

OpenFOAM を用いた円柱まわりの流れ場の数値計算

Flow analysis around cylinder using OpenFOAM

○橋爪俊樹¹, 大竹智久², 村松旦典²*Toshiki Hashizume¹, Tomohisa Ohtake², Akinori Muramatsu²

Abstract: OpenFOAM is the fluid analysis software of the open source. There are few fluid analysis examples by OpenFOAM, and we evaluated the reliability of result of flow field around a cylinder by using OpenFOAM. In $Re = 200$, the calculated results by icoFoam and pisoFoam solver show that calculated value of C_d became close to the experimental value of cylinder. In addition, we confirmed that using fine sub-grid mesh nearly cylinder surface contributes good results.

1. はじめに

村松・大竹研究室では、空力研究に有限体積法に基づく流体解析ツール OpenFOAM を積極的に活用することを目指している。

OpenFOAM は ESI group が開発、公開しているオープンソースの流体解析ソフトである¹⁾。商用ソフトウェア並の機能が搭載されており、解析理論は付属の User Guide, およびソースコードを読むことで理解できるようになっている。最近では企業の製品開発においても利用が拡大している。しかし、流体解析分野では、JAXA などの CFD 専門チームが開発したソフトウェア、あるいは FLUENT などの商用ソフトウェアが用いられることが多く、OpenFOAM を用いた解析事例は少ない。低レイノルズ数領域の流れ場解析に OpenFOAM を活用していくためには、どの程度 OpenFOAM による計算結果が利用できるか評価する必要がある。

本研究では、非圧縮性流れに限定し、解析対象として、理論値や実験値が既知となっている円柱まわりの流れ場を適用し、OpenFOAM の解析結果がどの程度信頼できるかを評価する。比較するパラメータは、円柱の揚力係数、抗力係数、円柱周りの圧力とする。

2. 計算手法および計算領域

OpenFOAM は偏微分方程式の解法に有限体積法を用いている。基礎方程式は以下の Navier-Stokes 方程式および連続の式からなる。

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \rho \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} = -\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{F} & (1) \\ \nabla \mathbf{U} = 0 & (2) \end{cases}$$

計算に使用する円柱は直径 20 mm, 流速 $U_\infty = 0.15\text{m/s}$ とする。このときのレイノルズ数は $Re = 200$

となる。流体は空気とし、密度 $\rho = 1.225\text{kg/m}^3$, 動粘性係数 $\nu = 1.5 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ とする。

流れ場の解析は、非圧縮性流れのソルバである icoFoam, pisoFoam, simpleFoam について比較を行う。icoFoam は基礎方程式を繰り返し計算することで解を求めるもので、pisoFoam は RANS モデルの設定から解を求める。ともに PISO 法を用いた非定常ソルバである。simpleFoam は RANS モデルの設定から解を求めるが、SIMPLE 法を用いた定常ソルバである。

計算領域の概略図を図 1 に示す。OpenFOAM に標準装備されている blockMesh と snappyHexMesh を併用し、メッシュ生成を行った。blockMesh より円柱直径の 1/20 のメッシュを最小幅として計算領域全体を生成し、snappyHexMesh より物体表面にメッシュを沿わせた。解析空間の大きさは x 軸, y 軸方向ともに半径の 20 倍をとした。2 次元流れ場を想定し、境界条件として、左境界面を流入面 ($U = 0.15\text{m/s}$), 右境界面を流出面, 上下左右面の圧力勾配を 0 とした。

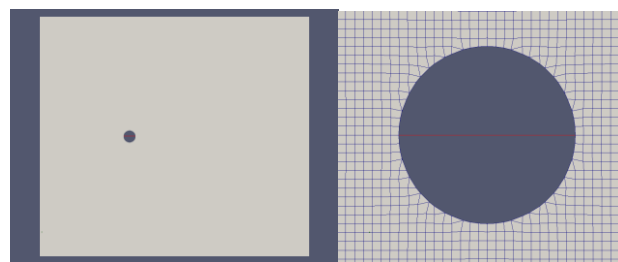


Figure 1. 解析領域全体図(左), 円柱近傍(右)

3. 計算結果および考察

OpenFOAM の解析で得られた揚力係数 C_l , 抗力係数 C_d , ストローハル数 St を表 1 に示す。icoFoam, pisoFoam の計算結果にあまり差はなく、どちらも実験値に近い値を求めることができた。simpleFoam は実験値と離れた値となっている。pisoFoam, simpleFoam はともに

RANS モデルを用いた解析であるため、計算結果の差は基礎方程式の非定常項の影響が大きいと思われる。

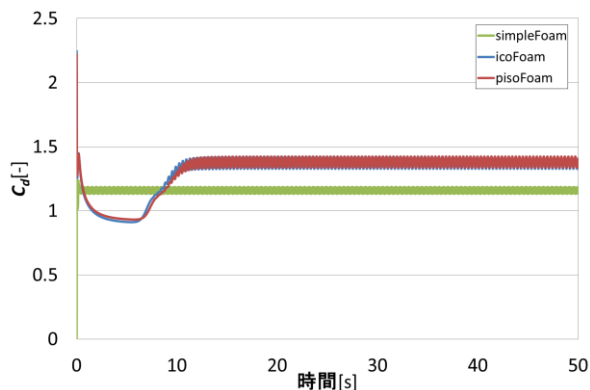


Figure 2. 抗力係数 C_d による結果の比較

Table 1. 各係数比較

	C_l	C_d	St
icoFoam	-0.0034	1.375	0.193
pisoFoam	-0.0041	1.381	0.193
simpleFoam	-0.0030	1.157	2.667
実験値		1.5	0.2

RANS モデルを用いた pisoFoam が icoFoam による計算結果に近い値となったのは、RANS モデルの設定において、OpenFOAM で用意されている層流用ダミー乱流モデルを用いたためと考える。乱流ソルバである pisoFoam に層流を解かせるもので、今回 pisoFoam と icoFoam は同じ計算をしたことになるため、pisoFoam と icoFoam の計算結果に差が出なかったと考える。流れ場のレイノルズ数は $Re = 200$ としており、円柱の臨界レイノルズ数³⁾よりも小さい値となっていることから、乱流モデルの設定より、乱流ソルバにおいても層流流れ場を解くことが可能であることが確認できた。

pisoFoam の計算結果より、流速分布および円柱周りの圧力分布を図 3, 4 に示す。図 3, 4 より、円柱の剥離や $Re = 200$ の場合の円柱後流において周期的な渦放出によるカルマン渦列の形成を確認できた。

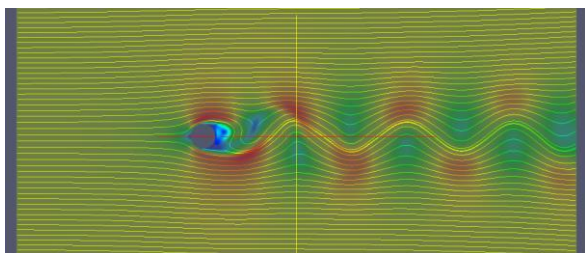


Figure 3. 円柱の流速分布および流線

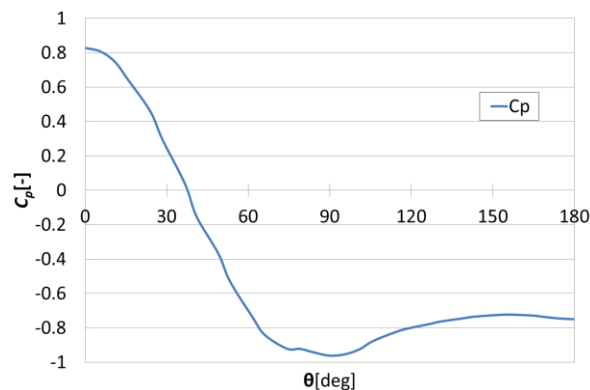


Figure 4. 円柱周りの圧力

OpenFOAM におけるメッシュ生成について、実験値に比較的近い結果を求めることができたことから、よいメッシュ生成が行われたと考える。snappyHexMesh は物体表面に沿って計算メッシュを作成するだけでなく、円柱近傍から遠方にかけてメッシュの分割数を変えることができるが、設定方法がわからず、計算領域全体でメッシュが細かくなったため、多くの計算時間がとられてしまった。今後の課題として、メッシュ生成設定について考えていく必要がある。

4. 結論

今回、OpenFOAM を活用していくにあたって、2次元非圧縮性流れ場、対象を円柱として OpenFOAM の解析結果について検証した。 $Re = 200$ の円柱周りの流れ場において、ソルバの比較、メッシュ生成から以下のような知見が得られた。

- 定常、非定常、層流、乱流の区別により使用するソルバを注意して選択する必要がある。
- 臨界レイノルズ数よりも低い流れ場の場合、RANS モデルの設定だけでなくソルバの基礎方程式に注意する必要がある。
- 層流において、icoFoam, pisoFoam による抗力係数、揚力係数の解析値は実験結果に近い値を示す。
- snappyHexMesh により、物体形状に合わせてメッシュを生成することができる。

参考文献

- 1) OpenFOAM: <http://openfoam.com/>
- 2) 日本流体力学学会編、「流体力学ハンドブック」、丸善株式会社、1987
- 3) 基礎流体力学編集委員会編、「基礎流体力学」、産業図書株式会社、2006