

曝気循環対策の施設規模に関する簡易式について

埼玉大学大学院理工学研究科 正会員 ○古里 栄一
財団法人 琵琶湖 淀川水質保全機構 正会員 久納 誠
財団法人 全国建設研修センター 正会員 丹羽 薫
埼玉大学大学院理工学研究科 正会員 浅枝 隆

1. はじめに

曝気循環対策は富栄養化した貯水池等における藍藻類の増殖抑制対策として有効な手法であり適用例も多い。効率的な適用のためには、貯水池規模に応じた施設規模を導入することが必要である。こういった観点の指標としては、湛水面積と吐出空気量とを用いた k 値(丹羽ら 1995a)が提案されているが、 k 値がどういった水理状態に相当するのかは明らかではない。対策による影響や効果を見積もる上では、 k 値と水理条件との対応が明らかになると有効である。本報告は、既往知見に基づいて k 値と循環率との関係を考察したものである。

2. k 値の概要

式 1 に、 k 値の算定式(丹羽ら 1995a)を示す。

$$k = \frac{\sum \sqrt{Q_B}}{A'} \quad (1)$$

ここで、 k : 貯水池規模と曝気循環装置の規模の比率を表す施設規模の指標、 Q_B : 曝気循環装置 1 基あたりの空気量[NL/min.]、 A' (夏季における)湛水面積[km²]である。式 1 の分子は循環流量の規模を示している。平方根は循環水量は空気量の概ね平方根に比例する(丹羽ら 1995b)特性を表現したものである。また、曝気水深は一般に藍藻類の増殖抑制効果を得るために 15~20m であることから、式 1 の分母は循環作用を及ぼす貯水容量の規模を示している。したがって、 k 値が大きいほど貯水池規模に対して曝気循環装置による循環混合度合いが大きいことになる。

式 1 を MSG 単位系に直せば、 Q_B [NL/min.] = $6 \cdot 10^4 \cdot Q_B$ [Nm³/s] および A' [km²] = $10^{-6} \cdot A$ [m²] より式 2 となる。

$$k = 2.45 \cdot 10^8 \frac{\sqrt{Q_B}}{A} \quad (2)$$

ここで、 Q_B : 曝気循環装置 1 基あたりの空気量 [Nm³/s]、 A (夏季における)湛水面積[m²]である。 τ との関係考察のために、式 2 を Q_B の形に直すと以下の通りである。

$$Q_B = 0.167 \cdot 10^{-16} \cdot k^2 \cdot A^2 \quad (3)$$

3. 循環時間(τ)

曝気循環流によって湖水が 1 回循環する時間を循環時間(τ)と定義し、式 4 で表現する。

$$\tau = \frac{V}{Q_w} \quad (4)$$

ここで、 τ : 曝気循環流の循環時間[s]、 V : 空気吐出

口上部の湖水容量[m³]、 Q_w : 曝気循環装置によって生じる循環流量[m³/s]である。

4. τ と k との関係の考察

以下に示すいくつかの仮定に基づいて τ と k との関係を考察した。なお、曝気循環装置によって生じる循環流量については、密度成層場において生じる二重の気泡噴流(Double Plume)の構造と規模を直接解く方法(Asaeda & Imberger 1993)も開発されているが、本研究は k 値と τ の関係を概略的に把握することを目的としていることから、解析的な扱いが可能な近似式を用いることとした。こういった近似式は室内実験や現地観測等に基づいたいくつかの方法が提案されているが、ここでは多くの実験および現地観測データより得られた経験式(浅枝ら 1991)および、広域的に生じる中層密度流(intrusion)を測定した土研式(丹羽ら 1995b)の複数の式を用いた。

4.1 貯水容量

貯水容量は、水深方向の貯水面積の減少による立方体からの偏差率(r_v)を用いて下式で近似した。

$$V = r_v \cdot A \cdot H \quad (5)$$

ここで、 r_v : 水深方向の貯水面積の減少による立方体からの偏差率[-]、 A : 湛水面積(表層の水面積)[m²]、 H : 曝気水深[m]である。

4.2 曝気循環装置によって生じる循環流量

(1) 浅枝らの式

式 6 に浅枝ら(1991)による循環流量の近似式を示す。これは、既往知見も含めて気泡流量としては $1.83 \times 10^{-7} \sim 6 \times 10^{-1}$ [m³/s]、曝気水深としては 0.4~50[m] の範囲の数多くの観測データを用いて得られたものである。ただし、密度成層していない条件における連行流量である。

$$Q_w = 0.302 \cdot \left(\frac{H}{L_m} \right)^{4/3} \cdot Q_B \quad (6)$$

ここで、 Q_w : 曝気循環装置によって生じる循環流の流量[m³/s]、 H : 曝気水深[m]、 L_m : 気泡の浮力の長さスケール[m]である。 $(L_m = (Q_B^2/g)^{1/5})$

式 6 を曝気水深と空気量で整理すれば下式となる。

$$Q_w = 0.56 \cdot H^{4/3} \cdot Q_B^{7/15} \quad (7)$$

(2) 土研式

丹羽ら(1995b)は、現地観測や数値解析に基づいて、気泡噴流そのものではなく貯水池全域に影響を与える広域的な密度流の規模を定式化している(式 8)。

$$Q_w = 0.54 \cdot H \cdot Q_B^{1/2} \cdot \Delta r^{1/2} \quad (8)$$

ここで、 Q_w 曝気循環装置によって広域的に生じる中間密度流(intrusion)流量[m³/s]、 $\Delta \rho$ 曝気吐出口上部と表層の密度差[g/cm³]である。MSG 単位系にすれば式 8は、

$$Q_w = 132.3 \cdot H \cdot Q_B^{1/2} \cdot \Delta r_B^{1/2} \quad (9)$$

となる。

4.3 τ と k 値との関係

浅枝らの式(式 7)を用いた場合は、 τ は下式で表現される。

$$t = 1.786 \cdot r_v \cdot \frac{A}{H^{1/3} \cdot Q_B^{7/15}} \quad (10)$$

式 3 を代入すれば、 τ は k 値の関数として式 11 で表現される。

$$t = 1.22 \cdot 10^8 \cdot r_v \cdot \frac{A^{1/15}}{H^{1/3} \cdot k^{14/15}} \quad (11)$$

また、土研式(式 9)を用いた場合は、 τ と k 値との関係は下式で表現される。

$$t = 75.6 \cdot 10^{-4} \cdot r_v \cdot \frac{A}{Q_B^{1/2} \cdot \Delta r^{1/2}} \quad (12)$$

式 12 に式 3 を代入すれば、

$$t = 185 \cdot 10^4 \cdot \frac{r_v}{\Delta r^{1/2} \cdot k} \quad (13)$$

となる。

図 1 に、式 11, 13 に基づいて、 k 値と τ の関係を示す。一般的な貯水池の条件を想定して、 r_v は 0.5[-]、 A は 10⁶[m²]、 H は 15[m]とした。土研式(式 13)における密度差は同一貯水池であっても時間的に変動することから、複数の密度差条件を解析した。曝気循環対策時に生じる可能性がある条件として、 N^2 (浮力周波数)= 1×10^{-3} 、 5×10^{-4} 、 1×10^{-4} [s⁻²]を用いた。なお、これらは、水温差にして概ね 0.8℃、3.8℃、7.7℃に相当する。式 7 と式 9 の循環流量の規模の違いによって両式で数値は異なる傾向はあるが、いずれの場合においても k 値の増大に応じて循環流量は増加することから、滞留時間は減少する。また、一般的に藍藻類の増殖抑制効果のあるとされる k 値が 200 から 300 の範囲(有馬ほか 2005)では、循環層全体の循環時間として 5 日以下であると推定される。

5. 藍藻類増殖抑制効果との関係

図 1 よりわかるように、土研式を用いた場合には密度勾配に応じて同じ施設規模でも倍以上の τ の変動がある。近年の現地貯水池における曝気循環対策時の藍藻類と成層強度(浮力周波数)との関係より $N^2 < 10^{-4}$ [s⁻²]において藍藻類の増殖が抑制されることが明らかとなっている(古里ら 2003)。しかしながら、図 1 よりわかるように、こうした弱い成層強度では土研式では循環流量が少なく推定されるために、滞留時間が長くなってしまいう傾向がある。しかし、施設規模あたりの循環水量の増加という観点から例えば 10^{-3} [s⁻²]レベルの強い成層状態が好ましいと判断することは正しくない。循環流の形成は藍藻類の増殖抑制のための手段であることから、対策適用にあたっては、藍藻類の増殖抑制を図ることのできる条件を確保すべきである。

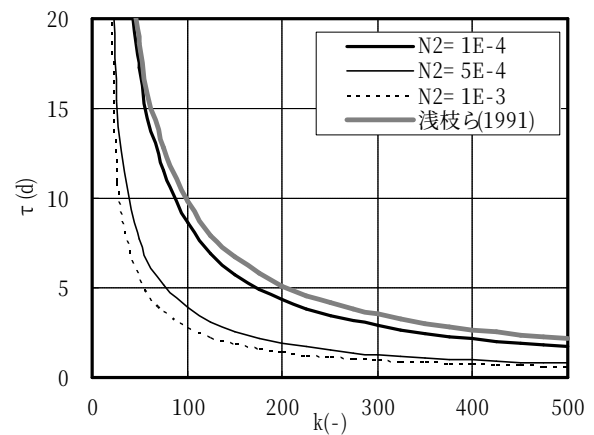


図 1 k 値と循環時間(τ)との関係

6. 課題

本研究により、施設規模の指標と循環混合層の循環時間との関係が明らかとなった。しかしながら、適性施設規模の明確化という観点からは以下の課題がある。藍藻類の増殖抑制のためには、暗所における藍藻類の枯死(Furusato et al. 2004)と表層における安定成層の形成抑制を図る必要がある。曝気循環対策実施時には水平方向の 3 層流が生じることから、これら各層における循環時間と上記要素との関係を考慮した研究が必要である。さらに、適切な施設規模については現地調査や数値解析等の多面的な解析判断手法により明らかにする必要がある。

参考文献

- 有馬慎一郎・佐々木弘二・福崎彰・古里栄一・浅枝 隆 (2005) 寺内ダムにおける曝気循環装置による藍藻類増殖抑制対策に関する考察 (I 曝気循環施設規模と藍藻類の抑制効果との関係), 土木学会年次学術講演会講演集, VII, 135-136.
- 浅枝隆・池田裕一・J. Imberger (1991) 不連続な密度界面を持つ成層中におけるBubble Plumeの挙動と成層の時間推移, 土木学会論文集, No.438/II-17, 23-30.
- Asaeda, T. and Imberger, J. (1993) Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, *Journal of Fluid Mechanics*, **249**, 35-57.
- Furusato E., Asaeda T. & Manatunge J. (2004) Tolerance for prolonged darkness of three phytoplankton species, *Microcystis aeruginosa* (Cyanophyceae), *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyceae), and *Melosira ambigua* (Bacillariophyceae), *Hydrobiologia*, **527**, 153-162.
- 丹羽薫・久納誠・久保徳彦・真田誠至(1995a)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.
- 丹羽薫・久納誠・古里栄一(1995b)流動制御によるダム水質保全対策におけるシミュレーション手法の検討, 環境システム研究, **23**, 157-168.
- 古里栄一・浅枝隆・須藤隆一 (2003) アンテナ色素の吸光特性に基づく藍藻類の光学のおよび水理学的発生条件に関する現地データを用いた考察—アンテナ色素・浮力周波数仮説—, 水環境学会誌, **26**, 285-293.