

# 藍藻類の増殖抑制効果に対する曝気循環対策の 施設規模の影響

## STUDY OF FACILITY SCALE FOR PREVENTION OF WATER BLOOM BY ARTIFICIAL CIRCULATION

後藤 浩一<sup>1</sup>・古里 栄一<sup>2</sup>・浅枝 隆<sup>3</sup>

Kouichi GOTOU, Eiichi FURUSATO and Takashi ASAEDA

<sup>1</sup>正会員 独立行政法人水資源機構 総合技術推進室 (〒338-0812 さいたま市桜区大字神田936)

<sup>2</sup>正会員 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-0825 さいたま市桜区下大久保255)

<sup>3</sup>正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科 (〒338-0825 さいたま市桜区下大久保255)

We investigated the relationship between the abundance of cyanobacteria and stratification intensity ( $N^2$ ) in three eutrophicated reservoirs in which an artificial circulation system had been installed and the effects of the facility scale on that relationship. Cyanobacteria markedly increased when  $N^2$  was above  $10^{-4}$  [ $s^{-2}$ ] in all three reservoirs whether the artificial circulation was installed or not. A certain facility scale was needed for the decrease of  $N^2$ . Sufficient decrease in  $N^2$  by the facility occurred in the reservoir in which cyanobacteria was prevented. The appropriate facility scale to decrease  $N^2$  was considered to be related to the internal Froude number inherent in each reservoir.

**Key Words:** artificial circulation, cyanobacterial bloom, stratification intensity, facility scale

### 1. はじめに

富栄養化したダム貯水池における藍藻類の異常発生の抑制対策として、圧縮空気を貯水池の深部から放出して貯水池の水温成層を制御する曝気循環対策<sup>1)</sup>が多くのダムで適用されている<sup>2)3)</sup>。しかしながら、全ての場合において藍藻類の増殖抑制が達成されているわけではない<sup>4)5)</sup>。この原因の一つとしては、曝気循環対策による効果の発現機構が複雑であるために、合理的な設計・管理指針が明らかになっていないことが考えられる。

曝気循環対策は、気泡噴流によって生じた密度流で貯水池全域の水理環境を制御することによって、間接的に植物プランクトンの生育環境を変化させて藍藻類の増殖を抑制する手法である。水質障害を引き起こす *Microcystis* 属や *Phormidium* 属は、競合戦略において安定した成層を要求するという性質が数多く指摘されている<sup>5,6,7,8)</sup>。そうした観点からの曝気循環対策による対策効果も報告されている<sup>9)</sup>。したがって、藍藻類が増殖しにくい成層強度の低下を達成するという観点からの、計画論および管理論の構築が考えられる。このためには、曝気循環装置の施設規模と、水理学的過程を通じた生態学的現象との因果関係を定量的に明らかにする必要がある。

こうした目的のためには様々な検討・実験手法が有効であろうが、現地データより経験的な関係性を見いだすことも有効であると考えられる。梅田ら<sup>5)</sup>は、富栄養化した貯水池において藍藻類の増殖を抑制することが可能な成層強度について現地データを用いて検討を行っているが、施設規模との関係については課題が残る。本研究においては、曝気循環装置の設置された複数のダム貯水池における現地データを用いて、成層強度と藍藻類の現存量の関係について検討するとともに、曝気循環装置による成層強度への影響を検討し、藍藻類の増殖抑制を達成することのできる曝気循環装置の施設規模に関する考察を行うものである。

### 2. 対象データの概要

#### (1) ダム貯水池

検討対象としたダム貯水池は、水資源機構所管ダムの中で藍藻類の増殖に伴う水質障害の抑制を目的として散気方式の曝気循環装置が設置されている3ダムとした(表-1)。群馬県に位置するKSダムは、流域面積254km<sup>2</sup>、堤高140m、堤頂長405m、総貯水容量60,500,000m<sup>3</sup>の重力式コンクリートダムである。KSダム貯水池において

表-1 検討対象ダムにおける曝気循環装置の適用状況および施設規模

| ダム名称              | 導入時期および基数                              | 曝気循環施設         | 湛水面積 (km <sup>2</sup> ) <sup>a</sup> | 施設規模 (k値) <sup>b</sup> |
|-------------------|--|----------------|--------------------------------------|------------------------|
| KSダム              | 1994年 1基, 1995年 1基, 1996年 2基, 1997年 1基 | 2400NL/min.×5基 | 1.26                                 | 195                    |
| TKダム              | 2001年 1基, 2003年 1基, 2004年 2基           | 5600NL/min.×4基 | 1.4                                  | 214                    |
| TRダム <sup>c</sup> | 1999年 1基, 2003年 1基                     | 3700NL/min.×2基 | 0.59                                 | 203                    |

<sup>a</sup>夏季の湛水面積として、KSおよびTKダムは洪水期制限水位を、TRダムは常時満水位時の湛水面積を用いた。

<sup>b</sup>各ダムにおいて曝気循環装置は段階的に導入されたが、ここでは全基導入後の施設規模を示した。

<sup>c</sup>TRダムにおいては、1995～1997年の3カ年は、同規模1基の施設が実験的に1～2ヶ月稼働していた。

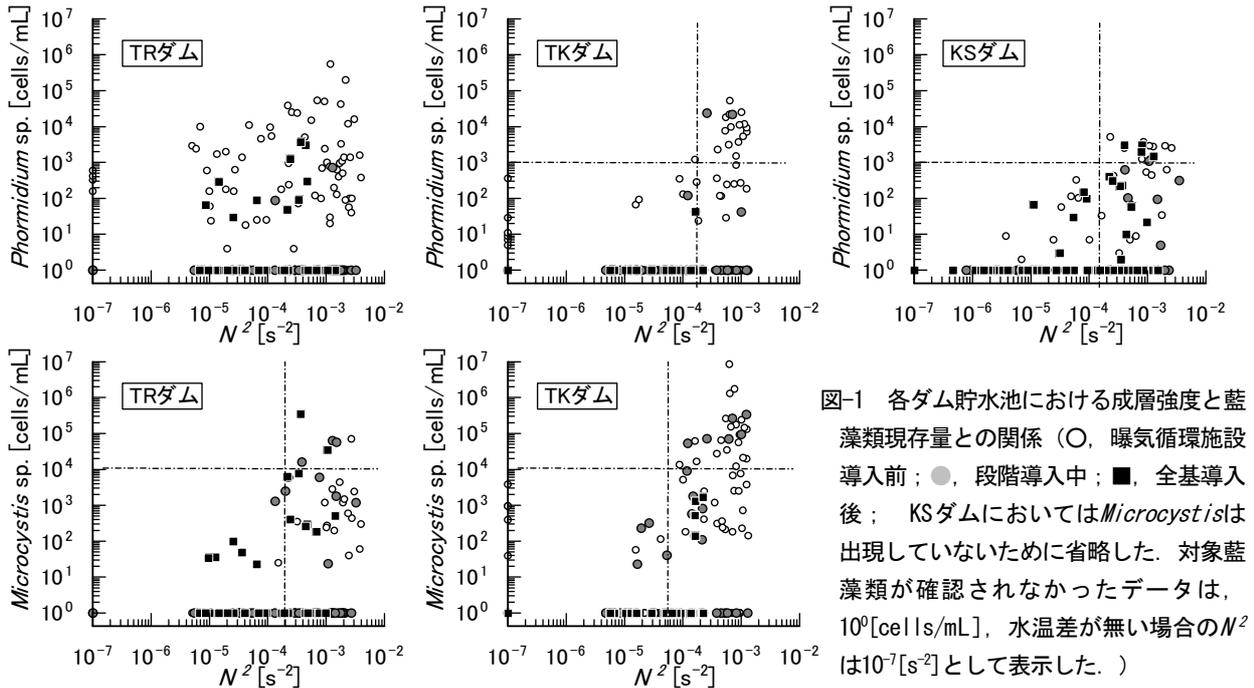


図-1 各ダム貯水池における成層強度と藍藻類現存量との関係 (○, 曝気循環施設導入前; ●, 段階導入中; ■, 全基導入後; KSダムにおいてはMicrocystisは出現していないために省略した。対象藍藻類が確認されなかったデータは、10<sup>0</sup>[cells/mL]、水温差が無い場合のN<sup>2</sup>は10<sup>-7</sup>[s<sup>-2</sup>]として表示した。)

はPhormidium属によって生産された2-MIBによる異臭味障害が発生していた。京都府に位置するTKダムは、流域面積615km<sup>2</sup>、堤高67m、堤頂長208.7m、総貯水容量56,800,000m<sup>3</sup>のアーチダムである。TRダムは、福岡県に位置する流域面積51km<sup>2</sup>、堤高83m、堤頂長420m、総貯水容量18,000,000m<sup>3</sup>のロックフィルダムである。TKダムおよびTRダムの両貯水池においては、KSダム貯水池と同じくPhormidium属の増殖に加えて、主にMicrocystis属によって発生したアオコによる景観障害が発生していた。

## (2) 使用データ

### a) 対象期間

研究で用いたデータの対象期間は、曝気循環装置の設置時期(表-1)を考慮し、各ダムにおいて装置導入前後が数年以上含まれることを図り、KSダムとTRダムについては1989年から1995年までの17カ年、TKダムについては1991年から1995年までの15カ年とした。

### b) 藍藻類の現存量と成層強度

藍藻類の現存量は、ダムサイト付近の基準地点において月1回の頻度で実施されている定期調査結果における

植物プランクトンデータより、表層のMicrocystis属およびPhormidium属の細胞数を用いた。成層強度の指標は、既存研究<sup>5)9)</sup>と同様に、角周波数である浮力周波数(N)を用いて、表層から水深10mまでの平均的なN<sup>2</sup>を成層強度として用いた(式1)。

$$N^2 = \frac{g \cdot \rho_z - \rho_s}{\rho_0 \Delta z} \quad (1)$$

ここで、g、重力加速度; ρ<sub>0</sub>、基準密度(本論文では1.0×10<sup>3</sup>[kg/m<sup>3</sup>]とした); ρ<sub>z</sub>、水深zの密度; ρ<sub>s</sub>、表層密度、Δz、表層と水深zの層厚である。密度は、植物プランクトンサンプルの採水時に同地点で機器測定された水温鉛直分布データより算定した。算出水深は各貯水池における水温鉛直分布の状況と藍藻類の増殖環境という観点より表層から水深10mとした。

### c) 曝気循環施設の規模と成層期平均成層強度

曝気循環施設の規模を指標する数値として、貯水池規模と循環流量の規模との比率を考慮したk値<sup>11)</sup>を用いた(表-1)。

$$k = \sum \sqrt{Q_B} / A \quad (2)$$

ここで、 $Q_B$ 、曝気循環装置 1 基あたりの吐出空気量 [L/min.];  $A$ 、湛水面積[km<sup>2</sup>]である。 $k$ 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の影響が大きくなる。湛水面積は、藍藻類の増殖時期である夏季の湛水面積として、オールサーチャージ方式のTRダムにおいては常時満水位を、制限水位方式のKSダムおよびTKダムにおいては洪水期制限水位を用いた。

本研究において曝気循環施設の規模と成層強度との関係を検討するためには、各ダムの曝気循環施設の規模と対応する成層強度を定める必要がある。当該対策は、植物プランクトンの増殖が活発な成層期における成層強度を低下させることから、成層期平均成層強度( $N^2_{st}$ )を、式(1)で得られた各月の成層強度の単純平均から定めた。したがって、1年毎の $N^2_{st}$ の値が存在する。なお、成層期としては4月から10月までと仮定した。

### 3. 現地データにおける成層強度と藍藻類現存量

#### および曝気循環対策の関係

##### (1) 各ダムにおける成層強度と藍藻類現存量との関係

図-1に、各貯水池における成層強度と*Phormidium*属および*Microcystis*属の細胞数との関係を示す。なお、各藍藻類の細胞数が検出されなかったデータは $10^0$ [cells/mL]として表示し、表層と水深10mの水温が全く同一である場合には $N^2$ は $10^7$ [s<sup>-2</sup>]として図では表示した。各データにおいて、成層強度が増加するほど当該成層強度条件における藍藻類現存量が多くなる傾向がある。こうした関係は、既往研究においても複数のダム貯水池で確認されている<sup>5)9)</sup>。藍藻類が水質障害を生じるレベルの現存量に達する $N^2$ を定めるために、図中には一般的なアオコ発生レベルとされる現存量(*Microcystis*属： $10^4$ cells/mL<sup>10)</sup>)と、これを上回ることの無い $N^2$ の境界線を示した。なお、梅田ら<sup>5)</sup>と同様に*Phormidium*属は $10^3$ cells/mLを水質障害レベルとして図示した。TRダムにおける*Phormidium*属を除いては、約 $10^4$  [s<sup>-2</sup>]を下回る $N^2$ 条件ではこれらの藍藻類は水質障害を引き起こす現存量レベル以上に増殖していない。本研究で対象とした複数のダム貯水池では共通して約 $10^4$  [s<sup>-2</sup>]の $N^2$ レベルが藍藻類が顕著に増殖するか否かの境界となる条件であると考えられる。梅田ら<sup>9)</sup>も複数のダム貯水池において、 $N^2$ 評価水深を等しくした場合は、藍藻類の出現限界となる $N^2$ がほぼ同レベルの値であることを報告している。異なったダム間において成層強度と藍藻類の現存量との関係がほぼ共通していたことは、安定成層要求性の強い藍藻類の動態に対する成層強度の影響の強さを示すものであると考えられる。

低い $N^2$ 条件においても*Phormidium*属の現存量がTRダムで多かった理由としては、混合状態に対して異なった応答特性を有する生態特性のタイプがTRダムでは存在していたことが推定される。例えば $10^{-5}$ [s<sup>-2</sup>]という低い $N^2$ 条件においてさえ、*Phormidium*属細胞数が $10^4$ [cells/mL]に達するデータが存在している。掲載は省略するが、これらは冬季を中心とした循環期のデータである。*Phormidium*属には主要なアンテナ色素の違いに応じてPC-typeとPE-typeが存在する。水中で比較的透過性の良い短波長光を吸収するPE-typeは、混合環境で出現する傾向がある<sup>8)9)</sup>。TRダムにおいては色素タイプ別に*Phormidium*属細胞数が計測されていなかったために断言はできないが、低い $N^2$ 条件の循環期においても*Phormidium*属細胞数が水質障害レベルに達していたのは、PE-typeが主体であったことが原因である可能性がある。

##### (2) 曝気循環による成層強度と藍藻類への影響

前述した成層強度と藍藻類現存量との関係は、曝気循環装置の設置前後で顕著な違いは無かった(図-1)。KSダムとTRダムにおいては、全基導入後もTKダムほど成層強度は低くなっておらず、藍藻類現存量も多い状態が継続していた。一方TKダムにおいては、2003年に曝気循環装置が4基に増設された以降は、それ以前に比べて成層強度が低下して $10^4$ [s<sup>-2</sup>]を超過することが少なくなっており、藍藻類の増殖は対策によって抑制された。

各ダムにおける、対策による藍藻類抑制効果の違いは、曝気循環対策による成層強度への影響がダムに応じて異なっていたためである考えられる。藍藻類の増殖抑制を達成したTKダムにおいては、藍藻類が増殖しにくいレベルの成層強度まで循環混合された。これに対してKSダムおよびTRダムにおいては、曝気循環装置によって成層強度は低下したが藍藻類が増殖困難なレベルにまで成層強度を低下できなかったことから、対策後においても藍藻類が増殖していると考えられる。以上より、曝気循環装置による藍藻類増殖抑制のためには、単に水理状態に何らかの影響を及ぼすだけではなく、成層強度を藍藻類の増殖に適さないレベルにまで低下させる必要があると言えよう。

ただし、TRダムの*Phormidium*属については、対策後は成層強度条件に関わらず現存量が減少したために、対策による成層強度への影響を通じた現存量の変動は確認できなかった。掲載は省略したが、対策導入とほぼ同時期から藍藻類の優占種が*Microcystis*属に変化している。成層状態以外の他の環境要素あるいは植物プランクトン群集そのものの遷移によって*Phormidium*属が減少したと考えられる。

#### 4. 藍藻類の増殖抑制可能な施設規模の検討

##### (1) 曝気循環装置の施設規模と成層強度との関係

表-1に検討対象ダムにおける曝気循環施設の施設規模を比較して示す。いずれのダムにおいても全基導入後の $k$ 値は200前後であり顕著な違いは無い。だが、ダム貯水池に応じて藍藻類の増殖抑制効果が異なっていた。この原因として、ダム毎に曝気循環対策による水温成層の制御効果が異なる可能性が考えられる。そこで、各ダムにおける対策の施設規模と成層強度の変化を検討した。

図-2に、各ダム貯水池における $k$ 値と成層期平均成層強度( $N_{st}^2$ )との関係を示す。なお、 $N_{st}^2$ は年次毎にデータが存在することから、図では当該 $k$ 値の設備導入状況における複数年の平均値と標準偏差を示した。各ダムにおいて曝気循環装置は段階的に導入されたため、それぞれ複数の $k$ 値の状況におけるデータが存在する。また、 $k$ 値が0である場合は曝気循環施設が存在しないことを意味している。

$k$ 値が100未満の条件では、いずれの貯水池においても $k$ 値の増加に応じた $N_{st}^2$ の顕著な変化は見られない。これは、曝気循環施設の規模が十分で無い場合には、混合作用が生じたとしても成層強度の低下には至らないためであると考えられる。一方 $k$ 値が200程度であれば各ダムにおける $N_{st}^2$ は低下している。成層強度の低下のためには一定の規模の曝気循環施設が必要であると考えられる。ただし、 $k$ 値が約200の条件における $N_{st}^2$ の絶対値は、ダムによって異なっている。曝気循環装置導入後も藍藻類が増殖しているKSダムとTRダムにおいては、 $k$ 値200程度において $N_{st}^2$ は低下しているものの、TKダムの無対策時と同レベルの $N_{st}^2$ である。図よりわかる様に、この要因としては、KSダムとTRダムとでは $k$ 値が0の条件、すなわち無対策時における $N_{st}^2$ が高い性質が考えられる。

曝気循環対策の目的は、水質障害を引き起こす藍藻類の増殖抑制であり、貯水池水理環境の制御は一手段に過ぎない。したがって、定性的な評価としてはKSダムおよびTRダムにおいては曝気循環装置による物理的な影響としての混合化は発揮されているが、藍藻類増殖抑制のためには混合効果が不十分であると考えられる。この要因としては、ダム固有の成層の強さに応じて曝気循環装置に求められる成層強度の低下幅が異なることが考えられる。したがって、曝気循環施設の適正施設規模を検討するためには、無対策時の成層強度が重要となる。

##### (2) 無対策時の成層強度( $N_{st-0}^2$ )に関する考察

上記の検討によって、必要な施設規模のダムによる違

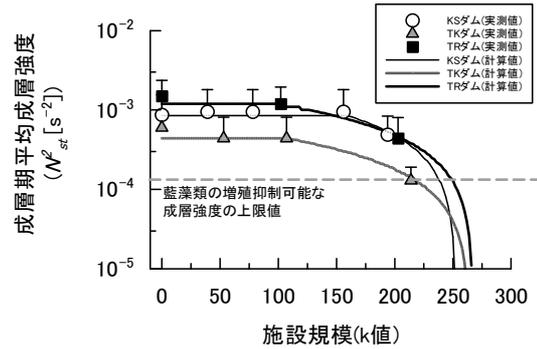


図-2 各ダムにおける曝気循環装置の施設規模( $k$ )と成層期平均成層強度( $N_{st}^2$ )との関係 (計算値は式(4)のうち線形式による近似線である。)

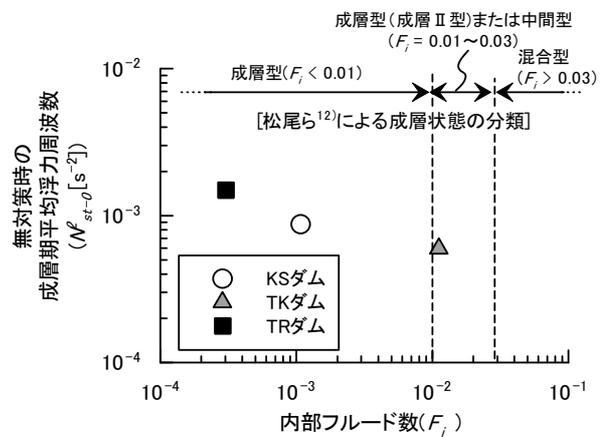


図-3 各ダムにおける $F_i$ と $N_{st-0}^2$ との関係

いに対して無対策時の成層強度( $N_{st-0}^2$ )が影響している可能性があると考えられた。一般的に、ダム貯水池における水温成層に影響を与える因子として気象や流況等がある。掲載は省略するが、検討を行った3ダムにおいて日射量や気温、流入量や風速データの統計値を整理した結果、流入量が少ないダムほど $N_{st-0}^2$ が大きい傾向があった。ダム貯水池における成層形成の有無の判定指標として、内部フルード数( $F_i$ )がある<sup>12)</sup>。本研究においても、流入量による成層への影響は貯水地形を加味した流速スケールとして生じると考え、流入に関する混合の指標として流速スケールを考慮した $F_i$ を算定した。

$$F_i = \frac{U}{\sqrt{g' \cdot H}} \quad (3)$$

ここで、 $U$ ；流速スケール、 $g'$ ；成層の密度差で補正した重力加速度、 $H$ ；水深である。 $U$ は成層期平均流入量を貯水池平均横断面積で除した値を、 $g'$ は $N_{st-0}^2$ を用いた値を、 $H$ は成層強度の算定水深である10mを用いた。図-3に、対象3ダムにおける $N_{st-0}^2$ と、 $F_i$ との関係を示す。 $F_i$ が大きいほど、成層時の浮力に対する慣性力

表-2 KSダムとTRダムにおける適性施設規模の検討数値

| 記号                         | KSダム  | TRダム   |
|----------------------------|---|--|
| $N^2_{st-0}$               | $8.5 \times 10^4$   | $1.2 \times 10^3$  |
| $f(k)$                     | $-9.1 \times 10^6 \times k$<br>$-1.6 \times 10^3 \times \ln(k)$ | $-7.1 \times 10^6 \times k$<br>$-1.05 \times 10^3 \times \ln(k)$ |
| $N^2_{st-k0}$ <sup>a</sup> | $2.3 \times 10^4$<br>$8.9 \times 10^3$                          | $1.9 \times 10^3$<br>$6.0 \times 10^3$                           |
| $k_{th}$ <sup>a</sup>      | 156   | 102  |
| $kreq$                     | 240   | 260  |

<sup>a</sup> 欄内の上側は線形近似, 下側は対数近似の式や値を示した。

の影響が大きくなる。松尾ら<sup>12)</sup>は, 0.01以下で成層型, 0.03以上で混合型となることを報告しており, 対象の3ダムは成層型に相当する。図よりわかる様に, 複数ダム間において $F_i$ が大きいほど $N^2_{st-0}$ が小さくなる傾向があ

る。つまり, 曝気循環対策を実施していない状況における成層強度に対して,  $F_i$ で指標される水理要素が影響を与えている可能性がある事を示していると考えられる。本検討では3ダムの値のみに基づいていることから, 図-3の関係性については多くのデータによる検証が必要であるが, 同様の施設規模( $k$ 値)の曝気循環装置が導入されているにもかかわらず藍藻類抑制効果および水温成層の制御状況がダムによって異なったことについては,  $F_i$ で指標されるダム固有の成層のしやすさの違いが影響していることが推察される。

### (3) 藍藻類の増殖抑制に必要な施設規模の検討

以上の検討に基づいて, KSダムおよびTRダムにおいて藍藻類の増殖抑制を達成するための施設規模の検討を試みた。検討にあたっては, これら両ダムの成層強度を, TKダムにおける $k$ 値200強でのレベルにまで低下させるための $k$ 値を試算することとした。水温成層の曝気循環に対する応答性については数値解析モデルによる詳細な検討が必要であろうが, ここでは図-2に示した $k$ 値と $N^2_{st}$ との関係から近似モデルを作成し, 検討することとした。この近似モデルを式4に示す。前述した様に, 適正施設規模の検討にあたっては無対策時におけるダム固有の成層強度の定義が必要となるが, KSダムおよびTRダムにおいては既に図-3に示した無対策時の成層強度値が得られていることから実測値を用いることとした。

$$N^2_{st} = \begin{cases} N^2_{st-0} & \text{if: } k < k_{th} \\ f(k) + N^2_{st-k0} & \text{if: } k \geq k_{th} \end{cases} \quad (4)$$

ここで,  $N^2_{st}$ , 成層期平均成層強度[s<sup>2</sup>];  $N^2_{st-0}$ , 曝気循環を実施しない場合( $k=0$ )の成層期平均成層強度[s<sup>2</sup>];  $f(k)$ ,  $k$ 値の増大に応じた $N^2_{st}$ の低下幅に関する関数[s<sup>2</sup>];  $k_{th}$ , 曝気循環によって成層強度が低下する境界となる $k$ 値である。 $N^2_{st-0}$ は,  $k$ 値が約100以下の条件における $N^2_{st}$ の平均より定めた。 $k_{th}$ は式(4)の2つの式の交点に相当する

$k$ 値として定めた。 $f(k)$ については様々な関数形の近似を行った結果, 線形( $f(k)=ak$ )および対数形( $f(k)=a\ln(k)$ )の相関が高かったためにこれら両近似関数を用いた。表-2にKSダムおよびTRダムの各種数値と, これらより得られた望ましい $k$ 値( $kreq$ )を示した。また, 図-2には表-2に基づく近似線のうち, 線形式による近似線を示した。 $kreq$ はKSダムとTRダムにおいてTKダムと同様の $N^2_{st}$ を達成可能であり, 藍藻類の増殖抑制が期待できる $k$ 値である。

表-2に示した様に, 両ダムにおいて藍藻類増殖抑制に必要な施設規模は,  $k$ 値にして250前後であると推測された。なお,  $k_{th}$ の小さいKSダムの方がTRダムに比べて $kreq$ が大きい理由は, KSダムの方が,  $f(k)$ の係数の絶対値が大きく,  $k$ 値の増加に対する $N^2_{st}$ の低減が大きいためである。両ダムの $kreq$ は現状施設よりも $k$ 値としてKSダムでは約45, TRダムでは約60弱の増加に相当する。これは, 実際の施設としては, いずれのダムにおいても現状の導入施設を1基増加させれば達成できる $k$ 値である。この様な簡易な方法によって曝気循環対策の適正施設規模に関する目安を得ることが可能ならば, 有用性が高いと考えられる。

ただし, 本研究成果に基づいてただちに増設を実施することは, いくつかの問題点や課題が現時点では存在することから, 適切ではない。図-2に示した近似線は, 数条件のみの $k$ 値のデータから得た経験式に基づくものである。より多くの $k$ 値のデータが存在すれば, 近似線は変化する可能性がある。200以上の $k$ 値条件に外挿して推測した $kreq$ の値は, 精度や確実性の面で問題がある。200以上の $k$ 値に相当するダム貯水池の実測値の解析や, 数値解析モデルによる $k$ 値の増加に対する $N^2_{st}$ の応答性の解析を行うことによって, こうした課題は解決できると考えられる。また, ダムに応じて $k$ 値と $N^2_{st}$ との関係が異なる事も推測されるので, 多くのダムのデータを用いた $k$ 値による $N^2_{st}$ への影響の検討も必要であろう。

## 5. 課題

本研究では3ダムのデータのみを用いたために, 研究成果の汎用性については問題が残る。この解決のためには, 多くのダム貯水池のデータを対象に同様な検討を行う必要がある。さらに, 本論文で提案した方法においては, 成層強度の指標である $N^2$ が極めて重要な意味を持っている。本研究では複数ダム貯水池の実測値に基づいて, 約 $10^4$ [s<sup>2</sup>]の $N^2$ が, 藍藻類の生育における境界値となることを示したが, これは経験的な結果でしかない。この $N^2$ の値は水温20℃以上では水深1mあたりでおおむね約

0.1℃の水温勾配に相当する値である。この条件が、どういった強度や頻度の循環状態に相当するののかという水理学的な意味に加えて、植物プランクトンの動態に対してどういう過程を経て影響するかを明らかにする必要がある。また、成層強度の評価条件についても、藍藻類の生育環境の指標として適切な条件として、評価水深、測定時間、植物プランクトン調査とのタイムラグ等について検討する必要がある。

本研究では藍藻類の生育環境要素として物理条件である $M^2$ にのみ着目したが、水温や日射量等の他の物理要素や、栄養塩やpH等の化学的要素の影響も考慮する必要がある。特に、適正な施設規模について本研究では成層強度の観点から検討したが、日射量、栄養塩、回転率および水温等のダムによって条件の異なる要素によって適正施設規模が影響を受ける可能性もある。本研究で対象とする事象は、曝気循環装置による物理過程や藍藻類の動態にかかる生理生態学的過程に加え、ダム貯水池固有の成層特性等広い範囲にわたる事から、こうした様々な課題について明らかにする必要がある。これらの課題を解決することにより、現在多くのダムにおいて経験的に適用されている曝気循環対策の費用対効果の最大化が可能になると考えられる。

## 6. 結論

曝気循環施設の導入されているダム貯水池における実測値を用いて、藍藻類現存量と成層強度との関係およびこれに及ぼす施設規模の関係の検討を行った。本論文の結論は以下の通りである。

- 1) 水質障害を引き起こす現存量レベルに藍藻類が増殖する成層強度は、検討対象とした3つのダム貯水池で共通して約 $10^4[s^{-2}]$ 以上であり、曝気循環装置の導入前後でこの傾向は変化しなかった。
- 2) 曝気循環対策によって藍藻類の増殖が抑制されたダムでは、成層強度が $10^4[s^{-2}]$ 以下に低下していた。
- 3) 対象とした3ダムにおける曝気循環対策の施設規模と夏季平均成層強度の関係は類似しており、一定レベル以上の施設規模で成層強度の低下が生じた。
- 4) ダムによる藍藻類増殖抑制効果の違いは、ダム貯水池固有の成層の強さが影響していると考えられた。
- 5) ダム貯水池それぞれに固有な成層強度は、気象や緯度ではなく、内部フルード数で指標される条件に影響を受けていると考えられた。
- 6) 対象3ダムの実測値から、曝気循環対策の施設規模と成層強度の関係の経験式を提案した。
- 7) この経験式を用いてKSダムとTRダムにおいて、藍

藻類の増殖抑制を可能にする施設規模を推定した。

謝辞：本論文の3名の査読者から貴重なご意見を頂き、論旨をより向上することができた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 廣瀬敏雄, 丹羽薫, 久納誠, 山下芳裕: 流動制御と糸状藻類を活用したダム湖水環境創造システム, 大ダム, Vol. 153, pp72-82, 1995.
- 2) 荒井治, 高須修二: ダム湖の水質対策の動向, ダム工学, Vol. 7(2), pp90-97, 1997.
- 3) 寺川陽, 福渡隆: ダム湖の富栄養化対策の動向, ダム技術, No. 136, pp31-39, 1998.
- 4) 有馬慎一郎, 佐々木弘二, 福崎彰, 古里栄一, 浅枝隆: 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), 土木学会第60回年次学術講演会, 7-068, pp135-136, 2005.
- 5) 梅田信, 古里栄一, 浅枝隆: 富栄養化したダム湖におけるアオコ発生指標としての水温成層安定性, ダム工学, Vol. 16(4), pp269-281, 2006.
- 6) Visser, M.P., Ibelings, W.B., Van der Veer, B., Koedood, J. and Mur, R.L.: Artificial mixing prevents nuisance blooms of the cyanobacterium *Microcystis* in Lake Nieuwe Meer, the Netherlands, *Freshwater Biology*, Vol. 36, pp.435-450, 1996.
- 7) Reynolds, C.S.: *Vegetation processes in the pelagic: A model for ecosystem theory*, 329pp, Ecology Institute, Oldendorf/Luhe, Germany, 1997.
- 8) 古里栄一, 浅枝隆, 須藤隆一: アンテナ色素の吸光特性に基づく藍藻類の光学的および水理学的発生条件に関する理論的考察—減衰スペクトル特性と混合水深—, 水環境学会誌, Vol. 26, pp277-284, 2003.
- 9) 古里栄一, 浅枝隆, 須藤隆一: アンテナ色素の吸光特性に基づく藍藻類の光学的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, Vol. 26, pp285-293, 2003.
- 10) 国土開発技術研究センター: 貯水池の生物, 142pp, 国土開発技術研究センター, 東京, 1982.
- 11) 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, pp.101-102, 1995.
- 12) 松尾直規・岩佐義朗・綾史朗: 多目的貯水池の水温分布特性とその影響要因, 第27回水理講演会論文集, 土木学会, pp.151-158, 1983.
- 13) 関根秀明, 吉田延雄, 梅田信, 浅枝隆: 曝気式循環施設の理論とその効果に関する考え方, ダム工学, vol. 13(1), 5-18, 2003.

(2007.9.30受付)