

jh230062

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

本研究では、プロペラ後流にある火星探査航空機周りの空力・推進・構造・飛行を同時に考える「機体丸ごとシミュレーション」技術の確立をし、デジタルツインによる設計開発を行うことができるプラットフォーム構築を目的に、各要素技術の高度化に加え、連成・統合を目指して研究を実施した。主に、プロペラ後流中の翼周り空力現象の解明、推進系付航空機の飛行制御ロバスト設計、翼の空力弾性効果との連成、対応する風洞実験の実施を遂行し、関連する研究の査読付き論文 2 編、国際会議発表 4 件などの成果がある。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

北海道大学 情報基盤センター
 東北大学 サイバーサイエンスセンター
 東京大学 情報基盤センター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 共同研究分野 (HPCI 資源利用課題のみ)

超大規模数値計算系応用分野

(4) 参加研究者の役割分担

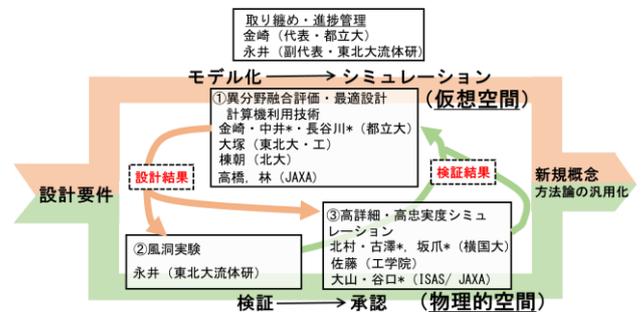
各技術分野で国内を代表する 5 大学, ISAS/ JAXA の研究グループを組織し、次の通り分担している。

- ①⑤は北大, ②③は東北大の計算資源を主に利用している。この組織により、モデル化と検証を分担する。
- ① 都立大（金崎・中井*・長谷川*）：数値流体力学学 (Computational Fluid Dynamics: CFD) でのプロペラ後流のモデル化, ロバスト最適設計法
- ② 東北大・工学部（大塚）：空力構造連成による弾性評価
- ③ ISAS/ JAXA, 横国大（大山・北村・古澤*・坂爪*）：CFD におけるプロペラ実形状の直接計算

④ 東北大・流体研（永井）：風洞実験

⑤ 工学院大（佐藤・後藤*）：高物理忠実度計算モデルによる CFD

⑥ 北大・JAXA（棟朝・高橋・林）：計算機・ソフトウェア利用技術



第 1 図研究体制とデジタルツインの考えに基づく組織イメージ。

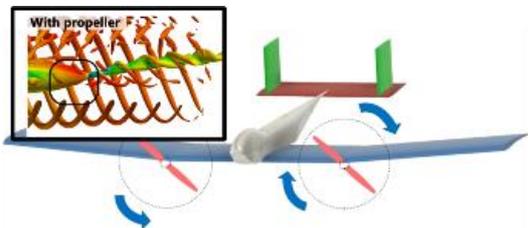
2. 研究の目的・意義

電動の軽量小型無人航空機 (Micro air vehicle: MAV) の研究開発が盛んである。MAV の推進系にはプロペラ推進が選択されることが多いが、プロペラが生む流れ (プロペラ後流) と翼など機体との干渉 (第 1 図) により、自身の翼性能や飛行性能、構造成立性に影響を与えることを考慮した設計を行う必要がある。申請者らは 2021 年度-2022 年度にかけて JHPCN の枠組みにおいて、空力・推進・構造・

飛行などの分野横断的研究グループを組織し、機体-推進統合設計法の構築に向けて、火星探査用 MAV (第 2 図) を共通モデルとしてプロペラ後流の空力・構造・飛行性能への影響性を調べるための「機体丸ごとシミュレーション」技術や実験技術の構築、とそれらを用いた知見の獲得を試みた(jh210052-NAH, JH220053)。

本年度は、空力-構造-推進-飛行連成計算による「機体丸ごとシミュレーション」技術を具体的に設計に用い、MAV の設計法を確立すること目的とした研究開発を行う。デジタルツインの考えを研究開発に導入し、風洞実験での検証、さらには飛行試験も視野に入れた活動を展開する。この達成により新規 MAV 開発の方法論を提供しつつ、デジタルツインに基づく製品開発の先導的研究となることも期待できる。要素研究として「プロペラ後流にある翼の空力-構造-飛行異分野融合シミュレーションに基づく機体設計(仮想空間)」と「風洞実験・高忠実度シミュレーションでの検証(物理的空間)」を実施する。

軽量の MAV において複雑流動であるプロペラ後流の影響は大きいものの、空力・構造・飛行特性に関する汎用的な知見は十分とは言えないことから、デジタルツインの考えに基づき、仮想空間での機体丸ごとシミュレーション技術と物理空間での実験技術の両輪により解決を試みる。本研究成果を汎用性のある知識として公開することは、本研究グループ以外の MAV 研究にも有益であり、今後実世界問題のカギとなるデジタルツイン技術の好例ともなることで、社会還元性も高いと考える。



第 2 図 MAV ノミナルモデルとしてのプロペラ付き

3. 当拠点の公募型共同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、計算手法を統一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ている。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

2022 年度は前年度実施した要素技術を高度化しつつ、推進系付火星探査航空機を主な対象として空力-推進-構造-飛行の評価技術と最適設計法の統合と検証のための実験を進めた。凡そ計画通りに進捗したものと考えているが、火星探査航空機の推進系統合について、その検討を進め高性能化を進める必要がある。2023 年度はプロペラ後流に晒される翼を模擬しながら、プロペラの作動条件による流体と構造、飛行現象の違いを明らかにすることを目的とした。

要素研究として実施したプロペラ形状の直接評価においては、風洞試験に対応した計算として、ここまでプロペラから発生する推力が小さい条件での解析を行ってきた。また、風洞試験、高物理忠実なモデルによる計算についても、技術の高度化を進めつつ、デジタルツインのなかの現実(physical)の模擬を補完できる可能性を探る。

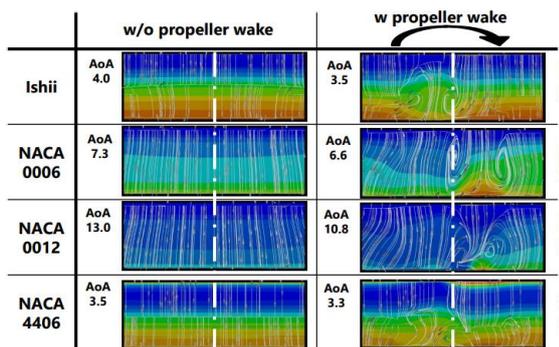
5. 今年度の研究成果の詳細

5.1 異分野統合連成シミュレーションに関する研究

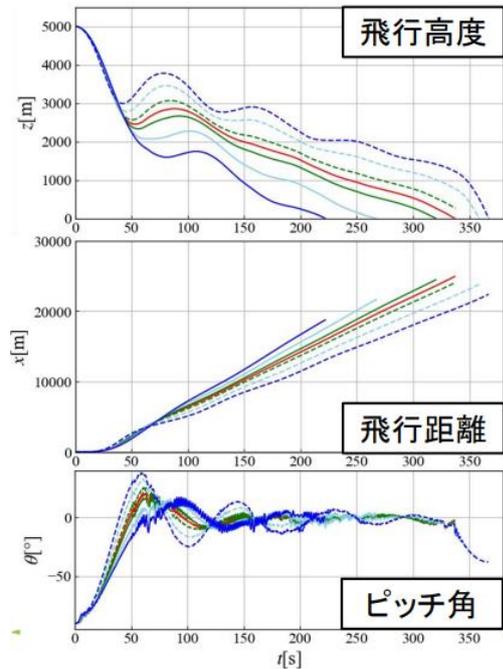
都立大のグループでは、北海道大学のスパコンを用いて、空力-構造連成計算に用いる空力データを取得した。具体的には、シミュレーションの結果に基づいて、翼幅方向の空力荷重分布を導出している。計算には、MPI 並列ソルバを用いた。この中で、第 3 図に示す通りプロペラの有無と翼型変更の影響性について調査した。同グループでは、空力・飛行の連成計算と空力操舵の最適設計も実

施し、無推力機に対し、飛行距離を伸長することを目的とした最適な飛行連成の結果（第 4 図）を取得している。ここでは、中間報告書から発展させ、ロバスト制御を考慮できる Polynomial Chaos Expansion を用いている。

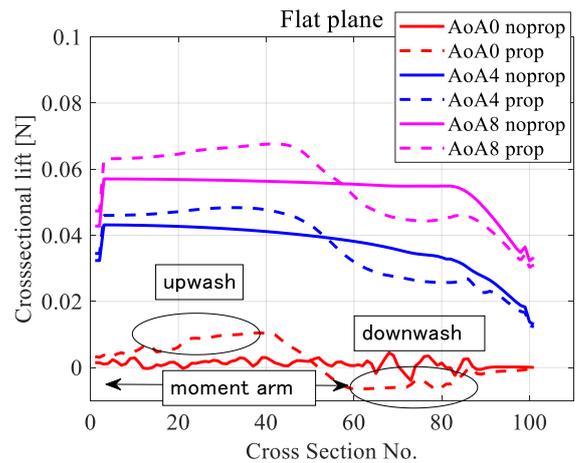
都立大の CFD 解析で得られた流体力を東北大・工の構造解析ソルバに入力し、火星飛行機主翼のたわみ計算を行った。迎角 0, 4, 8 度のそれぞれに対してプロペラ有・プロペラ無の解析を行った。第 5 図は主翼スパン方向の揚力分布を示す。第 6 図は主翼スパン方向における各位置でのたわみを示す。全条件でプロペラによってたわみが減少している。プロペラには①後流加速効果と②後流回転効果がある。前者は揚力の総和を増加させ、たわみを増加させる。後者は第 X 図の赤点線に示すように揚力の総和を変化させないが、揚力分布を変化させる。固定端と downwash が生じている領域の距離が固定端と upwash が生じている領域の距離より大きい。すなわち、downwash で生じる下向き空気力に対するモーメントアームが大きい。このため第 Y 図の赤点線のように迎角 0 度でも負のたわみが生じる。検討している火星飛行機は比較的大口径のプロペラを搭載するため①後流加速効果によるたわみ増加よりも②後流回転効果によるたわみ減少が支配的になったと考えられる。



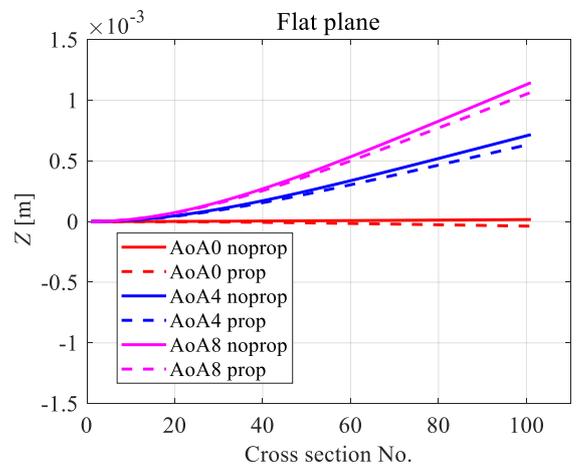
第 3 図 空力-飛行連成の空力制御最適化により得た最適解の飛行履歴。



第 4 図 ロバスト性を考慮した空力-飛行連成の空力制御最適化により得た最適解の飛行履歴。



第 5 図 主翼の揚力分布



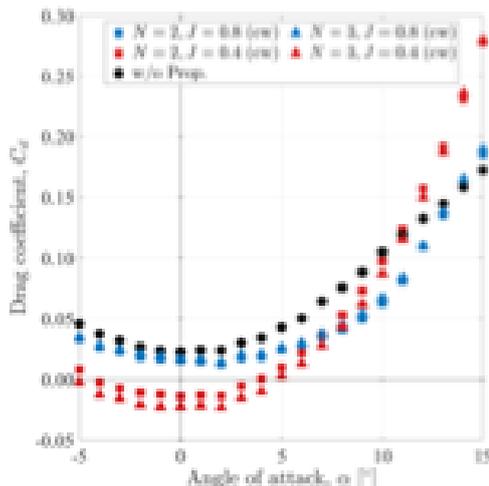
第 6 図 主翼のたわみ

5.2 風洞実験・高忠実度シミュレーション

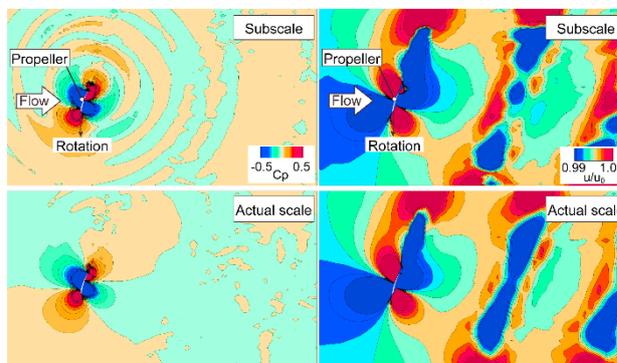
プロペラ後流の特徴周波数を変化させてプロペラ-固定翼の空力干渉を調査した。実験より、進行率の低下に応じてプロペラ下流に置かれた固定翼の抗力係数が減少することが明らかとなった（第7図）。さらに翼面上の圧力分布より、ブレード通過周波数の増加に伴って後縁での圧力回復が促進されていることが示された。このような流れ場の変化は層流剥離しやすい低 Re 数流れ特有の現象と言える。また、ブレード通過周波数を高く設定することで、後縁剥離の抑制に加えて前縁で強力な負圧が発生し抗力を低減する効果があることが示唆された。

横国大のグループでは、これまで調査してきた低レイノルズ数流れでのプロペラ周囲流れ場の研究成果を踏まえて、低レイノルズ数流れでプロペラ後流中に置かれた固定翼に生じる空力干渉に対する圧縮性効果について非定常数値解析によって調査を行なった。計算には、MPI 並列ソルバを用いた。その結果、実機スケールの火星飛行機では圧縮性の影響によってプロペラ後流の乱れが小さくなる（第8図）ことで、高周波の細かな振動が消失することがわかった（第9図）。

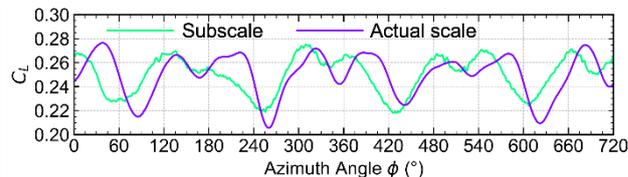
工学院大のグループでは、低レイノルズ数におけるプロペラ-翼干渉の流体现象、特にプロペラの誘起流れが翼の層流剥離泡に与える影響について調べることを目的とし、NACA0012 翼周り流れのLES を東大スパコンを用いて行った。プロペラをアクチュエータディスクモデルで模擬したLES から、プロペラ誘起流れが層流剥離泡に与える影響を誘起流れのスワール数によって整理できることが明らかとなった。加えて、プロペラをアクチュエータラインモデルで模擬したLES を行い(第10図)、誘起流れの非定常性が、剥離泡における剥離・遷移・再付着位置に影響を与えることがわかった。



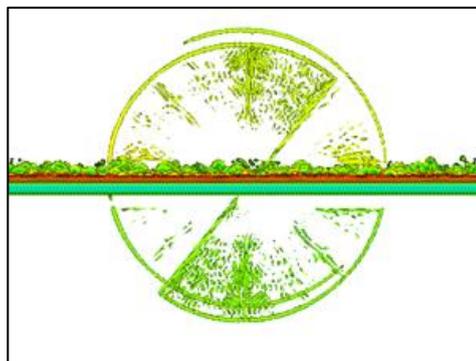
第7図 進行率を変えた際のプロペラ後流中での抗力係数

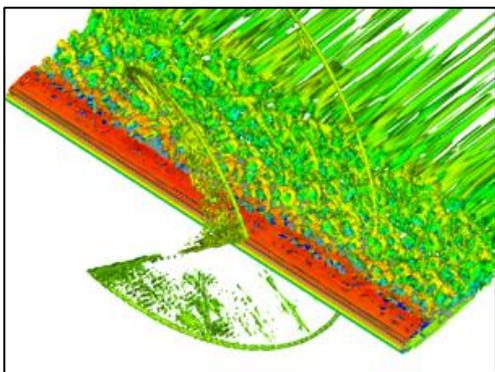


第8図 プロペラ 63%半径方向位置における瞬時断面圧力係数および主流方向速度分布



第9図 プロペラ後流中に置かれた固定翼に働く揚力係数の時間履歴（プロペラ2周分）





第 10 図 アクチュエータラインモデルを用いたプロペラ、翼周りの流れ場

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

6.1 異分野統合連成シミュレーションに関する研究

都立大では空力-飛行の連成計算を、都立大と東北大・工では、空力-構造連成計算について進めた、プロペラ後流の影響を明らかにした。都立大は Polynomial Chaos Expansion の実装により、モンテカルロシミュレーションと比べて 8 割以上の計算コスト削減ができる評価法を取り入れ、大気条件の不確かさを考慮した飛行経路の最適化計算法を構築した。さらに、東北大の構造評価法の高効率化により、評価コストの 9 割減に成功した。今後は、これらの成果を活かし、プロペラ後流による翼のたわみによる飛行最適性への影響の検証に加え、空力-構造連成計算では、プロペラによる主翼のねじりへの影響を調査する。

6.2 風洞実験・高忠実度シミュレーション

東北大流体研では、これまでは翼の定常空力特性および翼表面の定常圧力分布、翼周りの流れ場に着眼して実験的な調査を行ってきたが、今後は翼表面の非定常流れ場に着眼した調査を行う。そのために、感圧塗料を用いた計測技術を開発する予定である。

プロペラ実形状の数値計算を実施した横浜国立大のグループでは、プロペラ後流と固定翼が引き起こす空力干渉流れについて詳細に調査でき、当初の期待通り研究が進化した。今後はプロペラ後流渦と固定翼上方の剥離流れの干渉に関して、よ

り細かなスケールで生じている物理現象を調査する。

高忠実度な数値計算により、physical を補完することを目的として研究を進めた工学院大のグループでは、今年度の計画として設定したプロペラの非定常性を考慮に入れた LES をおこなうため、アクチュエータラインモデルの実装と解析をおこなった。アクチュエータディスクモデルの結果と合わせて、プロペラ誘起流れの特性が層流剥離泡に与える影響に関する基礎的な知見を得ることができた。今後はレイノルズ数やプロペラ位置を変えた LES を行い、プロペラ-翼干渉における流体现象のさらなる知見獲得を目指す。

7. 研究業績

(1) 学術論文 (査読あり)

[1] Furusawa, Y., Kitamura, K., Ikami, T., Nagai, H., and Oyama, A., “Numerical Study on Aerodynamic Characteristics of Wing within Propeller Slipstream at Low-Reynolds-Number,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences* (67), pp.1222, 2024.

[2] Furusawa, Y., Kitamura, K., Ikami, T., and Nagai, H., “Numerical Study on Unsteady Flow Field Structure over Wing within Propeller Slipstream at Low-Reynolds-Number,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan* (accepted).

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

[1] Otsuka, K., Dong, S., Kuzuno, R., Sugiyama, H., and Makihara, K., “Moving Morphable Components based on Strain-Based Beam Formulation for Topology Optimization,” AIAA SciTech Forum 2024, USA, January 25, 2023.

(3) 国際会議発表 (査読なし)

[1] Furusawa, Y., Kitamura, K., Ikami, T., Okawa, M., and Nagai, H., “Propeller Scale Effect on Fixed Wing within Propeller Slipstream at Low Reynolds Number,”

34th International Symposium on Space Technology and Science, 2023.

[2] Furusawa, Y., Kitamura, K., Ikami, T., Okawa, M., and Nagai, H., "Compressibility Effects around Propeller on Propeller-Wing Aerodynamic Interaction for Mars Airplane," 20th International Conference on Flow Dynamics, 2023.

[3] Hasegawa, N., Kanazaki, M., and Nagai, H., "Influence of Propeller Wake on Mars Airplane Wing Geometry," The 20th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023), November 2024.

(4) 国内会議発表（査読なし）

[1] 古澤善克, 北村圭一「低レイノルズ数($4,900 \leq Re \leq 50,000$)の翼型周り流れにおける乱流遷移モデルの性能比較」, 第 54 期日本航空宇宙学会年会講演会, 2023.

[2] 坂爪竣哉, 北村圭一, 西村練, 伊神翼, 永井大樹「同軸反転ロータの低 Re 数空力振動の数値解析」, 第 61 回飛行機シンポジウム, 2023.

[3] 後藤彰斗, 佐藤允, 「プロペラを模擬した旋回流が翼面上の層流剥離泡に与える影響」, 第 55 回流体力学講演会/第 41 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポ, 2023 年 7 月.

[4] 長谷川 奈南, 金崎 雅博, 永井 大樹, 「火星飛行機におけるプロペラ後流中の主翼翼型に対する影響調査」, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会, 1C09, 富山市, 2023 年 10 月.

(5) 公開したライブラリなど

特になし

(6) その他（特許, プレスリリース, 著書等）

特になし