

亜臨界領域における円柱まわり流れの3次元数値流体解析

○中央大学大学院 学生員 樽川 智一 中央大学 正会員 平野 廣和
中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

風工学の分野における最も基本的な断面の一つである円柱まわりの流れは、剥離点の位置や乱れ性状に関する Reynolds 数依存性により、Karman 渦列に代表される様々な流れのパターンを作り出すと知られている。この流れ場の物理的なメカニズムを解明することは、剥離点が決まりにくい形状を有する物体まわりの流れの流体力学の問題に大きく貢献すると考えられる。このため、多くの実験が行われており、豊富な実験データ^{1),2)}が蓄積されている。数値流体解析の分野でも、計算値と実験値を比較することによって、計算手法の検証例として取り上げられ、多くの計算例³⁾が報告されている。

従来各種の研究により、 $Re=190$ 以上になると、剥離を伴う流れであるとともに主流方向と直角の円柱軸方向にも流れが生じる 3 次元な流れが存在することから、2 次元解析では定性的および定量的な面において実験結果と差が生じることが指摘されている。このため、円柱のみならず各種の断面において 3 次元解析を行う必要があることが論じられており、ほぼ一般化されるに至っている。しかし、3 次元解析を行うには、現在であっても膨大なデータ量と計算時間を要することには変わらない。そこで、矩形断面を含め、あえて手軽に行える 2 次元解析を色々な乱流モデルを導入して行われるに至っており、矩形断面を含め、多数の手法により定量的な誤差を避ける試みがなされている。しかし、これらの乱流モデルを導入した円柱まわりの 2 次元解析結果のおおむね共通することは、亜臨界域（約 $Re=10^{2.5} \sim 10^4$ 付近）で流体力を過大に評価することから抗力係数が実験結果に比べて大きな値を示すことである。一方、流れの場に注目すると、円柱表面における剥離点から不規則な二次渦群が形成される結果などがあり、このため Strouhal 数の実験結果との不一致などが生じることとなり、実際の現象を再現しているとは言いがたい結果となっている場合もある。このような背景から、本研究では亜臨界域における円柱まわり流れの 3 次元数値流体解析を行う。具体的には、抗力係数や Strouhal 数、剥離点の位置などに着目し、流れの 3 次元性を考慮することによって実験結果との乖離

をどの程度低減できるかを検討する。

2. 基礎方程式

構造物の周りを流れる風などの流れ場を非圧縮性粘性流れとすると、次の Navier-Stokes 方程式で表される。

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(p, \mathbf{u}) = \mathbf{0} \quad \text{in } \Omega$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \text{in } \Omega$$

ここで ρ は密度、 $\mathbf{u}$ は流速、 p は圧力、 Ω は図-1 に示す解析領域、 $\boldsymbol{\sigma}(p, \mathbf{u})$ は応力テンソルであり次式で表される。

$$\boldsymbol{\sigma}(p, \mathbf{u}) = -p\mathbf{I} + 2\mu\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}), \quad \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$$

ここで μ は粘性係数、 $\mathbf{I}$ は単位テンソルである。

3. 解析手法

数値流体解析には丸岡ら⁴⁾が提案している IBTD/FS 有限要素法を用いている。本解析手法では、運動方程式は IBTD 法、連続式は FS 法により離散化され、流速と圧力は分離して求まり、それぞれ陰的に解くことになるが、代数方程式の行列が対称となるため、対称行列用の代数方程式で効率よく解析することができる。代数方程式の解法には Scaled Conjugate Gradient (SCG 法) を用いる。また、物体上に作用する空気力は、離散化された運動方程式の境界積分項から、物体表面上の各節点の表面力が算出され、これらを加算することによって算出される。

4. 解析条件

解析領域を図-1 に示す。境界条件は、流入境界で一様流速、側面で slip、円柱表面で no-slip とし、円柱軸方向

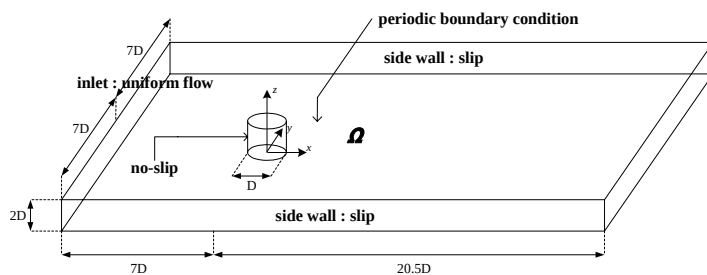


図-1 解析領域

キーワード : CFD, 円柱, 亜臨界領域, 3次元性

連絡先 : 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel.03-3817-1816 fax.03-3817-1803

は、周期境界条件を用いている。周期境界条件は、差分法などで頻繁に用いられる手法で、有限要素法では上面を下面の節点量を重ね合わせることによって無限の領域を仮定できる。また、解析条件を表-1に示す。解析に用いた有限要素は、図-2に示すように2次元解析で用いた四角形要素分割を円柱軸方向に重ねた六面体要素を用いている。

5. 解析結果および考察

図-3に平均抗力係数 C_d とStrouhal数 St のReynolds数変化の実験結果との比較を示す。ここでの実験結果は、抗力係数はWilliamson¹⁾、Strouhal数はScheme²⁾によるものである。Re=250~10,000では、抗力係数の実験結果は、Reynolds数が高くなるにつれて、Re=2000付近まで徐々に低下してから、増加する傾向にある。2次元解析では、Re=500~2000にかけて抗力係数が増加する傾向にあり、Reynolds数が高くなるにつれて、実験結果との差が広がっている。一方、3次元解析では実験結果に沿うような形でほぼ一致している。これは、2次元解析では、円柱側面で形成された渦が、円柱軸方向に拡散できずに流体力を過度に増加させていたが、3次元解析により軸方向の流れを再現できたことに起因する。また、Strouhal数においても、3次元解析結果が、より実験結果に近い値を示している。これは、円柱軸方向の縦渦の放出を再現できたことに起因していると考えられる。

図-4に2次元解析及び3次元解析による圧力分布のReynolds数変化を示す。2次元解析結果では、円柱側面で形成された渦が、円柱に沿って後方に移動し放出される流れとなっているため、円柱を回り込む流れが強くなっている。一方、3次元解析結果では、円柱側面で形成された渦が、円柱後方に向かって広がりを持ちながら放出されているのがわかる。また、2次元解析結果では、規則的なKarman渦列の放出が見られるが、3次元解析結果では、円柱軸方向の縦渦とKarman渦列の放出が重なりあった流れとなっている。Reynolds数が高くなるにつれて、縦渦のスケールが小さくなり、より複雑な渦構造になるのがわかる。

6. 今後の課題

亜臨界域における円柱まわり流れでは、剥離領域が円柱後方に大きく広がるため、実際の流体力等を得るためには3次元解析が必要であることがわかった。今後、より高い亜臨界域で3次元数値流体解析をすることにより、その精度を検証していく。また、Re=3000以上になると、乱流遷移していることも考えられるため、乱流モデルの導入も検討する。

表-1 解析条件

Reynolds数 Re	500, 1000, 2000
時間増分 Δt	$0.02U/D$
軸方向分割幅 Δz	$0.1D$
軸方向分割数	20
最小要素幅	$0.001D$
総節点数	13000×21
総要素数	12800×20

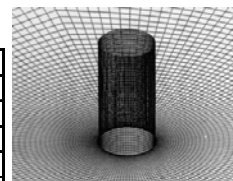


図-2 要素分割

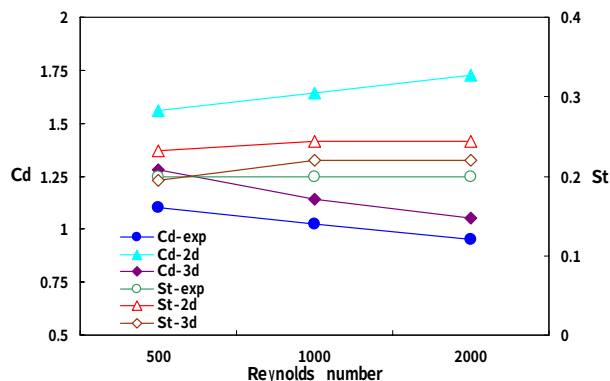
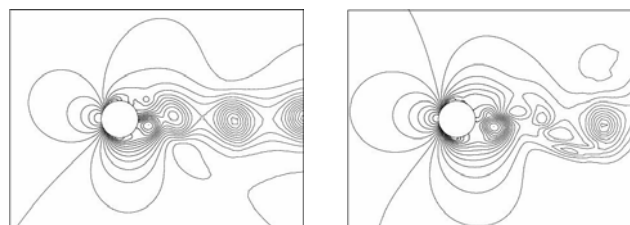
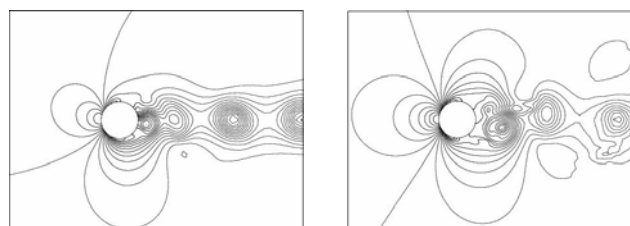


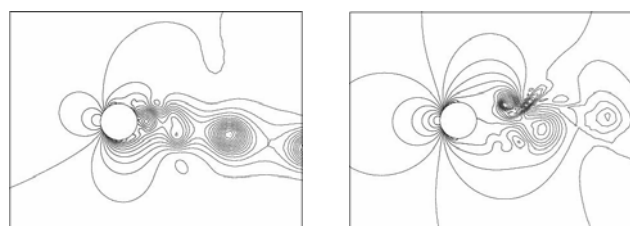
図-3 抗力係数 C_d とStrouhal数 St のReynolds数変化の実験結果との比較



Re=500



Re=1000



Re=2000

2次元解析結果

3次元解析結果

図-4 圧力分布のReynolds数変化

<参考文献>

- 1) Williamson, C.H.K. : Vortex dynamics in the cylinder wake, *Annu. Rev. Fluid. Mech.*, Vol.28, pp.477-539, 1996
- 2) Scheme, C.H.K : On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds number, *J. of Fluid Mech.*, Vol.133, pp265~285, 1983
- 3) 丸岡晃, 太田真二, 平野廣和, 川原睦人 : 広範囲な Reynolds 数域での円柱まわりの2次元及び3次元数値流体解析, 土木学会論文集 Vol.591/I-43, pp139-150, 1998.4
- 4) 丸岡晃, 太田真二, 平野廣和, 川原睦人 : 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.42A, pp383-394, 1997