

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：37111

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23651019

研究課題名(和文) 気球分離式小型無人航空機による成層圏エアロゾル上部境界領域動態の直接観測

研究課題名(英文) In-situ observation of stratospheric aerosol using balloon assisted gliding UAV

研究代表者

林 政彦 (HAYASHI, Masahiko)

福岡大学・理学部・教授

研究者番号：50228590

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：成層圏エアロゾル層の観測を飛躍的に発展させるために、安価で、観測装置および大気試料の回収が可能な観測プラットフォームを開発した。観測装置を搭載した翼幅約3mのモータグライダーに、エアロゾル計数装置、エアロゾルサンプラーを搭載し、ゴム気球で飛揚、目的最高高度で気球を分離し、地上基地に自動で最適航路を選択しながら帰還させる。システム開発を国内における実験で行い、実地観測を南極昭和基地において、2013年1月に実施した。小型ゴム気球により、観測を行いながら飛揚したのち、気球を分離し、観測拠点まで自律帰還させることに複数回成功した。観測最高高度は成層圏下部に達する高度10kmであった。

研究成果の概要(英文)：In order to evolve stratospheric aerosol observations, a new low cost observation platform, which enable to recover on bord instruments and samples, has been developed. A small unmanned glider with observation instruments and navigation system is launched with small rubber balloon. Then UAV is separated from the balloon and glide to ground station by auto navigation. Each components have been designed and tested in Kyushu and Hokkaido, Japan and actual observations were carried out at Syowa station, Antarctica, in January 2013. Observation during ascent, launching with small rubber balloon, separation from balloon, and gliding flight with auto navigation were successsfully performed five times, and the highest observation altitude reached 10 km in the stratosphere.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：無人航空機 直接観測 試料回収 成層圏エアロゾル 物質循環

1. 研究開始当初の背景

成層圏の変動は、オゾン層破壊、地球温暖化などにより人類にとっての地球環境の一部として認識されるようになっており、その変動メカニズムの理解は重要な課題である。成層圏のエアロゾル層は、Junge によってその存在が確認され、粒径、組成等に関する基本的な知見が得られた。その後、大規模火山噴火の影響（火山アッシュ、硫酸エアロゾルなど）の全球的な拡散、オゾンホールへの極成層圏雲（氷、硝酸、硫酸などからなるエアロゾル）の表面反応の寄与、火山噴火後の地球の寒冷化といった熱収支など視点から大きく注目された。これらの研究に基づき、成層圏エアロゾルは、熱帯付近の対流圏から流入、粒子化・成長しながら輸送され、中緯度圏界面の破れ、極地域で対流圏に戻るといった全球的な循環をしていると考えられている。しかし、成層圏エアロゾルの主成分である硫酸の前駆物質の起源も含めて、その循環像の理解は、現象論的な段階にとどまっており、全球的な粒径分布、組成に関する詳細な観測が必要とされてきた。

現在の全球的な観測としては人工衛星やライダーによるリモートセンシングによる観測が中心である。直接的な観測として Wyoming 大、および日本の研究グループ（名古屋大、福岡大など）による気球観測、NASA の有人航空機を用いた観測などが行われている。しかし、これらの直接観測手法は、継続性、地域性、高度領域などの点で弱点を有する。研究代表者は、計測機器とサンプル回収、さらには、観測の機動性に果たす有用性に着目し、近年、小型無人航空機による対流圏エアロゾル観測に取り組んできた。その中で、気球が航空機による限界高度を容易に超えることができる点と、最近の無人航空機技術の進歩に着目、それらを融合した観測プラットフォームを着想するにいたった。研究分担者は、無人航空機の開発研究に一貫して取り組んできており、高いレベルの飛行制御を実現してきた。これらの背景のもと、本研究では、機動性の高い回収型成層圏観測プラットフォームとしての気球分離式無人航空機システムの開発を行うこととした。

2. 研究の目的

エアロゾル層、オゾン層が存在する高度 35km までの観測を行い、かつ、計測装置、サンプルを回収する、重量数 kg 程度のプラットフォームを開発し、エアロゾルの試験観測を成功させる。そのために、気球、パラシュート、滑空型航空機、動力型航空機の有機的な複合システムを完成させる。特に大気密度の低い成層圏における下降時の飛行形態についての検討を重点に進め、(1)自律帰還プラットフォームのハード・ソフトの構築、(2)軽量で高精度な計測（気温、気圧、エアロゾル濃度など）システムの構築を行う。

3. 研究の方法

無人航空機を気球で成層圏高度最高高度約 30km（気圧：約 5hPa）へ観測装置を搭載した状態で到達させることのできるシステムを飛行数値シミュレーション等も用い考察する。その際に、観測装置の小型化の限界、飛行速度の限界、飛行可能高度の限界等を考慮して、全体高度 30km まで飛揚させるためには、高度 20km 以上におけるの開発に基づき①観測装置の小型化、②気球と無人機の分離システムの開発、③無人機の自律航行方法の検討、④自動操縦アルゴリズム開発、を並行して進めた。係留気球による実験など、これらのユニットの試験を個別に行い、⑤全体を組み上げた自由気球による分離実験を分離高度を少しずつ上げながら実施し、特に航空機の自動操縦パラメータ値の大気密度変化に伴う補正量を確認してゆく。⑥ある程度の分離、飛行の安定性が確認されたら、観測装置を搭載しての実地観測を行う。実地観測は、飛行の自由度が高く、一方で観測データの欠損が著しい南極昭和基地で夏季に実施することとした。⑦観測データ、サンプルを持ち帰り、国内での分析、解析を行い、夏季の南極におけるエアロゾル変動の様子を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 観測システムの理論的構築

本研究では、電動モータを搭載したグライダーを用い、気球によって上空へ飛揚、分離、その後は滑空によって放球基地まで帰還させ、着陸操作のみ手動で行うことが最も効果的かつ確実なシステムになると結論した。

(図 1)

また、南極昭和基地付近の気象ゾンデデータを用いたフライトシミュレーションにより、昭和基地から飛揚し、高度 12km で分離した場合、80%以上は、滑空のみで昭和基地上空に帰還が可能であることが分かった。

また、高度 30km 付近まで上昇させる場合には、航空機の飛行特性を改良する必要があること、あるいは、気球分離後は飛行可能高度まで、パラシュートによる降下をさせることで観測が可能になることも明らかになった。

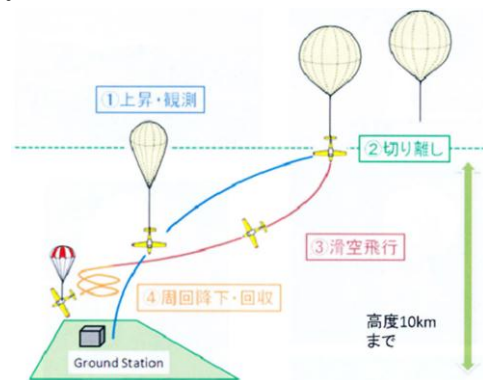


図 1 気球分離無人滑空機システム概要

(2) 観測装置の開発

本システムでは、気球を用いるため、ペイロードが大きくなることにより、観測オペレーションに対する制約が大きくなる。本研究では、エアロゾルの観測装置をできるだけ小型化することを目指した。観測装置の小型化は、機体の小型化を可能とする。

搭載観測装置は、エアロゾルの基本的な量である粒径と数濃度を小型で高時間分解能で計測のできる光散乱式粒子計数装置、小型化が可能でサンプル回収が可能であるインパクトとした。また、温度、湿度等の気象要素が必要なこと、データのリアルタイムモニタが可能の方が望ましいことなどから、小型軽量でエアロゾルデータを同時伝送できる気象ゾンデを搭載することとした。それぞれの観測装置の諸元は以下のとおりである。

①光散乱粒子計数装置 (図2)

観測項目：エアロゾル粒径分布

寸法：109×92×150 mm

重量：700g

サンプリング流量：3L/min

計測粒径；0.3~11.4 μm (m=1.40, 球形)
10チャンネル

高度分解能：

約20m

(4秒積算)

データ送信：

RS06Gゾンデ

(明星電気)

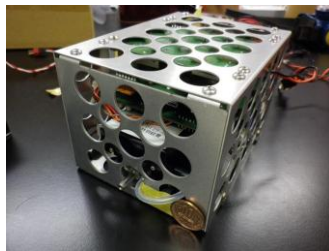


図2 光散乱粒子計数装置

②エアロゾル2段式インパクト (図3)

観測項目：エアロゾルサンプル回収

回収されたサンプルは、電子顕微鏡とエネルギー分散型X線解析装置により分析される

寸法：80×105×130 mm

重量：650g

サンプリング流量：約1.6L/min

ノズル直径：1.3mm, 0.5mm

カットオフ径：1.4 μm , 0.25 μm

サンプリング回数：16回まで

サンプリング時間：約3分

高度分解能：

約900m

気圧動作式

動作モニタ：

RS06Gゾンデ

(明星電気)

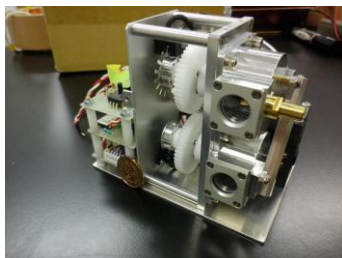


図3 インパクト

③ラジオゾンデ (図4)

ラジオゾンデは、温度、湿度の計測とともにGPS情報の送信、エアロゾルカウンタのデータおよびサンプラーの動作モニタを行う。温度、湿度の計測は、機体側面における温度影響や水蒸気の遊離などによる影響を受ける。このため、翼端に設置し、動態の影響を受けないようにした。通常気球観測のための筐体に収めた状態で翼端ポッドに納めることは難しかったために、筐体から取り出し、翼端ポッドに収めて装着した。

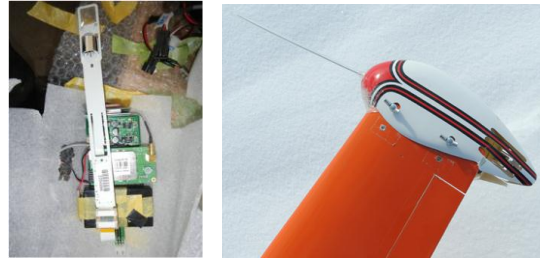


図4 ラジオゾンデ

左：筐体から取り出したゾンデ本体

右：翼端ポッド中のRS06G

④機器搭載

自動操縦装置、エアロゾル観測装置は胴体部に収納した。観測装置用のバッテリーは重心バランスと収納スペースの都合により、胴体前部のプロペラモータの脇に収納してある。図中のバッテリーは自動操縦装置用のものである。観測のための空気採取筒は胴体側部から真横につきだしている。

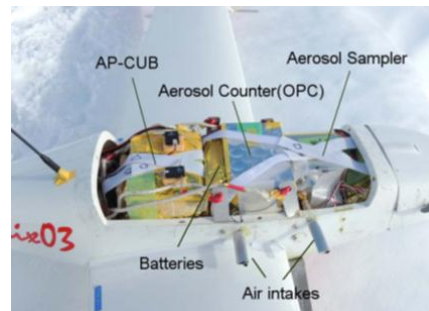


図5 観測準備の整った搭載した胴体部

AP-CUB: 自動操縦装置

Aerosol Counter: 光散乱粒子計数装置

Aerosol Sampler: エアロゾルインパクト

Air intake: 空気採取筒

(3) 気球

この状態で、機体総重量は、約10kgとなっている。この機体を高度30kmまで飛揚する場合には、3kgゴム気球が必要となる。充填するヘリウムガスは、7m³ボンベはぼ2本分である。この量のガスを充てんとすると気球は直径2.5mになる。2.5mの気球を収納でき、かつ持ち出せる広い間口の整った充填設備がなければ、充填は屋外で行わなければならない。屋外で充填する際には、風の影響を強く受ける。このため、本観測システムで、オ

ペレーション上の最大の制約は、地上風速になる。通常、地上風速 3m/sec 以下でなければ観測はできない。

(4) 気球分離装置 (図 6)

気球と無人機の確実な分離は、本観測システムの要である。気球と無人機は 50m 程度離して観測を行う必要があるため、比較的細いロープで接続する必要がある。同時に 10kg のペイロードを吊り下げて切断しない強度が必要である。さらに、分離時には安定して切断、あるいは、分離ができなければならない。本システムでは、連結ロープに新素材のポリエチレン繊維ロープ (商品名: ダイニーマ) を用いた。ダイニーマは、細くて強度があるが、熱により簡単に切断する。カッターは、ニクロム線通電による熱線を用いることとした。フェールセーフ機構を持たせるために、機体内に GPS による高度情報に基づいて動作するメインカッターを設置するとともに、気球下に気圧により動作する外部補助カッターを設置した。これにより、メインカッターが動作しなかった場合に、補助カッターによって気球の分離が行えるようにしている。

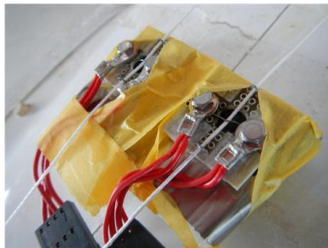


図 6 胴体下部に設置されたカッター

(5) 国内予備試験

南極昭和基地で成層圏に達する観測を実施することが一つの目的であった。その準備として国内での実験を 2012 年 7 月および 2012 年 9 月に北海道美深町において実施した。

気象条件等の制約と国内では航空路等が過密であり、自由な空域の確保が困難なこともあり、低高度での分離試験を一度行えたのみであった。

(6) 南極昭和基地での実地観測

第 54 次南極地域観測隊に、研究分担者である東野伸一郎が観測隊員として、また、研究代表者の指導学生である大学院生が観測隊同行者として参加して、2012 年 12 月～2013 年 2 月に昭和基地において、観測を実施した (表 1)。分離高度を 5km から少しずつあげて、最終的には、分離高度 10km での分離、自動帰還に成功した。

表 1 昭和基地における観測記録

日時	気球-分離		気球地点上空へ帰還		上空への帰還	
	分離高度	所要時間	高度	所要時間	→無降下	→分離後バリュート降下したため帰還せず
2012年 1月4日	5000m	5039m	16分	-	-	-
1月6日	5000m	5039m	15分	-	-	5分
1月18日	6000m	6009m	21分	4733m	5分	5分
1月29日	8000m	8091m	29分	608m	39分	49分
1月30日	10000m	9984m	1時間41分	6244m	5分	23分

次の図 7～図 9 は、昭和基地における観測の様子である。

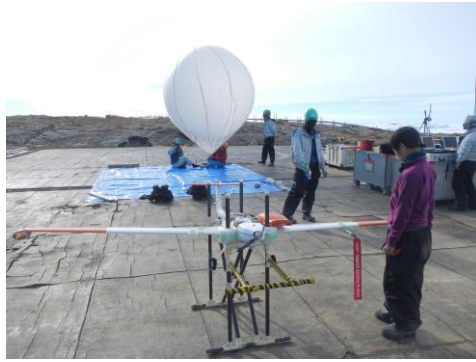


図 7 3kg 自由気球 (奥) と無人機 (手前)



図 8 無人機放球の瞬間



図 9 気球に吊られて上昇してゆく無人機

(7) 観測結果

観測結果の解析、サンプルの分析は現在、行っている途中である。ここでは、一例として、高度 6km で分離した 1/18 の光散乱粒子計数装置による観測結果 (図 10) とサンプルの電子顕微鏡画像 (図 11) を示す。

気球による上昇中の観測データとグライダーとしての滑空 (下降) 中の観測データを比較すると、上昇中の方が濃度が高い。滑空速度は 25m/sec 程度、上昇速度は 5m/sec 程度である。採取筒を流線に対して直交するように突き出しているため、高速で飛行しているときは、エアロゾルの吸引ロスが起きているためと考えられる。

また、共通して、高度 4.3～5km 付近に高濃度のピークがみられる。この高濃度ピークのあたりで典型的に見られたエアロゾルの

形態（図 11 左）とその下層の低濃度領域で見られたエアロゾルの形態（図 11 右）では、大きな違いがみられた。

5 日間の後方流線解析では、高濃度層はやや緯度が低い海域の境界層高度に達した。海洋境界層起源の可能性が高いが、組成としては海塩粒子のようなものが見られないことから、より詳細な解析が必要であると考えられる。

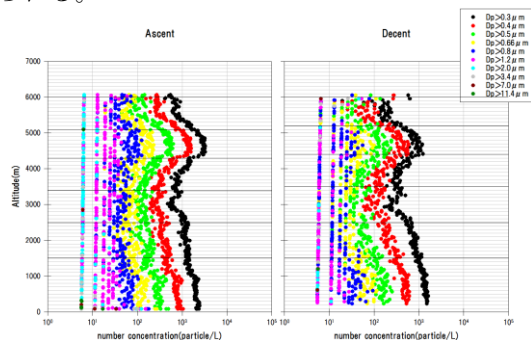


図 10 2013 年 1 月 18 日の昭和基地上空の積算エアロゾル濃度の鉛直分布

左：気球により上昇中の観測結果
右：グライダーとして滑空中の観測結果

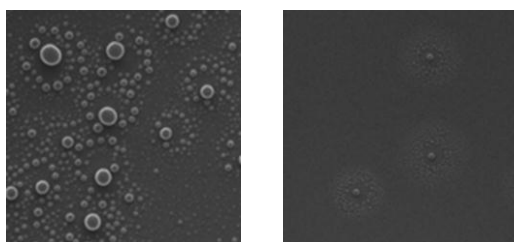


図 11 2013 年 1 月 18 日に採取されたエアロゾルの走査電子顕微鏡画像

左：高度 4.3～5.1km
右：高度 3.5～4.3km

2013 年 1 月のエアロゾル濃度は、対流圏全層で次第に高くなっていった。南極の夏季のエアロゾル循環を検討するうえで、54 次南極地域観測隊の観測により貴重なデータを得た。

(8)まとめ

本課題において、成層圏エアロゾル観測のための気球分離無人航空機システムを開発し、南極昭和基地において、高度 10km からの分離、自動帰還、観測に成功した。この成果により、今後、本開発システムによる成層圏エアロゾル層の上部境界領域に対応する約 30km までのエアロゾル観測の実現の展望を切り開くことができた。

5. 主な発表論文等

(下線は、研究代表者および研究分担者)

[雑誌論文] (計 3 件)

1. 尾塚馨一, 林政彦, 岡部和夫, 東野伸一郎, 無人航空機によるリアルタイム in-situ 測風, 福岡大学理学集報, 44 巻, pp45-52, 2014. (査読なし)
2. Higashino, S. and Funaki, M.,

Development and Flights of Ant-Plane UAVs for Aerial Filming and Geomagnetic Survey in Antarctica, Journal of Unmanned System Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 37-42, Sep 2013. (査読あり)

3. S. HIGASHINO, M. HAYASHI, S. NIAGASAKI, S. UMEMOTO, and M. NISHIMURA, A Balloon-Assisted Gliding UAV for Aerosol Observation in Antarctica, Proceedings of The 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace, Technology (APISAT-2013), Takamatsu, Japan, 2013. (査読あり)

[学会発表] (計 5 件)

1. 林政彦, 梅本紫衣奈, 尾塚馨一, 執行いずみ, 原圭一郎, 東野伸一郎, 長崎秀司, 西村太貴, 海洋起源エアロゾルの南極自由対流圏への輸送—2013 年 1 月の無人航空機観測—, 第 30 回エアロゾル科学・技術研究討議会, 2014 年 8 月 6～8 日, つくば
2. 林政彦, 平沢尚彦, 東野伸一郎, 南極観測における無人航空機観測の展開, 第 4 回極域科学シンポジウム, 2013 年 11 月 12～15 日, 立川
3. 林政彦, 梅本紫衣奈, 原圭一郎, 東野伸一郎, 夏季南極昭和基地上空の対流圏, 成層圏下部のエアロゾル濃度鉛直分布, 第 33 回極域気水圏シンポジウム, 2012 年 11 月 26～30 日, 立川
4. 西村太貴, 長崎秀司, 梅本紫衣奈, 林政彦, 東野伸一郎, 気球分離型エアロゾル観測用無人航空機に関する研究, 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2012), 2012 年 11 月 1, 2 日, 福岡
5. 東野伸一郎, 林政彦, 長崎秀司, 西村太貴, 気球分離型動力滑空 UAV によるエアロゾル観測システムについて, 第 49 回飛行機シンポジウム, 2011 年 10 月 26～28 日, 金沢

[図書] (計 1 件)

5. Higashino, S., Funaki, M., Hirasawa, N., Hayashi, M., and Nagasaki, S., Development and Operational Experiences of UAVs for Scientific Research in Antarctica, in Autonomous Control Systems and Vehicles - International Series on Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering, ISBN 978-4-431-54275-9, Vol. 65, pp. 159-173, Springer, 2013

[その他]

ホームページ等

九州大学飛行力学研究室

<http://www.aero.kyushu-u.ac.jp/fdl/latereports.html>

国立極地研究所プレスリリース

<http://www.nipr.ac.jp/info/notice/20130>

[305.html](#)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 政彦 (HAYASHI, Masahiko)

福岡大学・理学部・教授

研究者番号：50228590

(2) 研究分担者

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