

# 気泡循環対策の施設規模指標に関する理論構築における予備的考察

鹿児島大学 正会員 ○古里 栄一  
鹿児島大学 曹 磊  
水資源機構 久納 誠  
水資源機構 今本 博臣  
鹿児島大学 奥西 将之  
鹿児島大学 前田 広人

## 1.はじめに

気泡循環対策は、水資源開発施設の貯留水品質管理における重要な手法である。的確な本対策の適用のためには、工学的適用が効率的に可能であるとともに、十分な学術的根拠に基づく指標が有用である。実用上は施工据付前の段階における基本設計と、稼動後の管理指標とが必要である。本発表では、前者の基本設計指標のうち、吐出空気量と基数からなる施設規模を対象とする。

後述するように、近年わが国では経験的な指標である以下の  $k$  値(丹羽ら 1995)が使用されることがあり、水資源機構ダムでは多くの水域で有害藍藻類の抑制に成功している(今本ら 2013)。

$$k = \frac{\sqrt{Q_{0-P}}}{A_{s-P}} \quad (1)$$

ここで、 $Q_{0-P}$ : 大気圧下での吐出空気量[NL/min.],  $A_{s-P}$ : 夏季の湛水面積[km<sup>2</sup>]である。ここでは、空気量と湛水面積は、実用単位系であることを示すために添え字の-Pを付した。

現在は目標とする  $k$  値は経験的な数値が使用されているが、費用対効果の高い的確な対策実施のためには、理論的な目標  $k$  値が必要である。図1に、実貯水池における  $k$  値と流入リン濃度との関係を示す。図よりわかるとおり、概ね200から300を境にして、対策効果の発現状況が変わること、この遷移区間では流入栄養塩濃度の上昇に応じて効果が得られる  $k$  値が高くなる傾向が伺える。図中破線は、効果の有無に関する境界線を示したものである。ただし、この境界は図のキャプションに示したような条件あくまで暫定であり、この線に基づく基本設計を推奨するものではない。本発表では目標  $k$  値の理論構築を行なう上での基礎としての幾つかの考察等を行なった結果について報告するものである。

## 2.施設規模基本設計にかかる先行知見と課題

気泡循環対策は、artificial circulation (Lorenzen and Fast, 1977, Pastorok et al, 1982, Coocke et al., 2005) や曝気循環対策(国土交通省2005, 2018)として、国内外で数10年以上前から主要な富栄養化対策手法として適用されるとともに(国土交通省2005, 2018)、様々な学術・技術的な膨大な研究・開発が実施されてきた。この中から、上述した施設規模の設計方針として、以下の事例が存在する。気泡循環対策の基本設

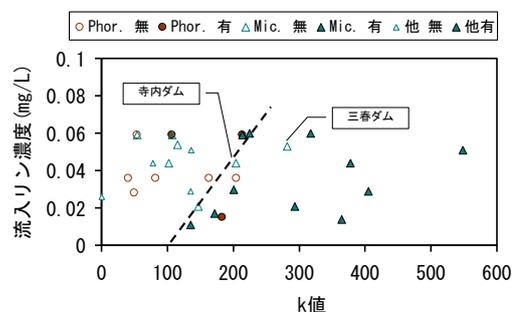


図-1 施設規模( $k$ 値)と流入河川水リン濃度の関係(塗潰しは効果有り、白抜きは効果が認められなかった事例を示す。)(データは、今本ら(2013)より)(旧名) *Phormidium* 属については、 $k$ 値との明確な関係がデータ範囲では認められないために、境界線は *Microcystis* に関するものである。また、ダム名を記した境界線の定義からはずれる2データは、共に浅い入り江がアオコ発生源と想定される水域である。こうした貯水池形状特性に加え、取水放流や貯水位変動等の影響が含まれていないことに留意が必要である。

計における要素としては、対策目的である混合状態形成における混合水深の設定方法(Lorenzen and Fast, 1977, Pastorok et al, 1982, 上田ら2005, 古里ら2017)や、施設規模としての吐出空気量(国土交通省2005, Pastorok et al, 1982)に加え、流体力学的観点から高いエネルギー効率を確保できる1基あたり空気量の設定方法(Asaeda and Imberger 1993)などが存在する。また、鉛直次元モデル(森北ら1987)や二次元モデル(梅田2005)実務的には数値解析モデルを用いて数値実験的に水質保全目標を満たす施設規模を設定される方法が多い。

こうした中で土木研究所により約25年前に提唱された  $k$  値(式1)が近年は水資源機構ダムで用いられており、適切な  $k$  値を満たす施設規模とすることにより多くの多目的ダムにおいて有害藍藻類の抑制に成功している(今本ら2013)。 $k$  値は単純な式で得られるとともに、数値解析モデルの複雑性に伴うパラメータ設定の恣意性や解析作業負荷の大きさを回避できるという優位性がある。ロバストな指標であることから、一つの設計手法として有用性が高い。しかも、式1および以下の簡易な考察からわかるとおり、吐出空気量と気泡噴流量が線形ではなく、ほぼ空気量の1/2乗に比例するという水理学的な特性が考慮されており、これらは海外の設計法の事例でも見当たらない点である。また図1からわかるように、概ね300以上の  $k$  値であれば対策効果は得られる可能性が極めて高いことも経験的に明ら

かである。しかしながら、経験値であることから、過剰性能設計となる可能性も存在する。これは直ちに施設設置費の増加につながり好ましくない。また、k値式で用いられる数値はSIではなく実用単位系であるために、理論的な考察では見通しが悪い。これらの2課題について、本発表では簡易な考察を行なう。

### 3.k 値の水理学的特性

気泡噴流で生じる広域水平密度流の影響を最も単純に表現すれば、気泡循環で生じる広域水平流量と貯水容量との比として、循環時間を  $\tau_s$  とすれば、古里ら(2015)の解析と同様に下式となる。なお、本論文では、広域水平密度流の3層構造の中で植物プランクトンのハビタットである表層部を対象とするために、添え字をsとする。

$$\tau_s = \frac{V_s}{Q_s} \quad (2)$$

ここで、 $V_s$ は表層容量、 $Q_s$ は気泡循環で生じる広域水平密度流のうち、表層の集約的流動の流量である。

また単純化して表層容量は湛水面積( $V_s$ )に比例するとする。

$$V_s \propto A_s \quad (3)$$

次に $Q_s$ については、吐出空気量( $Q_0$ )のべき乗数で表すとし、室内実験と現地調査を含む多くの知見から得られた1/2乗則(古里ら2015)を用いれば、以下の通りとなる。

$$Q_s \propto Q_0^{1/2} \quad (4)$$

以上より、下式の通りk値は時間の逆数に関連する単位を潜在的に有している。つまり気泡循環による広域密度流発生時の回転率に関係する。

$$\tau_s \propto \frac{A_s}{\sum \sqrt{Q_0}} = \frac{1}{k} \quad (5)$$

### 4.k 値の単位系の整理

実務で用いられるk値式はSI単位ではなく、工学的実用単位として、空気量は民生品コンプレッサーの諸元で用いられるNL/min.が、湛水面積は大型ダム諸元で用いられる $\text{km}^2$ が使用されている(丹羽ら1995)。

ここで、従前用いられているk値を実用的単位系k値として $k_p$ とし、SI単位系数値のk値を $k_{SI}$ とすれば、以下の通りとなる。なお、 $k_p$ 式で用いる空気量と湛水面積は、実用単位系であることを示すために添え字の-Pを付した。単位の違いより $\alpha$ は $4.1 \times 10^{-9}$ となる。

$$k_p = \frac{\sum \sqrt{Q_{0-P}}}{A_{s-P}} = \alpha \frac{\sum \sqrt{Q_0}}{A_s} = \alpha k_{SI} \quad (5)$$

なお、用いる数値に応じて、それぞれのk値の単位は $(\text{NL}/\text{min.})^{0.5}/\text{km}^2$  ( $k_p$ )、 $(\text{ms})^{-1}$  ( $k_{SI}$ )である。SI単位系を用いても力学的な意味が明確ではないが本質的には上で考察したように時間の単位を潜在的に有すると考えるべきである。また、 $\alpha$ の数値から明らかな通り、もしSI単位系を用いるとk値の値は大きなべき乗

数となり、実務者には扱いづらい数値である。このため、工学的実用においては、従前用いられてきた単位系のk値の有用性があると思われる。

### 4.今後の課題

気泡循環対策の施設規模の指標であるk値に関する理論的考察を行い、要求されるk値の理論化が必要である。

**謝辞:**本研究の一部は河川財団河川基金助成事業および高橋産業経済研究財団研究助成事業、水資源機構総合技術センター受託研究、琉球大学国際沖縄研究所 共同利用・共同研究事業、ダム技術センター共同研究により行われた。ここに記して謝意を示す。

#### 【参考文献】

- 1) 丹羽薫, 久納誠, 久保徳彦, 真田誠至: 流動制御システムに関する実験, 土木研究所資料, 第3375号, 101-102, 1995.
- 2) 今本博臣, 田作光良, 古里栄一: 曝気循環によるアオコ、カビ臭抑制の効果検証—9 ダム貯水池の実証実験結果から—, ダム工学, Vol.23, No. 4, pp.278-289, 2013.
- 3) Lorenzen, M. and Fast, A.: A Guide to Aeration/Circulation Techniques for Lake Management, EPA-600/3-77-004, 1977.
- 4) Pastorok, R.A., Lorenzen, M.W. and Ginn, T.C.: Environmental aspect of artificial aeration and oxygenation of reservoirs: A review of theory, techniques, and experiences, 192pp., NTIS Technical Report, E-82-3, 1982.
- 5) Cooke G.D., Welh E.B., Peterson S.A. and Nicholds S.A.: Restroration and management of lakes and reservoirs, 3rd ed. CRC, 591p, 2005.
- 6) 国土交通省河川局: 曝気循環施設及び選択取水設備の運用マニュアル(案), 平成17年10月版, 2005.
- 7) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課: ダム貯水池水質改善の手引き 平成30年3月, 2018.
- 8) 上田倫子, 吉田延雄, 横山繁樹, 澤田寿: 曝気式循環施設における混合水深の考え方の一考察, ダム工学, Vol. 15, No.1, 5-13, 2005.
- 9) 古里栄一, Bhuyan, J. K., Marteinsen, M., Nixdorh, B., 今本博臣: 新しい臨界水深評価手法としての修正Sverdrup式—気泡循環の吐出水深設計指針として—, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No. 4, I\_985-I\_990, 2017.
- 10) Asaeda, T. and Imberger, J.: Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, Journal of Fluid Mechanics, 249, pp. 35-57, 1993.
- 11) 森北佳昭, 畑孝治, 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1), 建設省土木研究所ダム部水資源開発研究室, 土木研究所資料第2443号, 1987.
- 12) 梅田信: 曝気循環を考慮した貯水池内流動に関する数値解析モデルの構築と検証, 水工学論文集, 第49巻, pp. 1165-1170, 2005.
- 13) 古里栄一, 久納誠, 丹羽薫, 梅田信: 貯水池気泡循環対策による広域水平密度流 ～低プ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, 2015.