

東洋情報株式会社 学生員 ○北垣 隆夫
神戸大学工学部 正 員 中山 昭彦
神戸大学院 学生員 松井 聡知

1. はじめに

段落下流部の流れの実用的計算は剥離、再付着など困難な要素が多く、精度ある計算は容易でない。乱流モデルとしては1方程式モデル、2方程式モデル¹⁾、応力方程式モデル²⁾などが用いられ、なお改良がなされている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が行われている。後者は計算費用が莫大になるため、精度、経験式を用いるため汎用性は少ないが計算量の少なくて済む前者の検証、改良にもつぱらもちいられている。本研究では、自由水面の影響の少ない低フルード数流れを念頭に置き、自由水面の考慮の必要のない断面拡張のある閉水路内流れの場合で適切な乱流モデルを二三検討を行い、それに基づく予備的数値計算を行った。

2. 段落下流部での乱流の特性と乱流モデル

段落下流部の流れ(図-1)の特徴はまず上流底面の境界層が強制的に剥離する。剥離したせん断層は逆流域内の圧力低下のため下方へ曲げられながら発達する。このせん断流は底面に近づくとその影響を受けるため自由せん断流に比べ複雑な様相を呈する。大規模乱れは流れ場全体に影響される。さらに下流では新たな境界層が発達する。従って段落流れに適応されるモデルは次の点に留意しなければならない。i) 流線曲率の影響を適切に反映する、ii) 乱流拡散は重要で領域全体の影響を考慮にいれ、iii) 再付着点近傍では境界条件によく用いられる壁関数の基になる対数則や局所平衡は成り立たない、また摩擦速度 u_τ はゼロあるいは非常に小さくなり速度スケールとして用いるのは避ける、などである。本研究ではこう言った点を検討し適正なモデルの応用を考える。最も一般に用いられ、他の複雑なモデルに比べ劣らない $k-\epsilon$ 2方程式法の応用を考える。この方法では $\bar{\epsilon}$ での乱流応力をその点でのひずみ速度

$S_{ij} = 1/2(U_{ij} + U_{ji})$ と渦動粘性係数で表される。しかしこの方法では大規模渦の重大になる剥離を伴う流れでは精度が悪い。そこで本研究では上記のように大規模渦の影響を反映するため渦粘性係数の使用をせずNakayamaら⁴⁾の非局所モデルを応用する事を考え、次のような積分表現を使うことを試みる。

$$-\overline{u_i u_j}(\bar{x}) = \int F(\bar{x}, \bar{\xi}) S_{ij}(\bar{\xi}) dA_{\bar{\xi}} - 2/3 k \quad (1)$$

ここで $F(\bar{x}, \bar{\xi})$ は渦動粘性係数 ν_i にあたる関数で、その積分値は ν_i に相当する。また

$$F(\bar{x}, \bar{\xi}) = C_\mu k^2 / \epsilon f(\bar{x}, \bar{\xi}) \quad (2)$$

とおき関数 $f(\bar{x}, \bar{\xi})$ はNakayamaら⁴⁾の関数を二次元に拡張したものを用いる。乱れエネルギー ϵ と k については次の標準的輸送式を解く事により求める。

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu + \nu_t) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} - C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} f_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

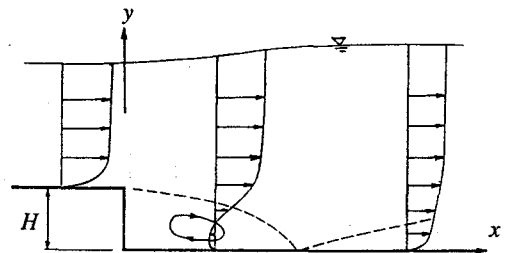


図-1 段落流れ場の概要

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (v + v_p) \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{u_i u_j}{\mu_t} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad (4)$$

ここで C_ϵ 、 C_ϵ は標準 $k-\epsilon$ で使われるモデル係数で、 f_2 は壁面の影響を表す減衰関数で、本方法では壁からの距離、およびKolmogorov速度を用いるAbeら³⁾の方法を採用した。これにより摩擦速度を用いずに壁面条件を与える事が出来る。境界条件は壁面では $k = 0$ 、 $\epsilon = \nu \partial^2 k / \partial y^2$ である。

3. 計算法

計算にはスタッガードメッシュを用いたMAC法を適応した。拡散項は中心差分、積分には台形公式、移流項は3次精度風上差分を用い、時間については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。

4. 計算結果

上記の計算を最近おこなわれた直接シミュレーション⁶⁾と同じ条件の基で段落ち高さを基にしたレイノルズ数が5000の場合について数値計算を行った。このレイノルズ数は他の計算例に比べ非常に小さいので結果の評価は注意する必要がある。図-2に平均流速場と乱れエネルギー分布の結果が示されてある。図-3は平均流速分布をシミュレーション結果と比較してある。計算はうまく行われているのが分かるが、結果は定性的のみ良好で、再付着点の位置がずれており、計算精度などまだ改良、検討の余地はある。

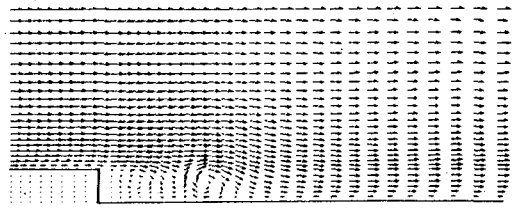
5. おわりに

本研究では段落ち流れに対し $k-\epsilon$ 方を改良した非局所的輸送モデルを適用した。予備的結果であるがさらに微調節することにより良い計算法になる可能性はあると思われる。応用に際しては自由水面の位置をも未知として解く方法が必要である。

参考文献

- 1) Nezu, Scheuerer, Symposium on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements, 1988.
- 2) Obi, Peric and 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) Nakayama, Vengadesan, 9th Symposium on Turbulent Shear Flows, 21-4, 1993.
- 5) Abe, Nagano, Kondoh, 1st Symposium on Computational Wind Engineering, No.52, 213-218, 1992.
- 6) Moin, Kim, 9th Symposium on Turbulent Shear Flows, 13-2, 1993.

平均流速ベクトル



乱れエネルギー分布

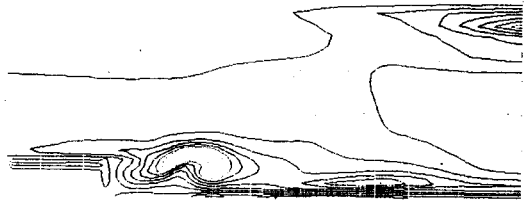
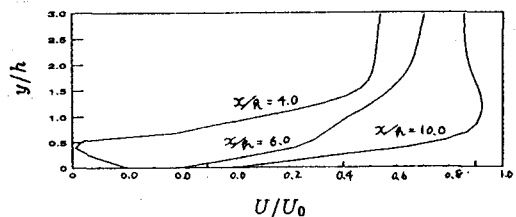


図-2 計算結果

流速分布 (計算結果)



Moinらのシミュレーション結果

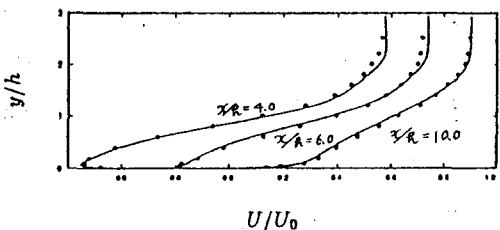


図-3 平均流速分布の計算結果とシミュレーションとの比較