低レイノルズ数域で飛行する超小型航空機の非定常空力性能向上に向けた薄翼の空力特性解明

大阪公立大学　工学研究科航空宇宙海洋系専攻
佐々木　大輔

１．はじめに

近年，災害地での調査や過疎地域での物資輸送に各種ドローンが活用されている．ドローンは，固定翼をもつ超小型航空機や多数の回転翼をもつマルチコプタ等，様々なタイプが存在しているが，一般に形状が小さく速度が遅いため，昆虫や鳥の飛行速度域となる．このような速度域では，高速で飛行するジェット旅客機等と異なり，厚みを持つ翼型形状よりも薄翼の方が空力性能に優れていることが知られている．慣性力と粘性力の比により表されるレイノルズ数を用いると，高速で飛行する物体は慣性力が卓越している高レイノルズ数流れに分類されるのに対し，低速で飛行する物体は粘性の影響が大きく低レイノルズ数流れに分類される．ここでは，各種ドローンの運用時間の向上につながる非定常空力特性の改善を目的として，低レイノルズ数流れ（10^3～10^4）に着目する．

低レイノルズ数領域特有の現象として，層流剥離泡が挙げられる．低レイノルズ数流れにおいて層流境界層が剥離すると強い逆圧勾配が生じ，物体表面から剥離する．その剥離した剪断層は急速に乱流へと遷移すると共に，翼型表面に再付着し，乱流境界層となることがある．これが層流剥離泡であり，空力性能へ大きな影響を与える．

このような低レイノルズ数流れにおける薄翼周りの複雑な流れ場や非線形性を持つ空力特性の解明を実験で行うことは難しい．その理由として，構造強度的に薄翼の再現が難しいこと，微小な空気力を計測することが難しいこと，また流れ場の可視化が困難であること等が挙げられる．そのため，昆虫の翅に特有の凹凸や突起が非定常空力性能に与える影響を実験のみで詳細に明らかにすることは困難である．

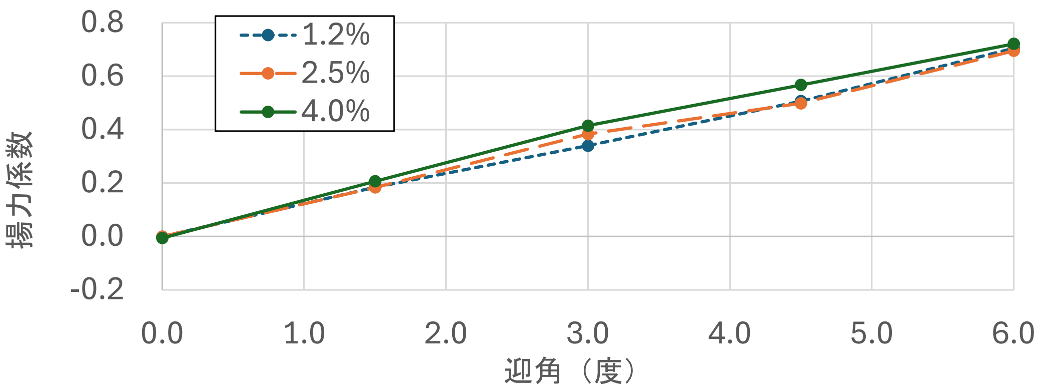
そこで本研究では，数値解析を利用して，低レイノルズ数流れにおける薄翼周りの非定常流れ場の解明を目指す．低レイノルズ数流れにおける翼まわりの流れを数値流体計算により解析するためには，剥離泡等の挙動を正確に捉えることが重要であることから，直交格子法に基づく解析手法を構築する．ここでは，低レイノルズ数域における薄翼に対して，厚みが空力性能に与える影響について調べると共に，平板翼に付けた突起の効果について明らかにする．

２．直交格子法による流体解析手法

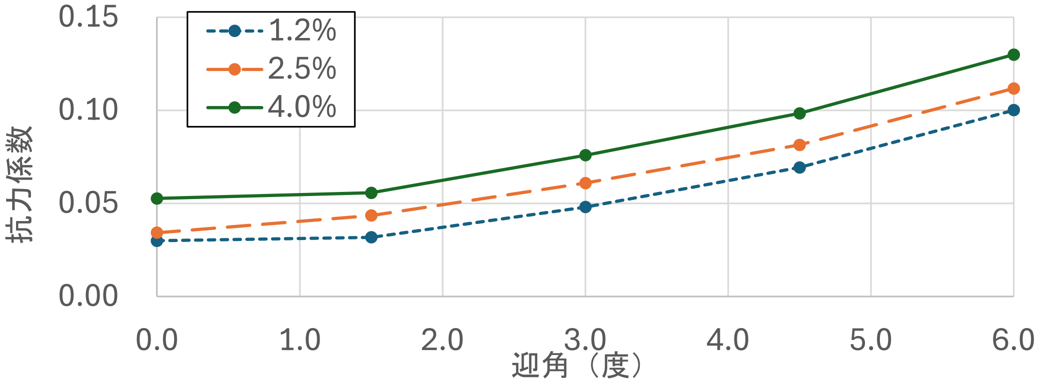
本研究では，完全等間隔直交格子法を用いた 2 次元非圧縮性流体解析ソルバにより，低レイノルズ数（10^4）の流れにおける解析を行う．本手法では，直交格子上における物体形状をレベルセット法により定義する．各格子に物体境界（界面）までの符号付き距離関数であるレベルセット関数を定義することで，直交格子上において流体，物体内部，物体壁面の属性が容易に決まる．本研究では，平板や突起を表すレベルセット関数を用いることで物体を定義する．なお，本手法の詳細に関しては参考文献[1]を参照されたい．

３． 翼厚による影響

平板翼を対象として，翼厚を翼弦長の 1.2%, 2.5％, 4%と変えて非定常流体解析を実施した．解析のレイノルズ数は 1×10^4 とし，2 次元解析が妥当と考えられる迎角域[2]（0 度～6 度）を設定した．解析の結果得られた空力係数の時間平均値を図 1 に示す．揚力係数，抗力係数，揚抗比に関して翼厚による差が現れていることが確認できる．揚力係数に関しては，3 度においてその差が顕著に現れている．その迎角では翼厚 4%の揚力係数が最も大きく，翼厚 1.2%の揚力係数は小さい．また，厚い翼の揚力傾斜が大きいことも分かる．図 2 に示す平均速度場のコンター図より，翼厚により前縁より生じた剥離領域の違いが確認できる．翼が厚いほど剥離領域が発達して広くなり，剥離泡の高さが高いことから，剥離域での負圧が揚力係数及揚力傾斜が大きい要因と考えられる．その一方，剥離泡の発達は抗力係数の増加につながる．そのため，薄い翼ほど抗力係数が小さく，厚い翼ほど抗力係数が大きいことが図 1 より確認できる．なお，揚抗比に関しては，揚力係数の差は比較的小さいことから，抗力係数の差がそのまま反映されているため，抗力の小さい薄翼が高い揚抗比を示す．

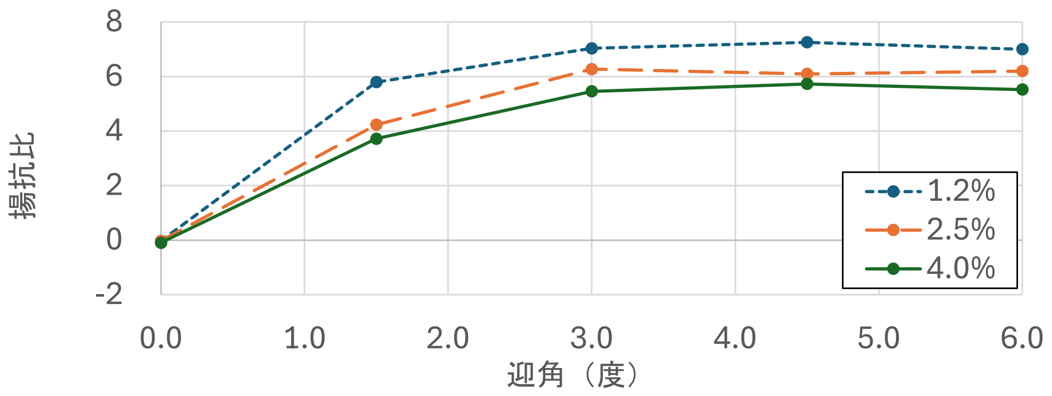


(a) 揚力係数



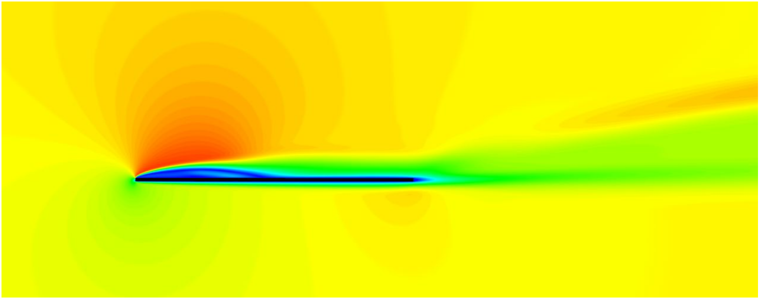
(b) 抗力係数

図 1． 平板翼の空力係数（揚力係数，抗力係数，揚抗比）（続く）

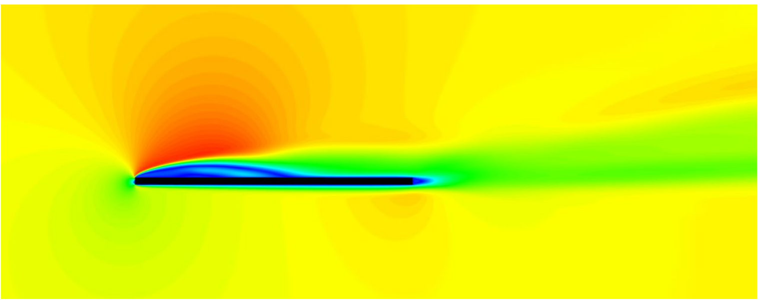


(c) 揚抗比

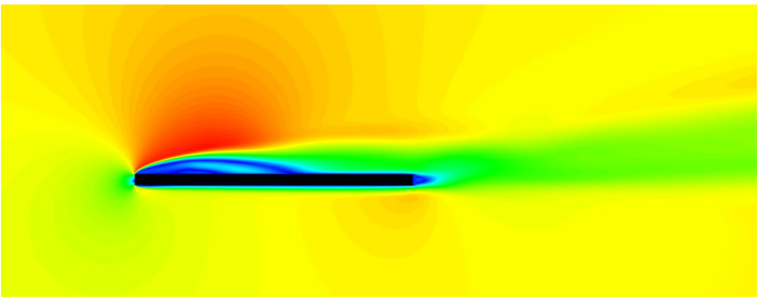
図１． 平板翼の空力係数（揚力係数，抗力係数，揚抗比）



(a) 1.2%平板翼



(b) 2.5%平板翼

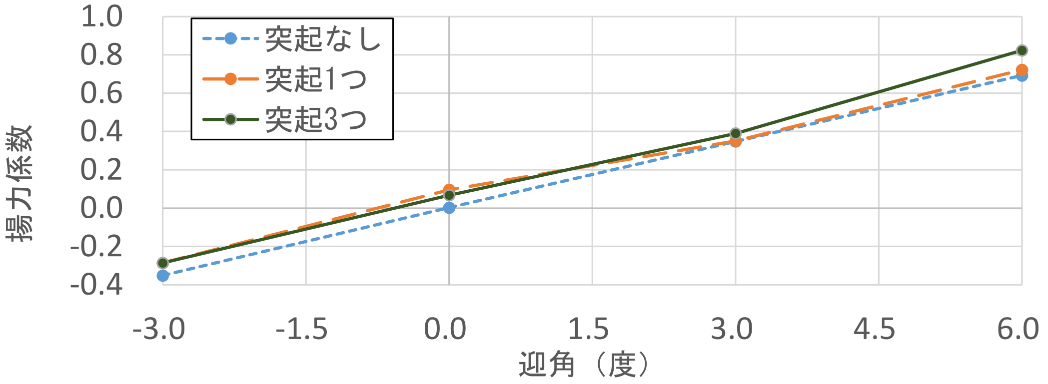


(c) 4%平板翼

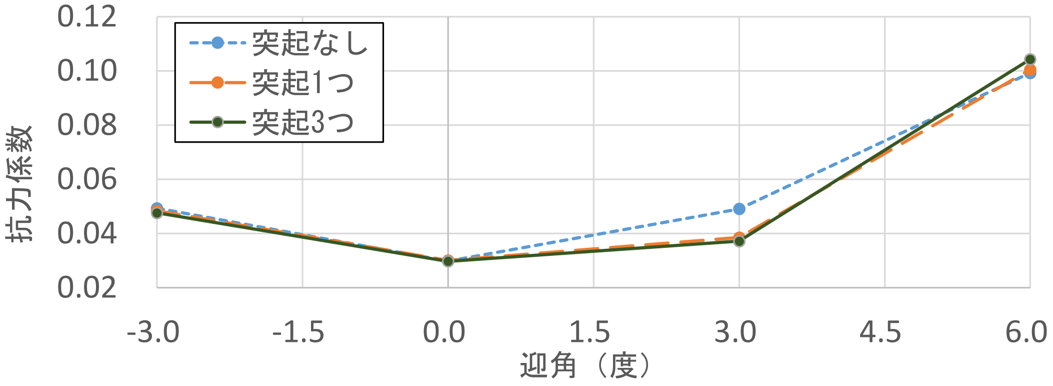
図２． 速度分布（迎角３度）

４． 突起の効果

次に，翼厚が翼弦長の 1.2%である平板翼に対して，半円状の突起を付けて 2 次元非定常空力解析を行った．半円状突起の高さ（半径）は翼弦長の 2.5%とし，翼弦長の 25%位置に設置した．また，同じ半円状突起を 3 つ並べた突起 3 つ形状を解析し，平板翼との空力係数値の比較を行った．その解析結果を図 3 に示す．突起のない平板翼では迎角 0 度において揚力は生じないのに対し，突起を付けた平板では揚力が生じていることが確認できる．図 4 に示す迎角 0 度に対する時間平均の速度分布及び瞬間場の流線の可視化図より，突起背後に剥離渦が生じることが確認できる．このことが迎角 0 度であっても上面に負圧を生じさせ，揚力を生成していることが分かる．突起 1 つの場合は，突起背後に広い剥離域が確認できる一方，突起 3 つの場合は，突起間の渦と後端の突起による剥離渦が確認できる．迎角が 3 度になると，突起が 3 つの場合，図 5 に示すように前縁からの剥離渦が突起まで伸びている．図 6 に示す時間平均した表面圧力係数分布からも，突起が 3 つの場合には負圧領域が広くなっていることが確認でき，これが揚力の向上に寄与していると考えられる．また，抗力に関しては，平板翼に対して突起を付けることで迎角 3 度における抗力係数が大きく改善している．平板翼では前縁から剥離渦が発達するのに対し，設置した突起により剥離渦の発達が抑制されるためと考えられる．その結果，揚抗比も迎角 3 度において大きく向上し，10 以上の揚抗比を達成している．

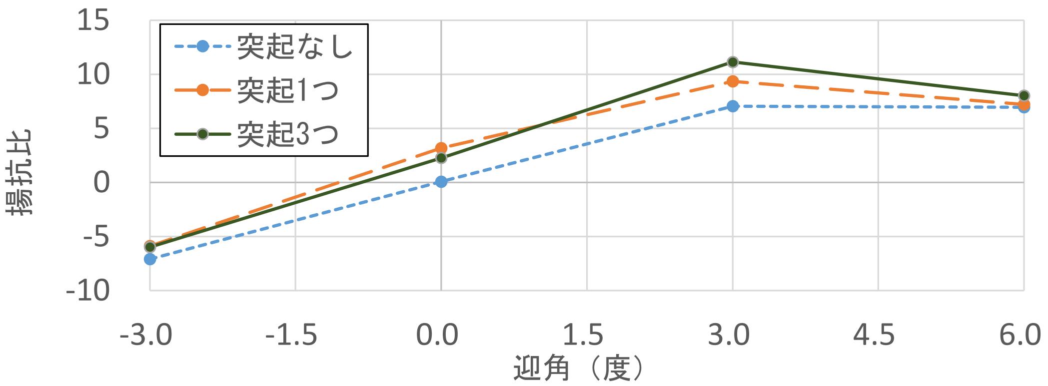


(a) 揚力係数



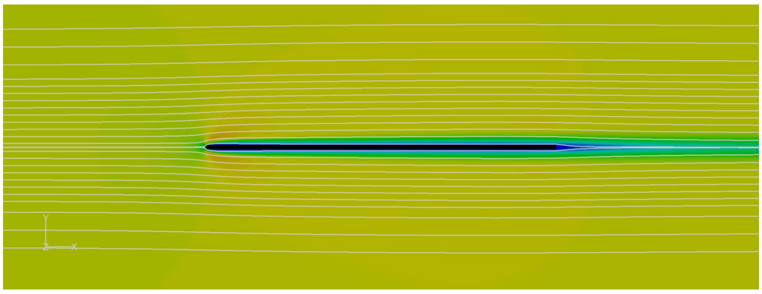
(b) 抗力係数

図３．突起付き平板翼の空力係数（揚力係数，抗力係数，揚抗比）（続き）

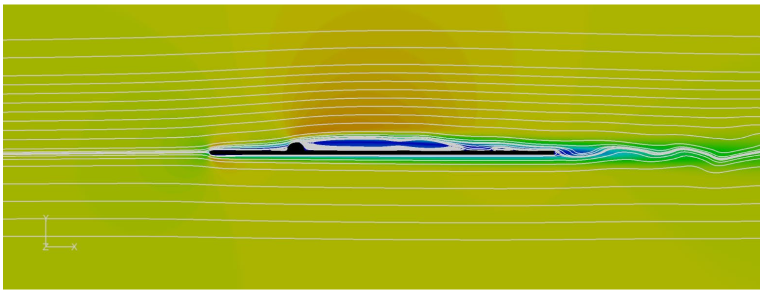


(c) 揚抗比

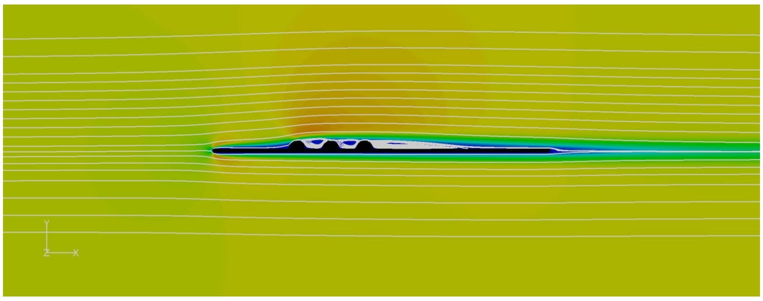
図３． 突起付き平板翼の空力係数（揚力係数，抗力係数，揚抗比）



(a) 平板翼



(b) 突起 1 つ付き平板翼



(c) 突起 3 つ付き平板翼

図４． 時間平均速度分布（0 度）

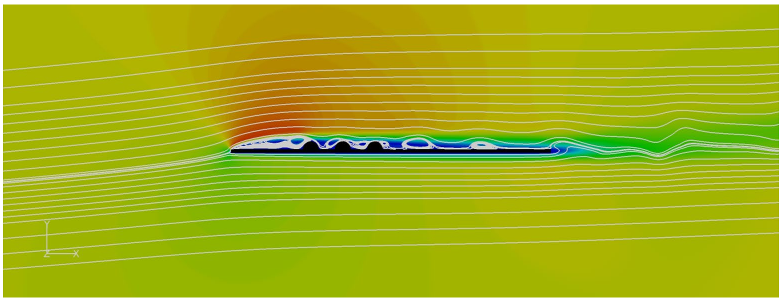


図５．突起 3 つ付き平板翼の時間平均速度分布（3 度）

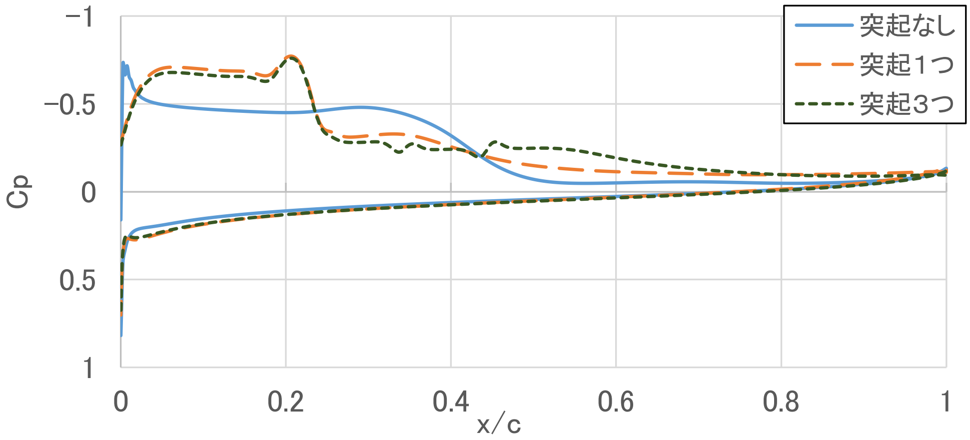


図６．時間平均表面圧力係数（3 度）

５． まとめ

本研究では，直交格子法に基づく流体解析手法を構築して，平板翼を対象に 2 次元非定常解析を実施した．低レイノルズ数域において，平板翼の厚みを変化させて解析を実施し，厚みによる前縁からの剥離域の変化が揚力係数・抗力係数に影響を大きく与えることを明らかにした．また，平板翼に半円状の突起を付けた非定常解析を実施し，突起の効果について調べた．突起を付けることで生じる剥離渦が揚力係数・抗力係数に大きく影響を与えることが分かった．また，前縁剥離渦と突起との干渉により，平板翼に比べて大きく揚抗比を改善させることが可能であることを示した．

突起の効果として，ドローンのロータで生じる空力騒音の低減につながるとの報告[3]もあることから，非定常流れの制御にも効果があることが期待される．そのため，本手法を拡張した 3 次元解析を実施し，突起の効果について更なる解明を進めている．図 7 は，複数の半円状突起を横に並べた 3 次元流体解析結果[4]であり，非定常空力性能の向上や騒音抑制効果について今後調べる予定である．

加えて，本手法を拡張して厚みのない（格子幅以下）翼の解析手法の構築を進めている．コウモリの膜といった極めて薄い物体の空力性能予測が可能になることに加えて，構造解析と連成させる流体構造連成解析手法の実現により，空気力による膜翼の変化も考慮した非定常空力性能予測が可能である．実際に柔軟膜翼に適用した例[5]を図 8 に示す．

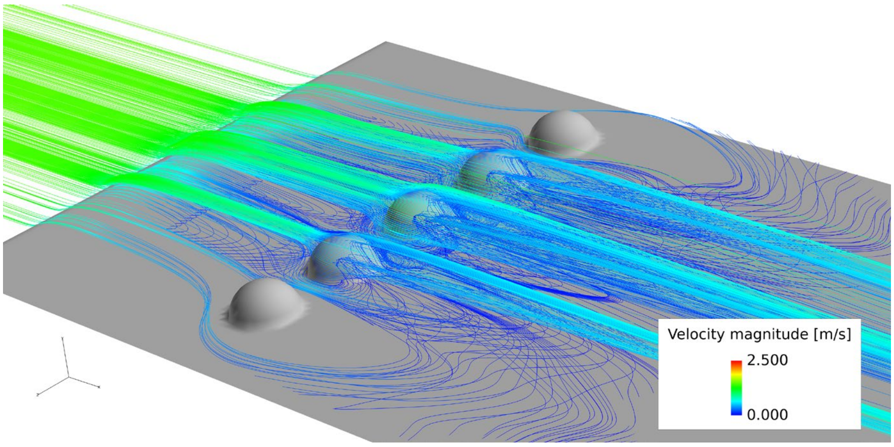


図６．突起付き平板翼の 3 次元解析結果[4]

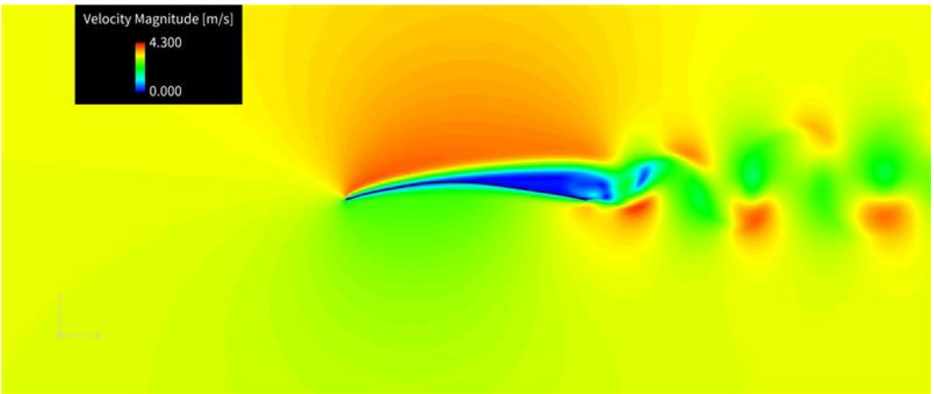


図７．柔軟膜翼の流体構造連成解析結果[5]

謝辞

本研究を遂行するにあたり，公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました．また，非定常流体解析手法の構築に際し，東海大学工学部川本裕樹博士にご支援を頂きました．なお，本研究の解析の一部は，東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システムを利用して得られました．ここに記して謝意を示します．

参考文献

1) 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 (accepted).

2) Takase, T., Sasaki, D., Okamoto, M.: Aerodynamic Study of a Circular Arc Airfoil at Low Reynolds Numbers Using Cartesian Mesh CFD, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 17, Issue 3, pp. JFST0007, October 2022.

3) 佐々木悠斗，大塚光，得竹浩，佐々木大輔，伊神翼，永井大樹：サバの尾びれを模倣した突起付き小型ロータの騒音評価，日本航空宇宙学会第 56 期年会講演会，東京，2025 年 4 月．

4) 大崎歩乃花，佐々木大輔，川本裕樹，岡本正人，佐々木悠斗，大塚光，伊神翼：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，第 57 回流体力学講演会／第 43 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム講演論文集，東京，2025 年 7 月（発表予定）
5) 船田光星，佐々木大輔，川本裕樹，高橋俊：低レイノルズ数領域における柔軟膜翼の空力性能を予測する流体構造連成解析手法，第 38 回数値流体力学シンポジウム講演論文集，東京，2024 年 12 月.