

II-284

開水路流れ横流入部の渦運動に関する数値解析

京都大学大学院	学生員	櫻井 寿之
京都大学工学部	正会員	細田 尚
京都大学工学部	正会員	村本 嘉雄
和歌山工業高等専門学校	正会員	木村 一郎

1. はじめに: 本研究は、開水路流れ横流入部近傍の流れを対象に、せん断不安定に起因する平面的な渦運動(鉛直軸回り)の再現性に関して、平面2次元解析と3次元解析を比較したものである。平面2次元解析を用いて、上述の渦運動がある程度再現できることは、いくつかの流れ場を対象に確認されている。そこで本研究は、少なくとも平面2次元解析で再現されている大規模渦運動を再現可能な3次元解析モデルを明らかにすることを目的としている。

2. 数値解析の基礎式: 数値解析の基礎式は連続式、運動方程式の空間3方向成分および乱流モデルから構成される。3次元解析を用いて渦運動の解析を行う場合、乱流モデルの選定に留意する必要がある。たとえば、カルマン渦に対して標準型k-εモデルによる結果の再現性が非常に悪いことが知られており¹⁾、モデルの改良が積み重ねられている。そこで本研究では、標準型k-εモデルを基本として、構成則に非線形性を考慮した非線形k-εモデルを考えた。非線形k-ε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いくつかあるが、ここでは、笠木ら²⁾の表示を用いている。非線形k-εモデルによるレイノルズ応力の表示を(1)式に示す。

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

$$S_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}, \quad S_{1ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_r} \frac{\partial U_j}{\partial x_r}, \quad S_{2ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_r}{\partial x_i} \frac{\partial U_j}{\partial x_r} + \frac{\partial U_r}{\partial x_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_r} \right), \quad S_{3ij} = \frac{\partial U_r}{\partial x_i} \frac{\partial U_r}{\partial x_j}$$

3. 数値解析法と計算の条件: 数値解析法として有限体積法を用い、移流項に3次元QUICKを、時間積分にアダムス・バッシュフォース法を用いる。計算の対象とする流れ場は、図-1に示した水路において、流入流速 5(cm/s), 横流入流速 18(cm/s), 下流端水深 10(cm)としたものである。格子間隔は流れ(x)方向、横(y)方向、鉛直(z)方向それぞれ $\Delta x = 5(\text{cm})$, $\Delta y = 2(\text{cm})$, $\Delta z = 1(\text{cm})$ である。また $\Delta t = 0.004(\text{sec})$ である。

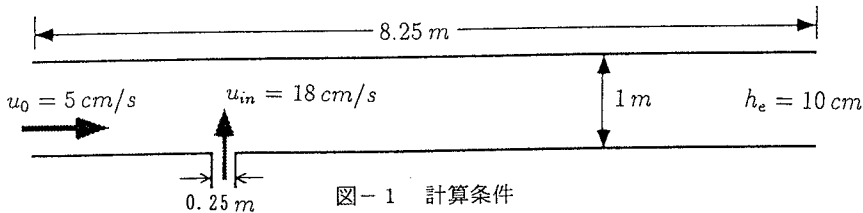


図-1 計算条件

4. 計算結果の考察: まず、平面2次元解析を行い渦運動を再現した結果を図-2に示した。横流入下流に大規模渦運動の発生・発達が見られる。次に標準型k-εモデルを用いて3次元計算を行った(図-3)。大規模渦運動は再現されていない。そこで、本研究の計算法の渦運動解析への適用性を確かめるために、N・S方程式(ただし粘性係数は200とした。)を用いて計算した結果が図-4である。渦の発振が見られ、渦動粘性係数を適切に評価すれば、本研究の数値解析法で渦運動が再現できることが確認される。またこの結果の横断面図を図-5に示した。これを見ると渦の周辺部で上昇流、渦の中心部で下降流が見られ、渦運動の3次元構造を示している。次に、非線形k-εモデルによる計算結果を図-6に示した。標準型k-εモデルによる結果と比較して循環の形にかなりの変化が見られ、平面2次元モデルの結果に近づいているが、渦の発振にはいたっていない。

そこで、モデルの改良をするために(2)式で定義される Strain Parameter を導入して、Kato・Launder と類似の(3)式を用いて係数 C_μ を補正する。

$$S = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2} \quad (2) \quad C_\mu(S) = \min \left[0.09, \frac{A_2}{1 + A_1 \cdot (\min[20, S])^{1.5}} \right] \quad (3)$$

(3) 式中の係数 A_1 , A_2 の値を表-1 に示したように変化させて計算を試みた。それぞれのケースにおける C_μ の関数形を図-7 に示した。図-8, 9 に Run A-1, A-4 の計算結果を示した。これを見ると、Run A-1 では渦が下流に引き延ばされているにとどまり非線形 $k-\varepsilon$ モデルの結果によく似ているが、Run A-4 では渦の発振の兆しがみられる。今後、より高次のモデルを導入するなどしてモデルの改善に努めたい。

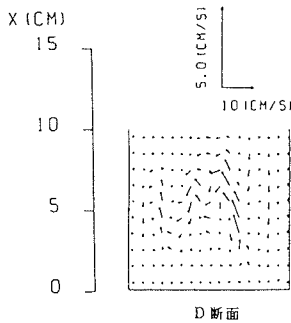


図-5 N・S方程式の結果の横断面

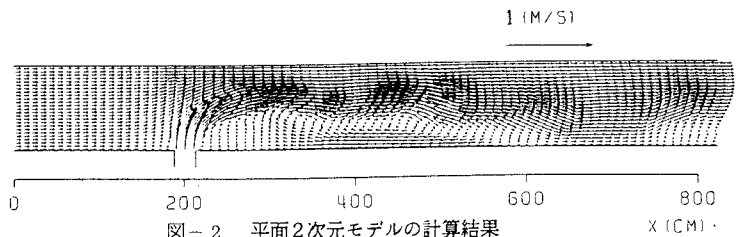


図-2 平面2次元モデルの計算結果



図-3 標準型 $k-\varepsilon$ モデルの計算結果(鉛直方向10層中上から5層目の平面図)

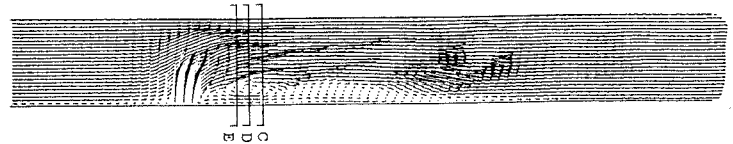


図-4 N・S方程式の計算結果(粘性係数 20ν)

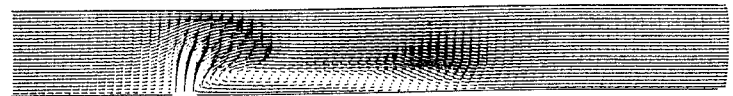


図-6 非線形 $k-\varepsilon$ モデルの計算結果(同上, $c_1=0.4, c_2=0, c_3=-0.15$)

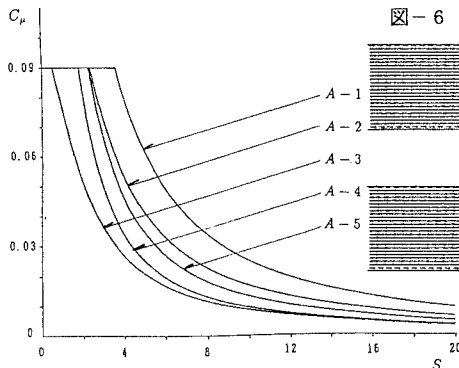


図-7 $C_\mu(S)$ の関数形

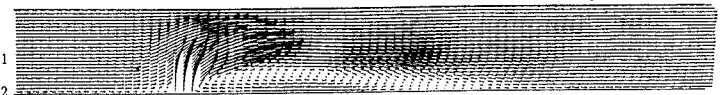


図-8 A-1 の計算結果

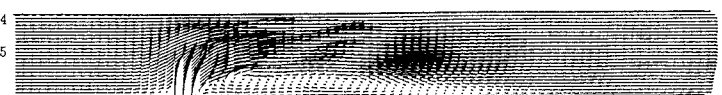


図-9 A-4 の計算結果

参考文献

- 1) Kato・Launder : Proc. 9th Symp. Vol.1, pp.P10.4.1~6, 1993.
- 2) 明・笠木 : 機会学会論文集 (B編), 56巻, 531号, pp.324-340, 1992.