20.道志川流域における かび臭物質濃度予測モデルの開発

手塚　樹哉[1*]・石平　博[2]・相馬　一義[2]・馬籠　純[2]

[1]山梨大学大学院医工農学総合教育部工学専攻 (〒400-8510山梨県甲府市武田4-4-37)

[2]山梨大学大学院附属国際流域環境研究センター (〒400-8510山梨県甲府市武田4-4-37)

＊ E-mail: *g22tr005@yamanashi.ac.jp*

近年，全国各地で水道水のかび臭発生が報告されており，横浜市の水道水源となっている道志川においても，かび臭の原因物質である2-MIB（2-メチルイソボルネオール）よる異臭味が問題となっている．2-MIBは藍藻類が発生源とされており，夏季の気温上昇に従い濃度が上昇する一方，降雨やダム放流により河川流量が増加すると，2-MIBおよび発生源である藍藻類が洗い流され濃度が急激に低下することが確認されている．本研究では，気象・水文条件やダム操作に応じて2-MIB濃度の動態を予測できる数値モデルの開発を行い，道志川流域における2-MIB濃度の季節変化の再現を試みた．また，モデルを用いた数値実験を通じて，人為的なダム放流によるかび臭抑制の可能性についても検討を行った．

Key Words : *musty odor, 2-Methylisoborneol,water quality simulation,dam operation*

1. はじめに

近年，貯水池やダム湖などの水道水源において，窒素やリンの流入に伴う富栄養化やそれに伴う藻類の増殖などが問題となっている[1)]．また，このような藻類の増殖は浄水の異臭味被害の要因ともなっており，かび臭発生はその中でも主要な問題の一つである．このようなかび臭の発生は河川でも報告されており[2)3)]，山梨県の道志村から神奈川県へ流下し横浜市の水道水源として利用されている道志川においても，2-MIB（2-メチルイソボルネオール）に由来するかび臭問題が発生している．

2-MIBは藍藻類が発生源とされており，夏季の気温(積算温度)の増加に従い濃度が上昇する．また，降雨やダム放流によって流量が増加すると，濃度は急激に低下しリセットされ，再び積算温度の増加に従い上昇する．そこで，濃度上昇の対策として，人為的なダム放流操作による原因物質や藻類の「洗い流し」が考えられる．他の河川流域（北海道，忠別川）においても，ダム放流によるかび臭抑制に関する検討が行われ，その有効性が確認されている[4)]．

一方で，2-MIB濃度を低減させるための適切な放流操作はいまだ明確にされていないことに加え，道志ダムは発電用取水を目的としたダムであり，多くの貯留水をかび臭抑制のための放流に使用した場合，本来の目的である発電が十分に行えなくなってしまう可能性がある．そこで適切な放流計画を検討するため，ダム周辺地域での気象条件の変化や放流量に対応したかび臭物質濃度の変化などを表現できるシミュレータが必要であると考えた．

本研究では，適切な放流操作を検討するためのダム周辺流域での降雨流出過程，流入量に応じた放流操作，気象条件の変化や放流量に対応したかび臭物質濃度の変化を予測できる数値モデルを開発し，そのモデルを用いて適切な放流計画を検討することを目的とする．

具体的な検討項目については以下の通りである．

(1)各要素モデルの開発
- ダム流入量推定モデル
- ダム操作ルールモデル
- かび臭物質濃度推定モデル

(2)要素モデルの統合によるシミュレータの開発

(3)シミュレータを用いたかび臭抑制のための放流操作シナリオの検討

対象地域は，山梨県道志村から神奈川県相模原市へ流下する道志川と道志ダム，およびその周辺地域とした．道志川が属する相模川水系では，流域間の綿密な流量調節が行われている．道志ダムでは，最も高出力な発電が可能である第一発電所から秋山川へ流域変更を行っているほか，貯留能力の高い宮ヶ瀬ダムへの導水も行っている．

2. かび臭物質濃度推定モデルの作成

(1)要素モデル1：ダム流入量推定モデル

道志ダムへ流入する流量の推定には二段タンクモデルを使用した．入力値は時間単位の降水量及び蒸発散量であり，道志川上流域での面積雨量およびThornthwaite法により推定した蒸発散量を使用した．中規模の出水と台風による大規模な出水を有する2017年9月から10月の流量を参照値としてモデルパラメータの同定を行った．

(2)要素モデル2：ダム操作ルールモデル

第一発電所からの導水先である相模ダムを含めた統合操作実績を基に，道志ダムへの流入量に応じて放流操作を再現するモデルを作成した．

流入量の少ない平常時では，約311.5 m程度の水位に到達すると，水位が約309.5 m程度になるまで，第一発電所による発電を行い，発電に使用された水は相模ダム上流である秋山川へ導水される．

降雨により流入量が大きくなった時は，導水先である相模ダムの状況に応じて，二つの操作パターンに区分されると推測した．相模ダムでも大きな流入がありゲート放流を行っている場合は，ゲート放流によりそのまま流入量と同じ量を道志川下流に放流を行う．相模ダムでゲート放流が行われていない場合は，第一発電所への発電および秋山川への導水を行いつつ，残りをゲート放流によって道志川下流へ放流する．

(3)要素モデル3：かび臭物質濃度推定モデル

横浜市水道局より提供を受けた青山沈でん池で計測している2-MIB濃度データを用いてモデルの作成を行った．

2-MIB濃度の推定には，降雨がないあるいはダム放流が必要になるほど大きくない場合の平常時の濃度変化を表現するモデルと，強い降雨により流入量が増加しダム放流が行われることで濃度が減少するイベントを表現するモデルの二つを作成した．

a)平常時のかび臭物質濃度推定モデル

藻類の増殖を表現するのに用いられるロジスティック関数(式(1))によって，有効積算温度から求めた2-MIB負荷量Lを，ダム下流域流量Rdで除すことで2-MIB濃度を算出した(式(2))．ダム下流域流量はタンクモデルを使用し算出した．ダム下流域流量の実測値は得られなかったため，代替として青山沈殿池での取水時における濁度の実測値を基にパラメータ同定を行った．そのため，ダム下流域流量Rdおよび2-MIB負荷量は実際の数値を表すものではなく，積算温度による濃度上昇と流量増加によって濃度が減少する様相を表す概念的なものである．

$$L = \frac{K}{1+\left(\frac{K}{L_0}-1\right)e^{-r_1 * GDD}} \tag{1}$$

L：2-MIB負荷量　K：環境収容力　L_0：初期負荷量
r_1：上昇率　GDD：有効積算温度

$$C = \frac{L}{Rd} \tag{2}$$

C：2-MIB濃度　L：2-MIB負荷量　Rd：下流域流量

b)ダム放流によるかび臭物質濃度減少モデル

積算放流量に応じて一定の値まで擦りつくように減少する様相を表現する式(3)を作成した．極限値Bは，式(4)により算出され，ピーク放流量R_{max}が高い場合は極限値Bは低い値となる．減少率r_2は式(5)により算出され，放流開始時の濃度C_0が大きい場合に減少率r_2が大きい値となる．式(4)と式(5)の係数はいくつかの放流イベントを基に算出した。

$$\begin{aligned} C &= r_2 \sum R + C_0 \quad (C \geq B) \\ C &= B \qquad\qquad\quad (C < B) \end{aligned} \tag{3}$$

C：2-MIB濃度　r_2：減少率　R：ゲート放流量
C_0：初期濃度

$$B = 4.5 * e^{-0.31 * R_{max}} \tag{4}$$

B：極限値　R_{max}：ピーク放流量

$$r_2 = 2.8 * 10^{-7} * e^{0.4 * C_0} \tag{5}$$

r_2：減少率　C_0：放流開始時の濃度

(4)かび臭抑制のための放流操作モデル

上述の要素モデル(1)〜(3)を統合し，かび臭抑制のためにダム放流操作を行った場合における2-MIB濃度の動態を推定するシミュレータを作成した．放流開始濃度と目標濃度を設定し，2-MIB濃度が放流開始濃度に到達した時，目標濃度に到達するまでゲート放流を行う．また，急激な水位低下を防止するため，事前貯留操作の追加を行った．2-MIB濃度とダム流入量の将来予測を行い，放流開始濃度に到達する時間より，事前貯留に必要な時間が長くなった時に事前貯留が開始されるよう設定を行った．

3. 結果

(1) シミュレータの検証

ダム流入量推定モデル，ダム操作ルールモデル，かび臭物質濃度推定モデルを統合し作成したシミュレータによる2-MIB濃度の再現結果を**図-1**，**図-2**に示す．2021年データによりパラメータ同定を行い，2020年において検証を行った．同定ケースである2021年では，6月下旬と8月上旬に大きな濃度ピークがみられるとともに，濃度上昇の過程で細やかな濃度変化がみられる．また，ピークからの急激な濃度低下は，ダム放流による洗い流しによるものである．4月上旬から5月頃に見られる細かな上昇・低下の部分を除き，2つのピーク過程での細かな変動についても，シミュレータにより，妥当な再現結果が得られていることが確認された．一方，検証ケースでは，9月上旬までのピーク値に加え，それ以降に見られる複数の小規模なピークの発生も適切に再現できていることが確認された．なお，Nash-sutcliffe係数による評価で2021年は0.89，2020年においては0.91となった．

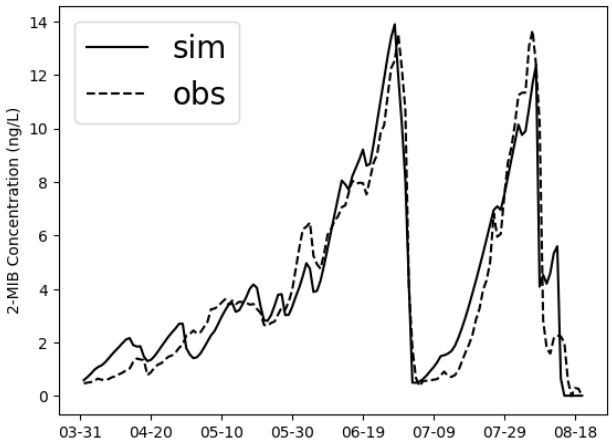


図-1 2-MIB濃度の再現結果 2021年における同定ケース

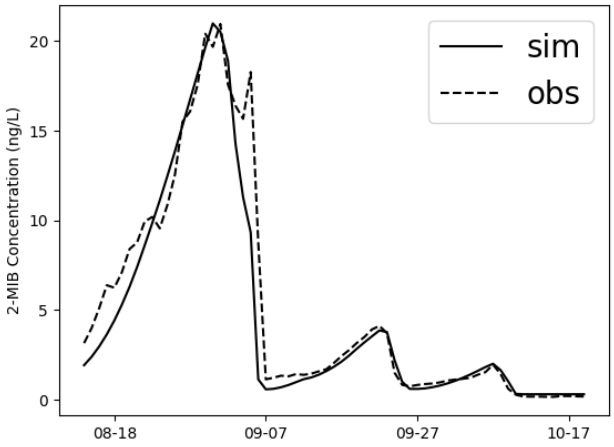


図-2 2-MIB濃度の再現結果 2020年における検証ケース

(2) かび臭抑制のための放流操作のシミュレーション

2021年においてかび臭抑制のための放流操作をした場合の2-MIB濃度のシミュレーション結果とダム水位の変動を**図-3**，**図-4**に示す．放流を開始する濃度は基準値である10 ng/Lをより小さい値である8 ng/Lとし，放流後に目標とする濃度は2 ng/Lとした．この場合，行われた放流の回数は2回で，必要な流量は1,736,890 m^{3}であった．

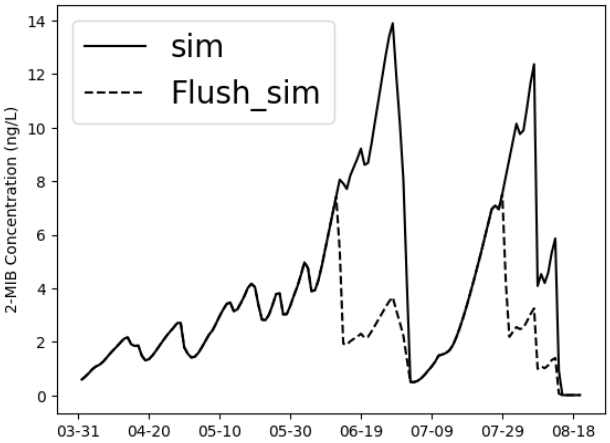


図-3 2021年においてかび臭抑制のための放流操作を行った場合での2-MIB濃度の動態予測

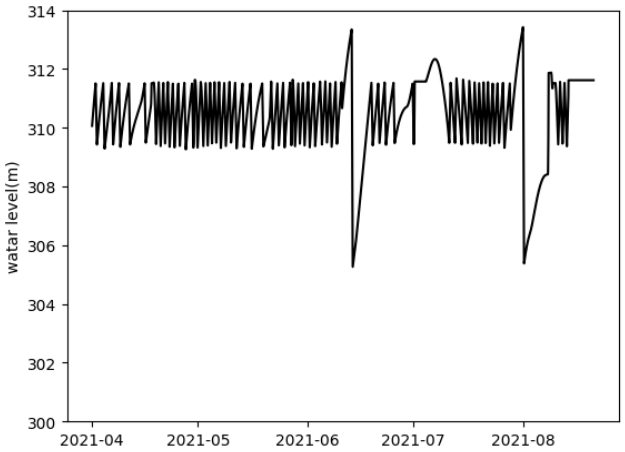


図-4 2021年においてかび臭抑制のための放流操作を行った場合での道志ダム水位変動予測

4. 考察

作成したシミュレータについて，Nash-sutcliffe係数による評価で2021年は0.89，2020年においては0.91と非常に高い再現度が得られた．一方で，検証に使用したデータが1年分と十分ではないため，今後も新たに計測されるデータの蓄積による，継続的な検証を行う必要性がある．

かび臭抑制のための放流操作のシミュレーションについて，放流操作によってかび臭の抑制が出来る可能性が示された．事前貯留を行うことで，水位が急激に低下す

ることも防止することが可能である．ただし，道志ダムでは維持流量0.4 m³/sと第二発電所を介した放流2.0 m³/sの約2.4 m³/sの放流を常に行っており，そのため降雨の少ない年ではダム流入量が減少し，常に行うべき放流である2.4 m³/sに近い値になってしまうと，事前貯留および放流を満足に行うことが出来ない可能性が高い．渇水が予測される場合はダム放流によるかび臭抑制のみではなく，従来より行われている活性炭処理などの他の浄水手段を併用する必要があることが示唆された．

5. 結論

本研究では，気象・水文条件やダム操作に応じて2-MIB濃度の動態を予測できる数値モデルの開発を行い，道志川流域における2-MIB濃度の季節変化の再現を試みた。その結果，開発したシミュレータを用いて，気象・水文条件からかび臭物質濃度である2-MIB濃度の季節変化を妥当に再現できることを確認した．また，モデルを用いた数値実験を通じて，人為的なダム放流による河道の「洗い流し」で，かび臭の抑制が出来る可能性を示すことができた．その一方で，降雨が少ない年においては，洗い流しを行うために必要とされるダム放流を行うことは困難で，従来より行われている活性炭処理などの浄水手段を併用する必要があることも示唆された．

今後は，随時計測される最新データを基により多くのケースについて検証を重ね，作成した要素モデルおよびシミュレータについての妥当性の検討を行っていく．

謝辞

本研究で使用したデータ等は，神奈川県企業庁及び横浜市水道局より提供を受けた．記して謝意を表する．

REFERENCES

1) 高橋威一郎，高瀬勝教，竹下佳代子，河野博幸，馬見塚守：芹川ダムにおけるかび臭物質産生藍藻及び2-メチルイソボルネオールの推移についての評価， 水環境学会誌 39巻2号 p. 51-62， 2016. [Takahashi, T., Takase, K., Takeshita, K., Kawano H., Mamizuka M. and Kizu H. : State Transition of Musty-odor-producing Cyanobacteria and 2-Methylisoborneol in the Serikawa Dam Reservoir, Journal of Japan Society on Water Environment Vol.39, No.2, pp.51-62, 2016.]

2) 木村 慎一，久野 草太朗，堀川 博哉，新谷 仁美，江原 和宏，岩永 秀：かび臭原因物質を産生する河川付着性藍藻の挙動と対策～多摩川上流域での事例～，におい・かおり環境学会誌 49巻1号， pp.10-20， 2018. [Kimura, S., Kuno. S., Horikawa, H., Shingai, H., Ehara, K. and Iwanaga, M. : Behavior and Countermeasures of Musty Odor Producing Cyanobacteria on the Riverbed ～ A study on upstream of Tama river, Journal of Japan Association on Odor Environment, Vol.49 (1), pp10-20, 2018.]

3) 三上雅人，寺中郁夫，茂木亨，森大輔，竹内謙太朗，長井潔：荒川に発生した河床付着性藻類の生息域拡大及び2-MIB濃度の変化，水道協会雑誌 第88巻 第5号， pp.9-14， 2018. [Mikami, M., Teranaka, I., Motegi, T., Mori, D., Takeuchi K. and Nagai K. : Colonization and Spread of Benthic Cyanobacteria Associated with Increased Concentration of 2-MIB in the Arakawa River, Journal of Japan Water Works Association, Vo. 88., (5), pp.9-14, 2018.]

4) 高田 学， 中道 厚之：忠別川の臭気発生と対策， 平成27年度全国会議(水道研究発表会) 講演集， pp.644-645， 2015. [Takada, M. and Nakamichi A. : Odor generation and countermeasures for Chubetsu River, Proceedings of Japan Water Works Association 2015, pp. 644-645, 2015.]