

Box翼を持つマルチコプタの風洞試験

嶋 英志 (JAXA), 米澤 宏一 (電力中央研究所),
西田 涼馬, 佐藤 允 (工学院大学), 堤 誠司, 藤本 圭一郎 (JAXA)

Wind Tunnel Testing of a Multicopter with Box Wing

SHIMA Eiji (JAXA), YONEZAWA Koichi (CRIEPI),
NISHIDA Ryoma, SATO Makoto (Kogakuin Univ.),
TSUTSUMI Seiji, FUJIMOTO Keiichiro (JAXA)

ABSTRACT

The aerodynamic characteristics including high angle of attack condition up to 95 degrees of the Box wing, in which the electric multicopter was surrounded by a duct like annular wing, were acquired by a wind tunnel test for use in a quiet Electric Vertical Take Off and Landing (eVTOL) aircraft. The Box wing is expected to be quieter by shielding the aerodynamic noise from the propeller. It was shown that the Box wing has a mild stall characteristic, the lift of the Box wing increases due to the effect of the propeller thrust, and that the current Box wing has no effect of improving the hovering ability.

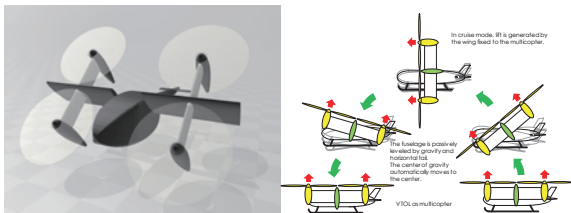


図1 PPBコンセプトの概要. 転換飛行中のCGイメージ (左), 離陸-遷移飛行-水平飛行-遷移飛行-着陸のイメージ図 (右)

1. はじめに

近年, 電動マルチコプタに代表されるElectric Vertical Take-off and Landing Aircraft (eVTOL)は用途を広げ, 物流用途での利用が始まりつつあり, さらには「空飛ぶタクシー」など旅客輸送に注目が集まっている. 物流・旅客輸送など輸送分野の利用には, 重いペイロードを積み長距離を安全に飛行できる空力性能が求められる.

輸送eVTOLの利便性向上には居住地近傍や人口密集地の飛行が望まれ, 騒音低減が大きな課題であるが, 中型電動マルチコプタから発生する騒音レベルは80dB~100dB程度とされ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であり, このままでは市街地での幅広い活用は難しい.

嶋ら^{2,3)}は, 電動マルチコプタの能力を生かし高揚抗比を軽量・シンプルな構造で実現できるeVTOL向けの最新機形態Passive Pendulum Body(PPB)を提案した. PPBの特徴はマルチコプタを90度回転して主翼により揚力を発生し水平巡航する. これにより, 巡航時の揚抗比を改善し飛行時間の拡大が可能である. PPBは主翼を付けたマルチコプタから電池やペイロードを収めた胴体を自由回転軸を介して吊り下げることを特徴と

しており, マルチコプタへの能動的コンポーネントの追加なしにチルトウィングと同等の効果を得ることを可能にしている. 図1にPPBコンセプトの概要を示す. PPBの機体設計上の課題としては, 自由回転軸付近で主翼が途切れて有効翼幅が減少することによる誘導抗力増加があげられる.

一方, 騒音に関しては, 揚抗比の改善により水平巡航時の必要推力は減少し, これにより推進騒音の大幅な減少が見込まれる. しかし, eVTOLの最大の騒音は最大推力が必要な垂直離陸およびホバリング時に発生するプロペラ (あるいはロータ) からの空力騒音である. これを低減する方法として, プロペラ周囲のダクトでの吸音や遮蔽が考えられる. 図2に代表例を示すように, VTOL機へのダクトドファン (あるいはプロペラ) 適用は60年代より試みられ⁴⁾, 新しい提案もある⁵⁾.

本研究では, PPBの空力・空力騒音上の課題を解決する新形態として, 主翼をプロペラ周囲を囲うダクト状のBox翼とした新形態PPB with Box Wing (PPBB)を提案し, 風洞試験により基本的な空力特性を明らかにする.

Box翼を用いる事で自由回転軸に揚力を持たせる必要はなくなり, 主翼の連続性が向上するとともに更なる揚抗比向上の可能性が示されている⁷⁾. また, プロペラを遮蔽するBox翼の効果で騒音低減が期待される.

本形態では水平巡航状態での約0度から離着陸およびホバリング時の約90度までの広い迎角範囲でBox翼を用いるので, VTOL機の空力特性で重要な遷移飛行に対してはポストストール状況でのBox翼の特性を知ることが必要である. 更に翼の近傍に取り付けられたプロペラが重量に匹敵する大きな推力を発生する状態で運用されるのでプロペラ後流などの影響も大きい. そ

ここで本研究では、プロペラの回転数をできる限り広い回転数範囲で変動させながら、0度から95度までの範囲で迎角を変化させて空気力や消費電力の概要を取得しeVTOLに利用する場合のBox翼の基本的な空力特性を明らかにする。

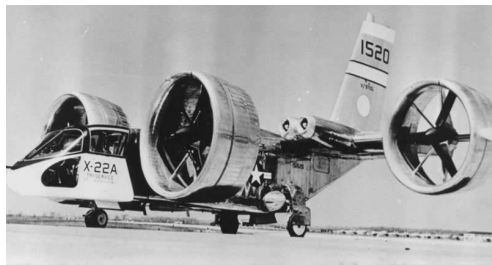


図2 ダクトドファンを用いたVTOL機の例. Bell X-22(1966)⁴⁾

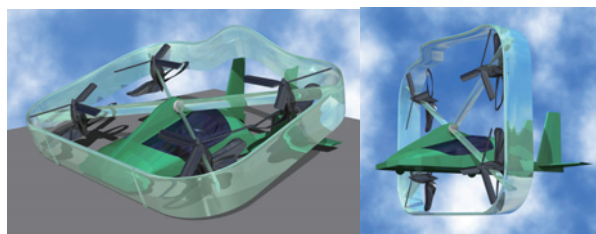


図3 PPBBを用いたeVTOLのコンセプトデザイン. 地上状態(左)と巡航飛行状態(右). 内部が見えるよう主翼を透明素材としている。

2. ダクトドファン利用のVTOLとPPBBの基本的アイデア

ダクトの効果によりむき出しのプロペラに比較して効率が向上することが知られている。嶋らの実験結果⁹⁾では、約20%の効率向上が示された。またダクトには側方への音の遮蔽による静音化効果も期待される。VTOLへのダクトドファンの利用は古くから試みられている。例として、1966年初飛行のBell社 X-22⁴⁾は当初実用機として計画され、その後研究目的で80年代まで実験が継続されたことが示すように実用に近い形態である。最近、Bell社はガスタービン発電機と電動モーターを組み合わせダクトドファンを用いたハイブリッドVTOLを提案している⁵⁾。

X-22等で用いられているダクトは水平飛行時には一種の円環翼として働き揚力を発生する。PPBのプロペラをダクトで覆ったダクトドファンに変更し同様にダクトを主翼として用いることは可能である。しかし、巡航時に上下に円環が重なった形となり、翼幅が増えずに翼面積が増加するので誘導抗力・摩擦抗力共に増大する問題点がある。そこで、複数のプロペラを一つの大きなダクトとみなせるBox翼の中に収め、面積の増大を最小限に抑えるのが、PPBBの基本的なアイデアである。図3にPPBBを用いた輸送eVTOLのコンセプトデザインを示す。

Desamiら⁷⁾は解析的にBox翼のような環状翼による翼効率向上効果を示し、翼効率が2以上まで向上することが示されている。これは1.4倍以上の翼幅の楕円翼と同等である。図4に揚力線理論で循環分布を最適化したBox翼等の正面形状と翼効率計算例を示す。

また、主翼全体が原理的に剛性の高い箱型を成すので構造の軽量化に役立つことも期待される。

VTOLの飛行においては安定な遷移飛行の実現が大きな課題であるが、遷移飛行の際のBox翼の高迎角、ポストストール特性に関する報告は知られていない。大きなプロペラ推力によるパワードリフトにより穏やかなポストストール特性を有することが期待される。

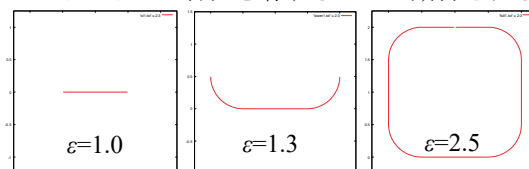


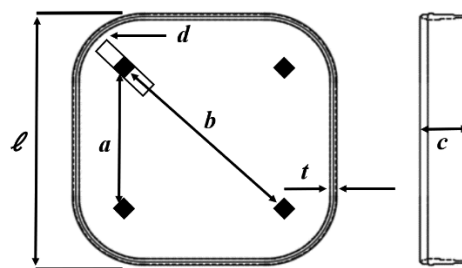
図4 揚力線理論で最適化された直線翼(左), ウィングレット状翼(中), Box翼(右), 各々の正面形状と翼効率. 各翼の全スパンで正規化。

3. 実験装置の概要

風洞試験にはJAXA相模原キャンパスの惑星環境風洞吹(吹き出し口直径1.6m)を用いた。実験ではBox翼大(Large Box wing), Box翼小(Small Box wing), Box翼無し(No Box wing)の3形態を使用し, Box翼の翼形状はNACA0012とした。プロペラは8インチの2枚ブレードを使用した。寸法は図5を参照されたい。

図6は本研究で用いた試験装置の概略図である。模型が吹出口に平行である点を0[deg]とし, 時計回りに水平回転させることで迎角(α)を設定した。模型後部に取り付けた6分力天秤により, 力, モーメントを計測した。プロペラの回転数は光学式非接触回転計で計測し, 消費電力はパワーメータを用いて計測した。

本実験では, マルチコプタの前進飛行状態とホバリング状態を通風した場合と無風の場合でそれぞれ模擬している。通風時の風速は10[m/s]で設定した。これは模型強度の制限による。翼弦長基準のRe数は 6.8×10^4 となる。プロペラの回転数は0, 1500, 2000, 2500[rpm]の4種類とし, 迎角については0から95[deg]までを5[deg]刻みで変化させた。1つの角度で風速, 回転数等を変更するため, 10ケースを測定した。本測定をBox翼無し, Box翼小, Box翼大の3形態で行い, 計700ケース測定した。実験結果は, 一様流流速, Box翼小の投影面積, プロペラ間の距離aを各々基準の速度, 面積, 長さとして無次元化した。



	長さ l[mm]	コード長 c[mm]	厚さ t[mm]	隙間 d[mm]	軸間距離 a[mm]	対角の 軸間距離 b[mm]	投影面積 S[m ²]
BOX翼大	580	100	12	50	254	363	0.058
BOX翼小	500	100	12	10	254	363	0.050

図5 Box翼及びプロペラ配置



図6 模型の概要

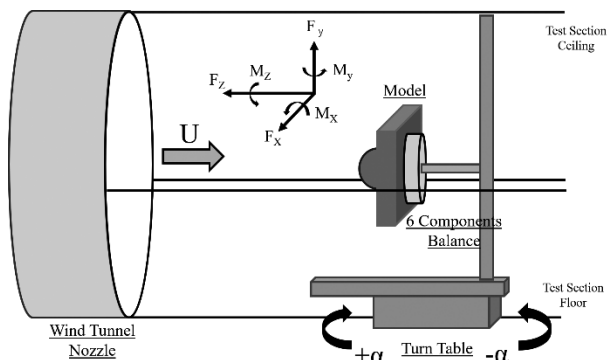


図7 試験装置の概略図

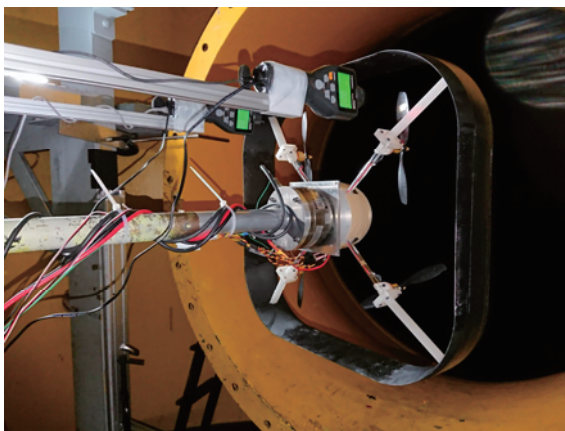


図8 風洞内設置の状況

4. 実験結果とその考察

4.1 推力無しの基本空力特性

図9-13に推力無しの場合の、揚力(C_L)、抗力(C_D)、軸力(C_A)、垂直力(C_N)、モーメント(C_m)を横軸迎角(α)を各々示す。特徴を次に記す。

4.1.1 揚力特性

Box翼無しでは揚力係数は概ね0なので揚力発生はほとんどBox翼によるものである。2次元翼型データベース⁸⁾によると Re 数 $=5 \times 10^4 \sim 10^5$ でのNACA0012翼型の最大揚力係数は0.8~1.1程度であり、またその時の迎角は8度~12度程度で、失速後には急な揚力の低下がみられる。一方Box翼小では最大揚力係数は1.2程度で、それに近い揚力を迎角20度~40度付近の広い範囲で発生している。Box翼は上下に2枚の翼があるので翼面積は投影面

積の2倍あることを考えると、NACA0012翼型単体の特性に比べて、最大揚力係数は小さい。一方、失速特性は顕著に緩やかである。

4.1.2 抗力特性

迎角0度での $C_D > 1.0$ であり、抗力が多い。これにはモーター用電子機器等を収めた概ね半球形の胴体の影響が大きい。胴体みの三分力をAppendixに示す。小迎角でのBox翼単体の抗力は、Box翼無し形態との差と考えるとBox翼小単体の最小抗力は0.1程度である。胴体の力を差し引いた値は4.2節に示す。

4.1.3 モーメント特性

原則的に上下対象形状なので迎角0度付近では $C_m = 0$ となるべきであるが、オフセットが生じている。模型の歪の影響などが考えられる。オフセットを無視すると、いずれの形態でも迎角5度付近までは右下がり静的に空力安定である。Box翼の形態では5度~15度にかけてピッチアップを生じており、 C_L とは異なり C_m の観点では失速の影響がみられる。現時点では迎角の刻みも大きく詳細不明であるが、迎角10度未満の巡航状態では静的な空力安定であると考えられる。これは巡航状態では制御なしでも飛行できることを示唆している。

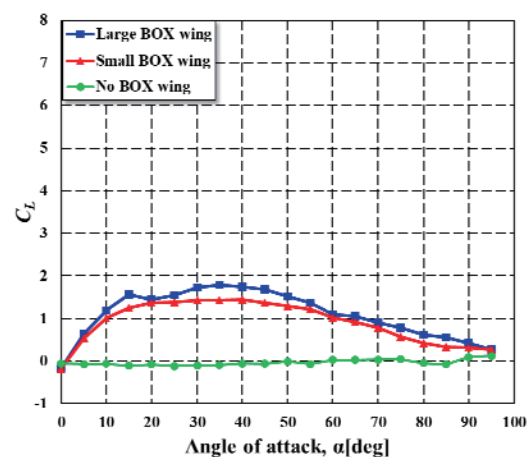


図9 推力無しの各形態の揚力特性

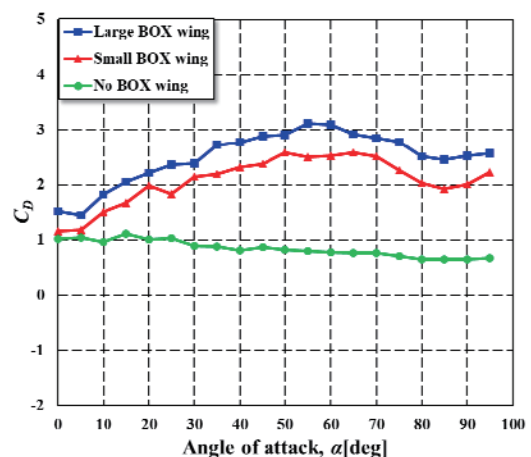


図10 推力無しの各形態の抗力特性

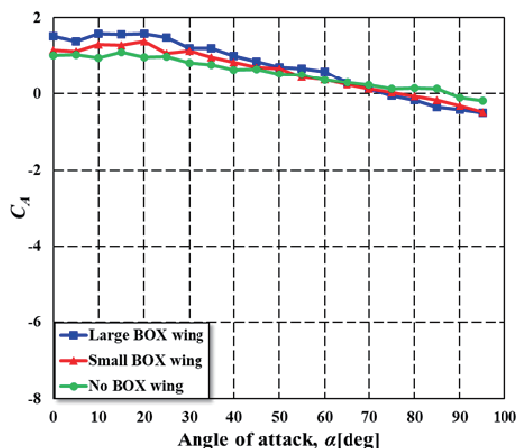


図11 推力無しの各形態の軸力特性

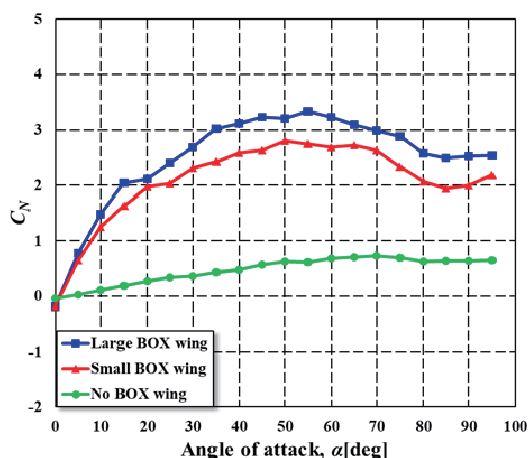


図12 推力無しの各形態の垂直力特性

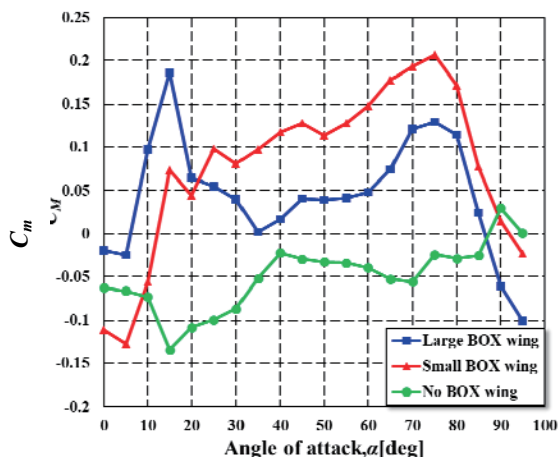


図13 推力無しの各形態のモーメント特性

4.2 推力と一樣流のある場合の特性

マルチコプタが様々な迎角を取りながら水平飛行する場合に相当する。トリム状態での飛行を想定して、上下のプロペラ推力を調整し $C_m \approx 0$ の状態で測定している。また、ここでは、大きな胴体及び六分力天秤の空力的影響を取り除くために、胴体のみ（プロペラおよびダクト無し）の力を差し引いている。胴体のみ力はAppendixに示す。大迎角ではBox翼が胴体を遮る形になるので、胴体の空気力は素の状態より小さくなる

と見込まれ、この処理により大迎角での抗力、垂直力を過小評価している可能性がある。

図14-16に揚力特性、図17-19に抗力特性、図20-22に軸力特性、図23-25に垂直力特性を示す。各形態でプロペラ回転数の違うケースを同じグラフ上に示す。プロペラ推力を含めて六分力天秤で力を計測しているため値には空気力だけではなくプロペラ推力成分も含まれている。特徴を下記する。

4.2.1 軸力特性

軸力は空気力とプロペラ推力の合力で、負の軸力は正味推力の発生を意味する。一樣流がない場合には軸力は概ね符号を反転したプロペラ推力と一致する。図20-22に示されるように、当然ながら、プロペラ回転数増大と共に軸力も増大するが、同回転数でも迎角が大きいくほど軸力も大きい。これは迎角変化に伴い、プロペラ面垂直方向の速度が変化するためと考えられる。一方、迎角0度付近では、プロペラによる軸力増分が極僅かあるいは、むしろ、やや減少を示している場合があるが、これは1500RPMが風洞速度10m/sでのプロペラの自由回転数に近いためである。また、Box翼の有無や大小による変化は顕著ではない。

4.2.2 揚力及び垂直力特性

他の力にも軸力と同様に回転数・迎角と共に増大する推力の影響が大きい。

図14-17に示されるように、どの形態でも回転数増大と共に揚力の増大がみられる。迎角大の状態では増分の大部分はプロペラ推力によるもので、迎角90度では揚力と（符号反転した）軸力は一致する。一方、推力の傾斜成分に直接関係しない、プロペラ推力の影響によるBox翼揚力成分の増大も大きく、軸力の1/3程度の増加が生じていることが図23-25の垂直力特性に示されている。一方、図23に示されるように Box翼無しの場合には迎角増大に伴う垂直力の増加は1.0未満でBox翼ありの場合の概ね1/3である。また、Box翼小はBox翼大よりも増分が大きい、Box翼小の方が翼とプロペラの間隔が小さく干渉効果がより強く表れるためと考えられる。

4.2.3 抗力特性

図17-19のいずれの形態でも低迎角では推力が抗力成分を打ち消すので回転数増大と共に抗力が低下するが、迎角増大と共にその効果は薄れ図17のBox翼無しでは迎角90度で0となる。一方、Box翼付きの場合には前項で述べたプロペラ推力による垂直力の増大による抵抗成分で相殺され、より小さい迎角において抗力減少効果はなくなる。図15のBox翼小では迎角70度付近、図16のBox翼大では迎角75度付近で推力の効果が逆転していることが見て取れる。全ての回転数で同じ迎角で交差しているのは興味深い。

4.2.4 モーメント特性

平均回転数を一定としながら、プロペラの差動を調整しモーメント0の状態での測定を基準としているので $C_m \approx 0$ であり記載は省略する。なお、どの迎角・回転数のケースでもモーメントを0に調整することは可能

であった。これは、Box翼の後流にプロペラが置かれプロペラの差動が阻害される可能性のある状況でもプロペラ推力によるトリム可能であり、少なくとも静的には常に制御可能であることを示唆している。

また風洞試験ではプロペラの差動回転により上下のモーメントを発生させたケースも計測したが、揚力、抗力、軸力、垂直力に関しては大きな差はなかったの、モーメント発生の結果は省略する。

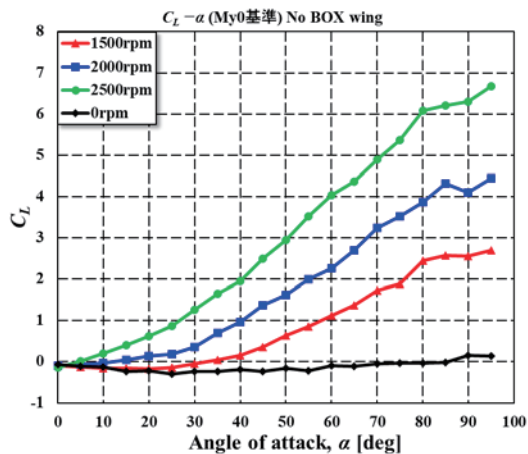


図14 揚力特性 (Box翼無し), 胴体のみ形態との差分

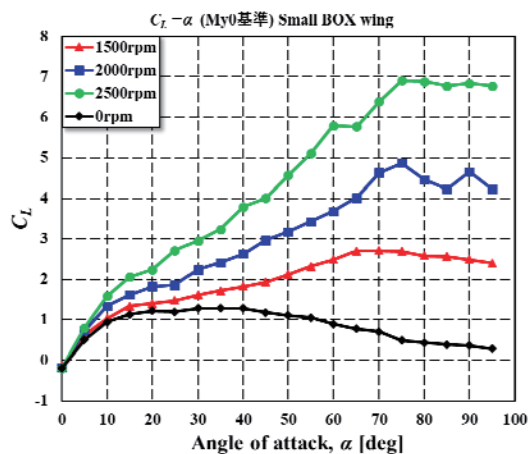


図15 揚力特性 (Box翼小), 胴体のみ形態との差分

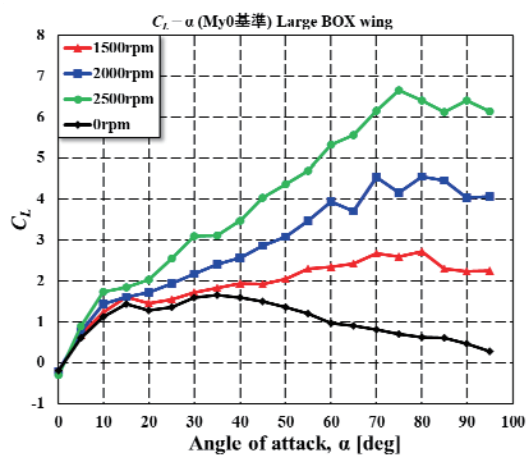


図16 揚力特性 (Box翼大), 胴体のみ形態との差分

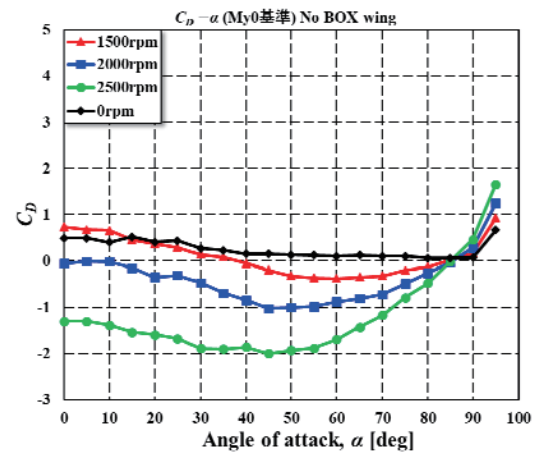


図17 抗力特性 (Box翼無し), 胴体のみ形態との差分

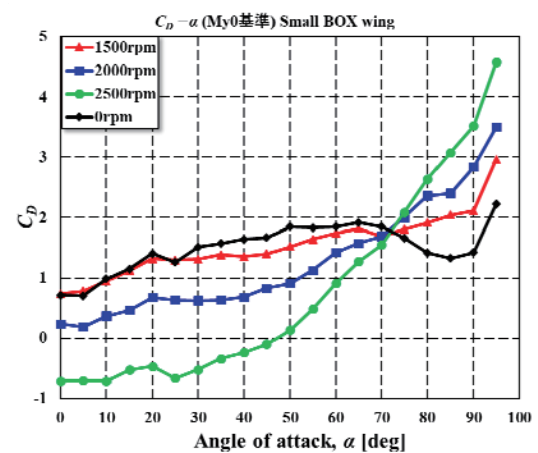


図18 抗力特性 (Box翼小), 胴体のみ形態との差分

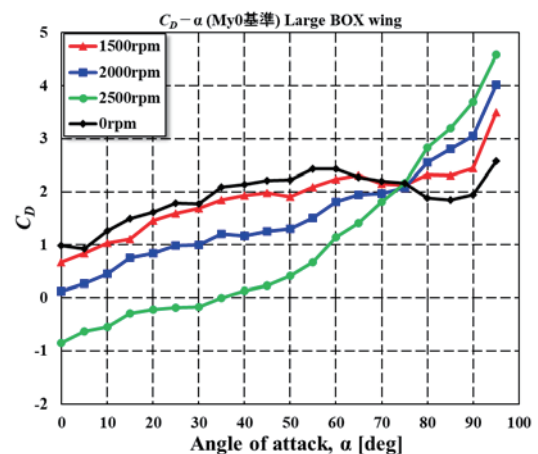


図19 抗力特性 (Box翼大), 胴体のみ形態との差分

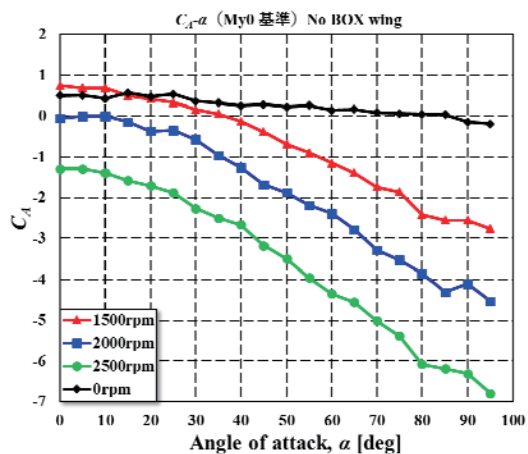


図20 軸力特性 (Box翼無し), 胴体のみ形態との差分

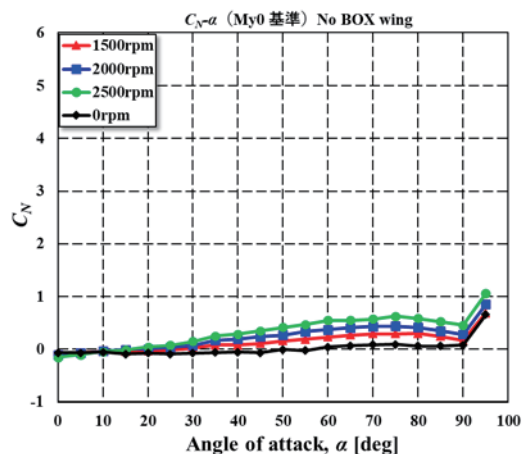


図23 垂直力特性 (Box翼無し), 胴体のみ形態との差分

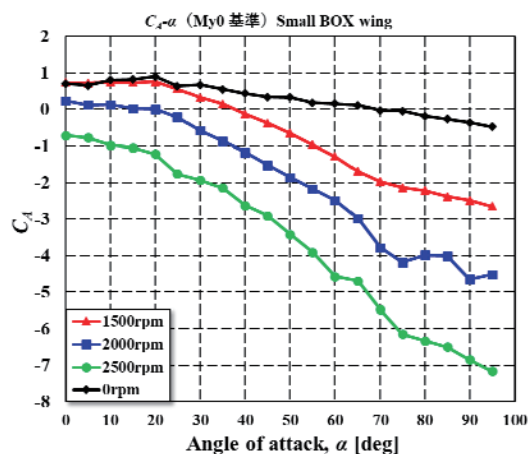


図21 軸力特性 (Box翼小), 胴体のみ形態との差分

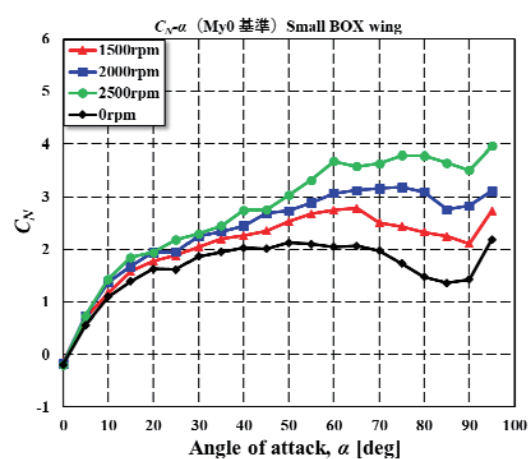


図24 垂直力特性 (Box翼小), 胴体のみ形態との差分

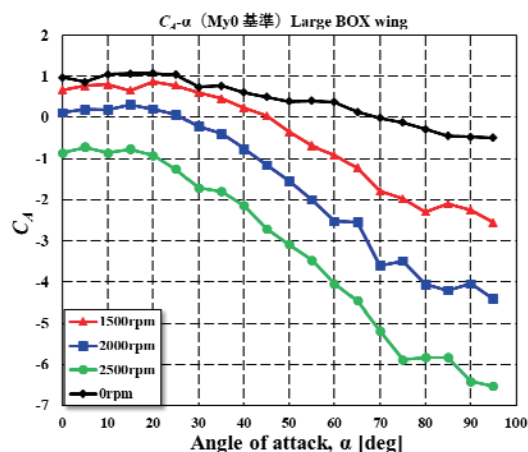


図22 軸力特性 (Box翼大), 胴体のみ形態との差分

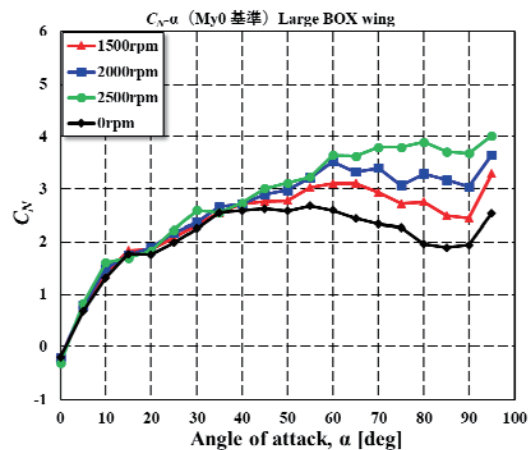
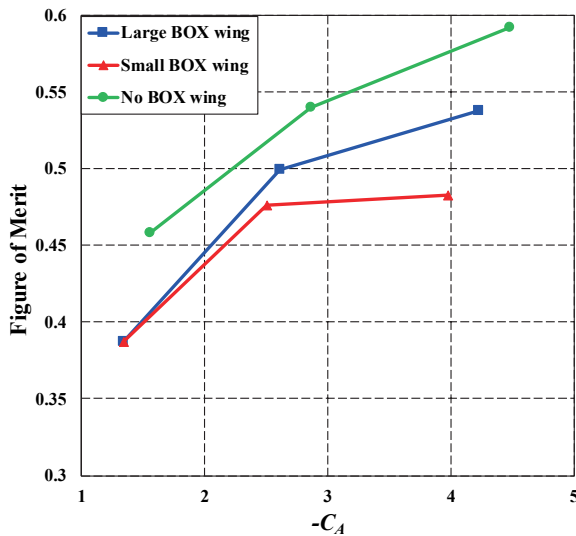
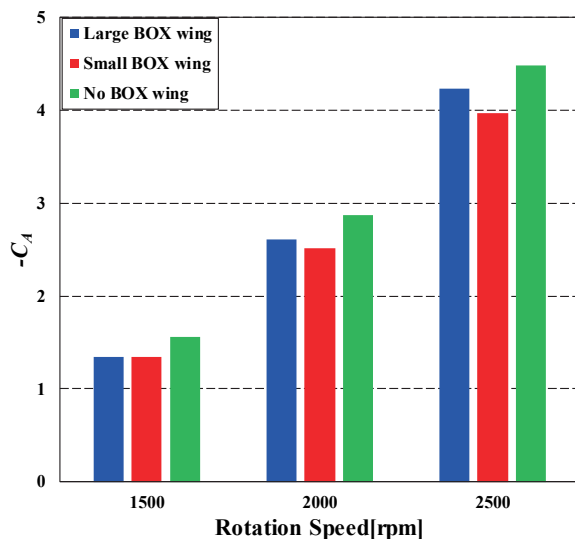


図25 垂直力特性 (Box翼大), 胴体のみ形態との差分

図26 推力 ($-C_A$) -FOM特性図27 回転数-推力 ($-C_A$) 特性

4.3 ホバリング特性（一様流のない場合）

Box翼無し、Box翼大小の各々の形態について、プロペラ回転数を1500RPM, 2000RPM, 2500RPMとした場合の、ホバリング状態（一様流のない場合）での、推力 ($-C_A$) -Figure of Merit (FOM) 特性を図26に、回転数-推力 ($-C_A$) 特性を図27に示す。ホバリング状態では一様流速度がないので推力（軸力）と消費電力だけが計測項目である。推力に関して、他の力との比較のために一様流速度を10m/sとした軸力で示す。なお、 $|C_A|=1.0$ は3.0Nに相当する。またFOM算出に必要なパワーは消費電力を用いている。

図26では、Box翼無し>Box翼大>Box翼小の順にFOMが大きい。図27では数値が大きいほど推力大を示し、これも概ね同回転数では、Box翼無し>Box翼大>Box翼小の順となっている。ダクトドファンに望まれるFOMや推力の増大が現状のBox翼では実現されていない。

ホバリング条件での最適形状ダクト形状はベルマウス状の大きな前縁半径を持っていることが知られている⁶⁾。一方、現状のBox翼はNACA0012翼型であり理想

ダクトからは程遠く、前縁での流れの剥離で流入空気流が乱されていることがホバリング特性の悪化を招いたと考えられ、Box翼大ではダクトとしてのBox翼との間隔が広がったために影響が緩和されたと考えている。

また2500RPMでの最大推力 ($-C_A$) は4程度である。一方図17-19に示される一様流のある場合の軸力から推算される係数化した最大推力は6-7程度であり、ホバリング状態に比べて1.5倍程度大きい。これは運動量理論から予測される一様流によるプロペラへの流入速度の増大によるものと考えられる。

5. おわりに

静粛eVTOLへの適用を目指してBox翼の内部に4個のプロペラを配置したマルチコプタの空力特性について、回転数を4種類（無回転を含む）に変化させて空力特性を取得し、次のような空力特性を把握した。

- ・ 推力のない状態では、迎角5-10度付近で急激なピッチアップを生じるが揚力に関しては迎角10度-45度付近で、あまり揚力係数が変わらない緩やかな失速特性が得られた。
- ・ 推力のある状態ではプロペラの差動によって常にトリム可能であった。
- ・ プロペラ推力が主翼に及ぼす影響は大きく、推力とは垂直方向に主翼の発生する力が推力の30%程度増大した。
- ・ ダクトドファンに期待されるホバリング性能の向上は見られなかった。

穏やかな失速特性や、どの迎角でもプロペラ推力によってトリム可能な特性から、安定な遷移飛行実現の可能性が高く、eVTOLへの利用に適した性質を示したといえる。

また今後の課題として次の点があげられる。

- ・ より高Re数での風洞実験：より実用に近いサイズや速度での特性を確認する。
- ・ 揚抗比特性把握の高精度化：CFDやより高レイノルズ数、高忠実度の風洞模型による風洞試験により巡行性能を高精度で把握する。
- ・ 騒音特性の把握：Box翼のプロペラ騒音遮蔽効果の確認。
- ・ 流れ場の理解：高迎角で顕著なBox翼の特性に大きく影響していると思われる、主翼とプロペラの干渉などの理解。

今後、この風洞試験で得られた知見を整理し、PPBBコンセプトの検討を進めてゆきたい。

謝辞

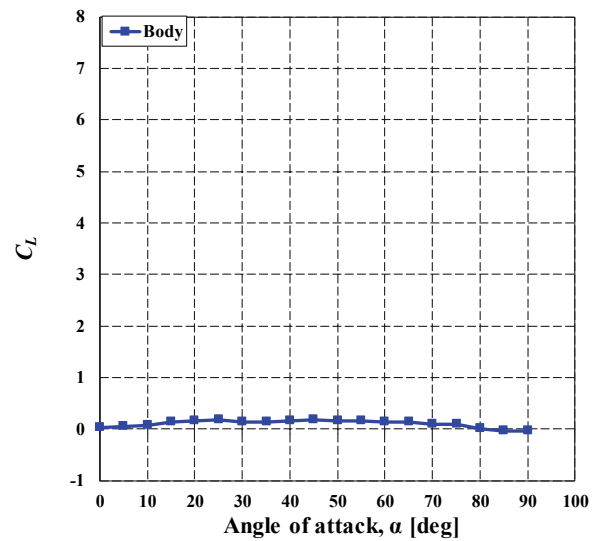
JAXA航空技術本部の藤野敦史様にはPPBBのコンセプトデザインを美しいCGで作成していただきました。またJAXA宇宙科学研究所の野中聡先生、武藤友太郎様には惑星環境風洞の利用について丁寧にご指導いただきました。これらのご協力に深く感謝申し上げます。

本研究は2019年度JAXA研究開発部門長裁量研究、電力中央研究所-JAXA共同研究、工学院大学-JAXA共同研究の一部として実施した。

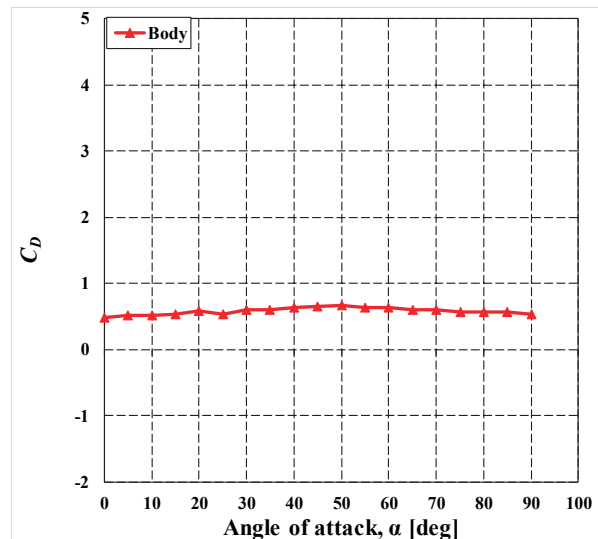
参考文献

- (1) C. E. Tinney and J. Sirohi, "Multirotor Drone Noise at Static Thrust", AIAA Journal, Vol.56, No.7, pp.2816-2826 (2018)
- (2) 嶋, 堤, 藤本, 伊藤, 「Passive Pendulum Body: 新しいeVTOL全機形態の提案」, 流体力学講演会講演論文集(2019)
- (3) Shima, E., Tsutsumi, S., Fujimoto, K. and Ito, T., "Passive Pendulum Body: a Novel eVTOL Configuration", Proceedings of Transformative Vertical Flight 2020 (2020)
- (4) <https://www.bellflight.com/products/bell-nexus>
- (5) https://en.wikipedia.org/wiki/Bell_X-22
- (6) 嶋, 米澤, 松本, 鳥越, 浜崎, 堤, 藤本, 中村, 「eVTOL静粛化技術の試み」, 飛行機シンポジウム講演論文集, 2019
- (7) DEMASI, Luciano, et al. Invariant formulation for the minimum induced drag conditions of nonplanar wing systems. AIAA journal, 2014, 52.10: 2223-2240.
- (8) <http://airfoiltools.com>

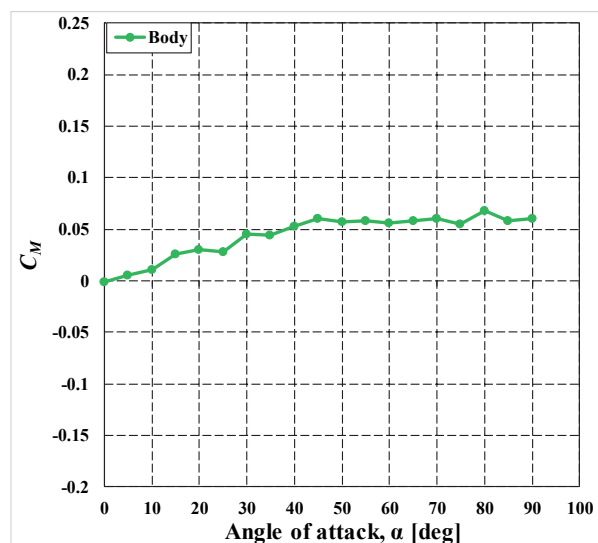
Appendix.胴体のみ三分力



図A1. 胴体のみ形態の揚力特性.



図A2. 胴体のみ形態の抗力特性.



図A3. 胴体のみ形態のモーメント特性.