

数値流体解析を用いた臨界領域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
 八戸高専 正会員 丸岡 晃 中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

既往の研究¹⁾²⁾により、円柱まわりの流れは Reynolds 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。

ここで、本論で対象とする臨界領域($Re=2.8 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^5$)は、亜臨界領域($Re=260 \sim 2.8 \times 10^5$)の流れの状態から超臨界領域($Re=3.5 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^6$)の流れの状態に移る特殊な領域である。この2つの異なる領域の流れの状態が混在することにより、不安定性を伴う流れとなる。そのため、この領域では不安定現象の Drag crisis 現象が確認されている。この現象は、流れの状態が剥離-再付着-再剥離の状態であり、かつこの流れの状態が対象構造物の片側に顕著の見られる。それにより、抗力の急減、Strouhal 数のジャンプ、背圧の急増などの特徴があらわれる。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。

以上のような背景に基づき、臨界領域付近での円柱まわりの流れに対し、CFD を用いることにより詳細な解析を行うことで、臨界領域の特徴を掴むことと、Drag crisis 現象の特徴を掴むことを目的とする。ここでは、軸方向のエネルギー散逸を考慮するため3次元静的解析を行うことに加えて、Drag crisis 現象が確認されている風洞実験を参考にした連続的な Re 数の増加手法を解析に導入する。さらに、軸方向に対して異なる分割幅の要素分割(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

本研究での数値流体解析手法には、丸岡ら³⁾が提案している、IBTD/FS 法を用いる。本手法は、運動方程式を 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性 Navier-Stokes 方程式を用いる。乱流には LES(Large Eddy Simulation)の Smagorinsky SGS (Sub Grid Scale)モデルを適用する。

2.2 解析領域

本解析で用いる解析領域を図-1に示す。境界条件は、流入境界 Γ_1 では一様流速 1.0, Γ_2 側面境界で slip, Γ_3 円柱表面で no-slip, 流出境界 Γ_4 で圧力 0, スパン方向 Γ_5 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条件を表-1に示す。ここでは、mesh1-3.2D32 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 3.2D, 軸方向分割層 32 層のものを mesh1-3.2D32 と呼ぶ。mesh1-3.2D32 は、構造物表面付近ならびに、後流域について微細な要素分

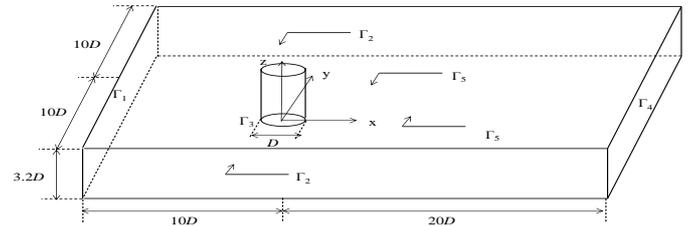


図-1 解析領域

表-1 解析条件

	有限要素分割			
	mesh1-3.2D32	mesh2-3.2D32	mesh2-3.2D128	mesh3-3.2D128
Reynolds 数	$10^3 \sim 2.5 \times 10^5$	$10^5 \sim 4 \times 10^5$	$10^5 \sim 4 \times 10^5$	$3 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5$
総節点数	36390×33	26090×33	26090×129	39090×129
総要素数	36000×32	26000×32	26000×128	38700×128
周方向分割	240			360
最小分割幅	0.0005D	0.0007D		0.0001D
軸方向長さ	3.2D			
軸方向分割幅	0.1D		0.025D	
時間増分 Δt	0.01D/U		0.008D/U	

割を施している。それに対し、mesh2-3.2D32 は、構造物表面付近だけでなく構造物近傍全体にわたり微細な有限要素分割を行い、計算負荷を減らす放射状メッシュを採用した。さらに mesh2-3.2D128 は、mesh2-3.2D32 と x-y 平面では同様の mesh だが、軸方向に4倍の微細な要素分割を行っている。また、mesh3-3.2D128 は、円柱表面、円柱近傍全体に加えて、軸方向に対しても微細な要素分割を施している。

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-2に示す。

解析結果は、亜臨界領域において、どの種類の mesh を用いた解析結果も実験結果と良い一致を示しており、Drag crisis 現象発生直前までは捉えられている。しかし、mesh1-3.2D32 を用いた解析結果は、Re 数 $Re=2 \times 10^5$ 付近から実験結果との乖離が見られる。これは、境界層での要素分割が不足していたためと推測される。

次に mesh2-3.2D32 を用いた解析結果は、 $Re=2.5 \times 10^5$ 付近までは実験結果と良い一致を示すが、 $Re=3 \times 10^5$ 付近で実験結果との乖離が見られる。これは、風洞実験では連続的に Re 数を増加させ実験を行っているのに対し、CFD を用いた解析ではそれぞれの Re 数毎に全て初期条件が 0 で解析を行っていることから、Re 数の増加の手法の違いが解析結果として現れたためと思われる。

そこで、風洞実験と同じように連続的に Re 数増加の条件を解析に導入した条件の mesh2-3.2D32-2 を用いて解析を行う。その結果、連続的な Re 数の増加を組み込む前では実験結果と乖離した $Re=3 \times 10^5$ 付近においては実験結果と比較的良好一致を示す結果が得られた。しかし、 $Re=3.5 \times 10^5$ 付近では実験結果との乖離が見ら

キーワード : 臨界領域, Drag crisis, 円柱, 数値流体解析

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

れる。これは、軸方向に対しての要素分割が不足しており、軸方向流れに対して、精度良く解析が行えていなかったことが、原因として推測される。

そこで、連続的な Re 数の増加に加えて、軸方向に微細な要素分割を行った条件の $mesh2-3.2D128$ を用いて解析を行った。この結果は、 $Re_c=3.5 \times 10^5$ 付近では実験結果と良い一致を示し、さらに高 Re 数である $Re_c=4 \times 10^5$ 付近でも C_d の低下傾向を捉えることができた。

さらに、 $mesh3-3.2D128$ を用いた解析結果では、実験結果と非常に良い一致で C_d の低下を捉えている。

3.2 Strouhal 数 S_f の検証

Strouhal 数(以下 S_f)の実験結果²⁾と解析結果の比較を図-3に示す。

実験結果で S_f がジャンプしているのは、亜臨界領域の流れの状態から超臨界領域の流れの状態へと流れの状態が大きく変化していることを示している。

解析結果では、 S_f ジャンプ前の亜臨界領域では、どの種類の $mesh$ を用いた解析結果も良い一致を示している。これに対して、 S_f ジャンプ付近に着目すると、 $mesh1-3.2D32$ と $mesh2-3.2D32$ を用いた解析結果では、 S_f ジャンプを明確に再現できていない。これは、軸方向流れの考慮が不十分であることが推測される。

一方、 $mesh2-3.2D128$ では、若干ではあるが S_f の増加が見られるが、顕著な S_f の増加傾向は見られない。ここで、 S_f ジャンプが確認されている Re 数域では非常に流れの状態が複雑であり、時々刻々と流れの状態が変化していることが考えられる。このような流れの状態の場合は、比較的長い時間毎における流れの状態を評価することは容易ではないため、比較的短い時間毎で流れの状態を評価する方が良いと判断した。具体的には、複数の周期の流れの状態を同時に評価せず、同様の周期成分毎にわけて流れを評価する。

そこで、 $mesh2-3.2D128$ の解析条件を用いて、比較的短い時間毎で、流れの状態を評価した解析結果を $mesh2-3.2D128-2$ とする。 $mesh2-3.2D128-2$ の解析結果では、顕著な増加傾向を示している。

3.3 剥離泡の検証

臨界領域付近の剥離泡の比較として時間平均流線図を図-4に示す。図-4(a)では、剥離泡に若干の非対称性が見られるが、亜臨界領域であるので非対称性のある流れは見られない。しかし、図-4(b)の $Re_c=2.5 \times 10^5$ より高 Re 数域では明確に非対称性が表れている。

ここで、明確に非対称性が見られる図-4(b)~(d)に着目する。図中に赤の実線で流れの様子を示し、紫の丸で上流側での剥離と考えられる付近、緑の丸で下流側での再付着と考えられる付近、黒の丸で下流側での再剥離と考えられる付近を示している。図-4(b)では、明確に非対称性のある流れではあるが、下流側での再付着は見られない。さらに高 Re 数域である図-4(c)、(d)では、上流側で剥離した流れが下流側で再付着し、再剥離する流れ状態が見られる。また、剥離泡の位置に着目すれば、図-4(b)、(c)では下側、図-4(d)では上側と固定されていない。

4. おわりに

本論では、臨界領域付近の Re 数域における円柱まわりの流れに対して詳細な解析を行った。

C_d では、Drag crisis 現象の発生の様子を、実験結果と

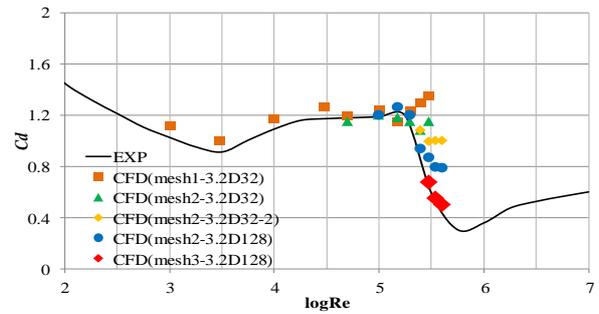


図-2 C_d の実験結果¹⁾と解析結果の比較

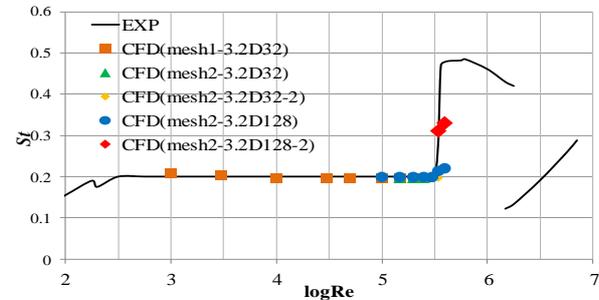


図-3 S_f の実験結果²⁾と解析結果の比較

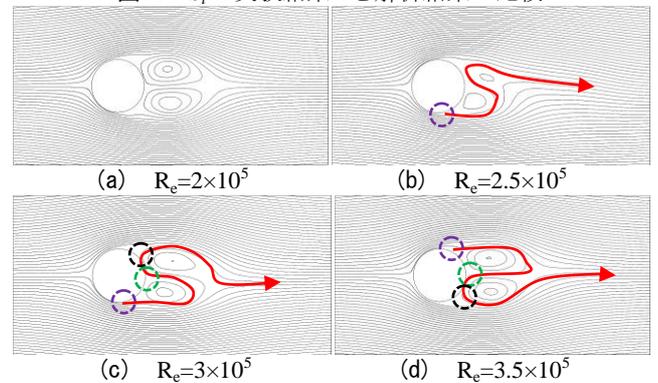


図-4 臨界領域付近での剥離泡の比較(mesh2-3.2D128)

比較的良い一致で捉えられた。

次に S_f では、若干の S_f の増加を捉えることができ、 S_f ジャンプが見られる複雑な流れの状態でも、比較的短い時間で流れの状態を評価すれば、亜臨界領域の流れの状態から、超臨界領域の流れの状態に変化しつつあることを捉えることができた。

さらに剥離泡の比較では、非対称性のある臨界領域の流れの状態に遷移する様子を比較的よく捉えることに加え、臨界領域の流れの状態の特徴である剥離-再付着-再剥離の流れの様子を捉えた。

これより、臨界領域の流れの状態と、不安定性を伴う流れによる不安定現象である Drag crisis 現象の特徴を掴みつつあると考えられる。

今後軸方向の長さの妥当性に関して再検討を行う。

<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 actiong 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, 土木学会構造工学論文集 Vol.43A, pp383-394, 1997.3