

令和元年6月20日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04592

研究課題名(和文) 上部成層圏から帰還可能な革新的小型無人機システムの研究

研究課題名(英文) Study on the Innovative UAV system which enables the return from upper stratosphere

研究代表者

東野 伸一郎 (HIGASHINO, SHIN-ICHIRO)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：40243901

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：気球と滑空型無人航空機を組み合わせた南極における高高度エアロゾル観測およびエアロゾルサンプリングシステムにおいて、高高度から直接滑空を開始することが強風時の帰還率をあげるために必要であるが、高高度における低レイノルズ数かつ中～高亜音速領域の空力特性が不明なために、第二分離方式と呼ぶ方式によって、気球分離高度から高度12km程度まで一旦パラシュートで降下させ、その後自律滑空を開始して無人機を回収する方法を利用してきた。パラシュートスティングバランスとよぶ装置を開発し、低速、すなわち低レイノルズ数領域でパラシュート降下している間の空気特性を推定し、その有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高高度における小型無人航空機の飛行データが無く、制御系設計のための空力特性データを取得することは非常に困難であった。筆者が開発した二段階分離法(気球からの分離高度から、空力特性が把握できている高度までパラシュートで一旦降下させる方法)において、今回開発したパラシュートスティングバランスと呼ぶ装置により低レイノルズ数領域における空力特性を推定できるようになったことは大きな意義がある。実験結果からは妥当な結果が得られており、いくつかの実施上の課題が残るものの、推定法としてほぼ確立できたとと言える。また、南極観測において定常的に高高度までのサンプル回収ができるようになる意義は大変大きい。

研究成果の概要(英文)：The author has developed a new method for the aerosol observation and sample return using the combination of a balloon and a glider unmanned aerial vehicle(UAV) in Antarctica. We have used "Two Stage Separation Method" in which the UAV descends down to approximately 12km in altitude by a parachute after separating from the balloon, and starts autonomous gliding by separating the parachute because of the unknown aerodynamic characteristics at higher altitudes, i. e. low Reynolds number and mid-to-high subsonic region. We have attempted and confirmed effective to estimate aerodynamic characteristics of the UAV at low Reynolds number which corresponds to the glide at higher altitude by using the device named "Parachute Sting Balance (PSB)". We can derive pure aerodynamic forces and moments by subtracting the forces and moments measured at the point where the PSB is attached from the whole aerodynamic forces and moments measured by accelerometers and angular sensors mounted on the UAV.

研究分野：飛行力学

キーワード：無人航空機 エアロゾル 高高度飛行 低レイノルズ数 空力特性 パラシュート

1. 研究開始当初の背景

筆者らは、南極における気球観測における観測機器やエアロゾルサンプルなどの容易な回収のために、観測装置を搭載した小型無人航空機(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)をゴム気球に懸吊して高高度に到達させ、気球から分離して自律飛行で放球点に帰還するという、これまでの UAV の限界をはるかに超える画期的なシステムを構築し、第 54 次日本南極地域観測隊夏観測活動において南極における圏界面をこえる高度 10km までのエアロゾル数密度観測とエアロゾルサンプルの回収に成功し、また第 56 次同観測隊夏観測活動においては、高度 23km までのエアロゾル数密度観測とサンプルの回収に成功した。しかしながら、気球から分離して自律飛行を開始した最高高度は高度 12km にとどまっております、高度 23km から滑空開始高度まではパラシュートによって降下を行っている(2 段階分離方式)。これは高高度における低レイノルズ数領域における UAV の空力特性が不明であるため、制御系の性能予測が困難であり、危険回避の観点からその滑空開始高度が上げられないのが理由である。この問題を解決するためには、高高度におけるより低レイノルズ数領域かつ中～高亜音速領域(図 1)の機体の空力特性を何らかの方法で推定する方法が必要であった。

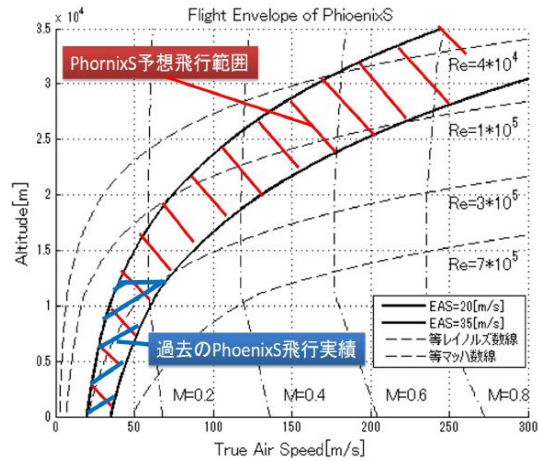


図 1 気球分離型無人機の飛行実績と予想範囲

2. 研究の目的

2 段階分離方式(図 2)と呼んでいる現在の方法は、一般的に気球が上昇可能な高度 30km 程度の高度から、現在までに飛行実証が行われている高度 12km まではパラシュートによって安全に降下し、その後パラシュートを分離して自律滑空に移行し、放球地点まで帰還することによって安全にエアロゾル観測およびサンプル回収を行う方法である。本研究では、気球の上昇限度高度からパラシュートによって降下してくる間、低速すなわちレイノルズ数が低下することを利用して、低レイノルズ数領域における機体の空力特性を推定することを目的とする。また、飛行試験結果の妥当性を評価するために、風速を下げ、レイノルズ数を一致させた風洞試験結果との比較を行う。

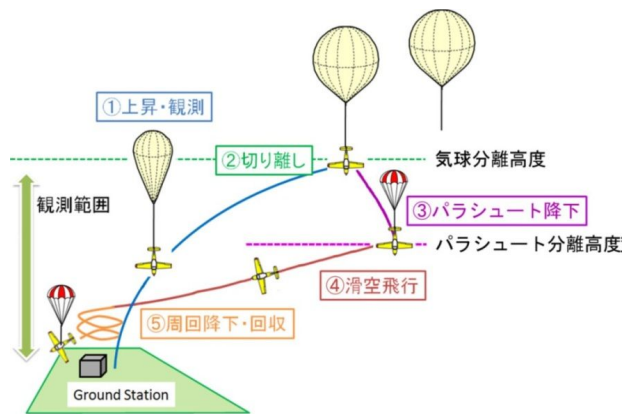


図 2 二段分離方式によるミッションプロファイル

3. 研究の方法

機体に搭載した加速度センサや角速度センサの微分から得られる角加速度を測定すれば、パラシュートを含む機体全体に働く空気力や空気力モーメントを知ることができる。一方、機体とパラシュートの接続部において、パラシュートが機体に及ぼす力やモーメントを別に測定し、全体の力やモーメントからベクトルとして差し引くことによって、機体だけに働く空気力や空気力モーメントを知ること

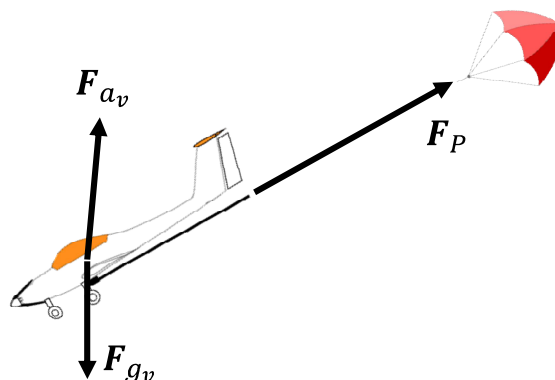


図 3 Parachute Sting Balance による計測

ができる。パラシュートが機体に及ぼす力やモーメントについては、機体とパラシュート取付部に力およびモーメントのセンサを取り付けることによって計測する。推定が必要な領域のレイノルズ数は、空気密度および速度によって決定される(図 1)ため、パラシュートの落下高度およびパラシュートサイズによって調節可能な落下速度を選択することによって実現することができる。本研究では、これを風洞試験における天秤(Sting Balance)になぞらえ、パラシュートスティングバランス(Parachute Sting Balance, PSB)と名付けた(図 3)。

風洞試験については、空気密度を選択することはできないが、風速を下げることによってレイノルズ数を下げることが可能である。ただし、動圧の低下とともにセンサで測定される力やモーメントの大きさが小さくなるため、精密な計測を行う必要がある。

これらの結果から得られた空力特性を使ってシミュレータの精度を向上させ、適切な高度ごとに制御系の設計を行い、ゲインスケジューリングを行うことによって制御を行う。また、空力特性の推定精度に問題があるものについては、空力特性を変化させたモンテカルロシミュレーションによって評価し、制御系の修正を行う。

飛行試験のうち、低高度における試験については、国内において必要な飛行許可を取得して実施する。高高度については、実験実績のあるモンゴル、ウランバートル郊外においてこれもモンゴル航空局の飛行許可を得て実施する。最終的には第 60 次日本南極地域観測隊夏隊同行者として大学院生を派遣し、高高度までのエアロゾル観測およびエアロゾルサンプル回収を目指す。

4. 研究成果

まず、実験機(Phoenix-S と呼ぶ)、搭載アビオニクスとパラシュートによる懸吊およびデータ測定装置(Parachute Sting Balance, PSB)の開発を行った。図 4 に実験に使用する機体を、図 5 に搭載アビオニクスを含む実験全体のシステムを、また図 6 に「パラシュートスティングバランス(Parachute Sting Balance, PSB)」の外観を示す。



図 4 実験機(Phoenix-S)の外観

パラシュートが機体に及ぼす力・モーメントを測定し、全機にかかる力・モーメントから差し引くことによって低レイノルズ数領域における空力特性を推定する「パラシュートスティングバランス」の基本システムにおいて、他のデータとの時刻同期に問題があることが判明したため、その解消を行った。また重量の増加に伴って、気球側への負担が増え、思うように分離高度が上げられない可能性があったため、制御システムのハードウェアを新たに開発し、システムの小型・軽量化を図った。これまでの機体-パラシュート-気球の接続方法は、この順に下から連続的に接続する方法であり、気球の分離は機体

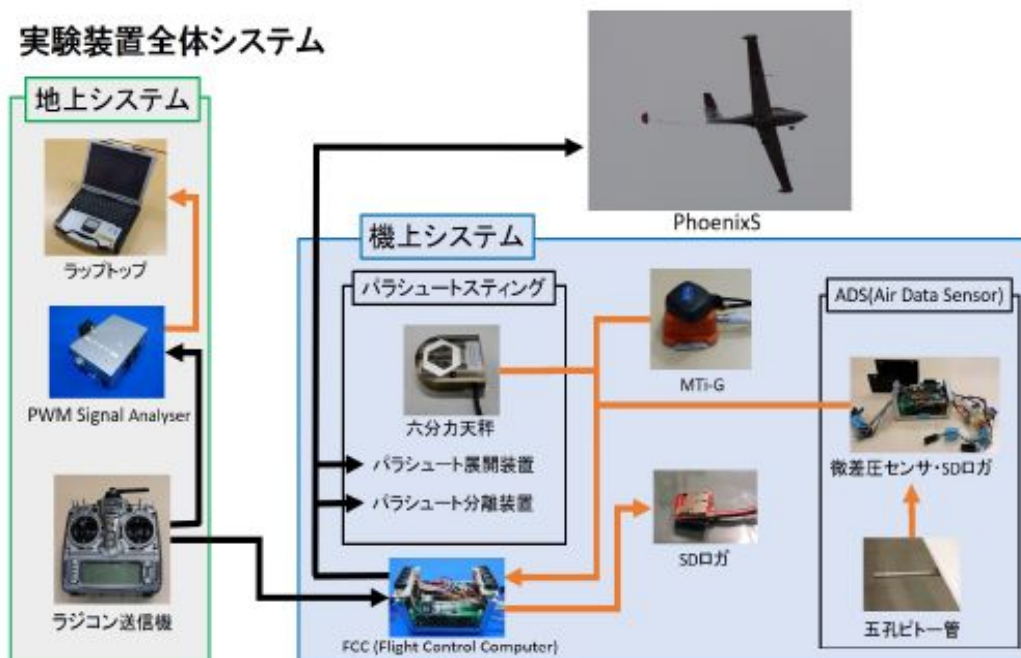


図 5 実験装置全体のシステム

の制御装置とは独立した分離装置によって行われていたが、気球の分離を機体側の制御装置で管理できる方が望ましいため、気球とパラシュートをそれぞれ機体に直接接続し、独立して分離制御できる方式を開発した。データ取得の効率を上げるために、気球ではなく、通常の離陸方法によって上空まで上昇したのち、パラシュートを展開してデータ取得を実施するためのパラシュート展開装置を開発し、比較的低空でもある程度上空のレイノルズ数に相当する空力特性を取得できるようになった。また得られたデータにもとづき、これまでの重回帰にかわり、垂線誤差法と呼ばれる方法を用いることによって空力特性をより高精度に推定し、高高度のシミュレーションモデルを開発することにより、高度 14km までの制御系の設計と制御ゲインのロバスト性の評価を行った。その結果、安定性を損なわずに分離・帰還が可能な見通しが得られた。2018 年 3 月には、北海道美深において、気球を用いた分離・データ取得実験を実施し、新たなパラシュート、気球懸吊方式および分離方式の機能確認を行うことができた(図 7)。また、得られた結果について日本航空宇宙学会西部支部講演会(2017)において大学院生が発表したところ、優秀講演賞を受賞した。



図 6 Parachute Sting Balance 外観



図 7 Parachute Sting Balance による飛行の様子



図 8 産業用ロボットアームを用いた風洞試験システム

開発した「パラシュートスティングバランス(PSB, Parachute Sting Balance)」の基本システムにおける他のデータとの同期ずれの問題は解消したが、温度特性を有するため測定精度が悪いという課題が残っていた。- 50 程度まで気温が低下していく高高度での測定精度を上げるため、マイコンを利用した保温システムを開発し、周囲温度が - 50 であっても PSB そのものの温度はほぼ 0 と一定に保たれることを地上の低温装置で確認した。

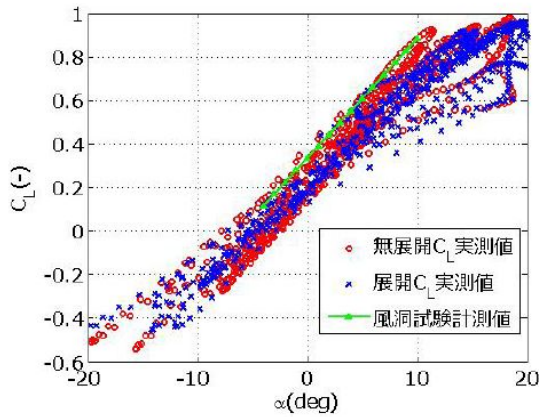


図9 風洞試験結果と飛行試験(PSB 展開および無展開時)結果の比較 (揚力係数 C_L)

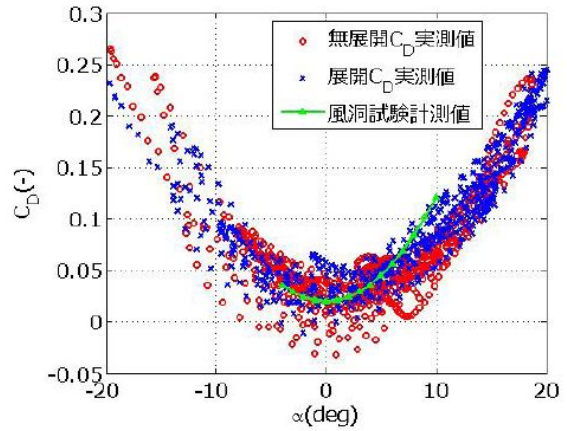


図10 風洞試験結果と飛行試験(PSB 展開および無展開時)結果の比較 (抗力係数 C_D)

低速風洞において産業用ロボットアームを用いて動的な特性を取得する方法を開発し(図8), PSBによって得られたデータの妥当性が確認できる状態になった(図9, 図10)。これらをもとにして開発したシミュレーションモデルと制御系に対し, 滑空降下に相当する線形部分のロバスト性の評価は通常の線形解析の方法で実施し, 分離~引き起こしに相当する非線形部分については, 速度超過やZ方向加速度など飛行破綻に繋がるパラメータについて, 空力特性をノミナル値まわりに変化させてモンテカルロシミュレーションを行い, 制御系のロバスト性の評価を行った。

これらの準備のもとに, 2018年8月にはモンゴルにおいてモンゴル科学技術大学の協力を得て滑空実験を実施し, また大学院生が第60次日本南極地域観測隊夏隊同行者として参加することにより, さらに高高度からの滑空実験を目指した。S17と呼ばれる拠点に6名程度のメンバと共同で滞在して実施を試みた。気象条件や他のミッションの影響を受けたために, 試験的に海拔高度2.6kmからの実験を行うにとどまったが, 気球の分離, パラシュート降下およびPSBによる計測, パラシュート分離, 滑空, 回収の一連のプロセスは成功し(図11), また同時に行われたエアロゾル観測およびサンプルリターンにも成功した。パラシュート降下中のPSBデータは現在解析中であり, 今後学会等で発表の予定である。

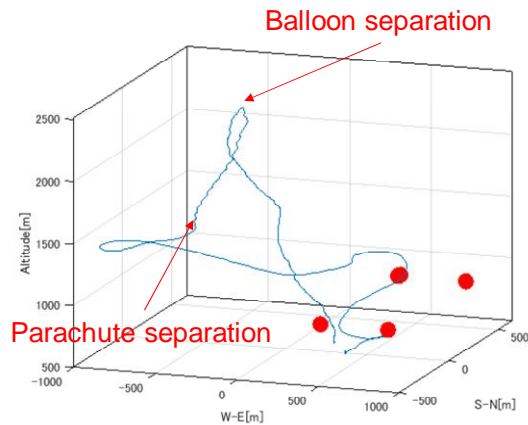


図11 南極における観測フライトの軌跡

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計10件)

1. 堤雅貴, 浜野惇, 東野伸一郎, 林政彦, 高高度滑空型 UAV(Strato Boomerang)の空力モデル推定法の評価, 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2018), CD-ROM, 2018.
2. Shin-Ichiro Higashino, The Aerosol Sample Return System in Antarctica Using a Balloon and an UAV, 2018 KSAS GNC Symposium(招待講演), 2018.
3. 東野伸一郎, 無人機による極限環境における科学観測, 平成29年度宇宙航行の力学シンポジウム(招待講演), 2017.
4. 浜野惇, 藤田拓己, 東野伸一郎, 高高度気球分離型自律帰還 UAV の飛行実験による空力特性の推定に関する研究, 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2017), CD-ROM, 2017.
5. Masahiko Hayashi, Naohiko Hirasawa, Koki Nakata, Shin-Ichiro Higashino, Aerosol measurements in Antarctica using "Kite Plane" in January 2017, 5th Conference of the International Society for Atmospheric Research using Remotely-piloted Aircraft,

2017.

6. 東野 伸一郎, 自律無人飛行機(UAS)の応用研究について- ドローンの未来 -, IoT とドローン活用技術研究会発表会(招待講演), 2017.05.・東野 伸一郎, 自律無人機(UAS)の応用研究と自律化について, 第4回 IoT とドローン活用技術研究会(招待講演), 2016.
7. 東野 伸一郎, 科学観測用 UAV の研究開発と運用, 平成 28 年度名古屋大学宇宙地球環境研究所研究集会 - 小型飛翔体による海象観測, 2016.
8. 東野 伸一郎, 水平面内エアロゾルサーベイ用 UAV の開発状況, 第19回南極エアロゾル研究会, 2016 .
9. 東野 伸一郎, 水平面内エアロゾルサーベイ用 UAV の開発状況と ISARRA2016 , 2016 年度南極無人機研究会, 2016 .
10. Shin-Ichiro Higashino, Masahiko Hayashi, Shuji Nagasaki, Takuya Okada, Keiichi Ozuka, Aerosol Observation and Sample-Return System Using a Balloon Assisted UAV and the Results in Antarctica, 4th Conference on the International Society for Atmospheric Research using Remotely-piloted Aircraft, 2016.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：林 政彦

ローマ字氏名：HAYASHI MASAHIKO

所属研究機関名：福岡大学

部局名：理学部

職名：教授

研究者番号(8桁): 50228590

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。