

熱対流が誘起する成層浸食過程の数値シミュレーション

大阪大学工学部 正員 室田 明
 大阪大学工学部 正員 ○道奥 康治
 佐藤工業(株) 正員 口田 光也

1. はじめに

水温二成層場において熱対流がもたらす成層浸食過程を再現するために、乱流モデルを導入した数値シミュレーションを行なった。解析より得られた連行則は水理実験値の存在する範囲では良好な適合性を有することが確認され、同時に実験的連行則の適用範囲が示された。また本モデルは水理実験あるいは現地観測で得られた乱流特性を精度良く再現しうる。

2. 数値シミュレーション手法

本研究で用いられた乱流モデルはMellor&Yamada¹⁾²⁾により大気接地層を対象に開発されたlevel2.5モデルを基本としている。彼らのモデルは乱れエネルギー方程式と乱流熱フラックス、流速変動量、水温変動量の各輸送方程式に体系的な簡易化を施して得られる代数的表現に基いている。モデル方程式の詳細については文献1)~3)を参照されたい。数値シミュレーションは鉛直一次元水温二層系を対象とし熱保存式に乱流モデルを導入して行なわれる。計算条件は著者ら⁴⁾の水理実験条件と同様に設定されている。境界条件として底部境界近傍で次式が成立するとする。

$$H_s = \overline{w\theta} - K_T(\partial\Theta/\partial z), \quad q^2 \rightarrow 0 \quad (\text{as } z \rightarrow 0) \quad (1)$$

ここに、 H_s :表面供給熱フラックス、 $\overline{w\theta}$:乱流熱フラックス、 K_T :熱の分子拡散係数、 $q^2/2$:乱れエネルギー、 Θ :平均水温、である。

3. 鉛直混合量の評価

数値シミュレーションで得られた成層浸食過程の計算結果より、混合率 E_f とリチャードソン数 R_{if} の関係を求め水理実験と同様に鉛直混合量の評価を行なう。 E_f, R_{if} は各々次式で定義される。

$$E_f = (dh_m/dt)/u_f \quad (2)$$

$$R_{if} = \epsilon g h_m / u_f^2 \quad (3)$$

ここに、 $u_f = (\alpha g H_s h_m)^{1/3}$:対流速度、 ϵ :上下層間の相対密度差、 g :重力加速度、である。ただし混合層厚 h_m は上下層平均水温の相加平均値に相当する高さで定義する。図-1は E_f と R_{if} の関係に関する計算結果とDeardorff⁵⁾及び著者ら⁴⁾の水理実験結果との比較である。計算値は両者の実験値の範囲

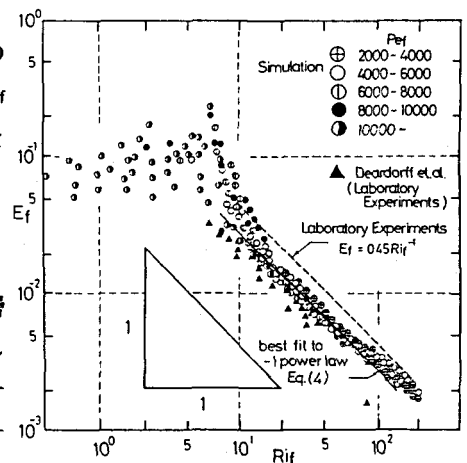


図-1 E_f と R_{if} の関係の比較

Akira MURATA, Kohji MICHIOKU and Mitsuya KUCHIDA

内に分布し、 $10 \leq Ri_f \leq 100$ の範囲では実験結果と同様ほぼ $E_f \propto Ri_f^{-1}$ の関係が認められる。この領域における計算結果の-1乗則に対する最適曲線は次式で与えられる。(図中実線)

$$E_f = 0.28 Ri_f^{-1} \quad (4)$$

またペクレ数 $Pe_f (= u_f h_m / K_f)$ が混合量に及ぼす影響は水理実験と同様にほとんど認められない。 $Ri_f \leq 20$ では混合層下部の水境界層の発達により二層系としての定義が困難となり、平均水温分布から求められた E_f と Ri_f の関係はばらつく。そこで図-2に示すように乱流熱フラックス $\overline{w\theta}$ のゼロクロス点の高さ h_l を代表長さ、密度界面と上層との相対密度差 ϵ_l として混合率 E_f とリチャードソン数 Ri_{fl} を定義し同様の関係を求める。図-3に結果を示す。ほぼ $Ri_{fl} \geq 5$ の範囲では式(4)の-1乗則に従う。逆に低リチャードソン数の領域では E_f は Ri_{fl} と独立にほぼ一定値を取る。図-1,3よりある程度大きなリチャードソン数の範囲では混合層厚の定義法とは無関係に-1乗則が成立することがわかる。また乱流熱フラックス分布から定義される混合層厚を用いた検討より、低リチャードソン数では、成層の安定度とは独立に対流速度のみに依存して連行現象が進行すると考えられる。

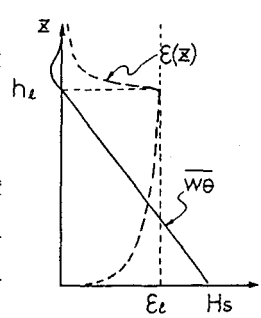


図-2 h_l と ϵ_l の定義

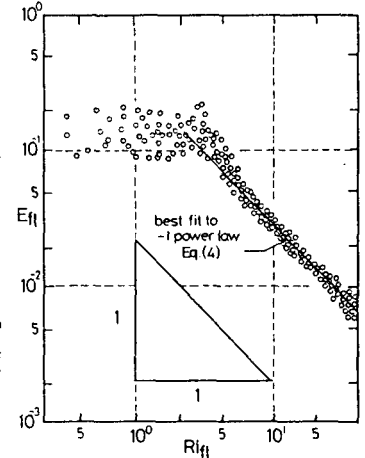


図-3 E_f と Ri_{fl} の関係

4. 乱れ変動量

本乱流モデルにより得られる乱れ変動量の鉛直分布を図-4~6に示す。図-4は乱流熱フラックス、図-5は流速変動量、図-6は水温変動量であり、それぞれ水理実験値⁶⁾と現地観測値を併記している。なお図中の $\theta_{*f} (= H_s / u_f)$ は水温変動に関する特性量である。混合層内の乱れの非等方性や躍層近傍の水温変動量のピーク値も精度良く再現され計算値と実験値の一致は良好である。

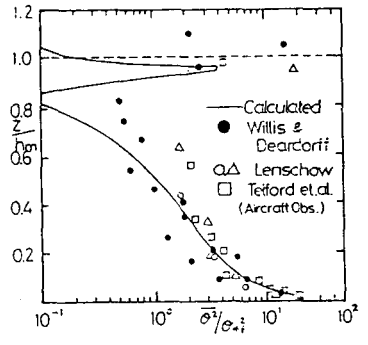
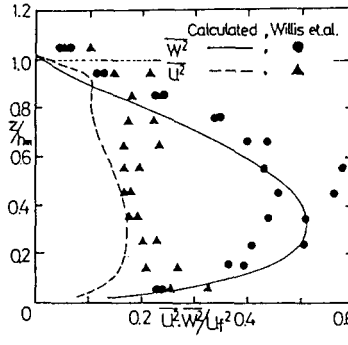
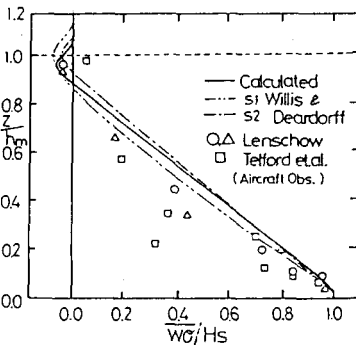


図-4 乱流熱フラックス分布の比較 図-5 流速変動量分布の比較 図-6 水温変動量分布の比較

(参考文献) 1) Mellor: J. Atmos. Sci., 1973. 2) Mellor & Yamada: J. Atmos. Sci., 1974. 3) Hassid & Galperin: Boundary-Layer Meteorology 26, 1983. 4) 室田・道奥: 土木学会論文集, 1986. 5) Deardorff, Willis & Stockton: J. F. M., 1980. 6) Willis & Deardorff: J. Atmos. Sci., 1974.