

(II-100) 日成層形成時における吹送流の数値シミュレーション

東京工業大学大学院 学生会員 西部隆宏
東京工業大学大学院 学生会員 銭 新
東京工業大学総理工 正 会 員 石川忠晴

1. はじめに

低平地にある浅い富栄養湖では、一日単位でおこる水温成層(日成層)が吹送流速分布を大きく変形させ、湖内の物質移動に大きな影響を及ぼしていると考えられる¹⁾。しかし日成層に伴う流れの現象は非定常、非一様なため、現地観測でその全貌をとらえるのは難しく、数値シミュレーションによる検討が必要となる。

本研究では低平地の浅い湖である霞ヶ浦(図-1)を対象として、三次元k-εモデルを用い、日成層形成時における吹送流のシミュレーションを行った。また、その結果を現地観測結果と比較・検討し、モデルの妥当性を検証した。

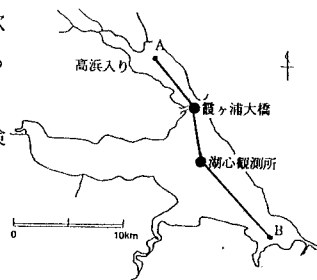


図-1 霞ヶ浦全体図

2. 基礎方程式

有限体積法により吹送流の数値シミュレーションを行った。基礎方程式と境界条件は以下の通りである。

輸送方程式:

$$\frac{Du}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}(\nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z}) = f(u - w \cot \varphi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}(\nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z}) = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{Dw}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}(\nu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\nu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\nu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z}) = fu \cot \varphi - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \delta g \quad (3)$$

$$\frac{Dk}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}(\nu_k \frac{\partial k}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\nu_k \frac{\partial k}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\nu_k \frac{\partial k}{\partial z}) = S_k \quad (4)$$

$$\frac{D\epsilon}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}(\nu_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\nu_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\nu_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial z}) = S_\epsilon \quad (5)$$

$$\frac{D\delta}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}(\nu_\delta \frac{\partial \delta}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\nu_\delta \frac{\partial \delta}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\nu_\delta \frac{\partial \delta}{\partial z}) = S_\delta \quad (6)$$

連続の式:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

$$\nu_{eff} = \nu + \nu_k = \nu + C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09 \quad (9)$$

$$\nu_k = \nu_{eff}, \nu_\epsilon = 0.77\nu_{eff}, \nu_\delta = 1.2\nu_{eff} \quad (10)$$

境界条件:

$$\text{水面: } \nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} = (u_*^2)_x, \nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z} = (u_*^2)_y \quad (11)$$

$$\text{水面、底面及び岸: } \frac{\partial \delta}{\partial n} = \frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial \epsilon}{\partial n} = 0 \quad (12)$$

$$\text{底面: } \nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} = \nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

ここにu, v, wはx, y, z方向の流速、kは乱れエネルギー、εは粘性散逸の大きさ、δは相対密度差である。またpは圧力、νは動粘性係数、fはコリオリ係数、Sは各未知数における生成項を表す。nは壁面及び壁と直交する成分の座標、u*は風応力、Cは係数である。

3. 計算条件

日成層が顕著で、吹送二層流が観測で確認されている96年9月12日を例に計算を行った。計算時間は日射の始まる5:00から23:00までの19時間である。初期条件では流速を全層でゼロ、水温は湖心で観測された鉛直プロファイルを与えた。計算中の入力となる風と日射には、建設省湖心観測所で観測されている時間データを用いた。図-2に計算に用いた風ベクトル、日射量の時間変化を示す。

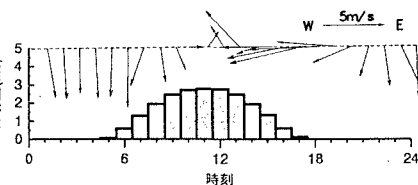


図-2 計算日の気象条件

なお風速データは風応力に変換し、日射による浮力発生量は(6)式中の生成項で考慮されている。

4. 計算結果

図-3に霞ヶ浦全体の表層、底層の流速分布を示す。表層では風向きの、底層ではその逆方向の二層吹送流が生じていることが分かる。図-4に図-1のA-B断面内に平行な流速成分を示す。上下で逆向きの流れが生じており高浜入りと湖心とで湖水の交換が活発に行われている様子が分かる。

図-5は湖心における水温の計算結果と湖心観測所に設置しているサーミスタチェーンによる観測結果である。色の濃いところで水温が低く、色の薄いところで水温が高い。また図中の斜めに見える白の境界線は水温躍層の低下に対応している。計算結果を観測結果と比較すると水温躍層の低下はうまく再現されているものの、水温の上昇量は実際より小さかった。これは逆輻射以外の熱の授受を考慮に入れていないために生じたと考えられる。

霞ヶ浦大橋中央における流速の計算結果と超音波ドップラー式流速計による観測結果を図-6に示す。この図は水道主軸方向(北から反時計回りに30度)に投影した流速成分である。色の濃いところが高浜入りから湖心に向かう流れ、色の薄いところはその逆の流れである。計算結果と観測結果とでは、水温のグラフとの対応で見ると、

日成層形成時間帯の流況以外はあまり似ていなかった。しかし、二層吹送流の状況はかなり似ており、今回のシミュレーションは日成層形成時の吹送流の状況を再現するのに有効であったといえる。

5. おわりに

今回の計算では、熱の授受を単純化し、底面摩擦をゼロとおくなど簡略化しているが、日成層形成時における水温躍層の移動を含めた吹送流速場の変化をうまく再現させることができた。今後はこのモデルに細かな修正を加え、より現実的なモデルに近づけようと考えている。

【参考文献】

- 1) 銭新：霞ヶ浦高浜入りにおける日成層形成時の湾水交換量の推定，海岸工学論文集第43巻，1996。
- 2) 荒川忠一：数値流体力学，東京大学出版会，1994。
- 3) 田中昌宏：日成層が浅い湖の流動と混合に及ぼす影響について，東京工業大学学位論文，1989。

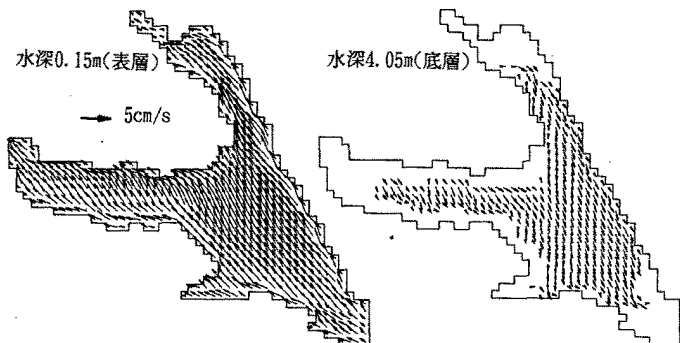


図-3 15:00における流速の空間分布

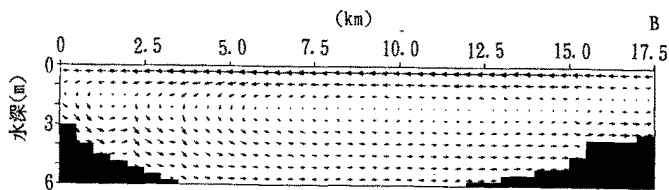


図-4 A-B断面での流速分布

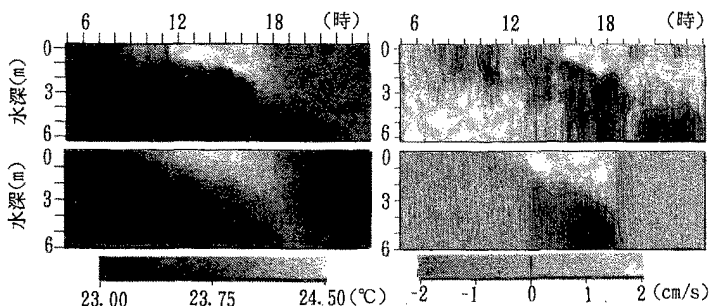


図-5 水温の時間変化
(上:観測結果,下:計算結果)

図-6 流速の時間変化
(上:観測結果,下:計算結果)