

数値流体解析による低レイノルズ数域における正方形角柱の流体力特性

九州工業大学大学院 学生会員 ○ 島田 雅志 九州工業大学 正会員 久保 喜延
長崎大学 正会員 河村 進一 北九州市役所 正会員 中村 秀行

1.はじめに 構造物周りでの実験がよく行われる領域は、レイノルズ数(Re 数)が 10^4 以上の領域であり、その領域での流れは Re 数に対して極端な変化はない。しかし、低 Re 数域($Re < 10^4$)では流体力の Re 数に対する影響が大きく、しかも複雑とされている。また、数値流体解析は低 Re 数域で多く行われているが、パラメータ等による精度や信頼性に問題がある。本研究では、精度や信頼性の向上を考慮して低 Re 数域における数値流体解析を行い、Re 数に対する流体力の特性を調べるとともに、実験結果との相違点を比較検討した。

2.解析手法 数値流体解析で用いた離散化手法は差分法とし、連続の式を直接解く代わりに O 型境界適合格子で離散化された一般曲線座標系の Navier-Stokes の式と圧力に関する Poisson 方程式を MAC 法に準じて交互に解き、Euler の陽解法によって時間進行を行う。また、解析の刻み時間の決定には、線型方程式(式 2-1)に対する安定性の必要条件(式 2-2)を用いた。あらかじめ格子サイズを決定し、条件が一番厳しいと考えられるときで流速が最大となる格子において安定条件式を満たすものを解析刻み時間とした。

$$\partial u / \partial t + U \partial u / \partial x = 1 / Re \partial^2 u / \partial x^2 \quad (2-1)$$

$$\begin{aligned} |C| < 1 \quad 2C / Rc < 1 \quad C = U \Delta t / \Delta x \quad \text{クーラン数} \\ Rc < 2 / C \quad Rc = U \Delta x / \alpha \quad \alpha = 1 / Re \quad \text{格子レイノルズ数} \end{aligned} \quad (2-2)$$

3.数値解析モデル 対象物体の形状は辺長 B の正方形断面とし、解析領域を半径 30B の円形として、解析対象物体を中心に配置した。使用した格子は、角柱近傍では細かく、角柱から遠ざかるにつれて粗くなるような O 型格子とした。また、境界条件は角柱表面の流速に対して滑りなしの条件($u=v=0$) 表面の圧力に対しては勾配零の条件($\partial p / \partial n = 0$, n は法線方向)、遠方境界は一様流($u=V, v=0, p=0$)である。

4.結果および考察 数値流体解析を行うにあたって、様々なパラメータの問題がある。その中の格子サイズの決定に着目して、Re 数を固定し格子サイズを変化させて解析を行った。Re=500 でのストローハル数(St 数)と平均抗力係数(C_D)の結果を図 1,2 に示す。ただし、横軸は周方向の格子分割数 i_{max} である。St 数は格子 90×45 では $St=0.138$ 程度であり、格子 90×45 から 106×53 にかけて減少し、格子 $106 \times 53, 114 \times 57, 122 \times 61$ では $St \approx 0.13$ を示している。また、 C_D は、格子 106×53 で減少し、格子 $106 \times 53, 114 \times 57, 122 \times 61$ で C_D は約 1.90 を示している。St 数、 C_D ともに値が格子 106×53 以降で収束しはじめており、この格子から物体周りの流れがほぼ正確に表現できるようになったと考えられる。Re=500 では格子 106×53 を最適な格子サイズと判断して、それをもとに最小格子サイズでの格子レイノルズ数を一定にすることにより、Re 数の変化に対する格子サイズを決定することとした。

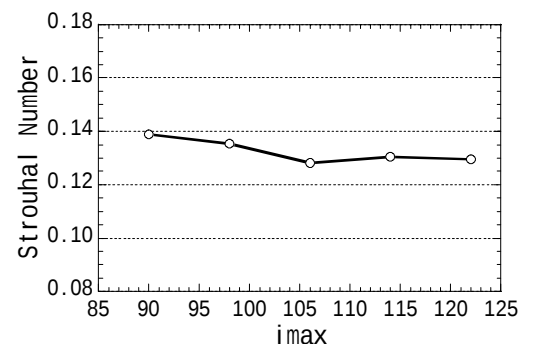


図1 St - i_{max} 関係

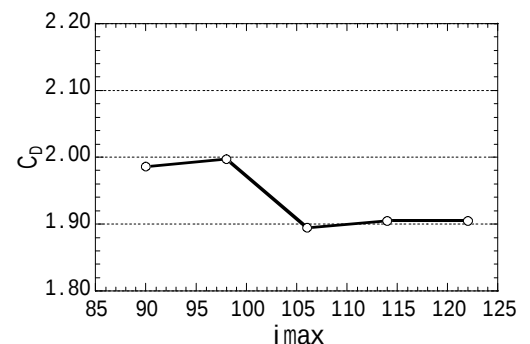


図2 C_D - i_{max} 関係

キーワード： 数値流体解析，低レイノルズ数，正方形角柱，差分法

連絡先：〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1 Tel 093-884-3110 Fax 093-884-3100

揚力の周波数解析により求められた St 数の Re 数に対する結果を図 3 に示す。St 数は $Re=200 \sim 1400$ において、 $St=0.12 \sim 0.135$ の範囲で徐々に減少し、 $Re=1400 \sim 8000$ では $St \approx 0.12$ 程度を示している。実験結果と比較すると、同様の傾向が見られ、解析値は実験値より若干小さいが近い値が得られた。St 数については、妥当な結果が得られたと考えられる。

二次元数値流体解析で得られた C_D と Re 数の関係を図 4 に示す。高 Re 数では一定とされる C_D が、 $Re=200 \sim 1000$ では $C_D=1.32 \sim 2.00$ の範囲で増加し、 $Re=1000 \sim 1600$ で C_D は減少して約 1.92 程度となった。 $Re=1800 \sim 8000$ において C_D は増加する傾向にあり、 $Re=8000$ では $C_D=2.49$ を示している。次に実験結果と比較すると、 $Re=200 \sim 1600$ では同様の傾向が見られ、解析値は実験値と近い値となっている。しかし、 $Re=1800 \sim 8000$ では C_D の解析値は実験値より大きくなる傾向にあり、解析値と実験値には約 0.5 程度の差があらわれた。Re 数の低いところでは三次元でないことの影響が少ないが、Re 数が大きくなるとその影響が現れたと考えられる。図 5 と図 6 に二次元解析と三次元解析によって得られた $Re=2000$ における揚力最大時の流線図を示す。二次元解析結果の流線において、抗力を大きくする原因と考えられる渦が角柱背面近傍に存在するが、三次元解析結果の流線ではその渦がやや後方に移動している。二次元解析での流れは二次元平面内に限られるため、スパン方向への流れの 3 次元的挙動が表現できずに角柱背後に強い渦が形成されたために、平均抗力係数が実験値よりも大きくなったと考えられる。

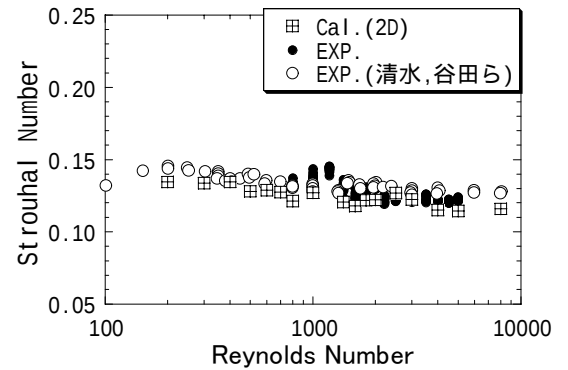


図 3 St - Re 関係

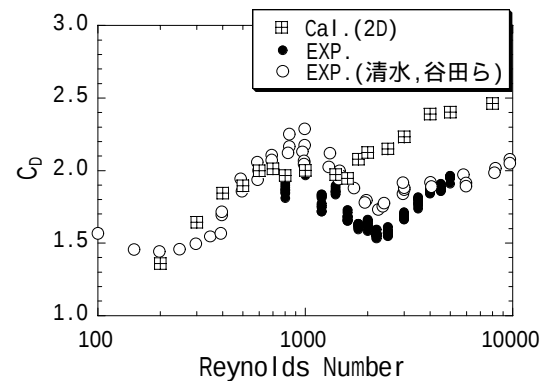


図 4 C_D - Re 関係

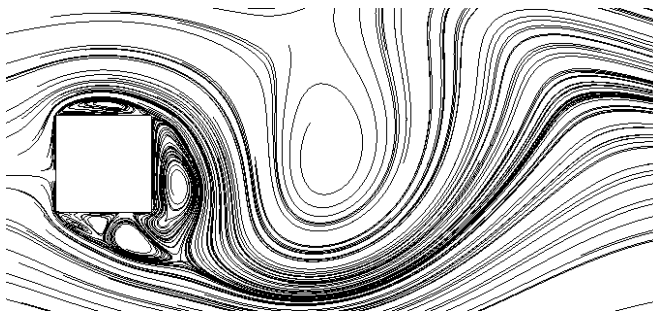


図 5 二次元解析の流線図(揚力最大時: $Re=2000$)

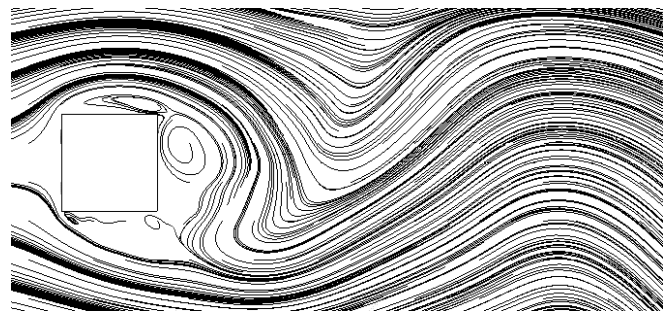


図 6 三次元解析の流線図(揚力最大時: $Re=2000$, $Z/B=1$)

5. まとめ

- $Re=500$ での格子サイズに対する平均抗力係数(C_D)とストローハル数(St 数)は、格子 106×53 以降の格子サイズからそれぞれの値が収束しはじめた。
- St 数は $St=0.12 \sim 0.135$ の範囲で Re 数の上昇とともに緩やかに減少しており、実験結果との比較では同様の傾向が見られ、実験値と近い結果が得られた。
- 低 Re 数域では C_D は Re 数による影響を受けやすく、 $Re=200 \sim Re=1600$ では解析結果は実験結果と同様の傾向が見られ、実験値と近い結果が得られた。しかし、 $Re=1800$ 以降では実験値より大きな結果となった。
- 三次元解析では、二次元解析に比べて背面での渦が後方へ離れる傾向が得られた。
- 二次元解析は、 $Re=1600$ において適用できるが、 $Re=1800$ では限界があり、現段階では三次元解析に頼る必要がある。