

I - B6

3次元円柱まわりの流れ解析に対する軸方向層分割の検討

三井造船 学員 太田 真二 中央大学 正員 丸岡 晃
中央大学 正員 平野 廣和 中央大学 正員 川原 睦人

1. はじめに

円柱まわりの流れは、剥離点の位置や流れ性状に関する Reynolds 数依存性により、Karman 渦列の放出に代表される様々な流れのパターンを作り出す基本的な断面として知られている。この流れ場の物理的なメカニズムを解明することは、剥離点が定まりにくい形状を有するような構造物まわりの流れの流体力学的問題に大きく貢献すると考えられる。この問題は、多くの実験、もしくは数値解析より、豊富なデータが蓄積されている。数値解析においては、これまでに、2次元解析結果^{[1],[2]}の実験値との不一致を解決するため、著者ら^{[3],[4]}により3次元解析が試みられ、成果を得てきた。しかし、Reynolds 数 $Re = 10^{3.5}$ 以上の流れになると、3次元解析結果においても、実験値と一致しないことが報告されている。この原因の一つとして、円柱軸方向の層分割数、円柱軸高さが、その Reynolds 数の流れに対し、不適切であるということが考えられる。また、平面方向の要素分割についても改善が必要であると考えられるが、3次元有限要素法において3次元方向の層分割数と高さの決定は、平面方向の分割より、その解に大きく依存してくると推定される。そのため、本研究では、円柱軸方向の層分割数と円柱軸高さに注目し、検討を行っている。具体的には、 $Re = 10^{3.5}$ の流れを重点的に解析し、その複雑な流れ場を捕らえるために、最適な3次元方向の層分割の検討を行う。

2. 解析手法

基礎方程式は非圧縮 Navier-Stokes 方程式、数値解析手法は有限要素法を用いる。離散化手法としては IBTD+FS 法^[5]を採用する。IBTD 法は、運動方程式の移流項による不安定性を解消する手法であり、BTD 法を陰的に改良した2次精度の手法である。FS 法は、圧力 Poisson 方程式を導くことによって流速と圧力を分離して解く同次補間を用いることのできる手法である。IBTD+FS 法は安定した解が得られ、またそこから得られる代数方程式の行列の形が対称であるため、計算効率が優れた手法である。よって、3次元解析の様な大規模計算には有効な手法である。

3. 解析条件

平面方向の解析領域と境界条件を図1に示す。総節点数:11400、総要素数:11200、円柱周り:160分割、最小分割幅:0.001Dとなっている。要素は Q1Q1 要素を用いた。3次元メッシュには、2次元メッシュを円柱軸方向に重ねたものを用い、 $Re = 10^{3.5}$ 時の円柱軸高さと層分割数を表1に示す。円柱軸方向の上面及び下面の境界条件には、周期境界条件を採用した。また、各ケースにおけるパラメータはすべて同一のものを用いている。解析に用いた微小時間増分は、0.02 である。

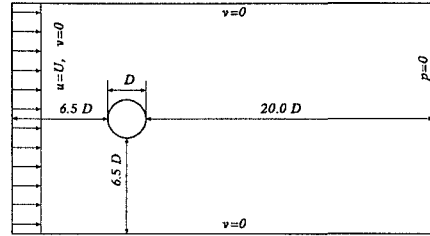


図1 平面方向の解析領域と境界条件

表1 $Re = 10^{3.5}$ における円柱軸高さと層分割数

層分割幅 Δz	円柱高さと層分割数
0.1D	1D10 分割, 2D20 分割, 4D40 分割
0.05D	1D20 分割, 2D40 分割, 4D80 分割
0.025D	1D40 分割, 2D80 分割

4. 解析結果

図2に背圧係数 C_{pb} の平均値の負値の Reynolds 数変化を示す。ここでの実験値は、文献 [6] によるものである。 $Re = 10^{2.5}, 10^3$ 時に関しては、2次元解析結果は $-C_{pb}$ が実験値より高い値を示し、Reynolds 数か上がるにつれその差は広がる傾向にあるが、3次元解析結果は、それとは逆に実験値に沿う様な形でほぼ一致している。これに対し $Re = 10^{3.5}, 10^4$ は、2次元解析結果と比べると、実験値に近い値を示しているが、実験値との間に若干の差が見られる。ここに、軸方向の層分割、円柱軸高さに問題があると考えられる。図3に $Re = 10^{3.5}$ 時の各層分割における背圧係数 C_{pb} の負値の実験値との比較を示す。 $Re = 10^{3.5}$ の流れ場は、図4で見られる様に、複雑な様相を示している。この流れ場を捕らえるためには、より細かな層分割数が必要となってくる。また、周期境界を用いているため、円柱軸高さが不十分であると、上面の縦渦が下面の縦渦に影響を及ぼすとも言われるため、長い領域を確保する必要がある。しかし、これらの条件の解析を行うには多くの計算機容量と計算時間が要求される。そのため、 $Re = 10^{3.5}$ において表1に示す条件内での、円柱軸方向の円柱軸高さと層分割について検討を行った。図3を見ると、円柱軸高さを1Dに設定した場合は、軸方向の分割幅を細かくすれば $-C_{pb}$ が下がる傾向が見られるが、実験値にはあまり近付かなかった。これは、円柱直径1Dに対して、円柱軸高さ1Dが不十分であることが考えられ、上下面での周期境界の影響が干渉していると推定される。円柱軸高さを4Dに設定した場合は、1Dに設定した同じ分割幅のものよりも $-C_{pb}$ が下がり、円柱軸高さを長くした方が $-C_{pb}$ が下がる傾向が得られている。

3次元解析, 軸方向層分割, 円柱まわり, 有限要素法

〒559 大阪市住之江区柴谷 1-2-32, TEL:06-681-3107, FAX:06-683-4690

また、1D, 4Dの層分割幅について見てみると、細かい層分割幅のものほど C_{pb} が下がる傾向が分かる。しかし、円柱軸高さを2Dに設定した場合は、一番粗い層分割幅 $\Delta z = 0.100D$ にしたものが一番下がった。この理由は、粗いメッシュにより解が鈍らされたことによる偶発的な低下だと考えられる。図4を見ると、20層分割($\Delta z = 0.100D$)では細かい縦渦が捕らえられておらず、層分割幅が粗いことが分かる。それと比べて、40層分割($\Delta z = 0.050D$)、80層分割($\Delta z = 0.025D$)に設定した場合には、細かい縦渦が捕らえられていることが分かる。従って、 $Re = 10^{3.5}$ の流れは、層分割幅を $\Delta z = 0.025D$ 以下にしないと、その微細な渦が捕らえられないことが分かる。また、同じ計算容量で見た場合、4D80層より2D80層に設定した方が良い結果が得られることが分かる。全体的には、細分割したことによる解の信頼性を考慮すると、円柱高さ2Dを80分割した時が妥当な層分割であるという結果が得られた。

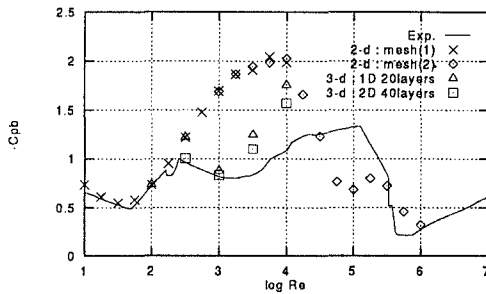


図2 背圧係数 C_{pb} の平均値のReynolds数変化の実験値との比較

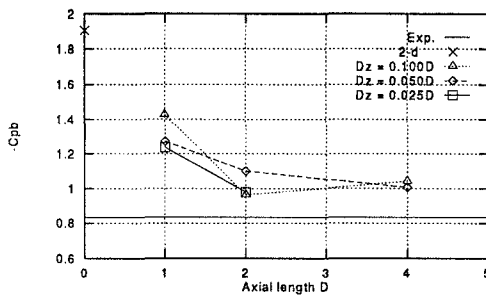
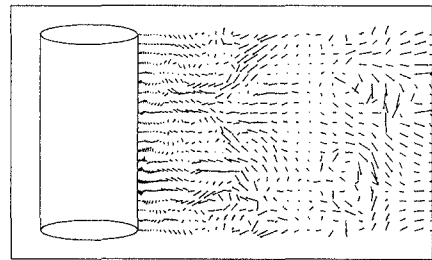


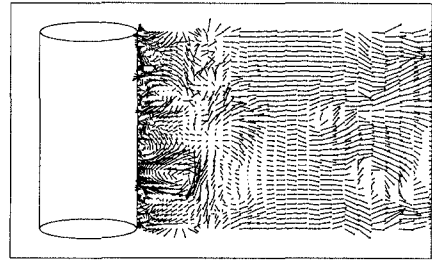
図3 $Re = 10^{3.5}$ 時の各層分割における背圧係数 C_{pb} の実験値との比較

5. おわりに

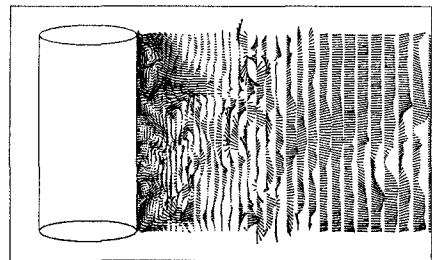
$Re = 10^{3.5}$ 時の層分割の検討を行った結果、円柱軸高さを2D、層分割数を80分割した時に良い結果が得られた。また、軸方向の微細な縦渦を捕らえるためには、層分割幅を $0.025D$ 以下にする必要があることが分かった。しかし、これらの解析は本計算機の最高レベルであったため、これ以上の大規模な計算は行えなかった。しかし、限りある計算能力の中で、ある程度のメッシュの細分割による解の信頼性を考慮すると、上記の分割が妥当であると言える。また、 $Re = 10^{3.5}$ 以上の流れ場はより複雑になる。この問題を解決するには、軸方向の分割以外にも、平面方向の分割も改良する必要があると考えられ、今後その事について検討していく予定である。



2D20 層分割



2D40 層分割



2D80 層分割

図4 各分割数における流速ベクトル図

参考文献

- [1] Tamura, T., Ohta, I. and Kuwahara, K., "On the reliability of two-dimensional simulation for unsteady flows around a cylinder-type structure", J. of Wind Engrg. and Indust. Aerodyn., Vol. 35, 1990
- [2] 丸岡・太田・平野・川原, "広範囲な Reynolds 数域での円柱まわりの流れの2次元計算", 第14回風工学シンポジウム講演概要集, 1996
- [3] 太田・丸岡・平野・川原, "同次補間を用いた陰的有限要素法による3次元円柱まわりの流れ解析", 第51回土木学会年次学術講演会講演概要集 第1部, 1996
- [4] 太田・丸岡・平野・川原, "亜臨界域における円柱まわりの3次元流れの数値流体解析", 第14回風工学シンポジウム講演概要集, 1996
- [5] 丸岡・太田・平野・川原, "同次補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮粘性流れの解析", 構造工学論文集, Vol.43A, 1997
- [6] Williamson, C. H. K., "Vortex dynamics in the cylinder wake", Annu. Rev. Fluid. Mech. 1996. 28:477-539