

浅い湖における底泥の巻き上げについて

東京工業大学大学院 学生会員 梅田 信
 建設技術研究所 正会員 東海林 光
 長崎県 岩永修二
 東京工業大学大学院 フェロー 石川忠晴

1. はじめに

わが国の平野部には浅い湖沼が多く存在するが、そのほとんどは人間活動の活発化に伴い、富栄養化が進行し水質が悪化した。一方、近年の水需要の増大に伴い、富栄養化した湖沼に対しても水源としての機能が期待されるようになり、水質の改善や管理が求められている。

富栄養湖では、窒素やリンなどの栄養塩が底泥とともに湖底に蓄積されている。これらは底泥が巻き上げられた際に、湖水中に回帰し、水質悪化を促進させることになる。したがって、底泥の巻き上げ機構を把握することは湖沼管理上重要であると考えられる。

そこで本研究では、茨城県の霞ヶ浦をフィールドとして、底泥の巻き上げについて現地観測と数値解析により検討した。

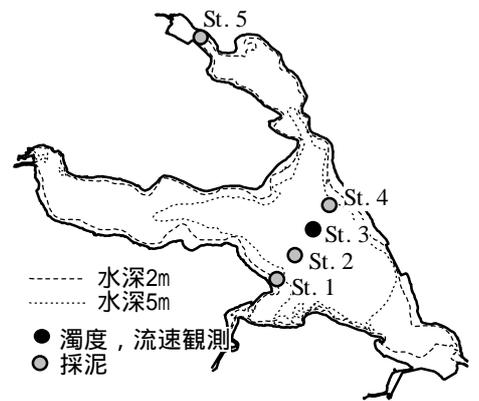


図-1 霞ヶ浦平面図と観測点

2. 現地観測

霞ヶ浦の平面図と観測地点を図-1に示す。観測項目は、底泥の巻き上がり状況を把握するためのモニタ観測と底泥の物性調査の二通りを実施した。

巻き上がり観測は、以下のように行った。建設省湖心観測所(水深6.0m)において水深5.0m、5.5mの高さに濁度計((株)アレック電子製)を設置し、10分間隔で連続計測を行った。また、超音波ドップラー式流速計(ADP:Soktek社製)を湖底に設置し、水深4.8mから水面までの水平流向流速を0.5mおきに5秒間隔で計測した。なお、風向風速及び水深0.5mの濁度は建設省により計測されている。図-2に観測結果の一例を示す。

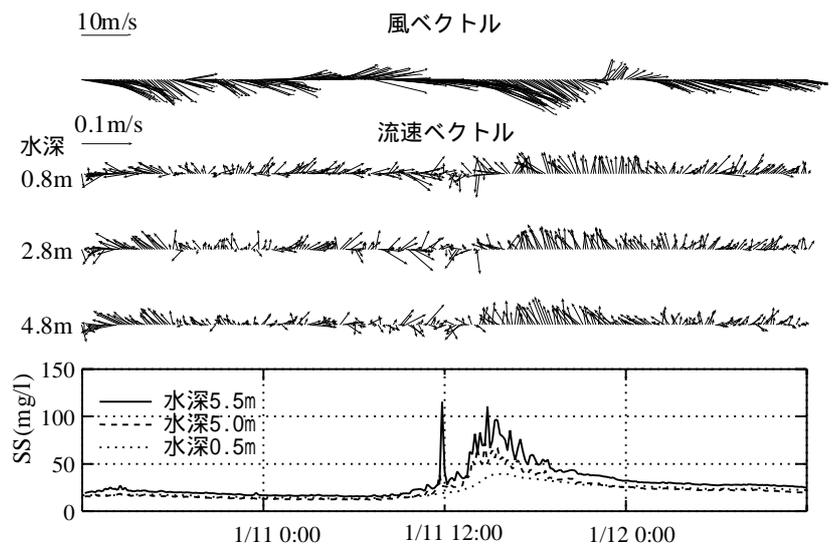


図-2 観測結果(風, 流速, SS)時系列

底泥の物性調査は、改良型簡易式コアサンブラー(離合社製)を用いて底泥コアを採取した後、粒度組成、含水比および粘度の計測を行った。含水比と粘性係数および降伏応力の関係を図-3に示す。なお粘度計はBrookfield社製DV-I+を用いた。

3. 底泥の運動モデル

3-1 モデル方程式

本研究では、底泥の巻き上げを密度流界面における連行現象として捉え、標準型k-εモデル方程式を变形することにより、底泥の運動モデルを作成した。基礎方程式は以下の通りである。これは銭ら¹⁾の鉛直一次元モデルにピンガム流体としての底泥の性質を表現する項を付加したものである。

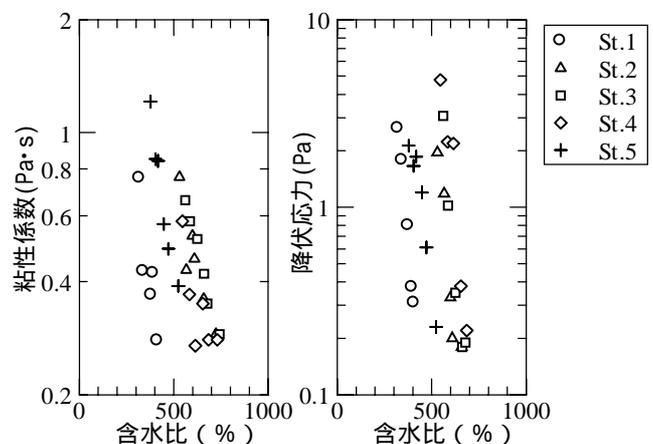


図-3 含水比と粘性係数, 降伏応力の関係

キーワード：底泥, 巻き上げ, k-εモデル, ピンガム流体

連絡先：横浜市緑区長津田町 4259 番地, tel. 045-924-5515, fax. 045-924-5549

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_y \right) = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_x \right) = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(v_c \frac{\partial C}{\partial z} + w_s C \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(v_k \frac{\partial k}{\partial z} \right) = P_r + G - \varepsilon - \varepsilon' \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = C_1 \frac{\varepsilon}{k^2} \{ P_r + (1 - C_3) G \} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$P_r = v \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} \left(1 - \frac{C}{C_s} \right) \quad (6) \quad G = g \gamma C \frac{\partial C}{\partial z} \quad (7)$$

$$v = (v_0 + \eta) + C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, v_k = v, v_\varepsilon = 0.77v, v_c = 1.2 C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

ここで, x, y は東西および南北方向の座標, f はコリオリ係数, r は水の密度, p は圧力, u, v はそれぞれ x 方向, y 方向の流速, k は乱れエネルギー, ε は散逸率, C は底泥の重量濃度(SS), v は実効動粘性係数, v_i は物理量 i の実効拡散係数, P_r は乱れエネルギーの生産率, G は密度拡散による乱れエネルギーの消散率, C_i は k - ε モデル固有の係数, γ は相対密度差と C の換算係数である.

$\tau, \eta, w_s, \varepsilon'$ は底泥を対象としたことによる付加項でそれぞれ, 底泥の降伏応力, 粘性係数, 底泥粒子の沈降速度, 底泥粒子の相互作用によるエネルギー損失を示す. これらは, 以下のように求めた.

w_s は Winterwerp and Kranenburg²⁾ に従い次の式で与えた.

$$w_s = w_{s0} \left(1 - \frac{C}{C_{top}} \right)^5 \quad (9)$$

ここに, w_{s0} は濃度がゼロとしたときの沈降速度, C_{top} は堆積している底泥の表層濃度である.

ε' は, 粒子の運動が乱流によっていると, 粒子同士の接触を非弾性衝突であると考え次式を導いた.

$$\varepsilon' = \alpha \frac{C^{5/3} (\rho_s - C)^{1/3}}{\rho_s (C_* - C)} \varepsilon \quad (10)$$

ここで C_* は十分に固結した状態と見なせる底泥の濃度, ρ_s は底泥の密度, α は定数である.

P_r にかかっている濃度に関する項は, 底泥が高濃度に存在するときには乱れエネルギーが発生しない効果を表している. τ, η は図-3 に示した分析結果を底泥濃度の関数に直した次式を用いて求めた.

$$\tau = 1.25 \times 10^{-13} C^{5.7}, \eta = 1.45 \times 10^{-9} C^{4.1} \quad (11)$$

また圧力勾配は, 水面の風応力に比べて流体内部のせん断応力がある程度小さいと仮定して, 次式より流速の観測結果を用いて推定した.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \approx \frac{u_{*x}^2}{H} + f\bar{v} - \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \approx \frac{u_{*y}^2}{H} - f\bar{u} - \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad (12)$$

ここに, H は水深, u_{*x}^2, u_{*y}^2 は風応力の x 成分, y 成分, バーは水深平均である.

3-2 計算結果

1999年1月10日正午から1月12日正午までの計算結果を図-4に示す. なお, 方程式系中のパラメータについては, $\alpha=4.0, C_*=125\text{g/l}, C_s=80\text{g/l}, w_{s0}=2.5 \times 10^{-4}\text{m/s}$ とした. 底泥の巻き上がっている様子は概ね再現できていると言える. しかし, 計算結果は, 観測結果と比べて, ピーク時において下層で小さく, 上層で大きい. すなわち, 深度方向に比較的一様な濃度分布となっている.

4. まとめ

本研究では k - ε モデルを変形し, 底泥の巻き上がり(連行)の計算モデル作成したところ, 観測結果を概ね再現することができた.

参考文献

- 1) 銭新, 石川忠晴: k - ε モデルによる DI 型連行現象の再現性について, 土木学会論文集, No.593, 1998.
- 2) Winterwerp, J.C. and Kranenburg, C: Erosion of Fluid Mud Layers II Experiments and Model Validation, *J. Hydraulic Eng.*, 1997.

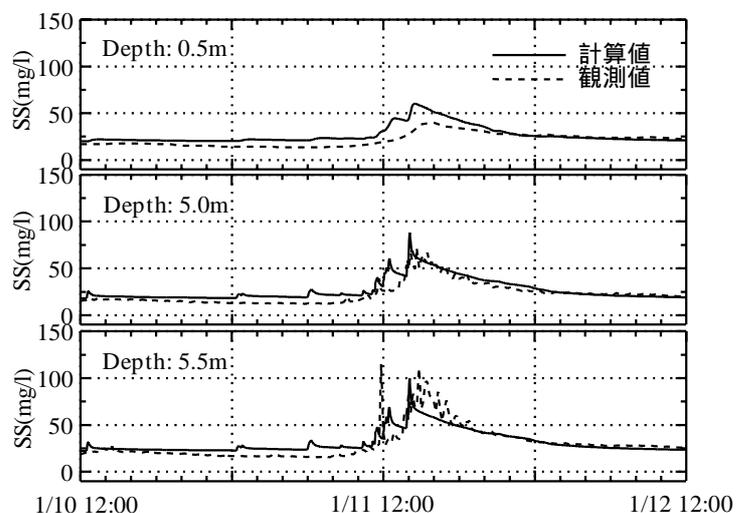


図-4 計算結果と観測結果の比較