

## 南極エアロゾル観測用高高度滑空型UAVの研究

堤, 雅貴

<https://hdl.handle.net/2324/7363786>

---

出版情報 : Kyushu University, 2024, 博士 (工学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :



氏 名 : 堤 雅貴

論 文 名 : 南極エアロゾル観測用高高度滑空型 UAV の研究

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

筆者らは、エアロゾル研究者と協力して南極における高高度のエアロゾル観測及びサンプル回収のため、エアロゾル観測及びサンプル回収の方法として、自由気球と小型 UAV を組み合わせた観測方法を開発し、高度 23km までの観測およびサンプル回収と高度 12km からの自動滑空回収に成功した。この成功を受けて、観測高度および自動滑空開始高度を高度 30km まで上げる要求がエアロゾル研究者からなされている。しかし、高度 30km における飛行は、低レイノルズ数かつ高亜音速という状態となる。この環境での空力特性は定量的に不明であり、定量的な空力特性に基づいた制御系設計が不可欠である。一般的に Prandtl-Glauert 則や, Gothert 則を用いることで圧縮性の影響を補正することが可能であるが、低レイノルズ数かつ高亜音速の飛行状態では、マッハ数の変化による空力特性の変化が、これらの法則と一致しないという報告もある。そのため、このような低レイノルズ数かつ高亜音速領域におけるデータ取得を直接実施する必要がある。

本論文は、高高度から直接飛行させるのではなく、一旦低高度までパラシュート降下をさせ、その降下中に、高高度における空力特性を推定するための新しい装置を開発して空力特性の推定を行うとともに、低レイノルズ数における風洞試験により、開発した新しい装置を用いた飛行試験による空力特性推定法の妥当性を検証したものである。また、推定された空力特性を用いて、高高度飛行の実現のための制御ゲイン設計を行うとともに、設計したゲインの評価を、モンテカルロシミュレーションによって実施し、高度 30km からの自動滑空帰還の実現可能性を示したものである。

本論文は 8 つの章から構成されている。

第 1 章では、本論文の研究背景、目的および本論文の構成を示した。

第 2 章では、気球と UAV を用いた南極でのエアロゾル観測システムが開発された経緯を述べ、南極で実施されてきたエアロゾル観測の問題点や改良点について述べた。特に、低レイノルズ数かつ高亜音速領域となる高高度における飛行特性が定量的に分かっていないという問題点がある。この低レイノルズ数かつ高亜音速領域における飛行特性を推定し、高高度における飛行を実現することが可能な制御系を設計するという本論文の主要テーマについて説明した。

第 3 章では、新型の内製飛行制御装置の開発についてまとめた。高高度における飛行状態の空力特性を推定するための試験システムを構築するにあたり、従来使用されていた内製飛行制御装置では、性能的に不十分であり、サーボ出力チャンネル数の増加や、演算能力の向上が必要であった。所望の性能を満たし、低温下でも動作可能な飛行制御装置を開発することに成功したことを述べた。

第 4 章では、高高度における飛行状態の空力特性を推定するための、MPSB(Movable Parachute Sting Balance)と呼ぶ新しい装置の開発、及び南極におけるエアロゾル観測とともに実施した MPSB を用いた空力特性推定試験の結果について示した。2022 年 12 月に南極昭和基地において高度 27km から高度 12km までパラシュート降下を行い、MPSB 試験を実施した。この試験では、

MPSB の天秤データがロガーの不具合により取得できないトラブルが生じたが、搭載していたカメラの映像から、パラシュートが UAV に及ぼす力を推定し、レイノルズ数が  $4.0 \sim 5.0 \times 10^4$ 、マッハ数  $0.3 \sim 0.4$  程度の通常では実現が困難な環境における空力特性推定を行うことが可能であることを示した。

第 5 章では、MPSB 試験より推定された空力特性の妥当性を確認するために風洞試験を行い、同程度のレイノルズ数状態における空力特性推定を実施し比較を行った。Gothert 則によって補正した風洞試験の結果は、一般的なレイノルズ数変化による揚力係数及び抗力係数の変化傾向と定性的に一致するという知見が得られた。また、他の翼型で現れるような低レイノルズ数領域で揚力係数が非線形性をもつという特徴は確認されていないことも確認された。

第 6 章では、推定された空力特性を用いて制御システムの閉ループ極を確認しつつ、基準値以上となる安定余裕を確保しつつ制御系のゲイン設計を実施し、地上から高度 30km までの範囲で機体を安定化可能なゲイン設計ができることを示した。

第 7 章では、モンテカルロシミュレーションを使用して、空力係数のばらつきや気球分離後の機首の引き起こし制御に関するロバスト性の確認を行った。初期状態や各空力係数をランダム変更したモンテカルロシミュレーションを行った結果、高度 30km から定常滑空状態への移行に成功する確率が 90%以上であることを示した。

第 8 章では、結論を記載した。

要約すると、本研究は、高高度の低レイノルズ数かつ高亜音速領域における空力特性を推定する MPSB という新しい装置を開発し、実際の高高度において安全に空力特性の推定を行う方法を示すとともに、高度 30km からの自動滑空が可能であることを示したものである。MPSB による推定結果を風洞試験の結果と比較し、おおむね一致するという知見を得るとともに、MPSB による空力特性推定方法の有用性を示した。また、推定された空力特性によって高度 30km からの自動滑空飛行を実施するためのゲイン設計を行い、十分な安定余裕を持った状態で安定なゲインを設計することができることを示すとともに、モンテカルロシミュレーションによってミッションの成功率を予測し、成功確率が 90%以上となることを示した。すなわち、MPSB という新たな装置による飛行試験方法によって高高度における空力特性が可能となり、その結果、高度 30km からの自動滑空帰還によって定期的かつ経済的なエアロゾル観測に大きく寄与することが示された。