

II-393 日成層形成時における湾水交換の数値シミュレーション

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
 日本貨物鉄道 西部隆宏

1. はじめに

閉鎖水域では、日々の日射により水温差1℃程度の弱い水温成層（日成層）が形成される。日成層が形成されている時間帯には鉛直方向の混合が抑制され、吹送流の移流分散性が高まるため、湾水交換が効率的に生じるものと考えられる。¹⁾そこで本研究では、霞ヶ浦高浜入り湾口において日成層形成時の湾水交換に関する現地観測を実施するとともに、k-εモデルによる三次元流動シミュレーションを行った。また、計算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。

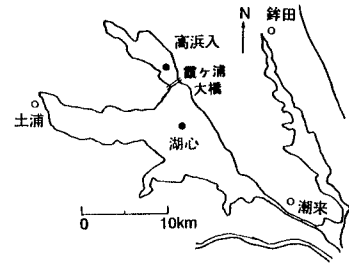


図-1 霞ヶ浦平面図

2. 基礎方程式

基礎方程式と境界条件は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \text{輸送方程式: } \frac{Du}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}(\nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z}) &= f(v - w \cot \varphi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{Dv}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}(\nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z}) &= -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{Dw}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}(\nu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\nu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\nu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z}) &= fu \cot \varphi - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \delta g \\ \frac{Dk}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}(\nu_k \frac{\partial k}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\nu_k \frac{\partial k}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\nu_k \frac{\partial k}{\partial z}) &= P_r + G - \epsilon \\ \frac{D\epsilon}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}(\nu_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\nu_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\nu_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial z}) &= C_1 \frac{\epsilon}{k} P_r - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \\ \frac{D\delta}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x}(\nu_\delta \frac{\partial \delta}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\nu_\delta \frac{\partial \delta}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\nu_\delta \frac{\partial \delta}{\partial z}) &= S \end{aligned}$$

$$P_r = \nu_t \{ 2 \{ (\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial y})^2 + (\frac{\partial w}{\partial z})^2 \} + \{ (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y})^2 + (\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z})^2 \} \}$$

$$G = -g \nu_\delta \frac{\partial \delta}{\partial z} \quad \nu_{eff} = \nu + \nu_t = \nu + C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \nu_k = \nu_{eff}, \quad \nu_\epsilon = 0.77 \nu_{eff}, \quad \nu_\delta = 1.2 \nu_{eff}$$

$$\text{連続の式: } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

境界条件

u, v, w :

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

$$\text{底面, 岸: } \text{境界面に垂直な流速} = 0$$

$$\text{底面: } \nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} = f_b u \sqrt{u^2 + v^2},$$

$$\nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z} = f_b v \sqrt{u^2 + v^2}$$

k, ε, δ :

$$\text{水面: } P_r = \frac{\tau_z^2}{\rho^2 \nu_t} = \frac{U_*^4}{\nu_t}$$

$$\text{水面, 底面, 岸: } \frac{\partial \delta}{\partial n} = \frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial \epsilon}{\partial n} = 0$$

$$\text{底面: } \int P_r dz = \rho f_b (u^2 + v^2)^{1.5}$$

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は散逸率、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_*は風応力の摩擦速度、f_bは底面摩擦係数、C_iはk-εモデルの係数である。

それぞれの式を体積法で離散化し、SIMPLE法で解いた。

3. 計算条件

計算は図-2に示す1996年9月12日の気象条件で行った。初期条件は、全層で流速をゼロとし、水温については湖心で0:00に観測された鉛直分布を与えた。

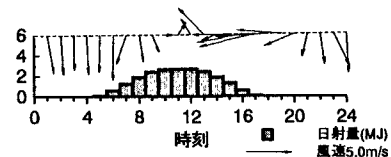


図-2 計算日の気象条件

キーワード：日成層 湾水交換 k-εモデル 数値シミュレーション

連絡先：〒226 横浜市緑区長津田町4259 TEL:045-924-5515 FAX:045-924-5519

4. 計算結果

図-3に日成層形成時(15:30)の上層と下層の流速分布を示す。上下層はほぼ逆向きの流れとなっていることがわかる。一方図-4は、仮に日成層が形成されないものとして(つまり日射量をゼロとして)、同様の風の条件下で計算した結果を示している。両図の比較から、日成層形成時に吹送流の移流分散性が高まり湾水交換が効率的に生じていることがわかる。

図-5に湖心における水温分布の観測結果(上)と計算結果(下)を、図-6に霞ヶ浦大橋中央における流速の観測結果(上)と計算結果(下)を示す。ただし図-6において色の薄いところが湖心から高浜入りに向かう流れ、色の濃いところがその逆の流れを表している。図からわかるように水温の観測結果と計算結果は概ね一致している。しかし現象の生じる時刻に多少の差が見られる。ひとつの原因として、湖心で観測した気象データの代表性の問題が考えられる。また熱の授受の計算方法が必ずしも十分でないことも原因のひとつと考えられる。

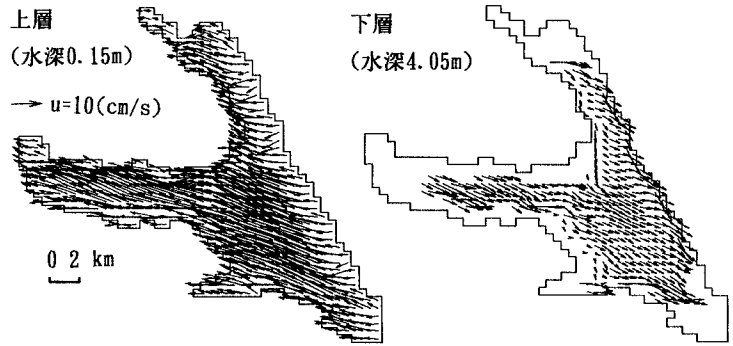


図-3 日成層形成時の流速分布

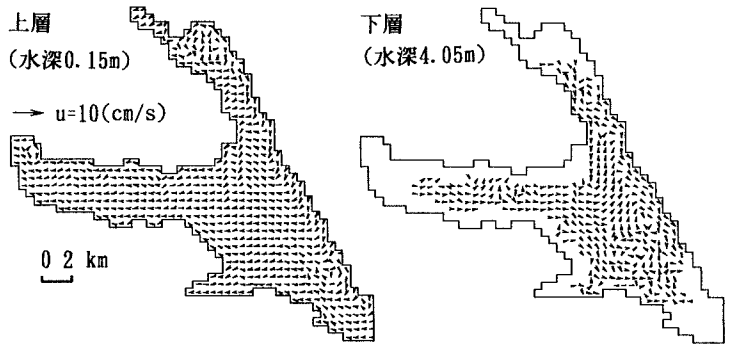


図-4 成層していない時の流速分布

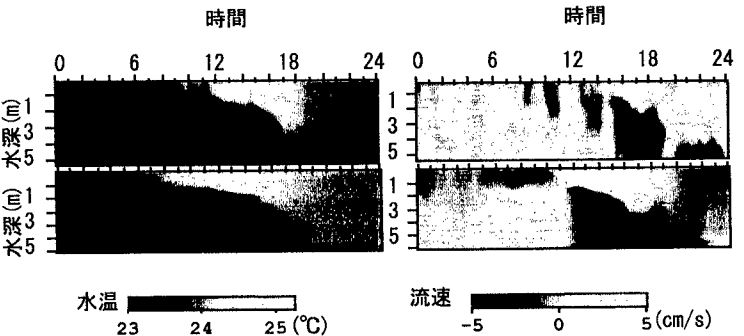


図-5 水温の時間変化

図-6 流速の時間変化

5. おわりに

現地観測の結果、日成層形成時には吹送流の移流分散性が高まり、高浜入り湾口において湾水交換が活発になる様子が捉えられた。また $k-\varepsilon$ モデルを用いた三次元数値シミュレーションにより、同様の結果が示された。しかしシミュレーションでは日成層の発達する時刻にズレが見られ、その原因のひとつとして熱の授受の計算誤差が考えられた。今後はこの部分について改良を加え、計算精度を高めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 銭新ほか: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、海講論文集、43、pp. 1216-1220、1996