

OpenFOAM を用いたステップ後方のはく離-再付着流 Separation and reattachment flow and of backward-facing step using OpenFOAM

○菅谷陽一¹,大竹智久²,村松旦典²*Yoichi Sugaya¹,Tomohisa Ohtake²,Akinori muramatu²

Abstract: OpenFOAM was attracted attention as a three-dimension computational fluid dynamics. In this report, we performed numerical calculation about the quasi-two-dimensional backward-facing step using OpenFOAM. We examined the relationship between Reynolds number and reattachment point. The calculations were performed for 2 mm step height in the range of Reynolds number $100 \leq Re \leq 600$. The flow field was compared with our numerical results and with previous results; numerical and experimental results. We confirmed that OpenFOAM was in agreement about previous results in the range of low Reynolds in the laminar region.

1.はじめに

流れ場の詳細を捉える有力な手段として、数値計算 (CFD :Computational Fluid Dynamics) がある。近年のコンピュータ性能の発達および低廉化に伴い、数値計算も発展し現象を精度よく再現できるようになってきている。

流体の数値計算においては、OpenCFD 社より OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation) がオープンソース CFD ツールボックス^[1]として提供されている。また、計算に必要なソルバやユーティリティは準備されているため、ジオメトリを作成し、境界条件の設定を正しく行えば計算が可能となる。ステップ後方は、はく離-再付着が生じるもっとも単純な流れの一つである。ステップ壁側の再付着位置はレイノルズ数に大きく依存し、再付着距離の変化から流れの様相が層流から乱流へ遷移することが知られている。OpenFOAM による流体計算の結果を検証した報告は少ないのが現状である。そこで本研究では、ステップ後方の流れでの流入の速度を変化させ、ステップ下流に生じる再付着位置の関係について考察したので報告する。

2. 数値計算法

2.1 支配方程式

支配方程式は非定常、三次元、非圧縮性の流れに対する連続の式と Navier-Stokes 方程式である。

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

ここで、 $\phi = \rho \mathbf{U}$ である。乱流モデルなどを用いる場合でも同様に OpenFOAM のクラスを用いることにより支配方程式を簡潔に記述できるため、修正も容易である。

2.2 計算手法及び計算領域

支配方程式を離散化し有限体積法で解く。計算アルゴリズムは PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) 法を用いる。PISO 法は非定常解析用に SIMPLE 法の反復計算を削減したアルゴリズム^[2]である。取り扱う流れ場が非圧縮性ニュートン流体であるため、icoFoam (非圧縮性、層流の速度-圧力ソルバ)をソルバとして使用した。方程式の各項の離散方法は、対流項は中心差分、圧力項と粘性項は線形補間、時間微分は Euler 法を用いる。座標はステップの下壁を原点とし、流れ方向に x 、断面方向に y とした。境界条件は、OpenFOAM のチュートリアルで使用されている設定を参考とした。

計算格子はステップ下壁と流れ方向の下壁付近を密にし、ステップ上流の高さはステップ高さの 7.5 倍をとる。計算格子は、六面体を用いる。ステップ下壁に 20 点、流れ方向の下壁 300 点をとる。OpenFOAM は 3 次元を取り扱うため、疑似的に 2 次元として表現しているため、スパン方向に 1 点、総格子数は 47250 格子となる。OpenFOAM は基本的に三次元の流れを取り扱うため、二次元の流れの場合は z 軸方向の物理量を 0 とする。ステップ高さを $2H$ 、入口からステップまでの距離 $70H$ 、ステップから出口までの距離 $60H$ とした。代表寸法はステップ上流の幅 $H = 1$ [mm] とした。代表速度はステップ上流の断面平均速度 U を変化させ、レ

レイノルズ数を変化させた。ステップ高さによるレイノルズ数 $Re_H = 100 \sim 600$ の層流領域とした。なお、fig.1 中には代表として下向きに流れが再付着した場合を示してあり、再付着位置を X で示してある。

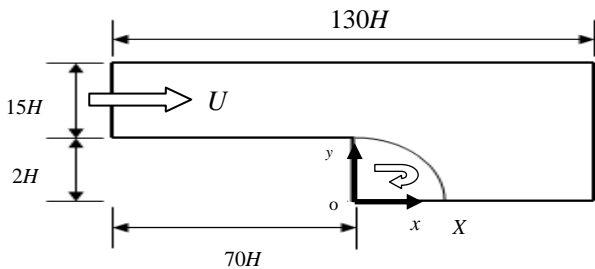


Fig. 1 Outline of backward-facing step.

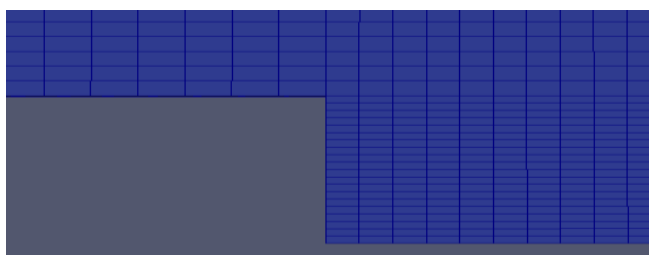


Fig. 2 Computational domain.

3. 計算結果および考察

代表例として、 $Re_H = 100$ 及び 600 の場合の流線を fig.3 に示す。ステップ下流の速度分布は逆流領域が存在しており、はく離循環渦領域が生じている。はく離循環渦領域はレイノルズ数によって範囲が変化していく。

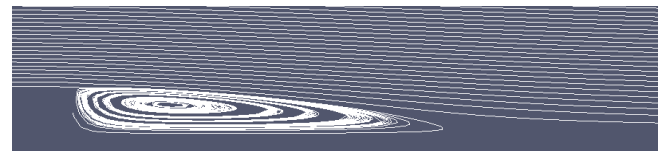
ステップ後方の流れでは下流の上壁にはく離循環渦が形成されるが、ステップと上壁が十分離れているので上壁にはく離循環渦が形成されない。

計算で求めた再付着位置を他の著者^{[3]-[5]}と比較したレイノルズ数と再付着位置との関係を fig.4 に示した。 $Re_H = 100 \sim 300$ では再付着位置が過去の結果とやや異なった。ステップ上流の高さの影響によって再付着位置が変化すると報告^[6]されている。他の研究報告と比較すると大きいため増大したと考えられる。 $Re_H \geq 400$ ではレイノルズ数の依存性が減少し、ステップ上流の影響が減少したためと考えられる。

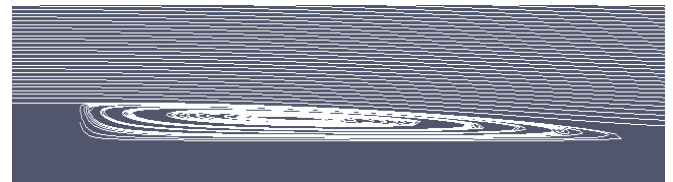
4. 結論

再付着位置、はく離循環渦はレイノルズ数に依存することが分かった。層流領域におけるレイノルズ数が低い範囲において OpenFOAM は使用できることを確認した。今後は、ステップ後方の再付着から、

NACA0012 翼型の翼上面での層流はく離泡の形成に適用し、翼型の作成等を検討していく。



(a) $Re = 100$



(b) $Re = 600$

Fig. 3 Streamline of $t=1$.

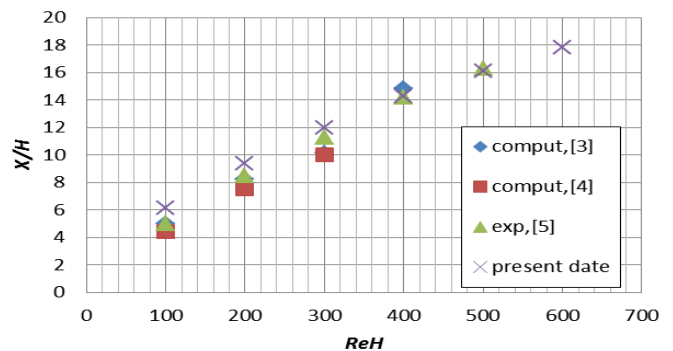


Fig. 4 Reattachment position.

参考文献

- [1] OpenFOAM: <http://openfoam.com>
- [2] H.K.Versteeg & W.Malalaskera: 数値流体力学, 2011, 第2版, p207-211.
- [3] T.G.Elizarova: Separating Flow Behind a Back-Step. Part I. Quasi-Hydrodynamic Equations and Computation of a Laminar, 2004, P.12.
- [4] Sparrow E.M: PC solutions for heat transfer and fluid flow downstream of an abrupt, asymmetric enlargement in a channel. Number. Heat Transfer, 1987, Vol. 12, P. 19-40.
- [5] Armaly B.F: Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow. J. of Fluid Mech, 1983, Vol.127, P.473-496.
- [6] Barton.I.E :Laminar flow past an enclosed and open backward-facing step. Phys.Fluids, 1994, Vol.6, P.4054-4056.