

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、加藤²⁾は修正 K-εモデル、嶋田ら³⁾は RANSモデルにより定量的な誤差を避ける試みが行われている。また、野村ら⁴⁾は、LES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め、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 Scaled Conjugate Gradient (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。ここでは、2 次元平面で微細な有限要素分割を行い、乱流モデルの有無同一の

解析手法で、 $Re=10^1 \sim 10^7$ の広範囲の 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が 2 次元解析でどの程度適用できるかを検討する。

() 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⁵⁾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。

() 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様流速 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。

() 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

() 定常空気力係数 (抗力係数 C_D)

図-1 に抗力係数 C_D の Reynolds 数変化の実験結果との比較を示す。 $Re=10^1 \sim 10^{2.25}$ では、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、Reynolds 数が高くなるにつれ実験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し、流体力を増加させている。乱流モデルなしの

表-1 解析条件

	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	0.003 D	0.0003 D
時間増分 t	0.05 D/U	0.005 D/U

キーワード : Drag crisis、定常空気力係数、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

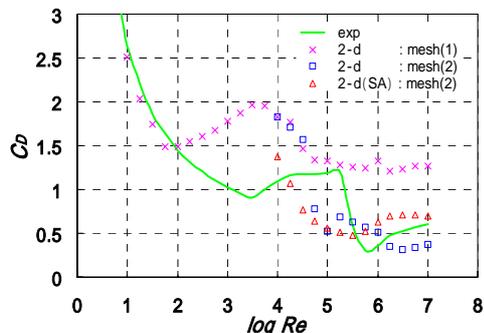


図-1 抗力係数 C_D の実験結果との比較

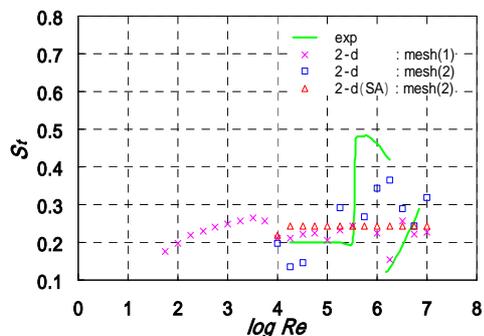
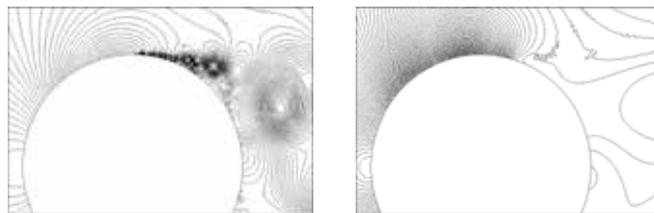


図-2 Strouhal数 S_t の実験結果との比較

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。これは、 $Re=10^5 \sim 10^6$ 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、 $Re=10^4$ 付近から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られる。一方、Drag crisisは、剥離せん断層の乱流化によるため、乱流モデルを導入して同じ計算を行った結果、この亜臨界領域において剥離点の移動が再現できていないため、同様に抗力は著しく低下している。風洞実験では $Re=10^6$ 以降において剥離点の位置が後方に移動し、剥離領域が狭くなることにより、3次元的な流れが強く影響しにくくなるが、2次元解析では早期のDrag crisisにより、これが $Re=10^6$ 以前の領域で起きていていると考えられる。 $Re=10^6 \sim 10^7$ では、実験では剥離点が風上側へと移動し、剥離領域が増加することで抗力が徐々に上昇している。乱流モデルによる解析結果と比較的するとおおむね現象を再現している。これより、超々臨界領域の流れを再現している可能性がある。

() Strouhal 数

図-2 にStrouhal数 S_t の Reynolds 数変化の実験結果との比較を示す。実験ではDrag crisisが起こる臨界領域付近の $2.8 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^5$ でStrouhal数は急増する。その後 1.5×10^6 までは、ほぼ一定値を保つが、境界層が乱流化して剥離点が風上に移動する超々臨界領域に至ると一旦急減少し、Reynolds数の増大とともに徐々に増加を示す。乱流モデルなしの解析結果より、 $Re=10^4$ 以降でStrouhal数がばらついている。これは、図-1 に示



(a)乱流モデルなし($Re=10^{5.5}$) (b)乱流モデルあり($Re=10^{5.5}$)
図-3 瞬間圧力コンター図

すように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、円柱の剥離点から不規則に生じている二次渦群によるものと考えられる。乱流モデルを導入すると、時間および空間フィルタ操作により安定したKarman渦周期の算出は可能になったが、剥離点の移動に伴うStrouhal数の変動は再現できていない。

() 円柱表面の流れの状態

図-3 に代表的な円柱表面の流れとして $Re=10^{5.5}$ を示す。乱流モデルなしの円柱表面では、2次元解析のために起こる典型的な二次渦の形成が見られる。これは、数値粘性の不足による負の粘性効果によるものと考えられる。乱流モデルを導入すると、時間および空間フィルタ操作により二次渦の形成は見られなくなる。しかし、実験の臨界領域における剥離点の位置を厳密に捉えておらず、実験では形成されてない規則的なKarman渦を形成していることから流れ場を厳密には再現できていないと考えられる。これにより、前述の剥離点の移動に伴うStrouhal数の変動が再現できていないことにもよる。

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た。しかし、それに伴うStrouhal数の変動、及び円柱表面の剥離点の位置を見ると、現象が再現できているとは言いがたい。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。これは、乱流モデルを導入しても同様である。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られる。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、八戸高等専門学校講師の丸岡晃氏に協力を得た。ここに感謝の意を表す。

<参考文献>

- 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
- 嶋田他：一樣流中の矩形断面柱に関する K-モデルによる2次元数値解析，日本風工学年次研究発表会概要集，1997
- 加藤真志：流れ直角方向に振動する角柱の2次元流れ解析による空力特性評価，日本風工学会誌第70号，1997
- 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
- 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