

I - B378

非線形 $k-\varepsilon$ による角柱周りの流れ解析

NKK 正会員 加藤 真志

1. まえがき 筆者らはこれまで二次元角柱を対象に RANS モデルによる二次元解析を試みてきた。RANS では、全風速変動を周期的変動とそれに上乗せされた不確定な変動に分離し、後者を乱流エネルギーとして評価する。二次元角柱でも、軸方向の乱流変動を考慮するための三次元解析が必要であると考えられるが、RANS による二次元解析の計算負荷は非常に軽いため、精度的問題が克服されれば、RANS は非常に有効な計算ツールとなる可能性がある。RANS の中でも実用性の高い $k-\varepsilon$ は、角柱周りの流れ解析に適用すると衝突面で過大な乱流エネルギーを生成する欠点があり¹⁾、これを克服する修正生産項 $k-\varepsilon$ を用いると、流れの特性が比較的精度良く評価されることを報告した²⁾³⁾。本研究では、さらに一歩進め、Reynolds 応力の非線形性を応力不変量の 3 次積で表した 2 方程式の非線形 $k-\varepsilon$ ⁴⁾ を、角柱の流れ解析に適用した結果を報告する。

2. 解析手法 3 次の非線形項まで考慮した 2 方程式の非線形 $k-\varepsilon$ は、以下の式で表される⁴⁾。

$$\begin{aligned} \overline{u_i u_j} = & \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \frac{\mu_t}{\rho} S_{ij} + c_1 \frac{\mu_t}{\rho} \frac{k}{\varepsilon} \left(S_{ij} S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kl} S_{kl} \delta_{ij} \right) + c_2 \frac{\mu_t}{\rho} \frac{k}{\varepsilon} \left(\Omega_{ik} S_{kj} + \Omega_{jk} S_{ki} \right) \\ & + c_3 \frac{\mu_t}{\rho} \frac{k}{\varepsilon} \left(\Omega_{ik} \Omega_{jk} - \frac{1}{3} \Omega_{lk} \Omega_{lk} \delta_{ij} \right) + c_4 \frac{\mu_t}{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon^2} \left(S_{ki} \Omega_{ij} + S_{kj} \Omega_{li} \right) S_{kl} \\ & + c_5 \frac{\mu_t}{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon^2} \left(\Omega_{ij} \Omega_{lm} S_{mj} + S_{li} \Omega_{lm} \Omega_{mj} - \frac{2}{3} S_{lm} \Omega_{mn} \Omega_{nl} \delta_{ij} \right) + c_6 \frac{\mu_t}{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon^2} S_{ij} S_{kl} S_{kl} + c_7 \frac{\mu_t}{\rho} \frac{k^2}{\varepsilon^2} S_{ij} \Omega_{kl} \Omega_{kl} \\ S_{ij} = & \partial U_i / \partial x_j + \partial U_j / \partial x_i, \quad \Omega_{ij} = \partial U_i / \partial x_j - \partial U_j / \partial x_i, \quad c_\mu = 0.3 \left[1 - \exp \left\{ -0.36 \exp(0.75 \eta) \right\} \right] / (1 + 0.35 \eta^{1.5}), \\ \eta = & \max(\tilde{S}, \tilde{\Omega}), \quad \tilde{S} = k / \varepsilon \cdot \sqrt{S_{ij} S_{ij} / 2}, \quad \tilde{\Omega} = k / \varepsilon \cdot \sqrt{\Omega_{ij} \Omega_{ij} / 2} \\ c_1 : & -0.1, \quad c_2 : 0.1, \quad c_3 : 0.26, \quad c_4 : -10 c_\mu^2, \quad c_5 : 0, \quad c_6 : -5 c_\mu^2, \quad c_7 : 5 c_\mu^2 \end{aligned}$$

モデル定数 $c_1 \sim c_7$ が全てゼロであれば、Reynolds 応力は等方渦粘性モデルと一致する。モデル定数は、Suga⁴⁾により、せん断、旋回、曲率付きの流れで実験値、および DNS の結果と整合するように決定された。解析には、 104×70 の直交格子を、流入条件としては 2% の乱れ強度¹⁾、上下境界には滑り条件を与え、角柱表面には壁関数を用いた。なお、 $20D \times 14D$ の解析領域(角柱 1 辺 D)、Reynolds 数 = 22,000 は、Franke¹⁾と同様である。

3. 解析結果 表 1 に非線形 $k-\varepsilon$ による解析結果を、実験値、および他の RANS モデルによる解析結果と併せて示す。 $\overline{C_D}$ 、 $C_{D,rms}$ は、抗力係数の時間平均と RMS、 $C_{L,rms}$ は、揚力係数の RMS、 St は Strouhal 数である。w.f. は壁関数を表している。図 1、2 には、角柱中央に沿った軸上での流れ方向の時間平均流速、時間平均された k に流速の周期的変動を加えた総乱流エネルギー k_{total} を、実験値、および他の RANS モデルによる結果と併せて示す。表 1 の空力特性結果については、修正生産項が揚力変動を壁関数で小さめ、2-layer($k-\varepsilon / k-\omega$)で大きめに予測している。壁関数を用いた非線形 $k-\varepsilon$ は、同じく壁関数を用いた修正生産項に比べ平均抗力や揚力変動を大きめに評価し、より実験値に近い揚力変動を与える。なお、一般的に St は高めである。図 2 の k_{total} は、壁関数の修正生産項により、角柱背後で小さめに評価されたが、非線形 $k-\varepsilon$ は、修正生産項の欠点であった角柱背後での過小評価を改善する結果を与えている。なお、2-layer を用いれば、修正生産項の評価精度は高い。また、角柱前方での過大な乱流エネルギーの生産は、応力の非線形成分が評価された結果、解消されている。図 1 の流れ方向の流速成分については、循環域の大きさから見て実験値は修正生産項の壁関数と 2-layer の中間にあったが、非線形 $k-\varepsilon$ は最も高精度に循環域の大きさを評価し、角柱から $3D$ 以上離れた下流でも、Durai の実験値¹⁾を重視すれば最も予測精度が高いと言える。

4. まとめ 角柱を対象に 2 方程式の非線形 $k-\varepsilon$ を適用し、以下の結論を得た。

キーワード：乱流モデル、流れ解析、角柱、非線形 $k-\varepsilon$

連絡先：〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町 1 番 1 号, Tel.044-322-6593, Fax 044-322-6519

- (1)角柱近傍の平均流速，総乱流エネルギーについて，非線形 $k-\varepsilon$ は修正生産項よりも精度の高い解を与える。
(2)抗力，揚力等の空力特性係数についても非線形 $k-\varepsilon$ は良好な解を与えるが，その解は実験値よりも若干大きめである。

なお，本解析には，Prof.B.E.Launder, Dr.H.Iacovides, Dr.T.J.Craft の指導と Mr.C.Robinson の協力の下に，筆者が非線形応力を組み込んだ TEAM(Turbulent Elliptic Algorithm Manchester)を使用した。

表1 実験結果及び解析結果(Reynolds 数 22,000)

Authors	Turbulence Model	Grids	$\overline{C_D}$	$C_{D\text{ rms}}$	$C_{L\text{ rms}}$	St
実験(Lyn ¹⁾)	—	—	2.14	0.18	—	0.135
実験(筆者ら ³⁾)	—	—	1.99	0.06	1.06	0.134
解析(筆者ら ²⁾³⁾)	修正生産項 $k-\varepsilon$ w.f.	104×70	2.05	0.02	0.82	0.145
解析(筆者ら ²⁾³⁾)	修正生産項 $k-\varepsilon/k-\omega$	183×156	2.36	0.08	1.49	0.145
本解析値	非線形 $k-\varepsilon$ w.f.	104×70	2.18	0.19	1.17	0.147

参考文献

- 1)Franke & Rodi, Calculation of vortex shedding past a square cylinder with various turbulence models, The 8th Symp. on Turbulent Shear Flows, pp.20-1-1 ~ 20-1-6, Munich, 1993.
- 2)Kato,M.&Launder,B.E. : The modelling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders, The 9th Symp. on Turbulent Shear Flows, pp.10-4-1~10-4-6, Kyoto, 1993.
- 3)加藤真志：修正生産項 $k-\varepsilon$ を用いた静止・振動角柱周りの二次元流れ解析，土木学会論文集，No.577／I-41, 1997年.
- 4)Suga,K.: Development and applications of a non-linear eddy viscosity model sensitized to stress and strain invariants, Ph.D Thesis, The Univ. of Manchester, 1995.

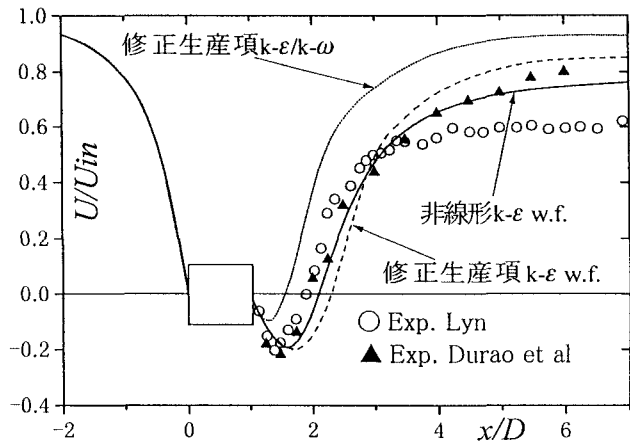


図1 角柱中心軸上の時間平均流れ方向流速分布

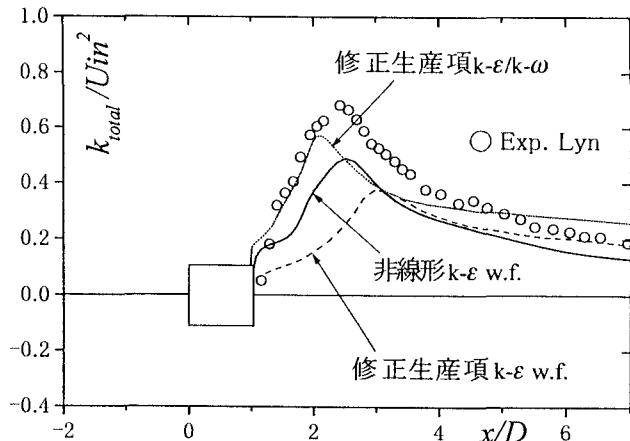


図2 角柱中心軸上の時間平均総乱流エネルギー分布