

11C06 eVTOL機における胴体と推進プロペラの 空力干渉について

○佐藤彰，田辺安忠（静岡理科大学）

Aerodynamic Interaction Between a Propeller and the Fuselage on a Lift+Cruise type eVTOL Aircraft

Key Words : eVTOL, Aerodynamics, Numerical Analysis

Abstract

Aerodynamic challenges in lift-and-cruise eVTOL aircraft are among the most critical barriers to their efficiency, safety, and operational viability. These issues stem from the conflicting requirements of vertical takeoff/landing (VTOL) and forward cruise phases, compounded by the complexity of transitioning between the two modes. This research focuses on the interaction between the propeller and the fuselage during transition and cruise modes. Numerical simulation and wind tunnel testing are carried out to study the aerodynamic interaction between the fuselage and the propeller to identify the changes in the performances of the propeller and the fuselage. For a pusher propeller located behind the fuselage, the inflow velocity into the propeller is reduced by the fuselage, which improves the propeller efficiency itself. The overall efficiency, including the drag of the fuselage, is found to increase more than the efficiency of the isolated propeller and the isolated fuselage added together.

1. はじめに

リフト&クルーズのeVTOL航空機における空力的な課題は、その効率性、安全性、運用可能性にとって最も重大な障壁の1つである。これらの問題は、垂直離着陸（VTOL）と前方巡航の相反する要件に起因しており、2つのモード間の移行が複雑であることも影響している。eVTOL（および従来型）航空機における機体とプロペラの相互作用は、空力的および構造的に重要な考慮事項である。この相互作用は、効率、騒音、振動、総合性能に影響し、特に、プロペラが複数の飛行フェーズ（ホバリング、移行、巡航）で動作する必要があるリフト&クルーズ型のeVTOL設計では顕著である。

図1に示すように、著者らが研究中の典型的なリフト&クルーズ型eVTOL機では、ホバリング時や低速飛行時に、揚力ロータが垂直離着陸時に高速ダウンウォッシュを発生させる。この流れは胴体や主翼などの構造物に衝突する可能性があり、胴体表面がダウンウォッシュを乱すことで抗力が増大し、正味の揚力効率が低下する。ダウンウォッシュは地面や胴体で反射してプロペラディスクに再循環し、渦輪状態や推力損失の危険性がある。揚力ロータからの後流は尾翼や主翼に直接流れ込み、ホバリング中の航空機を不安定にする可能性がある。著者らは、数値シミュレーションと実験によってこの問題を研究した[1]。

本研究は、遷移モードと巡航モードにおけるプロ

ペラと胴体の相互作用に焦点を当てている。胴体は、動きの遅い空気の境界層を生成する。胴体の後方に配置されたプロペラ（例えば、図1に示すようなプッシャー構成）は、この乱流の低エネルギー気流を取り込み、推力の変動やその他の相互作用を引き起こす。プロペラは、隣接する胴体部分上の気流を加速する。これは、胴体への流れの付着を改善することができるが、加速された流れは、胴体の抗力を高めることにつながる表面摩擦を増加させる可能性がある。

本研究では、数値シミュレーションと風洞試験を実施し、胴体とプロペラの空力的相互作用を調べ、プロペラと胴体の性能の変化を明らかにする。

2. 数値シミュレーション手法と実験装置

数値シミュレーション（CFD）は、JAXAで開発された回転翼専用のCFDコードであるrFlow3Dを用いて行われた[2-5]。本研究で採用した数値計算



図1 試験中のeVTOL機（静岡理工大製作）

手法を表 1 に示す．全速度数値スキームである mSLAU [6]（モディファイド SLAU [7]の略）は，このコードを小型プロペラに関連する低マッハ数，低レイノルズ数の流れにも適用できるようにしている．

実験は，図2(a)に示すように，半分の大きさの胴体とプロペラの模型を用いて風洞実験を行う．図2(b)では，胴体とプロペラに作用する力とモーメントを別々に測定できるように，胴体用とモーター駆動プロペラ用の2つの6分力ロードセルを示している．

3. リフトロータ

機体のリフトロータにはAPC社製13x4Eプロペラを使用する．一定の回転速度 7000 rpm では，図 3 に示すように，流れ場は前進速度によって大きく変化する．推力、出力、抗力の係数と、有

効揚力抗力比 L/De と前進率 μ の関係を図4に示す．図4(b)に示すように，ロータ先端-翼面を水平に保った場合、推力（揚力）は速度とともに大きくなる（図4(a)）が、出力はほとんど変わらないことが注目される．

4. プッシュプロペラ付き機体

図 5 に示すように，プッシュプロペラ（APC 6x4E，機体で使用されている APC 12x8E の半分のサイズ）を装備した機体の数値シミュレーションを実施した．プッシュプロペラを搭載した機体に作用する抗力を，図6に示すように，孤立した機体の抗力と比較した．プロペラによって加速された胴体への流入が、特に低速飛行で支配的であることがわかる．

分離プロペラと分離胴体から推定される正味推力を図7(a)に，プッシュプロペラと胴体の数値シミュレーションで得られた正味推力を図7(c)に示す．正味推力は，複合モデルの方が高速（15m/s 以上）で大きくなっている．また，プロペラ効率自体も分離型と複合型では大きく異なる．発生した正味推力に基づく正味プロペラ効率を図7(b)と (d)で比較する．10m/s 以上で顕著に高くなっている．プッシュプロペラは，胴体による流入の減少の影響を半分受けるが，流入角度の減少によりプロペラ翼の迎え角が大きくなるため，より大きな推力を発生させることができると考えられる．

5. 実験値と数値シミュレーションとの比較

図 8(a) (b) に胴体が付いた状態で計測したプッシュプロペラの進行率に対する推力係数とトルク係数を示す．数値シミュレーションに対して，実験値はオフセットをもって大きな値となっている．しかし，進行率の上昇に伴い推力係数、トルク係数ともに低下する傾向は，数値シミュレーションと実験値が同じ傾向を示している．

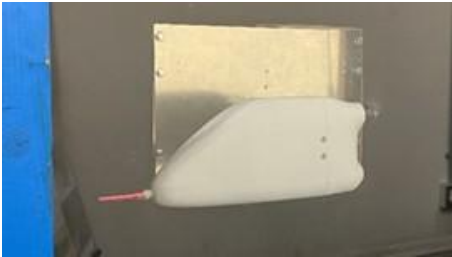
図8(c)(d)には，進行率に対するプッシュプロペラのみ効率とプッシュプロペラと胴体を合わせた全体の効率を示す．数値シミュレーションで示したプッシュプロペラのみ効率が，進行率の上昇に伴い増加していくこと、全体の効率は進行率の上昇に伴いピークをもって減少することが、実験値でも同様に示されている．

6. おわりに

本研究では，数値シミュレーションと風洞試験を実施し，胴体とプロペラの空力的相互作用を調べ、プロペラと胴体の性能の変化を明らかにした．胴体の後ろに配置されているプッシュプロペラ

表 1. 数値計算手法

	Background Cartesian grid	Body-fitted grid
Governing equations	Compressible Navier-Stokes equations	
Spatial discretization	Cell-vertex finite-volume method	Cell-centred finite-volume method
Numerical flux	mSLAU	
Reconstruction	FCMT interpolation method	
Viscous flux	second-order central difference scheme	
Time integration	explicit four-stage R-K method	DTS/LU-SGS
Turbulence model	Menter k- ω SST 2003 model + γ -Re θ Transition Model	



(a) 風洞内の胴体とプロペラの模型



(b) 模型内部のロードセル

図2 実験装置

では、胴体の影響によりプロペラに流入される空気の流入速度が低下する。これにより、プロペラの効率は、速度上昇に伴い上昇していくことが示された。また、胴体まで含めた全体の効率でも、プロペラと胴体を単独で足し合わせた場合よりも、効率が上昇することが分かった。

謝辞

本研究は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務（JPNP23027）の結果得られたものである。また、本研究での風洞試験は静岡理工大学の非常勤職員村松仁志氏、学部4年生藤田紘聡氏、卒業生丸山慈央氏、北澤康来氏に協力を頂いて実施されたものである。

参考文献

- [1] Sato, A., Tanabe, Y. and Ikemoto, T., "Aerodynamic Interference Between Lift Rotors and Main Wing on an eVTOL Aircraft," The 10th Asian/Australian Rotorcraft Forum, Melbourne, Australia, November 7-8, 2024.
- [2] Tanabe, Y., Sugawara, H., "Aerodynamic Validation of rFlow3D Code with UH-60A Data Including High Advance Ratios," 41st European Rotorcraft Forum, Munich, Germany. Munich, Germany, 2015.
- [3] Tanabe, Y., Saito, S. and Sugawara, H., "Construction and validation of an Analysis Tool Chain for Rotorcraft Active Noise Reduction", 38th European Rotorcraft Forum, Sep. 2012.
- [4] Tanabe, Y., Saito, S. and Sugawara, H., "Construction and validation of an Analysis Tool Chain for Rotorcraft Active Noise Reduction", 38th European Rotorcraft Forum, Sep. 2012.
- [5] Tanabe, Y., Saito, S., Takayama, O., Sasaki, D. and Nakahashi, K., "A New Hybrid Method of Overlapping Structured Grids Combined with Unstructured Fuselage Grids for Rotorcraft Analysis," 36th European Rotorcraft Forum, Paris, France, September 9-11, 2010.
- [6] Tanabe, Y. and Saito, S., "Significance of All-Speed Scheme in Application to Rotorcraft CFD Simulations," The 3rd International Basic Research Conference on Rotorcraft Technology, Nanjing, China. October 14-16, 2009.
- [7] Shima, E., and Kitamura, K., "On New Simple Low-Dissipation Scheme of AUSM-Family for All Speeds," 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, FA, January 5-8 2009, AIAA Paper 2009-136.

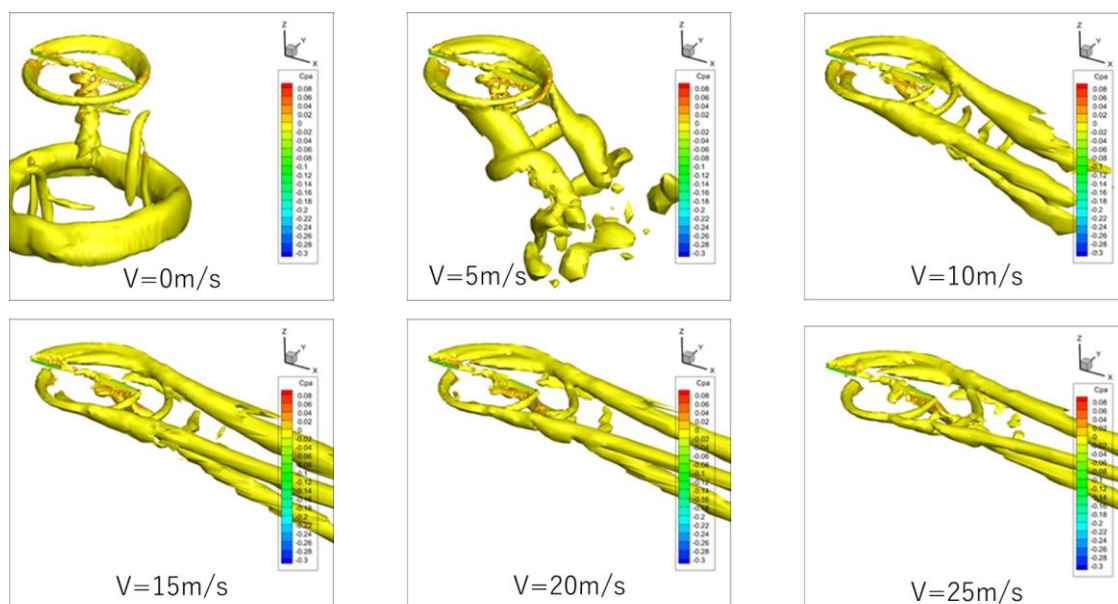


図3 進行速度によるフトロータの流れ場の変化

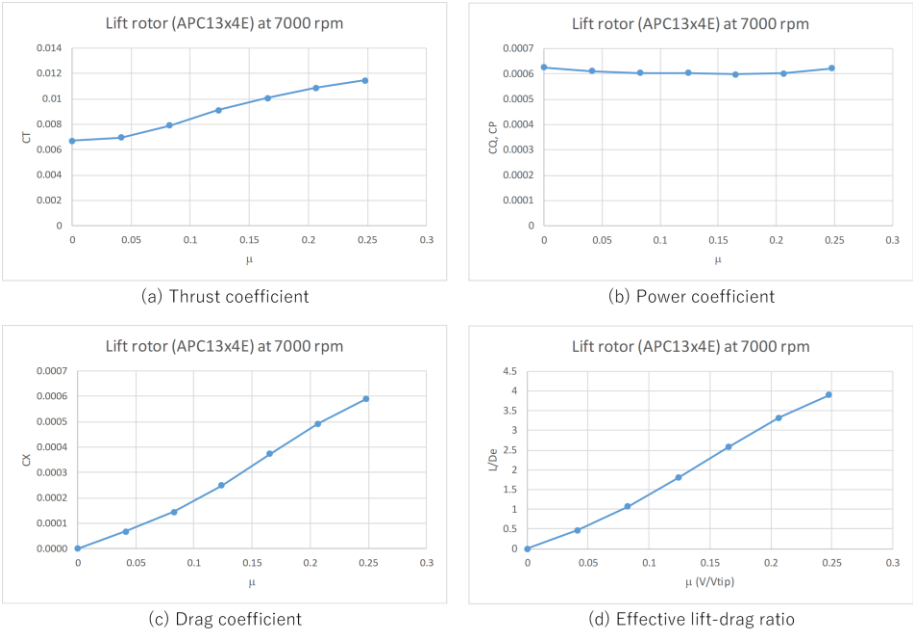


図 4 前進率によるリフトロータの性能変化

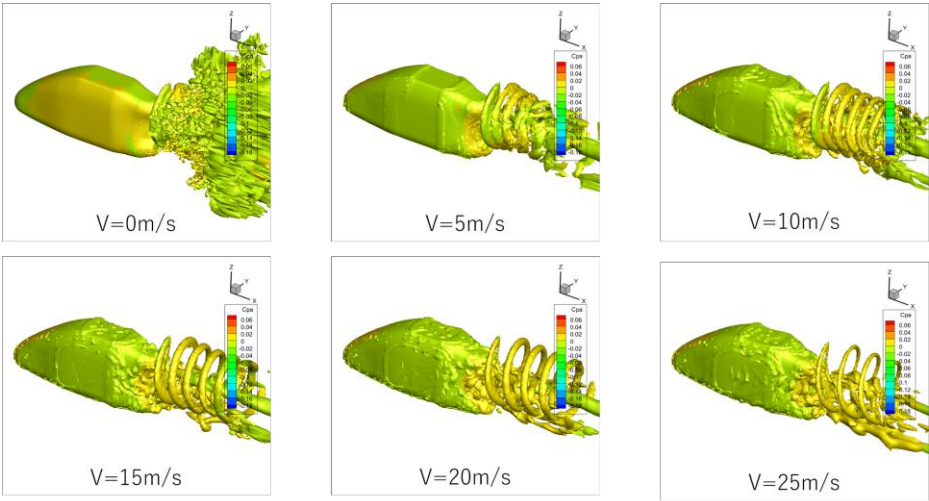


図 5 推進プロペラの流れ場の中の機体胴体

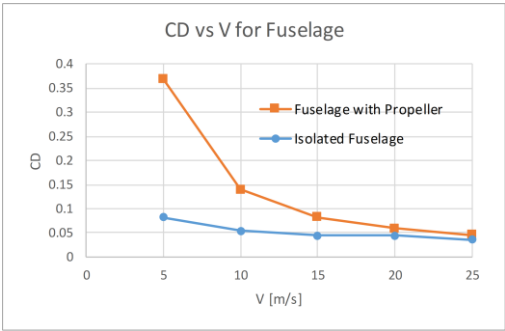


図 6 ブッシャプロペラによる抗力係数の変化

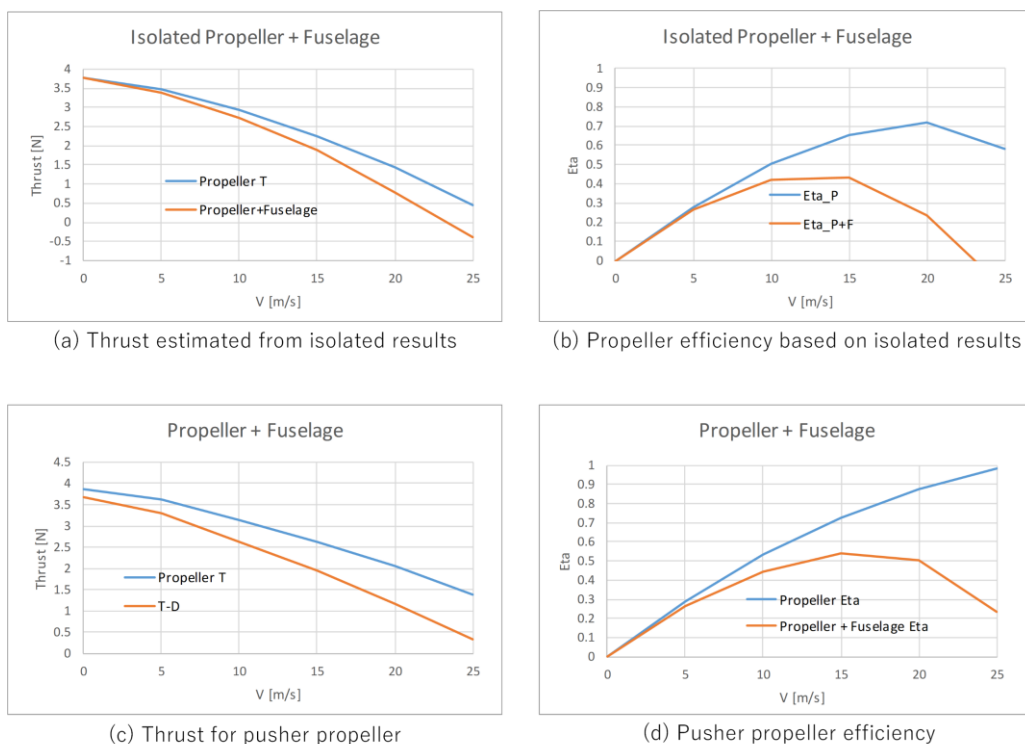


図7 プッシュプロペラの推力と効率

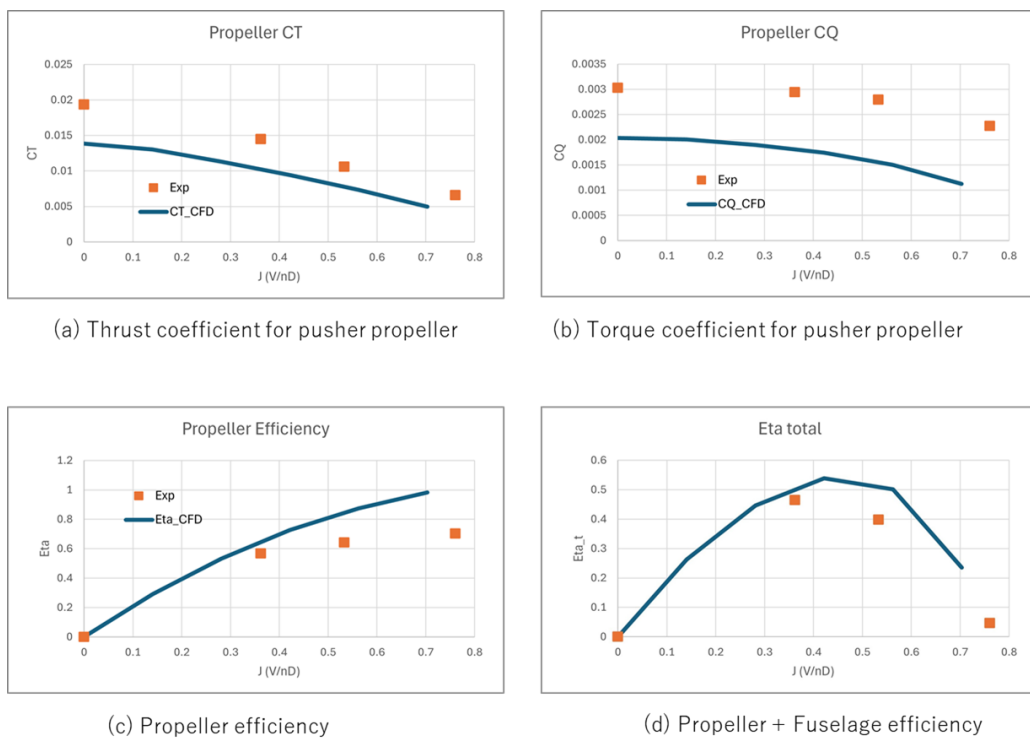


図8 プッシュプロペラの推力と効率、実験値と数値シミュレーションとの比較