

## 曝気循環装置を考慮した貯水池数値流動解析モデルに関する研究

東京工業大学 学生会員 ○箕浦靖久  
 東京工業大学 非会員 渡部一人  
 東京工業大学 正会員 中村恭志

### 1. 序論

閉鎖性が強い貯水池では、しばしば温暖季において水温躍層が表層付近に形成される。水温躍層は鉛直方向の物質輸送を抑制し、底層水の貧酸素化や、藻類などの異常増殖を引き起こす可能性がある。底層から空気を放出して鉛直循環流を駆動し、水温躍層を弱める曝気循環装置が多くの貯水池で使用されている。しかしながら、曝気の空間スケールは、貯水池内流動と著しく異なるため、従来曝気に伴う貯水池内流動構造の変化を数値解析により詳細に把握することは難しかった[1]。本研究では、鉛直1次元モデルによる曝気プルームの数値解析を3次元数値流動モデルと組み合わせることで、曝気を考慮した貯水池数値流動モデルを開発することを目的とした。

### 2. 曝気プルーム解析モデル

水温成層など密度成層を伴う水塊中での曝気プルームは、成層強度と放出される空気量に大きく影響を受ける[2]。本研究では、水温成層下における曝気プルームの鉛直1次元解析モデルとして、Asaedaらによるダブルプルーム曝気モデルを用いた[2]。図-1にモデルの模式図を示す。底層から放出された空気は微細な気泡群（気泡プルーム）を形成する。気泡プルームの周囲には連行により上昇水塊である内部プルームが形成される。高密度の下層水は内部プルームとなり上昇するが、その負の浮力により、ある水深で運動量を消失し気泡群を離れ、下降する外部プルームとなる。外部プルームはその密度が周辺水と同じになる深度で止まり、周辺水へイントルージョン（貫入）する。気泡群はそのまま上昇を続け、新たな内部プルームを連行する。内部プルーム、外部プルーム、及び周辺水間では速度差に比例して連行による交換がなされるとして鉛直 $z$ 方向の保存方程式を導出し、4次精度ルンゲクッタ法による数値積分により水塊・運動量・浮力の鉛直分布を求める。開発したモデルを用い、気泡放出量、成層強度、水深を変化させた96ケースについて検証計算を行った。既往実験では気泡上昇強度に対する成層強度の無次元パラメータ $P_N$ が500以上となるとプルーム

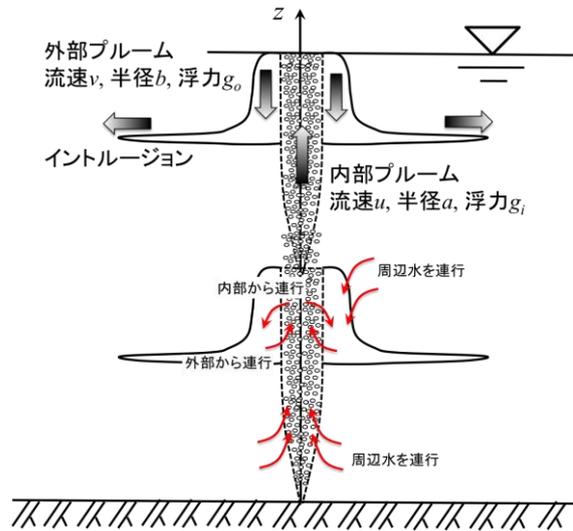


図-1 ダブルプルーム曝気モデル概念図

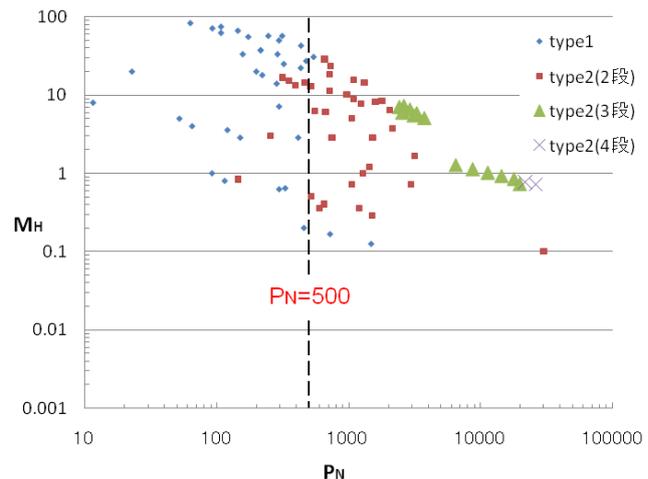


図-2 プルーム形態の変化

が多段となり(Type2), それ以下では単段(Type1)となることが知られている。図-2に $P_N$ および無次元気泡実行浮力フラックス $M_H$ に対する、計算されたプルーム段数を示す。図-2に示すように、開発した曝気モデルにより、実験などで示されているプルームの形態を妥当に再現可能であることを確認した。

### 3. 曝気-流動連成数値モデル

3次元数値流動モデルであるCIP-Soroban流動モデル[3]に、開発した曝気プルームモデルに組み込むことを

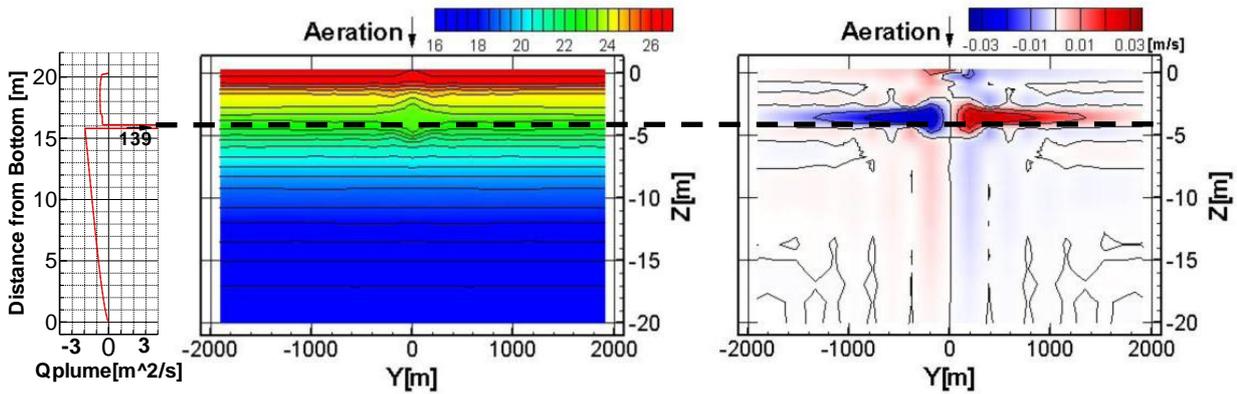


図-3 曝気-流動連成モデルによる仮想貯水池計算結果(曝気装置を含む横断面分布). (左) 曝気プルームから周辺水への放出量鉛直分布, (中) 水温分布, (右) 横断方向流速分布を示す. 図中の黒破線は曝気モデルにより計算されたイントルージョン水深.

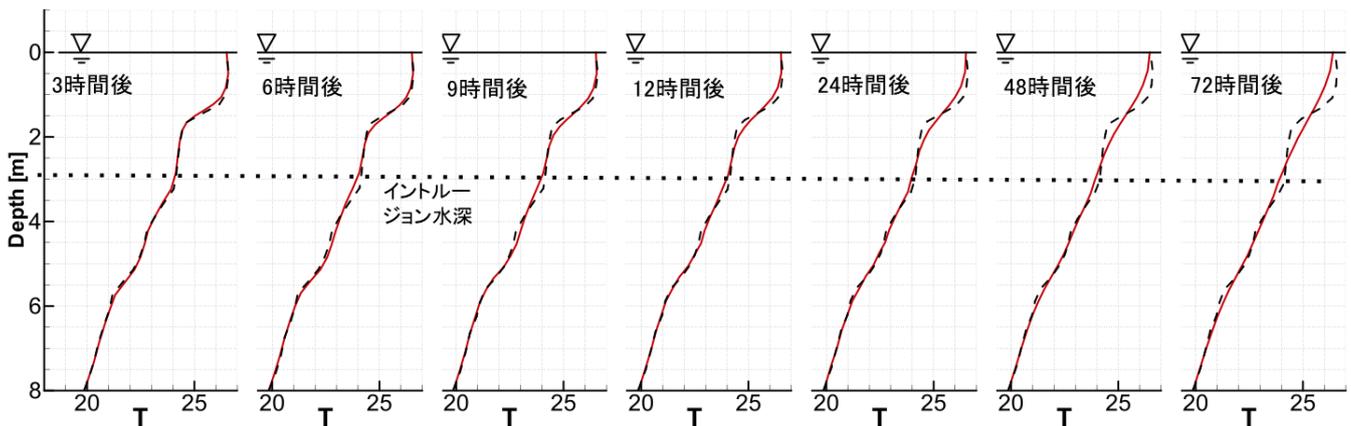


図-4 水温鉛直分布の計算結果(曝気装置から横断方向 500m). 黒破線: 初期水温, 赤線:  $Q_B=0.06\text{m}^3/\text{s}$  での計算結果.

行う. 貯水池内流動に比べ曝気の時間スケールは小さいことから, 流動と曝気の計算を分離して行うこととした. 流動モデルの各ステップにおいて, 流動モデルで計算された水温分布を周辺鉛直分布として曝気解析を行い, 曝気モデルから求められた曝気プルームから周辺水への流出量を流動モデルの連続条件式に加味する方法を提案した. また, 流動モデルで用いる新しい動的適合格子である Soroban 格子を考慮した計算方法も提案した.

開発した曝気-流動連成モデルを矩形断面・一様水深を持つ仮想貯水池に適用し検証計算を行った. 初期水温分布には釜房貯水池の夏期観測値を用い, 同湖における実際の空気放出量を用いて計算した. 図-3 に曝気開始後 12 時間後の貯水池横断面内での水温, 横断方向流速の分布を示す. イントルージョン水深で曝気から周辺水への貫入流が生じ, 鉛直循環流が生じていることが確認できる. 図-4 には曝気装置から 500m 離れた地点における, 水温鉛直分布の時系列変化を示す. 鉛直循環流により, イントルージョン水深より浅い位置にあった水温躍層が平滑化され, 弱くなっていること

が確認できる.

#### 4. 結論

鉛直 1 次元ダブルプルームモデルを開発した. 検証計算により, 開発したプルームモデルで, 実験で示唆されていたプルーム形態・挙動を再現可能であることを確認した. さらに, 3 次元 CIP-Soroban 流動モデルに曝気プルームモデルを連成させる方法について提案した. 開発した曝気-流動解析モデルを仮想貯水池の検証計算に適用した結果, 曝気に伴う鉛直循環流の生成, 及びそれによる水温躍層の解消を妥当に計算可能であることを確認した.

#### 参考文献

- [1] 梅田ら:曝気循環施設が設置された貯水池の流動解析,ダム水源環境技術研究所所報,pp.3-12,2004.
- [2] ASAEDA,T.&IMBERGER,J.:Structure of bubble plumes in linearly stratified environments, J.FluidMech,Vol.249,pp.35-57,1993.
- [3] 中村ら:CIP-Soroban 法に基づく汽水域 3 次元数値流動モデルの開発, 水工学論文集, Vol.54,pp1441-1446,2010.