

数値流体解析を用いた円柱まわり流れの解析

○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

既往の研究により，円柱まわりの流れの状態は Reynolds 数（以下 Re 数）に依存し変化することが明らかにされている．ここでは，円柱まわり流れを実験において，広範囲の Re 数で正確に把握されているものの，数値流体解析（以下 CFD: Computational Fluid Dynamics）を用いての把握は十分とは言えない．具体的には，亜臨界領域 Re 数 $R_e=260\sim2.8\times10^5$ ，超臨界領域 $R_e=3.5\times10^5\sim1.5\times10^6$ のように限られた Re 数の範囲で CFD を用いた研究はなされているが^{1),2)}，その中間に当たる臨界領域 $R_e=2.8\times10^5\sim3.5\times10^5$ での流れの状態の把握は十分ではない．臨界領域の流れでは，亜臨界領域の流れの状態から超臨界領域の流れの状態に遷移する特殊な領域であり，この異なる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．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-再剥離があり，かつ，この流れの状態が対象構造物の片側に顕著に見られる．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現れる．

以上のような背景に基づき，円柱まわり流れに対し，CFD を用いることにより，流れ場の把握，空力特性の把握を行うことを本研究の目的とする．ここでは，できる限り実現に近い解析を行うために，奥行き方向の流れを考慮するように 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模した，連続的な Re 数の増加を解析に導入することを試みる．3 次元解析結果と実験結果とを比較することにより，3 次元解析による現象の再現性の検討を行う．さらに，臨界領域付近において詳細な解析を行うことにより，臨界領域の流れの特徴を捉えることと，Drag crisis 現象の特徴を捉えることを併せて目的とする．

2. 解析手法

数値流体解析手法には著者ら³⁾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．

(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．乱流には，LES(Large Eddy Simularion)における Smagorinsky SGS モデルを用いる．

(2) 解析領域

解析領域は図-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．

(3) 解析条件

表-1 に解析条件を示す．ここでは，mesh1 を基本としている．mesh1 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割を施している．それに対し，mesh2 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 mesh3 は，mesh2 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．

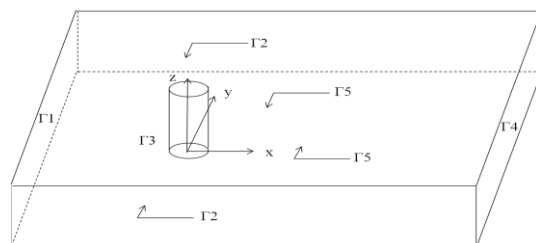


図-1 解析領域

表-1 解析条件

	有限要素分割		
	mesh1	mesh2	mesh3
Reynolds 数	$10^3\sim2.5\times10^5$	$10^5\sim4\times10^5$	$2\times10^5\sim4\times10^5$
総節点数	36390×33	26090×33	26090×129
総要素数	36000×32	26000×32	26000×128
周方向分割	240		
最小分割幅	0.0005D	0.0007D	
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

3. 解析結果

(1) 剥離泡の検証

図-2 に臨界領域付近での剥離泡の比較として，流線図を示す．図-2(a) では，剥離泡に若干の非対称性が見られるものの，非対称性のある流れではない．これに対して，図-2(b) では，明確に非対称のある流れに変化していることがわかる．さらに Re 数を増加させた図-2(c)，(d) では，剥離-再付着-再剥離と考えられる流れの状態が確認できる．一方，剥離泡の位置について着目すれば，図-2(b)，(c) では下側，図-2(d) では上側と，剥離泡の位置が Re 数毎に異なっている．以上より，流れの状態が，非対称性の強い流れへ遷移する様子が捉えられ，臨界領域の流れの状態の特徴を比較的良く掴むことができたと考えられる．

(2) 抗力係数の検証

図-3 に，抗力係数 C_d の実験結果⁴⁾と解析結果の比較を示す．精度比較のために，2 次元解析結果も併記する．3 次元解析結果は，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

キーワード : Drag crisis 現象，円柱，Reynolds 数，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

おり、Drag crisis 現象発生直前までは捉えられている。しかし、mesh1 を用いた解析結果は、 Re 数 $Re=2 \times 10^5$ で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 を用いた解析結果は、 $Re=2.5 \times 10^5$ まで実験結果と良い一致を示すが、 $Re=3 \times 10^5$ 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 mesh2-2 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 $Re=3 \times 10^5$ 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、 $Re=3.5 \times 10^5$ では実験結果との乖離が見られる。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 mesh3 を用いて解析を行った。この結果は、実験結果と非常に良い一致を示す結果が得られ、 C_d の低下する過程を、比較的良く捉えられている。

以上より、不安定性を伴う、臨界領域の流れの特徴を、比較的掴めていると考えられる。

(3) Strouhal 数の検証

図-4 に Strouhal 数 (以下 S_t) の実験結果⁵⁾と解析結果の比較を示す。精度比較のため、2次元解析結果も併記する。実験結果で S_t 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。3次元解析結果では、 S_t 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_t ジャンプ付近に着目すると、mesh1 と mesh2 を用いた解析結果では、 S_t 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、mesh3 では、若干ではあるが S_t の増加が見られるが、顕著な S_t の増加傾向は見られない。ここで、 S_t 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いての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思われる。そこで、mesh3 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 mesh3-2 とする。mesh3-2 の解析結果では、顕著な増加傾向を示している。これより、流れの状態が、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がわかる。

4. おわりに

本論において、亜臨界領域から超臨界領域にかけての Re 数域で、3次元解析を行うことにより、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事ができた。また、 C_d では、Drag crisis 現象の発生の様子を、実験結果と比較的良好一致で捉えられた。 S_t では、若干の S_t の増加を

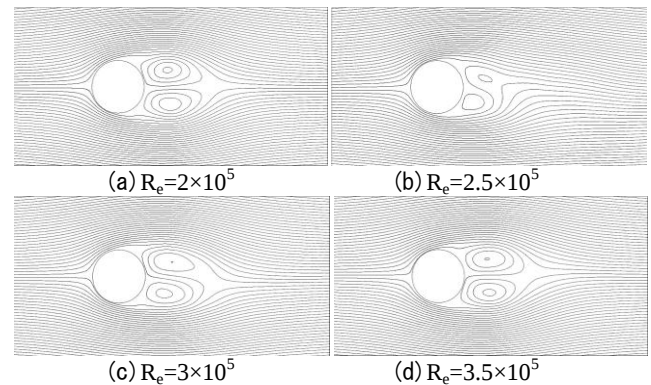


図-2 臨界領域付近での剥離泡の比較(流線図)

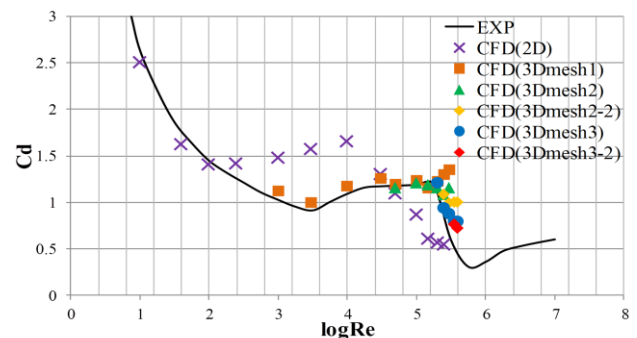


図-3 C_d の実験結果と解析結果の比較

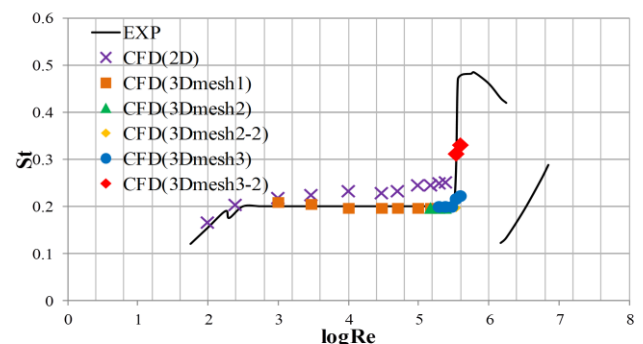


図-4 S_t の実験結果と解析結果の比較

捉えることができ、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、超臨界流れの状態に変化しつつあることが捉えることができた。これより、臨界領域の流れの状態と、不安定性を伴う流れとしての Drag crisis 現象の特徴を掴みつつあると考えられる。

今後の展開として、軸方向長さ、軸方向分割幅をパラメータとして解析を行うことにより、CFD を用いた Drag crisis 現象の再現に向け、更なる検討を行う。

<参考文献>

- 1) 樽川智一他：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
- 2) 小野 佳之, 田村 哲郎：超臨界域における円柱まわりの流れに関する LES 解析
- 3) 丸岡晃：大規模数値流体解析のための高効率な解析手法に関する基礎的研究 博士論文 1998
- 4) Williamson, C.H.K. : Vortex dynamics in the cylinder wake, Annu. Rev. Fluid. Mech., Vol.28, pp.477-539, 1996
- 5) 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
- 6) 樽川智一：広範囲な Reynolds 数域における円柱まわり流れの数値流体解析精度の検証