

第Ⅱ部門

微細気泡による深層曝気を考慮した貯水池の水質解析

(株) 建設技術研究所 正会員 ○西口 祐輝
 神戸大学工学部 フェロー 道奥 康治
 神戸大学大学院 学生員 酒谷 祐輔
 神戸大学工学部 学生員 小林 秀樹

1. はじめに

貯水池などの閉鎖水域では、富栄養化によって深層が貧酸素化し、様々な水質障害が発生する。本研究で対象とする貯水池においても、受熱期には内部生産と有機物の分解により水中の酸素が多量に消費され無酸素水塊の拡大が顕著であった。そのため、底泥堆積層から栄養塩や鉄・マンガンなどが嫌氣的に溶出していた。そこで、マイクロバブルによる深層曝気が行われ、水質がかなり改善された。本研究では、深層曝気により発生する微細気泡プルームからの酸素溶存を考慮した水質モデルを開発し、酸素回復過程を再現する。

2. 気泡プルームのモデル化

図-1 は、マイクロバブルエアレータから発生する気液混相プルーム（以後、「気泡プルーム」と記す）が気相流（空気、純酸素）と液相流（連行水）からなることを考える。貯水池は鉛直方向に N 個の層に離散化される。第 j 層の上側境界面（高さ z_j ）における気相の流量を Q_{aj} 、液相の流量を Q_{pj} とする。また、第 j 層において、周囲水から気泡噴流への連行流量を ΔQ_{pj} 、気泡プルームから周囲水へ単位時間あたりに溶解する気体流量（曝気量＝溶解流量）を Q_{dj} とする。

(1) 浮力フラックス: B_j

第 j 層における気泡プルームの浮力フラックス B_j は次式のように表す。

$$B_j = gQ_{aj} - g \left(\frac{\rho_{pj} - \rho_j}{\rho_j} \right) \cdot Q_{pj} \quad (1)$$

ここで、 ρ_j は第 j 層における周囲水（貯水池水）の密度 (kg/m^3)、 ρ_{pj} は第 j 層における気泡プルーム液相の密度 (kg/m^3) である。式(1)において、第 1 項は気相流の浮力フラックス、第 2 項は気泡プルームの液相と周囲水との相対重力を表す。

(2) 気相流量: Q_{aj}

第 j 層における水圧を P_j (kPa) とすれば、第 j 層での気相流量 Q_{aj} は次式で表される。

$$Q_{aj} = \left(\frac{P_{j-1}}{P_j} \right)^{0.71} Q_{aj-1} - Q_{dj} \quad (2)$$

ここで、 H を全水深 (m) とすると、 $P_j = w_0(H - z_j) + P_{\text{air}}$ は高さ z_j (m) における絶対圧力である。

また、式(2)の第 2 項は第 j 層における単位時間あたりの気泡溶解量 Q_{dj} をあらわす。 Q_{dj} は気泡の溶解速度を v_{wj} (m/s)、気泡の平均直径を d_j (m)、気泡個数を N_j として次式で表される。

$$Q_{dj} = 4\pi d_j^2 \cdot N_j \cdot v_{wj} \quad (3)$$

上式は、気泡溶解量が [気-液境界面の表面積] × [気泡個数] × [気泡の溶解速度] であることを表す。

(3) 液相流量: Q_{pj}

気泡プルームの液相は第 j 層において周囲水から ΔQ_{pj} だけの連行をとる。

$\Delta Q_{pj} = \alpha \cdot \left(\frac{6\pi}{5} \right) \cdot b \cdot L_R \cdot B_{j-1}^{1/3} \cdot (z_j^{5/3} - z_{j-1}^{5/3})$ を連行流量、 α を連行係数、 b を係数 (= 4.7)、 L_R を気泡噴流の形状比 (= 0.1) とすると、 Q_{pj} は Fischer らにより次式で与えられる。

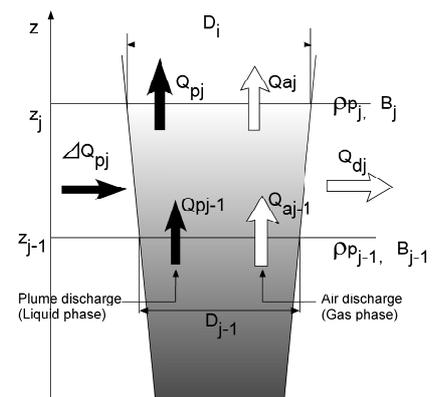


図-1 気泡プルーム

$$Q_{pj} = Q_{pj-1} + \Delta Q_{pj} = Q_{pj-1} + \alpha \cdot \left(\frac{6\pi}{5} \right) \cdot b \cdot L_R \cdot B_{j-1}^{1/3} \cdot (z_j^{5/3} - z_{j-1}^{5/3}) \quad (4)$$

一方、第 j 層内では周囲水が取り込まれて気泡プルーム液相の密度が変化するので、質量保存式は以下ようになる。

$$\rho_{pj} Q_{pj} = \rho_{pj-1} Q_{pj-1} + \rho_j \Delta Q_{pj} \quad (5)$$

同様にして、ある水質項目 i の第 j 層内の濃度 $C_{i,j}$ (mg/l)についても次の保存式が成り立つ。

$$C_{pi,j} Q_{pj} = C_{pi,j-1} Q_{pj-1} + C_{i,j} \Delta Q_{pj} \quad (6)$$

ここで、 $C_{pi,j}$ はプルーム液相の水質項目 i の濃度(mg/l)である。

(4)水平貫入

気泡プルームの上昇過程において、第 j 層の浮力フラックス B_j が負に転ずる場合にはプルーム水塊が周囲水へ水平に貫入し、第 j 層の周囲水と融合する。したがって、プルームが水平貫入する第 j 層においては Q_{pj} (ρ_{pj} , $C_{pi,j}$)だけの質量、物質が第 j 層へ加わることになる。一方、 Q_{aj} は Q_{dj} の割合で溶解し、液相が水平に貫入しても気泡が無くなる限り上昇し続ける。したがって、水平貫入が生じた地点で $Q_{pj}=0$ にリセットし、再び周囲水を連行しながら上昇を続ける。

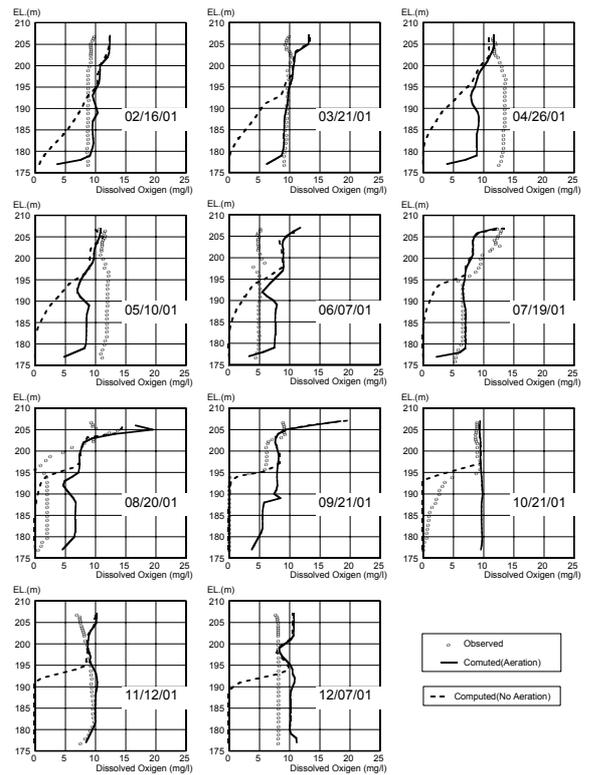


図-3 溶存酸素の分布 (Sダム 2001年)

3. 解析結果

図-2 の水温の季節変化を良好に再現している。図-3 の溶存酸素の分布から、深層曝気を考慮しない場合に比べ、深層層における溶存酸素濃度の分布状況がうまく再現されており、深層曝気の酸素供給が適切に記述されていることが確認された。

参考文献

Jason Antenucci and Alan Imerito: *The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model Science Manual*, October 13,2000.
 Fischer, H.B., et al.: *Turbulent Jets and Plumes, 'Mixing in Inland and Coastal Waters'*, Academic Press, pp.315-389, 1979.

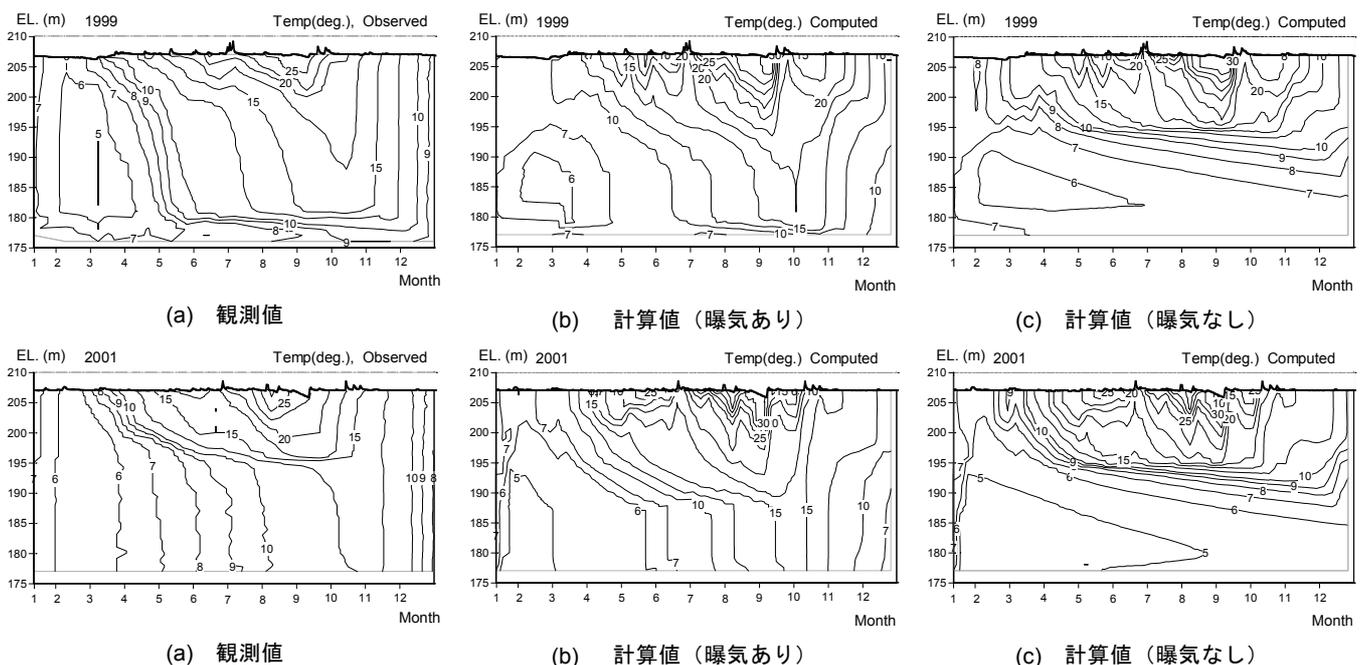


図-2 水温の季節変化 (Sダム, 上段 1999年, 下段 2001年)