

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

近年の計算機性能の向上に伴い、数値流体力学 CFD が大きな進歩を遂げ、風工学の分野においても着実に成果を挙げている。従来の CFD を用いた研究は、主として2次元解析による検討が行われてきた。その理由として、3次元解析を扱った場合の大規模な計算機容量および計算時間の問題や、比較すべき風洞実験が部分断面を取り出した流れの2次元性を考慮した実験であることが挙げられる。しかし、実際に実験が行われている空間は3次元空間であることから、2次元平面での解析結果では定量的な面において実験結果と乖離が生じることが指摘されている。そこで、それらの定量的な乖離を避ける試みとして、2次元解析へ乱流モデルの導入や3次元解析などが行われ、ほぼ一般化されるに至っている。

このような背景から、本研究では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を題材とし、CFDの精度を検証する。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、剥離点が定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)}も蓄積されている。これらによると、Reynolds数が約200になると円柱軸方向流れが発生することが報告されている。また、既往の数値解析による研究により、2次元解析ではそれ以上のReynolds数域において実験結果を再現できないことが報告されている。そこで、2次元解析では実験結果と乖離が生じてしまうReynolds数域において3次元解析を行うことで、抗力係数やStrouhal数、剥離点や淀み域などの実験結果との乖離はどの程度低減できるかを検証する。なお、本報では研究の第一段階であるので、解析を行うに際しては、乱流モデル等を用いない直接法を採用した。

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。

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

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

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、 $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{p}, \mathbf{u})$ は応力テンソルであり次式で表される。

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

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³⁾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められ、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。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、円柱軸方向は、周期境界条件を用いている。周期境界条件は、差分

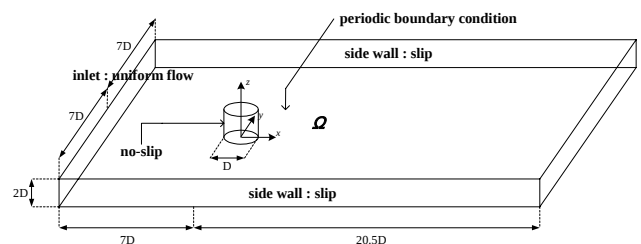


図-1 解析領域

表-1 解析条件

Reynolds数 Re	500 ~ 30000
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

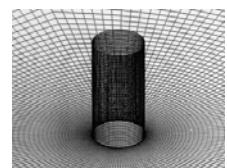


図-2 要素分割

キーワード : CFD, 円柱, 亜臨界領域, 淀み域

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

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を円柱軸方向に重ねた六面体要素を用いる。

5. 解析結果および考察

図-3に平均抗力係数 C_d 、図-4にStrouhal数 S_t のReynolds数変化の2次元解析結果及び実験結果との比較を示す。ここでの実験結果は、平均抗力係数はWilliamson¹⁾、Strouhal数はScheme²⁾によるものである。亜臨界領域における平均抗力係数の実験結果は、 $Re=2000$ 付近まで低下してから、徐々に増加する傾向にある。2次元解析では、Reynolds数が高くなるにつれて抗力係数が増加し、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遷移し、ほぼ一致している。また、Strouhal数においても、2次元解析では若干の乖離が見られるが、3次元解析では実験結果に一致している。

図-5に $Re=10^{3.75}$ の2次元および3次元解析結果の比較を示す。2次元解析では、時刻歴波形にさまざまな周波数成分が混在しており、振幅の絶対値が著しく大きな値となっている。また、瞬間圧力分布より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ことがわかる。これにより、円柱後方での圧力変動が大きくなり、流体力を過大評価していることが考えられる。また、時間平均流線からも円柱を回り込む流れが強くなっており、円柱後方での流速変動の少ない淀み域が狭まっていることがわかる。これらの現象は、2次元解析では円柱軸方向に渦が拡散できず、円柱後方に移動しながら成長してしまうことが原因であると考えられる。一方、3次元解析では、時刻歴波形は一つの卓越周波数成分が存在しており、振幅の絶対値は2次元解析と比べて著しく低下している。また、瞬間圧力分布より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。これにより、2次元解析と比べて円柱後方の圧力変動が小さくなり、流体力を低減させていると考えられる。また、時間平均流線では、円柱後方に明瞭な双子渦の発生が確認でき、淀み域の広がりが大きくなっていることがわかる。

6. 今後の課題

亜臨界域における円柱まわり流れでは、円柱後方における淀み域が大きく広がるため、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Reynolds数域で3次元解析を行うことで、Drag crisis現象などを正確に再現できるかを検討する。

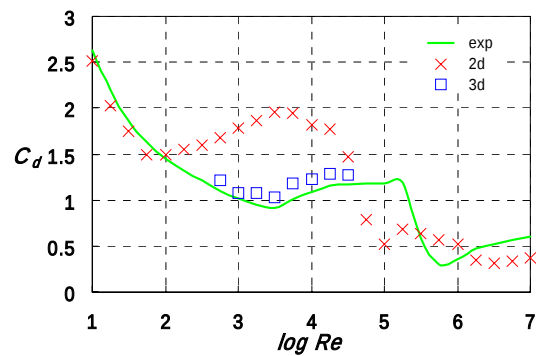


図-3 平均抗力係数 C_d のReynolds数変化

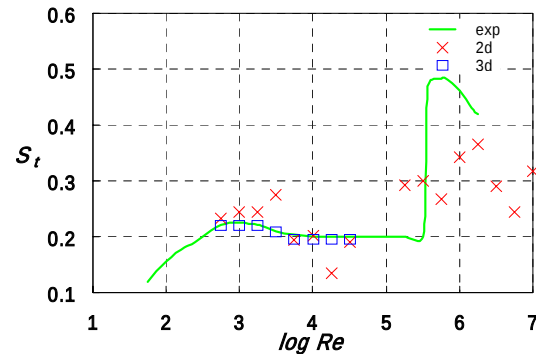
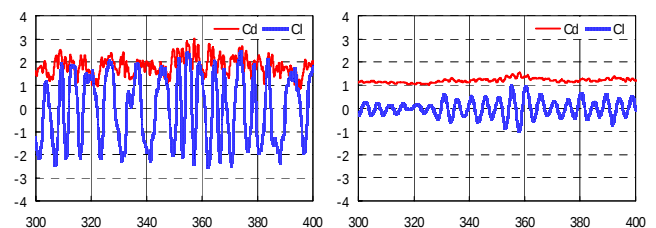
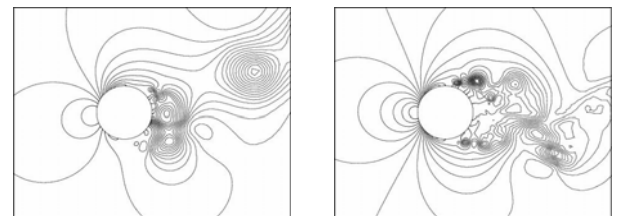


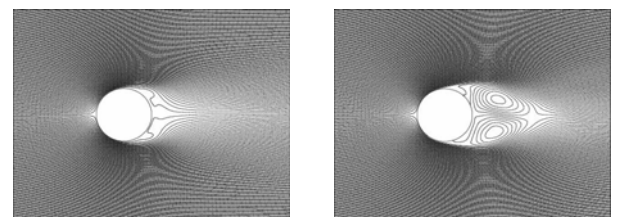
図-4 Strouhal数 S_t のReynolds数変化



静的空気力係数の時刻歴



瞬間圧力分布



時間平均流線

図-5 $Re=10^{3.75}$ の2次元および3次元解析結果の比較

<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 : 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