

B-2 潮汐の影響を受ける湖の流動モデルと水質浄化に関する一考察

静岡大学工学部システム工学科

○平澤一幸

同上

瀬野忠愛

1. はじめに

静岡県浜松市にある佐鳴湖は2000年以降、日本で最も水質が悪い(COD=11~12mg/l)とされる富栄養湖である。佐鳴湖のような潮汐の影響を受ける湖沼・内海等の閉鎖性水域は、外部との水交換が行われにくく汚濁物質が蓄積されやすいため、河川や海域に較べて水質の改善や維持が難しいといわれている¹⁾。水質悪化の原因として、潮汐の影響による汽水湖特有の湖内流動、産業の発展や宅地開発による周辺環境からの汚濁負荷の増大などが挙げられ、これまでに下水道整備や湖底汚泥の浚渫、水生植物の植栽などさまざまな浄化対策を実施してきたがその効果はほとんど得られていない。未だ因果関係は明らかでなく原因の調査解明が求められている。佐鳴湖の汚染メカニズムの解明、浄化方法の提案・評価をしていくにあたり精緻な流動モデルが必要とされている。本研究では、佐鳴湖の調査データを基に、佐鳴湖とその周辺河川を考慮した広範囲な流動モデルでシミュレーションを行い、佐鳴湖水質予測、評価、改善方法を提案する。

2. 流動モデルの基礎式

流体の運動量保存より(1)、(2)式が、流体・物質の質量保存より(3)、(4)式が成立する。 x, y 方向の速度 u, v は、深さ方向に積分平均化された速度として定義する。深さ方向の速度分布は、底面の摩擦力を考慮している²⁾。今回のシミュレーションではコリオリ力と風による影響は考慮しないものとする。

・運動方程式

 x 方向;

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{g}{(1.486h^{1/6})^2} \frac{u n^2 (u^2 + v^2)^{1/2}}{u} = 0 \quad (1)$$

 y 方向;

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{g}{(1.486h^{1/6})^2} \frac{v n^2 (u^2 + v^2)^{1/2}}{v} = 0 \quad (2)$$

・連続の式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

・移流拡散方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} - \eta \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) = S \quad (4)$$

 h : 深さ[m] u, v : 直交座標系での速度[m/s] t : 時間[s] ρ : 密度[kg/m³] E_{ij} : 渦粘性係数[Pa・s] ($i, j = x, y$) g : 重力加速度[m/s²] a : 水底の標高[m] n : 水底摩擦の粗度係数[s/m^{1/3}] η : 渦拡散係数[m²/s] S : 生成消滅項

3. シミュレーション条件

3. 1 モデルの領域

佐鳴湖は潮汐の影響で逆流が起こるので、下流およびその支流まで考慮する必要がある。よって、モデルの範囲をFig. 1のように設定した。

色分けはモデル領域における深さ分布を示している。湖内の色の濃い部分は深さ約 2.5mほどである。領域内のメッシュは主に三角形とし、支流などの細い河川は四角形とした。

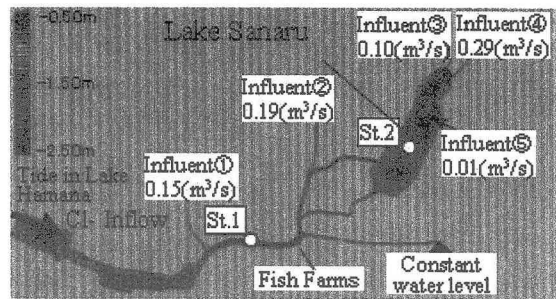


Fig 1 The region of model and boundary

3. 2 境界条件

Fig. 1 で示した領域の左側には浜名湖が隣接している。境界条件としての水位変動は浜名湖モデルの計算結果を用い、堀留川は一定水位、それ以外は一定流量とした。流量は、下流の支流河川①②には浜松市データ (2000 年平均) を、上流河川③④⑤には静岡県浜松土木事務所のデータ (2002 年 11 月 5, 6 日平均) ³⁾ を用いた。

3. 3 時間刻み

潮位・流速データなどを、より正確に捉えるため、時間刻みを変えてシミュレーションを行った結果、720[s] 刻み以下で精度よく流動特性を再現できた。そのため、今回のシミュレーションでは時間刻みを 720[s] (12 分) とした。

3. 4 初期条件

計算開始時の初期速度は $u=v=0$ [m/s]、塩素イオンの初期濃度は $C=0$ [mg/l] とした。塩素イオン濃度のシミュレーションより、開始から 20 日以降で湖内塩素イオン濃度が安定し現状の佐鳴湖に近い値に成ることから、試行期間を 2002 年 10 月 5 日 0 時～10 月 30 日 24 時の 25 日間とし、本計算を 2002 年 10 月 30 日 0 時～同年 11 月 13 日 24 時の 15 日間行った。

4. シミュレーション結果

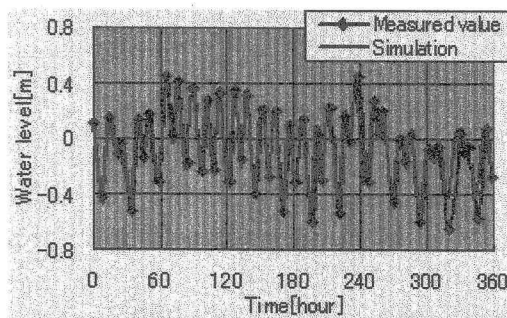


Fig.2 Comparison of water level at St.1

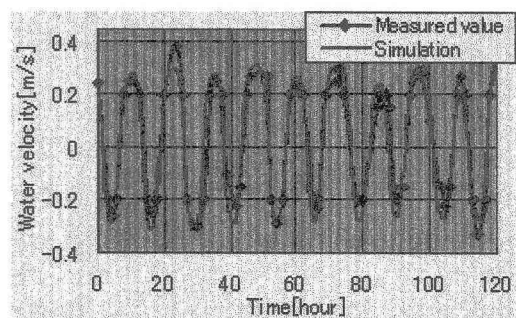


Fig.3 Comparison of water velocity at St.1

Fig. 2 および Fig. 3 に、St. 1 (参照 Fig. 1) における水位並びに流速の時間変化を示す。シミュレーション結果と実測値を比較すると、河川の流は、順流・逆流を繰り返す複雑な動きをみせるが、結果は全体的によい一致を見せている。

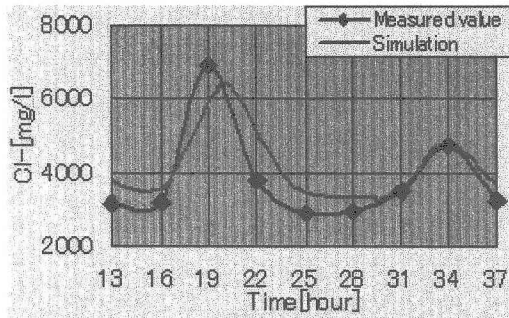


Fig.4 Comparison of Cl^- concentration at St.1

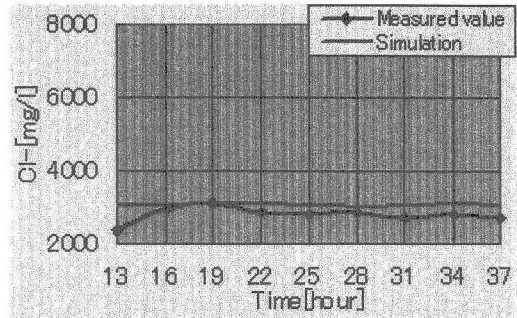


Fig.5 Comparison of Cl^- concentration at St.2

Figs. 4, 5にSt.1(志都呂橋)とSt.2(湖心)における塩素イオン(Cl^-)濃度変化を示す。水位変動・流速に比べ、シミュレーション結果と実測値に誤差が見られた。原因としては河川の合流点、湖内領域での渦拡散係数の推算値が適切でない可能性がある。また、下流河川にあたる新川は河川の幅や深さが一様ではないため、この河川についてはさらに領域の分割を行い、それぞれに最適な渦拡散係数の同定が必要であると考えられる。

5. モデルの応用例

平成16年3月25日に佐鳴湖および下流域の底泥調査を行った。その結果、下流域の底泥から高濃度のリンが検出されたことから、佐鳴湖の下流に汚染源(リン濃度0.20mg/l)が存在すると仮定した。計算期間は2002年10月5日0時~11月13日24時、湖内・下流域の初期濃度0.15mg/lとした。

Fig6より、リンの溶出を仮定した場合と仮定しない場合の湖内のリン濃度を比較すると大きな差がみられた。リンの溶出が無い場合、濃度は低下している。一方、リンの溶出を仮定した場合、逆流の影響によりリンが湖内へ流入し、リン濃度の低下が抑えられている。今回のシミュレーションでは、下流の汚染源が湖内に与える影響を見るために湖内の溶出源は考慮していない。そのため、実測値より低い値になっている。

6. 結言

佐鳴湖の特徴である潮汐の影響を考慮し、佐鳴湖および周辺河川を含めた広範囲な流動モデルを作成し、佐鳴湖の流動状況を再現した。計算領域は複雑な流動状態にあるが、水位・流速変動ともに実測値とよい一致を示した。モデルの計算より、佐鳴湖の水質は下流の汚染源の影響を大きく受けることが明らかになった。佐鳴湖の水質浄化対策は、上流河川や湖内でのみ行われてきたが、目立った効果は見られなかった。しかし、湖内浄化のためには下流河川の水質調査・水質改善を考える必要があると思われる。今後、堀留川など支流の流量・水位や正確な深さデータをはじめとするより多くのフィールドデータを集め、さらなるモデルの精緻化を行う。

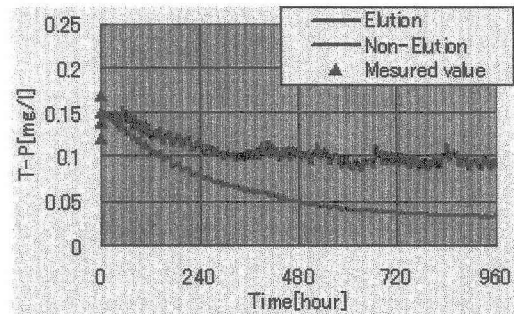


Fig.6 T-P concentration for elution and non-elution at St.2

引用文献

- 1) Iwasa, Y.: Lake Engineering Data Compilation, Sankaido, Tokyo, Japan(1990)
- 2) Suyama, T., Master Thesis, Shizuoka University, February(2001)
- 3) Shizuoka Civil Engineering-Works Office Home Page,
<http://doboku.pref.shizuoka.jp/desaki/hamamatu/sanarusenmon/HAJIME/KAGAMI.HTM> (accessed May 2003)