

成層安定度を考慮した深層 曝気の必要送気量の推算

AERATION DISCHARGE ESTIMATION WITH CONSIDERATION OF
THERMAL STRATIFICATION STABILITY

道奥康治¹・小林憂三²・青木千夏²・原義晴³・松尾克美⁴

Kohji MICHIOKU, Yuzo KOBAYASHI, Chinatsu AOKI, Yoshiharu HARA and Katsumi MATSUO

¹フェロー会員 工博 神戸大学教授 工学部 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

²学生会員 学(工) 神戸大学大学院工学研究科前期課程(同上)

³(株)中電技術コンサルタンツ(〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

⁴正会員 (株)中電技術コンサルタンツ(同上)

In order to properly determine oxygen discharge of a micro-bubble aeration system, dissolved oxygen and relating water qualities were measured in an anoxic reservoir hypolimnion. Consumption and loss amounts of the oxygen were estimated by analyzing oxygen balance. It was found that the oxygen loss rate linearly decreases with increasing dynamic stability of thermal stratification. A seasonal dependency of oxygen consumption due to biochemical activities was also obtained from the field dataset. Aeration discharge necessary for keeping the hypolimnion aerobic was estimated by summarizing the analytical results, which provides necessary information for optimizing the system operation. The proposed method for estimation of aeration discharge was expected to minimize both the energy consumption and the system capacity.

Key Words : micro-bubbles, aeration, reservoir eutrophication, dissolved oxygen, energy saving, thermal stratification stability

1. はじめに

貯水池における深水層の貧酸素化対策は、全層曝気方式と深層曝気方式に二分される。前者では、表層の酸素とともに浮遊藻類も深水層にまで引き込み、酸素回復と同時に有機物の生産を抑制できる。しかし、深水層の汚濁が進行し、その浮上・拡散の影響が懸念される場合には、水温成層を維持しながら酸素を供給する深層曝気方式がより適している。貯水池の水質特性や運用形態に応じて、曝気方式を選択し施設容量を適切に決定する必要がある。施設の計画に際しては、水質浄化効率に加えてシステム構造の簡易性、維持管理の省力化、省エネルギーなどに留意すべきである。

著者らは高い酸素溶解効率を有するマイクロバブル・エアレータを用いた深層曝気技術の開発と実証試験を実施してきた^{1,2)}。浮上速度が小さい微細気泡を発生させ、自然大気のかわりに酸素を供給することにより、水温躍層を維持したまま酸素が回復し深層水質は改善された²⁾。

これまで、水質改善効果に着目してきたが、その一方で、システム運用に必要なエネルギーを節約して気圏

環境への負荷を軽減すること、システムの寿命を長期化することも重要な技術的視点である。本研究では、成層安定度と酸素消費速度を考慮して酸素回復に必要な送気量を算定し、深層曝気を効率化することを検討する。これにより、深層曝気システムの運用合理化を計る。

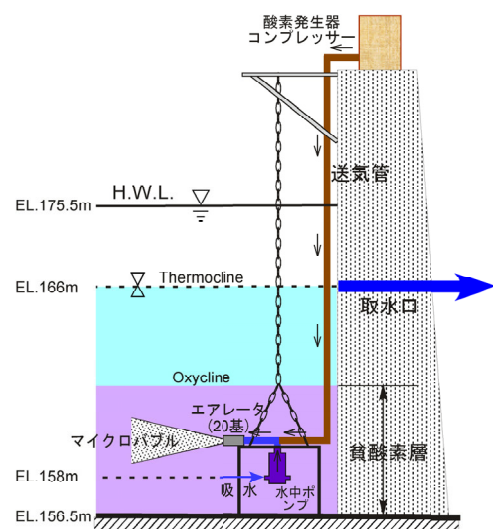


図-1 水質浄化システム

2. 曝気システムの概要²⁾

総貯水容量375,000m³、最大水深19mの生活貯水池において、最大水深点の湖底上1.5mにマイクロバブル・エアレータを設置した。曝気対象容量は、盛夏期において無酸素状態となる約21,000 m³の深水層である。図-1にシステム構成を、表-1に機器の諸元をそれぞれ示す。

3. 水質浄化実験の経緯²⁾

成層開始前の2004年3月から曝気を開始したが、顕著な鉛直混合をとまなうことなく水温躍層が形成された。供給された溶存酸素は躍層のキャッピング効果を受けて封じ込められ、深水層の酸素は回復した。深水層の嫌気的環境が解消されたため、リン・窒素などの栄養塩や鉄・マンガン濃度は飛躍的に低減し、相当程度の水質浄化機能を確認した。

マイクロバブルの大部分が水中で溶解する特性を利用してシステム構造を簡素化するために、本システムには従来型の深層曝気システム^{3), 4)}のような排気装置は設置されていない。そのため、多少の曝気擾乱が生じて表層水が下層へ連行され、深層水温と躍層が図-2のように上昇した。一方、曝気開始後の数週間で深水層の溶存酸素濃度は20mg/Lを超え、結果的には酸素供給が過剰であった。

以上のように、当面の水質浄化目標を達成することはできたが、システムを実用化する上で以下のような課題が明らかになった。

- ・水温成層は鉛直混合を抑制し、マイクロバブルを深水層に封じ込める役割を果たす。したがって、曝気効率を向上させるためには、曝気擾乱により成層が減退しないように送気量を調整することが必要である。

- ・溶存酸素は好気的環境を維持する程度の濃度を維持すれば十分である。システムのライフサイクルコストを下げて維持点検を省力化するためにも、酸素要求量を正確に把握し稼働時間を必要最小限にとどめるような運用が求められる。

通常、コンプレッサや酸素発生器の容量は、酸素消費速度の実績を上回るように、安全側をとって大きめに設定される。機器の構造上、電力消費量や機器の消耗量は送気量の減少に比例して単調に減少するわけではない。つまり、送気量を調整するには、機器の出力を下げるのではなく、定格出力で運転しながら、運転/停止を間欠的に繰り返す方法が現実的である。

以上の知見に基づいて本研究では、水温成層と溶存酸素の状況をモニタリングしながらシステムを間欠的に運転し、必要送気量の合理的な算定方法を検討する。

表-1 機器の諸元

水中ポンプ	出力 3.7kW, 揚程 20m, 流量 500L/min
コンプレッサ	出力 2.2kW, 最大吐出量 240L/min
酸素発生器	出力 0.2kW, 最大送気量 1,200L/hr, 実質送気量 300~1,000L/hr

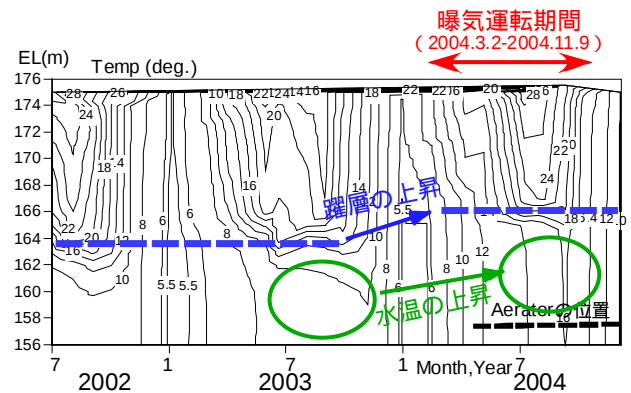


図-2 深層曝気前後の水温分布の比較

4. 水質観測と間欠運転方式

(1) 水質観測

2006年において、4月26日より水質観測を、6月26日より深層曝気を、それぞれ開始した。多項目水質計（YSI社製）を用いてダムサイトの最大水深点における水温、溶存酸素濃度：DO、電気伝導度：EC、酸化還元電位：ORP、クロロフィルa濃度：Chl-a、水素イオン濃度：pH、濁度を鉛直方向0.5~1.0m間隔で計測した。また、上層（水面下1m）、中層（EL.166m）、底層（湖底上0.5m）で採水し、化学的酸素要求量（COD）を計測した。流入河川水と貯水池放流水についても同じ項目を計測した。水質観測は毎月1回に加えて、システムの稼働・停止時にも実施し、実質的には月に3~5回の頻度で行われた。

(2) 間欠運転

全期間を通し、送気流量を1,000(L/hr)に設定した。深水層の溶存酸素濃度を監視するために、湖底上4mのDO濃度の定時計測（毎日10時）をダム管理者に委託した。その報告を受けて、曝気システムの運転・停止の是非を判断し、操作が必要な場合には水質観測を兼ねて現場に出動し、システムを手動操作した。

図-3に示すように、深水層におけるDO濃度の目標値を5~10mg/Lと設定し、下限値5mg/Lを下回る場合にはシステムを稼働させ、上限値10mg/Lを上回る場合には停止した。その結果、表-2のような稼働実績が得られた。

5. 水温成層と溶存酸素の変遷

水温分布の変遷を図-4に示す。着色部はシステムが稼働している期間をあらわす。2006年6月26日の曝気開始から約25日間、鉛直混合が発生し、図に示すように全層

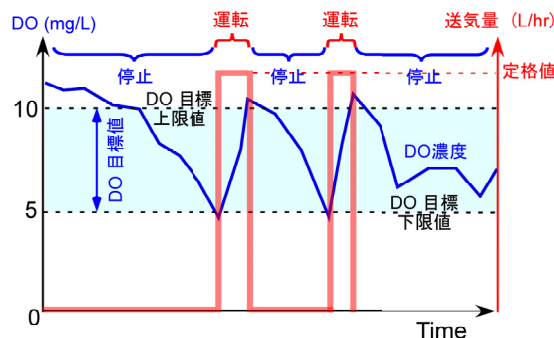


図-3 間欠運転の概念

表-2 システムの運転実績

運転期間		日数	休止期間	
(I)	6月26日~7月21日	25	~6月26日	
(II)	7月26日~8月4日	9	7月21日~7月26日	
(III)	8月10日~8月14日	4	8月4日~8月10日	
(IV)	8月18日~8月25日	7	8月14日~8月18日	
(V)	9月1日~9月7日	6	8月25日~9月1日	
(VI)	9月25日~10月3日	8	9月7日~9月25日	
			10月3日~	

が循環した。その原因を解明するために水中カメラで気泡発生状況を調査したところ、20基のエアレータにかかる送気圧力が均等ではなく、気泡発生が一部のエアレータに集中して気泡径が大きくなったことが判明した。7月26日にエアレータを至急調整し、以降はシステムが順調に稼働しながら水温成層が再形成された。別途実施した水温解析により、2006年7月18日の集中豪雨による河川流入も成層破壊に少なからず貢献していることが判明した。

実験当初の気泡発生不良と大規模な出水は想定外であったが、それによって成層強度が大きく変化し、結果的には多様な成層条件のもとで酸素溶解効率を計測することができた。その後、秋期大循環によって水温躍層が自然に消滅したため、10月3日に曝気を停止した。

図-5は溶存酸素濃度DOの経月変化をあらわす。曝気開始直前の6月26日までは深水層の酸素消費が進むが、曝気開始後、酸素が速やかに回復し、システムの運転・停止に応じてDO濃度は小さな変動幅で増減した。図-3の操作ルールにしたがうことを原則としたが、手動操作であったため、9月7日~9月25日のように停止期間が長引いてDO濃度の下限目標値5mg/Lを下回る場合もあった。この期間においては、図-6のように池底近傍の電気伝導度が増加し、底泥からの嫌氣的溶出が生じているようである。無酸素層厚さは底上3m程度までに限定されているので、これは局所的な溶出現象であり、池底斜面上の塩分流下の影響は小さいと考えられる。

6. 酸素消費量の推定と酸素収支

酸素の消費量・散逸量を考慮して必要送気量を算定する。前者には生物化学過程が、後者には水温成層の安定

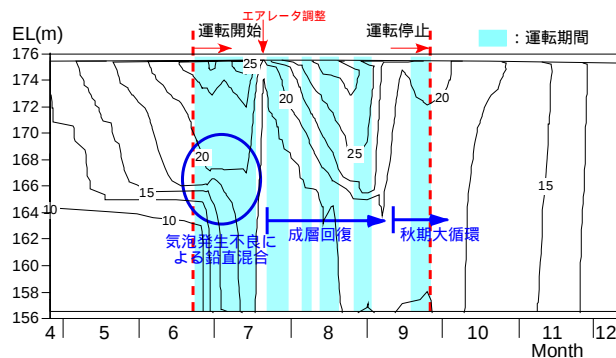


図-4 水温分布の変遷

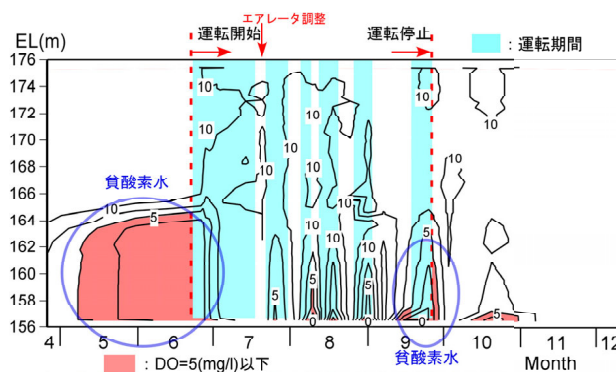


図-5 溶存酸素濃度DOの分布

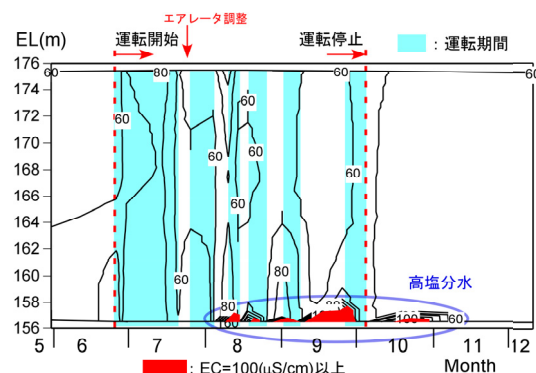


図-6 電気伝導度ECの分布

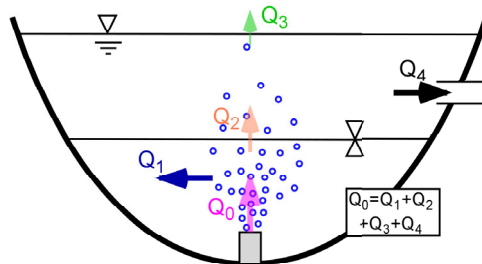


図-7 池内の酸素収支

性や酸素の流失・浮上量などの水理過程が影響する。これらの要因はいずれも季節的に変化する。

池内の酸素収支は図-7のようにあらわされる。ここで、 Q_0 : エアレータの酸素供給量,
 Q_1 : 深水層への酸素溶解量 (=消費量 + 回復量),
 Q_2 : 深水層から表層への浮上・拡散量,

Q_3 : 大気への物理的な散逸量,
 Q_4 : 取放水による(移流)流失量,
 であり,単位は[kg/day]である.

Q_1 の一部は有機物の好氣的分解や窒素化合物・金属イオンの酸化などに消費され,残りが溶存酸素として水中に留まる.

(1) 酸素消費量の推算

ほとんどの期間において取水口はEL.166mに固定され,図-4-6からわかるようにEL.165m以深の層(EL.156.5~165m)が貧酸素化する.これを深水層と定義し,藻類の生産活動が酸素収支に影響を及ぼさないと考えて,深水層の酸素収支を解析する.

二つの観測日に挟まれた曝気休止期間における酸素消費速度(dC_O/dt)をDO濃度分布の観測値 $C_O(Y)$ から算出し,図-8に示す.8月中旬から9月にかけて深水層における酸素消費が最も早い.深水層全体の酸素消費量 Q_d は次式で算定される.

$$Q_d = \frac{d}{dt} \bigg|_{\text{OFF}} \int_{Y_B}^{Y_H} C_O(Y) A(Y) dY \quad (1)$$

ここで, $A(Y)$: 標高 Y における貯水面積, Y_B :池底の標高(=EL.156.5m), Y_H :深水層境界面の標高(=EL.165m), $(d/dt)|_{\text{OFF}}$:システム停止期間における時間変化率をあらわす.

稼働期間の酸素消費量 Q_d については $C_O(Y)$ から求めることができないため,休止期間の Q_d を時間的に内挿して稼働期間中の Q_d を推定する.以上の手順で得られた Q_d の季節変化を図-9に示す.なお,6月26日の観測前に底層近傍の酸素が枯渇し,5月31日~6月26日の酸素消費量が過小評価される.そのため,稼働期間中の6月26日~7月21日における酸素消費量は,4月26日~5月31日における消費量と7月21日~7月26日における消費量を時間的に内挿して推定した.図-9より,盛夏期には1日に10kgを越える酸素が消費されていることがわかる.

(2) システム稼働時における深水層への酸素溶解量: Q_1 と曝気効率: R_E

システム稼働時の深水層への酸素溶解量 Q_1 (図-7参照)は,上記の手順で推算された酸素消費量 Q_d と酸素回復量の実績値 Q_r と合わせて

$$Q_r = \frac{d}{dt} \bigg|_{\text{ON}} \int_{Y_B}^{Y_H} C_O(Y) A(Y) dY \quad (2)$$

$$Q_1 = Q_r + Q_d \quad (3)$$

として評価する.式(2)において, $(d/dt)|_{\text{ON}}$:システム稼働期間における時間変化率である.

図-7を考慮すれば,酸素送気量 Q_0 に対し酸素が Q_1 だけ溶解したことになり,深層曝気効率 $R_E(\%)$ と散逸率 $R_L(\%)$

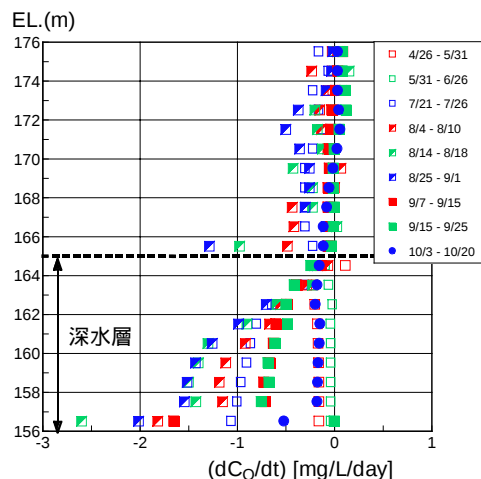


図-8 曝気休止期間における酸素消費速度

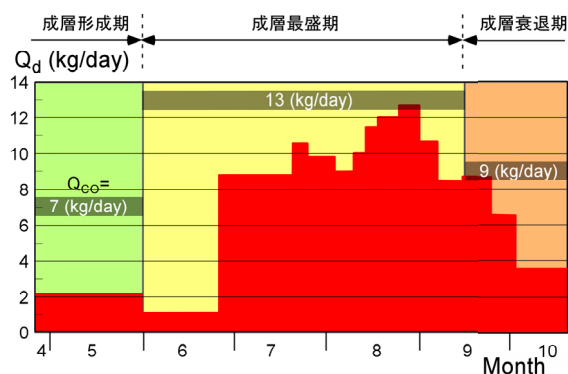


図-9 深水層全体における酸素消費量 Q_d の季節変化

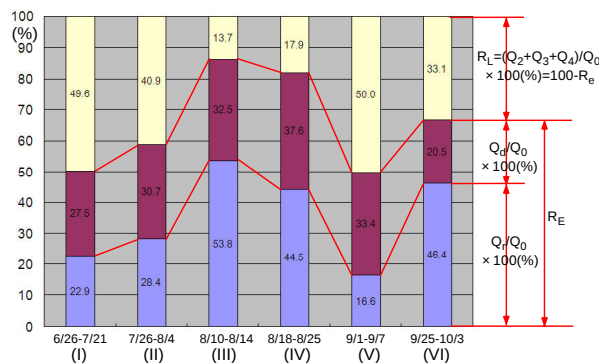


図-10 送気量 Q_0 に対する深層曝気効率 R_E ,散逸率 R_L など

は次式のように定義される.

$$R_E = (Q_1/Q_0) \times 100(\%) \quad (4)$$

$$R_L = \{(Q_2 + Q_3 + Q_4)/Q_0\} \times 100(\%) = 100 - R_E \quad (5)$$

ここで, $Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$ である.

以上のようにして,表-2の各期間における R_E と R_L などを算定すると図-10のようになる.

曝気効率 R_E は期間(III),(IV)において約85%と高くなる.この時期においては,EL.166m付近に安定した水温躍層が発達した.このため,躍層部の大きな浮力差が深水層からの気泡浮上を阻み,成層の力学的安定性が曝気擾乱を抑制している.

(3) 曝気効率に対する成層安定度の影響

上述のように，曝気効率 R_E （または酸素散逸率 R_L ）は水温成層の力学的安定度と密接に関連している．したがって，成層安定度の関数として酸素散逸率 R_L を評価すれば，より正確に必要な送気量を算出することができる．

図-11のAのように水温成層が発達した状態における力学的な安定度（以降，「成層安定度」と記す） S_t^{dy} は，Aの熱量を維持したまま断熱的に混合させた仮想的な一様密度分布状態（図-11のB）とのポテンシャル・エネルギー差に等しい． S_t^{dy} は次式のように算定される．

$$S_t^{dy} = \int_{Y_B}^{Y_S} \{\rho_m - \rho(Y)\} g(Y - Y_B) A(Y) dY \quad (6)$$

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，次式で定義される．

$$\rho_m = \frac{\int_{Y_B}^{Y_S} \rho(Y) A(Y) dY}{\int_{Y_B}^{Y_S} A(Y) dY} \quad (7)$$

S_t^{dy} は図-11のAをBの状態にまで混合させるのに必要な仕事量に相当する．

以上のように算定された成層安定度 S_t^{dy} を図-12に示す．期間(III)，(IV)において S_t^{dy} が4,000kN・mを越える高い安定度を示しているのに対し，期間(I)の後半や(VI)においては2,000kN・mを下回り，鉛直混合しやすい状態にある．

別途，鉛直一次元モデル⁴⁾を用いた水温解析によって曝気循環の影響を除外した場合の S_t^{dy} を推定した． S_t^{dy} の実績値（図-12）と併記すれば図-13のようである．前者は河川流入・水面熱収支など自然要因だけの S_t^{dy} への影響をあらわしており，出水にともない S_t^{dy} が大きく減少していることがわかる．両者の差は曝気の効果に相当する．期間(I)における気泡発生不良が成層破壊に大きく影響しているが，7月集中豪雨もまた S_t^{dy} の減少に対して大きく貢献していることが確認される．

各稼働期間内において S_t^{dy} が減少すると酸素気泡は深水層に留まりにくくなり，系外への散逸が大きくなる．そこで， S_t^{dy} の期間内最小値 $S_{t, \min}^{dy}$ が酸素の散逸率 R_L を規定するパラメータと考え，両者の関係を図-14に示す．期間(VI)を除くと高い負の相関が認められ，成層安定度が増加するほど散逸率 R_L が低減している．期間(VI)（9月25日～10月3日）の値は他のデータ群と離れており，他の期間より R_L が小さい，つまり，曝気効率 R_E が相対的に高く評価されている．貯水池と河川の水温の比較から河川水の流入標高を推定すると（図-15），期間(VI)においては河川水が終始深水層へ流入していることがわかる（濁度は考慮していない）．このように河川から深水層への酸素供給が形式的に曝気効率 R_E に算入され，成層安定度の割に散逸率 R_L が大きく評価されたと考えられる．

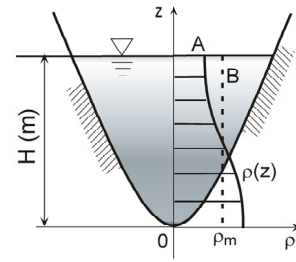


図-11 成層安定度 S_t^{dy} を定義するための二つの密度分布

[A:水温成層時の水温分布，B:Aの状態を断熱的に混合した場合の仮想的な一様密度分布，C: 基準とする一様な密度分布（例えば，冬季の全層循環状態）]

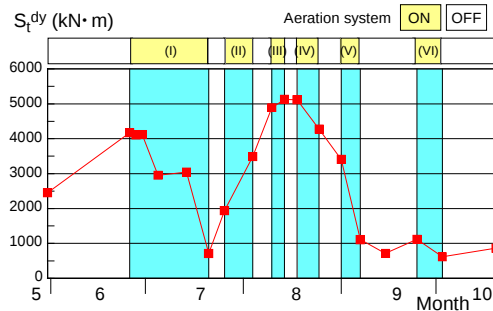


図-12 成層安定度 S_t^{dy} の季節変化

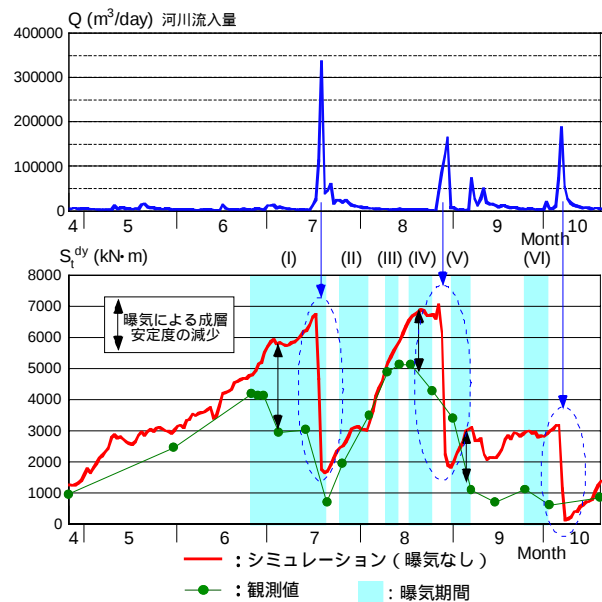


図-13 河川流入と曝気擾乱の成層安定度 S_t^{dy} への影響

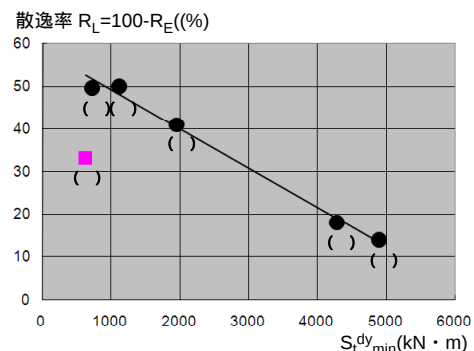


図-14 成層安定度の期間内最小値 $S_{t, \min}^{dy}$ と散逸率 R_L との関係

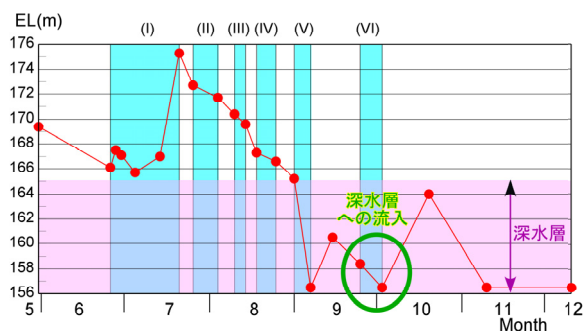


図-15 河川流入標高の推定値

7. 必要送気量の算定

必要送気量 Q_N を算定するにあたり、酸素消費量の実績値 Q_d を上回るように季節毎の酸素要求量 Q_{CO} を安全側に設定する。深層外への酸素散逸率 R_L を考慮して Q_N は次式のように算定される。

$$Q_N(t) = \frac{Q_{CO}(t)}{1 - R_L(t)/100} = \frac{Q_{CO}(t)}{R_E(t)/100} \quad (8)$$

ダム管理の実情を勘案すると、送気量を毎日管理することは困難である。ここでは、水温・水質の季節変化に関する2006年や既往実績を考慮して、深層曝気が必要な成層期を、(i) 成層形成期（4月15日～6月1日）、(ii) 成層最盛期（6月1日～9月15日）、(iii) 成層衰退期（9月15日～10月31日）に分割し、期間毎の Q_N を以下のように設定する。

まず、図-9の Q_d 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 $Q_{CO}(t)$ を同図中のように設定する。次に、図-12と図-14を用いて、降雨量が平年並みであった2003年実績の成層安定度から曝気効率 R_E を求め、これを下回る安全側の値を図-16のように設定する。

以上のように設定された諸元と式(8)から算定される必要送気量を表-3に示す。

8. まとめ

深層曝気施設の適切な運用を目的として、酸素消費速度の季節への依存性と成層安定度の曝気効率への影響に着目し、必要送気量の算出方法を提案した。曝気施設がない場合には深層の酸素が枯渇するため、実績に基づく季節毎の酸素消費速度の推定は難しい。しかし、本報では、間欠運転される曝気システムの停止期間中の溶存酸素が残留した状態を対象としたため、濃度変化から季節毎の酸素消費量を推定することが可能であった。さらに、深層に溶解あるいは滞留する酸素の割合（曝気効率）が成層安定度に依存することを利用して、系外への酸素散逸量を推定し、必要送気量を算出した。

一般に、曝気施設の容量は安全側を見て大きめに計画される。出力を微調整できるシステム型式の場合には問

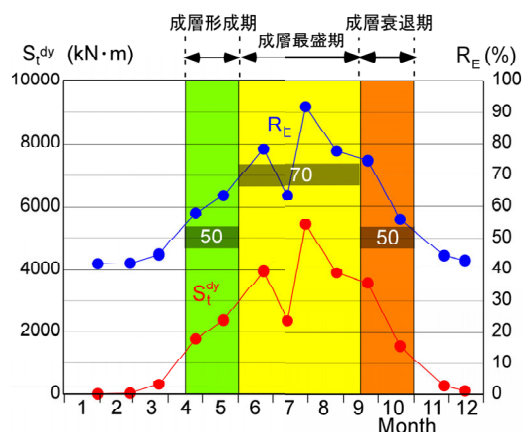


図-16 各期における曝気効率 R_E の設定

表-3 諸量の設定と必要送気量の算出

	成層形成期 4/15～6/1	成層最盛期 6/1～9/15	成層衰退期 9/15～10/31
日数	45	105	45
成層安定度 S_t^{dy} (kN・m)	1,000	3,000	1,000
曝気効率 R_E (%)	50	70	50
酸素要求量 Q_{CO} (kg/day)	7	13	9
必要送気量 Q_N (kg/day)	14	19	18
稼働率 $Q_N/Q_0 \times 100$ (%)	41	55	53

題ないが、定格出力で運転するシステムの場合には、機器の消耗・損傷を最小限に抑え、維持・管理の省力化・省エネルギーを計るために、稼働/停止を繰り返す間欠運転が有利である。水質監視に基づき自動化された間欠運転を実現することが今後の技術課題である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、兵庫県県土整備部と八鹿土木事務所の関係各位、神戸大学前田浩之技術職員、元神戸大学大学院の小林秀樹氏、釜谷知佳氏には多大なるご協力を頂いた。本研究は平成18,19年度科学研究費補助金基盤研究(B)(1)（課題番号：18360237、代表者：道奥康治）の助成のもとに実施された。

参考文献

- 1) 道奥康治・神田徹・大成博文・森口昌仁・松尾昌和・松尾克美：曝気形態と貯水池深層水質との関係について、水工学論文集、第46巻、pp.1091-1096, 2002.
- 2) 道奥康治・酒谷祐輔・松尾克美・尾田敏範・原義晴：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) 森川七生・道奥康治：貯水池水の蘇生をはかる；水資源開発公団「一庫ダム貯水池」の深層水エアレーションシステム、土木学会誌、第77巻、pp.12-15, 1992.
- 4) 道奥康治・小谷英之・小林秀典：中層貧酸素化の軽減を目的とした貯水池曝気施設の計画、水工学論文集、第51巻、pp.1355-1360, 2007.

(2007.9.30受付)