

中央大学 学生員○小西英生

中央大学 正会員 檜山和男

前田建設工業 正会員 志村正幸

前田建設工業 正会員 関根章義

1. はじめに

既報^[1]において低レイノルズ数流れ問題や角柱辺長比を変化させた問題に三段階テラーガラキン有限要素法を適用し本手法の有効性を示した。今回、風洞実験レベルにおける流れを評価する事を目標とし、 $Re = 10^4$ 程度の角柱周り流れ問題に本手法を適用し、風洞実験結果と比較することにより本手法の高レイノルズ数流れに対する妥当性の検討を行った。

2. 基礎方程式

非圧縮性粘性流体の基礎方程式として、ナビエストークスの運動方程式と連続の式を用いる。

$$\dot{U}_i + U_j U_{i,j} + P_{,i} - \frac{1}{Re} (U_{i,j} + U_{j,i})_{,j} - F_i = 0 \quad (1)$$

$$U_{i,i} = 0 \quad (2)$$

ここに、 $\dot{}$ は時間に関する偏微分、 $_{,i}$ は空間方向に関する偏微分、 P は圧力、 Re はレイノルズ数、 F_i は物体力を表す。

3. 三段階テラーガラキン有限方程式

運動方程式に対する時間方向の離散化に、三段階テラーガラキン法を用いる。本手法は、時間微分項のテラー展開を微小時間増分量 Δt の三次の項まで考慮し、それを三段階に分解して計算を行うものである。また、この非線形方程式を解くにあたり流速と圧力を分けて計算を行う分離解法の一つである流速修正法を用いた。

$$U_i^{n+\frac{1}{3}} = U_i^n - \frac{\Delta t}{3} \left\{ U_j^n U_{i,j}^n - \frac{1}{Re} (U_{i,j}^n + U_{j,i}^n)_{,j} \right\} + \frac{\Delta t}{3} P_{,i}^n \quad (3)$$

$$U_i^{n+\frac{2}{3}} = U_i^n - \frac{\Delta t}{2} \left\{ U_j^{n+\frac{1}{3}} U_{i,j}^{n+\frac{1}{3}} - \frac{1}{Re} (U_{i,j}^{n+\frac{1}{3}} + U_{j,i}^{n+\frac{1}{3}})_{,j} \right\} + \frac{\Delta t}{2} P_{,i}^n \quad (4)$$

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \Delta t \left\{ U_j^{n+\frac{2}{3}} U_{i,j}^{n+\frac{2}{3}} - \frac{1}{Re} (U_{i,j}^{n+\frac{2}{3}} + U_{j,i}^{n+\frac{2}{3}})_{,j} \right\} + \Delta t P_{,i}^{n+1} \quad (5)$$

ここに、添字 n は各時刻レベル、 Δt は微小時間増分量である。

(3),(4),(5) 式右辺第 2 項を中間流速としてまず計算してから各段階における流速を計算している。(5) 式の発散をとり $n+1$ 回目の連続の式を代入することにより (6) 式の圧力に関するポアソン方程式が導かれる。ここで、(6) 式中の $\bar{U}_i^{n+1}$ は、中間流速である。

$$P_{,ii}^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} \bar{U}_{i,i}^{n+1} \quad (6)$$

(3),(4),(5),(6) 式にガラキン法を適用し、流速と圧力に対しては三角形一次要素を用いて離散化を行う。

4. 実験

概要としては、縦 5cm × 横 10cm × 高さ 30cm (縦方向の長さを代表長さ d とする) の辺長比 2 の角柱を用い、角柱固定状態と流れ垂直方向に自由度を持つ自由振動状態の 2 パターンの実験を行った。風洞内には、一様で二次元的な流れを作るため $2\text{m} \times 2\text{m}$ の風路 (図 1) を設け、模型には風路壁面境界層の影響を排除するためエンドプレートを取り付けた。渦列振動数の測定には熱線風速計を、圧力測定はビニール製チューブを用い、両者共 500Hz にて検出しカットオフ周波数は 100Hz に設定した。実験の各諸元を表 1 に示す。

アスペクト比	6	平均風速分布	± 4 % 以内
閉塞率	5 %	後流熱線位置	4d
表面圧力測定数	32 点	風速範囲	5.0m/s ~ 15.5m/s

表 1 実験の諸元

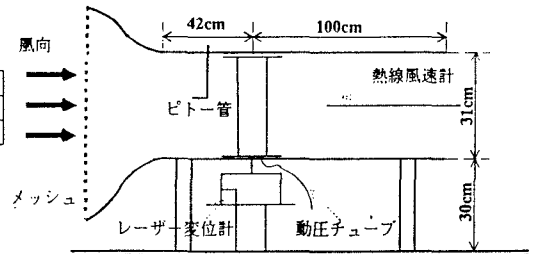


図 1 風洞側面図

5. 解析結果と実験値の比較

実験値との比較を行うに際し、計算対象のレイノルズ数を $Re = 10^4$ と設定した。境界条件は、図2に示す通りである。解析に用いたメッシュは閉塞率5%とし、境界層を6分割行っている。また微小時間増分量 $\Delta t = 0.0005$ を用いている。図3に Re 数とストローハル数の関係を岡島らの実験結果^[2]及び本実験結果と共に示す。既報^[1]の報告では渦列の周波数解析において様々なピークが算出されていたが、今回、境界層までメッシュ分割を行ったことにより $St = 0.06, 0.15$ となり実験値とほぼ一致した値を算出する事ができた。背圧係数 C_{pb} は、実験では0.615 計算結果は0.601 と良い一致を示した。図4、図5、図6に角柱前面、上面、後面における平均圧力分布 $\bar{C}_p$ の比較を示す。前面、後面では実験値と良い一致を示しているが、側面においては本実験結果及び田村らの数値解析結果^[3]と比べ、本解析結果は $\bar{C}_p$ の変動が大きく評価されている。これは、角柱前面角付近の急激な流れの変化による数値的不安定により前面付近の $\bar{C}_p$ が大きく評価されたためと考えられる。一方、辺長比2の角柱でみられる再付着現象が負圧の減少より確認できる。辺長比2の角柱周りの流れは剥離、再付着を繰り返す現象として知られているが、解析が二次元であるため渦の三次元性が捉えられず再付着型となったものと考えられる。

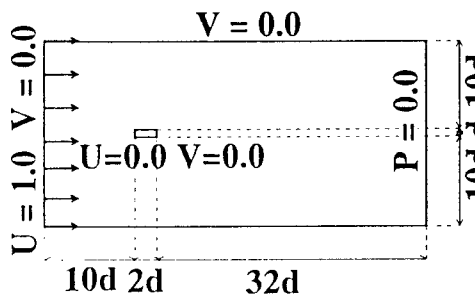


図2 境界条件

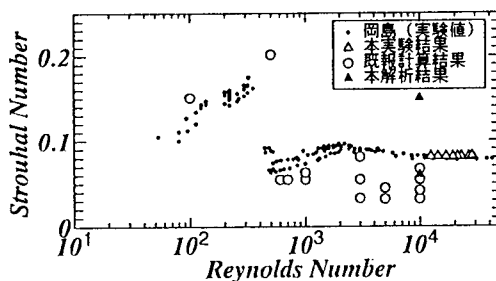


図3 レイノルズ数とストローハル数

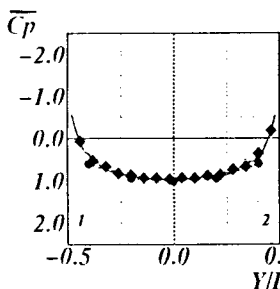


図4 角柱前面平均風圧係数分布

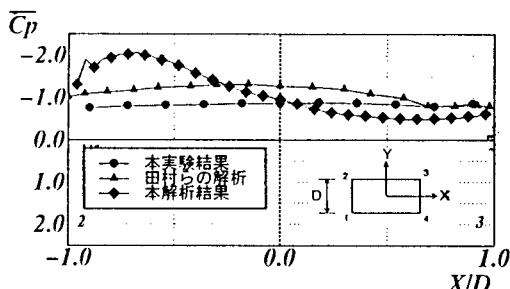


図5 角柱上面平均風圧係数分布

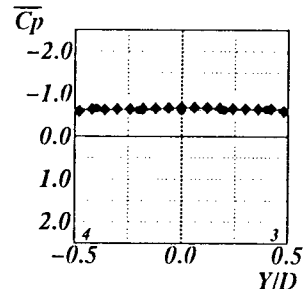


図6 角柱後面平均風圧係数分布

6. おわりに

本論文において、三段階テラーガーキン有限要素法により高レイノルズ数流れ内の角柱に作用する特性値を算出し、実験値との比較を行った。

1. ストローハル数等の比較において境界層を6分割することにより実験値に近い値を算出する事ができた。境界層のメッシュ分割をどの程度行えば良いかについては今後さらに検討を行う。
2. 高レイノルズ数解析の場合、節点数が多くなる事、微小時間増分量 Δt が小さくなる事により計算時間をかなり必要とし、計算高速化への課題を残している。

今回は静的な解析を行ったが、今後動的な解析を行う予定である。

参考文献

- [1] 小西英生、金子賢一、櫻山和男：“三段階テラーガーキン法による角柱周り空力特性解析”，第49回土木学会年次学術講演会講演概要集，C.S-39, pp80-81(1994)
- [2] 岡島厚、杉谷賢一郎：“長方形断面柱のストローハル数と背圧係数（レイノルズ数の影響）”，日本機械学会論文集（B編）Vol.50, No.457, pp.2004-2012, (1984)
- [3] 田村哲郎、伊藤嘉晃：“種々の辺長比を有する角柱周り流れの3次元シミュレーション”，第13回風工学シンポジウム論文集 p537-542(1994)