

k-εモデルを用いた二次元表層密度噴流の数値解析

大阪大学工学部 正 員 室田 明

大阪大学工学部 正 員 中辻啓二

大阪大学工学部 学生員○藤崎 豊

1. まえがき

第30回水講¹⁾では、表層密度噴流を忠実にモデル化することに主眼をおいた数値解析を行い、考案した数値解析法が概ね実現象を予測し得るという確証を得た。本報では、運動量や浮力の乱流輸送を精度高く勘案できるk-ε二方程式モデルの導入を試み、k-ε乱流モデルの表層密度噴流への適用性を実験値との比較で検討する。

2. k-ε二方程式モデルの自由水表面条件について

k-εモデルの導入による数値解析法の改良点は、渦動粘性係数 ν_t の算定方法のみである。したがって、数値解析法の詳細は文献 1) を参照されたい。近年、あらゆるせん断流に適用される傾向にあるk-εモデルは、乱流運動エネルギーkと粘性消散率εの輸送方程式を解くことにより、渦動粘性係数 ν_t を次式のように求める乱流完結法である。

$$\nu_t = C_\mu \cdot (k^2 / \epsilon) \quad (1)$$

ここに、 C_μ は実験定数であり、通常0.09が用いられている。k-εモデルは局所等方性を前提に考案されたので、レイノルズ数の高い乱流場でしか適用できない。したがって、壁面近傍や水表面近傍のような乱れの抑制される流れ場には何らかの補正が必要となる。壁面近傍の補正には速度の対数則を用いて誘導された、いわゆる near-wall-function が汎用されている。一方、水表面近傍の補正には定説はない。そこで、本研究では水表面近傍の補正に二通りの方法を検討した。その一つは、水表面での境界条件を $k = \epsilon = 0$ と仮定する方法である。(補正法①) もう一つは、 $dk/dz = d\epsilon/dz = 0$ のように水表面境界条件において、次式に示すような C_μ の補正関数を用いる方法である。(補正法②) 後者はMcGuirk・Papadimitriou²⁾によって提案されている。

$$C_\mu = (\kappa \epsilon L / k^{3/2})^{4/3} \quad (2)$$

ここに、 κ はカルマン定数0.435、 L は自由水表面から垂直に測った距離である。渦拡散係数 Γ_t については、文献 1) と同様、つぎの実験式を用いて算定する。

$$\Gamma_t = \begin{cases} \nu_t / 7.0 R_i & \cdots 1.0 \leq R_i \\ \nu_t / (6.873 R_i + 1.0 / (1.0 + 6.873 R_i)) & \cdots 0.01 \leq R_i \leq 1.0 \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 $R_i = (g / \rho_a) \cdot (\partial \rho / \partial z) / (\partial U / \partial z)^2$ である。また、放流口における $k_0 = (\overline{u^2} + \overline{w^2}) / 2$ は噴流などの乱流場では $\sqrt{\overline{u^2}} / U \cong 0.1$ とおけること、また、 $\overline{u^2} > \overline{w^2}$ であることの類推から、 $\sqrt{k_0} / U_0 = 0.07$ と仮定する。一方、 ϵ_0 は放流口近傍で乱れの生成と逸散がつり合っているとして $\epsilon_0 = -\overline{uw} \cdot (dU/dz)$ と仮定する。但し、 $-\overline{uw} \cdot (dU/dz)$ は放流口より0.5cm 入った位置での実験値を採用している。

Akira MUROTA, Keiji NAKATSUJI and Yutaka FUJISAKI

3. 均質表層噴流での検証

水表面条件を検証するために、均質表層噴流の数値解析を実施した。計算結果から、半値半幅の拡がり率 $dH_{0.5}/dx$ についての比較を行うと、その値は補正法①で 0.048、補正法②で 0.068であった。椿・小松³⁾は実験から $dH_{0.5}/dx = 0.072$ としているので、補正法②の値がほぼ妥当と考えられる。図-1は補正法②を用いた場合のレイノルズ応力の鉛直方向分布を示す。流下方向距離 x/H_0 が放流口から 10, 36, 79 と離れていくにつれて、計算値は自己保存領域 ($x/H_0 = 125$) で計測された実験値に近づく。しかしながら、 $x/H_0 = 124$ の計算値にはその傾向が見られなくなり、実験値をかなり下回る。これは下流端境界条件の影響と思われる。下流端 ($x/H_0 = 160$) を放流口から十分に離して設定すれば、合理的な値が得られるであろう。

4. 表層密度噴流の数値解析

つぎに、放流密度フルード数 $Fd_0 = 2.87, 5.59$ の場合の数値解析を行った。解析対象は文献 1) と同様である。図-2は放流口近傍の $Fd_0 = 5.59$ の流動をベクトル表示したものである。流況を強調するため、ベクトルは $\sqrt{V/U_0}$ と歪ませてある。放流水束が周囲環境水を連行しながらガウス分布形へ近づいていくという、流れの形成領域から確立領域への遷移の様子がよく表われている。また、連行量を補償する、主流部とは逆向きの流動が周囲環境水中に形成されていることも確認できる。図-3は流下方向流速と浮力の鉛直方向分布を示す。流下位置 $x = 10\text{cm}$ は形成領域を、 $x = 25\text{cm}$ は確立領域を代表させている。計算結果と実験値の合致度はきわめて良好であり、 $k-\epsilon$ モデルを導入した数値解析法が表層密度噴流の平均流動を精度高く予測し得ることがわかった。

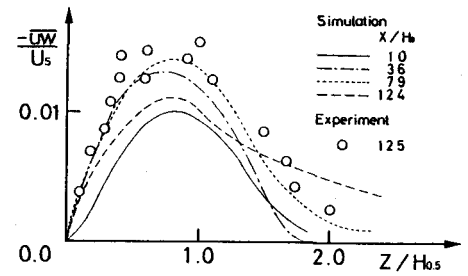


図-1 レイノルズ応力の鉛直方向分布

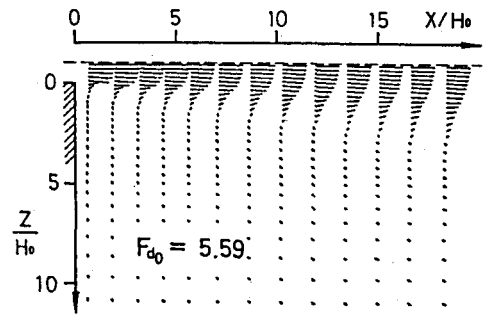


図-2 放流口近傍の流動特性

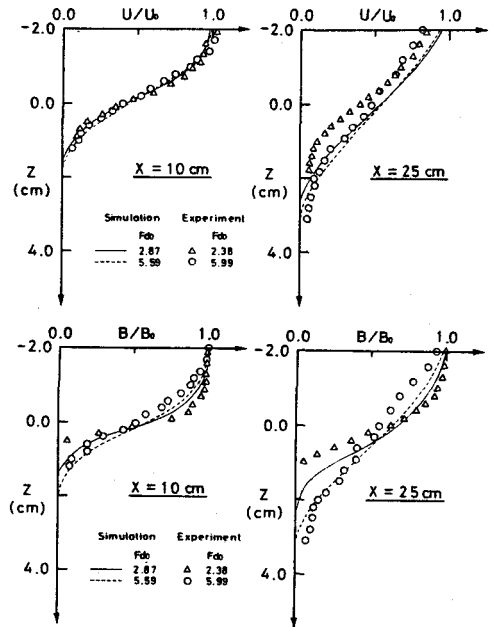


図-3 流速と浮力の鉛直方向分布

参考文献 1) 室田・中辻：第30回水理講演会論文集，1986。 2) McGuirk・Papadimitriou：5th Intl. Sympo. on Turbulent Shear Flows, 1985。 3) 椿・小松：土木学会論文報告集第 273号，1978