

1. はじめに

本研究は平野部に存する浅い湖の吹送流の数値計算法を霞ヶ浦を対象に検討するものである。湖の流れは言うまでもなく水平方向にも鉛直方向にも分布を持つ三次元的な流れである。また湖における物質の移動は明らかに移流分散による。したがって流れの三次元性を無視した平面流計算はあまり意義を持たない。しかしまた三次元流を実態に即して取り扱うのは容易でなく、仮りにできたととしても、水質変動現象の時間スケールが極めて長いことから膨大な量の計算を要することは想像に難くない。それゆえ本研究では、流れの三次元性をいかに簡略なモデルで表わすかという点を主眼とする。

2. 基礎方程式

村岡・福島⁽¹⁾によれば、霞ヶ浦湖流では移流慣性項と水平粘性項は他の項に較べて十分小さい。そこでこれら2項を除いた運動方程式を鉛直方向に積分すると(1),(2)式を得る。また連続条件式は(3)式のように書ける。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - f_c v - \tau_{sx} - \tau_{bx} = 0 \quad \dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + f_c u - \tau_{sy} - \tau_{by} = 0 \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 $u, v = x, y$ 方向の線流量、 $\eta =$ 水面変位、 $f_c =$ コリオリ係数、 $h =$ 水深、 $g =$ 重力加速度、 $\tau_{sx}, \tau_{sy} = x, y$ 方向の風応力、 $\tau_{bx}, \tau_{by} = x, y$ 方向の底面せん断応力、である。鉛直平均化された流れは上式を得ることによって求められる。しかしそれだけでは流れの鉛直変化をとらえることができないので、序に述べた理由で不十分である。

3. 「浅い」ということ

表題に掲げた「浅い」という単語は若干曖昧であるが、ここでは「風のせん断によって生じる乱れで鉛直方向に十分混合される」という意味である。したがって浅い湖の流れは次の特徴を持つ及至は次のような仮定が成立する可能性があると推測される。

① 密度成層が生じず、均質流体として取り扱える。

② 風のせん断の影響は湖底まで速かに伝わる。せん断力の働く面は水平で、せん断力の向きは風向に等しい。すなわちエックマンスパイラルが表われない。

③ 開水路における対数分布則のように、風のせん断力に応じた速度の鉛直分布がローカルに形成される。

そこで、図1に示すように、流れを2つの成分の和として表わせるものと仮定する。オ1の成分は(1)~(3)式から求まる鉛直方向に平均化された流れ、オ2の成分は風のせん断により生じる分布を持った流れである。(オ2の成分の鉛直積分値はゼロ。) また(1),(2)式の底面せん断力 τ_{bx}, τ_{by} は、鉛直平均流速ではなく、合成された流れの底面流速により表わされる。

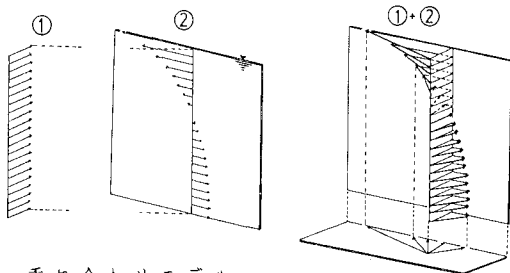


図1 重ね合わせモデル

以上の仮定に従えば、深度別の流速ベクトルを同一平面上に重ねて描いた場合、ベクトルの先端がひとつの直線上に並ぶこととなる。図2は霞ヶ浦において実施されたフロート観測の結果であるが、⁽²⁾このような傾向のあることが読み取れる。

4. 流速鉛直分布と底面せん断力

風のせん断力による流速鉛直分布(オ2の成分)は、Bainsら⁽³⁾の実験結果に基づき、次式で表わすこととした。

$$\frac{U_b}{U_{fs}} = -2.5 \left(\ln \frac{z}{h} - \ln \left(2 - \frac{z}{h} \right) + 1.614 \right) \quad \text{----- (4)}$$

ここに、 U_{fs} = 表面摩擦速度、 U_b = 風方向の流速、 h = 水深、 z = 水面から鉛直下方への座標である。(4)式とBainsらの実験データを図3に比較する。

底面せん断力は底面流速の2乗に比例するものとした。(4)式で $z = h$ とすると $U_b = 4U_{fs}$ 。これに鉛直平均流を加えると底面流速が得られるから、底面せん断力について次式を得る。

$$\vec{\tau}_b = (\vec{U}_1 + 4\vec{U}_{fs}) \cdot |\vec{U}_1 + 4\vec{U}_{fs}| \quad \text{----- (5)}$$

ここに $\vec{\tau}_b$ = 底面せん断力ベクトル、 $\vec{U}_1$ = 鉛直平均流ベクトル、 $\vec{U}_{fs}$ = 表面摩擦速度ベクトルである。

5. 計算結果と現地データの比較

(1)~(3)式を時間に関しては後退差分形にし、空間に関してはアイソパラメトリック四辺形要素を用いたカラーキン法により非定常解を求める計算プログラムを作成した。解析対象は霞ヶ浦(西浦)とし、現地観測データ⁽⁴⁾と比較した。

図4は水深1mにおける流速データと計算結果の比較の一例である。右上の矢印群は潮来(湖の南東端)での風データである。なお計算初期状態は静止状態とし、図の風データを入れて最終時刻で実測値と比較している。湖心部の散点では一致度が低い、他の水域(特に土浦入)ではかなり良く一致していると言える。

6. おわりに

本報ではかなり大胆な仮定のもとに計算した結果を述べた。今後は、この仮定の検証も含めてさらに検討を加えてゆきたいと考えている。

7. 引用文献

- (1) 村岡、福島：霞ヶ浦(西浦)の湖流、国立公害研究所研究報告、オ19号、1981
- (2) 加藤、石川、須賀：霞ヶ浦湖流の実態、オ38回年講、1983
- (3) Bains W.D., Knapp D.J. : Wind Driven Water Currents, ASCE, Hy2, 1965
- (4) 霞ヶ浦水象研究委員会資料、1983

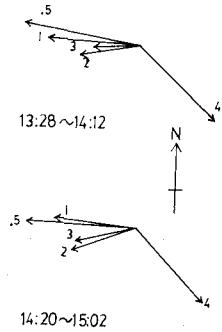


図2 フロート観測結果

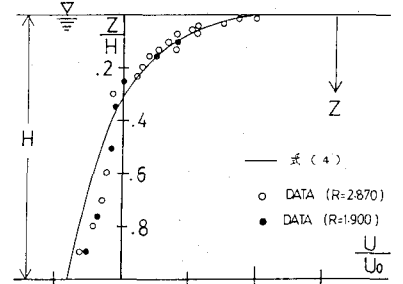


図3 吹送流鉛直分布 (Bains 他)

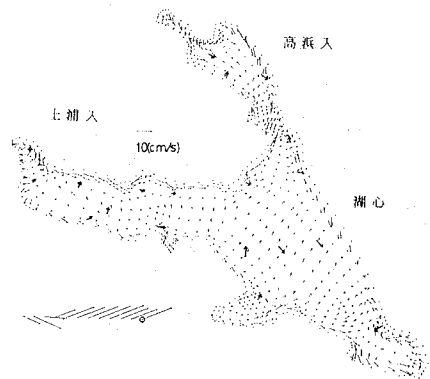


図4 計算例(水深1m)