

jh210052-NAH

プロペラ駆動小型無人機の設計検討技法の確立を目指した空力・推進・構造 の実機丸ごと統合シミュレーション

金崎 雅博（東京都立大学）

概要

本課題では、プロペラ推力を用いた小型航空機（Micro-aerial vehicle: MAV）の開発が盛んになっていることを受け、プロペラ後流に曝される翼と全機空力性能に着目して、翼周りの流れや構造への影響、形状設計への影響について明らかにし、知見を得ることを目的とする。2021 年度は、数値流体力学（Computational Fluid Dynamics: CFD）を援用した調査を主に行いつつ、構造計算との連成、風洞を用いた試験についても実施した。CFD による検証は、主にプロペラ形状の回転を含めた直接計算と、プロペラ後流を体積力モデリングによりモデル化する手法の二つを用意し、設計において適宜選択できるようにした。また、プロペラ配置のほかに、翼形状をパラメトリックに変更し、傾向の観察を行った。空力・構造連成の異分野統合計算では、静的空力弾性解析と動的空力弾性解析を実施し、特に計算効率の面でも良好な成果を得ている。各担当の進捗は概ね予定通りであり、2022 年度以降の要素技術統合に向けた用意ができつつある。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

北海道大学 東北大学 名古屋大学

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

本申請研究では、研究代表者・副代表者が全体を取りまとめ、次の内容を実施する。なお、スパコン利用（コードの最適化など）に関して、北海道大のメンバから助言を頂く。

① 数値流体力学（Computational Fluid Dynamics: CFD）を用いたプロペラ形状・動作の直接計算による空力評価（横国大, 工学院, JAXA 宇宙科学研究所 (ISAS/ JAXA)。ISAS には東京大学大学院の連携大学院研究室所属学生を含む。）

② 体積力モデリングによるプロペラ後流のモデル化とプロペラ配置・翼形状の性能検証（都立大）

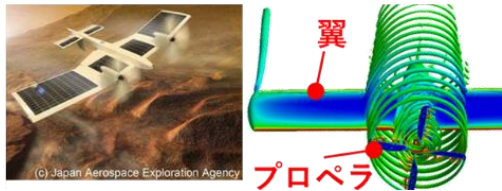
③ 空力弾性評価による構造的成立性の検討（東北大工学部）

④ 風洞実験による数値計算の妥当性検証と数値計算と風洞実験を相補的に用いた空力的知見の獲得（東北大流体研）

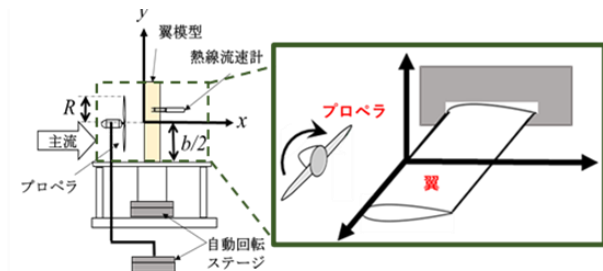
2. 研究の目的と意義

その環境適合性や利便性から、電動の小型無人航空機（Micro air vehicle: MAV）の研究開発が盛んである。危険な地域や火星などの大気を持つ惑星の観測に加え、新たな運輸体系の構築にも有用なものとして注目されている。例えば、宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA) の宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science: ISAS) に設置されている火星探査航空機リサーチグループでは、火星大気を利用した航空探査（第 1 図）を目指した機体の研究開発を行っている。この研究においては、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics: CFD) をはじめとする大規模シミュレーション技術が適用されている。ソフトバンク株式会社らは成層圏からネットワークを提供するための長時間対空型無人航空機を開発を行っているが、これもプロペラ駆動であり、計算技術が適用されている。これらには本申請研究組織の一部が関わっている。

こうした電動の航空機においてはプロペラ推進が用いられるが、プロペラが生み出す流れ（プロペラ後流）と翼など機体本体との干渉により、自身の翼性能や構造成立性に影響を与えることを考慮し、設計を行う必要がある。そこで本研究では、1-（3）に示す通り、分野・組織横断的研究グループを組織し、プロペラ後流を伴う航空機の翼周りの空力特性の解明と、翼形状およびプロペラ配置に対する最適性に関わる知見の獲得を目的とする。この達成により、空力・推進・構造を統合した実機丸ごとシミュレーションによる設計検討技法を確立する。目的達成のために、第2図に示す翼(200mm×50mm)とプロペラ(半径76.2mm)から成る単純なモデルと流れの条件研究チーム内で共有する。



第1図 火星探査航空機とプロペラ後流・主翼干渉のシミュレーション



第2図 翼とプロペラの風洞試験セットアップの模式図

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

航空機前期周りの数値計算は、空力・構造・飛行力学のいずれも高コストであり、最適設計やケーススタディを実施するうえで、貴公募研究で提供される計算資源は必要不可欠であった。また、各拠点での協力により、計算手法を一つの目標に適用可能とすることができている。

航空機設計は空力・構造・飛行力学と異分野の連成が不可欠であることから、学際研究を奨励する貴公募研究に提案書が評価されたことは、研究グループとしても、客観的な意義付けと捉える。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本研究は2021年度採択課題である。

5. 今年度の研究成果の詳細

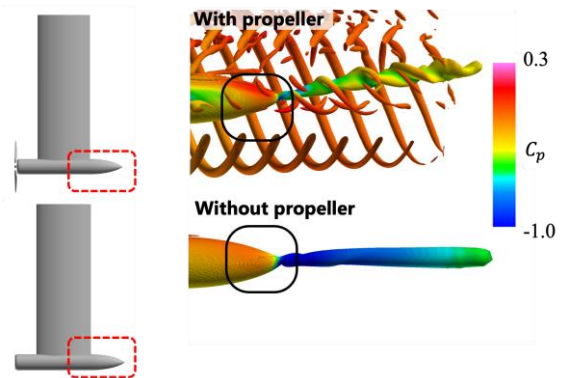
5.1 プロペラの翼取付位置の影響(担当:宇宙科学研究所)

電動プロペラ航空機の設計におけるプロペラ配置の設計指針を得ることを目的とし、プロペラと固定翼間の空力干渉をCFD解析によって調査した。

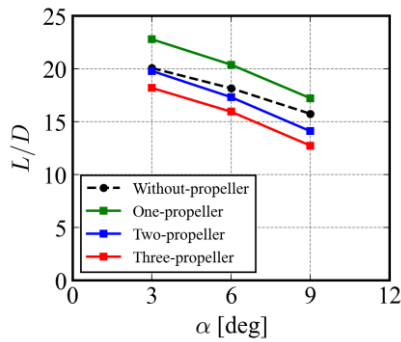
特に今年度は、(i)プロペラが1基の場合にスパン方向取り付け位置が与える影響、(ii)プロペラ基数が与える影響、の二点について明らかにした。

まず、プロペラ数が1基の場合にプロペラ取り付け位置をスパン方向に変化させ、ナセル及び固定翼に与える影響を調査した。結果、プロペラを翼端に取り付けた方が、翼の中央側に取り付けた場合と比較して、抗力係数が小さくなることがわかった。この原因は、翼端にプロペラを取り付けた場合、(i)固定翼はプロペラの吹き下ろしの影響を直接受けないこと、(ii)翼端渦がプロペラ後流によって緩和されナセルに生じる抗力が減少すること、の2点であることが分かった。

また、翼に搭載するプロペラ基数についての設計指針を得るために、総推力が一定となる条件の元でプロペラ基数を変化させ、固定翼の空力特性に与える影響を明らかにした。結果、巡航時の揚抗比はプロペラ1基の場合に最も高く、基数の増加とともにその値は小さくなることが分かった。



第3図翼端渦とプロペラ後流の干渉

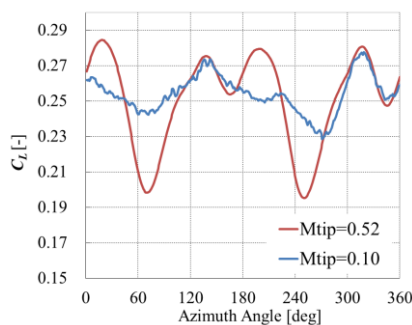


第 4 図プロペラ基数が揚抗比に与える影響

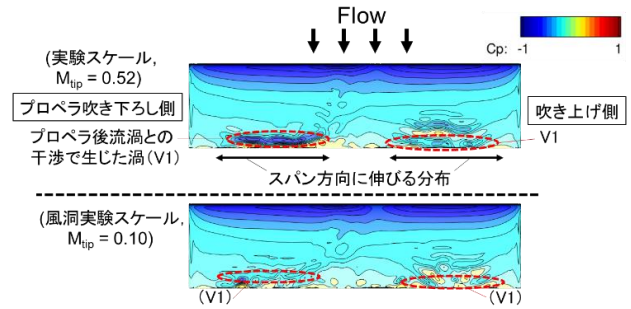
5.2 プロペラ形状の直接計算による後流-翼干渉 (担当：横国大)

低レイノルズ数領域でプロペラ後流と固定翼が干渉する流れ場について、風洞実験スケール（全体的に非圧縮性流れ）と実機スケール（プロペラ翼端付近は圧縮性流れ）の計算を行い、迎角 4° での固定翼の空力特性を比較した。AOBA-B の計算性能を最大限に発揮するために OpenMP によるスレッド並列を施したプログラムを用いて計算を行った。実機スケールでは固定翼の非定常的な揚力変動の大きさが風洞実験スケールよりも増大した（第 5 図）これは、プロペラ後流渦と固定翼の剥離せん断層が周期的に干渉して生じる渦の圧力が実機スケールの方が低圧になるために生じていた（第 6 図）。

迎角を大きくした時、実機スケールでは固定翼上の渦運動が複雑になることで、不規則な非定常揚力変動が生じるようになった。また、迎角 4° の時と共通して、実機スケールではプロペラから生じる圧力波が弱まることで、その圧力波が固定翼へ与える影響も弱まり、固定翼の揚力変動の高周波成分が消失した。



第 5 図 プロペラ 1 周分の時間における固定翼の揚力変動（迎角 4° ）



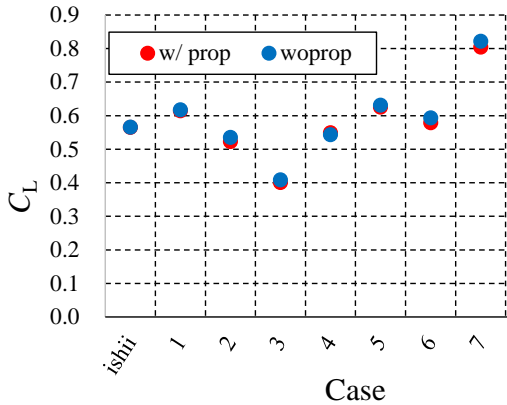
第 6 図 プロペラ方位角 15° の時の固定翼表面圧力係数分布（迎角 4° ）

5.3 体積力モデリングによるプロペラ後流のモデル化とプロペラ配置・翼形状の性能検証 (担当：都立大)

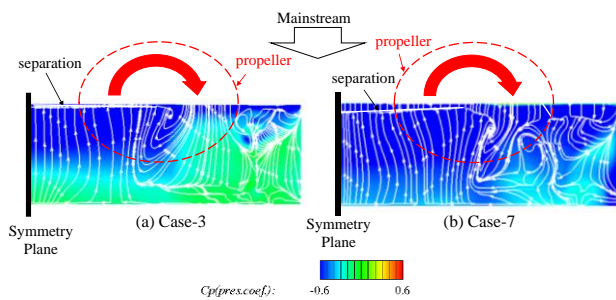
まず、低レイノルズ数領域で火星飛行機にプロペラ後流が及ぼす影響について調査をするため、体積力モデリング (Body Force Modeling: BFM) によりモデル化したプロペラ, Actuator Disk Model (ADM) を用いたプロペラ後流の効率的な模擬により、主翼前縁のプロペラスパン方向設置位置によるパラメトリックスタディを、北海道大学のスパコン (サブシステム A) を用いて実施した。プロペラ設置位置は、主翼翼端、主翼スパン 25%位置、主翼スパン 50%位置である。調査の結果、プロペラを主翼翼端に近い配置にするほど、翼根側と比べて抵抗が減少した。これは翼端側配置ほど、プロペラ後流の吹き上げにより発生する剥離領域が翼端渦の影響により抑制されることと、プロペラ後流の吹き下ろしによる主翼への干渉領域が減少して負圧領域が増加し、飛行に必要な揚力を低迎角で生み出せることが理由だと考えられる。

次に、プロペラ後流に曝される翼形状最適化の事前調査のため、翼型を修正 PARSEC 法によりパラメトリックに定義し、低レイノルズ数での標準翼型としている石井翼と合わせて、北海道大学のスパコン (サブシステム A) を用いて 8 サンプルの傾向を調査した。サンプルはラテン超方各法により取得した。プロペラの後流が無いケースともそれぞれ比較した。結果、プロペラの後流があるときに、第 7 図に示す通り揚力係数が向上しやすいケースとそうでないケースがあることが分かった。本検討では、翼型は広

い定義域内で行ったことから、より詳細な設計を行う際には考慮が必要な影響であると考えられる。揚力係数が低い Case3 と最も高い Case7 の表面流れの比較を第 8 図に示す。Case3 では後縁で剥離し、翼端側でその範囲を広げて揚力を得る範囲が減っているが、Case7 では広く負圧を保ち、揚力につなげている。



第 7 図 サンプルに対する揚力係数 C_L



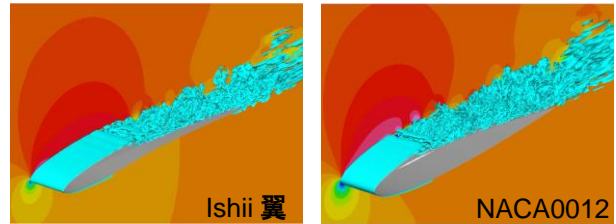
第 8 図 Case-3, Case-7 翼上面の表面流線, 表面 CP 分布

5.4 低レイノルズ数における翼周りの高精度空力計算 (担当: 工学院大)

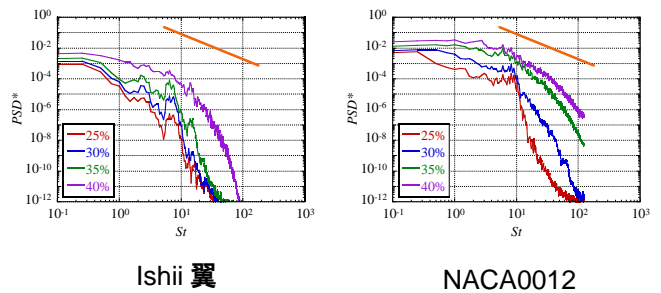
低レイノルズ数におけるプロペラ・翼干渉の流体现象を、Large-Eddy Simulation (LES) を用いて解明することを目的とする。特に、低レイノルズ数翼周り流れにおいて重要となる翼面上の層流剥離泡が、プロペラ後流においてどのような影響を受けるのかを精査する。計算機利用上の工夫として、北大スパコン (サブシステム A) の環境に合わせて並列数やファイルの読み込み・書き出し書式の変更を行った。

今年度はプロペラ後流の影響を調べる前段階として、石井翼および NACA0012 翼周り流れの LES を北海道大学のスパコン (サブシステム A) を用いて行い、

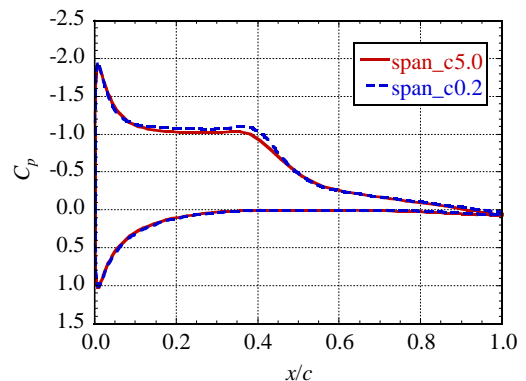
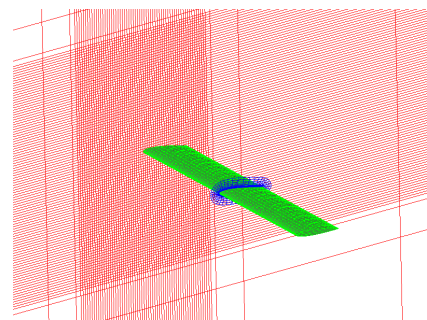
翼形状, レイノルズ数, 迎角が層流剥離泡の形成に与える影響について調べた (第 9 図)。特に、各条件における非定常特性を周波数解析によって精査し、K-H 不安定性に起因する 2 次元的な渦構造の放出周波数を明らかにした (第 10 図)。加えて、プロペラを模擬したアクチュエータモデルの組み込みを行うため、重合格子を用いた翼周り流れの数値解析を行い、圧力分布が上記の結果と良好な一致を示すことを確認した (第 11 図)。



第 9 図 流れの瞬間場. $0.0 \leq u/U_\infty \leq 1.5$



第 10 図 周波数特性.



第 11 図 重合格子を用いた解析

5.5 空力-構造連成計算に基づくプロペラ後流の翼への影響（担当：東北大・工）

プロペラ主翼の空力干渉を考慮した空力弾性解析法を構築した。プロペラ後流を円筒形状で近似することでプロペラ主翼の空力干渉計算を高速に行う手法である（第12図）。プロペラ10基を搭載した高アスペクト比翼の解析を行った。プロペラ主翼の空力干渉で主翼の静的変形量は増大し、動的振動振幅は減少するという知見が得られた。さらに、高アスペクト比翼の細長形状と幾何曲線理論の類似性を活用し、ベクトル変数を歪変数に変換し、少ない変数で大変形を表現できる高速計算手法を提案した。構造単独の静解析・動解析の双方において90%以上の計算時間削減を達成した。

実機運用中の計測には外部設置のレーザ変位計測やカメラ変位計測は使えないため、埋込型の歪センサなどを使うことになる。このため、実機と解析モデルのパラメータを整合させるには歪を変数にした方が有効である。上記のベクトル歪変換を用いて静的空力弾性解析を行えば、巡航時の歪分布を直接的に算出でき、実機と解析モデルの整合を容易に行えることを示した。

計算においては、東北大学サイバーサイエンスセンターAOBA-Bを用い、計算資源を最大限活用すべく、MATLAB解析コードの並列化を行った。また、東北大学サイバーサイエンスセンターAOBA-BとローカルPCとのデータ交換を迅速にするため、施設職員と相談し、ファイルアップロード用とファイルダウンロード用のMATLABコードを作成した。

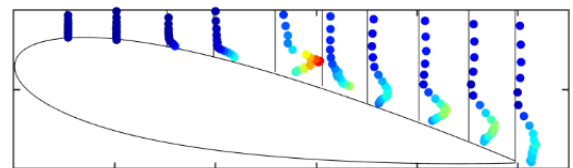


第12図 円筒近似したプロペラ後流

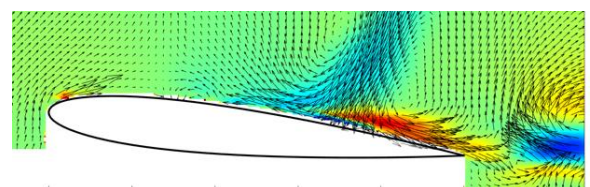
5.6 プロペラ-翼干渉に関する風洞試験（担当：東北大・流体研）

風洞を用いて、低レイノルズでのプロペラ後流中にある翼表面の流れ場を調査した。流れ場の計測にはプロペラ後流による非定常な流れ場を計測するために、時間分解能が高い熱線流速計を用いた。実験結果からは、プロペラ後流が翼近傍を間欠的に通過する様子が確認できた。また、このプロペラ後流の通過後に、第13図に示すように翼面近傍での強い乱れを持つ領域が生じた。さらに、この領域は下流に伝播していた。また、プロペラ後流の通過が翼面上の流れ場に何らかの影響を与え、翼面上に渦が生じ、それが下流に伝播することを明らかにした。

一方、熱線流速計は点計測であり、空間的に詳細な調査ができず、数値計算結果との直接的な比較は難しい。そこで、高い時間分解能と空間分解能を有する粒子画像流速測定法（PIV）により非定常計測も行なった。第14図に示すとおり、プロペラ後流の通過やそれに伴う渦の発生を詳細に捉えることができた。このようにCFDと直接比較可能な高い空間解像度と時間分解能を持つ流れ場計測および解析手法を確立することができた。



第13図 熱線流速計による乱れ度分布



第14図 PIVによる速度場計測

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

6.1 プロペラの翼取付位置の影響に関する研究

今年度実施した CFD 解析では、主翼に対する垂直方向のプロペラの取り付け位置は全て同じ条件で解析を行なった。今後は複数のプロペラを取り付ける場合に、揚抗比特性等の空力特性を向上させるための設計指針を調査するためにプロペラの垂直方向の取り付け位置を変化させた解析を実施する予定である。さらに、アクチュエーターディスクモデルを用いた解析も行い、流れ場の比較を行うことも視野に入れている。

6.2 プロペラ形状の直接計算による後流-翼干渉

今年度は、風洞実験と同じプロペラ・固定翼形状、同じ位置関係の数値計算を行うことで、風洞実験と実機飛行での流れ場の違いを明らかにすることができた。今後はよりプロペラの回転数が速い（実機スケールの圧縮性の影響がより大きい）ケースの計算を行い、風洞実験スケールと実機スケールで現象の違いが生じた根本的な原因を明らかにする。

6.3 体積力モデリングによるプロペラ後流のモデル化とプロペラ配置・翼形状の性能検証

今年度はプロペラ配置と後流による翼空力性能を取得し、流れ場の特徴などを考察した。さらに、翼形状を変更したサンプリングを行い、性能向上のために必要な翼形状に関する知見を得た。

今後は今年度実施したサンプリングの結果に対して多変量解析法などを適用した分析を行いつつ、翼空力形状の最適設計を実施する。さらに、空力-飛行連成計算に基づいた火星探査航空機の飛行性能評価法を構築し、空力制御の最適設計を通して機体全体のシミュレーションに基づく最適設計に繋げる。

6.4 低レイノルズ数における翼周りの高精度空力計算

申請時に設定した、プロペラ後流における翼周りに流れの高精度非定常数値計算までは至らなかったが、その前段階として低レイノルズ数翼周り流れの高精度非定常数値計算を行った。結果として様々な条件下における層流剥離泡特性が明らかになった。今後は、今年度得られた知見をもとに、プロペラ・翼干渉

の高精度非定常数値計算を行い、プロペラ後流が層流剥離泡に与える影響を明らかにする。

6.5 空力-構造連成計算に基づくプロペラ後流の翼への影響

申請時に設定した計画「東北大学 A0BA を利用したコードを拡張・空力弾性評価による構造的成立性の検討」を実施できた。具体的には静的空力弾性解析と動的空力弾性解析を A0BA-B で実施するための並列計算コードの拡張と一部解析結果の実験実証である。

今後は解析手法の火星飛行機への適用と拡張を行う。まず、全方向変位を考慮できる解析法の構築を行う。2021 年度はスパン方向の変形を考慮できる解析法を構築した。一方で、火星飛行機などは薄い膜のような翼の方が高い空力性能を示すことが分かっている。膜翼はコード方向にも変形する。コード方向変形も解析できるようにプログラムを拡張する。次に、展開機構解析法を構築する。火星飛行機は大気圏突入用のカプセルに収納されて地球から火星に運搬されることが検討されている。このため翼を折り畳んで収納しておき、飛行しながら展開することが要求される。今後は解析手法とコードを拡張し、この展開挙動を解析できるようにする。既にその初期検討はアメリカ航空宇宙学会誌 AIAA Journal に採択されている。

6.6 プロペラ-翼干渉に関する風洞試験

当研究グループでは、他グループが実施した数値計算の結果と比較するため、実験的なアプローチによって、低レイノルズでのプロペラ後流中にある翼表面の流れ場を調査してきた。これまでの研究では、高い時間分解能を持つ熱線流速計を用いた計測を行った。今年度の成果から、PIV を用いて高い空間解像度と時間分解能を持つ流れ場計測および解析手法を確立することができた。これにより今まで以上に空間的に詳細な流れ場の調査が可能になり、数値計算との比較が容易になることが期待できる。加えて、他グループが実施した数値計算と同一の試験条件で風洞実験を行い、数値計算と実験との直接的な比較を行うことを計画している。

7. 研究業績一覧

(1) 学術論文 (査読あり)

- [1] Otsuka, K., Wang, Y., Palacios, R., and Makihara, K., “Strain-Based Geometrically Nonlinear Beam Formulation for Rigid–Flexible Multibody Dynamic Analysis,” *AIAA Journal*, (accepted).

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

- [1] Otsuka, K., Dong, S., and Makihara, K., “Absolute Nodal Coordinate Formulations for Aeroelastic Analysis of Next-Generation Aircraft Wings,” *ASME 17th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control (MSNDC 2021)*, Online, August 17-20, 2021.
- [2] Otsuka, K., Wang, Y., Palacios, R., and Makihara, K., “Strain-Based Geometrically Nonlinear Beam Formulation for Multibody Dynamic Analysis,” *AIAA SciTech Forum 2022*, Online, January 4, 2022.
- [3] Taniguchi, S., Oyama, A., “Numerical Analysis of Propeller Mounting Position Effects on Aerodynamic Propeller/Wing Interaction”, *AIAA SciTech Forum 2022*, January 3, 2022.

(3) 国際会議発表 (査読なし)

- [1] Otsuka, K., Dong, S., Wang, Y., Fujita, K., Nagai, H., and Makihara, K., “Nonlinear Aeroelastic Analysis Coupling Unsteady Vortex Lattice Method and Strain-Based Beam Formulation,” *18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2021)*, CRF-62, Online, October 27-29, 2021.
- [2] Furusawa, Y., Kitamura, K., Nagai, H., “Numerical Study on Mach Number Effects of Propeller on Propeller-Wing Interaction,” *18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD 2021)*, OS18-1, Online, October 27, 2021.

- [3] Nakamura, H., Horie, S., Kanazaki, M., Fujita, K., Nagai, H., “Numerical Investigation: Influence of Propeller Wake on Mars Exploration Airplane’s Stability,” *CRF-40, The 18th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021)*, Virtual, October 2021.

- [4] Dong, S., Otsuka, K., Wang, Y., Fujita, K., Nagai, H., and Makihara, K., “Development of Multibody Dynamics Formulation Based on Canonical Theory,” *33rd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS2022)* Online, 2022.

(4) 国内会議発表 (査読なし)

- [1] 伊神翼, 林孝亮, 藤田昂志, 永井大樹, “低レイノルズ数下でのプロペラ後流中における主翼表面上の非定常流れ場の解明”, 第 53 回流体力学講演会/第 39 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, JSASS-2021-2044-F/A, 2021.
- [2] 伊神翼, 林孝亮, 藤田昂志, 永井大樹, “低レイノルズ数におけるプロペラ後流が引き起こす主翼表面上の非定常流れ場の考察”, 第 59 回飛行機シンポジウム, JSASS-2021-5011, 2021.
- [3] 大川真生, 伊神翼, 藤田昂志, 永井大樹, “低レイノルズ数におけるプロペラ後流の通過に同期した翼面上剥離渦の形成”, 令和 3 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2021.
- [4] 大川真生, 伊神翼, 藤田昂志, 永井大樹, “低レイノルズ数におけるプロペラ後流中の翼面上非定常流れ場の調査”, 東北学生会 第 52 回学生員卒業研究発表講演会, 2022.
- [5] 古澤善克, 北村圭一, 永井大樹, 「プロペラ・固定翼空力干渉においてプロペラの翼端マッハ数変化が与える影響の数値解析」, 日本航空宇宙学会主催, 第 59 回飛行機シンポジウム, 1B-03, 2021 年 11 月 30 日.
- [6] 大塚啓介, Shuonan Dong, 榎原幹十朗, 「歪を要素変数とする非線形梁要素の柔軟マルチボディ解析への拡張」, 日本航空宇宙学会主催, 第 63 回構造強度に関する講演会, 3A-11, 2021 年 8 月.
- [7] 谷口翔太, 大山聖, 「プロペラ取り付け位置が主翼周り流れ場に及ぼす影響」, 第 53 回流体力学講演会/第 39 回航空宇宙数値シ

- ミュレーション技術シンポジウム, オンライン, 2021 年 7 月 1 日.
- [8] 谷口翔太, 大山聖, 「複数のプロペラと固定翼間の空力干渉」, 第 35 回数値流体力学シンポジウム, オンライン, 2021 年 12 月 14 日.
- [9] 谷口翔太, 大山聖, 「複数のプロペラが固定翼の空力特性に与える影響」, 令和 3 年度宇宙航行の力学シンポジウム, オンライン, 2021 年 12 月 21 日.
- [10] 堀江史郎, 「プロペラ周りの流れ場が火星飛行機の空力特性に与える影響」, 1E09, 第 59 回飛行機シンポジウム, virtual, 2021 年 12 月.
- [11] 中村晴香, 堀江史郎, 金崎雅博, 藤田昂志, 永井大樹, 「火星探査航空機縦安定性へのプロペラ後流の影響」, 令和 3 年度 宇宙航行の力学シンポジウム, オンライン, 2021 年 12 月.