

II-171

自由水面の変動を考慮した段落部乱流の計算

神戸大学工学部 正員 ○中山 昭彦
東洋情報 学生員 北垣 隆夫
神戸大学大学院 学生員 松井 聰知

1. はじめに

段落下流部の流れは剥離、再付着などを伴い、実用的且つ精度ある計算は容易でない。とくに自由水面は平均流の扱いにおいても計算手続きは複雑であり、乱れ場への影響にはまだ不明な点も残されており確立されていない¹⁾。自由水面のない閉管路内での断面拡大部の場合、いろいろな乱流モデルを用いた計算が行われており^{2,3)}、最近では格子平均による大規模渦のシミュレーションや、低レイノルズ数ではあるが直接シミュレーションなどが行われ⁴⁾、なお改良がなされている。自由水面がある場合でも閉管路流れに準じた方法が適応され、低フルード数流れについて良い計算結果が得られている⁵⁾。しかしフルード数が大きい場合には自由水面効果は大きくなり、自由水面境界条件を厳密に扱わなければならない。本研究では自由水面を現実的に扱い、圧力一定の条件を満たす未知変動境界として解く方法を試みた。乱流モデルは比較的簡単でいろいろな流れである程度の精度も検証されている $k-\epsilon$ 型2方程式モデルを採用するが、再付着流れに適応可能な Abeら⁶⁾による低レイノルズ数モデルを応用した。このモデルでは摩擦速度を用いずKolmogorov速度を用いて壁面効果を反映しているので段落ち流れの計算に適している。

2. 基礎方程式及び乱流モデル

計算は図-1に示すような2次元段落ち下流部の流れで座標は図に示すようにとる。重力場での定常流れの運動方程式は

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x_i}(P/\rho + gy) + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{u_i u_j} + \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

である。ここで U_i , u_i はそれぞれ平均流速、変動流速の直行座標 x_i での2次元ベクトル成分で、 P , y , g は平均圧力、鉛直距離及び重力の加速度である。自由表面流れを扱うのに、空間位置 x_i で空間体積の水の占める割合 $F(x_i)$ を定義すると、 F はゼロと1の間の値をとり

$$\frac{DF}{Dt} = U_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

を満足する。(1)式は $F > 0$ の領域でのみ適応する。 $k-\epsilon$ 法ではレイノルズ応力を渦動粘性モデルを用い

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad \nu_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

と置き、乱流エネルギー k 、とその散逸率 ϵ については次のモデル輸送式を解く事により求める。

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} - C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} f_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad (5)$$

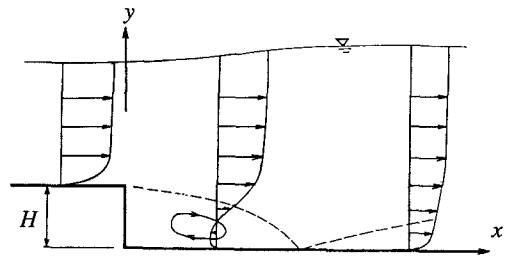


図-1 段落ち流れ場

ここで C_μ 、 C_{ei} 、 $C_{\epsilon 2}$ はモデル定数、 f_μ 、 f_2 はモデル関数で、本計算では全て Abe⁵⁾らにより与えられた値及び関数形を用いる。このモデルは他のモデルと異なり壁面摩擦速度の代わりに $u_\epsilon = (v\epsilon)^{1/4}$ 及び乱れレイノルズ数 $k^2/v\epsilon$ を用いているところに特徴がある。 k 、 ϵ の壁面境界条件は壁からの垂直距離 n を使い、 $k=0$ 、 $\epsilon=2v\partial^2 k/\partial n^2$ とし、水面上では垂直勾配はゼロとした。水面近傍では乱れの減衰効果があると指摘されているが、本計算では v_ϵ を人工的に減衰効果を与えずに用いた。

3. 計算法

計算には食い違い格子を用いたMAC法を適応した。拡散項は中心差分、移流項は3次精度風上差分を用い、非定常問題として時間について陽的オイラー法を用い非定常計算を行い、定常状態が得られるまで計算を繰り返した。格子は壁面近辺で細かくとり粘性底層をも計算できるようにした。 F の計算には数値誤差による散逸のないVOF法を用いた。計算領域は段落ち上流に $5H$ 下流に $40H$ とり 75×75 の不等間隔格子上で解いた。

4. 計算結果

上記の計算を Nezu & Scheuerer⁶⁾の実験のうち上流最大流速と段落ち高さを基準にしたフルード数 $Fr=0.2$ の高いケースにあたる条件の基での計算例及び流速を上げ $Fr=0.5$ にした場合の結果の流速分布を図-2に示す。低いフルード数での結果は概ね良好であるが、逆流速度が実験に比べ大きく計算され、再付着点の位置が短く、計算精度などまだ改良、検討の余地はある。高いフルード数の場合では水面で不安定波動が見られた。図-3に同じケースの乱れ強度の分布を示す。低いフルード数での結果は良好である。

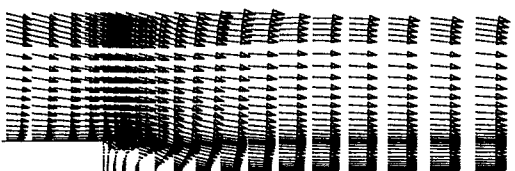
5. おわりに

本研究では段落ち流れに対し改良 $k-\epsilon$ 法を適応し、自由水面を圧力一定である位置の未知な境界として扱った計算を行った。予備の結果であるが今後モデルの検討、調整改良し、跳水など水面変化の大きい流れを扱うのに応用したい。

参考文献

- 1)河原能久：東京大学土木工学科、水工学シリーズ 92-A-1, 1992.
- 2)Obi, Peric & Scheuerer, AIAA J. Vol. 29, 585-590, 1991.
- 3)小林・富樫：生産研究45巻1号、33-39, 1993.
- 4)Moin & Kim, 9th Symposium on Turbulent Shear Flows, 13-2, 1993.
- 5)Abe, Nagano, & Kondoh, 1st Symposium on Computational Wind Engineering, No.52, 213-218, 1992.
- 6)Nezu & Scheuerer, Symposium on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements, 1988.

(a) $Fr=0.2$



(b) $Fr=0.5$

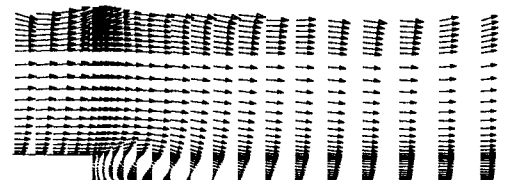
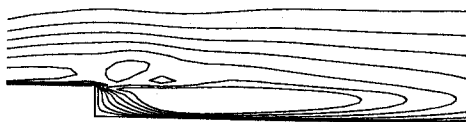


図-2 平均流速場の計算結果と実験との比較

(a) $Fr=0.2$



(b) $Fr=0.5$



コンター間隔: $0.002U_m^2$

図-3 乱れエネルギー k の分布