

II-351

二成層状態にある湖に関する数値計算について

北海道大学大学院 学生員 赤堀 良介
北海道大学大学院 正会員 清水 康行

1. はじめに

北海道東部網走川河口に位置する網走湖は、上層に淡水層、下層に無酸素状態の塩水層を持つ二成層状態にある汽水湖であり、湖付近に一定方向に強風が吹き続けた場合、上層水の吹き寄せと巻き上げによって風上側で塩水層が湧昇し青潮が発生する。この青潮による被害は魚介類に対してのみでなく周辺の社会問題となっており、その影響は今後も深刻化が予想される。これらの現象に関して、将来における被害の影響や対策の効果等を予測するための水理モデルの構築が必要とされるが、本研究では風応力の影響下にある二成層状態の湖での下層水の湧昇と吹送終了後の密度界面の動き、拡散とそれに伴う界面水位の低下に注目し、その再現を目的として数値計算を行った。

2. 基礎式と計算方法

鉛直断面における密度流の計算に当たって、二次元非圧縮流体に対する連続の式、Navier-Stokes方程式と、移流拡散を伴う物質連続式と連続の式より得られた密度に関する方程式(1)を用いた。

ただし、 ρ_w :水の密度、 D_x :x軸方向の拡散係数、 D_y :y軸方向の拡散係数、 H_x :水位のx軸方向の偏微分である。また、境界条件として水面での接線方向の釣りの式(2)を用いるが、このときせん断力 τ を式(3)で与えることにより、風による応力を考慮して計算を行う。ただし U_s :風応力による水面の摩擦速度である。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\rho}{\rho_w} \left(D_x \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{2H_x}{1-H_x^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\tau}{\rho v} \quad (2)$$

$$\tau = \rho U_s^2 \quad (3)$$

実際の計算に当たってはこれらの式を一般座標から、 (ξ, η) 軸を用いた境界適合座標へと座標変換し¹⁾、さらに差分化したものを用いた。まずNavier-Stokes方程式を差分化した式より次の時刻の仮の速度を陽的に求める。なお移流項には三次制度の風上差分を用いた。それに補正值を加えた速度が圧力項を満足するように、SOR法を用いて一定の反復誤差になるまで繰り返し補正し、その値が次の時刻の速度となる。以下同様の手順を目的の時刻に達するまで繰り返し、計算を行うこととする。

3. 計算条件

数値計算を行うに当たって、過去に行われた実験と比較するために、その条件を同様に設定し図1に示す。今回は尹らの行った実験²⁾を参考にし、初期条件を設定した。上下で比重の異なる液体に満たされた二成層状態にある矩形の湖断面について、湖表面に時刻0(sec)から360(sec)まで摩擦速度 $U_s=0.0065$ (sec)を与え、その後送風を停止する。この条件で時刻0(sec)から1000(sec)まで数値計算を行い、時間ごとの流速、水面形、密度分布を求めた。

また、計算メッシュ数は縦10、横200であり、粘性係数 $\nu=0.00005$ (m²/sec)、拡散係数 $D_x=D_y=0.0000005$ (m²/sec)とした。

4. 計算結果

計算結果を、ある時刻での密度界面のコンター線と流速ベクトルの図として図2から図5までに示す。図中色の濃い所が比重の大きい部分である。風上側の界面は送風開始後急激に上昇を開始し、約80(s)後に表面へと達する。このときの様子を示したものが図2である。実験においては90(s)後に表面に達しているのものでそれよりも幾分早いのが、上層の循環によって下層が風上に連行されていく様子がベクトル図によって確認できる。

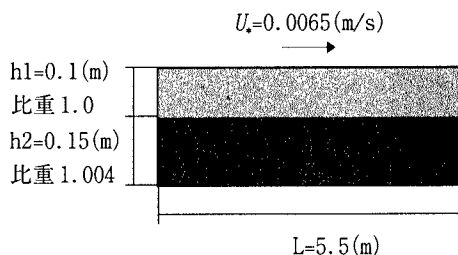


図1 初期条件

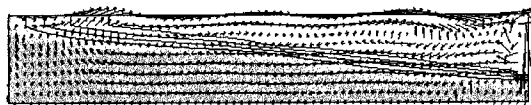


図2 time=81.0(s)

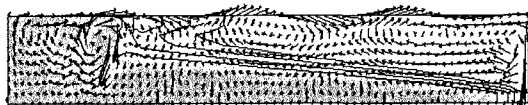


図3 time=226.0(s)

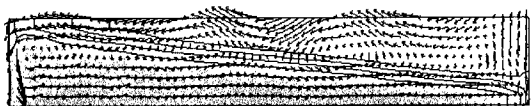


図4 time=452.1(s)

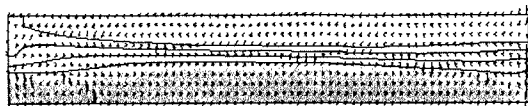


図5 time=599.2(s)

図2-図5 流速ベクトル図

図3は時刻220(s)前後では定常の状態に達したときの様子を
示したものである。このときのベクトルを見ると、上層、下
層のそれぞれに互いに逆向きに回転する大きな渦が形成されて
いることがわかる。また実験で報告されている風上側で鉛直に
切り立った界面の形状も再現されており、その付近ではベクト
ルが特異な動きを見せている。尚、定常時の風上より300(cm)
での流速分布を示したものが図6であり実験とはほぼ同様の傾向
が見られた。

時刻360(s)で送風が停止された後、上流端の流速は400(s)
前後で一気に下降へと転じ、さらに450(s)ほどで上流端の界
面が下降を開始する。このときの様子が図4である。

上流端の界面は水面からほぼ15(cm)下降し、やや上昇に転じた後に時刻600(s)前後で収束する。これが図5
である。この間の動きは実験に報告されているよりも全体に鈍く、送風後に実験で見られた密度界面の内部セ
イシュ的な運動も、計算では確認できなかった。ただし中間層の厚さと、拡散に伴う界面の水位の低下に関し
ては実験の値に近い結果が得られた。

5. 計算結果に対する考察

今回行った計算は、主に送風中と送風停止後の二つの部分に分けて考えることができるが、前半の送風中の
断面に関しては比較的良好に再現することができた。特に、風による外力が上層で大きな渦を作りそれに下層
水が連行されて湧昇が起きる様子や、定常時の流速ベクトルの動き、界面の切り立った形状などについては実
際のメカニズムに近いものであったと言える。

反面、送風が停止された後の再現性はそれほど良好ではなく、実験で確認された密度界面の内部セイシュが
計算結果において確認されなかった。これは、粘性係数や拡散係数といった経験的に与えられる数値を決定す
る際にその主眼を送風中に置いたことや、計算を安定化するために人工粘性的な考えを導入し粘性係数が擬似
的に高い状態にあったことなどが理由として考えられる。

6. まとめ

本論文では網走湖で見られるような青潮に関して、同様な仕組みで起こる現象の再現を目的として数値計算
を行った。

計算結果が示すものとして青潮の発生段階のメカニズムについては、実際の様子と類似したものであったと
言える。収束段階については、界面の内部セイシュが再現されなかったが、拡散による界面水位の低下は確認
することができた。

<参考文献>

- 1) 川村 洋, 土方邦夫: "熱と流れのシミュレーション", 丸善株式会社, 1995.
- 2) 尹 鍾星, 中辻啓二, 村岡浩爾: "閉鎖性水域における吹送密度流に関する実験", 水工学論文集, vol.37
pp285-292, 1993.

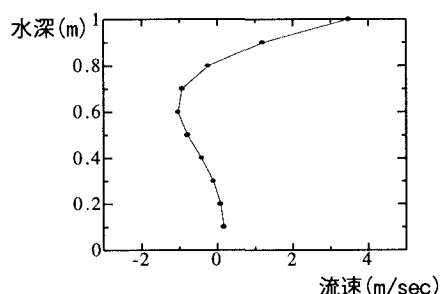


図6 風上より300(cm)での流速分布