、結果として藍藻増殖が起こらなっただめにカビ臭が発生しないことが確認できた。また、出水が収束した9/12の計算結果からダムサイト付近より水温の上昇が起こり始めている。これは発電放流により湖心～発電放流口間よりも発電放流口～堤体間の流動が抑制され停滞性が増していることに起因している。さらにChl-a濃度は流入端、湖心上流、ダムサイトから上昇しはじめている。このとき出水後であったので湖内の栄養塩濃度は高く、水温は低下していたため、日射量の影響が最も大きいことに起因すると考えられる。

(3) 遮光効果検証

以上の結果より藻類増殖は流入栄養塩が豊富で、日射量が多く、流れが停滞し、水温が高いほど活発で、これら4条件のいずれかを抑制することで、藻類増殖やカビ臭を抑制できると考えられる。これまでの結果より滝里ダムにおいては流入端、湖心上流、狭窄部上流、ダムサイトが藻類増殖の重要な地点であると考えられ、カビ臭抑制対策案とその効果の検証を行った。対策案の一例として狭窄部上流において遮光した場合について計算を行った。比較基準は2004年9/5の計算結果とし、2-MIB濃度が最も高かった狭窄部上流において0.16km²を完全遮光したと設定した。図-22に示すように遮光部分の2-MIB濃度は減少するが、ダムサイト付近には影響が出ていないことがわかる。これは遮光により藻類増殖を抑制できるが、それにより流下する栄養塩濃度が上昇し、ダムサイトにおいてより増殖を助長するためと考えられる。この結果から栄養塩、日射、流れ、水温の4条件の一つだけでは局地的な対策（例えばダムサイトのみのカビ臭抑制）には効果を発揮するが、貯水池全体としての水質保全が難しいことがわかった。

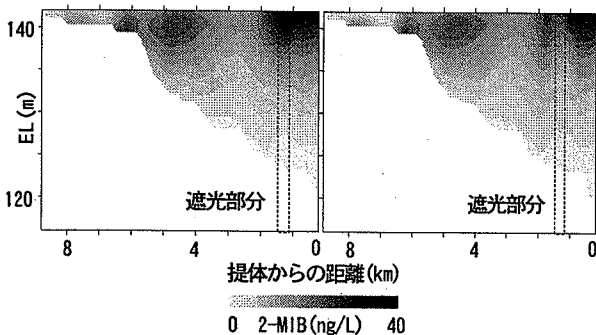


図-22 2-MIB濃度遮光効果比較（左：遮光無、右：遮光有）

6. まとめ

富栄養化の顕著ではない貯水池における生物起因のカビ臭問題について生態系モデルを構築し、様々な感度分析を行った。これによりカビ臭の発生機構とその制限要因に関する知見が得られた。

鉛直二次元計算の結果、滝里ダム貯水池における藻類増殖地点は①流入端、②上流、③狭窄部上流、④ダムサイトであった。また藻類増殖要因として①栄養塩濃度、

②日射量、③流動、④水温が主要因であり、特に水温が19℃以上、有光層である水深5m以浅で無機栄養塩が十分であれば増殖が顕著であった。これら増殖要因のいずれか1条件を制限するだけでは貯水池全体としての問題解決には至らないことが示された。このことから滝里ダムにおけるカビ臭抑制のうえで重要なのは流入無機栄養塩の低減、狭窄部上流とダムサイトでの流動改善や遮光措置などが考えられる。これらを満たす一案として意図的に水生植物を栽培することで、無機栄養塩の吸収と遮光措置を同時に行うことが可能である。今後、遮光と無機栄養塩の一定割合除去の設定を行うことで感度分析を行い、その効果を検証する予定である。

本モデルはほぼ定量的に貯水池内の水質挙動を再現できることがわかったが、無機態窒素など水域のみで収支をとることが困難な物質の気液平衡や形態変化、さらには生物との関係をより検討し、モデルに反映させる必要がある。また、滝里ダム貯水池においては散気式曝気装置を堤体から湖心の間に4基設置しており、これら曝気の流動に与える効果をモデルに組み込むことにより、さらなる再現性の向上を目指したい。

参考文献

- 1) 橘治国；富栄養化と水質解析，水工学シリーズ95-A-2，1994.
- 2) 杉浦則夫；霞ヶ浦のカビ臭原因生物と環境要因，用水と廃水，Vol. 31，pp. 20-25，1989.
- 3) 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，pp. 13-19，1989.
- 4) 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，pp. 138-235，1987.
- 5) 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.
- 6) 杉原幸樹，中津川誠，高田賢一；貯水池形状がカビ臭発生に及ぼす影響，河川技術論文集，第11巻，pp. 571-576，2005.
- 7) 奥川光治，宗宮功；数理モデルによる富栄養化のシミュレーション解析，土木学会論文報告集，第337号，pp. 119-128，1983.
- 8) 杉原幸樹，濱原能成，加藤晃司，中津川誠；茨戸川の富栄養化に関する総合的解析その2，北海道開発土木研究所月報 No. 615，pp. 10-24，2004.
- 9) 杉原幸樹，高田賢一，山下彰司；ダム貯水池における放線菌に由来するカビ臭のモデル化，北海道開発土木研究所月報 No. 630，pp. 10-22，2005.
- 10) 北海道開発局 石狩川開発建設部；H15年度 石狩川本支流水質調査業務報告書，pp. 346-399.
- 11) 北海道開発局 石狩川開発建設部；H16年度 滝里ダム流域水環境調査試験業務報告書，pp. 13-95.
- 12) 北海道開発局 石狩川開発建設部；H17年度 滝里ダム流域水環境調査試験業務報告書，pp. 39-52.

(2006. 4. 6 受付)