

卒業論文要旨

剥離制御を目指した回転体付きフラップ周りの流体解析

システム工学群

航空エンジン超音速流研究室 1220041 尾崎 絢音

1. 序論

航空機には主翼の後部についている後縁フラップという高揚力装置がある⁽¹⁾。これらは翼の湾曲の増加に加え、よく面積の増加によって低速度での飛行時に大きな揚力を獲得する。これら高揚力装置の性能が向上するとより安全な離着陸や滑走距離の短縮に繋がる。高揚力装置の性能向上の手段の一つにフラップ角を大きくするという方法がある。しかしフラップ角を大きくするとフラップ上面に発生する剥離を制御する必要がある。

剥離を制御するために様々なフラップの種類が存在する。主翼前縁の一部分を前方に稼働させることで主翼との隙間を作り、翼下面側の気流の一部を上面に流すことで上面の層流境界層にエネルギーを供給して剥離を遅らせるスラットや、主翼とフラップの間に隙間を空けることにより、翼上面に前方の翼下面の気流を流し剥離を遅らせるスロテッドフラップ⁽²⁾などがある。スロテッドフラップについては、より効果を高めるよう隙間を2つに増やしたダブルスロテッドフラップ⁽²⁾や3つに増やしたトリプルスロテッドフラップ⁽²⁾もある。

上記のスロテッドフラップを用いて、先行研究で佐々木⁽³⁾はフラップ上面に回転円筒を設置することで、回転円筒の周速が主流速度の2倍のときフラップ上面に発生する剥離を抑制した。

本研究では、先行研究⁽³⁾で検証した回転円筒による剥離制御方法を参考に、回転円筒ではない他の形状にすることでより効率よく剥離を制御する方法を提案する。具体的には上記のスロテッドフラップを用いてフラップ上面に円筒ではない回転する模型を埋め込むように設置したモデルの数値計算を行い、回転する模型がフラップの剥離制御に効果的かどうかを評価する。

2. 計算手法

数値計算には連続体力学の前処理用のC++製ツールボックスであるOpenFOAM(Open source Field Operation And Manipulation)を用いた。その中で圧縮性乱流のための過渡ソルバーであるrhoPimpleDyMFoamを用いて計算した。空間の離散化手法には有限体積法を用い、方程式の移流項には二次精度風上差分法、粘性項には二次精度中心差分法を用いた。乱流モデルには $k\omega$ -SSTを採用した。

3. 図および表の書き方

計算対象の翼モデルは図1の翼型がNLR 7301 Multi Element Airfoilのフラップ前縁から約85%地点に最大直径が約10.06mmの回転体が埋め込むように設置されたモデルである。諸元として、基準翼弦長0.57m、フラップ翼弦長が基準翼弦長の32%、フラップと母翼の最短距離が基準翼弦長の2.6%、フラップ前縁と母翼後縁間の距離が基準翼弦長の5.3%となっている。そしてフラップ角は40degとなっており、一般的な旅客機のフラップ角は10degから20deg程度であるため、大きなフラップ角となっている。

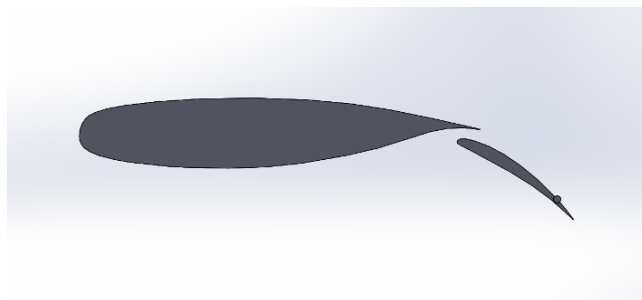


Fig.1 NLR 7301 Multi Element Airfoil with Cylinder.

4. 計算格子及び境界条件

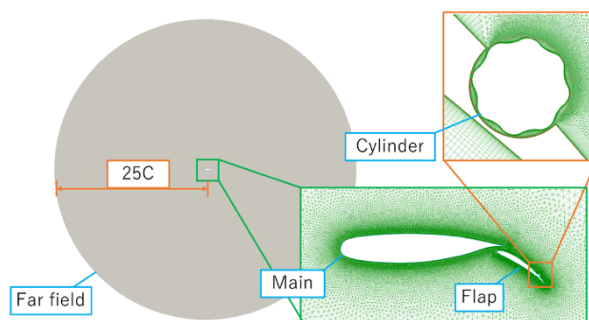


Fig.2 Computational grid and Boundary.

計算領域は翼モデルを中心に基準翼弦長の50倍の長さの半径を持つ円形の計算領域である。図2に対応する境界条件を表1に示す。回転体の回転速度は主流流速の0倍(つまり回転していないとき)、1倍、2倍とした。

Table 1 Boundary conditions.

Boundary surface	Boundary condition
Far field	Uniform flow
Main	Viscous wall
Flap	Viscous wall
Cylinder	Viscous wall

5. 主流条件

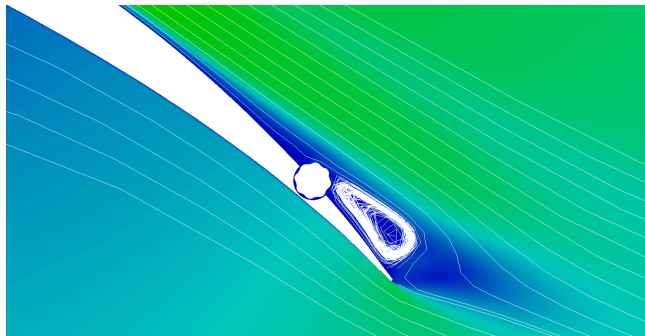
主流条件を表2に記載する。迎角 $\alpha = 2$ とし、主流流速を63[m/s]とした。

Table 2 Main flow condition.

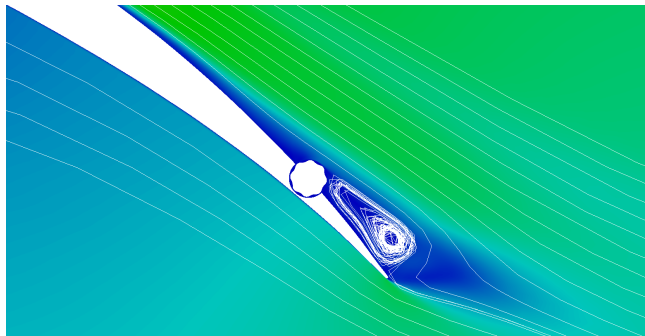
Boundary surface	Boundary condition
Inflow velocity[m/s]	$U=63$ [m/s]
Turbulent model	$k\omega - SST$
Turbulent intensity[%]	2.6×10^{-6}
Turbulent energy k	9.0×10^{-9}
Specific dissipation rate ω	1.0×10^{-6}
Courant number	0.6

6. 結果と考察

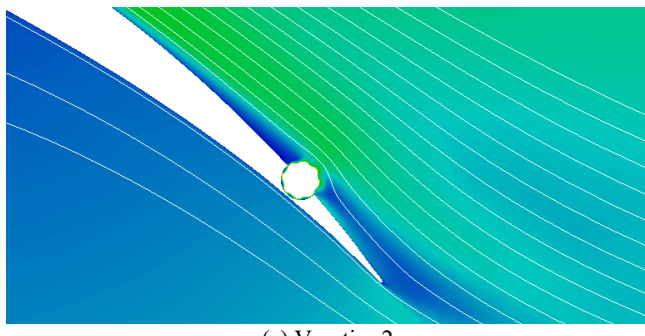
回転体の流速分布及び流線を速度比 $V_ratio=0, 1, 2$ のとき図 3 に示す。



(a) $V_ratio=0$



(b) $V_ratio=1$



(c) $V_ratio=2$

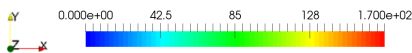
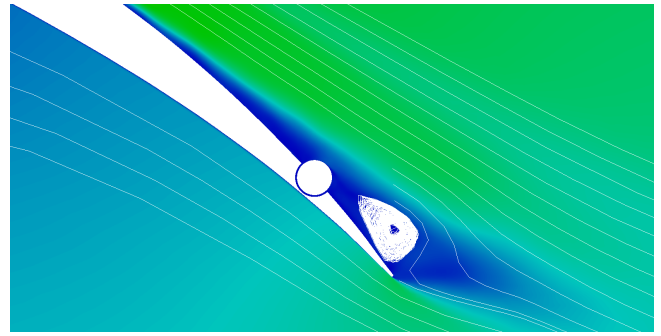
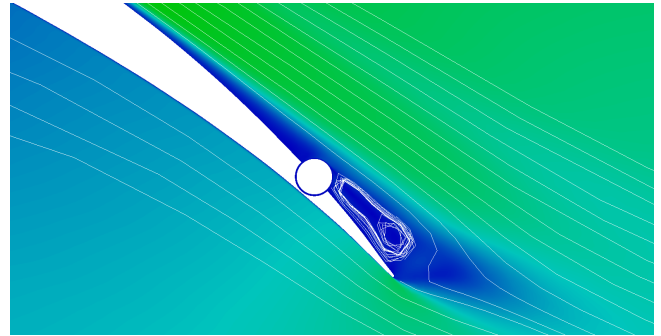


Fig.3 Velocity distribution and streamlines in a rotating body.

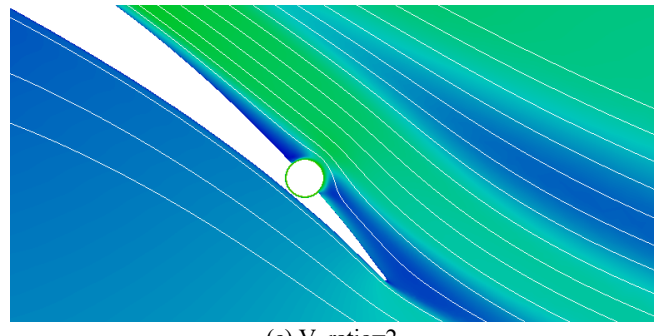
円筒の流速分布及び流線を速度比 $V_ratio=0, 1, 2$ のとき図 4 に示す。本研究で採用した回転体、先行研究⁽³⁾で採用した円筒どちらも速度比 $V_ratio=2$ のときフラップ上面に発生する剥離が抑制され、低速領域も減少したことが分かる。



(a) $V_ratio=0$



(b) $V_ratio=1$



(c) $V_ratio=2$

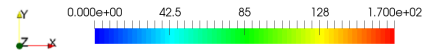
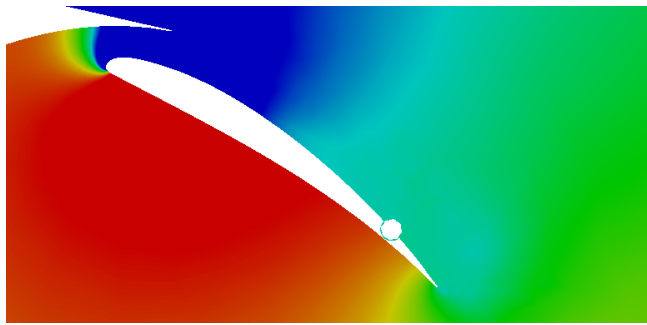
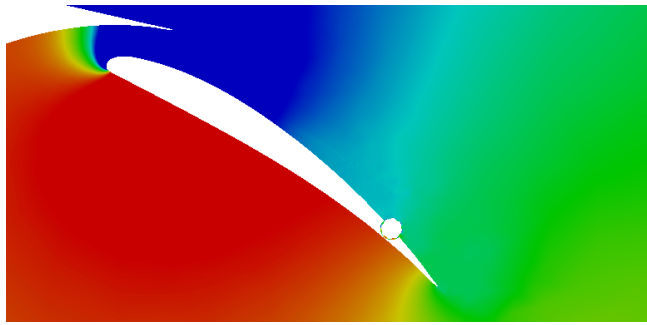


Fig.4 Velocity distribution and streamlines in a cylinder.

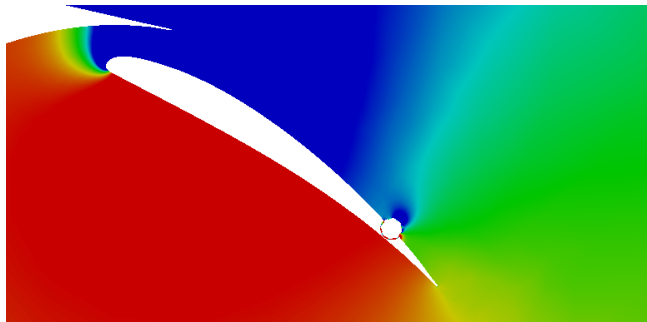
次に回転体の C_p 分布図を図 5 に、円筒の C_p 分布図を図 6 に示す。(a)では図 5, 6 どちらもフラップの上流に負圧が確認できる。(b)では図 5, 6 どちらも上流で確認できた負圧が少し下流付近に広がっていることが確認できる。(c)では図 5, 6 どちらも設置した回転体付近にまで負圧が広がっていることが確認できる。(c)ではわずかではあるが、円筒よりも回転体の方が負圧部分が大きいことが確認できる。



(a) $V_ratio=0$



(b) $V_ratio=1$



(c) $V_ratio=2$

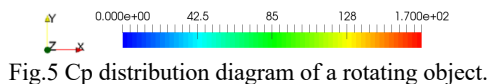
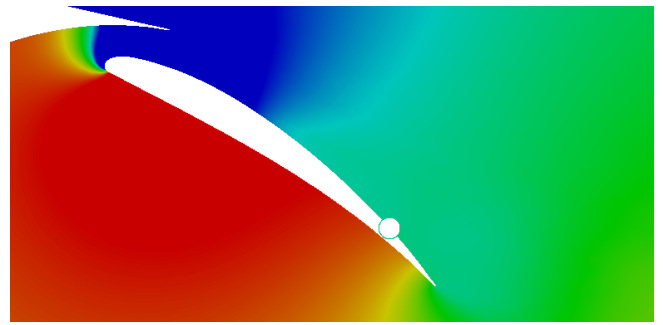
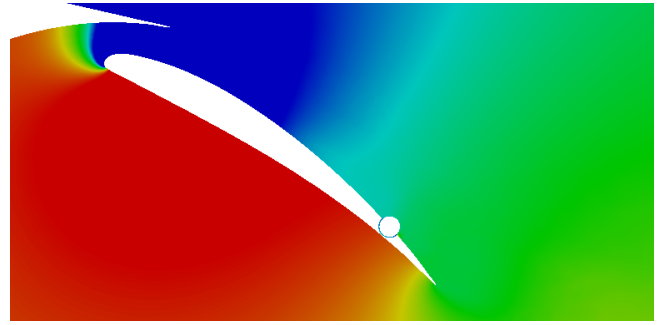


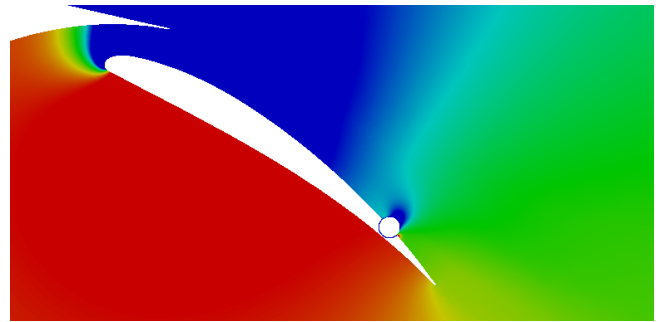
Fig.5 Cp distribution diagram of a rotating object.



(a) $V_ratio=0$



(b) $V_ratio=1$



(c) $V_ratio=2$

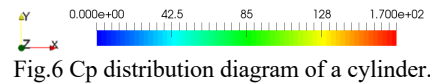


Fig.6 Cp distribution diagram of a cylinder.

次に回転体と円筒を設置したことによる空力性能への影響を定量的に言及する。図7に母翼とフラップを合わせた揚力係数 C_l と V_ratio の関係を示す。回転体と円筒との揚力係数 C_l に大きな差はないが、 $V_ratio=2$ のときわずかに回転体の方が大きいことが分かる。図8に母翼とフラップを合わせた抗力係数 C_d と V_ratio の関係を示す。抗力係数 C_d は回転体と円筒どちらも $V_ratio=2$ のとき回転体なしよりも小さくなるが、回転体と円筒を比較すると円筒の方が小さいことが分かる。図7と図8の結果から揚抗比 L/D を図9に示す。 $V_ratio=2$ のとき回転体と円筒どちらも揚抗比 L/D が回転なしを上回るが、抗力係数 C_d が円筒の方が小さいため揚抗比 L/D は円筒の方が大きいことが分かる。

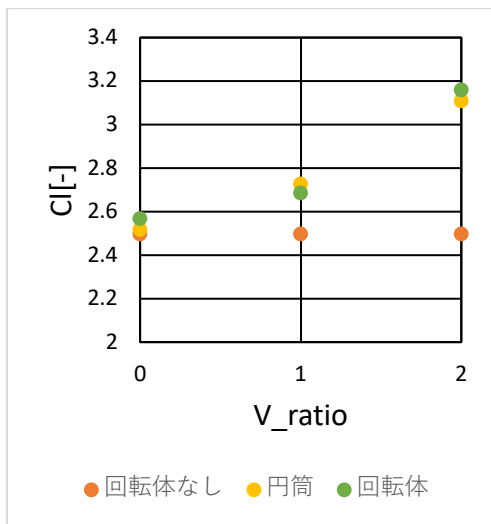


Fig.7 Cl value for each V_ratio.

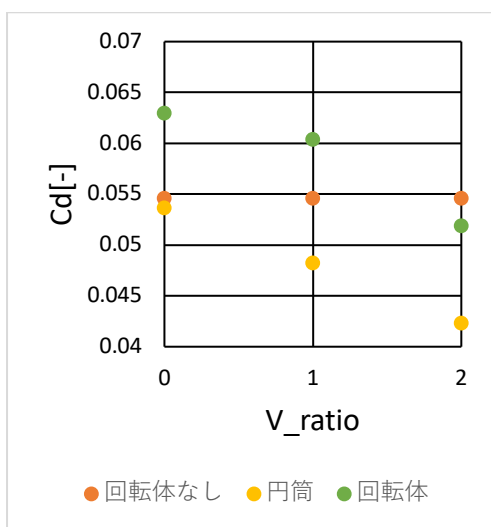


Fig.8 Cd value for each V_ratio.

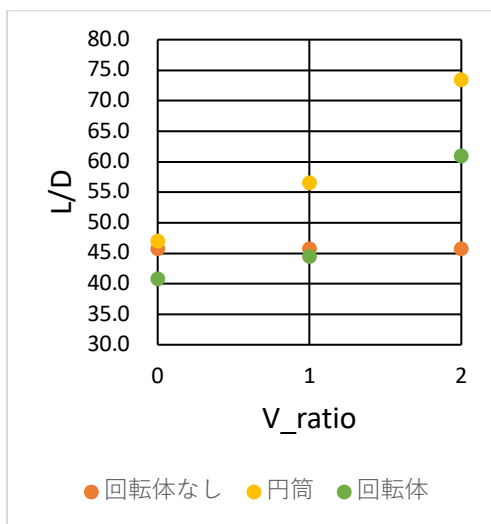


Fig.9 L/D value for each V_ratio

以上の結果から、先行研究⁽³⁾の円筒と比較して効率が良くなったとは言えないが、剥離を制御する方法として本研究での回転体は有効であると言える。図8での抗力係数が大きくなった要因として、本研究でのモデルが流れの攪拌をねらった凹凸の形状であることが考えられる。円筒より複雑な形状になったことで抗力が大きくなったうえ、凹凸形状の軸とした径を先行研究⁽³⁾と等しくしたため凹凸が小さく、想定していたより流れを攪拌することができなかったと考えた。

先行研究⁽³⁾では、円筒は実際に回転しているのではなく壁面に平行な向きに速度の分布のある移動壁条件を適用することで回転による円筒近傍の流れへ運動量を付加する効果を模擬していたため、解析できる形状が円筒のみであった。しかし本研究では格子を回転領域と静止領域に分け、回転領域を剛体回転させる機能を用いて、回転体を実際に回転させて解析することができた。よって結果的に先行研究⁽³⁾を改善とまでには至らなかったが、円筒以外の様々な回転体モデルを導入できるようになったことに意義があると考えた。

7. 結言

本研究はフラップ上面に発生する剥離を円筒より効率よく制御する方法として、凹凸形状の回転体による剥離制御法提案し、流れ場及び空力性能への定量的比較を行った。その結果、円筒より効率よく剥離を制御することはできなかったが、本研究で使用した回転体モデルも剥離制御に有効であることが分かった。

今回着目した回転体は攪拌をねらって凹凸形状にしたが、想定していたより攪拌の効果は得られなかった。今後の展望としては径の大きさを変えて凹凸部分を大きくする、円形に沿った形ではない新しい形状のモデルを使用するなど、大きな攪拌効果を得られるような形状で試すことが必要であると考えられる。

文献

- (1) 航空機のメカニズムと裏側, TECH+, 井上孝司, 2016, https://news.mynavi.jp/techplus/article/aero_tech-10/
- (2) 航空実用辞典, JAPAN AIRLINES, 1997, <https://www.jal.com/ja/jiten/dict/p118.html#02-02a-3>
- (3) 佐々木蓮, 高知工科大学修士論文, 2020, “回転円筒を用いたフラップ周りの剥離流れ制御”