

高山ダム浅層曝気循環の 水温を指標とした効率的運用

丹羽 賢一¹

¹独立行政法人水資源機構 木津川ダム総合管理所 管理課（〒518-0413）三重県名張市下比奈知2811-2

本報告は、高山ダム貯水池においてアオコ抑制のために設置された浅層曝気循環設備について、効果等を整理分析し、その結果を踏まえた今後の運用方針等の検討を行ったものである。

検討は、水質自動観測設備や現地の水温連続観測等のモニタ結果、及び定期水質調査結果を対象に、主として表層水温を指標とした観点から循環効果、冷水放流の改善効果、低層の溶存酸素（DO）低下とこれに伴う鉄・マンガンの溶出抑制効果等について整理分析を行った。

また、整理結果を踏まえ、曝気循環設備の効率的（経済的）運転を現場で簡易に行うための、運転台数増減の目安となる水温指標の提案を行った。

キーワード 浅層曝気循環設備 表層水温 低層DO低下 循環効果 効率的運用

1. はじめに

高山ダム貯水池では、1969年の管理開始後15年が経過した1984年頃から、栄養塩の流入負荷量の増加に伴い、藍藻類のMicrocystisを優占種とするアオコの発生が確認されており、毎年夏期には低層の溶存酸素(DO)の低下も見られていた。また、選択取水設備が無いため常に低層のEL.95.0m、99.0m（湖底標高概ねEL.90m程度）から放流をしているため、4～5月頃には流入水温に比べ低い温度の冷水を放流することがあった。

そこで、2000年～2002年に、浅層曝気循環設備4基（コンプレッサー4台）を設置しその後2012年に散気管のみを4基増設し、併せて3箇所水温の連続モニタリングも実施している（図-1）。

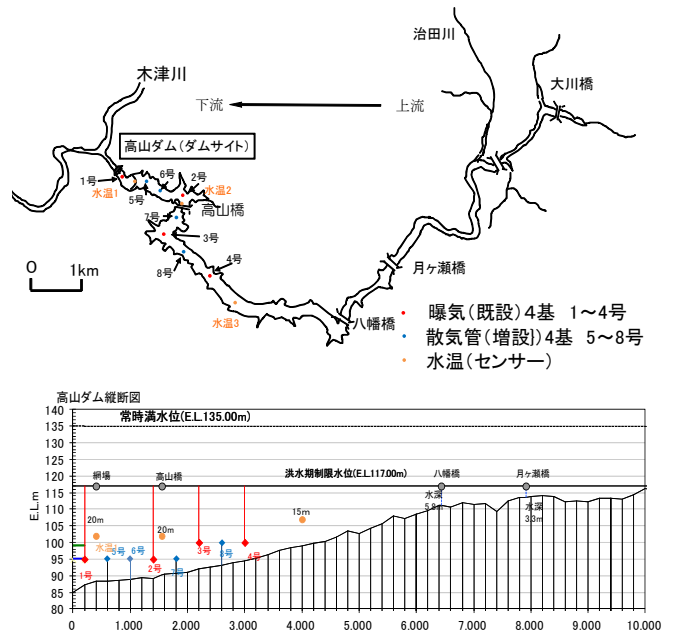
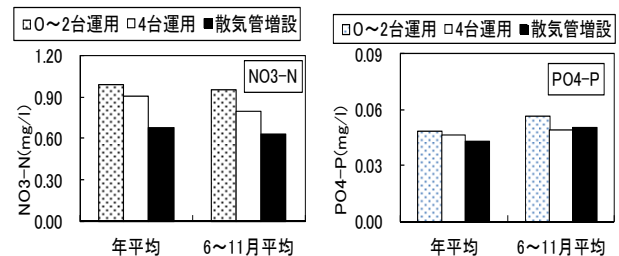


図-1 曝気循環設備の設置位置

2. 高山ダム水質の経年変化（曝気前後の変化）

(1) 流入水質と貯水池水質の経年変化

高山ダムの流入水質について、曝気設備の設置運用時期の平均で比較した（図-2）。硝酸態窒素(NO₃-N)は経年的に減少傾向が見られているが、オルトリン酸態リン(PO₄-P)は、0.05mg/l程度の高い値で横ばい傾向にあり、流入水質のみに着目した場合は、藻類の異常増殖によるアオコ発生のリスクは高い状態で継続していることが分かる。

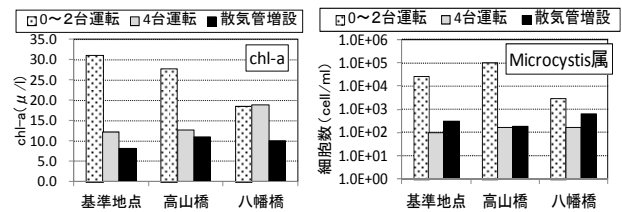


※0～2台運転: 2001～2003 4台運転: 2004～2011 平均
散気管増設: 2012～2015 平均

図-2 流入水質の経年変化（大川橋地点）

(2) 曝気設備運用前後の貯水池水質の変化

貯水池の基準地点（網場）におけるクロロフィル a(Chl-a)濃度及びアオコ原因種である *Microcystis* の細胞数を曝気運転期間で比較すると（図-3），流入リン濃度は減少していないにもかかわらず，曝気循環設備運用後明らかに減少が見られており，運用の効果が確認出来る。



※0~2 台運転: 2001~2003 4 台運転: 2004~2011 平均
散気管増設: 2012~2015 平均

図-3 貯水池水質の経年変化

4. 曝気循環設備の効果

(1) 運転前後の水温及び溶存酸素(DO)鉛直分布の変化

曝気循環設備運用前の 2000 年 7 月と運用後の 2004 年 7 月の水温と溶存酸素 (DO) の鉛直分布比較を図-4 に示す。

曝気の運転により水温及び DO は曝気水位付近から一様となっており，循環効果が見られる。なお，運用前において EL. 99m 付近で水温躍層が形成されているのはこの水深から取水を行っていることによるものである。

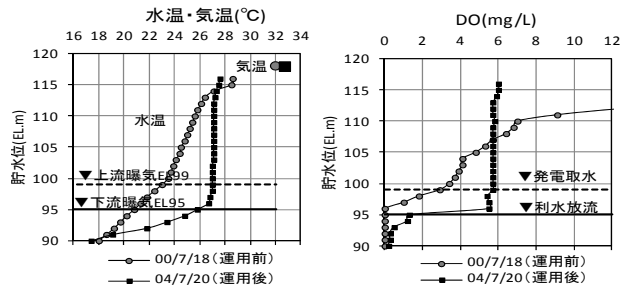


図-4 曝気前後の水温・DO 鉛直比較（基準地点）

(2) 曝気循環によるアオコ抑制効果の指標

アオコの原因となる藍藻類は，細胞内の気泡によって浮上し表面付近に集積する。曝気循環設備によるアオコ抑制は，表層付近の水温勾配を小さくし，循環流で藍藻類を光の届き難い深層へ送ることにより増殖を抑制する。

そのため一般に効果の指標は水温勾配とすることが多い。しかし図-4の通り，水温勾配が小さくなると水温躍層より深い低水温の層と表層が混合されるため，表層水温も低下する。

また，一般に水温が高くなると *Microcystis* は増加傾向を示す。このため，アオコが発生する指標として表層水温が使用出来るか検討を行った。

毎月の定期調査から，図-5にアオコ発生時の *Microcystis* と Chl-a の関係を，図-6に表層水温区分毎の細胞数の頻度割合を示す。

図-5から概ねアオコ発生時には *Microcystis* は 10,000 細胞，Chl-a は $30 \mu\text{g/l}$ を超えている。また，図-6の前後比較から，曝気の運用で表層水温の低下と 30°C 以上の回数の減少が見られており，水温が高いほど抑制効果が大きくなっていく。 30°C 以上の高い水温の回数の減少が抑制効果が大きくなる目安と考えられる。

次に1日6回の自動監視の結果から，曝気の運用，表層水温と気温の比較を図-7に示す。下段の図は，日最高気温と表層水温が 30°C を超過した日数と回数を年毎に示したものである。

運用前~2台試験運転の2000~2003年は夏期に気温の上昇と共に水温も 35°C 付近まで上昇し，表層水温が 30°C を超える回数も年間100回以上であったが，4台運用後の2004年以降は，水温は 30°C 程度まで低下し， 30°C を超過する回数も減少している。

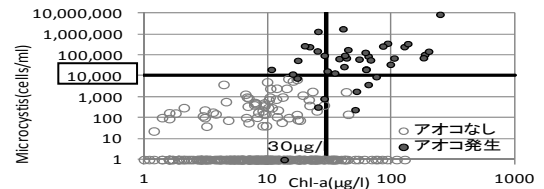


図-5 アオコ発生時の *Microcystis* 細胞数と Chl-a

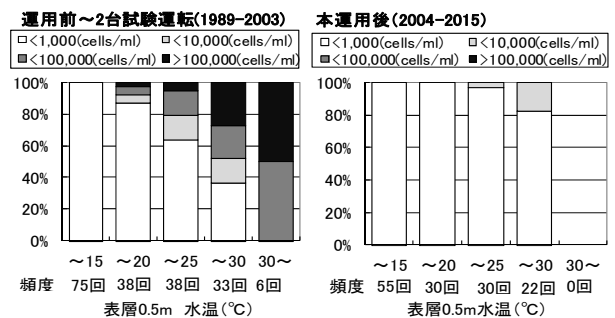


図-6 表層水温と *Microcystis* 細胞数（定期調査）

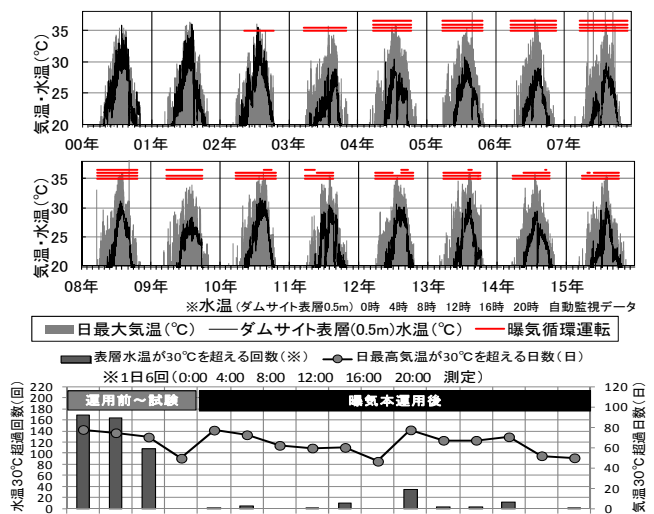


図-7 曝気の運転と気温・表層水温の関係

(3) コンプレッサー運転台数と循環効果

曝気循環設備の運用時における表層水温の地点（ダムサイト、網場（0.4km）、高山橋（1.6km）、4号曝上流1km（4km）、八幡橋（6.4km）、流入水）比較を図-8にまた、コンプレッサーの運転台数毎の各地点における水温鉛直分布を図-9に示す。

曝気の運転により、表層3m付近までの水温勾配が小さくなることで、上流から下流に行くに従い表層水温が低下していることが分かる。

(4) 曝気循環による冷水放流改善効果とDO改善効果

図-10に運用前後の放流水温を示す。運用前の放流水温は、4月頃は流入と比較し5℃程度低くなっておりアユ等への影響が懸念される状況であったが、運用後は水温差が2℃程度まで減少している。

図-12に2001年～2015年に測定した底層（底上1.0m）のDOと鉄・マンガンとの関係を示す。概ねDOが2mg/l以下となると鉄・マンガンの溶出量が増加する傾向にある。

また、図-11に示す取水深のDOを見ると、取水深付近のDOは、運用前は0mg/lまで低下していたが運用後は2mg/l以上まで上昇している。

これらのことから曝気の運用により、底層からの鉄・マンガンの溶出が抑制され、放流水への影響が緩和されていることが推察される。

4. 浅層曝気循環設備の運用方針

(1) 曝気循環設備の散気水深と散気方式

曝気循環設備の散気方式は、水深固定、標高固定、水深可変がある。効果の点では藻類の光制御や曝気のエネルギー効率を考慮すると、出来るだけ深い位置から曝気を行うのが良いため、安価で維持管理も簡単な標高固定型を深い位置に設置するのが良いが、一般に選択取水設備のある貯水池では、取水深変更による効果を得るため、水深固定型や可変型を採用することが多い。

高山ダムでは選択取水設備は設置していないが、水深可変と標高固定両方を設置している。運用は冷水放流や低層のDO低下を抑制するため、取水深のEL95m付近から標高を固定して散気を行う必要があり、水深可変型の曝気については、水位に応じて水深を変化させて運用している。

そのため今後の更新時においては標高固定型とすることが望ましいと考えられる。

(2) コンプレッサー運転台数の増減の指標

曝気循環設備の運転によるアオコ発生抑制の指標は一般的に水温勾配等が用いられるが、代替として表層水温30℃の頻度の低下が指標として使用できることが3章2節で明らかとなった。

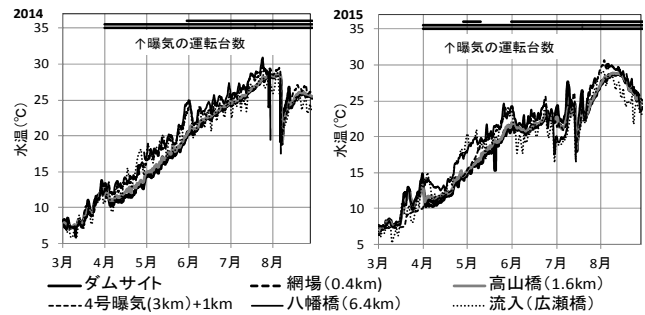


図-8 曝気運転時の表層水温の地点比較（3～8月）

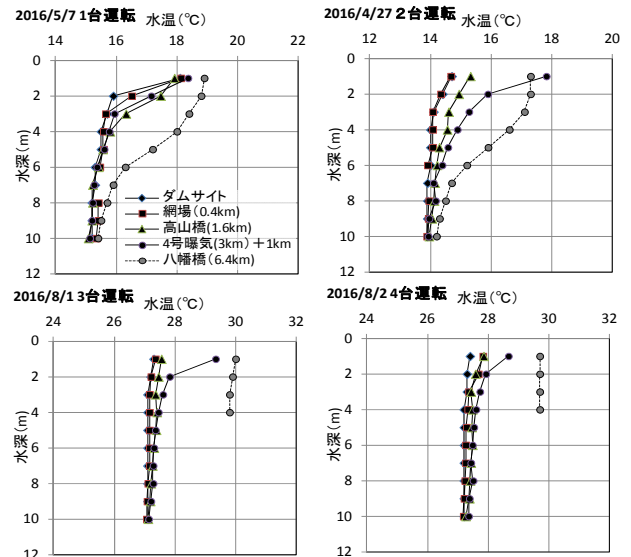


図-9 運転台数と水温分布の比較（2016年抽出）

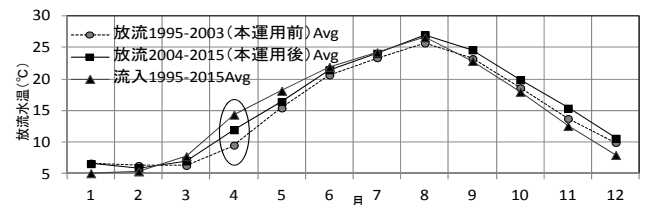


図-10 放流水温の運用前後比較

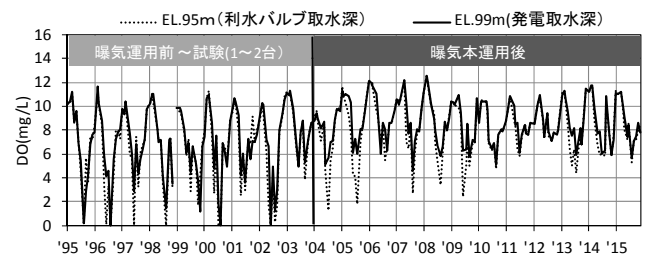


図-11 取水深(EL95m及びEL99m)DOの経年変化

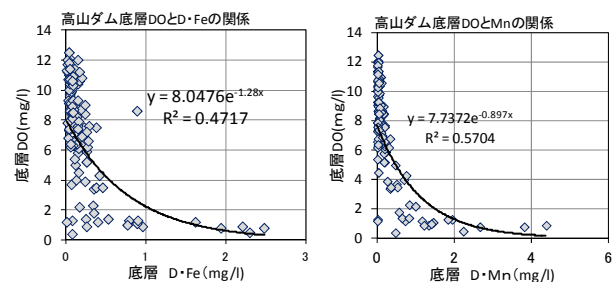


図-12 底層(底上1m)DOと鉄・マンガン（基準地点）

まず、コンプレッサー運転台数の増減の閾値を検討するため、自動監視装置の表層水温とChl-aとの関係を整理した。結果を図-13に示す。なお、水温は日変動があるためここでは日平均値とした。

曝気循環設備運用前の相関係数は、 $R^2=0.2$ と相関がみられるが、運用後の相関係数は、 $R^2=0.001$ で相関が見られなくなっている。

これはアオコが発生しないように曝気循環設備を常に運転しているためであり、全期間の統計値からは運転台数の増減の閾値は得られなかった。

そこで、曝気循環設備を運転していてもアオコが発生することがあることに着目し、このときの条件が区分できるように整理することで運転台数の増減の指標の検討を行った。

表層0.5m日平均水温と運転台数の関係をChl-a濃度（ $\leq 15, 15 \sim 20, 20 \sim 30, 30 \leq$ ）毎に図-14に示す。例えば5月は、多くのケースでコンプレッサー2台の運転でChl-aが $15 \mu\text{g/l}$ 以下となっているが、日平均の表層水温が 17°C を超えるとコンプレッサー2台でもChl-a濃度が $30 \mu\text{g/l}$ 以上となる場合がある。

そのため表層水温が 17°C 以下の場合は2台の運転とし、 17°C を超える場合には3台運転が必要と考えられる。

(3) コンプレッサーの効率的運転（月毎の運転台数）

以上の結果から、4月～10月のコンプレッサー運転台数の増減の目安についてダム地点の日平均表層水温を指標とすると表-1の通りとなる。

5. まとめ

高山ダムの曝気運用時におけるコンプレッサーの運転台数と表層水温・Chl-aを分析することで、表層水温を指標として台数の増減の目安が得られた。

この結果を目安に効率的運用を行っていきたい。
その他 以下のことが分かった。

a) 高山ダムにおいては、表層水温が 30°C 以上の高い水温となる回数が減少していることが、アオコ抑制効果が大きくなる目安と考えられる。

b) 曝気循環設備の運用により、上流から順に水温勾配が小さくなり、台数による違いが確認できた。

c) 選択取水設備が無く取水深が貯水池底層付近である高山ダムであっても、曝気設備の最適な配置、運用により冷水放流抑制・DO低下の抑制ができることを確認できた。（鉄・マンガン溶出抑制のため、底層付近のDOを 2mg/l 以上に保つことが望ましい）

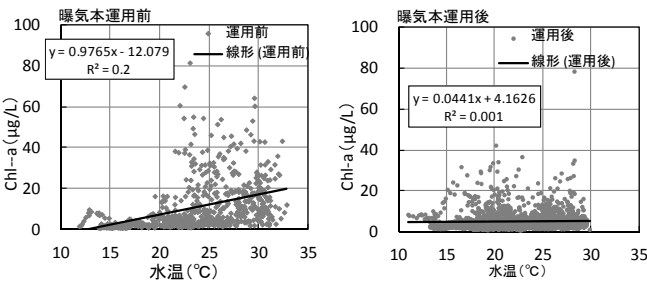


図-13 表層水温と日最大Chl-aの関係（基準地点）

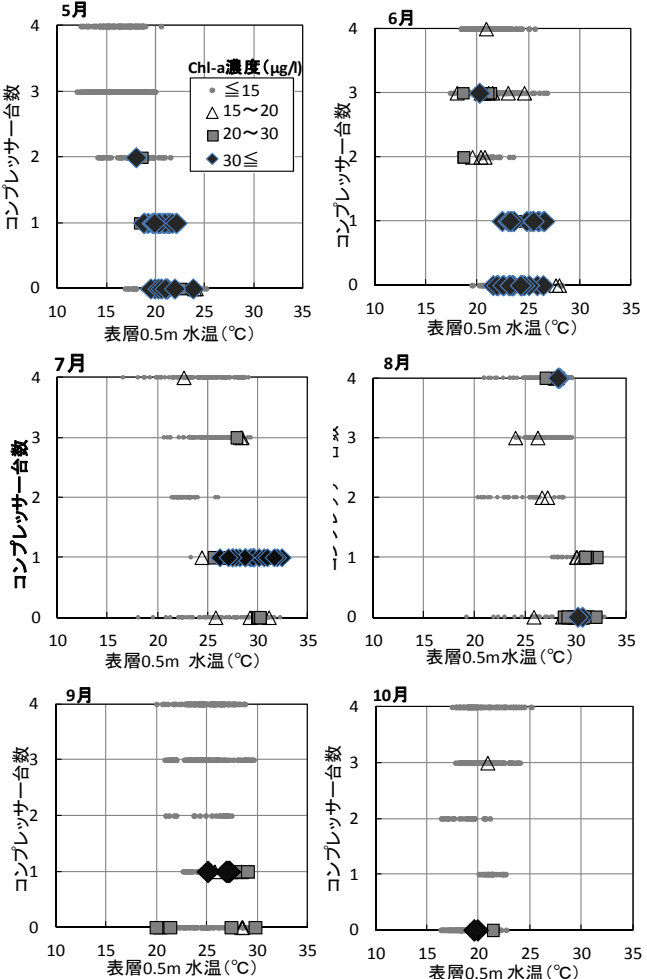


図-14 藍藻類によるChl-aと表層水温・運転台数

表-1 月毎の曝気コンプレッサー運転台数の目安

月	基本	ダムサイト自動監視表層水温等目安
4月	2台	アユ等水産資源への冷水放流への影響の観点から4月1日から2台の運用
5月	2台	日平均表層水温 $>17^\circ\text{C}$ →3台へ増加
6月	2台	日平均表層水温 $>20^\circ\text{C}$ →3台へ増加
7月	3台	日平均表層水温 $>28^\circ\text{C}$ →4台へ増加
8月	3台	日平均表層水温 $>28^\circ\text{C}$ →4台へ増加
9月	2台	日平均表層水温 $\geq 25^\circ\text{C}$: 2台 日平均表層水温 $\leq 25^\circ\text{C}$: 1台
10月	1台	日平均表層水温 $\geq 20^\circ\text{C}$ →1台 日平均表層水温 $\leq 20^\circ\text{C}$ →停止