

JWA モデルの曝気循環サブプログラム改良とそのモデルを用いた浅層曝気循環設備の配置・運用検討

○村田 裕¹・武田 浩一²・松浦 旬³・小山 和也⁴

概要：

水資源機構では、浅層曝気循環設備による富栄養化対策を数多くのダム貯水池で実施し、一定の効果を上げている。しかし、浅層曝気循環設備の一定水深による連続運用により形成された水温躍層において、表層と曝気水深の水温勾配が小さくなった場合、アオコの発生を抑制できなくなるケースが見られ、この現象を水質予測モデルで再現した事例はない。この課題に対し、JWA モデルの予測精度向上を目的に曝気循環サブプログラムを改良し、水温勾配の違いによるアオコの抑制効果を再現できるようにした。

また、2009 年の川上ダムの環境レポートでは、浅層曝気循環設備の設置基数を 2 基にすると所定の水質改善効果を発揮すると予測されたが、改良した JWA モデルでは能力不足となった。このため設備の総排出空気量を変化させずに設置基数を変化させ、維持管理費が増加しないような効果的な配置計画について検討を行った。その結果、設置基数を 4 基にすることで所定の水質改善効果が期待できることが分かった。また、浅層曝気循環設備の多水深運用によって、更なる水質保全効果の発揮及び維持管理費の縮減が見込まれることが分かった。

キーワード：JWA モデル、水質予測モデル、曝気循環サブプログラム、浅層曝気循環設備

1. はじめに

水質保全設備の建設にあたっては、適切かつ効果的な配置や規模の検討が重要である。管理においては、維持管理費の縮減のために、水質保全設備の効率的な運用が求められている。総合技術センターでは、アオコ発生等の水質に係る技術的課題に対して、浅層曝気循環設備等の水質保全設備を考慮した水質予測モデル（以下、「JWA モデル」という。）を開発し、貯水池における水質予測技術の向上を図ってきた¹⁾

しかし、浅層曝気循環設備の一定水深による連続運用により形成された水温躍層において、表層と曝気水深の水温勾配が小さくなった場合、アオコの発生を抑制できないケースが見られ、ダム貯水池の現地調査においても、アオコの発生抑制を司る下層への潜り込み流量が減少することが分かってきたが²⁾、この現象を水質予測モデルで再現した事例はない。本稿は、予測精度向上を目的として、JWA モデルに付随する浅層曝気循環設備による循環流等を計算するためのサブプログラム（以下、「曝気循環サブプログラム」という。）の改良と、このモデルを用いて建設段階の川上ダムにおいて浅層曝気循環設備の効果的な配置計画の検討及び効率的な運用案の検討について、報告するものである。

2. JWA モデルの曝気循環サブプログラム改良

浅層曝気循環設備によって発生する循環流は、気泡吐出口から吐き出された気泡が周囲の水を連行して生じる第一循環流と、第一循環流に連行される形でダム貯水池の水が下層に潜り込む第二循環流があり、第二循環流による潜り込み流量がアオコの抑制を司ると考えられている（図-1）。我が国で使用されている浅層曝気循環設備を考慮した水質予測モデルでは、図-2 に示すようにアオコの抑制を司る下層への潜り込み流量（無次元連行流量に比例）が貯水池の水温勾配（ブルーム数にほぼ比例）

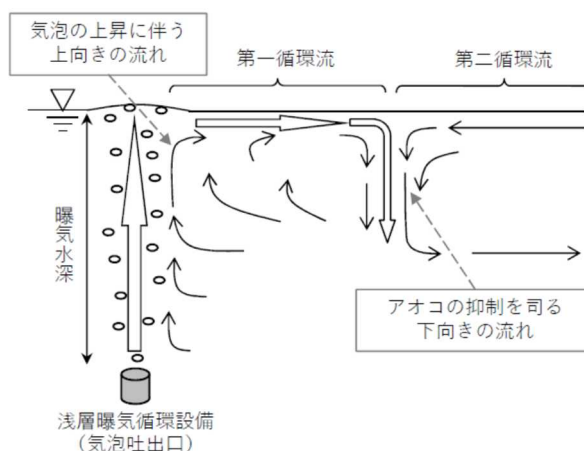


図-1 浅層曝気循環設備による循環流の概念図

1. 総合技術センター 情報グループ

2. 総合技術センター 情報グループ長

3. 川上ダム建設所 環境課長

4. 川上ダム建設所 環境課

にかかわらずほぼ一定となっている³⁾。このため水温勾配が小さくなった場合、下層への潜り込み流量を過大評価していることになり、浅層曝気循環設備の施設規模等を検討する上で、少ない基数や小規模の空気量で効果が発揮できるとの検討結果に繋がる恐れがある。

このような課題に対応するため、鹿児島大学古里特任准教授との共同研究により、水温勾配の変化により潜り込み流量を変化させる等の新たな理論を構築し、曝気循環サブプログラムに追加することによって、JWAモデルの精度向上を図った。改良したモデルの検証にあたっては、大山ダムの水質調査結果とモデル改良前後の計算結果を比較した(図-3)。既存モデルによる計算結果では、水温勾配により潜り込み流量が変化しないため、クロロフィルaの値がほぼ一様となることから、浅層曝気循環設備の効果を過大評価していると考えられるが、改良モデルでは、クロロフィルaに変動がみられ、実測値に近い値になっている。

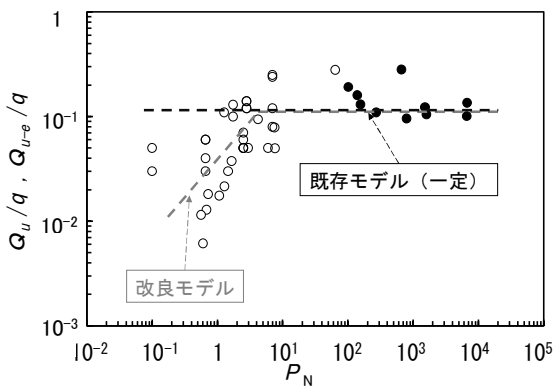


図-2 無次元表層流量 (Q_s/q)・無次元連行流量 (Q_e/q)とプルーム数 (P_N) の関係 (古里ら, 2018, 改変)⁴⁾

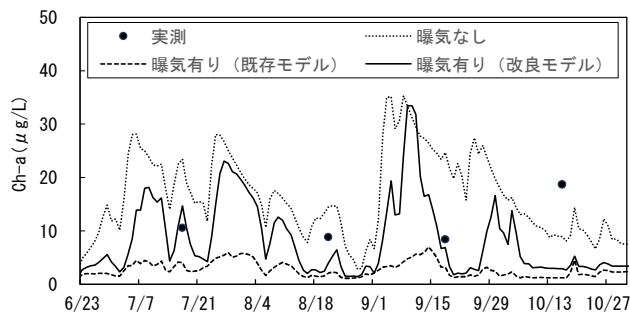


図-3 改良前後の計算結果と実測値の比較 (大山ダム)

3. 浅層曝気循環設備の効果的な配置計画の検討

3.1 浅層曝気循環設備の配置計画検討の概要

川上ダムの環境レポートでは、浅層曝気循環設備の設置基数を2基、総排出空気量を11.2m³/min (コンプレッ

サー5.6m³/min×2台) にすると所定の水質改善効果を発揮すると予測されていたが、浅層曝気循環設備の能力が過大評価されている可能性があった。このため改良したJWAモデルを用いて、浅層曝気循環設備の総排出空気量を変更せずに設置基数を変化させ、維持管理費が増加しないような効果的な配置計画についての検討を行った。検討ケースを表-1に、各ケースにおける浅層曝気循環設備の配置計画を表-2に示す。なお、曝気水深は表層から15m一定、運用期間は4/1~10/31とし、環境レポートと同様の条件とした。

表-1 配置計画の検討ケース

Case	浅層曝気循環設備
環境レポート	5.6m ³ /min×2基 (計11.2m ³ /min)
Case1	無
Case2	5.6m ³ /min×2基 (計11.2m ³ /min)
Case3	2.8m ³ /min×4基 (計11.2m ³ /min)
Case4	1.9m ³ /min×6基 (計11.4m ³ /min)

表-2 浅層曝気循環設備の配置計画

case	浅層曝気循環設備の配置計画
Case2	
Case3	
Case4	

3.2 水質シミュレーションによる配置計画の検討結果

図-4 に示すとおり、Case1（無対策）に比べ、浅層曝気循環設備の設置基数を増加させるほど（Case2～Case4）クロロフィル a の値は小さくなった。ただし、Case4（設置基数6基）については、水質シミュレーションにおいて上流端に位置する⑤と⑥が水位低下時に湖底に着底する結果となった。すなわち実管理においては、水位低下の度に設備を水面上に巻き上げる必要があることから、管理の負担増や施設の故障が発生する可能性が懸念される。よって、所定の水質改善効果が期待でき、かつ、管理の負担軽減及び設置費のコスト縮減を踏まえるとCase3の設置基数4基が適切であると言える。

4. 浅層曝気循環設備の効率的な運用案の検討

4.1 浅層曝気循環設備の効率的な運用案の考え方

川上ダム環境レポートでは運用期間を4/1～10/31、曝

気水深を表層から15m一定としているが、運用条件を高度化することにより、更なる水質保全効果を発揮させるとともに、維持管理費の縮減を目的に効率的な運用案の検討を行った。

前述したように、曝気水深を表層から一定として連続運用した場合、運用初期は水温勾配が大きいため下層への潜り込み流量も大きい、水温勾配が小さくなると下層への潜り込み流量も小さくなり、アオコの抑制効果が不十分になる。この現象に対応するため、大山ダムでは、曝気水深を段階的に低水温の深層に移動させることで水温勾配を再び大きくし、下層への潜り込み流量を還元させる多水深運用の実証実験を継続中である。

そこで検討ケースとして、Case3（設置基数4基）の施設規模を同一とし、曝気水深を10mから25mまで段階的に降下させる多水深運用の考えと維持管理費縮減を目的とした運用期間を考慮したCase5（表-3）を追加した。図-5に曝気水深一定と多水深運用の比較図を示す。

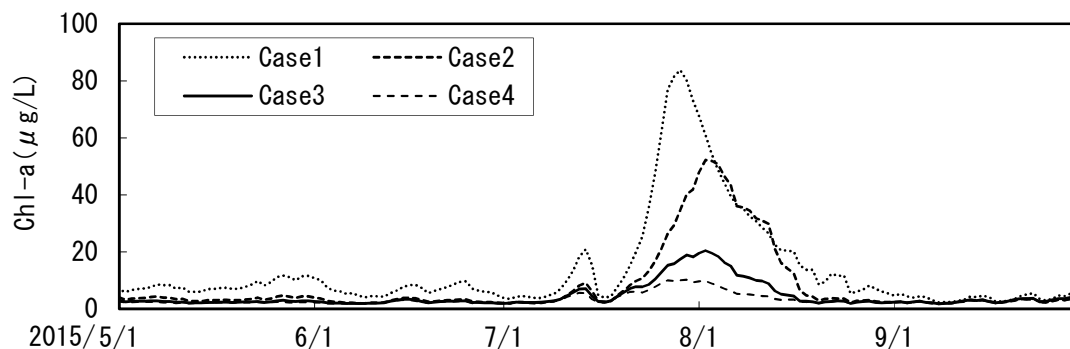


図-4 ダムサイト地点表層の水質予測結果 (Chl-a)

表-3 浅層曝気循環設備による多水深運用

運用期間	浅層曝気循環設備	曝気水深	備考
4月1日～	2基	水深15m	アオコ等の発生抑制を目的に運用を開始するが、制維持管理費縮減として2基にて運用
7月の梅雨明け後 (7/10～7/19)	4基	水深15m	梅雨明け後の水温上昇等によりアオコ等の発生の可能性があるため4基にて運用。ただし、日照時間が多くなる梅雨の中休み等、アオコ等の発生が確認または見込まれる場合は前倒しで実施
7月下旬 (7/20～7/31)	4基	水深17.5m	10日間隔の多水深運用に移行。アオコ等の発生が確認または見込まれる場合は、曝気水深の変更を前倒しで実施
8月上旬 (8/1～8/9)	4基	水深20m	
8月中旬 (8/10～8/19)	4基	水深22.5m	
8月下旬～9月下旬 (8/20～9/30)	4基	水深25m	
10月上旬～10/31 (10/1～10/31)	2基	水深25m	アオコ等の活性化が低いため、維持管理費縮減として2基を停止
10月中旬～31日	—	停止	アオコ等の発生が見込まれない場合に全基停止

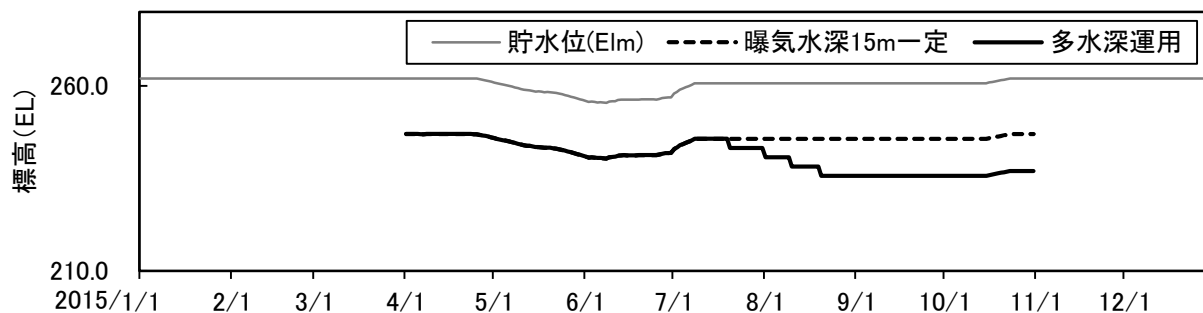


図-5 曝気水深一定と多水深運用の比較図 (曝気水深)

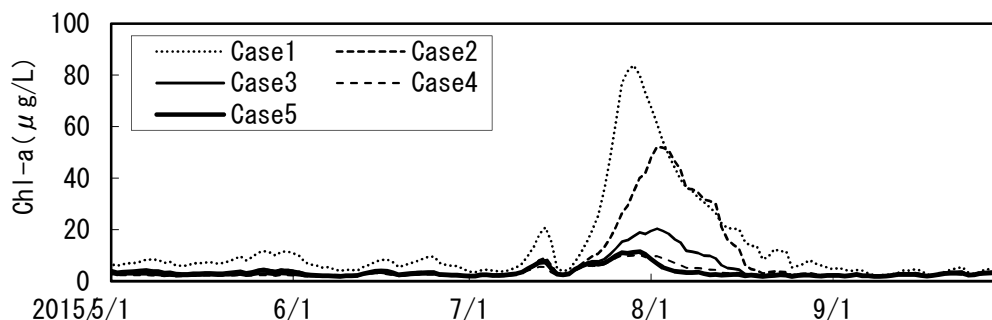


図-6 ダムサイト地点表層の水質予測結果 (Chl-a)

4.3 水質シミュレーションによる効率的な運用案

図-6 に示すとおり、Case5 (設置基数 4 基：多水深運用) は、Case3 (設置基数 4 基) に比べクロロフィル a の値が小さくなっており、Case4 (設置基数 6 基) と同程度の値となっていることから、設置基数 4 基で多水深運用を行うと、設置基数 6 基の運用と同程度の効果が期待できることがわかった。

また、Case3 (設置基数 4 基) の延べ運用日数は 856 日であるが、Case5 (設置基数 4 基：多水深運用) では 594 日となり 30%の縮減効果となり、594 日については、アオコ等の増殖が見込まれない場合の全基停止が考慮されていないことから、更なる延べ運用日数の削減が見込まれる。

5. まとめ

JWA モデルの曝気循環サブプログラムに新たな理論を追加改良することにより、これまで水質シミュレーションにおいて、水温勾配が小さい場合に曝気循環の効果を過大評価していた問題を改善することができたと言える。

川上ダムの浅層曝気循環設備の総排出空気量を同一とした場合、管理の負担軽減及び建設コストの縮減を踏まえると設置基数は 4 基が適切と言える。また、設置基数 4 基による多水深運用を行う事により、設置基数 6 基 (曝気水深 15m 一定運用) と同程度の効果が期待でき、延べ運転日数も 30%以上の縮減効果が見込まれることが分かった。

川上ダムにおいては、管理移行後、本検討を参考に多

水深運用を行いながら、水質調査によるモニタリングを行い、適宜運用を見直す順応的管理の手法を取り入れた適切な貯水池管理が重要と考えられる。

また、2018 年から大山ダムにて多水深運用の実証実験を行っており、これまでアオコ原因種である藍藻類の異常発生が見られなかった。2020 年も引き続き実証実験を行っており、その効果の確認状況により、曝気水深が変更可能な浅層曝気循環設備を有する水資源機構管内のダムにおいても、多水深運用の採用が有利と考える。

謝辞：JWA モデルの改良にあたり、国立大学法人鹿児島大学古里栄一特任准教授にご指導・ご助言をいただいた。ここに記して謝意の意を示す。

参考文献

- 1) 丹羽ら. 2013. 貯水池における水質予測技術の向上 (JWA モデルの開発). 水資源機構技術研究発表会
- 2) 古里ら. 2015. 貯水池気泡循環対策による広域水平密度流～低ブルーム数における実用式～. 土木学会論文集G(環境), Vol. 71, No. 7, III_455-III_466.
- 3) Asaeda, T. and Imberger, J. 1993. Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, J. Fluid Mech., Vol. 249, pp. 35-57.
- 4) 古里ら. 2018. 大量の圧縮空気を活用した気泡循環に関する現地実験—広域水平密度流の水温成層変形法による評価—. ダム工学 28(2), 86-97, 2018.