

広範囲な Reynolds 数域での円柱まわり流れの数値解析精度の検討

○中央大学 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

近年の急速なコンピュータの発達に伴い数値流体力学 (CFD) が大きな進歩をとげ、これらの進歩の過程において解析値と実験値とを比較することにより解析手法の妥当性を検証することが行われている。それらの検証には、主として平面のみを考慮した 2 次元解析が行われてきたが、構造物の軸方向の流れを表現できないことから、円柱を扱った問題などでは既に 3 次元解析の必要性が丸岡ら¹⁾により指摘されている。しかし、2 次元解析は色々なモデルを導入しても容易に行えることから、乱流モデル導入による定量的な誤差を避ける試みが行われている。野村ら²⁾は、LES の Smagorinsky モデルにより 2 次元円柱まわり流れの Drag crisis 現象の再現を示しているが、円柱表面における剥離点から不規則な二次渦群が形成されていることから実際の現象を再現しているとは言いがたく、この結果がどのようなことから生じるかを掴むことが必要である。

本研究では、広範囲な Reynolds 数域における円柱まわり流れの 2 次元数値流体解析を行い、精度の検証を行う。さらに乱流モデルの導入も併せて検討する。これにより、3 次元数値流体解析を行うことの必要性を論ずる。

2. 解析手法

数値流体解析には丸岡ら¹⁾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まり、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。本研究では、代数方程式の解法に SCG 法を用いる。

物体上に作用する静的空気力は、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求める。

3. 円柱まわりの流れの解析

円柱まわりの流れに代表される剥離を伴う流れでは、実際には 3 次元的な流れが存在するため、3 次元解析を行う必要があると言われている¹⁾。ここでは、2 次元平面で微細な有限要素分割を行い、乱流モデルの有無を同

一解析手法で、 $Re=10^1 \sim 10^7$ の Reynolds 数域の 2 次元解析を行う。2 次元解析結果と実験結果とを比較することによって、Reynolds 数依存性の定性的な面と定量的な面において 2 次元解析がどの程度適用できるかを検討する。

(i) 支配方程式

支配方程式は、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用い、乱流には丸岡ら³⁾が用いている大規模剥離を比較的精度良く追えるとされている RANS(Reynolds Averaged Navier - Stokes Equation)の SA(Spalart-Allmaras)モデルを採用する。

(ii) 解析領域と境界条件

解析領域は、円柱直径を D とした場合、円柱前方と側方を $6.5D$ 、円柱後方を $20.0D$ としている。また、境界条件は流入境界で一樣流速 U 、側面で slip、円柱表面で no-slip としている。有限要素には流速・圧力に対して双一次三角形要素を用いる。

(iii) 解析条件

表-1 に解析条件を示す。 $Re=10^4 \sim 10^7$ では、より微細な要素分割が要求されるため、要素分割(1)より円柱の周方向分割、法線方向最小分割幅等を細かくした要素分割(2)を用いた。また、要素分割は断面近傍で節点を集中的に配置している。

4. 解析結果および考察

(i) 流体力の Reynolds 数変化

図-1 は抗力係数 C_D の Reynolds 数変化の実験結果との比較を示す。また、図-2 に Strouhal 数 St の Reynolds 数変化の実験結果との比較を示す。ここでの実験結果は、Williamson 及び Scheme によるものである。

$Re=10^1 \sim 10^{2.25}$ では、抗力係数 C_D はほぼ実験結果と一致している。この付近の Reynolds 数では軸方向流がほとんど生じない

ためと考えられる。

$Re=10^{2.5} \sim 10^4$ 付近

では、抗力係数 C_D

及び Strouhal 数 St

は Reynolds 数が高

くなるにつれ実験

表-1 解析条件

有限要素分割	要素分割(1)	要素分割(2)
Reynolds数 Re	$10^1 \sim 10^7$	$10^4 \sim 10^7$
総節点数	15006	41758
総要素数	29440	82432
周方向分割	256	512
最小分割幅	0.003D	0.0003D
時間増分 Δt	0.01D/U	0.005D/U

キーワード : 円柱まわり流れ、Drag crisis 現象、剥離のメカニズム、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

結果と差が広がっている。これは、円柱側面で形成された渦が円柱後方で成長し放出されるが、3次元性が表現できないため拡散せずに過度に成長することに起因する。乱流モデルなしの $Re=10^4 \sim 10^5$ では、抗力係数 C_D の実験結果は Reynolds 数が高くなるにつれ増加しているが、解析結果は急激に低下している。また、乱流モデルを導入した解析結果にも同様の傾向が見られる。これは、 $Re=10^{5.5}$ 付近で起こると知られている Drag crisis 現象を示しているようにこの結果だけでは考えられる。しかし、この現象が早期に生じているのは、2次元計算では円柱表面の境界層が下流まで継続し剥離することから、剥離領域が小さくなって抗力が低下しているものと考ええる。一方、Strouhal 数 S_t の実験結果は、Drag crisis 現象に伴い $Re=10^{5.5}$ 付近での急増が見られるが、解析結果においては早期の Drag crisis 現象に伴って Strouhal 数に変動していない。これより Drag crisis 現象が起こる Reynolds 数域での剥離点の移動に伴う渦周期の変動は、再現できていないと考えられる。それ以降の Reynolds 数域では、抗力係数 C_D は乱流モデルによる解析結果において超臨界、超々臨界の実験結果に定性的に一致している。これらの流れの領域では、剥離点の位置が後方へ移動し剥離領域が狭まるため、3次元的な流れが影響しにくくなったことに起因していると考えられる。

(ii) Drag crisis 現象付近の Reynolds 数域の流れの状態

図-3 に Drag crisis 現象時(左)及び現象後(右)の乱流モデル導入前の圧力分布を示す。図-4 に同様に乱流モデル導入後の圧力分布を示す。

乱流モデル導入前の $Re=10^{4.5}$ では、円柱側面で形成された渦の円柱後方で再付着が見られるが、円柱後方に移動せずに早期に放出されている2次渦が見られる。 $Re=10^{5.5}$ では、2次渦が連鎖的に形成される現象が見られる。ここで剥離点の位置は後方に移動し、また最も手前の剥離点よりもさらに後方でも剥離現象が起きている。これらの2次渦の不規則な放出は、2次元解析における計算のために起きている典型的な現象であり、実現象を再現できていないことがわかる。乱流モデル導入後の $Re=10^4$ では、円柱側面で剥離点より剥離し遷移領域を経て再付着—再剥離する剥離渦を見ることができ、Drag crisis 現象時の剥離のメカニズムにほぼ一致している。しかし、剥離渦が規則的な渦周期で放出され、実現象では形成されない Karman 渦列が形成されている。 $Re=10^5$ では、剥離渦の再付着—再剥離を見ることができず、Drag crisis 現象後の剥離のメカニズムを再現できていないことは明らかである。

5. おわりに

2次元解析において、実験結果の臨界領域より低い $Re=10^4$ 付近の領域で Drag crisis 現象の様な傾向を生じ

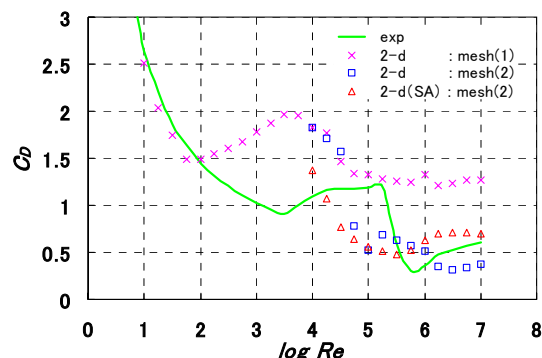


図-1 抗力係数 C_D の Reynolds 数変化の実験結果との比較

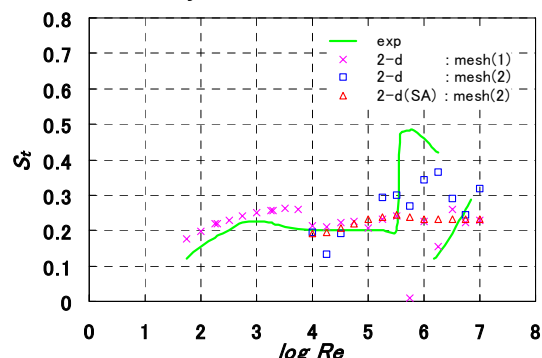


図-2 Strouhal 数 S_t の Reynolds 数変化の実験結果との比較

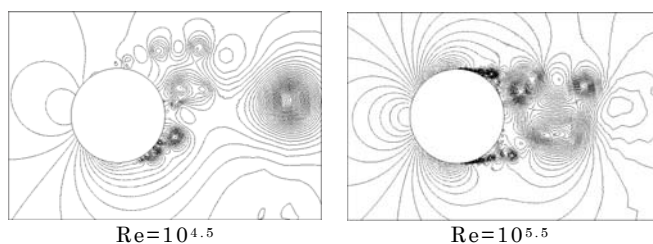


図-3 乱流モデル導入前の圧力分布の Reynolds 数変化

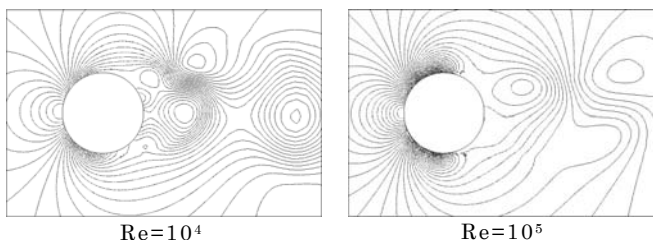


図-4 乱流モデル導入後の圧力分布の Reynolds 数変化

た。しかし、それ以降の Reynolds 数域の Strouhal 数の変動、円柱表面の剥離のメカニズム等において各種の風洞実験によって示されている現象を再現しているとは判断できず、2次元解析特有の問題により現象を捉えたと判断する。よって、実際の現象を2次元解析で説明することは困難であると考え。今後の課題は、3次元解析を行うことによりここで示した問題点の検証を行い、より高精度の数値流体解析の手法の検討を行うことである。

謝辞：本研究の実施にあたり、八戸工業高等専門学校講師の丸岡晃先生に協力を得た。ここに感謝の意を表す。

<参考文献>

- 1) 丸岡他：広範囲な Reynolds 数域での円柱まわりの2次元及び3次元数値流体解析，土木学会論文集 No.591, 1998.4
- 2) 野村他：Smagorinsky の渦粘性モデルを用いた円柱まわりの流れの解析，「風工学における数値計算の応用と評価」研究小委員会資料
- 3) 丸岡他：数値流体解析による断面辺長比 4 の矩形断面の空力応答特性に関する検討，応用力学論文集 Vol.8, 2005