貧酸素改善を目的としたプロペラ式湖水浄化装置の適正吐出水量の推算

ゼニヤ海洋サービス株式会社 水環境研究部 正会員 〇西田秀紀 川本靖行 稲田精一

鳥取大学大学院工学研究科 黒岩正光

一般財団法人水源地環境センター 髙橋定雄 木村文宣

株式会社海洋開発技術研究所 城野清治 井手裕樹

1. はじめに

ダム貯水池や湖沼では、春季から秋季に水温成層が形成されると鉛直方向の水の混合が抑制されるとともに、底 層に沈降した有機物を微生物が分解する際に酸素を消費するため深水層において貧酸素化することが多い.このよ うな背景のもと、著者らは貧酸素化対策として、プロペラ式湖水浄化装置(以下、「プロペラ装置」)を開発し、現 地実証実験による貧酸素水域のD0改善効果を確認した¹⁾.

一方、これまでは貧酸素化の改善効果に着目してきたが、消費電力を削減して経済 性を考慮した適正な吐出水量を設定することも重要な技術的視点である.

そこで、本稿では、貧酸素水域の成層安定度と酸素消費速度を考慮して D0 改善に必要な適正吐出水量について検討したので報告する.

2. プロペラ装置による貧酸素水域の改善メカニズム

プロペラ装置は、溶存酸素の豊富な表層水を吸引し、送水管を通して表層水を底層部に 放出することによって、深水層の貧酸素改善を図るものである(写真-1、図-1). プロペラ 装置による流動現象は、図-2に示すように底層部に吐出された低密度の表層水は周辺の水 塊を連行しつつ上昇し、自らと同程度の密度の層(水温成層)に達した時点で水平方向に向 きを変えて密度流として平面的に広がる.これに伴い、供給された溶存酸素豊富な吐出水は 水温成層のキャッピング効果を受けて封じ込められ、深水層の貧酸素化は改善される.

このように、水温成層は鉛直混合を抑制し、プロペラ装置の吐出水塊を深水層に封 じ込める役割を果たす.したがって、深水層のDO改善効率を向上させるためには、水 温成層が減退しないように吐出水量を調整する必要がある.

3. 実証実験の概要

実証実験は、Aダム(総貯水容量3,080万m³、湛水面積109ha)のダム堤体から3.6 km上流にプロペラ装置を設置して行った.実証実験の概要を以下に示す.

- 実験期間:平成30年5/14~9/30(装置稼働開始5/15、連続稼働)
- ・プロペラ装置能力:吐出水量4,000m³/hr^{**1)}、モーター出力5.5kw
- ・調査項目:水温、DO(RINKO-Profiler ASTD102を使用)
- ・調査地点:ダムサイト No.1~貯水池上流部 No.7(装置下流 3.6 km~装置上流 2.5 km)

※1)本流量は、アオコ抑制対策を目的に設定されたものであり、貧酸素対策を目 的として設定したものではない.

4. 貧酸素水域の D0 改善効果

図-3 は、No.3 (プロペラ装置下流 130m)のプロペラ装置稼働前後のDOを図示したものである.図から分るように、装置稼働前(5/14)のEL.84m以深の層(EL.84m~73m)に貧酸素化(DO:5mg/1以下)がみられ、これを本稿では『深水層』と定義する.稼働開始後(5/16~)は、DOは徐々に回復し、稼働14日後(5/30)にはDOは7mg/1まで改善していることが分かる.

5. 貯水池内の酸素消費量とプロペラ装置による酸素供給効率

ここでは、プロペラ装置の適正な吐出水量の算定に必要な酸素消費量および酸素供給効率 について検討する.図-4 は、貯水池内の深水層における酸素収支を示したものである.な お、酸素収支には、藻類の生産活動が酸素収支に影響を及ぼさないとする².

ここで、 Q_0 : プロペラ装置による酸素供給量、 Q_1 : 深水層の酸素消費量、 Q_2 : 深水層の酸 素回復量、 Q_3 : 深水層から表層への酸素移流量、 Q_4 : 放流量(本稿では無視する)であり、 深水層において $Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$ の関係を満足する(単位: kg/日).

(1)酸素消費量の推算

貯水池全体の酸素消費量 Q1は、次式で算定される.

$$Q_1 = \frac{d}{dt} \bigg|_{\mathcal{B}} \int_{Y_B}^{Y_H} C_o(Y) A(Y) dY$$
[1]

ここで、*C₀(Y)*: DO 濃度分布の観測値、*A(Y)*:標高 Y の貯水池面積、

 Y_B : 深水層下層面の標高(EL. 73m)、 Y_H : 深水層上層面の標高(EL. 84m)、 $(d/dt)\Big|_{\mathcal{BE}(m)}$: プロペラ装置設置前の時間変化率

なお、酸素消費量 Q₁の算定には、プロペラ装置設置前の平成 21 年の月別 DO 鉛直データを用いた.

図-5 は、Q₁の季節変化(5月~9月)を示したものである.図より、盛夏期には春秋期の約2倍(420kg/日)の キーワード:貧酸素対策、湖水循環装置、低コスト、成層安定度、適正吐出量

連絡先: ゼニヤ海洋サービス㈱ 東京都中央区八重洲 2-7-12 Tm. 03-3510-2631 FAX. 03-3510-2632







図−2 プロペラ装置による流動現象



図-3 DO 分布の時系変化



図-4 貯水池内の酸素収支

酸素が消費され、夏期に有機物による嫌気的な分解が特に進んでいることが分かる. (2) プロペラ装置による深水層への酸素供給効率

図-4を考慮し、プロペラ装置による酸素供給効率 R_{ℓ} および散逸率 R_{ℓ} は、上記で推算 された Q_{ℓ} 、酸素供給量 Q_{ℓ} および酸素回復量 Q_{ℓ} を用いて次式で定義される.

$$R_E = \frac{(Q_1 + Q_2)}{Q_0} \times 100(\%) \quad [2] \qquad R_L = 100 - R_E \quad [3]$$

なお、酸素供給量 Qoは、プロペラ装置の吐出水量と表層水 D0 の濃度の積により、酸素回復量 Qoは次式により算定した.

$$Q_2 = \frac{d}{dt} \bigg|_{\text{REMME}} \int_{Y_B}^{Y_H} C_0(Y) A(Y) dY \quad [4]$$

ここで、(d/dt) _{稼働後}:プロペラ装置稼働後の時間変化率

図-6は、酸素供給効率 R_Eおよび散逸率 R_Lの季節変化(5月~9月)を示したものである. 図から R_Eは、7月以降、急激に減少していることが分かる.

6.酸素供給効率に対する成層安定度の影響

前述のように、酸素供給効率 R_eは、水温成層の状態と大きく関係する. つまり、成層の安定度と R_eの関係を定量的に評価すれば、より正確に適正な吐出水量を推定することができる. 水温成層が発達した状態(図-7 の A)における成層の安定度(成層安定度 S)は、A の熱量を 維持したまま混合させた仮想的な一様密度分布(図-7 の B)を考慮し、次式で算定される³⁾.

$$S = \int_{Y_B}^{Y_S} \{\rho_m - \rho(Y)\} g(Y - Y_B) A(Y) dY \quad [5] \qquad \rho_m = \frac{\int_{Y_B}^{Y_S} \rho(Y) A(Y) dY}{\int_{Y_B}^{Y_S} A(Y) dY} \quad [6]$$

ここで、*Y_s*:水面標高、*g*:重力加速度である. ρ_mはBにおける密度であり[6]式により定義される. 図-8 は、成層安定度*S*と酸素供給効率 *R_e*の季節変化を示したものである. 図より、両者は 強い相関を示すとともに7月以降急速に減少していることが分る. これは、プロペラ装置稼 働開始初期、溶存酸素は水温成層のキャッピング効果により深水層に封じ込められていたが、 7月以降、過剰な吐出水量により成層安定度が低下し(鉛直混合しやすい状態となり)、深水 層の溶存酸素が系外へ散逸されたためと考えられる.

7. 適正吐出水量の算定

適正酸素量 Q_vは、酸素消費量の実績値 Q₁を上回るように酸素要求量 Q_{co}を安全側に設定し、 深水層への酸素供給効率 R_Eを考慮して次式により算定する.

$$Q_N(t) = \frac{Q_{CO}(t)}{R_F(t)/100}$$
 [7]

7月以降、成層安定度が低下し鉛直混合しやすい状態になった実情を勘案して、適正吐出水量の 算定期間を2期(i)5月~6月、(ii)7月~に分割し、期間ごとのQ_i(t)を以下のように設定する. まず、図-5のQ_iの実績値よりも安全側となるように、各期における酸素要求量Q_i(t)を同図中の

ように設定する. 次に、酸素供給効率 $R_{\rm c}$ は、キャッピング効果の強弱より以下のように設定する. ・(i):実績を下回る安全側の値に設定 ($R_{\rm c}$ =70%)

・(ii):キャッピング効果を維持したと仮定して(i)の値を採用

このように設定された諸元と[7] 式から算定される5月~8月の適正吐出水量を表-1に示す. 表より、適正吐出水量は、5月~6月が1,430m³/hr、7月~8月が2,770m³/hr となり、季節による 酸素消費量の違いによって異なることが分かる.なお、適正吐出水量のは、次式で算定される.

$$Q_T(t) = Q_N(t) / C_{os}(t)$$
 [8] ここで、 $C_{os}(t)$:表層の DO 観測値である.

8. おわりに

本稿により得られた結論を以下に示す.

- 1) 成層安定度 Sと酸素供給効率 Reは、相関性が強いことを確認した.
- 2)酸素供給効率 R_Eが成層安定度 Sに依存することを考慮して、適正吐出水量の 算定方法を提案した.

9. 課題·展望

1)5月~6月の適正吐出水量下における長期のR_EおよびSを検証する必要がある.
 2)吐出水量の調整は、成層安定度を考慮し、運転/停止を間欠的に繰り返す方法の検討も重要である.

参考文献:

- 1) 西田秀紀他: プロペラ式湖水浄化装置による貧酸素水域の改善効果について(その2)、第74回年次学術講演会、pp. VI 963-964、2019
- 2) 道奥康治他:酸素マイクロバブルを用いた貯水池の水質浄化システム、水工学論文集、第50巻、pp.1357-1362、2006

3) 有田正光編著:水圏の環境、pp.116-121









図-7 成層安定度を定義 するための密度分布



表-1 適正吐出水量の設定

		5-6月	7月~8月
酸素供給効率R _E	[%]	70	(仮定) 70
酸素要求量Qco	[kg/日]	300	450
適正酸素量Q _N	[kg/日]	429	643
適正吐出水量Q ₁	$[m^3/ \exists]$	34, 290	66,280
	$[m^3/hr]$	1,430	2,770