

3C05 低レイノルズ数における 平板に設けた突起まわり流れの3次元解析

○大崎歩乃花, 佐々木大輔（大阪公立大学）, 川本裕樹（東海大学）,
岡本正人（金沢工業大学）, 佐々木悠斗, 大塚光（金沢大学）, 伊神翼（東北大学）

Three-Dimensional Analysis of the Flow Around Installed Protuberances on a Flat Plate at Low Reynolds Numbers
Honoka Osaki, Daisuke Sasaki (Osaka Metropolitan University), Yuki Kawamoto (Tokai University),
Masato Okamoto (Kanazawa Institute of Technology), Haruto Sasaki, Hikaru Otsuka (Kanazawa University),
Tsubasa Ikami (Tohoku University)

Key Words : Vortex, CFD, Unsteady Flow

Abstract

In a flow field with low Reynolds numbers, thin airfoils such as flat plates are said to be aerodynamically advantageous compared to streamlined ones, and it is believed that those characteristics can be further improved by installing small protuberance which imitate vortex generators. Therefore, in this study, flat plates with various types of protuberances attached to their surface were defined using the Level set function, and the aerodynamic effects of the protuberances were investigated through three-dimensional numerical calculation, as well as its impact on the flow field. As a result, it was found that the aerodynamic performance varies due to the distribution of laminar separation vortices caused and affected by the protuberances.

1 はじめに

近年、災害地の監視や生態系の観測に向けて、小型無人航空機利用の関心が高まっている[1]. 小型無人機は、小型で持ち運びが容易であり、運用に大きな費用が掛からないといった長所がある。小型無人航空機の飛行レイノルズ数は 10^3 - 10^4 で、一般的な航空機のレイノルズ数 10^6 - 10^7 よりも低いため、低レイノルズ数領域に分類される。一般的に、レイノルズ数 10^6 - 10^7 では流線形の翼型が空力的に有利である。これに対し、低レイノルズ数域では高レイノルズ数域よりも層流剥離が生じやすく、流線形翼型よりも平板や薄翼の方が、空力性能が高いことが知られている[2].

低レイノルズ数領域では層流剥離泡が翼上面に形成され、翼型の空力性能を左右する。低レイノルズ数域で翼型の迎角を上げていくと、層流剥離泡が崩壊し、大規模な剥離を生じることがある。このとき、翼型に働く揚力が大幅に減少する失速と呼ばれる現象が生じる。航空機設計では失速が生じる迎角を可能な限り高くすることが望ましい。

低レイノルズ数領域で剥離を抑制する手法の一つとして、ボルテックスジェネレータ[3]を翼上面に取り付けることが有効であると知られている。そこで、平板に小さな突起を設置し、形状と配置を工夫することで平板翼の空力特性を改善できる可能性がある。

著者らが行った過去の2次元解析[4]では、平板の上面に半円状の突起を設置することで剥離渦が生じ、揚力が増加することがわかった。また、迎角によって最大揚力を得られる突起の設置位置・設置数が異なることが判明した。一方で、この計算は2次元解析であり、3次元的な突起形状と平板翼型の空力性能の関係は未知である。

そこで本研究では、3次元解析を通して、半円柱突起及び半球突起を用いた突起付き平板に対して計算を行い、より空力性能を改善するような突起形状を探索する。また、突起周りの流れ場を明らかにし、2次元解析結果と同様に、剥離渦生成により揚力が増加するメカニズムが3次元でも確認できるか調べる。

2 研究手法

平板及び4種類の突起付き平板に対して、非圧縮性流体解析ソルバにより計算を行い、その空力係数と剥離の様子について比較する。

2.1 解析モデル

解析対象として、図 1(a)に示すような翼弦長 $c=0.1\text{m}$ で厚みが $1.2\%c$ である平板(Plane)を、Level set関数[5]により定義した。また、この平板に設置する突起の種類及び数を変えることで、図 1(b)~(e)に示すような4種類の突起付き平板を、Level set関数を用

いてそれぞれ定義した. 突起付き平板は, 半径 $2.5\%c$ の半円柱が1つある形態(Cylinder)と, 半径 $2.5\%c$ の半球が1つ (Sphere_1) と, 半球が3つ (Sphere_3), 5つ (Sphere_5)ある形態である. 過去の研究[4]に基づき, 2次元と3次元による突起形状の違いを見るために設定した. それぞれの突起は前縁から $25\%c$ の位置に取り付けた. 寸法の詳細を図 1に示す.

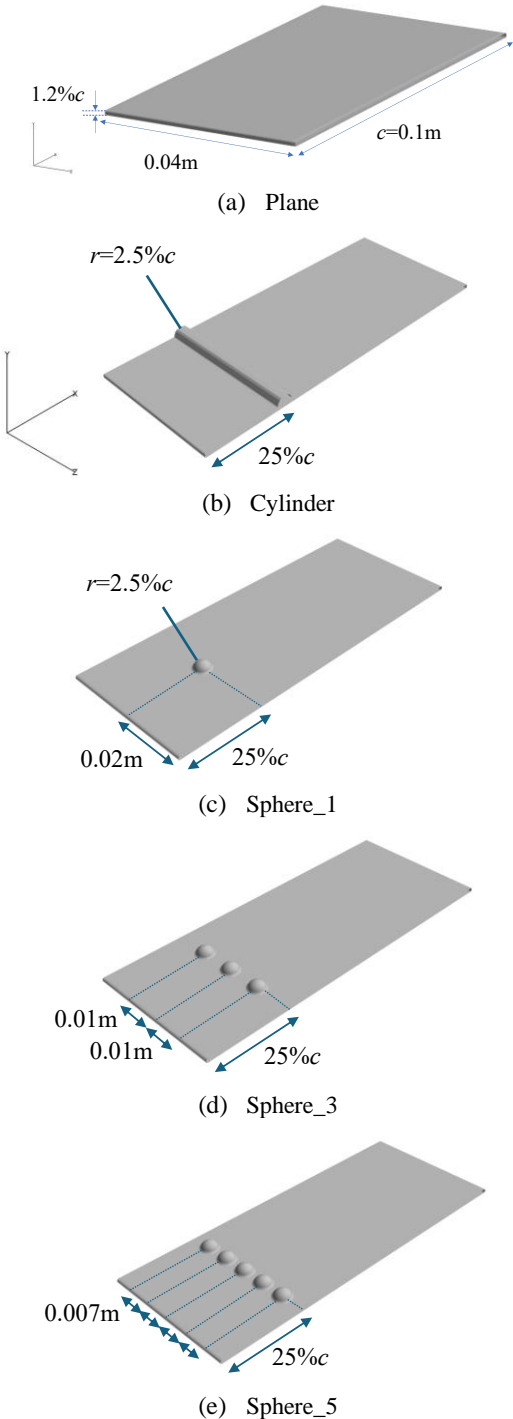


図 1 本研究の解析対象

2.2 解析ソルバ

本研究では, 完全等間隔直交格子法[5]を用いた3次元非圧縮性流体解析ソルバにより, レイノルズ数 1.0×10^4 の流れにおける解析を行う. ここで, 本研究で用いた非圧縮流体解析ソルバの計算法を表 1に示す.

表 1 非圧縮性流体解析ソルバの計算法[6]

支配方程式	非圧縮性Navier-Stokes方程式
対流項（空間精度）	5次精度WENO法
粘性項（空間精度）	2次精度中心差分
対流項（時間精度）	3次精度TVD Runge-Kutta法
粘性項（時間精度）	3次精度TVD Runge-Kutta法
速度・圧力連成	Fractional Step法
圧力反復解法	BiCGStab法
物体境界	Ghost Cell法
計算格子	等間隔直交格子

2.3 計算条件

本研究の計算条件を表 2に示す. また, 各面の境界条件を表 3に, 計算領域を図 2に示す. ここで, 物体表面は埋め込み境界法を用いて滑り無し条件を課している.

表 2 本研究の計算条件

計算領域	$0.8\times 0.4\times 0.04[\text{m}^3]$
格子幅[m]	5.0×10^{-4}
格子数	1.02×10^8
迎角[°]	0, 1.5, 3, 4.5, 6

表 3 境界条件

境界	速度	圧力
流入 (-X)	Dirichlet条件 (迎角考慮)	Neumann条件 (勾配0)
流出 (+X)	Neumann条件 (勾配0)	Dirichlet条件 ($p=0[\text{Pa}]$)
その他	Neumann条件 (勾配0)	Neumann条件 (勾配0)

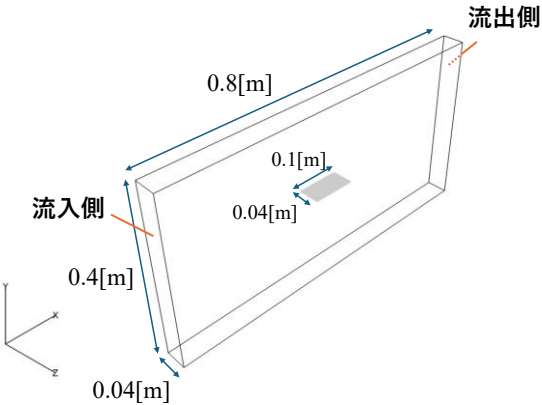


図 2 計算領域

また、図 2 に示すように、本研究において x 軸は正の向きを主流方向、 y 軸は正の向きを鉛直上方向、 z 軸はスパン方向として、それぞれ定義する。

3 結果と考察

図 1 で示した4種類の突起付き平板及び平板単体で突起のない形状に対して、表 2 に示す計算条件のもと、各ケースにおいて迎角を 0° から 6° まで 1.5° 刻みで変え、その都度非定常解析ソルバで計算を行った。以下にその結果を記す。

図 3 から図 5 は迎角ごとの各ケースの抗力係数、揚力係数、揚抗比をそれぞれ示す。各図の横軸は迎角 $\alpha[^\circ]$ 、縦軸は各空力係数を表す。また、迎角ごとの各ケースの平板上面の平均表面圧力係数分布を図 6 から図 10 に示す。さらに、図 11 から図 14 に各突起付き平板の突起付近の流線の可視化図を示す。

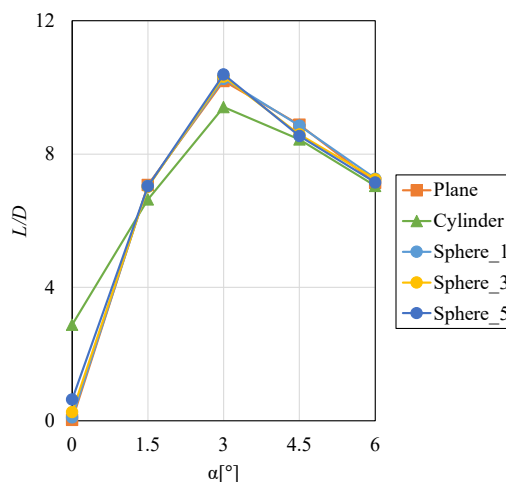


図 5 揚抗比

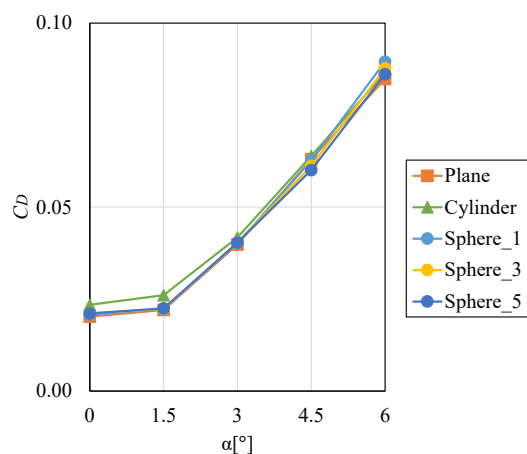


図 3 抗力係数

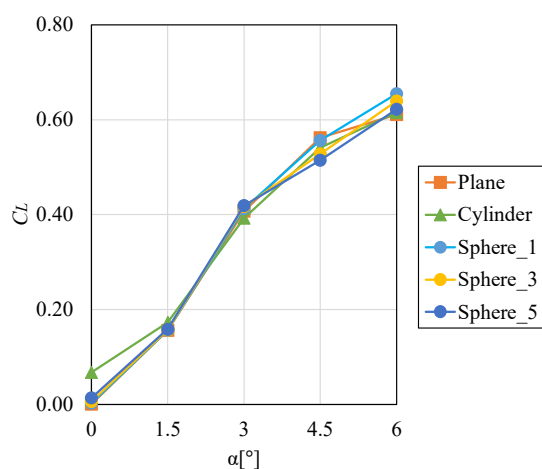


図 4 揚力係数

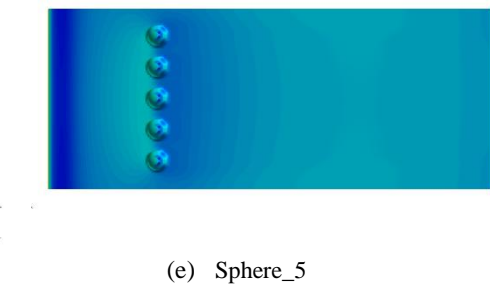
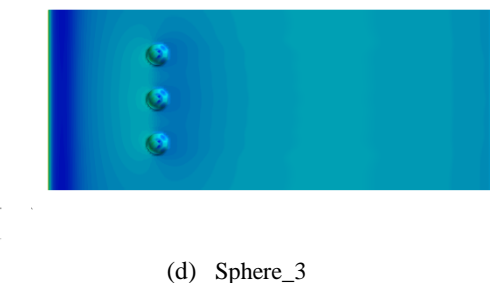
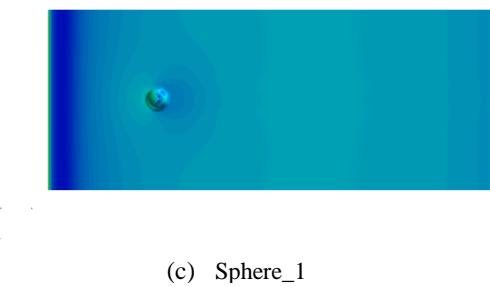
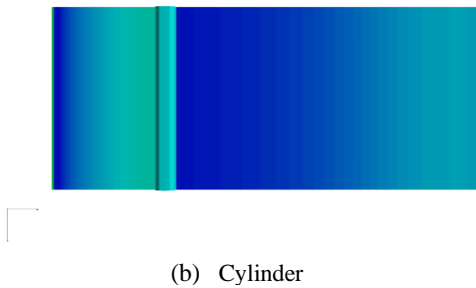
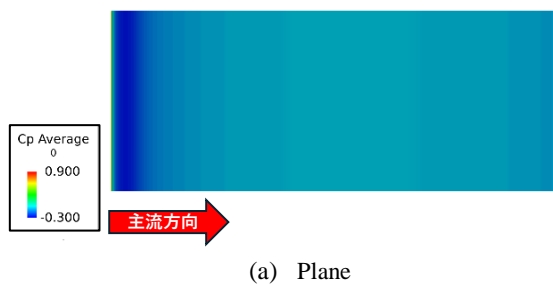


図 6 各ケースの平均圧力係数分布(迎角0°)

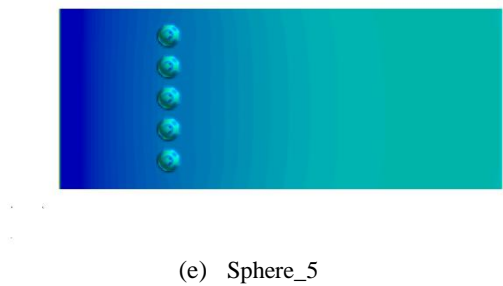
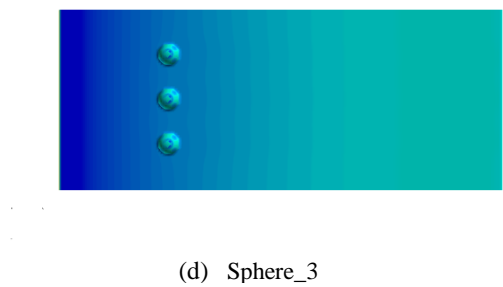
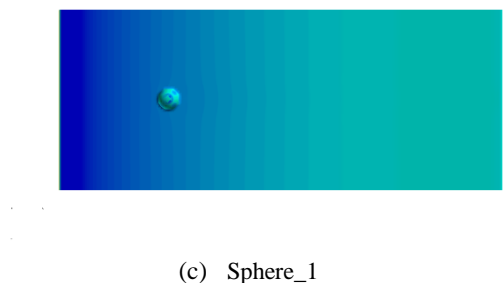
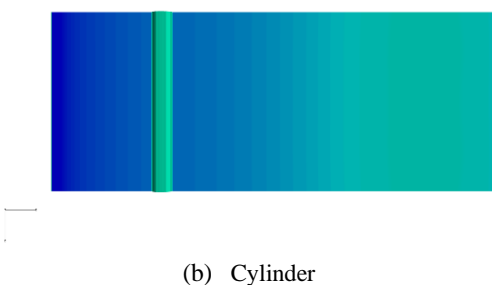
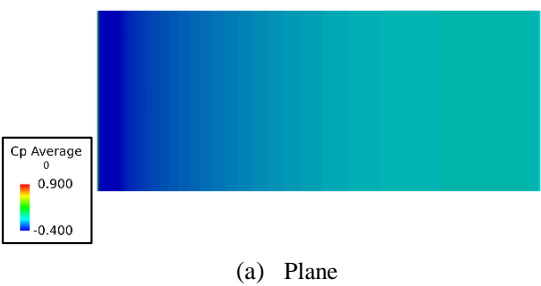


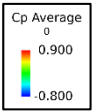
図 7 各ケースの平均圧力係数分布(迎角1.5°)



(a) Plane



(b) Cylinder



(a) Plane



(b) Cylinder



(c) Sphere_1



(c) Sphere_1



(d) Sphere_3



(d) Sphere_3



(e) Sphere_5



(e) Sphere_5

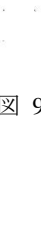


図 8 各ケースの平均圧力係数分布(迎角3°)

図 9 各ケースの平均圧力係数分布(迎角4.5°)

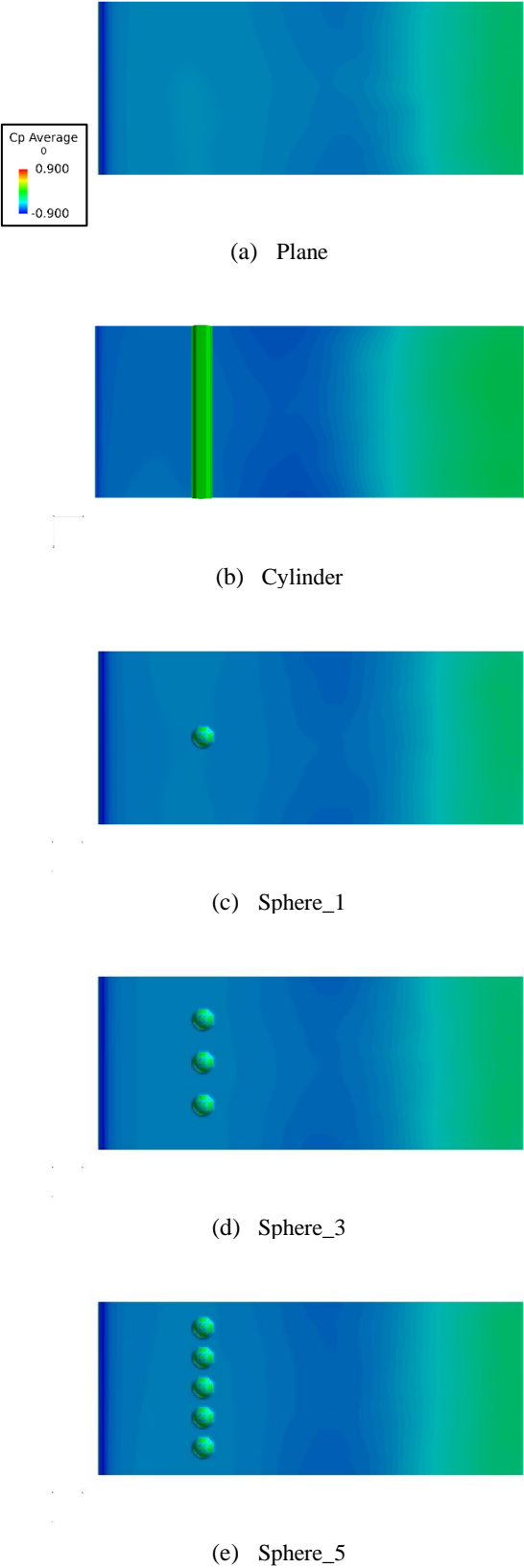


図 10 各ケースの平均圧力係数分布(迎角6°)

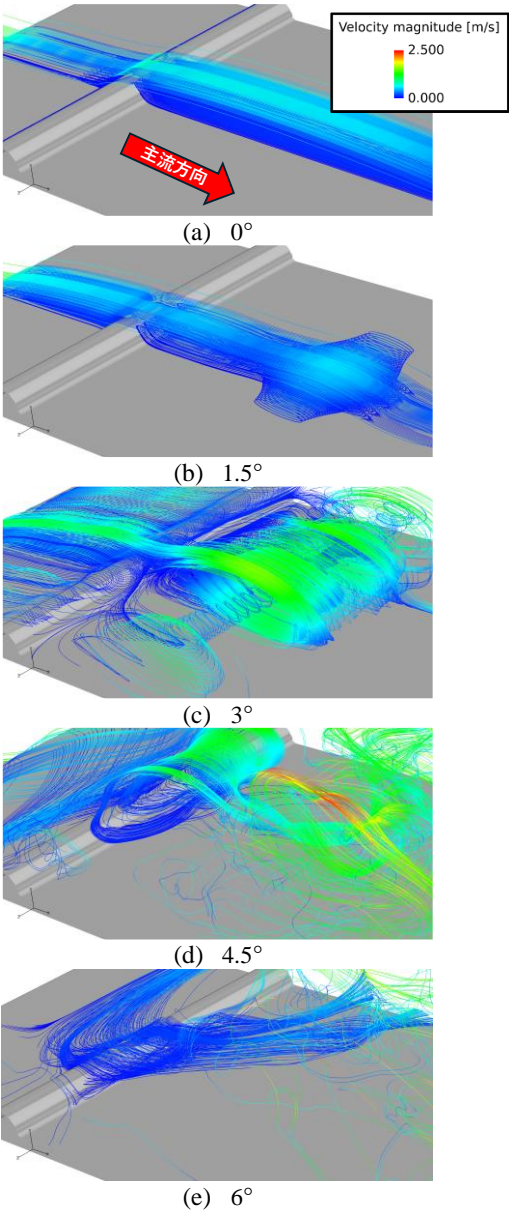


図 11 突起付近の流線の可視化図 (Cylinder)

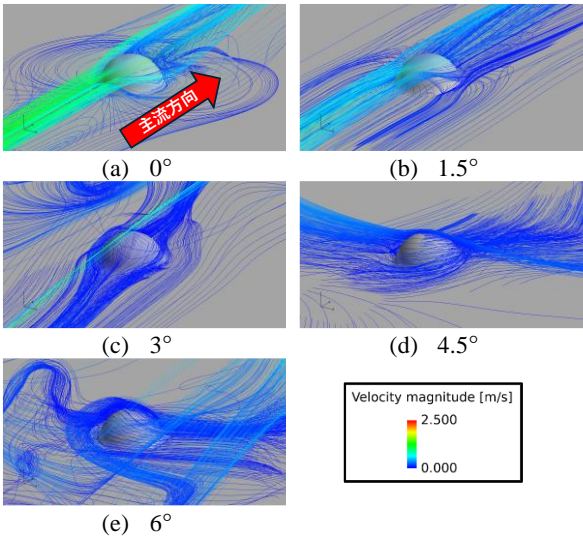


図 12 突起付近の流線の可視化図 (Sphere_1)

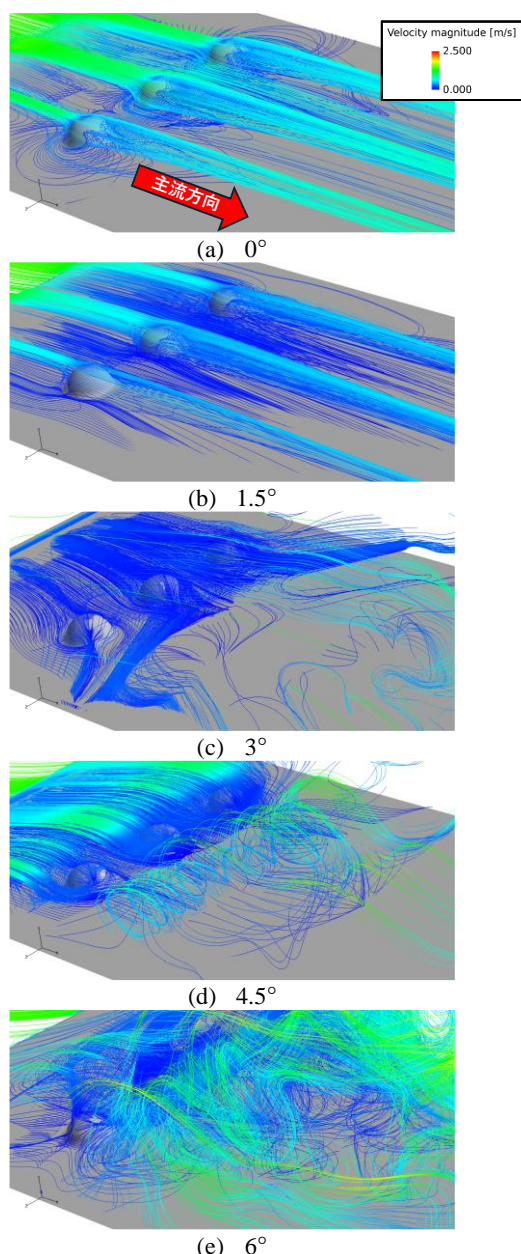


図 13 突起付近の流線の可視化図 (Sphere_3)

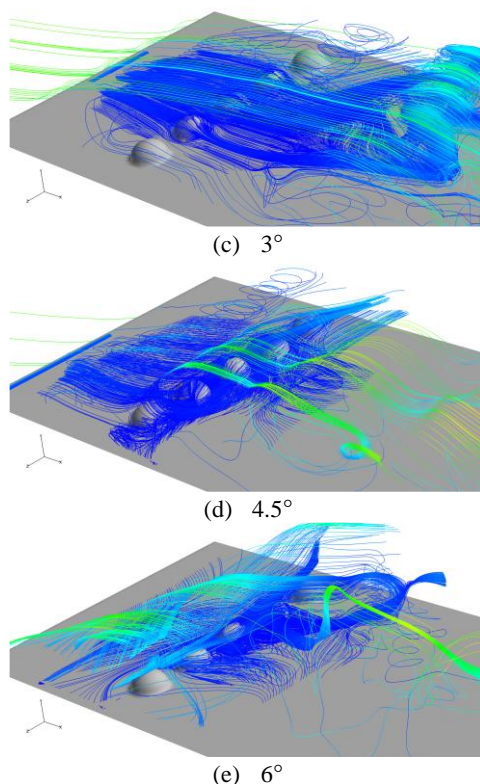
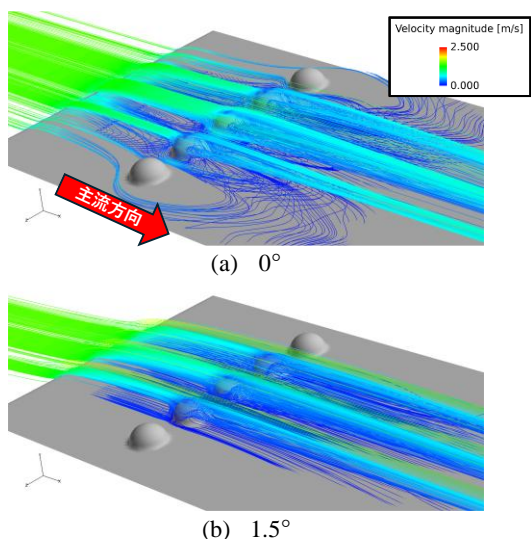


図 14 突起付近の流線の可視化図 (Sphere_5)

3.1 結果の概要

まず、平板に突起を設置する全般的な傾向について述べる。過去の研究[4]でも示した通り、平板上面に突起を設置することで層流剥離泡のような挙動を示す剥離渦が形成される。上面に剥離渦が生じると負圧が発生し、下面に生じている正圧との圧力差が大きくなり、結果揚力が上昇すると考えられる。生じている面に対して剥離渦が接している領域が大きいほど、より大きな揚力が発生すると考えられる。

一方、突起を設置することで形状のぬれ面積が増加するため、抗力が増加すると考えられる。また、図 11 から図 14 に示される各形状の突起付近の流線の可視化図を見ても、0, 1.5° という低迎角においては、半球突起を設置することで2次元的に流れる流線はその軌道を変えられ、突起の後ろに回り込むような流れとなる。一方、3° 以降の高迎角では平板の前縁から発達する剥離泡が大きくなり、突起全体が剥離泡の中に埋まってしまう。よって、高迎角では低迎角の場合ほど突起は流れに影響しないと考えられる。平板のスパン方向全体に伸びている半円柱突起では、半球突起のように流れが突起の後ろに回り込むことができず、3° 以降の高迎角でも2次元的な流れが形成されることがわかる。

2次元解析では突起設置による抗力増加はあまり見られず、特定の迎角においては抗力が減少する様

子まで見られたが、本研究で行った3次元解析ではほぼ全ての迎角で突起設置による抗力増加が見られた。また、突起設置により剥離渦が発生し、それによって揚力が増加する様子は、2次元解析結果ほど顕著に見られなかった。これは、流れの3次元性により、剥離泡・剥離渦の大きさ及び位置が2次元解析で見られたものとは異なるためだと考えられる。特に、3次元的な突起形状である半球突起を用いた形状では、前述した通り突起の後方に流れが回り込む。その3次元的な流れにより、2次元解析で見られたものとは異なる剥離渦が形成されたと考えられる。

以降では、迎角毎の効果について述べる。

3.2 迎角による流れ場の比較

3.2.1 迎角0°

Planeでは剥離泡が形成されておらず、図 6からも、上面の圧力分布は前縁を除いてほとんど変化がないことがわかる。このような迎角においては、Cylinderが突出して高い揚力係数を示す。これは、図 6からわかる通り、Cylinderにおいてのみ広い範囲で平板上面の突起後方に剥離渦、すなわち負圧が発生しているためである。半球突起付き平板においても突起の後ろに剥離渦が形成されているが、Cylinderよりもその範囲が狭いため、Cylinderほど高い負圧を生じなかったと考えられる。半球突起付き平板の中ではSphere_5, Sphere_3, Sphere_1の順に高い揚力係数を示しており、これは突起の数が多いほど生成される剥離渦の領域が広いためである。Planeでは前述した通り剥離領域が存在しないため、最も低い揚力係数を示した。

抗力係数に関しては、突起がなくぬれ面積最小のPlaneが最も低く、ぬれ面積最大のCylinderが最も高かった。半球突起付き平板の中では、その差はわずかであったが、突起の数が多い順に高い値を示した。これもやはり、突起設置によるぬれ面積増加による結果だと考えられる。

以上の結果から、迎角0°においては広範囲に剥離渦を生じたCylinderが最も高い揚抗比を示した。

3.2.2 迎角1.5°

突起がないPlaneにおいて前縁から小さい剥離泡が形成され始める。0°同様、この迎角においてもCylinderが最も高い揚力係数を示す。これは、図 7からわかる通り、0°同様剥離渦領域が最も広いからである。半球突起付き平板では突起の後ろにのみ剥離渦が存在するが、Cylinderではスパン方向全体に剥離渦が生じている。

抗力係数に関しては、Plane及び半球突起付き平板ではほぼ同じ値を示すが、Cylinderにおいては突出し

て高い値を示す。これは、前述した通り半円柱突起のぬれ面積が5ケースの中で最大であることによると考えられ、0°のときよりも他のケースとの差が増加している。

以上の結果から、揚力係数のみで見るとCylinderが最も効果的であるが、同時に大きな抗力を生じるため、揚抗比では最も低い値を示した。よって、迎角1.5°においては、元の平板Planeが3種の半球突起付き平板にわずかな差をつけて最も高い揚抗比を示した。

3.2.3 迎角3°

前縁から発達する剥離泡がさらに成長し、元の平板において最大揚抗比を示す迎角である。この迎角では、0, 1.5°では最も高い揚力係数を示していたCylinderが、逆に最も低い揚力係数を示す。図 8に示される平均表面圧力分布を見てみると、Cylinderでは前縁から約50%cの位置までは他の4ケースよりも高い負圧が生じていることがわかる。一方で、それ以降では他よりも低い負圧が生じている。また、水色の領域で示される剥離渦の再付着位置が、他の4ケースと比較してより前縁近くにある。よって、迎角3°において半円柱突起を用いると、前縁近くでは高い負圧を生じるが、後縁付近では元の平板よりも低い負圧を生じると考えられる。さらには、平板前縁から生じる剥離泡も縮んでしまい、上面全体に生じる負圧が小さくなると考えられる。揚力係数に関してはSphere_5が最も高い値を示したが、Sphere_1, Sphere_3との差はわずかであった。

抗力係数に関しては0, 1.5°同様、ぬれ面積最大のCylinderが最も高く、Planeが最も低い値を示した。半球突起付き平板では、半球突起設置によるぬれ面積増加によりPlaneよりわずかに大きな値を示したが、突起の数による違いはほとんど見られなかった。

以上の結果から、3°においてはSphere_5が最も高い揚抗比を示し、次いでSphere_3, Sphere_1, Plane, Cylinderという結果になった。

3.2.4 迎角4.5°

前縁から発達する剥離泡がさらに成長している。この迎角では、3°までの迎角と異なり、突起が設置されていないPlaneが最も高い揚力係数を示す。図 9の平均表面圧力分布図を見てみると、元の平板Planeでは前縁から約50%cの位置に、平板の左右両側に高い負圧の領域が存在していることがわかる。この領域が主要な剥離泡を示しており、形状全体の揚力の大部分を生み出すと考えられる。Planeの次に高い揚力係数を示したSphere_1では、左右両端から離れた中央に突起が一つのみ設置されているため、この負圧領域に大きく影響しなかったと考えられる。次に高

い値を示したCylinderでは、3°同様前縁付近では他のケースよりも高い負圧を生じているが、後縁付近では低い負圧を生じており、全体で見た剥離泡としては他のケースよりも縮んでいる。このことにより、Planeよりも低い揚力係数を示したと考えられる。次に高い値を示したSphere_3では、Sphere_1よりも負圧の領域が狭くなっている。最も低い揚力係数を示したSphere_5では、領域の面積は増加しているが、負圧の値自体が小さくなっている。このような結果から、4.5°という迎角では平板中央の左右両側に大きな負圧が生じるため、その領域を狭く、又は弱くしないような突起の設置が必要だと考えられる。Sphere_5では左右両端に近い位置に突起が設置されているため、突起が負圧領域に強く影響したと考えられる。

抗力係数に関しては、Cylinder、Plane、Sphere_1、Sphere_3、Sphere_5の順に高い値を示す。3°までと同様、形状のぬれ面積最大であるCylinderが最も高い抗力を生じたと考えられる。一方で、半球突起付き平板はPlaneよりもぬれ面積が大きいにも関わらず、Planeよりも低い抗力係数を示した。これは、剥離渦の大きさによる影響だと考えられる。突起が設置されておらず、平板中央の左右両側の剥離渦がそのまま存在するPlaneでは、半球突起付き平板よりも大きな剥離渦が生じていると考えられ、それが抗力の増加につながったと考えられる。半球突起付き平板においても、揚力係数が高い、すなわちより大きな剥離渦が発生していると考えられる形状の順に高い抗力係数を示した。

よって、4.5°においては、最も高い揚力係数を示したPlaneが最も高い揚抗比を示した。

3.2.5 迎角6°

前縁から発達する剥離泡がかなり大きくなっている。3、4.5°同様Cylinderでは他の4ケースと比較して、前縁近くでは高い負圧を示し、後縁近くでは低い負圧を示すが、その差は3、4.5°の場合と比較して小さい。しかし、Cylinderの揚力係数は依然低いままで、元の平板Planeとほぼ同じ値を示す。半球突起付き平板の中では、突起の数が最も少ないSphere_1が最も高く、次いでSphere_5、Sphere_3の順に高い。これは4.5°同様、図10に示される、平板の中央付近に存在する左右両側の負圧領域の面積に関連すると考えられる。Sphere_1、Sphere_5と比較して、Sphere_3ではこの領域が狭くなっており、負圧領域が小さいことから他の2ケースよりも低い揚力係数を示したと考えられる。

抗力係数に関しては、4.5°まではCylinderが最も高い値を示していたが、6°においてはSphere_1が最も高い値を示す。これは、このような高迎角においては前縁から発生する剥離泡がかなり大きくなっている

ためである。4.5°同様、単に形状のぬれ面積の大小だけでなく、生成される剥離渦の大きさによっても抗力値が変動すると考えられる。実際、揚力係数が最大であったSphere_1が最も高い抗力係数を生じており、他4ケースも揚力係数が高いほど抗力係数も高い傾向を示す。

よって、この迎角においては、抗力係数も揚力係数も高いSphere_1が最も高い揚抗比を示した。

3.2.6 迎角変化に対する突起の効果

以上のことから、低レイノルズ数域において平板に半径 $2.5\%c$ の半円柱突起及び半球突起を設置することで、低迎角においては2次元解析結果同様、その後方に剥離渦を生じ揚力を生み出す効果があるとわかった。一方、高迎角においては、設置位置によっては平板に元々存在する負圧領域に突起が影響してしまい、揚力を減少させる効果もあることがわかった。さらには、突起を設置することで形状のぬれ面積が増加して抗力が増加する上に、突起により生じる剥離渦も抗力を増加させてしまう。

迎角0°においては、広範囲にわたって剥離渦を発生させる半円柱突起付き平板が効果的であったが、1.5°以降の迎角では他の形状よりも大きい抗力が生じてしまい、結果他の形状よりも揚抗比が下がってしまった。1.5°以降の迎角では元の平板や半球突起付き平板が効果的である。特に4.5、6°では平板の中央付近の左右両側に強い負圧領域が存在するため、その領域を狭く・弱くさせないように突起を設置する必要があると考えられる。

また、半球突起の数を変えてスパン方向一列に設置した結果、迎角0°では突起の数に応じて揚力が増加したが、1.5、3°では設置数による違いは見られなかった。4.5、6°では前述した負圧領域が存在するため、突起の数よりも設置位置の方が空力性能に影響することがわかった。

4 結論

完全等間隔直交格子法を用いた3次元非圧縮性流体解析ソルバにより、レイノルズ数 1.0×10^4 の流れにおいて半円柱及び半球突起付き平板に対して非定常解析を行った。その結果、2次元解析結果同様、突起を平板の上面に設置することで剥離渦を生じ、上面と下面の圧力差を増加させることで揚力を上昇させる効果があることがわかった。一方で、突起の設置によるぬれ面積増加、及び生み出した剥離渦により抗力も増加することが確認された。また、4.5°以降の高迎角では平板の中央付近の左右両側に強い負圧領域が存在し、その前方かつ付近に突起を設置するとその負圧領域が弱まり、揚力が減少してしまうと

判明した。高迎角では揚力が高い形状ほど高い抗力を示したため、低迎角ほど突起設置による空力性能向上効果は見られなかった。さらに、スパン方向に半球突起の数を変えても迎角 0° 以外では大きな差は見られず、スパン方向における突起の設置数よりも設置位置の方が空力性能に影響することがわかった。

今後は、高迎角においては半球突起を平板中央よりも後縁側に設置した形状で計算を行う等、突起の配置についてより検討を行う必要があると考えられる。また、本研究では1列に複数の半球突起を設置した形状のみを解析対象としたため、今後は列を複数にし、コード長方向に設置する突起の数を変えた際の空力性能への影響も調べる予定である。

参考文献

- [1] Mueller T. J., DeLaurier J. D., “Aerodynamics of Small Vehicles,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.35 (2003), pp.89-111.
- [2] 竹田沙紀, 岡本正人, “超低レイノルズ数における楕形状翼の空力特性” *日本航空宇宙学会論文集*, Vol.70, No.2 (2022), pp.40-47.
- [3] Suarez J. M., Flaszynski P., Doerffer P., “Application of rod vortex generators for flow separation reduction on wind turbine rotor,” *Wind Energy*, Vol.21, Issue 11 (2018), pp.1203-1214.
- [4] 大崎歩乃花, 佐々木大輔, 川本裕樹, 岡本正人, “低レイノルズ数流れにおいて平板に付けた突起の効果” *第56回流体力学講演会／第42回航空宇宙数値シミュレーション*

技術シンポジウム論文集, 2024.

- [5] 川本裕樹, “固気液混相流解析法を応用した自動車エンジン内ピストンリングまわりの流体挙動予測,” 東海大学大学院令和2年度博士論文 (2020), pp.15-32.
- [6] Osaki H., Sasaki D., Kawamoto Y., Okamoto M., “The Effects of Installing Protuberances on a Flat Plate at Low Reynolds Numbers,” *International Journal of Computational Fluid Dynamics GCFD* (2025, to be published).

謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所、2024年度研究助成を受けて実施されました。

また、本研究には、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点（JHPCN）、及び、革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ（HPCI）のご支援により（課題番号：jh240076, jh250067）、サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータAOBA-A及びAOBA-Sを使用しました。また、サイバーサイエンスセンターのご支援により、3次元非圧縮性流体解析ソルバの高速化も行っていただきました。

さらに、本研究は東北大学流体科学研究所における公募共同研究（J24I012, J25I014）の一環として実施しました。

計算結果の可視化には、FieldView CFD 社 University Partner Program(UPP)のご提供を受け、FieldViewを利用させていただきました。