

数値流体解析を用いた臨界レイノルズ数付近における円柱まわりの流れの把握

○中央大学 学生員 糟谷 直樹 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

既往の研究^{1),2)}から、円柱まわりの流れはレイノルズ数（以下、 Re 数）に依存して流れの状態を変化させることが明らかにされている。円柱まわりの流れの状態は、レイノルズ数の値によって 7 つの領域に大別される。中でも、臨界領域 ($Re=2.8 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^5$) は、亜臨界領域 ($Re=260 \sim 2.8 \times 10^5$) から超臨界領域 ($Re=3.5 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^6$) に遷移する特殊な領域である。臨界領域では、亜臨界領域と超臨界領域の流れの状態が混在することにより、円柱に作用する抗力に劇的な変化が確認されている。また、臨界領域では、流れが剥離—再付着—再剥離の状態であり、なおかつ対象構造物の片側に顕著にこの流れの状態が見られる。また、Strouhal 数のジャンプや背圧の急増などの特徴もあらわれる。このような特徴は、実験では把握されているものの、数値流体解析(CFD: Computation Fluid Dynamics)を用いての把握は十分とは言えない。

以上のような背景から、本報では円柱まわりの流れに対して CFD を用いることにより、臨界 Re 数付近における円柱まわりの流れの特徴を掴むことを目的とする。解析では、軸方向のエネルギー散逸を考慮するために 3 次元静的解析を行う。また、解析精度には主流方向直角の軸方向の要素分割が大きく影響するため³⁾、軸方向に対して異なる軸方向長さと分割幅の要素分割(以下 mesh)を用いての解析も併せて行う。そして、3 次元解析結果と実験結果との比較を行うことにより、解析での現象の再現性を検討するものである。

2. 解析手法

数値流体解析手法には著者ら⁴⁾が提案している IBTD/FS 有限要素法を用いる。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る。

2.1 支配方程式と連続式

支配方程式は非圧縮 Navier-Stokes 方程式を用いる。乱流モデルには、LES(Large Eddy Simulation)における標準 Smagorinsky SGS(Sub Grid Scale)モデルを用いる。なお、モデル定数 $C_s=0.1$ とする。

2.2 解析領域

解析領域は、縦に $20D$ 、横に $30D$ 、軸方向高さを $2.5D$ と $3.2D$ とする。境界条件は、流入境界では一様流速 1.0 、側面境界で slip、円柱表面で no-slip、流出境界で圧力 0 、スパン方向で周期境界条件を規定している。

2.3 解析条件

本解析で用いる解析領域を表-1 に示す。ここでは、mesh1-2.5D200 を基本としている。なお、mesh1 の平面上での要素分割で、軸方向高さ $2.5D$ 、軸方向分割層 200 層のものを mesh1-2.5D200 と呼ぶ。mesh1-2.5D200 は、周方向分割数を 360、軸方向の分割幅を $0.0125D$ 、分割層数を 200 とし、主流方向と軸方向の双方に対して微細な要素分割を施している。

表-1 解析条件

	mesh1-2.5D 200	mesh1-3.2D 128	mesh2-3.2D 128
時間増分 Δt	0.008D/U		
レイノルズ数	$2.5 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^5$		
総節点数	39090×201	39090×129	26090×129
総要素数	35800×200	35800×128	26000×128
周方向分割数	360		240
最小分割幅	0.0001D		0.0007D
軸方向高さ	2.5D	3.2D	
軸方向分割数	200	128	
軸方向長さ	0.0125D	0.025D	
モデル定数	0.1		

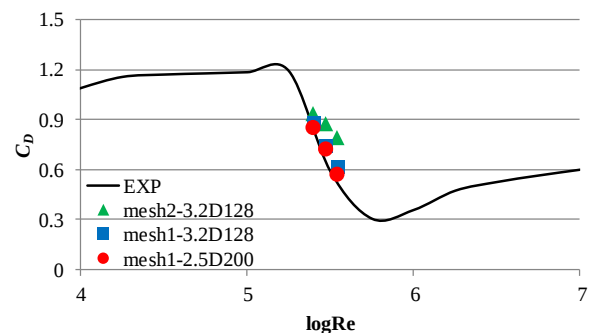


図-1 抗力係数 C_D の実験結果¹⁾と解析結果の比較

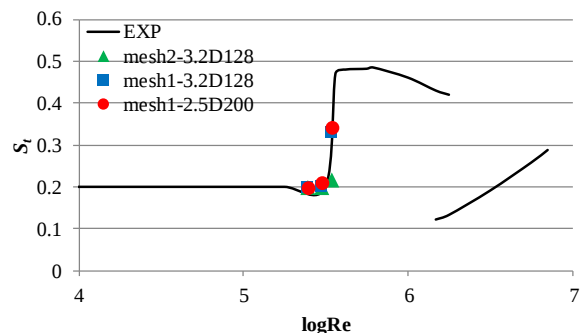


図-2 Strouhal 数 S_L の実験結果²⁾と解析結果の比較

3. 解析結果

3.1 抗力係数 C_D の検証

抗力係数（以下、 C_D ）の実験結果¹⁾と解析結果の比較を図-1 に示す。図-1 において、黒の実線で実験結果を示し、プロットで解析結果を示す。なお、解析精度の比較として、mesh1-3.2D128 と mesh2-3.2D128 を用いた解析結果も併記する。

mesh1-2.5D200 を用いた解析結果では、 C_D の低下する過程を実験結果と良い一致で捉えている。また、mesh1-3.2D128 を用いた解析結果では、実験結果と比較的 良い一致を示し、mesh2-3.2D128 を用いた解析結果では、 Re 数が増加する毎に実験結果と差が大きくなる。

3.2 Strouhal 数の検証

Strouhal 数（以下、 S_L ）の実験結果²⁾と解析結果の比較を図-2 に示す。図-2 では、黒の実線で実験結果を示し、プロットで解析結果を示す。なお、解析精度の比較として、mesh1-3.2D128 と mesh2-3.2D128 を用いた解析結果も併記する。

し、プロットで解析結果を示している。

mesh1-2.5D200 を用いた解析結果では、 S_t ジャンプを実験結果と良い一致で捉えている。また、mesh1-3.2D128 を用いた解析結果でも実験結果と解析結果で比較的良好一致を示し、mesh2-3.2D128 を用いた解析結果では S_t の若干の増加傾向を捉えるまでにとどまっている。

3.3 円柱まわりの平均圧力係数 C_p の検証

mesh1-2.5D200 を用いた解析結果として得られた円柱まわりの平均圧力係数（以下、 C_p ）を図-3 に示す。 C_p は次の式(1)により求められる無次元量である。

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2} \quad (1)$$

ここで、 P は円柱まわりの圧力、 P_∞ は無限遠方での圧力であり、ここでは流入境界の中心での圧力としている。 ρ は密度であり、 u_∞ は無限遠方での流速である。ここで u_∞ は、解析条件で規定している、流入境界面での一様流速 1.0 としている。

図-3 に示す各 Re 数の C_p において、極小値を示す角度の場所が剥離点であると考えられる。図-4 において、 $Re=2.5 \times 10^5$ では、若干の非対称性を示す結果が得られた。しかし、臨界 Re 数付近で確認されている背圧の急増はみられない。これに対して、 $Re=3.0 \times 10^5$ では、 $Re=2.5 \times 10^5$ に比べて、非対称性が強くなり、背圧の急増を示す結果も得られる。さらに Re 数を増加させた $Re=3.5 \times 10^5$ では、ほぼ対称の C_p を示した。

ここで、明確な非対称性を示し、背圧の急増がみられた $Re=3.0 \times 10^5$ の解析結果に着目をする。図中の角度 $250^\circ \sim 260^\circ$ 付近で黒の点線で囲んだ場所は、 C_p が一定となる付近である。この C_p が一定となる部分は、一度剥離した流れが再付着したことにより形成される、剥離泡の形成を示している。この剥離泡の形成は、円柱の片側でのみ見られる結果が得られた。

3.4 臨界 Re 数付近での流れの検証

mesh1-2.5D200 を用いた解析結果として得られた流線図を図-4 に示す。

図-4(a)では、若干の非対称性のある流れが見られるが、一度剥離した流れの再付着は見られない。一方で、円柱まわりの C_p において、明確な非対称性が現れた図-4(b)では、円柱の片側では一度剥離した流れが再付着なく後流に流れ、もう一方の側では再付着が見られる。さらに Re 数を増加させた図-4(c)では、円柱の両側で一度剥離した流れの再付着が確認できる。

4. おわりに

本論では、臨界 Re 数付近における円柱まわりの流れに対して、数値流体解析を用いることにより詳細な解析を行った。

C_D では、 C_D の急減する過程を実験結果と比較的良好一致で捉えることができた。

S_t では、顕著な S_t の増加を捉えることができた。

円柱まわりの C_p では、 $Re=3.0 \times 10^5$ において、明確な非対称性と背圧の急増を示す結果が得られた。さらに、円柱の片側でのみ、剥離一再付着による剥離泡の形成を捉えることができた。

臨界 Re 数付近の流線図では、 $Re=3.0 \times 10^5$ において、

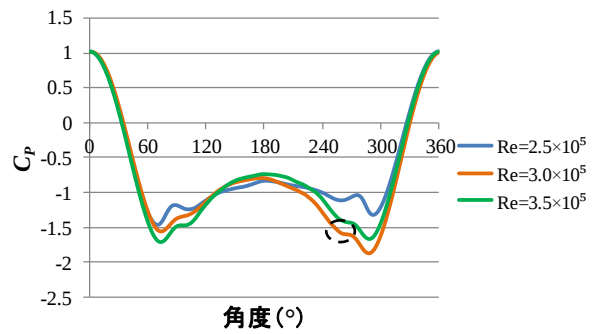


図-3 円柱まわりの平均圧力係数 C_p (mesh2-2.5D200)

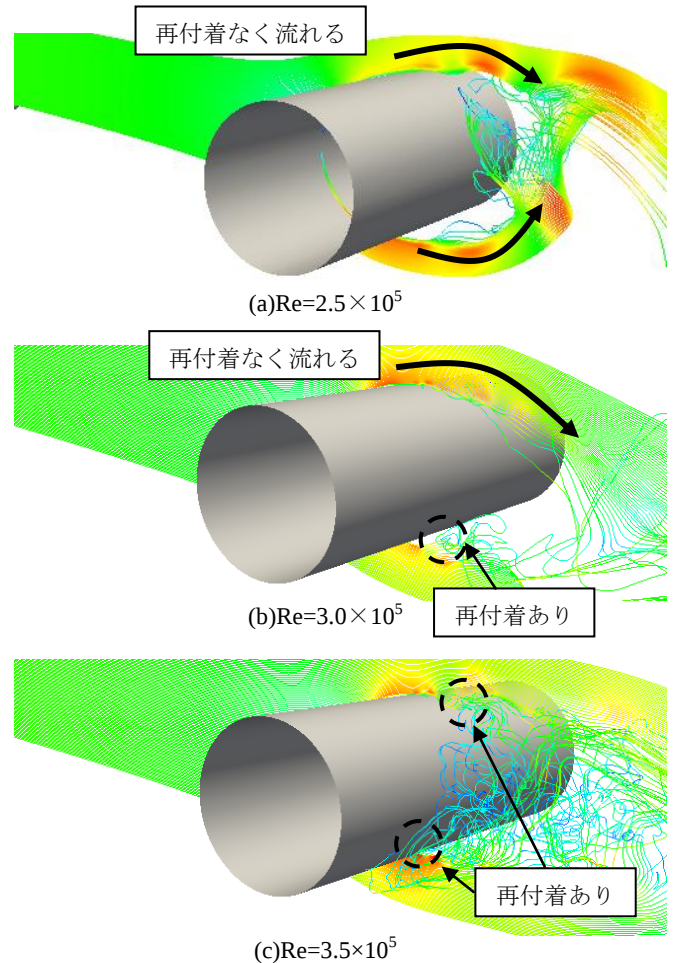


図-4 臨界 Re 数付近の流線図(mesh1-2.5D200)

円柱の片側でのみ、剥離一再付着一再剥離の流れを捉えることができた。

これより、臨界 Re 数付近における円柱まわりの流れの特徴を捉えつつあるといえる。

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) Schewe, G.: On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds number, *J. of Fluid Mech.*, Vol.133, pp.265~285, 1983.
- 3) 糟谷直樹, 平野廣和, 丸岡晃, 佐藤尚次: 臨界レイノルズ数域における円柱まわりの流れの数値流体解析, 応用力学論文集 Vol.15, pp.645~, 2012.
- 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, 土木学会構造工学論文集 Vol.43A, pp.383-394, 1997.3