Smagorinsky 定数を変化させた時の臨界レイノルズ数域での円柱まわりの流れの数値流体解析

中央大学 学生員 ○糟谷 直樹 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

円柱まわりの流れの状態はレイノルズ数(以下, Re 数とする)に依存性を示すことが知られている^{1),2)}.中 でも、本研究で対象とする臨界 Re 数域は、円柱に作用 する抗力の急減(Drag crisis 現象)や Strouhal 数のジャ ンプ、円柱の上下面で異なる流れ場の状態等の特徴が 現れる特殊な領域である.数値流体解析(CFD: Computation Fluid Dynamics)による研究では、臨界 Re 数域の 特徴の一部は捉えている³⁾ものの、精度良く臨界 Re 数 域の特徴の把握には至っていない.その原因の1つと して、高 Re 数域の解析の際に用いられる乱流モデルに よって付加される項が、微妙に流れ場に影響している ことが考えられる.

以上のような背景に基づき,本論は臨界 Re 数域にお ける円柱まわりの流れに対して CFD を用いることによ り,臨界 Re 数域の特徴を掴むことを目的とする.それ に併せて,乱流モデルが解析結果に与える影響の考察 を行う.本解析では,軸方向のエネルギー散逸を考慮 するために3次元静的解析を行う.また,高 Re 数域の 乱流場の再現には乱流モデルとして LES (Large Eddy Si -mulation)における標準 Smagorinsky SGS (Sub Grid Scale) モデルを用いる.このモデル定数(以下,Csとする) を変化させて解析を行うことで,乱流モデルが解析に 与える影響の考察行う.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

数値流体解析手法には丸岡ら⁴⁾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.

2.1 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. 乱流モデルには, LES における標準 Smagorinsky SGS モデルを用いる.

2.2 解析領域と境界条件

解析領域は,縦に 20D,横に 30D,軸方向高さを 2.5D とする.境界条件は,流入境界では無次元の一様流速 1.0,側面境界で slip,円柱表面で no-slip,流出境界で 無次元の圧力 0,スパン方向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, mesh1-2.5D100 を基本要素分割(以下, mesh とする) としている. なお, mesh1の平面上での要素分割で, 軸 方向高さ 2.5D, 軸方向分割層 100 層のものを mesh1 -2.5D100 と呼ぶ. mesh1-2.5D100 を用いた解析では, Cs を 0.1~0.04 まで段階的に変化させて解析を行う. 乱流



図-2 S_tの実験結果²⁾と解析結果の比較

モデルの解析結果に与える影響の考察を行うため,著者らの先行研究³⁾において最も良い解析精度であった mesh1-2.5D200を比較対象の解析結果として用いる.こ こで mesh1-2.5D200 の解析では, Cs を 0.1 と固定している.

3. 解析結果

3.1 抗力係数 C₀の検証

抗力係数(以下, C_D とする)の実験結果¹⁾と解析結 果の比較を図-1に示す.図-1では、黒の実線で実験結 果を示し、丸の塗りつぶしの色別で Cs の変化を示す. なお、比較対象として用いる mesh1-2.5D200 を用いた解 析結果は塗りつぶしなしのプロットで示す. **図-1**において, Cs を変化させることにより解析結果 に影響を及ぼすことがわかる.

実験結果と比較すると、 C_D の低下傾向を非常に良い 一致で捉えている.また、 $C_S=0.1$ と固定し解析を行っ た mesh1-2.5D200 の解析結果が実験結果との差が生じ る、 $Re=4.0 \times 10^5$ 以降においても、 C_S を変化させるこ とにより C_D の低下傾向を示す結果が得られた.

3.2 Strouhal 数 S_tの検証

Strouhal 数(以下, *S*, とする)の実験結果²と解析結 果の比較を図-2 に示す.なお,*S*,の算出には十分に周 期性が得られると判断された無次元時間 250 以降の変 動揚力の解析結果を用いる.

図-2において、Csを変化させることにより、臨界 Re 数域の特徴である S_tジャンプ(急増)を実験結果と良 い一致を示す結果が得られた.また、mesh1-2.5D200を 用いた解析結果に比べても、実験結果と良い一致での 解析結果が得られた.

3.3 円柱まわりの平均圧力係数 Cpの検証

 $C_D \geq S_t$ の実験結果と解析結果の比較から、Cs を変化 させることにより、実験結果と良い一致を示す結果を 得た. $C_D \geq S_t$ に加えて、円柱表面での平均圧力係数の 考察を行う. ここで、Cs を変化させた場合の円柱まわ りの C_P の解析結果を図-3 に示す. 図-3 の各解析結果 において、極小値を示す角度の場所が剥離点である.

図-3 において、Cs=0.1 ($Re=2.0 \times 10^5 \& Re=2.5 \times 10^5$) の解析結果では、 C_P は対称の形となり、背圧の増加は みられない、一方、Cs=0.075 ($Re=3.0 \times 10^5$)では背圧 の増加が確認できる結果となった、同様に、Cs=0.06~ 0.04 の解析結果においても背圧の増加がみられ、Cs を 低下させるにつれて、背圧の増加の度合いが大きくな る結果を得た、ここで、著者らの研究³⁾では、mesh1-2.5 D200 を用いた $Re=3.0 \times 10^5$ において、 C_P に明確な非対 称性がみられたが、Cs を変化させた場合では、Re=3.0×10⁵において、明確な非対称性を示す傾向は得られな かった。

3.4 臨界 Re 数域付近の流れ

Cs を変化させた解析結果として得られる,流線図を 図-4に示す.図-4に示す流線図は,瞬間流線図である.

図-4(a)では、円柱の上面では再付着あり、下面では 再付着なしという、円柱の上下面において、異なる流 れの状態がみられた.次に、図-4(b)では、円柱の上下 面ともに再付着がみられ、概ね対称の流れ場の状態と なる結果が得られた.

4. おわりに

本論では、臨界 Re 数域付近の円柱まわりの流れに対して、Cs を変化させることによる解析を実施した.本 論でのまとめを以下に示す.

- 1) C_D の解析結果では、Cs を変化させることにより、 C_D の低下傾向を実験結果と良い一致で捉えた.
- 2) S_t の解析結果では、Cs を変化させることにより、 S_t ジャンプを捉えることができた.
- *C_p*の解析結果では、Cs=0.075 以下の解析結果において、背圧の増加傾向がみられ、Csの低下に従い 背圧の増加の度合いが大きくなる.
- 4) 臨界 Re 数域付近の流線図では、Cs=0.075の解析結 果において、円柱上下面で異なる流れの状態を示 す結果が得られた。



図-3 円柱まわりの C_Pの解析結果 (Cs を変化させた場合)



(a) Cs=0.075 (*Re*= 3.0×10^5)



 (b) Cs=0.06 (*Re*=3.5×10⁵)
 図-4 臨界 *Re* 数付近の流線図 (Cs を変化させた場合)

以上の結果から、Cs を変化させることにより、解析精度に影響を与えることがわかる.また、対象とする Re 数に対して適切な Cs を与えることにより、空力特性と流れ場の再現性共に、解析精度の向上につながることが考えられる.

謝辞:本研究の一部は、(独)科学技術振興機構 A-STEP の給付を受けたことを付記する.

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.
- Schewe, G. : On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds number, *J. of Fluid Mech.*, Vol.133, pp.265~285, 1983.
- 3) 糟谷直樹,平野廣和,丸岡晃,佐藤尚次:臨界レイノ ルズ数域における円柱まわりの流れの数値流体解析, 応用力学論文集 Vol.15,pp.645~652,2012.8.
- 4) 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, pp.383-394, 1997.3