

卒業論文要旨

航空機のフラップに取り付ける剥離制御用回転体の形状検討

Investigation of the Shape of a Rotating body for Peeling Control to be Attached to Aircraft Flaps

システム工学群

航空エンジン超音速流研究室 1230032 大前 友秀

1. 序論

航空機は安全に離着陸するために巡航時より低速で飛行する必要がある。しかし、低速飛行では十分な揚力を得ることができないため高揚力装置を用いることが多い。代表的な高揚力装置として翼の前縁に取り付けるスラットと、後縁に取り付けるフラップがある。スラットは、高迎角時に生じる主翼前縁の過大な負圧を抑え、失速迎角を遅らせることで、最大揚力を増す。フラップは、同一迎角における翼面積の増加や、主翼の湾曲の増加によって揚力を増す。ところが主翼の湾曲の増加によってフラップ上面に剥離が発生すると、失速に繋がる危険性があるため、剥離を制御する必要がある。

剥離制御の方法には、翼表面を動かすことで、翼表面付近の流れに運動量を与える表面移動法⁽¹⁾や、ボルテックスジェネレーターという小さな突起物を取り付けることで、意図的に乱流を発生させ、流れの混合を引き起こし、境界層に運動エネルギーを与え剥離を遅らせる方法⁽²⁾がある。

先行研究で佐々木⁽³⁾は、参考論文⁽⁴⁾と同型の翼型 NLR 7301 Multi Element Airfoil を用いて、母翼とフラップ周りの RANS 解析を行い、フラップ表面に回転円筒を取り付けることで、運動量を与え剥離の制御可能を示した。主流条件は迎角 2 度でマッハ数 0.185、レイノルズ数 2.51×10^6 である。佐々木は回転円筒に移動壁条件を適用し、回転を模擬した。回転円筒の回転速度が主流速度の 2 倍以上であればフラップ上面に発生する剥離を抑制可能である。

しかし、回転体の周速度が主流速度の 2 倍の速度で回転するには相当な速度になる。そこで、本研究では回転体の周速度を主流速度と同等もしくはそれ以下で剥離を制御できる形状を検討する。回転体による表面移動法に加え、回転体をディンプル形状にすることで意図的に流れをより攪拌し、剥離の制御に効果的かを評価する。

2. 数値計算手法

数値計算ソフトには OpenFOAM を使用した。ソルバーは非圧縮性乱流解析ソルバーである pimpleDyMFoam を用いた。支配方程式はレイノルズ平均ナビエーストークス方程式と連続の式である。空間の離散化には有限体積法を用い、時間微分項にはオイラー法、対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。また、速度圧力解法には PIMPLE 法を用いた。

3. 計算対象

3.1 翼モデル

計算対象の翼モデルには、NLR 7301 Multi Element Airfoil を用いた。この翼型に先行研究⁽³⁾で選定されたフラップ前縁から約 85%位置に最大直径約 9.6mm の回転体を埋め込むように取り付けた。回転体を取り付けた翼モデルを図 1 に示す。また、翼モデルの諸元を表 1 に示す。

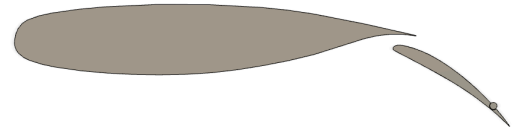


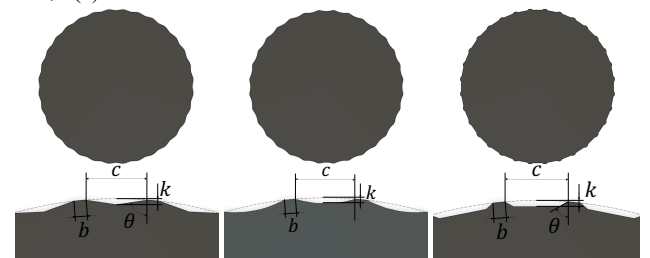
Fig.1 NLR 7301 Multi element Airfoil with Rotating body

Table.1 Wing model specifications

Basic airfoil chord[m]	0.57
Flap chord[%]	32
Flap angle[deg]	40
Flap gap widths[%]	2.6
Overlap[%]	5.3
Cylinder position[%]	84.375
Cylinder max diameter[mm]	9.6388
Gap between flap and cylinder[mm]	0.5

3.2 回転体形状

回転体形状には、武藤⁽⁵⁾による研究で用いられたディンプル形状を参考にした。ディンプルの形状を図 2 に示し、諸元を表 2 に示す。各ディンプルの形状は(a)が円錐型、(b)が円弧型、(c)が台形型である。



(a)Cone (b)Arc (c)Trapezoid

b: distance c: width k: depth d: diameter

Fig.2 Shape of dimple for Rotating body

Table.2 Dimple shape specifications

	b/d	c/d	k/d	k/c	θ
(a)	0.0152	0.0828	0.00794	0.0958	81.451°
(b)					—
(c)					60°

4. 計算格子及び境界条件

計算領域は翼モデルを中心とした基準翼弦長の 25 倍を半径とした円で構成した。総格子点数は約 14 万点である。図 3 に対応する境界条件を表 3 に示す。本研究では SlidingMesh を用いて回転体を実際に回転させて計算を行った。SlidingMesh は格子を回転領域と静止領域に分け、回転領域を実際に回転させることで回転を再現する。OpenFOAM の境界設定では、回転領域(Rotating region)と静止領域

(Stationary region)の境界(図 3 の赤線)を不整合周期境界とした。また、回転体の境界をMovingwall とし、移動速度を 0 とした。SlidingMesh と併用することで回転を再現した。

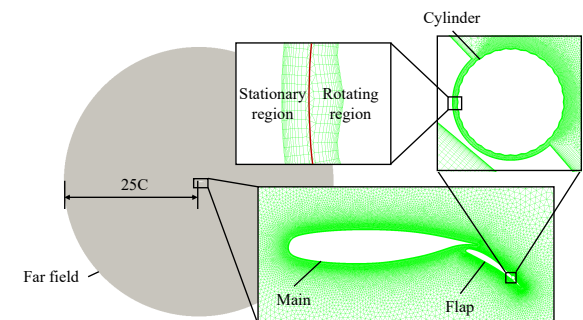


Fig.3 Computational grid and Boundary

Table.3 Boundary conditions

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

5. 計算条件

主流条件を表 4 に示す．主流速度は約 63m/s である．回転体の周速度を主流速度と等しい速度にして計算を行った．また，最大クーラン数を 0.6 に設定した．

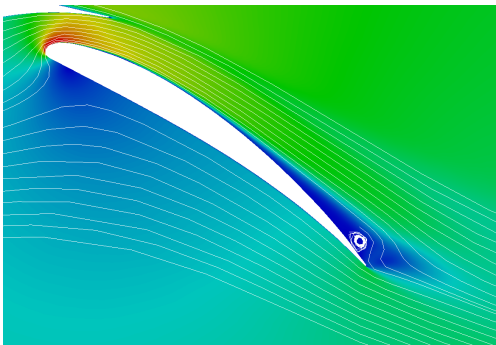
Table.4 Main flow condition

Reynolds number[-]	2.51×10^6
Mach number[-]	0.185
Angle of attack[deg]	2
Reference pressure[Pa]	103512
Temperature[K]	288.15
Turbulent energy[m ² /s ²]	9.0×10^{-9}
Specific dissipation rate[1/s]	1.0×10^{-6}
Density[kg/m ³]	1.2514
Kinematic viscosity[m ² /s]	1.43×10^{-5}

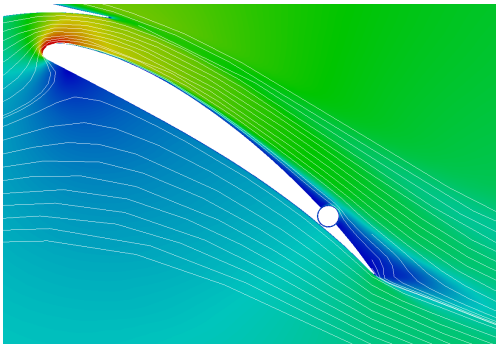
6. 計算結果及び考察

図 4 に回転体未設置時及び回転体設置時のフラップ周りの平均速度分布と流線を示す．(a)より，フラップ後縁側に剥離が発生しているのに対して，(b)，(c)，(d)では，剥離が抑制できているのが確認できる．また，(a)より(b)，(c)，(d)の方がわずかであるが低速領域をフラップに沿う方向に流すことができている．そのため，主流速度と同等の周速度の回転体を実際に回転することで流れに運動量を与えることができていると考える．

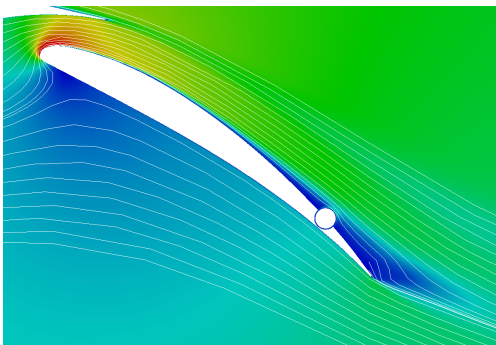
また，図 5 に回転体未設置時及び回転体設置時のフラップ周りの平均圧力分布とカラーバーを 50 等分した等高線を示す．カラーバーの数値は OpenFOAM の設定上，圧力*p*を密度*ρ*で割った値である．(a)は低圧領域がフラップ後縁まで広がっているが，(b)，(c)，(d)は回転体より後方で圧力の上昇が確認できる．



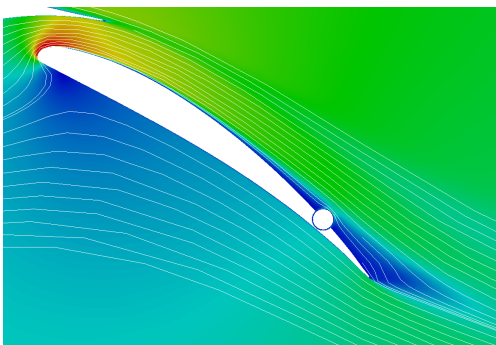
(a) No cylinder



(b) Cone



(c) Arc



(d) Trapezoid

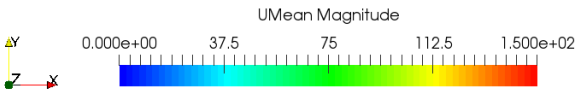
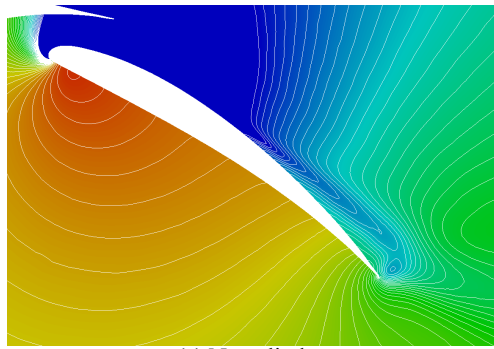
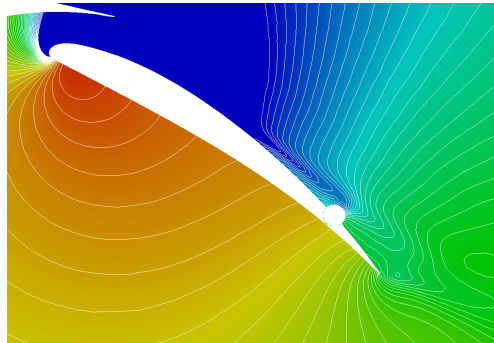


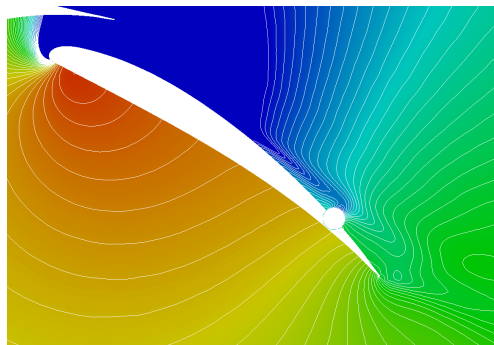
Fig.4 Average velocity distribution and streamline



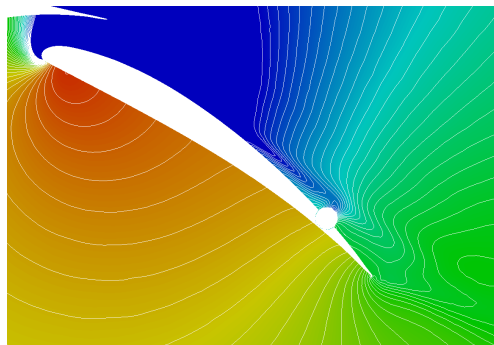
(a) No cylinder



(b) Cone



(c) Arc



(d) Trapezoid

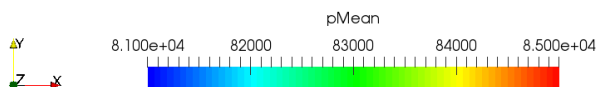


Fig.5 Average pressure distribution and contour

各回転体形状の揚力係数 C_l と抗力係数 C_d の関係を図 6 に示す。図 6 より、回転体未設置時より回転体設置時の方が C_l は増加し、 C_d は減少したことが確認できる。つまり、揚抗比 L/D が大きくなっている。流れ場に発生していた剥離を抑制できているため、圧力抵抗が減少したことが要因であると考ええる。また、回転体のマグヌス効果により揚力が増加し、同時に流れの方向を翼に沿う方向へ変更したためであるとも言える。

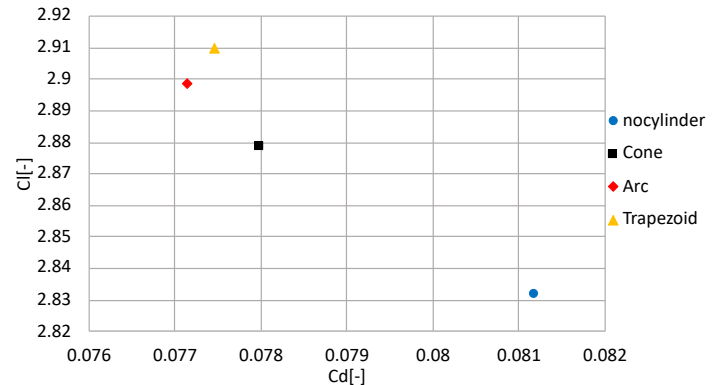


Fig6. Relationship between C_l and C_d for each rotating body

7. 結論

本研究では、回転体によるフラップ上面の剥離制御における回転体形状の検討として、3 パターンのディンプル形状を回転体に適用した。そして、回転物体を含む CFD を実行し流れ場及び空力性能の比較を行なった。その結果、先行研究⁽³⁾では制御困難であった低迎角の剥離であっても、主流速度と同等の周速度で剥離を抑制し、空力性能の向上を確認することができた。よって回転体の形状としてディンプルは有効である。しかし、ディンプル形状による明確な違いを確認することができていない。ディンプル形状の攪拌効果を数値的に調査することでより効果的な形状を見出すことが可能かもしれない。

また、主流速度と等しい周速度で剥離を抑制できたことから、機械的な回転機構を実機に搭載せずとも、主流の流れに従って受動的に回転することで剥離を制御できる可能性を示した。より安定で安全に離着陸可能となれば空港滑走路の距離の減少など敷地の有効活用にも貢献できる可能性もある。

文献

- (1) 汪運鵬, 中村佳朗, “表面移動法によるフラップ表面の剥離制御”, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 58, No. 679, pp. 239-244, 2010.
- (2) Adam Jirasek, “Vortex-Generator Model and Its Application to Flow Control”, *Journal of Aircraft*, Vol. 42, No. 6, pp. 1486-1491, 2005.
- (3) 佐々木蓮, “回転円筒を用いたフラップ周りの剥離流れ制御”, 高知工科大学修士論文, 2020.
- (4) Seyedeh Sheida Hosseini, C. P. van Dam and Shishir A. Pandya, “Computational Investigation of Nominally-Orthogonal Pneumatic Active Flow Control for High-Lift Systems”, 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2018-0559, 2018.
- (5) 武藤浩司, 岡永博夫, 青木克巳, “ディンプルの形状がゴルフボールの周りの流動特性に及ぼす影響”, 東海大学紀要工学部, Vol. 48, No. 1, pp. 131-136, 2008.