

中央大学 学生員 ○松田裕行
中央大学大学院 学生員 吉田和人
中央大学 正会員 檜山和男

1. はじめに

近年、乱流場の数値解析において LES (Large Eddy Simulation) による解析が注目を集めている^{[1][2]}。本研究は、1 対 1 角柱周りの流れの解析を行い角柱に作用する特性値について Lyn らの実験値と比較、検討を行うものである。またその際、要素分割や角柱壁面境界条件の依存性について検討を行った。尚、レイノルズ応力の渦粘性モデルには、Smagorinsky モデルを用いている。

2. 基礎方程式

Smagorinsky モデルを用いたナビエーストークス方程式、連続の式は以下のように表すことができる。

$$\dot{u}_i + \bar{u}_j \bar{u}_{i,j} = -(\bar{P} + \frac{2}{3} k_{SGS})_{,i} + \{(\frac{1}{Re} + \nu_{SGS}) \bar{S}_{ij}\}_{,j} \quad (1)$$

$$\bar{u}_{i,i} = 0 \quad (2)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \quad \nu_{SGS} = (C_s \Delta)^2 \left(\frac{\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad k_{SGS} = \frac{\nu_{SGS}^2}{(C_k \Delta)^2} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{\cdot}$ は変数の格子平均量、 k_{SGS} は SGS の乱流エネルギー、 ν_{SGS} は SGS の動粘性係数を表す。また、 C_s, C_k は、Smagorinsky モデルを用いた時の定数で、 $C_s = 0.15, C_k = 0.094$ を用いる。

また、角柱壁面付近での急激な速度変化による過大な渦粘性の影響には、Van Driest 型の Wall Dumping function を乗じている。

$$f = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{25}\right) \quad (4)$$

3. 有限要素法

流れ場の基礎方程式に対して、空間方向にはガラーキン法に基づく有限要素法、時間方向には 3 段階テラーガラーキン法^[3]を用いて離散化を行う。要素としては、三角形一次要素を用いる。

4. 数値解析例

解析対象は、1 対 1 の 2 次元角柱周りの流れで $Re(= U_0 D / \nu) = 22000$ である。境界条件としては、図 1 のようである。尚、角柱壁面境界条件には、Werner, Wengle により提案された linear-power-low 型の Wall function を適用し、表 1 で W-W 型として表している。計算ケースは表 1 のようであり各計算ケースにおいて抗力係数、ストローハル数は表 1 に示す。

表-1: (計算条件の概要及び結果の比較)

	節点数	要素数	$L_1 \times L_2$	h_w	閉塞率	壁面境界条件	$\bar{C}_d$	S_t
Case1	7228	14112	31.0×15.0	0.0126	6.67 %	W-W 型	2.138	0.137, 0.155
Case2	7228	14112	31.0×15.0	0.0126	6.67 %	non-slip 型	2.192	0.174
Case3	7862	15352	22.0×11.0	0.0122	9.09 %	W-W 型	2.436	0.088
Case4	6180	12032	30.0×11.0	0.0405	9.09 %	W-W 型	2.821	0.078
Lyn ^(文献 [2] から抜粋) の実験値							2.05 ~ 2.23	0.135

(注: L_1 は水平方向領域長さ、 L_2 は垂直方向領域長さ、 h_w は最小メッシュ幅を表す)

5. 解析結果

(角柱中心軸上の平均速度分布) 角柱中心軸上の平均速度 $\langle \bar{u}_1 \rangle_t$ の分布を図 2 に示す。Case 2 においては、角柱背後の逆流域が実験値よりも狭くなっている。これは、壁面境界条件に non-slip 型を適用している影響からであると思われる。また Case 1, Case 3 においては、実験値よりも狭い分布を示しているものの、下流域まで良い一致を示した。(剥離領域の平均速度分布) 風上コーナーより $0.5D$ 後方の位置の平均速度 $\langle \bar{u}_1 \rangle_t$ の分布を図 3 に示す。閉塞率の大きい Case 3 では、Case 1 に比べて壁面付近における負の風速が過大評価されており、また角柱遠方においては実験値とに差異がみられ、閉塞率の影響がでているものと思われる。(風圧係数の時間平均値) 角柱に作用する風圧係数の時間平均値 $\langle \bar{C}_p \rangle$ の分布を図 4 に示す。前面 A-B において、3 ケースとも実験値と良い一致を示している。一方、側面 B-C、背面 C-D においては Case 3、Case 4 で実験値よりも大きな負圧が見られるが、Case 1 において十分な最小メッシュ幅と閉塞率をとることにより、実験値と良い対応を示した。

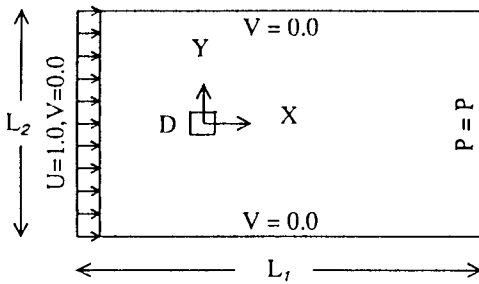


図-1: 境界条件図

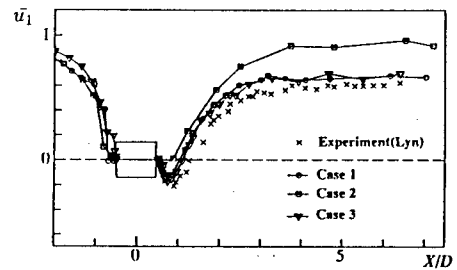


図-2: 中心軸上平均速度分布

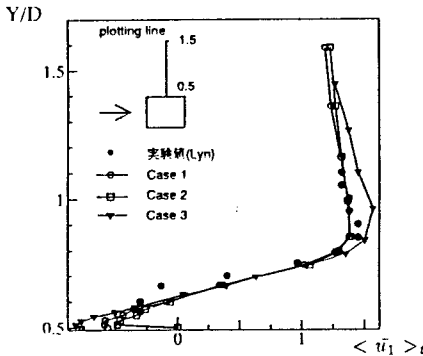


図-3: 剥離領域での平均速度分布

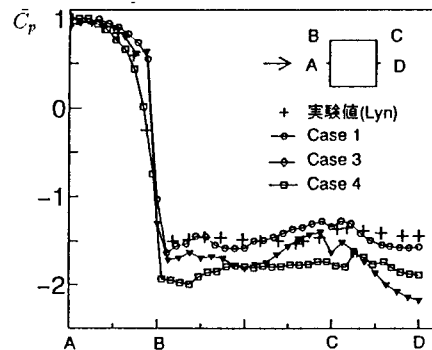


図-4: 風圧係数の時間平均値

5. 結論

本研究において以下のことが明らかになった。

- [1]: 要素分割において、格子以下の渦構造を表現するには、極力、最小メッシュ幅 (h_w) を小さくとり、十分な閉塞率をとることが必要である。
- [2]: 角柱壁面境界条件について、non-slip 型の境界条件を与えるよりも、壁面上の流速勾配を考慮した Werner, Wengle 境界条件や壁減衰の効果考えた Wall Dumping function を適用することが必要である。

参考文献

- [1] 坂本、持田、村上: 2次元角柱周りの乱流渦放出流れに関する LES と DSM、 $k-\epsilon$ 、実験の比較、日本建築学会構造系論文集、pp.49-56 (1994)
- [2] 富永、村上、持田: LES による2次元角柱周辺流れの解析、第8回数値流体力学シンポジウム講演論文集、pp.225-228 (1994)
- [3] 畑中勝守、江春波、川原睦人: 3段階テイラーガラーキン法を用いた非定常流体解析、土木学会第47回年次講演会講演会、pp.618-619 (1992)