

関西電力	正員○福住 晃
京都大学 工学部	正員 細田 尚
京都大学 工学部	正員 村本 嘉雄
岡山大学 環境理工学部	正員 大久保賢治

1. はじめに：流体密度の非一様性に起因する流れの基本的な現象として交換密度流を取りあげ、数値解析的に再現する。交換密度流は、これまで実験的研究を中心として密度フロントの形状や進行速度、密度界面における内部波や混合などについて数多くの研究が行われてきた。本研究は、交換密度流の数値解析結果を従来の実験的研究と比較し、モデルの改良を行う。

2. 基礎式と数値解析法：まず、N. S. 方程式を用いて数値解析を行ったところ、現象は定性的には再現されたが（図-1）、混合層厚が大きすぎ（図-2, 3）、密度界面での不安定波の再現が実験結果（写真-1）と比べて不十分であった。

これらの問題点を解決するための足掛かりを得るために、低レイノルズ数型 k- ε モデルに密度勾配の効果を取り入れた乱流モデルを標準型として数値解析を行った。基礎式は、連続式、レイノルズ方程式、密度の保存則およびレイノルズ応力を閉じるための乱流モデルで構成される。数値解析法としては、有限体積法を用い、連続式を満たすように圧力を修正させながら、時間積分を行った。移流項の離散化には Quick スキームを用いた。計算の初期条件としては、大久保¹⁾の実験結果をもとに水深 $H=18\text{cm}$ 、密度偏差 $\varepsilon=0.00597$ とした。計算は、渦運動の激しい領域において乱れエネルギーの生成・散逸が精度良く再現されず、渦動粘性係数が非常に大きくなり数値解が発散した。

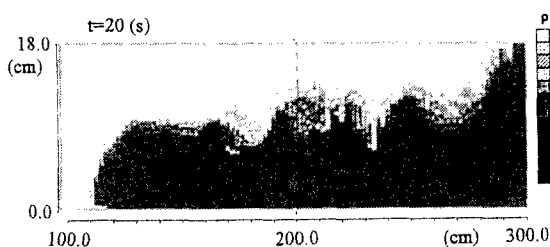


図-1 N.S.方程式による計算結果

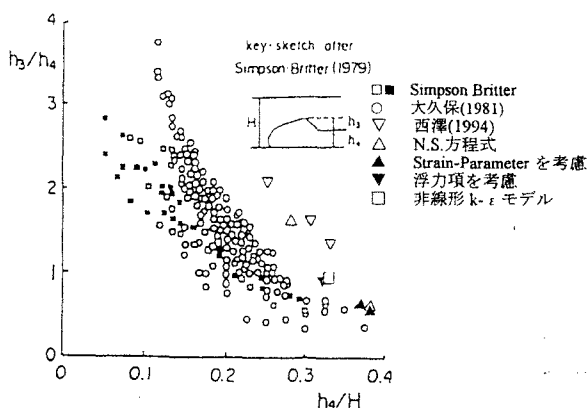


図-2 混合層厚と下層厚の関係

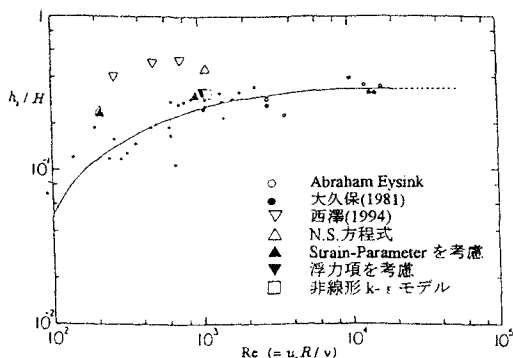


図-3 混合層厚とレイノルズ数の関係

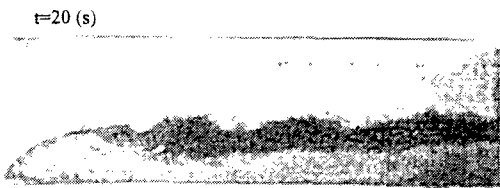


図-4 実験結果

3. ストレイン・パラメータの導入：モデルの改良として、まず、以下に示すストレイン・パラメータの渦動粘性係数への影響を考慮した。

$$S = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} S_{ij}^2}, \quad (S_{ij} \equiv \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \quad (1)$$

ここに、 u_i ；流速ベクトルの成分、 k ；乱れエネルギー、 ε ；乱れエネルギー散逸率を表す。渦動粘性係数の定数 c_μ とストレイン・パラメータ S の関係を表す関数形として Kato・Launder²⁾らの提案する次式を用いた。

$$c_\mu(S) = \min \left[0.09, \frac{A_2}{1 + A_1 (\min(20, S))^{1.5}} \right] \quad (2)$$

ここで $A_1 = 1.0$, $A_2 = 0.3$ とした。発散は起こらなくなったが、写真-1 と比べて、密度界面の不安定波が少し小さすぎる（図-4）。

4. ε -方程式への浮力項の導入：成層化を強める効果があるとされる ε -方程式の浮力項を導入した。その計算結果（図-5）は図-4 より界面での不安定波が大きくなっている。これは、成層が強くなったことにより界面での渦動粘性係数が減少したためと考えられる。また、混合層厚も図-2(▼印)に示したように従来の実験結果に近い値を示している。

5. 非線形 $k-\varepsilon$ モデル：レイノルズ応力の表示に、ひずみ速度の非線形項を考慮した非線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いて数値解析を試みた。非線形 $k-\varepsilon$ モデルの導出過程およびモデル方程式の表示には類似のものが数通りあるが、ここでは、次の、明・笠木³⁾らの表示を用いた。

$$-\overline{u_i' u_j'} = DS_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k - c_\mu \frac{k^3}{\varepsilon^2} \sum_{\beta=1}^3 c_\beta \left(S_{\beta\beta j} - \frac{1}{3} S_{\beta\alpha\alpha} \delta_{ij} \right) \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad S_{2ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_r} + \frac{\partial u_r}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_r} \right), \quad S_{3ij} = \frac{\partial u_r}{\partial x_i} \frac{\partial u_r}{\partial x_j} \quad (4)$$

ここに、 D ；渦動粘性係数、 c_β は定数であり、 $c_1 = 0.1$, $c_2 = 0$, $c_3 = -0.15$ とした。計算結果は、図-6 に示すように密度フロント先端でも連珠型の波の発生がみられ、実験結果に類似している。

6. おわりに：以上、交換密度流を取り上げ、乱流モデルを用いて数値解析を行い、モデルの改良を行ったが、今後、非線形 $k-\varepsilon$ モデルについてさらに検討を行うとともに、LES 等の乱流モデルについても検討を行ってきたい。

<参考文献> 1) 大久保賢治：京都大学学位論文，1988。 2) Kato・Launder: Proc. 9th Symp. on Turbulent Shear Flows, Kyoto, Vol. 1, pp. P10. 4. 1～6, 1993。 3) 明・笠木：日本機械学会論文集(B 編)，56 巻，531 号，pp. 94～100, 1990。

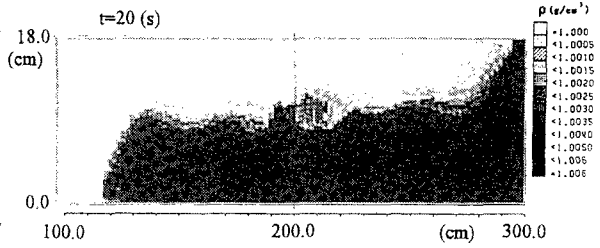


図-5 ストレイン・パラメータを考慮した計算結果

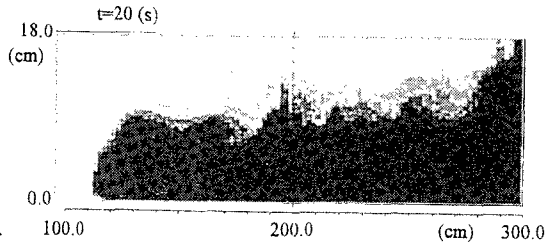


図-6 浮力項を導入した計算結果

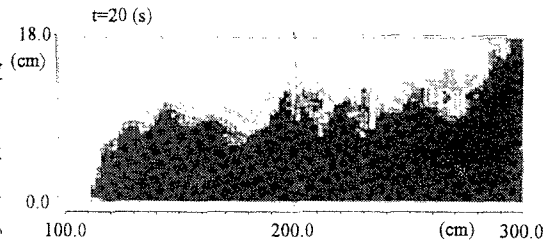


図-7 非線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いた計算結果