

1C11 Gurney Flapを適用した静粛プロペラ「Loopprop」の 流れ場と空力特性に関するCFD解析

○松元太一，中新井田馨希，佐藤允（工学院大学），嶋英志（JAXA）

CFD analysis of the flow field and aerodynamic characteristics of the quiet propeller “Loopprop” with Gurney Flap

Taichi Matsumoto, Yoshiki Nakaniida, Makoto Sato (Kogakuin University), Eiji Shima (JAXA)

Key Words: Loopprop, Quiet propeller, Gurney Flap, CFD

Abstract

A loop-type propeller, named as “Loopprop”, has been developed to reduce aerodynamic noise generated by the propeller. In this study, Computational Fluid Dynamics (CFD) analyses on the flow around the Loopprop with Gurney Flap (GF) have been performed to investigate the flow field and aerodynamic characteristics. CFD analyses revealed that Loopprop with the GF of a 2% chord length, improves thrust coefficient by 36% and the Figure of Merit by 5%. This is because GF increased the pressure difference between the upper and lower surfaces of the blade, resulting in greater lift generation. Furthermore, the presence of the GF suppresses flow separation, which mitigated the increase in torque coefficient, thereby contributing to the improvement in the Figure of Merit.

1. 緒論

1-1. 物流におけるeVTOLの活用

近年，マルチコプタ型の電動垂直離着陸機（eVTOL）は，垂直離着陸能力や制御の容易さから物流や点検などの商業分野へ応用され始めている．次の段階として，旅客輸送やより大型物資の物流輸送での活用が期待される．一方，物流eVTOLを普及させる場合，機体の大型化や居住地での運用が想定されるため，積載量の増加や航続距離等の機体性能の向上，eVTOLを飛行させる際の安全性・信頼性の確立，eVTOLから発生する騒音の低減などが課題として挙げられる．

特に，機体の大型化や居住地での運用を考えると，騒音の低減は重要なテーマである．Tinny *et al.*^[1]は，ホバリング状態におけるクアッドコプターのドローンから発生する騒音についての実験を行った．クアッドコプターのドローンから発生する騒音は近傍場では80~100dB程度となることが分かった^[1]．

80dbは地下鉄の車内，100dBは電車が通る際のガード下と同程度の騒音であるため，物流eVTOLを普及させるためにはさらなる静音化が必須となる．

1-2. Gurney Flapについて

Gurney Flap（GF）は，図1に示すように翼の後縁付近の翼下面側に取り付けられるマイクロタブである^[2]．最初にGFを使用したのは，Dan Gurneyである．レーシングカーのリアウィング後縁上部に追加のダウンフォースを与え，空力への影響を最小限に抑えながら効果を得た^[3]．その後，Liebeckによって

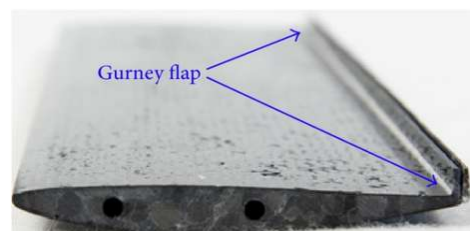


図1. 翼の後縁に取り付けられたGF^[2]．

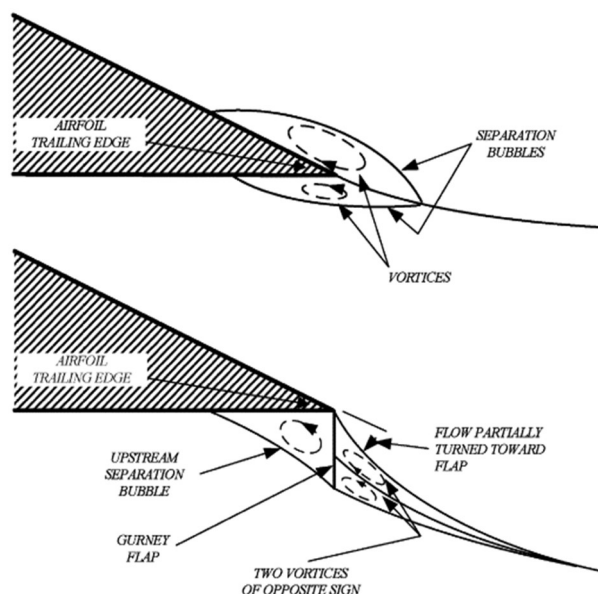


図2. Liebeckによって描かれたGFなしとGF
ありの流れのパターン^[4].

GFに関する初の風洞実験が行われた^[4]. GFは非常にシンプルな設計であるため、解析や製造が容易である。

図2はLiebeckによって描かれたGFなしとGFありの流れのパターンである^[4]. GFの後流では、互いに反対向きに回転する2つの渦が発生し、その部分に低圧領域ができる. この低圧領域により、翼の後縁付近で生じる逆圧力勾配が低減され、翼上面での剥離の遅延または抑制につながる. さらに、翼上面の流速の増加により翼上面の負圧が強まる. 一方で、GFの前方では流れが遅くなり、翼下面では圧力が増加する. これらの結果としてGFを用いることで翼の揚力増加が実現される.

GFはその設置の簡便さから近年、比較的小スケールな固定翼への適用が行われており、その効果が確かめられている. 加えて、ドローン用のプロペラなどへ適用する研究もおこなわれている. Shima *et al.* は、Box翼にGFを取り付け、風洞実験から空力特性を調査した^[5]. また、翼に近接するプロペラを持つ有翼eVTOLにおけるGFの効果について調査した^[6]. 高瀬らは、GFを取り付けた受動的モーフィング翼において低速風洞試験を行った^[7]. Gibertini *et al.* は、ヘリコプタのロータにGFを取り付け、ホバリング状態でのGFの性能についての実験を行った^[8]. Noda *et*



図3. Loopprop搭載のドローン「SOTEN」^[12].

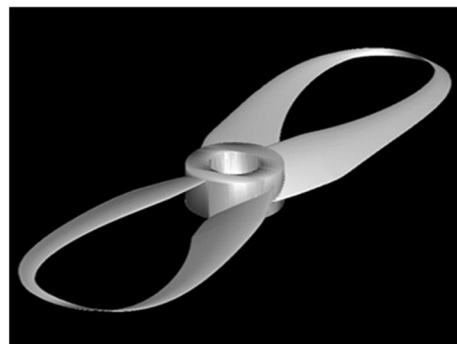


図4. Looppropの全体図.

al. は、鋸歯状GFをドローンプロペラに取り付け、音響に関する実験と流れ場に関する数値解析を行った^{[9][10]}. しかし、ドローンプロペラにGFを適用した研究は少ないのが現状である.

1-3. 静粛プロペラ「Loopprop」

ドローンの静粛化手段として、1.音源からの発生音の抑制、2.吸音・反射による遮蔽、3.スピーカーによる能動的消音、4.不快さを減らす音色の制御などが挙げられる^[11]. この4つの手段のうち、1と4の効果を狙ってJAXAで開発されたのが静粛プロペラ「Loopprop」である^[11]. 図3は、Looppropを搭載させたドローン「SOTEN」を示している^[12]. Looppropはスキュードプロペラにおける静粛化の考え方を基に設計されている. 図4はLooppropの全体図である. 図より、Looppropは前進角を有するスキュードブレードと後退角を有するスキュードブレードが翼端において結合されていることがわかる. これによりスキュードプロペラにおける騒音低減効果を継承しつつ、スキュードプロペラでは課題であった構造的リスクが克服可能となっている. また、プロペラ形状の設計においては、プロペラにかかる遠心力と張力をバランスさせるため、遠心力場での懸垂線を利用した設計が成されている. 詳細は別文献を参照され

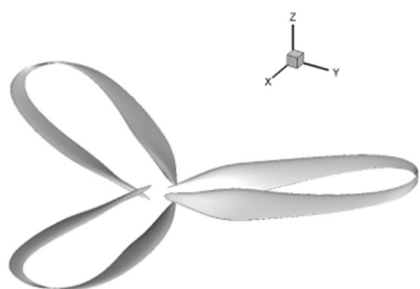


図5. GFを付加した3Blade-Looppropの概観.

たい^[11].

現在までに、Looppropに関する様々な数値的・実験的研究が行われており、Loopprop形状の改良も進められている^[13-18]. 特に、近年の実験結果^[19]より、通常の2枚プロペラに比べてGF付きLooppropでは離陸推力である4.5Nにおいて2.1dBの静音効果が確認されている. しかし、GF付きLooppropに関する数値解析はいまだ行われておらず、詳細な流れ場などは不明である.

本研究では、GFを適用したLoopprop周りの流れに関する数値解析を行い、GFの効果について調べることを目的とする. 本稿では、通常のLooppropの流れ場とGFを適用したLooppropの流れ場および空力性能の結果を比較することで、流れや空力性能に与えるGFの効果を明らかにする.

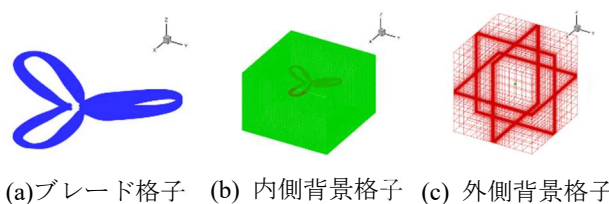
2. 数値解析手法

2-1. 計算対象および計算条件

計算対象は、GFを付加した3Blade-Looppropである. 図5にGFを付加した3Blade-Looppropの概観を示す. プロペラ半径が $R=0.133\text{m}$ 、GFの高さは翼コード長の2%である. 先行研究で行われた実験^[19]を模擬するためプロペラ回転数は4060rpm, 5560rpmとした. 音速基準のレイノルズ数 2.3×10^7 とし、一様流温度及びロータ壁面温度は288.15K, 比熱比は1.4とした. また、ホバリング状態を仮定するため一様流の速度は0m/sとした.

2-2. 計算手法および支配方程式

数値解析にはJAXAで開発が進められている回転翼機周りの流体解析用ソルバーrFlow3D^[20]を用いた. 支配方程式には3次元圧縮性Navier-Stokes方程式を用



(a)ブレード格子 (b) 内側背景格子 (c) 外側背景格子

図6. 計算格子.

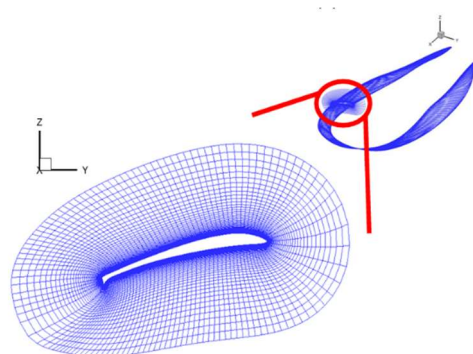


図7. GFを付加した3Blade-Looppropの格子の断面図.

い、背景格子ではCell-vertex有限体積法を、ブレード格子ではCell-centered有限体積法により離散化した. 数値流束は、mSLAU(modified SLAU)を用いて評価し、高次精度化には4次精度Compact MUSCL TVD Schemeを用いた. 時間積分は背景格子に4段階のRunge-Kutta法、ブレード格子にはDual-time stepping/LU-SGSを用いた. 本解析では乱流モデルは使用していない.

2-3. 計算格子

図6に本解析で用いた計算格子を示す. それぞれ、ブレード格子、内側背景格子、外側背景格子の配置と全体図である. また、図7にGFを付加した3Blade-Looppropの格子の断面図を示す. 本解析で用いた計算格子は全て構造格子であり、3つのブレード格子、内側背景格子、外側背景格子からなる移動重合格子である. 格子点数はブレード格子131万点 \times 3、内側背景格子1773万点、外側背景格子1261万点の合計約3427万点である. 計算には工学院大学所有のワークステーションを用い、プロペラが20回転するまで解析を行った.

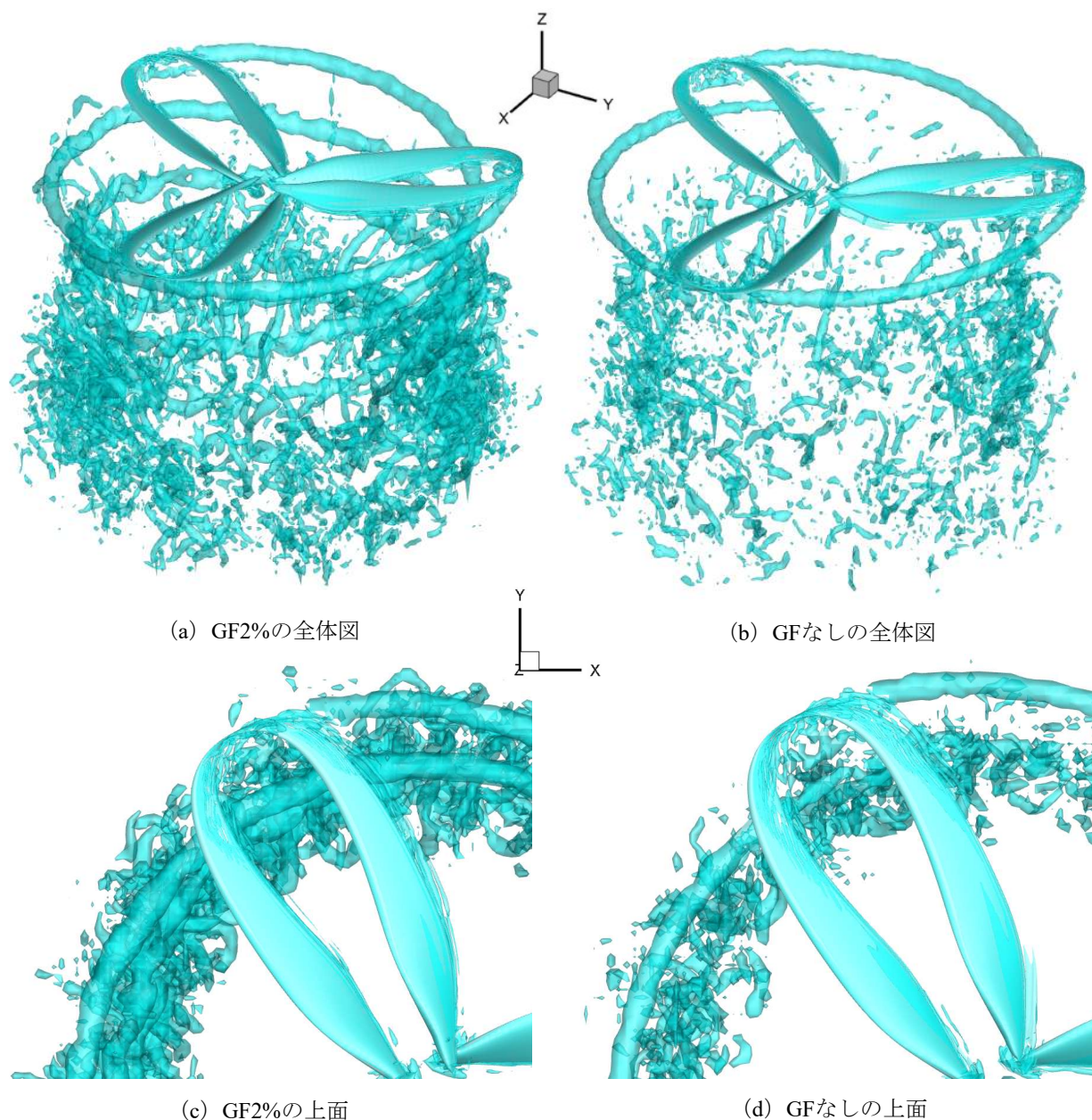


図8. 4060rpmにおける瞬間の流れ場.

3. 結果と考察

3-1. 流れ場の比較

図8にGF2%のLooppropとGFなしのLooppropの4060rpmにおける瞬間の流れ場を示す．等値面は速度勾配テンソルの第二不変量(Q)である．図8より，両Looppropともに翼端渦および細かい剥離渦の生成が確認できる．GF 2%のLooppropではGFなしのLooppropに比べて翼端渦がより明確に可視化されており，形状を維持したまま下方に移流している．一方で，中新井田らの研究^[17]より，遷音速領域においてLooppropは直線ブレードプロペラに比べると明確な翼端渦が観察されなかった．これらより，GF付加に

よるブレード上面と下面の圧力差が増加したことで，Looppropにおいても翼端渦がより顕著に表れたと考えられる．

3-2. 空力性能の比較

図9にGF2%のLooppropとGFなしのLooppropの推力係数(C_T)，トルク係数(C_Q)，ホバリング時の効率を表すFoM（Figure of Merit）の回転数による変化を示す．ここで，実験値はShima *et al.*の結果である^[19]．図9に示されているGFなしのLooppropの回転数は，それぞれ3160rpm，4060rpm，4960rpm，5560rpmである．各係数は次のように定義される．

$$C_T \equiv \frac{T}{\rho \pi R^2 (a M_{tip})^2} \quad (1)$$

$$C_Q \equiv \frac{Q}{\rho \pi R^3 (a M_{tip})^2} \quad (2)$$

$$F_oM \equiv \frac{C_T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2} C_Q} \quad (3)$$

ここで T , Q , ρ , R , a は各々、推力、トルク、空気密度、プロペラ半径、音速である。

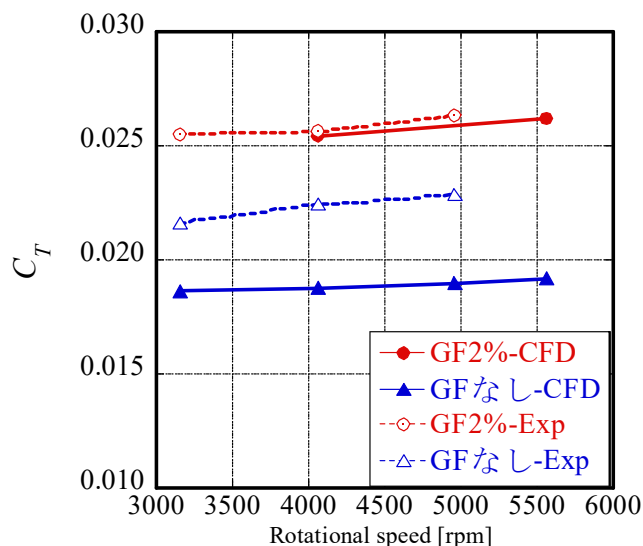
まずCFD結果について述べる。図9(a)より、各回転数においてGF 2%のLooppropはGFなしのLooppropに比べて推力係数の値が約36%増加している。本稿では4060rpmと5560rpmの2つの回転数の比較のみ示したが、推力係数の増加は他の回転数においても同様な結果を示すと考えられる。

図9(b)から、各回転数においてGF2%のLooppropはGFなしのLooppropに比べてトルク係数の値は約50%増加した。これは、GF付加による圧力抵抗増加によってトルク係数が増加したと考えられる。また、GF2%のLooppropとGFなしのLooppropは回転数によるトルク係数の変化は推力係数に比べて小さい。

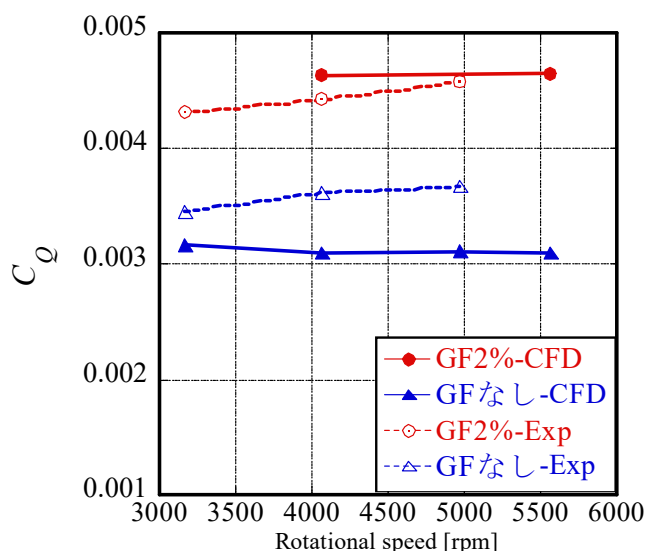
図9(c)から、各回転数においてGF2%のLooppropはGFなしのLooppropに比べてFoMは約5%増加した。また、GF2%のLooppropとGFなしのLooppropは回転数が増加するにつれてFoMの値も増加している。

各空力性能におけるCFD結果と実験値より、両者ともにGF付加によって推力係数とトルク係数は増加し、FoMはほぼ同等かGF2%のほうが上昇する。CFD結果と実験を比較すると、GF2%の結果ではCFD結果と実験値が比較的良好に一致している。一方、GFなしの結果は推力係数とトルク係数ともにCFD結果は実験値より低い値を示しており、その結果、実験値のFoMはCFD結果よりも増加している。CFDと実験の差異は、CFDにおけるハブ等の部品の省略や、次節以降で議論する流れの剥離の影響などが考えられるが、現時点で定かではない。

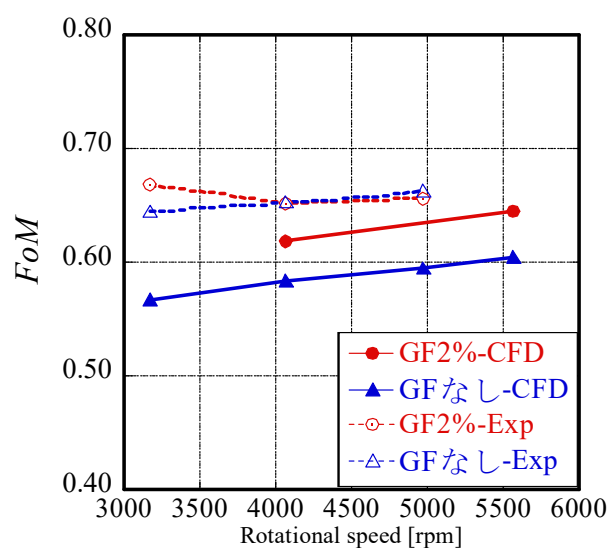
以上より、Looppropに付加したGFは物流eVTOLにお



(a) 推力係数



(b) トルク係数



(c) フィギュアオブメリット

図9. 空力性能の比較(実験値はSima *et al.*の結果^[19]).

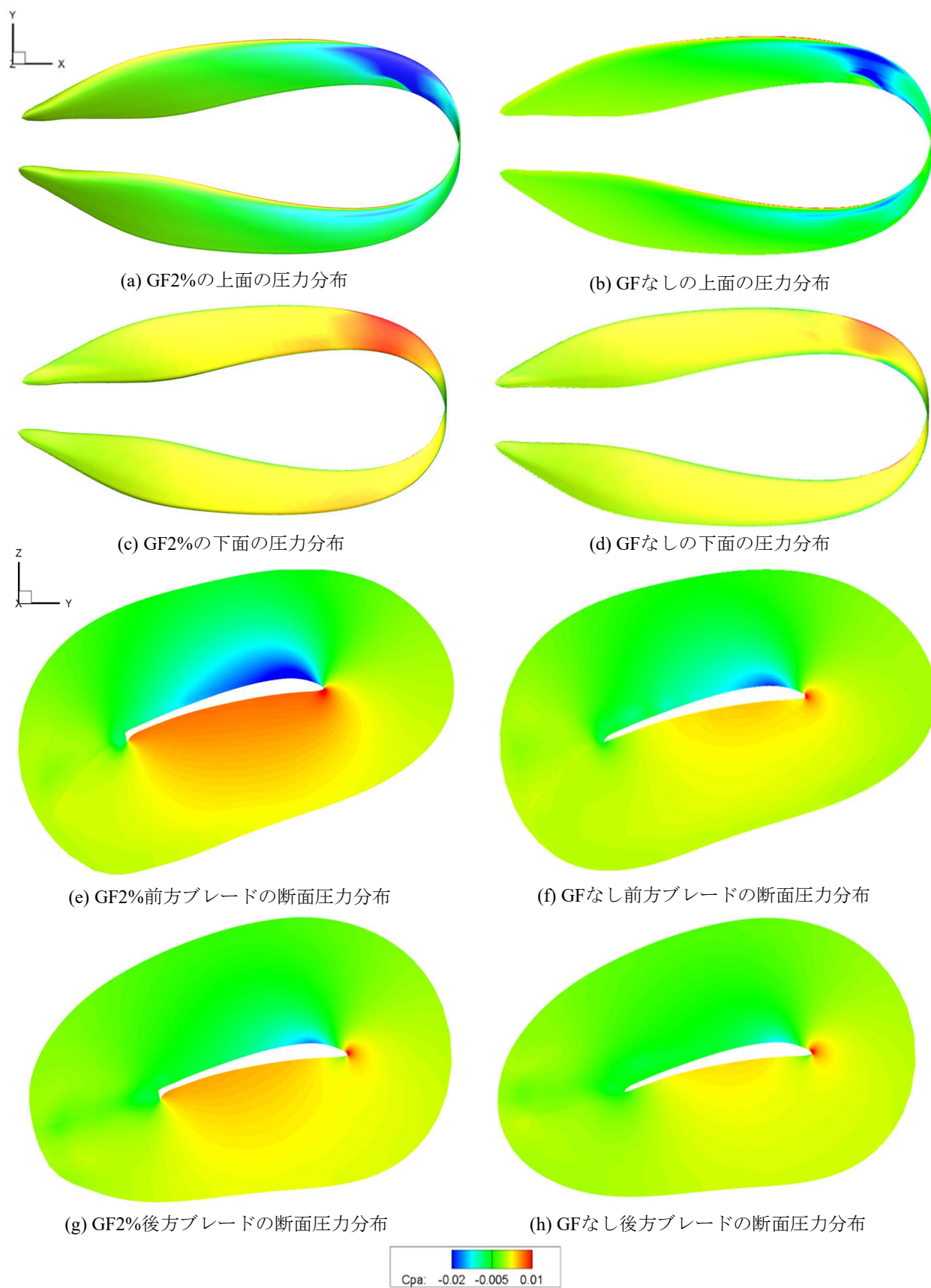


図10. 4060rpmの平均圧力分布. (a)(b)はプロペラ上面, (c)(d)はプロペラ下面, (e)(f)は半径方向80%位置の断面($r/R=0.8$)の分布.

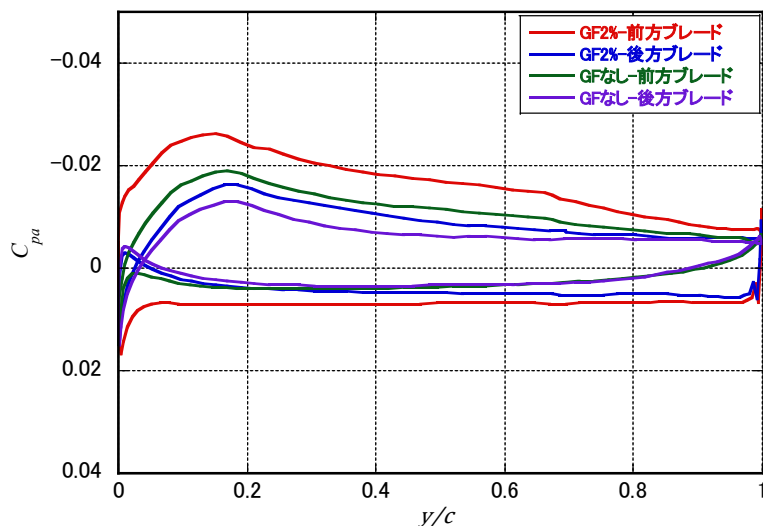


図11. 4060rpmにおける半径方向80%位置($r/R=0.80$)の圧力係数分布.

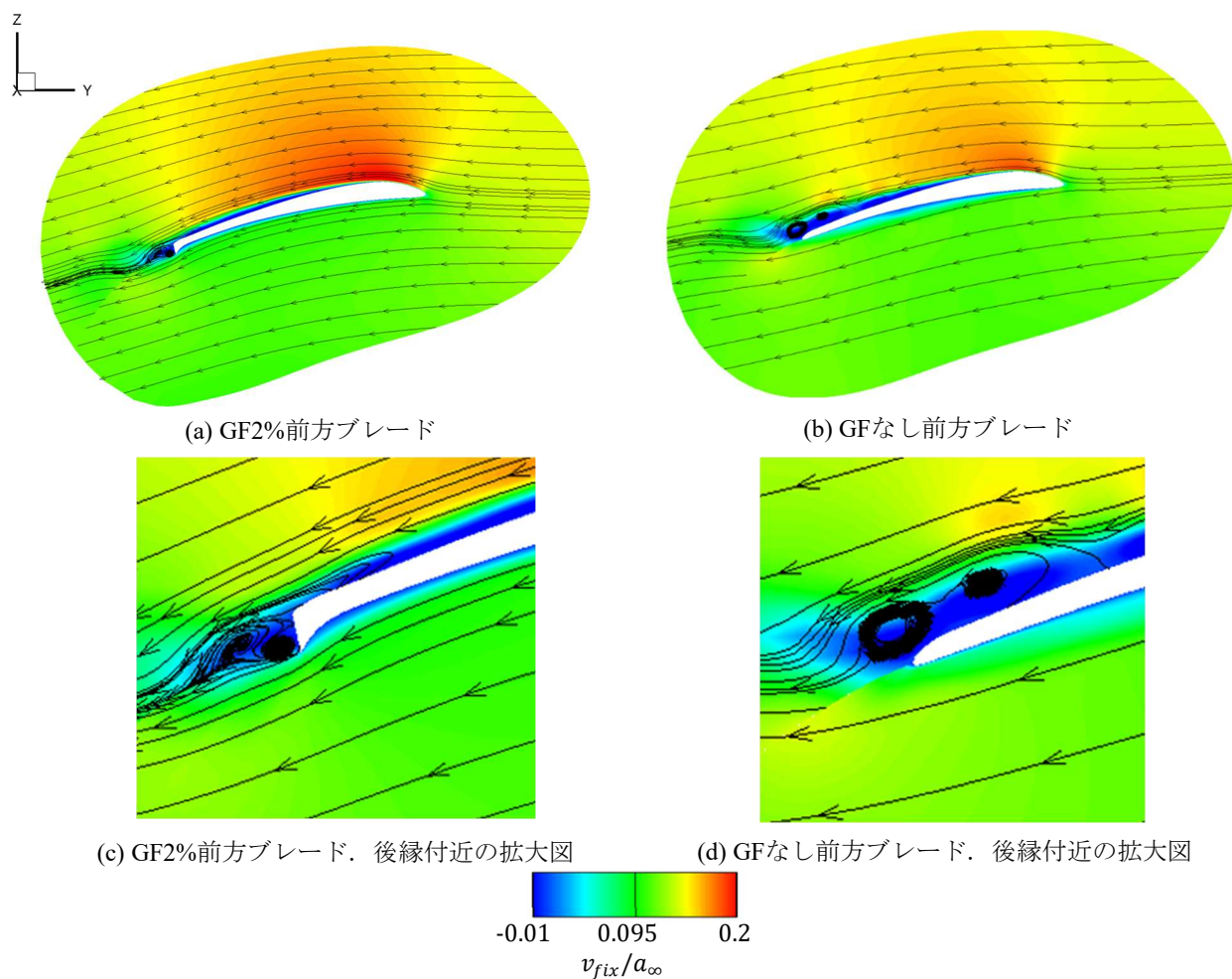


図12. 4060rpmにおけるブレード固定の速度分布. 断面は半径方向80%位置($r/R=0.8$).

ける空力特性において重要な利点をもたらすことが
わかった. 次節より, 4060rpmにおける流れ場を調べ
ることでこの理由を考察する.

3-3. 4060rpmにおけるLoopprop周りの流れ場の特性

本節では4060rpmにおける各ブレードの流れ場か
ら, 図9にみられる空力性能と流体现象の関係につい
て議論する. 図10, 図11に, 音速に基づく圧力係数

(C_{pa})、ブレード固定の速度(v_{fix})と流線の分布を示す．ここで、圧力分布は15回転目から20回転目までのプロペラ5回転分の平均場となっている．各物理量は以下の式で求めた．

$$C_{pa} = \frac{2(p - p_{\infty})}{\rho_{\infty} a_{\infty}^2} \quad (4)$$

$$v_{fix} = v - \frac{r}{R} M_{tip} \quad (5)$$

ここで ρ , p および a はそれぞれ密度、圧力、音速を、 v は空間固定座標の y 方向速度、 M_{tip} はプロペラの翼端速度である．下付きの ∞ は一様流をあらわしており、本解析ではホバリング状態を仮定しているため一様流速度は0m/sである．

図10にGF2%のLooppropとGFなしのLooppropの4060rpmにおける平均圧力分布を示す．図10(a)(b)(c)(d)より、GF2%のLooppropでは低圧領域および高圧領域がプロペラ半径方向の80%~90%位置の範囲で観察され、その領域の範囲はGFなしのLooppropと比べると拡大している．また、図10(e)(f)はブレード半径方向80%位置($r/R=0.8$)における前方ブレードの断面圧力分布である．この図より、GF2%のLooppropは

プロペラ下面において全体的に高圧領域が存在している．また、プロペラ上面においては低圧領域が存在しており、GF2%のLooppropはGFなしのLooppropに比べてより圧力の減少が顕著である．これらより、翼上面の圧力が低下し翼下面の圧力が増加することで、結果として揚力が増加するという、固定翼におけるGFの効果が回転翼であるLooppropにもみられた．また、図11に4060rpmにおける半径方向80%位置($r/R=0.8$)の圧力係数分布を示す．図10(g)(h)、図11から、GF付加の効果は前方ブレードの方が後方ブレードよりも顕著である．後方ブレードにおける翼上面圧力分布の変化は比較的小さいが、翼下面の圧力分布ではGF2%は後縁に向かうにつれて高圧領域が広がっている．

図12にGF2%のLooppropとGFなしのLooppropの4060rpmにおけるブレード固定の断面速度分布と流線を示す．断面は半径方向80%位置($r/R=0.8$)である．図12(a)(c)から、GFの直後方で速度が逆流している領域が存在しており、対の渦が確認できる．一方で、図12(b)(d)から、ブレード後縁付近で速度が逆流している領域が存在しており、剥離渦の放出が確認できる．この結果は、固定翼と同様に、LooppropにおいてもGF

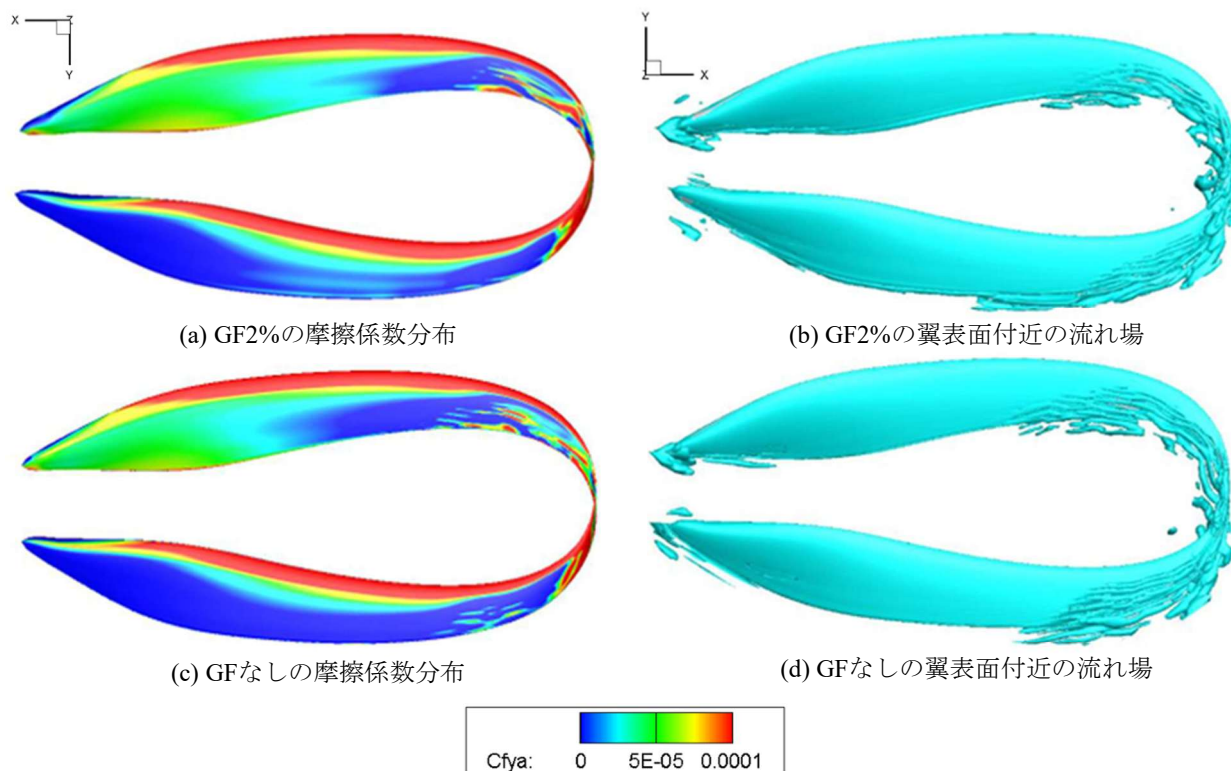


図13. 4060rpmにおける摩擦係数分布と翼表面付近の流れ場

の影響により翼後縁で発生する対の渦が下流側に押し下げられていることを示している。また、図12(a)(b)から、このGF後方の低圧領域により、GF2%のLooppropはプロペラ上面での流速が増加していることも確認できる。

図13に4060rpmにおける摩擦係数分布と翼表面付近の流れ場を示す。図13(a)(b)において、GF2%のLooppropの摩擦係数が負となる青い領域は、剥離渦が観察される領域とほぼ一致している。剥離渦の生成位置は、GF2%のLooppropでは前方ブレードでは半径方向60%位置、後方ブレードでは半径方向50%位置となっているおり、GFなしのLooppropでは前方ブレード、後方ブレードともに60%位置となっている。また、翼表面付近の流れ場からGF2%のLooppropはGFなしのLooppropに比べて剥離が抑制されていることが確認できる。

以上より、現段階のLoopprop形状に対するGFの効果として、翼上面における負圧増加と翼下面における正圧増加による揚力上昇とともに、ブレード後縁付近における流れの剥離抑制がみられた。特に、流れの剥離抑制は、GF付加によるトルクの増加を低減する効果をもたらし、その結果としてFoMも増加したと考えられる。

4. 結論

本研究ではGF2%のLooppropにおけるCFD解析を行い、Gurney Flapを適応したLooppropの空力特性と流れ場について調査した。

- (1) 流れ場より、GF 2%の Loopprop は GF なしの Loopprop に比べてより明確な翼端渦が放出されており、形状を維持したまま下方に移流している。また、GF のすぐ後方では、固定翼と同様に回転翼でも対となる渦の存在が確認できた。
- (2) 空力性能の比較より、GF2%の Loopprop は GF なしの Loopprop に比べて推力係数と FoM が増加し、GF 付加によるプロペラ空力性能の改善がみられた。実験値との比較より、GF2%の結果は実験値と比較的よく一致する一方、GF なし

の結果は推力係数とトルク係数ともに CFD 結果は実験値より低い値を示した。実験、CFD 両者で GF 付加によって FoM は GF なしに比べて上昇、または、ほぼ同等の値となった。

- (3) 半径方向 80%位置における断面圧力分布から、GF2%の Loopprop ではブレード上面の圧力がより低くなり、ブレード下面の高圧領域の範囲がより増加した。これにより、ブレード上面と下面の圧力差が増加し結果として揚力の増加につながった。
- (4) 前方ブレードと後方ブレードに対する GF 付加の効果は、前方ブレードの方が GF の効果はより顕著にみられた。
- (5) 摩擦係数分布と翼表面付近の流れ場から、GF 2%の Loopprop では GF なしに比べて剥離が抑制されている。これによりトルク係数の増加が低減されることで FoM の増加につながった。

今後は、GFつきLooppropにおける音響特性の解明を行っていくとともに、騒音において重要となる翼端渦の生成機構、流れの剥離抑制におけるGF付加の効果についてより詳細に調べる。

参考文献

- [1] C. E. Tinney, J. Sirohi, “Multicopter Drone Noise at Static Thrust” AIAA Journal, Vol. 56, No7, pp. 2816-1826, (2018).
- [2] S. Jain, N. Sitaramand, S. Krishnaswamy, “Computational Investigations on the Effects of Gurney Flap on Airfoil Aerodynamics” International Scholarly Research Notices, (2015).
- [3] J. J. Wanga, Y.C.Lia, K.-S.Choi, “Gurney flap-Lift enhancement, mechanisms and applications” Aerospace Sciences, (2008).
- [4] R. H. Liebeck, “Design of Subsonic Airfoils for High Lift” Journal of Aircraft, Volume 15, (1978)
- [5] E. Shima, K. Yonezawa, R. Nishida, S. Honda, M.

- Sato, “AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF BOX WINGS FOR AN INNOVATIVE EVTOL CONFIGURATION” 33rd International Council of the Aeronautical Sciences congress, ICAS, (2022).
- [6] 嶋英志, 佐藤允, 本多秀輔, 中新井田馨希, 米澤宏一, 古後遼大, L. Hao, “翼に近接するプロペラを持つ有翼 eVTOL におけるガーニーフラップの効果について”, 第 61 回飛行機シンポジウム, (2023).
- [7] 高瀬滉平, 越智秀次, 伊東桃子, 玉置義治, 今村太郎, 横関智弘, 李家賢一, “Gurney flap を取り付けた受動的モーフィング翼に関する低速風洞試験結果について”, 第 61 回飛行機シンポジウム, (2023).
- [8] G. Gibertini, A. Zanotti, G. Droandi, F. Auteri, G. Crosta, “Experimental investigation of a helicopter rotor with Gurney flaps” The Aeronautical Journal Volume 121 No 1236, (2017).
- [9] R. Noda, T. Ikeda, T. Nakata H. Liu, “Characterization of the low-noise drone propeller with serrated Gurney flap” Front. Aerosp. Eng., Sec. Aerodynamics and Flight Mechanics Volume 1, (2022).
- [10] R. Noda, K. Hoshiba, I. Komatsuzaki, T. Nakata, H. Liu, “Near- and Far-Field Acoustic Characteristics and Sound Source Localization Performance of Low-Noise Propellers with Gapped Gurney Flap” Drones (2024).
- [11] 嶋英志, 堤誠司, 藤本圭一郎, “静粛ドローンを目指した革新プロペラの試み”, 第 56 回飛行機シンポジウム, (2018).
- [12] ACSL Web サイト” <https://www.acsl.co.jp/news-release/press-release/2811/>”.
- [13] 嶋英志, 米澤宏一, 松本紘典, 鳥越誠也, 浜崎壘, 堤誠司, 藤本圭一郎, 中村翼, “eVTOL 静粛化技術の試み”, 第 57 回飛行機シンポジウム, (2019).
- [14] E. Shima, T. Tsutsumi, K. Fujimoto, “Preliminary Study on Innovative Loop Propellers for Quiet eVTOL” 8th Asian/Australian Rotorcraft Forum (2019).
- [15] 鈴木陽大, 佐藤允, 菅原瑛明, 田辺安忠, 嶋英志, “ドローン用ローター「Loopprop」の流れ場に関する数値解析”, 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, (2019).
- [16] 福井翔一, 佐藤允, 佐藤光太郎, 嶋英志, “初期型 Loopprop と直線形ブレードにおけるローター特性の比較”, 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, (2020).
- [17] 中新井田馨希, 佐藤允, 嶋英志, “静粛ローター「Loopprop」の遷音速特性に関する CFD 解析”, 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, (2023).
- [18] Y. Nakaniida, M. Sato, E. Shima, “Numerical Study on Aerodynamic Characteristics of Loop Propeller Toward Quiet eVTOL”, AIAA AVIATION FORUM AND ASCEND (2024).
- [19] E. Shima, J. Sun, H. Liu, K. Yonezawa, H. Kaneko “Aeroacoustics, Psychoacoustics, and Aerodynamic Characteristics of Innovative Looped Propellers Using Catenary Curves” 30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (2024).
- [20] Y. Tanabe, S. Saito, “SIGNIFICANCE OF ALL-SPEED SCHEME IN APPLICATION TO ROTORCRAFT CFD SIMULATIONS” The 3rd International Basic Research Conference on Rotorcraft Technology, (2009).