

数値シミュレーションを用いた曝気式循環施設の適切施設規模指標に対する考察

東北大学大学院工学研究科 学生会員 ○王 孟涛

日本大学工学部土木工学科 正会員 梅田 信

1. はじめに

ダム貯水池は、治水や利水といった様々な役割を果たしており、社会基盤施設として非常に重要なものである。しかしながら、ダムを建設することにより、貯水池内に栄養塩類の蓄積が進むと、富栄養化現象が発生してしまうことが多い。富栄養化現象の一つとして、水面の着色現象や上水の異臭味障害などが発生するアオコは、景観や水利用に著しく障害を及ぼしている。そこでアオコ対策として、曝気式循環施設がダム貯水池で導入されることが多い。これは、水温（密度）の差によって成層化したダム貯水池において、気泡の浮力により貯水池中低層部の低水温水塊を表層へ連行し、貯水池内に循環流を発生させることにより、水温成層状況を変化させる機能を持つ施設である¹⁾。湖底に酸素を供給し溶存酸素濃度を上昇させるための「深層曝気施設」とは異なり、「浅層曝気」とも呼ばれている。

しかしながら、その設置計画の手法については、必ずしも確立した指針は未だ無く、現状では、数値シミュレーションを併用しながら半ば経験に基づき設置することが多い。そこで本研究では、数値シミュレーションを用いた適切な施設規模を求める方法について検討し、従来の施設規模指標の経験値も参照しつつ、適切な施設規模指標に対する考察を行った。

2. 研究手法

2.1 表層水温勾配

アオコ発生の原因種である藍藻類の増殖は、貯水池内の水温成層と関連することが指摘されている。貯水池表層の成層安定性を表す表層水温勾配 I は、アオコ発生指標として用いられている。式(1)でその定義を示す。

$$I = \frac{T_1 - T_2}{D_1 - D_2} \quad (1)$$

ここで、 T_1 は表層水温($^{\circ}\text{C}$)、 T_2 は水深 3m における水温($^{\circ}\text{C}$)、 D_1 は表層水温の測定水深(m)、 D_2 は T_2 の測定水深(3m)である。 I が $0.5(^{\circ}\text{C}/\text{m})$ を超過すると、アオコが発生する可能性が高くなるという知見が既往研究で研究されている²⁾。本研究も表層水温勾配を指標とし、曝気式循環施設の効果を評価する。

2.2 解析モデル

本研究は、鉛直一次元の水温解析モデルを使用する。本モデルは梅田・落合³⁾より開発され、基礎方程式を式(2)および式(3)に示す。

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S \quad (3)$$

ここで、 V は貯水量(m^3)、 Q_{in} は流入量(m^3/S)、 Q_{out} は放流量(m^3/S)、 T は水温($^{\circ}\text{C}$)、 K は拡散係数、 S は水温の生成項($^{\circ}\text{C}$)である。また、曝気により生じる流動に関しては Asaeda and Imberger⁴⁾による二重プルームモデルで表現される。貯水池モデルと曝気モデルの両者の接合は梅田⁴⁾により構築された。

2.3 従来の施設規模指標

曝気式循環施設の施設規模についての指標としては、土木研究所により約 25 年前に提唱された k 値が近年も用いられている。これを参考に施設を設置した水資源機構のダムで有害藍藻類の抑制に成功している⁵⁾。式(4)に k 値の定義を示す。

$$k = \frac{\Sigma \sqrt{Q}}{A} \quad (4)$$

ここで、 Q は曝気循環装置 1 基あたりの吐出空気量(L/min)、 A は貯水池の湛水面積(km^2)である。最新の曝気設計マニュアル⁶⁾では、概ね 250 から 300 の k 値を満たすと十分な施設規模であるとされている。

3. 計算条件

本研究は、国土交通省や水資源機構が管理する多目的ダムのうち、地域別に曝気式循環施設の設置されるダムを 7 つ選定した。対象ダムの地理的分布を図 1 に示す。対象の解析期間は 1 月の初期条件が得られる日から 12 月 31 日までの約一年間とした。三春ダムおよび寺内ダムは 2011 年、浅瀬石川ダム、草木ダム、阿木川ダム、高山ダムおよび鹿野川ダムには 2016 年のデータを用了。初期条件（水温鉛直分布）、毎日の流入量および放流量はダム諸量データベースから入手した。気象条件（気温、日射量、風速、湿度、雲量）はそれぞれのダムに最も近い気象台のデータを用了。なお、曝気式循環施設の稼働条件については水質年報（水資源

キーワード：ダム貯水池、アオコ、曝気式循環施設、鉛直一次元モデル、施設規模

連絡先：〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 環境水理学研究室 022-795-7453



図 1：対象ダムの地理的分布

機構が管理するダム) またはネット上の関連資料 (国土交通省が管理するダム) から入手し、それにしたがって設定した。鉛直方向の計算格子間隔は 0.5m であり、計算時間ステップは 60 秒とした。

3. 結果

3.1 適切施設規模を求める方法

鉛直一次元モデルを用いた適切な曝気式循環施設の施設規模を求める方法について述べる。例として寺内ダムを対象とし、曝気 2, 4, 6 と 8 台を設定する時の表層水温勾配の時系列を算出した。その結果を図 2 に示す。この結果から、曝気式循環施設の台数の増設につれて表層水温勾配が減少するのが見られた。また、全 2 台から全 4 台、全 6 台への増設は効果が明らかに見えるが、さらに全 6 台から全 8 台へ増設するのは大きな改善が見られなかった。したがって、最適台数が 6 台であると考えられる。この方法を用いて全ての対象で適切施設規模を算出した結果と実績規模との比較 (k 値) を図 3 に示す。高山ダムと阿木川ダムを除いて実績規模と接近した結果が多い。

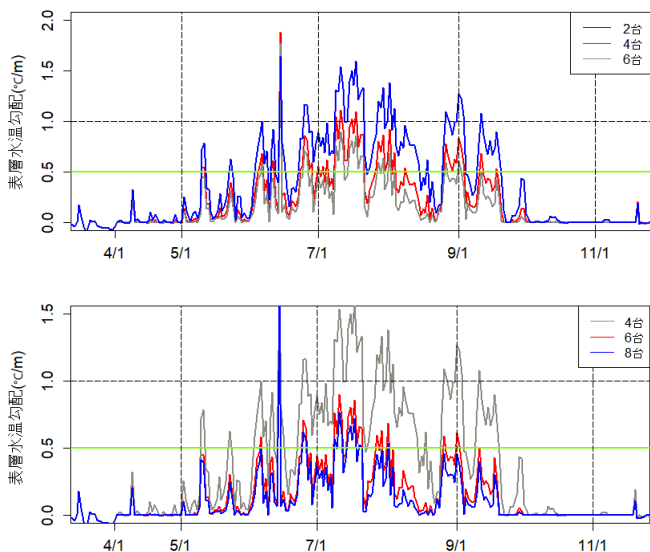


図 2：寺内ダムにおける表層水温勾配時系列の設置台数別シミュレーション

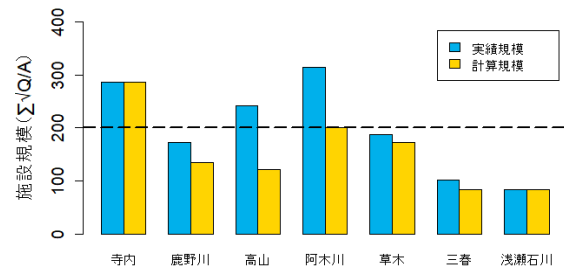


図 3：計算施設規模と実績規模の比較

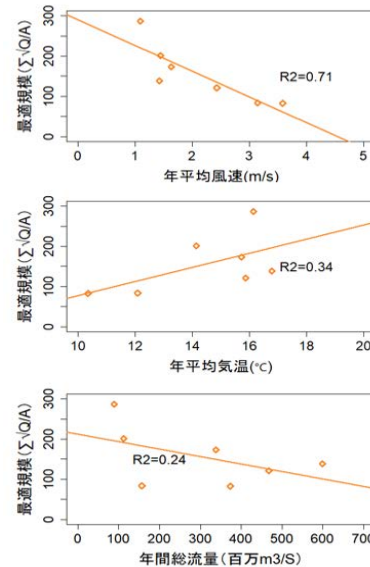


図 4：適切施設規模と外力条件の相関分析

3.2 外力条件の影響

本研究で選定した対象ダムは、地理的に違いが大きいものである。そのため、気象や流量といった外力条件が曝気式循環施設の効果にどのような影響を与えるかについて検討した。各外力条件の年平均値を横軸とし、算出した適切施設規模 (k 値) を縦軸とし、最も相関のある結果を図 4 に示す。

4. まとめ

本研究は鉛直一次元水温モデルを用いて適切な曝気式循環施設の施設規模を求める手法について検討した。また、外力条件が施設規模に与える影響を相関分析で分析した。その結果、ダムの条件によって理想的な k 値が異なるということが分かった。特に、気温、風速および流量の影響が大きいことが見られた。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課, 2021.
- 2) Nagayoshi, G., M.Umeda, Y. Izumi and M. Okano: *International Conference on Large Dams*, Barcelona, pp.265-288, 2006.
- 3) 梅田信, 落合雄太: 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, No.5, I_127-I_135, 2012.
- 4) 梅田信: 水工学論文集, 第 49 巻, 2005.
- 5) 今本博臣ら: ダム工学, Vol.23,(4), pp.278-289, 2013.