

CFD を用いた円柱まわり流れにおける Drag crisis 現象の再現性の検証

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

円柱まわりの流れは、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 次元的な流れが存在する。このことから、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乖離が生じることが指摘されている¹⁾。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性は、一般に認識されるに至っている。

円柱まわり流れの 2 次元解析は、亜臨界域で流体力を過大評価し、臨界域よりも低い Reynolds 数域において Drag crisis 現象を再現する。しかし、同現象に伴う剥離渦周期の劇的な変化までは追えず、円柱表面の剥離渦を厳密に再現できていないことが言える¹⁾。一方、3 次元解析により、亜臨界域において流体力の過大評価を是正し、実験結果を厳密に再現している研究例もあるが、臨界域以上の流れにおいて、剥離渦周期の定量評価や剥離状況の可視的評価を詳細にした例は少ない。

このような背景から、本研究では高 Reynolds 数域における円柱まわり流れの 3 次元数値流体解析を行い、Drag crisis 現象の再現性を検証する。具体的には、 $Re=10^4$ 以上における流体力及び Strouhal 数を定量評価し、同現象を再現していると思われる Reynolds 数において、円柱表面の剥離状況を可視化することで、同現象の物理機構を把握する。

2. 解析手法

流れ場を非圧縮性粘性流れとして扱おうと、次の非圧縮性 Navier-Stokes 方程式で表される。

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) - \nabla \cdot \sigma(p, u) = \mathbf{0} \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

ここで、 u は流速、 p は圧力、 ρ は密度、 σ は応力テンソルであり、次式で定義される。

$$\sigma(p, u) = -p'I + 2(\mu + \rho\nu_t)\varepsilon(u) \quad (3)$$

$$p' = p + \frac{2}{3}\rho k_t, \quad \varepsilon(u) = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (4)$$

ここで、 μ は粘性係数、 I は単位テンソル、 k_t 及び ν_t は乱流エネルギー及び渦動粘性係数である。 k_t は圧力項に換算圧力 p' として k_t を含めて扱うことができるため陽には表れない。また、本研究では、 ν_t を LES の Smagorinsky モデルにより求める。

数値流体解析手法には、丸岡らが提案している IBTD/FS 法²⁾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良く解析できる。代数方程式の解法には、SCG 法を用いる。また、有限要素は、流速と圧力に対して双 1 次四角形要素を円柱軸方向に重ね合わせた六面体要素を用いる。

3. 解析条件

解析領域を図-1 に、解析諸元を表-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、円柱軸方向の境界平面には周期境界条件を用いる。ここで、有限要素分割名は、mesh1 を用いた L=2D で軸方向分割を 20 層としたものを mesh1-2.0D20 と呼ぶ。

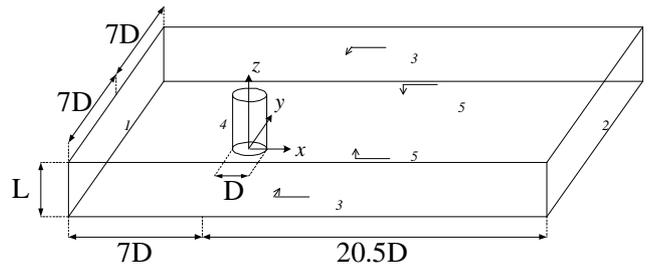


図-1 解析領域

表-1 解析諸元

有限要素分割	mesh1-2.0D20	mesh1-6.4D64	mesh2-3.2D32	mesh2-3.2D64
Reynolds数 Re	$10^4 \sim 10^6$	$10^4, 10^5, 10^6$	$10^4 \sim 10^6$	$10^4, 10^5, 10^6$
総要素数	12800 × 20	12800 × 64	29600 × 32	29600 × 64
周方向分割	160	160	320	320
最小分割幅	0.001D	0.001D	0.0001D	0.0001D
軸方向長さ L	2.0D	6.4D	3.2D	3.2D
軸方向分割幅	0.1D	0.1D	0.1D	0.05D
時間増分 Δt	0.02D/U	0.02D/U	0.01D/U	0.01D/U

キーワード : CFD, 円柱, Drag crisis 現象, 剥離・再付着

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

4. 解析結果

図-2及び図-3に平均抗力係数 C_d 及び Strouhal 数 S_t の実験結果との比較を示す。図-2の mesh1-2.0D20 では, $Re=10^5$ 付近で C_d が減少し, Drag crisis のような現象が見られる。また, mesh1-6.4D64 では, $Re=10^5$ 以下において実験値と一致している。それに対して, mesh2-3.2D32 及び mesh2-3.2D64 では, 常に実験値より過大評価しており, 精度に欠ける結果となっている。これは, mesh2 における平面方向分割幅に対して, 軸方向分割幅が少ないことが原因であると考えられる。一方, 図-3の mesh1-2.0D20 では, $Re=10^5$ で見られた Drag crisis 現象に伴った S_t の急増が見られない。これより, 同現象における剥離渦周期を再現できていないと言える。しかし, $Re=10^5$ の実験値には一致している。これより, C_d が減少した原因として, 円柱軸方向長さ 2.0D に対して周期境界条件が, 円柱後方の淀み域に影響を及ぼしたことが考えられる。また, $Re=10^{5.5}$ 以下では, どの解析ケースもほぼ $S_t=0.2$ を示しており, 実験値に一致している。このことから, 実験における亜臨界域の剥離渦周期を示していることが考えられ, 臨界域以降の再付着再剥離を再現できていないと考えられる。

図-4に Drag crisis 現象を再現したと見られる mesh1-2.0D20 における瞬間圧力コンター図と時間平均流線図を示す。まず, 時間平均流線図より, Reynolds 数の上昇に伴い, 円柱後方の双子渦が小さくなっていくのがわかる。これにより, 流体力が徐々に減少していくことが考えられ, Drag crisis のような現象を再現したと考えられる。瞬間圧力コンター図より, $Re=10^4$ では, スケールの小さい渦群の放出が目立つ。これは, 剥離せん断層が層流から乱流に遷移し, 乱流の乱れ成分が層流 Karman 渦の形成に影響を及ぼし, せん断層内の渦のスケールを減少させることで, 乱流 Karman 渦が発生していると考えられる。 $Re=10^5$ では, 剥離せん断層内における渦のスケールが徐々に小さくなり, 円柱側面から小規模の渦が連鎖的に放出されていることから, 円柱側面において乱流遷移していることがわかる。また, 後流に向けて乱流 Karman 渦を放出しているのもわかる。図-2より, ここで Drag crisis らしき現象が起きているが, 円柱後方で剥離渦の再付着が見られない。よって, 同現象の流れ場を再現できていないと言える。 $Re=10^6$ では, $Re=10^5$ と同様に小規模の乱流渦が並んでいるが, 再付着が見られない。実験における超臨界領域では, 剥離 - 再付着 - 再剥離が安定して起こることから, $Re=10^6$ の流れ場も厳密には再現できていない。

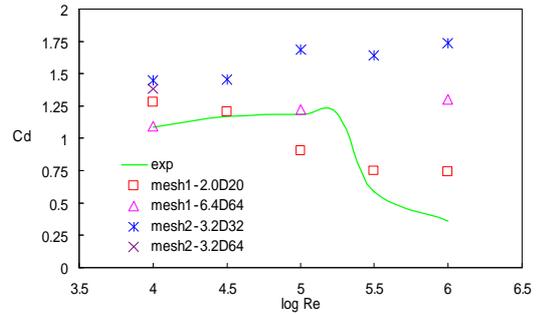


図-2 平均抗力係数 C_d の実験結果との比較

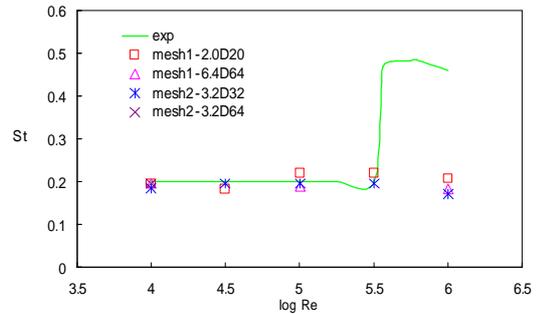


図-3 Strouhal 数 S_t の実験結果との比較

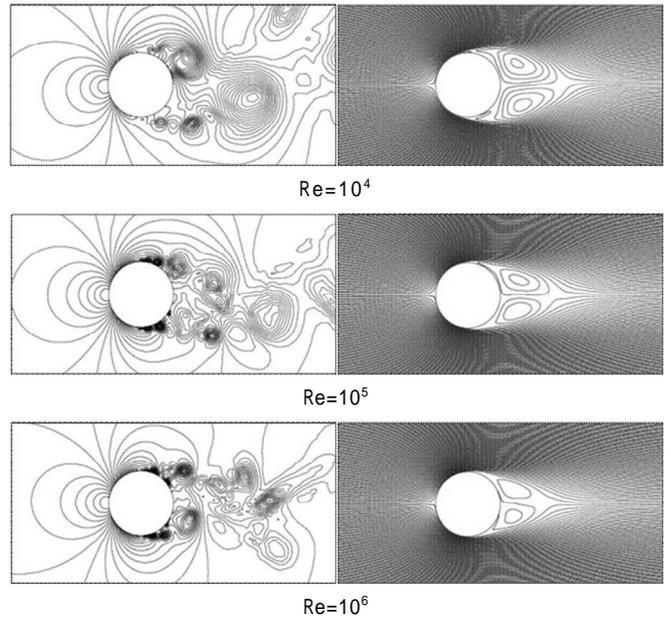


図-4 mesh1-2.0D20 における瞬間圧力コンター図及び時間平均流線図

5. まとめ

全ての解析ケースにおいて, 渦周期及び剥離状況は亜臨界域を示す結果となった。また, Drag crisis 現象に沿った流体力及び流れ場を定性的に再現できなかった。同現象を厳密に再現するには, 軸方向層分割幅をより細かくする必要があると考えられる。

<参考文献>

- 1) Tamura, T.: On the Reliability of two-dimensional simulation for unsteady flows around a cylinder-type structure, J. of Wind Engrg. and Indust. Aerodyn., Vol.35, pp.275-298, 1990
- 2) 丸岡他: 同次補間を用いた陰の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