

三次元貯水池流動シミュレーションの表層水移送装置の組み込みに関する研究

首都大学東京 学生会員 ○上田博茂

首都大学東京 正会員 横山勝英 新谷哲也 小泉 明 山崎公子

東京都水道局 非会員 高橋和彦 金見 拓 岩月夏希(現福祉保健局)

1. 研究目的

水源貯水池には富栄養化対策として表層水移送装置が設置されることがある。この装置は、表層で増殖する植物プランクトンをポンプ吸引し湖底の無光層に放出することで、藻類の増殖を抑制する効果が期待されている。しかし、吐出水は密度差によりプルームとして浮上し等水温層で拡散するため、その挙動を正確に予測することが必要である。これまでに著者らは、現地観測と鉛直1次元解析により吐出水の浮上停止水深を推定したため<sup>1)</sup>、次に三次元流動シミュレーションにプルームのメカニズムを組み込んだモデル構築を行った。

2. プルームの浮上挙動の理論

本研究では三次元流動モデル **Fantom3D** を用いた<sup>2)</sup>。本モデルは基礎方程式に非圧縮とブシネスク近似を施した三次元 Navier-Stokes 式および連続式を用いた流体モデルで静水圧、非静水圧計算を行うことが可能である。

プルームの浮上現象を再現するにあたり、水塊の鉛直流速が水平流速を上回るため、非静水圧計算を行うことが必要である。しかし非静水圧計算では、圧力に関する三次元ポアソン方程式を解く必要があるため計算負荷が大きく貯水池全域を対象にすることは現実的には不可能である。

そこで静水圧近似の流動モデルにプルームの鉛直1次元解析(図-1)を組み込んだ。プルームの鉛直1次元解析は、連行放出  $\alpha$  を用いることで、水塊が周囲水を巻き込みながら浮上する過程を解いており、浮力  $g'$ 、放出浮力流速  $H$ 、仮想原点からの距離  $z$  における拡がり幅  $b$  と鉛直流速  $w$  をそれぞれ計算し、これらから水平連行速度  $v$  を求める。さらに連行流量  $Q$  は次式で表される。

$$Q = 2\pi b \cdot dz \cdot v \tag{1}$$

これを次の要領で計算セルにおけるやり取りとして表現した。まず、最下層のセルには吐出流量  $Q_0$  と水温  $T_0$  を入力条件として与える。Step 1 では連行流量  $Q_1$  を(1)式から求め、 $Q_0 \cdot T_0$  と  $Q_1 \cdot T_1$  の混合水塊を上方セル(下から2層目)に移動させる。このとき、流量の連続のために  $(Q_0 + Q_1)$  を下方セルへ移動させるが、水温のやり取りはしない。Step 2 では、下から2層目のセルにおいて  $Q_2$  を求めて、先程と同様にして3層目とのやり取りを行う。なお計算セルは10~25 mを想定しており、プルームの拡がり半径は最大でも5 mに満たないため、水平連行は1つのセルの内部

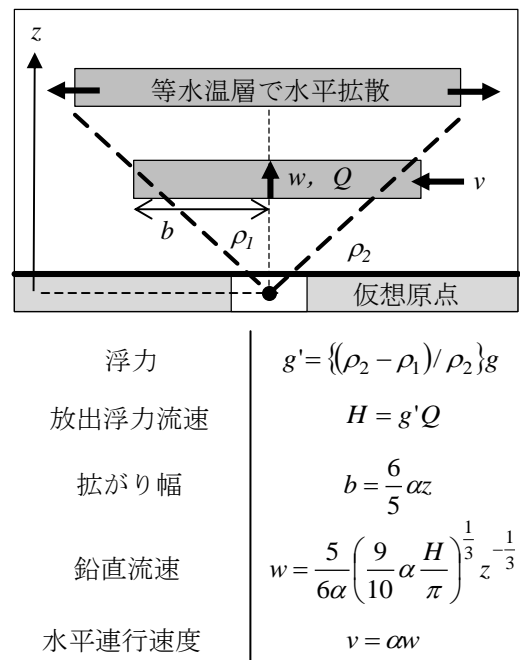


図-1 プルームの鉛直1次元解析

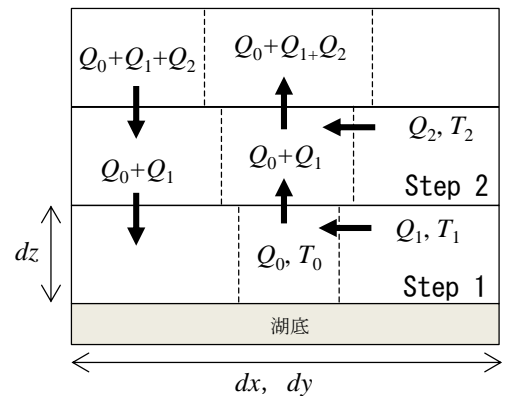


図-2 プルームの浮上のモデル化

キーワード 貯水池, プルーム, 表層水移送装置, 三次元流体モデル

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 TEL.042-677-1111

で行う。そして、プルーム水温が周囲水温と同様になった水深で上下のやり取りを中止し、プルーム流量を水平に放出した。

3. 三次元静水圧モデルへの適用

構築したプルーム浮上の静水圧モデルの適用性を確認するために、矩形型の水槽において非静水圧モデルとの比較を行った。表-1 に非静水圧、静水圧の計算条件を示す。初期条件として夏季の水温の実測鉛直分布を、境界条件として吐出水の流量 (0.64 m<sup>3</sup>/s) と実測水温 (26.3℃) を与え、プルームの可視化のためにトレーサー (濃度 1.0) を与えた。

図-4 に計算開始から1時間後のトレーサーの濃度分布を示す。非静水圧条件ではプルームが水深7 m 付近まで上昇し、その後、沈み込んで水深10~15 m 付近で水平に移流している。これは既往の実験的研究により示された流動構造と一致している。一方、静水圧条件では水深13~16 m 付近で水平に移流した。今回のプルームモデルでは浮上の際の慣性力による沈み込みを考慮しておらず、単に等水温層で水平方向に移動するとしている。そのため、プルーム中心部の挙動は再現できていないが、水平移流に関しては概ね再現できたといえる。

各条件での計算負荷として1時間のプルーム現象を計算するのに非静水圧では約60時間かかるのに対し静水圧では8分であった。すなわち計算時間を1/460に短縮できた。

4. 実貯水池への導入

東京都奥多摩町にある小河内貯水池 (図-5) において本モデルを運用した。表層水移送装置は貯水池上流部に設置されており、その周辺を25 m 格子に区切り、堤体に向かって50 m 格子と100 m 格子に分けた。鉛直格子は表層から水深40 m までを0.5 m、水深40~50 m を1 m、水深50~60 m を2 m、それ以下を5 m とした。初期条件として水温鉛直分布を、境界条件として気象、河川水の流量と水温、放流量を与えた。4日助走期間の後に装置を稼働させた。

トレーサーの濃度分布 (図-6) を計算した結果、プルームが水深13~16 m 付近で水平に広がっており、下流側への移流量が卓越している様子が確認できた。

以上より、表層水移送装置を三次元流動モデルに組み込むことができた。

- 1) 上田博茂、横山勝英、小泉明、山崎公子、高橋和彦、松嶋夏希：貯水池の表層水移送装置から放出される温水プルームの浮上現象に関する研究、水道協会雑誌、第84巻、2015
- 2) 新谷哲也、中山恵介：網走川河口域で発生する塩水遡上に関する数値的検討、水工学論文集、第57巻、pp.1829-1834、2013

表-1 各条件下での計算条件

計算方法	非静水圧条件	静水圧条件
水平グリッド	1 m × 1 m	25 m × 25 m
鉛直グリッド	1 m	0.5 m
タイムステップ	0.2 sec	5 sec
計算期間	1時間	24時間
境界条件	流入量・流入水温	

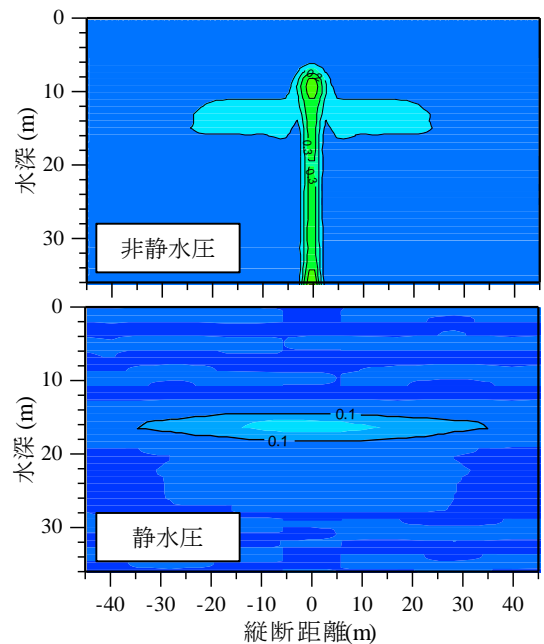


図-4 1時間後の縦断トレーサー図 (上) 非静水圧条件 (下) 静水圧条件

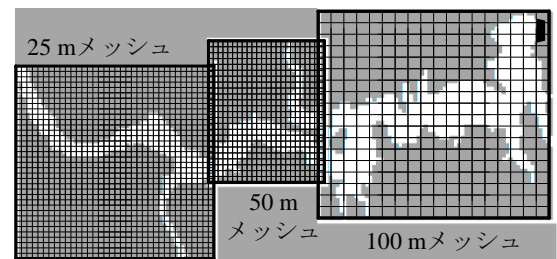


図-5 本モデルにおけるドメイン区切り

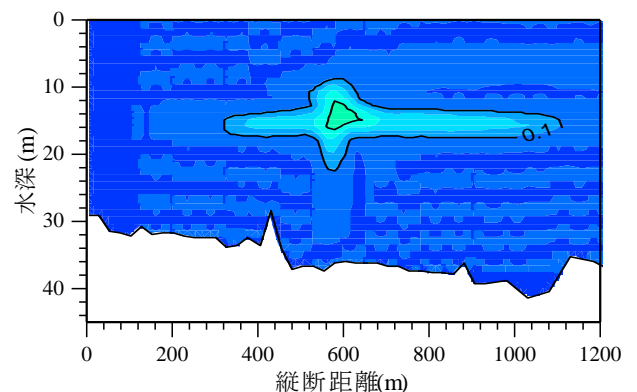


図-6 5日目の縦断トレーサー図 (静水圧条件)