

# 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

PLANNING OF AERATION SYSTEM FOR MINIMIZING  
DEOXYGENATION IN RESERVOIR METALIMNION

道奥康治<sup>1</sup>・小谷英之<sup>2</sup>・小林秀典<sup>3</sup>  
Kohji MICHIOKU, Hideyuki KOTANI and Hidenori KOBAYASHI

<sup>1</sup>フェロー会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

<sup>2</sup>正会員 修(工) (株) 東日本旅客鉄道 (〒151-0053 東京都渋谷区代々木二丁目2番2号)

<sup>3</sup>学生会員 学(工) 神戸大学大学院自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

It was found in a eutrophic reservoir that the metalimnion became anoxic during the hot season while the hypolimnion became successfully aerated. As countermeasures against deoxygenation of the reservoir metalimnion, performance of three types of aeration systems, i.e. (i) air diffuser system, (ii) air bubbler destratification system and (iii) air bubble jet system, was evaluated by making a numerical analysis of water quality. In the analysis, physical processes such as dissolved oxygen dilution and vertical mixing caused by aeration were taken into consideration in addition to hydrodynamics and biochemical processes regarding to water quality. The system's performance was examined from view points not only of water purification but also of cost-benefit performance. It was found through the analysis that the air bubbler destratification system shows the best performance. System's capacity necessary for the aeration was also discussed.

**Key Words :** reservoir eutrophication, deoxygenation, decomposition of organic matters, aeration, water purification

## 1. はじめに

貯水池の貧酸素化は、底泥からの栄養塩・金属の溶出や、浄化効率の低下など、様々な水質障害をもたらす。対象貯水池では、深水層の貧酸素化対策として深層曝気が実施されているが、近年、曝気効果が到達しない水温躍層部での酸素消費が顕著になり、貧酸素化が進行している<sup>1)</sup>。図-1に示すヒソメトリック曲線（「高度一面積」曲線）からわかるように、深水層に比べて中層の容積は大きく、中層の酸素回復は深水層の場合ほど容易ではない。また、対象貯水池のように水道水源に供されている場合には、中層に取水口が位置しているため貧酸素化が净水工程に深刻な影響をおよぼす。

本研究ではまず、現行の深層曝気システムを組み込んで鉛直一次元の水質モデルを構築し、現状における中層の貧酸素化を再現する。次に、中層の酸素回復をはかるために図-2に示す三種類の曝気システムを用いた中層曝気を想定し水質解析を実施する。水質シミュレーションに基づいて、溶存回復に必要な各システムの施設規模を推算するとともに、それぞれの水質改善性能を水質と費用便益の面から比較して、曝気システムの適正規模を議

論する。

## 2. 対象貯水池と深層曝気

対象貯水池の流域面積は94.5km<sup>2</sup>、湛水延長は5.6km、最大水深は31m、総貯水量は11.6×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>である。池水の年交換率は2~10程度で安定な水温成層が発達する。1988年より図-2(a)の循環方式による曝気装置4基によって深層曝気が開始された（1基あたりの送気量は350~1500L/min）。その結果、深水層の酸素が回復し、底層

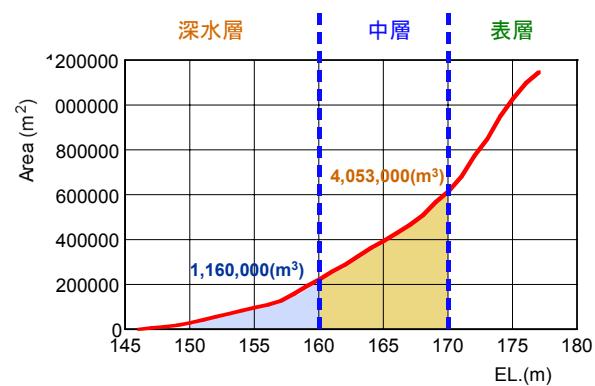


図-1 対象貯水池のヒソメトリック曲線

での溶存物質や栄養塩の濃度はかなり低減した。しかし、曝気装置から供給される酸素が躍層周辺にまで至らないため、中層部の貧酸素化が顕著となっている。現地観測より、躍層部に浮遊する有機物の分解、「躍層一底泥」接触面での底泥酸素消費量（Sediment Oxygen Demand, SOD）が中層部の貧酸素化を促進する要因であることが明らかとなつた<sup>1)</sup>。中層部の貧酸素水塊には底泥起因のマンガンや栄養塩などが集積している。

### 3. 水質解析

本研究で用いる貯水池モデルは、鉛直方向に分割され、各層が水理現象にともなう体積収支に応じて伸縮、上下移動するLagrange型の鉛直一次元モデルであり、Dynamic Reservoir Simulation Model, DYRESM<sup>2)</sup>を基本にして著者らが独自にコード化した<sup>3)</sup>。図-2の三種類の曝気システムに応じて、鉛直混合や酸素収支を記述するサブモデルを組み入れるとともに、図-3のような水質収支が考慮されている。すなわち、本モデルは、①水理モデル、②曝気モデル、③水質モデルから構成される。

①、③については割愛し、②曝気モデルの考え方を以下に要約する。

#### (1) 循環方式(図-2(a))のモデル化

循環方式の曝気装置では、図-4(a)のように、装置下端の散気管から空気が供給され、曝気筒内の気液混相流中で酸素が水中へ溶解する。高さ $z$ における気相流量を $Q_a(z)$ とし、液相流量は装置下端の運行流量 $Q_{in}$ に等しいと考える。高さ $z$ において気相から液相への溶解流量を $Q_d(z)$ とおけば、上昇過程において単位時間あたり、高さ $dz$ あたり $Q_d(z)dz$ の酸素が液相へ溶解し、曝気された水が貯水池内へ吐出される。

ここで、高さ $z=Z$ における気相流量 $Q_a(Z)$ は、水中への空気の溶解を考慮して

$$Q_a(Z) = \left( \frac{P(z_b)}{P(Z)} \right)^{0.71} \cdot Q_{diff} - \int_{z_b}^Z \left( \frac{P(z)}{P(Z)} \right) \cdot Q_d(z) dz \quad (1)$$

で与える。ここで、 $P(z)$ (kPa)は高さ $z$ (m)における絶対圧力、 $Q_{diff}$ ( $m^3/sec$ )は地上での送気量 $Q_{air}$ をエアレータの設置水深に換算した送気量(実送気量)である。

気相の酸素濃度を $C(z)[g/m^3]$ とおき、境膜理論に基づいて水中への酸素溶解フラックス $J(z)[g/m^2/sec]$ は飽和DO濃度 $C_s(z)[g/m^3]$ (水温の関数)との差に比例すると仮定する。直径 $d_b$ の気泡の表面から $J(z)$ の割合で溶解すると考え、気泡個数を $N(z)$ 個とすればDOの溶解量 $M_{DO}(z)[g/m/sec]$ は次式で与えられる。

$$M_{DO}(z) = \pi d_b \cdot N(z) \cdot J(z) = \pi d_b \cdot N(z) \cdot K_L \{ C_s(z) - C(z) \} \quad (2)$$

ここで、 $K_L[m/sec]$ は酸素移動係数であり、高さ $z$ における飽和DO濃度 $C_s(z)$ は水压 $P(z)[Pa]$ とヘンリイ一定数 $H(T)$

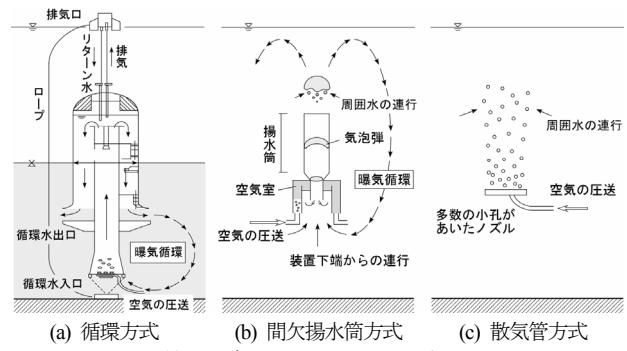


図-2 検討対象とする三種類の曝気システム

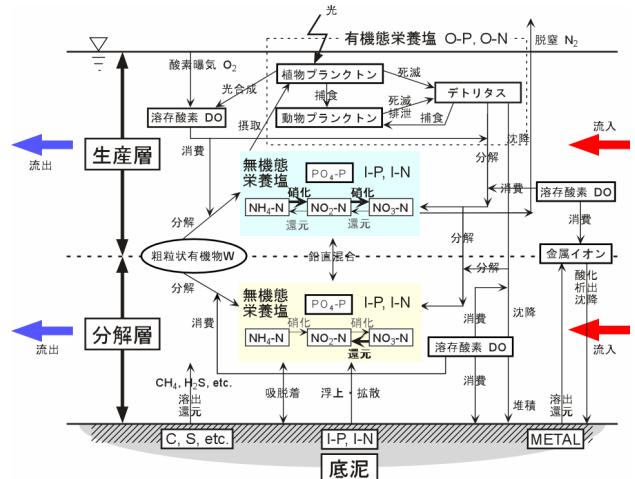


図-3 水質解析で考慮される水質収支

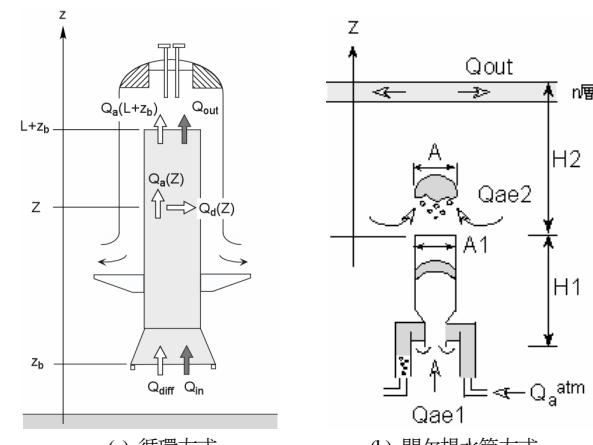


図-4 曝気システムにおける気泡流量などの定義

( $T^\circ C$ は水温)を用いて次式のように与えられる。

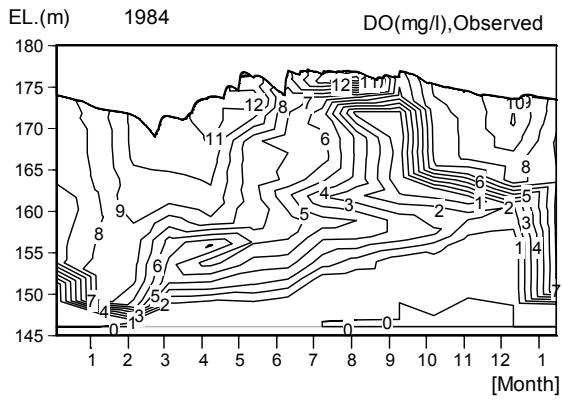
$$C_s(z) = (158/760) \{ P(z)/H(T) \} \quad (3)$$

ここで、158mmHgは大気圧760mmHgに占める酸素分圧である。

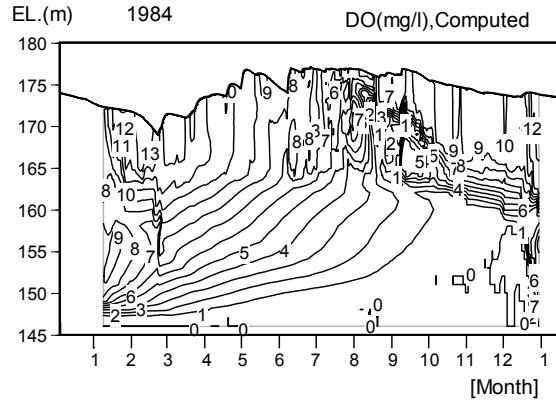
曝気筒下端から運行された溶存酸素(以下、DOと記す)の濃度 $DO_{in}$ の深層水(図-4(a)参照)が長さ $L$ の曝気筒内を上昇した後に吐出されるDO濃度 $DO_{out}$ は $M_{DO}(z)$ を用いて次式のように与えられる。

$$(DO)_{out} = DO_{in} + \int_{z_b}^{L+z_b} M_{DO}(z) dz \quad (4)$$

理想気体の状態方程式を用いれば、DO溶解量 $M_{DO}(z)$

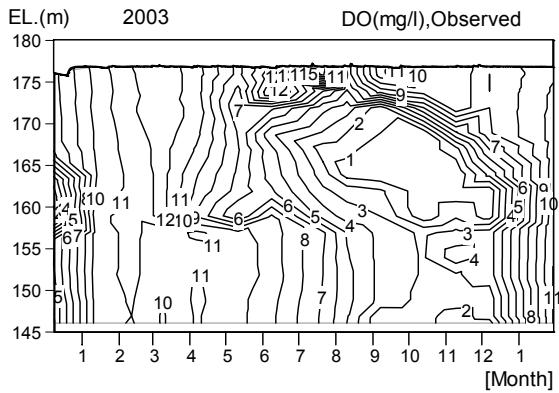


(a) 観測値



(b) 解析値

図-5 深層曝気開始前の溶存酸素分布（1984年）



(a) 観測値

図-6 深層曝気開始後の溶存酸素分布（2003年）

と空気溶解流量 $Q_d(z)$ とは次式により換算される。

$$Q_d(z) = \frac{1}{32} \cdot \frac{R\{T(z) + 273.15\}}{(158/760)P(z)} \cdot M_{DO}(z) \quad (5)$$

ここで、 $R$ は気体定数（8.3145[J/K/mol]）である。

曝気筒下端での吸い込み流量は送気量 $Q_{air}$ と曝気筒長さ $L$ の関数として経験的に与えられる。

## (2) 間欠揚水筒方式（図-2(b)）のモデル化

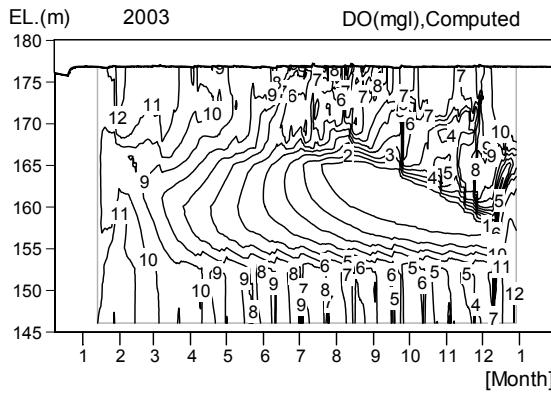
図-4(b)の間欠揚水筒方式に関しては、揚水筒下端における吸い込み量 $Q_{ae1}$ や気泡弾による連行流量 $Q_{ae2}$ 、さらに連行水の上昇・下降挙動に関する知見が得られており<sup>4), 5)</sup>、これらを採用した。

## (3) 散気管方式（図-2(c)）のモデル化

散気管曝気にともなう周囲水との水質交換に関してはDYRESMで採用されている気泡噴流モデルを採用した。モデルの第j層における気泡噴流の液相流量 $Q_{pj}$ と周囲水の連行流量 $\Delta Q_{pj}$ は次式で与えられる<sup>2)</sup>。

$$Q_{pj} = Q_{pj-1} + \Delta Q_{pj} \\ = Q_{pj-1} + \alpha \cdot \left( \frac{6\pi}{5} \right) \cdot b \cdot L_R \cdot B_{j-1}^{1/3} \cdot \left( z_j^{5/3} - z_{j-1}^{5/3} \right) \quad (6)$$

ここで、 $\alpha (= 0.004)$ : 第1連行係数、 $b (= 4.7)$ : 第2連行係数、 $L_R (= 0.1)$ : 気泡噴流の形状比である。 $B_j$ は気相流量 $Q_{aj}$ 、



(b) 解析値

液相流量 $Q_{pj}$ 、気泡噴流の液相密度 $\rho_{pj}$ 、周囲水の密度 $\rho_j$ から次式で定義される浮力フラックスである。

$$B_j = gQ_{aj} - g\{(\rho_{pj}-\rho_j)/\rho_{pj}\}Q_{pj}, \quad (7)$$

第j層における気泡噴流の直径 $D_j$ は高さ $z_j$ のべき関数として次式のようにあらわす。

$$D_j = D_0 + A(z_j - z_0)^m \quad (8)$$

ここで、 $D_0$ : ノズル出口における気泡噴流径（後述の検討では $D_0=2.0\text{m}$ ）、 $A (= 0.1)$ 、 $m (= 1.2)$ : モデル定数である。

循環方式と散気管方式の曝気装置に関しては、式(1)～(5)を組み込んで気泡の溶解を気相の連続式に考慮し、マイクロバブル噴流にも適用できるように設定した。間欠揚水塔方式の場合には気泡の溶解を考慮していない。

## 4. 水質の再現とモデルの検証

水質モデルのパラメータを同定し、再現性を検証するために、深層曝気開始前の1984年と開始後の2003年を対象として水質解析を実施した。図-5に1984年、図-6に2003年におけるDOの解析結果をそれぞれ観測値と比較する。2003年における深層曝気の送気量としては、1基あたり350～1500L/minの容量を有する曝気装置4基それぞれの運転実績値の合計量を与えている。1984年における深水層の貧酸素化の様子、2003年における深水層の酸

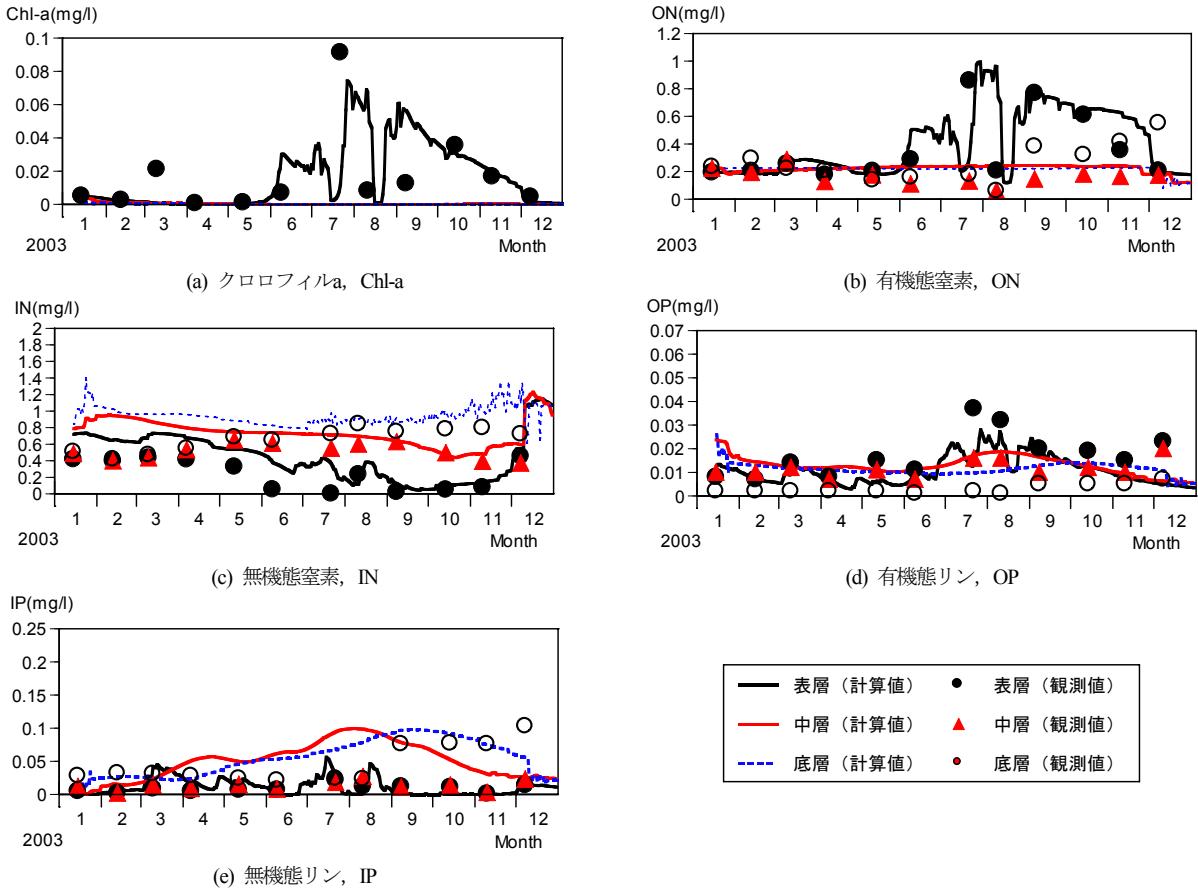


図-7 水質各項目の再現性 (2003年)

素回復状況と中層における貧酸素水の発達などがおおよそ再現されている。ただし、貯水池延長が長く、観測においてはDOが上下流方向にゆるやかに変化しているのに対し、解析モデルは鉛直一次元を仮定しているため、観測値と解析値にはずれも見られる。

水温に関しても良好な一致が確認されている(省略)。他の水質項目について、観測値と解析値との比較を図-7に示す。概ねモデルの再現性が確認されたため、曝気施設の規模・型式が水質に及ぼす影響を本モデルによって検討することとする。

## 5. 曝気施設の性能評価

水質解析モデルを用いて、図-2に示す三種類の曝気システムを中層に設置した場合の水質改善効果を評価する。本来は水質障害の状況に応じて目標水質を設定すべきであるが、ここでは曝気効果を直接反映する指標としてDO濃度をとる。

### (1) 曝気方式の諸元

図-2(a)の循環方式では、深層曝気で稼働中のものと同型機種を中層に設置し、成層構造を維持しながら中層に酸素を供給する。図-2(b)の間欠揚水筒方式、ならびに図-2(c)の散気管方式は中層の貧酸素水を拡散浮上させ、表層の豊酸素水を中層へ供給することにより貧酸素水の

表-1 曝気システムと貯水池の諸元  
(曝気期間はいずれも2003年1月1日~12月31日を想定)

(a) 循環方式

曝気筒の直径	0.5m
曝気筒の高さ	7m
吸込み口標高	163m
吐出し口標高	170m
気泡径	0.002m

(b) 間欠揚水筒方式

曝気筒の直径	0.4m
曝気筒の高さ	5m
吸込み口標高	156m
吐出し口標高	161m
空気室容積	0.04m <sup>3</sup>

(c) 散気管方式

設置標高	156m
気泡直径	0.002m
溶解効率	$8.0 \times 10^{-10} (1/sec)$

(d) 貯水池の諸元

常時満水位	176.8m
取水口標高	166 or 171m
貧酸素層の標高	163~171m
湖底標高	146m

解消を図る。ここでは、表-1(d)の貯水池諸元を考慮して各曝気システムの条件を表-1(a)-(c)のように設定し、それぞれの曝気性能を検討する。

### (2) 水質改善度の評価方法

水質指標としてDOをとる。厳密には水質障害の状況に応じて着目する層や時期を特定する方がよいが、ここでは貧酸素化が問題となる中層(標高155~170m)の平均的な酸素回復量 $\Pi_p$ を次式のように定義し、水質改善度の指標とする。

$$\Pi_p = \frac{\int_0^{365} \int_{155m}^{170m} \{C(z, t) - C_0(z, t)\} A(z) dz dt}{365 \times \int_{155m}^{170m} A(z) dz} \quad (9)$$

ここで、 $A(z)$ : 標高 $z$ における貯水池の水平面積、 $t$ : 時間

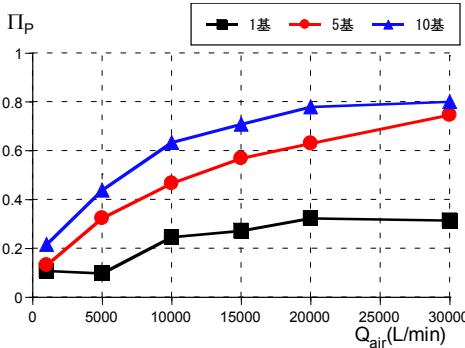


図-8 設置基数・送気量と酸素回復量 $\Pi_P$ （循環方式）

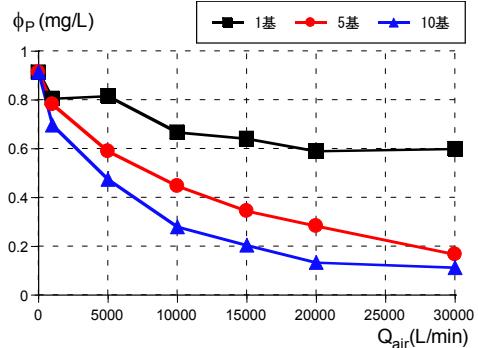


図-9 設置基数・送気量と酸素不足量 $\phi_P$ （循環方式）

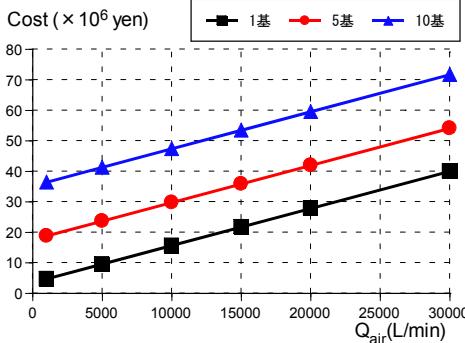


図-10 設置基数・送気量と費用の関係（循環方式）

(日),  $C(z, t)$ : 中層曝気をした場合のDO濃度,  $C_0(z, t)$ : 中層曝気がない場合のDO濃度, である。

一方, 健全な水質を維持するためのDOの目標濃度を  $C_S=5\text{mg/L}$  と設定して平均的な酸素不足量 $\phi_P$

$$\phi_P = \frac{\int_0^{365} \int_{155m}^{170m} \Delta C(z, t) A(z) dz dt}{365 \times \int_{155m}^{170m} A(z) dz} \quad (10)$$

をもう一つの水質改善達成指標に用いる. 式(10)中の酸素不足量 $\Delta C(z, t)$ は次式により定義される.

$$\Delta C(z, t) \equiv \begin{cases} C_S - C(z, t) & \text{if } C_S > C(z, t) \\ 0 & \text{if } C_S < C(z, t) \end{cases} \quad (11)$$

$\phi_P$ が0に近いほど水質改善の達成度が高いことを示す.

### (3) 費用便益分析

水質改善の便益を適切にあらわす経済評価手法は確立されていないため, 平均酸素回復量 $\Pi_P$ をもって便益指標 $B$ に代替する ( $B=\Pi_P$ ). また, 曝気システムの設置・運用に要する費用 $C$ を算出するためには, 様々な費目を考慮する必要があるが, ここでは初期投資費 $K$  [円] (設備費), 維持管理費 $O$  [円] (電気料金) のみを考慮する. 以上から費用便益比 $B/C$ を次式で評価する.

$$\frac{B}{C} = \frac{B}{O + \alpha_{iT} K} \quad (12)$$

上式中,  $\alpha_{iT}$ は利子率 $i$ , 経済的耐用年数 $T$  [年] の設備における年間資本係数であり, 次式で定義される.

$$\alpha_{iT} = \left( \sum_{n=1}^T \frac{1}{(1+i)^n} \right)^{-1} \quad (13)$$

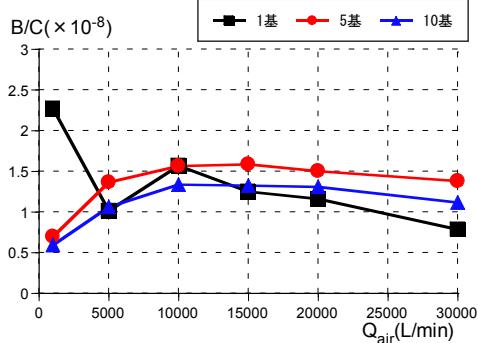


図-11 設置基数・送気量と費用便益比 $B/C$ （循環方式）

本解析では,  $i=0.1$ ,  $T=20$  [年] とし,  $\alpha_{iT}=0.117$ とする. 維持管理費 $O$ には様々な要素が含まれるが, ここでは, コンプレッサの送気に要する電力料金をもって代替する. 曝気システム1基あたりの初期投資費は, (a) 循環方式:  $K=5,000$ 万円, (b) 間欠揚水塔方式: 500万円, (c) 散気管方式: 1,000万円とする.

### (4) 曝気システムの性能評価

循環方式の曝気システム1基, 5基, 10基を中層に設置し, 送気量を変化させた場合の平均酸素回復量 $\Pi_P$ と酸素不足量 $\phi_P$ を図-8,9に示す. 台数・送気量の増加とともに酸素は回復し, 酸素不足は解消されるが, 送気量や台数がある程度以上になると水質改善度の伸びは頭打ちになる. 図-10のように費用は台数や送気量の単調増加関数であるため, 図-9,10から算出される費用便益比 $B/C$  ( $=\Pi_P/\phi_P$ ) は図-11のように, 送気量に対して極大値をとる. ただし, 図-11において, 1基で送気量が最小 (1,000L/min) の場合に最も大きな $B/C$ を示しているが, この条件下では, 図-8,9からわかるようにDOがほとんど改善されていない状況である. このことから,  $B/C$ だけで施設の適正規模を判断できないことがわかり,  $B/C$ と図-8または図-9を併せて曝気システムの施設規模を決定することが必要である. 図-11から5基で10,000 (L/min) の送気量が最適と判断される.

間欠揚水塔方式, 散気管方式についても図-8~11と同様の水質改善度, 費用便益比を評価した. 図-12は横軸に台数, 縦軸に総送気量をとった平面上での平均酸素回復量 $\Pi_P$  (濃淡パターン) と費用便益比 $B/C$  (等値線, 数値は $\times 10^{-8}$ [mg/L/円]) の関係を三種類の曝気方式に対し

て示している。淡い色ほど中層の酸素回復 $\Pi_P$ が大きく、濃い色ほど中層が貧酸素状態であることを示す。

例えば、図-12(a)を見ると $1.5 \times 10^8$ [mg/L/円]の等値線において最大のB/Cが達成され、この範囲にある総送気量と台数の組み合わせが適していることがわかる。しかし、台数が1~2基では濃淡図からわかるように酸素回復 $\Pi_P$ は十分ではない。したがって、 $B/C = 1.5 \times 10^8$ [mg/L/円]の範囲で、しかも $\Pi_P$ の大きな赤丸の範囲が最も適切な組み合わせと判断される施設規模(5基-15,000[L/min])か(6基-15,000[L/min])が与えられる。

同様にして、間欠揚水塔方式と散気管方式における適正施設規模は図-12(b),(c)中の赤丸の範囲と判定される。

三種類の曝気方式を比較すると、図-12(b),(c)の間欠揚水塔方式が同等の施設規模に対して最も大きな $\Pi_P$ (最も濃い色)を達成し、中層の貧酸素水を軽減する上で有利な工法であると判断される。その要因として、循環方式の場合には成層が維持され、供給されたDOが中層にとどまり、取放水口から選択的に放出されることが考えられる。間欠揚水塔方式の場合には、中層以浅へも酸素が拡散し、循環式に比べると取放水によるDOの損失は少ないものと推察される。

本解析に基づけば、間欠揚水塔方式5基、総送気量による5,000L/minの運転が中層を曝気する上で推奨される。

## 6. むすび

深層曝気が成功しても躍層部での酸素消費によって中層が貧酸素化した場合には、その容量が大きいために相当規模の曝気システムを必要とする。三種類の曝気方式を中層の貧酸素水対策として採用した場合を想定し、それらの水質改善効果を水質シミュレーションにより検討した。溶存酸素回復量と施設費・電力料金を考慮した費用便益比を指標として、曝気方式とその規模を検討した結果、中層の貧酸素水の解消には間欠揚水塔方式が最も有利であることが明らかとなり、その適正規模が示された。

**謝辞：**水質観測を実施するにあたり、佐々木茂太・西口祐輝の両氏（前神戸大学大学院学生）、神戸大学技術職員前田浩之氏には多大なご協力を賜った。また、本研究の一部は平成18年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(1)、課題番号：18360237、研究代表者：道奥康治）の助成を得て実施された。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 道奥康治・小谷英之・佐々木茂太・西口祐輝：水温躍層における貧酸素水の成長機構について、水工学論文集、第49巻、pp.1177-1182、2004年。

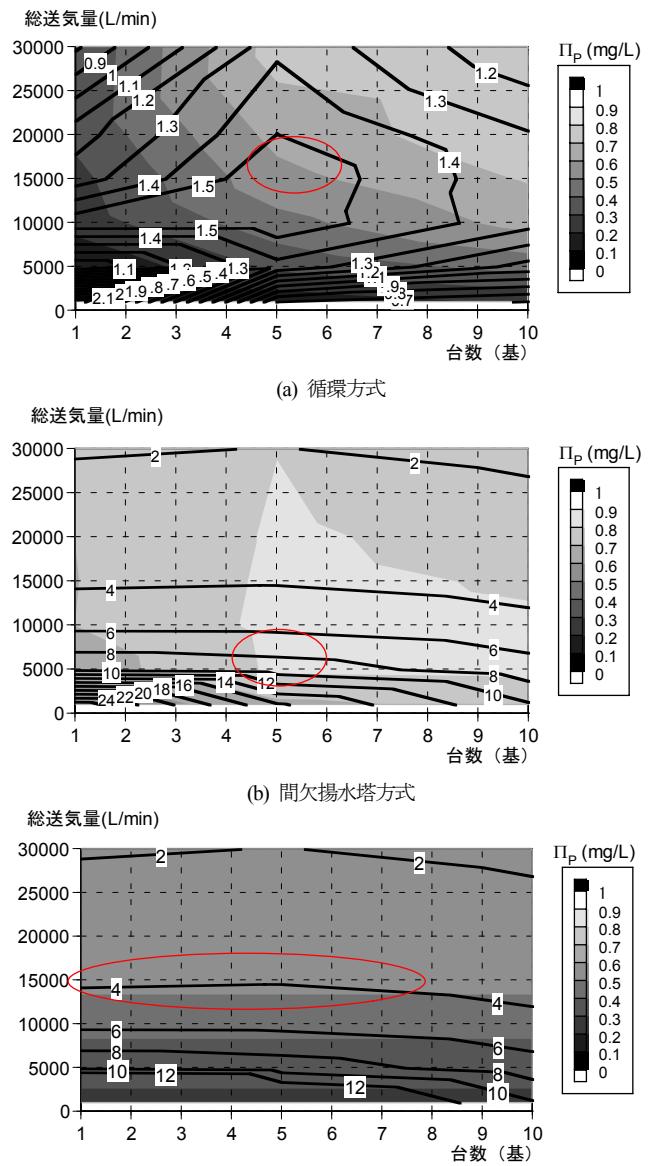


図-12 [送気量、設置基数] と [B/C、酸素不足量 $\phi_P$ ]

- 2) Jason Antenucci and Alan Imerito: The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model Science Manual, October 13, 2000.
- 3) 道奥康治・松尾昌和・香川健一・斎藤敦：貯水池の富栄養化にともなう熱塩成層のモデル化、水工学論文集、第47巻、pp.1237-1242、2003年。
- 4) 松梨史朗、宮永洋一：曝気を考慮した水質予測モデルの実貯水池への適用、第32回水理講演会論文集、pp.251-256、1988。
- 5) 浅枝隆、中井正則：気泡を用いた高密度の深層水用水施設の解析、土木学会論文集、第411号/II-12, pp.91-98, 1989。

(2006.9.30受付)