

II-194

非線形 k-εモデルによる Lyn の実験結果の再現計算

四日市大学 環境情報学部 正 員 木村 一郎*

京都大学 工学研究科 正 員 細田 尚**

はじめに: 角柱周辺の非定常流れに関する Lyn の実験結果¹⁾について、2次元非線形 k-εモデルによる再現計算を試みる。計算領域の概略を図1に示す。角柱の一辺($D=4\text{cm}$)を代表長としたレイノルズ数は $Re=2.2 \times 10^4$ である。

乱流モデルの概要: 次の4つの乱流モデルを適用し、結果の比較を行う。

Run1: 標準型線形 k-εモデルであり、次のようにレイノルズ応力を評価する。

$$-\overline{u_i u_j} = D_i S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad S_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}, \quad D_i = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

ここに、 U : 流速、 $-\overline{u_i u_j}$: レイノルズ応力、 k : 乱れエネルギー、 ε : 乱れエネルギー散逸率、 C_μ : 定数($=0.09$)である。

Run2: 次式に示すように、構成則に2次の非線形項を考慮した非線形 k-εモデルである。

$$-\overline{u_i u_j} = D_i S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \frac{k}{\varepsilon} D_i \sum_{\beta=1}^3 C_\beta \left(S_{\beta j} - \frac{1}{3} S_{\beta \alpha \alpha} \delta_{ij} \right) \\ S_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}, \quad S_{2ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_r}{\partial x_i} \frac{\partial U_j}{\partial x_r} + \frac{\partial U_r}{\partial x_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_r} \right), \quad S_{3ij} = \frac{\partial U_r}{\partial x_i} \frac{\partial U_r}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここに、 $C_1(=0.4)$ 、 $C_2(=0)$ 、 $C_3(=-0.13)$ 、 $C_\mu(=0.09)$ は全て定数とする。

Run3: 式(2)で、 C_1, C_2, C_3, C_μ をストレインパラメータ S とローテーションパラメータ Ω の関数とする。

$$C_\mu = \min \left(0.09, \frac{0.3}{1+0.4M} \right), \quad C_1 = \frac{0.4}{1+0.01M^2}, \quad C_2 = 0, \quad C_3 = \frac{-0.13}{1+0.01M^2} \\ M = \max(S, \Omega), \quad S = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2}, \quad \Omega = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2} \quad (3)$$

Run4: $C_1(=0.4), C_2(=0), C_3(=-0.13)$ は定数とし、 C_μ を次のように S と Ω の関数形で与える。

$$C_\mu = \min \left(0.09, \frac{0.3}{1+0.09M^2} \right), \quad M = \max(S, \Omega) \quad (4)$$

計算法の概略: 計算法は有限体積法とし、運動方程式の移流項には

QUICK を、 k, ε 方程式の移流項には Hybrid 法を用いた。時間積分には2次の Adams-Bashforth 法を採用した。計算格子は可変直交格子で、格子数は 112 (主流

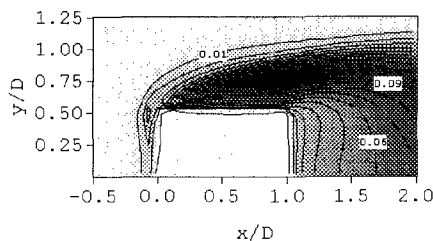
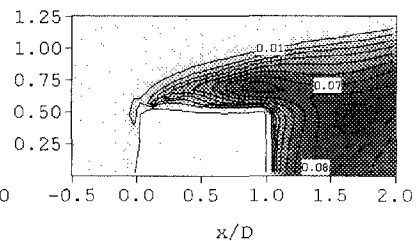
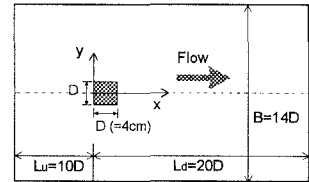
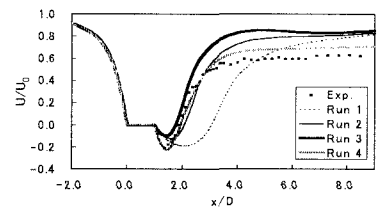
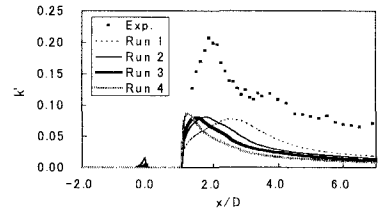
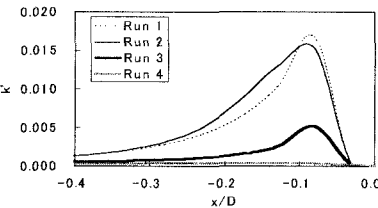
図 5(a) 角柱周辺の k' の分布 (Run1)図 5(b) 角柱周辺の k' の分布 (Run3)

図1 計算領域

図2 x軸上の U/U_0 の分布 (U_0 : 主流流速)図3 x軸上の $k' = k/U_0^2$ の分布図4 衝突部直前の k' の分布

キーワード: 乱流モデル, 非線形 k-εモデル, カルマン渦, 数値解析

* 〒512-8512 四日市市萱生町1200 四日市大学環境情報学部 Tel 0593-65-6599, Fax 0593-65-6617

** 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学工学研究科 Tel 075-753-5075, Fax 075-761-0646

方向)×92(横断方向)である。以下、計算結果と Lyn の実験(アンサンブル平均値)の比較を行う。

結果の考察: 計算結果では全ての Run でカルマン渦が再現され、ストローハル数は $St=0.144\sim 0.146$ の範囲の値となった。これは、実験におけるストローハル数 $St=0.13$ に比べて約 11%大きい値である。図2は x 軸上の主流方向の無次元流速を比較したものである。Run1, 2 は角柱下流部の逆流域を過大に評価しており、特に Run1 では循環流の長さが実験よりも2倍以上大きい。一方 Run3 では逆に循環流のスケールが実験より小さい。Run4 は全体的な流速分布を良好に再現している。

図3は、 x 軸上の乱れエネルギーの分布を比較したもので、いずれのモデルも実験と比較してかなり小さい値となっている。これは、実験で生じている長周期成分がアンサンブル平均操作により乱れとして計上されることが一因と考えられる²⁾。図4は図3の衝突直前の部分を拡大したものである。Run1, 2 は Run3, 4 に比べて衝突直前の k が大きい値を示している。従来から $k-\varepsilon$ モデルの欠点として、衝突部における k の過剰生成の問題が指摘されている³⁾。図4より、ストレインパラメータ、ローテーションパラメータの効果を導入したモデルは衝突部の k の過剰生成を抑制すること、2次の非線形項には抑制の効果が無いことが指摘される。図5(a), (b)は角柱周辺の乱れエネルギーの分布を Run1 と Run3 で比較してものである。Run3 では角柱周辺の k の生成が抑制されていることがわかる。

図6(a), (b)は、 U および V の無次元変動エネルギー(k_{px}, k_{py})について、実験値と計算値を比較したものである。 k_{px} のピークについてみると、全てのモデルで実験値を上回っている。特に Run4 は実験値との相違が著しい。Run4 の U の時系列には図7に示すような非周期性が認められ、間欠的に振幅の大きい箇所が現れることが k_{px} の過大評価に関係すると思われる。 k_{py} についてみると、Run1 の値は明らかに実験値よりも小さい。Run4 は全体的に良好な一致を示している。図8は、全変動エネルギー(乱れ成分+周期性分)の分布を示したものである。

Run1, 2 はピーク値が実験より小さく、実験の振動特性を再現できていない。Run3 はピーク値をほぼ再現しているものの、 $x/D>3$ の領域で実験値より大きな値を示す。Run4 の結果は実験と良好に一致する。図9は Run3 における流速変動の各成分の横断方向分布(r.m.s.)を2つの断面で比較したものである。 $x/D=4.5$ の分布は $x/D=2.5$ の場合に比べて実験との適合性が悪い。図 6,8,9 より、Run3 は実験の非定常特性をある程度再現しているものの、流下に伴う振動の減衰過程を十分に再現できていないことがわかる。**まとめ:** $k-\varepsilon$ モデルにより Lyn の角柱周辺の非定常流に関する実験の再現計算を試みた結果、標準型モデルはカルマン渦に伴う流体振動を過度に減衰すること、ストレインパラメータ、ローテーションパラメータを考慮した非線形モデルは角柱周辺の乱れエネルギーの過剰生成を抑制する効果があることなどが示された。

参考文献: 1)Lyn (1992) ERCOFTAC fluid dynamics database,43. 2)Bosch & Rodi (1998) Int. J. Numerical Methods in Fluids, vol28, pp.601-616. 3)Kato & Launder (1993) Proc. of 9th Symp. on TSF, Vol.1, pp.19.1-19.6.

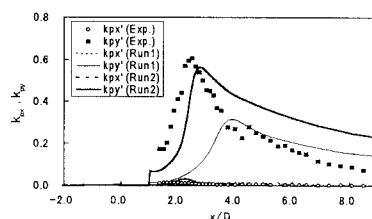


図 6 (a). k_{px}, k_{py} の分布 (Run1, 2)

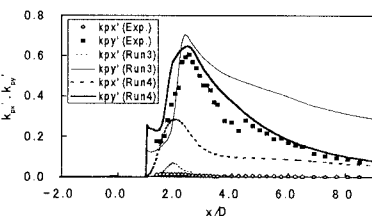


図 6 (b). k_{px}, k_{py} の分布 (Run3, 4)

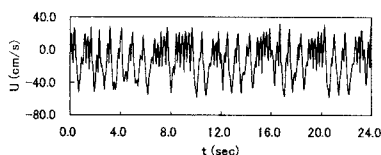


図 7 U の時系列 (Run 4, at $x/D=6$)

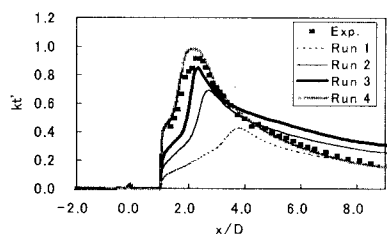


図8 x 軸上の全変動エネルギーの分布

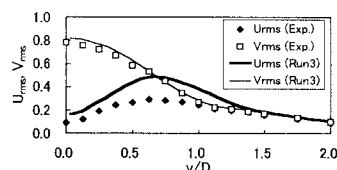


図 9 (a) U と V の変動(rms)の横断方向の分布($x/D=2.5$, Run3)

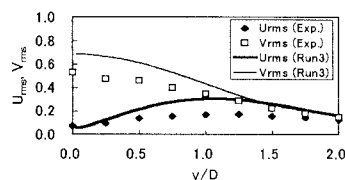


図 9 (b) U と V の変動(rms)の横断方向の分布($x/D=4.5$, Run3)