

1C05 有翼eVTOLにおけるプロペラと主翼の空力干渉

○米澤 宏一 (電力中央研究所), 古後 遼大, 劉 浩 (千葉大), 佐藤 允 (工学院大), 嶋 英志(JAXA)

Aerodynamic Interference Between Wing and Propellers in Winged eVTOL

Koichi Yonezawa (CRIEPI), Ryota Kogo, HaoLiu (Chiba University),
Makoto Sato (Kogakuin University), Eiji Shima (JAXA)

Key Words : Propeller, Main Wing, Aerodynamic Interaction

Abstract

The effects of aerodynamic interference between the rotor and the wing were investigated experimentally for use in the aerodynamic design of an electric vertical takeoff and landing aircraft that operates as a quadcopter when hovering and uses the lift of the wing when in horizontal flight. In the experiments, the position of the rotor was varied in the wing span direction for comparison. The results showed that the lift-drag ratio of the main wing was varied due to the rotor position and that the optimum rotor position was almost the mid-span of the wing.

1. はじめに

物流業界では、近年配送量が増加し、ドライバー不足が問題になっている¹⁾。また、CO₂の大量排出による環境汚染も懸念される²⁾。これらの問題の解決策の一つとして、eVTOL（電動垂直離着陸機）が注目されている。松尾³⁾は、トラックとマルチコプタにおける配送時の効率とCO₂の排出量の違いをシミュレーションにより調査し、マルチコプタは配送の効率向上とCO₂低減の両立が可能であることを明らかにした。

一方で、eVTOLの物流用途での実用化には航続時間および航続距離の延長が大きな課題の一つとなっている。航続距離を拡大するためには、水平飛行中の機体の揚抗比を最大化し、推進器によるエネルギー消費を最小化することが求められる。嶋らは、シンプルかつ高揚抗比を目的としたPPB(Passive Pendulum Body)と呼ばれる形態の有翼eVTOLを提案した^{4,5)}。この形態は、マルチコプタに主翼を付加し、ティルトウイング機のように離着陸時と巡航時でプロペラと主翼の角度を変えることで主翼からも揚力を得る。そのため、プロペラのみで飛行するマルチコプタよりも高効率な飛行を実現できる。また、プロペラと主翼の転換は4枚のプロペラの推力差を利用して行うため、アクチュエータなどを必要とせずシンプルな機体となっている。過去に行われた風洞試験^{6, 7, 8)}にて、主翼の上下に配置されたプロペラと主翼の空力干渉による機体全体の揚力の増大が確認されたが、そのメカニズムや主翼に対するプロペラの設置位置の違いによる影響も詳しく調査されていない。また、これまで行われている有翼eVTOLにおけるプロペラと主

翼の空力干渉の研究は、Lift and Cruise型の機体⁹⁾やプロペラが主翼の前方に配置されたVectored thrust 型の機体¹⁰⁾を対象としているものが多く、主翼の上下にプロペラを配置したPPB形態のような機体を対象とした研究は他に見られない。そこで、本研究では、主翼の上下にプロペラを配置したティルトウイング機の空力特性の解明および空力性能の向上を目的として、主翼の上下に配置されたプロペラが主翼に及ぼす影響について風洞試験を行い調査した。

2. 試験方法

本研究では、千葉大学に設置されている回流式の風洞を使用した。計測部は図1に示すように、1m×1m×2mで、開放されている。模型は図2に示すように、過去の風洞試験¹¹⁾で用いられたPPB形態の機体をもとに半スパンの模型を用いた。主翼とプロペラの位置関係は図2右図の通りとなっており、プロペラ回転面は主翼翼弦に対して45°傾いている。プロペラおよび主翼の仕様は表1に示すとおりである。2基のプロペラはいずれも主翼とは分離された状態で固定されており、主翼は胴体内部で六分力が計測できるロードセルで支持されており、胴体とも分離されている。試験条件として、風速を10m/s、ロータ回転数を5400min⁻¹で固定して主翼に作用する空気力を計測したうえで、2基のプロペラの位置を主翼スパン方向に変化させ、主翼の揚抗比を評価した。

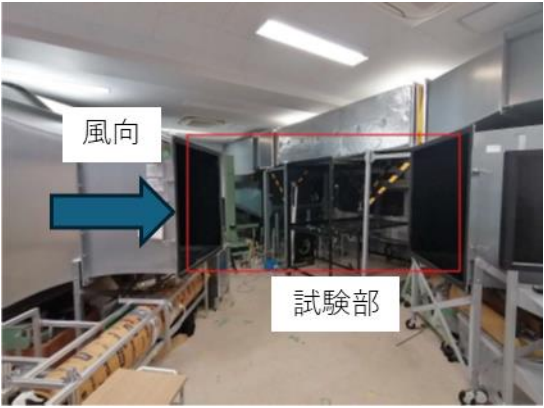


図 1 風洞試験部

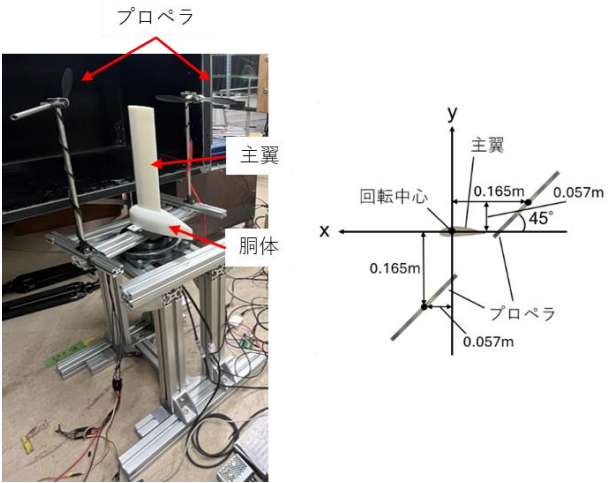


図 2 主翼・プロペラ模型

表 1プロペラおよび主翼の仕様

プロペラ半径	0.10
$r[m]$	
翼弦長 $c[m]$	0.10
翼スパン $b[m]$	0.40
翼面積 $S[m^2]$	0.04
翼型	NACA4421

3. 試験結果

図3に試験で得られた結果として、プロペラのスパン方向を変化させた場合の揚力、抗力、揚抗比の変化を示す。図中にはプロペラを設置していない主翼のみ、翼下面側のみプロペラを設置した場合、翼上面側のみプロペラを設置した場合、2台のプロペラを設置した場合の4つの条件について計測結果を示している。なお、主翼の迎角は 12° である。まず、翼下面にのみプロペラを設置・運転した場合について、主翼のみの結果と比較すると、揚力は、主翼のみの場合よりも低下し、プロペラの設置位置に関係なくほぼ一定の値を示している。抗力もプロペラの設置位置

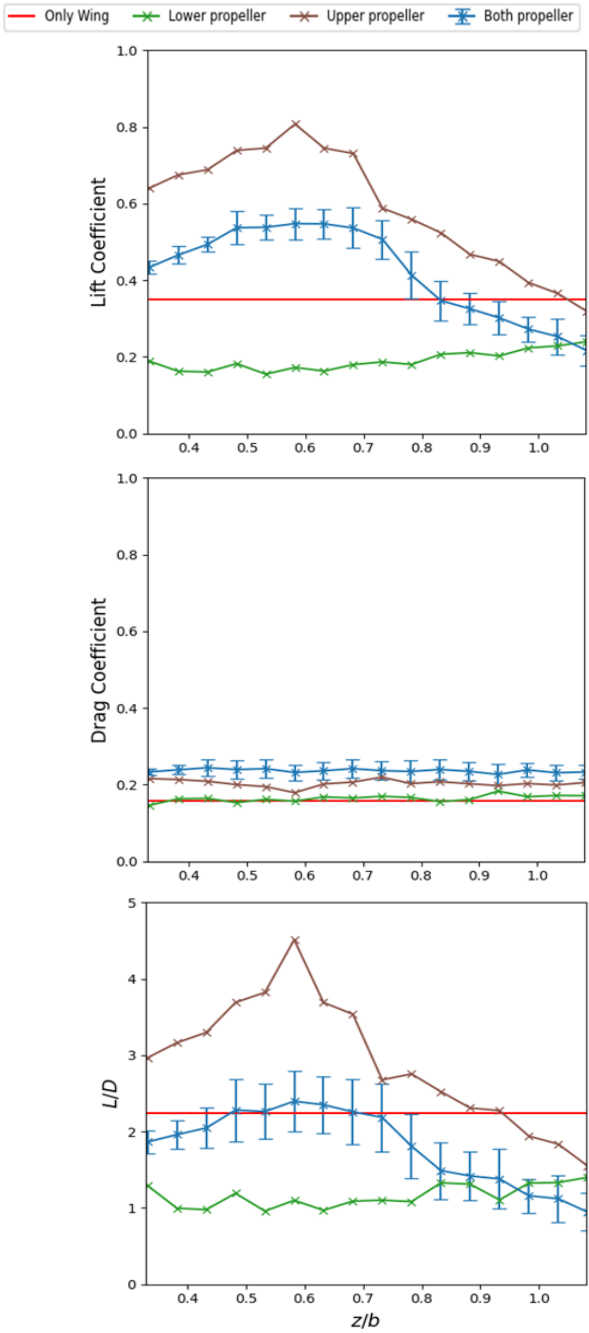


図 3 プロペラ設置位置に対する、揚力・抗力・揚抗比の変化

による影響は少なく一定で、主翼のみの場合と同程度の値となっている。このため、揚抗比は主翼のみの場合と比べるとほぼ半減している。この結果は、翼下面のプロペラが作る誘導速度が、主翼周りの流れを変化させ有効迎角を低下させることが原因であると考えられる。次に翼の上面側のプロペラのみを設置・運転した場合について、主翼のみの場合と比較すると、揚力は増加しており、プロペラが主翼スパンの60%の位置に設置されている場合に最大となっている。一方で、翼端側にプロペラが設置されている場合に

は揚力の増加量は小さくなり、翼端よりも外側にプロペラが設置されている場合には、主翼のみの場合よりも揚力が減少する。抗力に関してはプロペラの設置位置の影響は小さいが、主翼のみの場合に比べて抗力は増加している。この結果、揚抗比はプロペラが主翼スパンの60%に設置されている場合に最大となっている。主翼上面側にプロペラを設置した場合にはプロペラが吸込む流れにより主翼の有効迎角が上昇するため揚力、抗力が増加するものと考えられる。一方でプロペラのスパン方向位置が影響することに関しては、主翼後流、特に翼端渦の影響でプロペラの吸込み特性が低下している可能性が考えられるが、今回の試験では計測を行っていないため、影響の解明は今後の課題である。プロペラ2基を設置・運転した場合には、上記の2つの結果を足し合わせた傾向が見られる。つまり、上面側のプロペラの作用により主翼の揚抗比が増加し、下面側のプロペラの作用により揚抗比が低下している。以上の結果から、主翼上下にプロペラを設ける場合にはプロペラの設置位置は主翼スパンの60%付近が最も適当であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、主翼の上下にプロペラを配置した有翼のeVTOL機体の主翼とプロペラの空力干渉の影響を明らかにするために風洞試験を行い、主翼に作用する空力荷重の評価を行った。この結果、主翼上面側のプロペラによる誘導速度によって主翼揚力は増加する一方で、下面側のプロペラは揚力を低下させる作用が確認された。また、主翼の抗力は、主翼上面側のプロペラにより増加し、下面側のプロペラの影響はほぼ見られないことが確認された。主翼上下にプロペラを設置した場合はこれらの作用がほぼ加算される。また、主翼スパンのおよそ60%の位置にプロペラを設置すると主翼の揚抗比が最大となることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 野波建蔵: ドローン産業応用のすべて一開発の基礎から活用の実際まで一, 株式会社オーム社, 2018, pp. 194.
- 2) 国土交通省: 令和5年度宅配便等取扱実績関係資料, 2024
- 3) 松尾典孝: ドローンによる宅配物流の効率化とCO₂排出低減に関するシミュレーション研究, 日本自動車技術会(JSAE)春季学術講演会講演予稿集, 91(2020).
- 4) 嶋英志, 堤誠司, 藤本圭一郎, 伊藤浩之: Passive Pendulum Body : 新しいeVTOL全機形態の提案, 流体力学講演会/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, 2019, pp. 173-181.
- 5) Shima, E., Tsutsumi, S., Fujimoto, K. and Ito, H.: Passive Pendulum Body : a Novel eVTOL Configuration, International Powered Lift Conference, 2020, pp. 182-196.
- 6) 嶋英志, 米澤宏一, 西田涼馬, 佐藤允, 堤誠司: Box翼を持つマルチコプタの風洞試験, 流体力学講演会/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, 2020, pp. 129-136.
- 7) Shima, E., Yonezawa, K., Nishida, R., Honda, S. and Sato, M.: AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF BOX WINGS FOR AN INNOVATIVE EVTOL CONFIGURATION, 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2022.
- 8) 嶋英志, 佐藤允, 本多秀輔, 中新井田馨希, 米澤宏一, 古後遼大, 劉浩: 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, 飛行機シンポジウム, 2023, 2B02.
- 9) Lee, W. S., Tai, M. S., Kim, D. H. and Park, D. H.: Construction of Aerodynamic Database and Investigation of Power-On Effect for Lift-Cruise Type eVTOL Aircraft, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2024.
- 10) Simmons, B. M.: Efficient Variable-Pitch Propeller Aerodynamic Model Development for Vectored-Thrust eVTOL Aircraft, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2022.
- 11) 古後遼大, 中新井田馨希, 守屋龍, 高橋陽平, 米澤宏一, 佐藤允, 嶋英志, 劉浩: 推進効率が向上した有翼eVTOLにおけるプロペラと主翼の空力干渉, 飛行機シンポジウム, 2024, 2E12.