

新しい気球分離型無人航空機大気観測システム開発と 昭和基地上空夏季自由対流圏のエアロゾル時空間変動

東野伸一郎^{1*}・林 政彦²・梅本紫衣奈³・長崎秀司¹
西村大貴⁴・尾塚馨一⁵・白石浩一²・長沼 歩⁶

Development of Balloon-Assisted Gliding Unmanned Aerial Vehicle System for Atmospheric Observation and Spatiotemporal Aerosol Variations in Summer Troposphere over Syowa Station

Shin-Ichiro Higashino^{1*}, Masahiko Hayashi², Shiina Umemoto³, Shuji Nagasaki¹,
Motoki Nishimura⁴, Keiichi Ozuka⁵, Koichi Shiraishi² and Ayumi Naganuma⁶

(2020年1月29日受付; 2020年10月18日受理)

Abstract: A novel aerosol observation and sampling system has been developed by combining a rubber balloon and an unmanned aerial vehicle (UAV). The system takes advantage of the feature of an observation method using a rubber balloon, which is handy, inexpensive, and higher reachable observation altitude than those of other observation methods, and the feature of a UAV which can fly back to the released point autonomously. In this system, an optical particle counter, an aerosol sampler, and a GPS sonde are mounted on a motor-glider UAV. The UAV, which is suspended from a rubber balloon, is released from the ground. After finishing observation and sampling during its ascent, the UAV is recovered by separating from the balloon and gliding back to the released point autonomously. Five observation flights were performed successfully at Syowa Station in the summer activity of the 54th Japanese Antarctic Research Expedition, and the maximum observation and separation altitude reached 10 km. Number concentrations obtained by in-situ measurements and morphology of recovered aerosols using the UAV show the possibility that the enhancement of sulfate aerosols in the free troposphere and bottom of the stratosphere were caused by the volcanic eruption in the mid-latitude in January 2013.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, Aerosol Observation, Balloon, Syowa Station, Time- and Space-wise Aerosol Variation

¹ 九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門. Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395.

² 福岡大学理学部地球圏科学科. Department of Earth System Science, Fukuoka University, 8-19-1 Nanakuma, Jyonan-ku, Fukuoka 814-0180.

³ 福岡大学大学院. Ex-graduate student, Fukuoka University.

⁴ 九州大学大学院(現トヨタ自動車). Ex-graduate student, Kyushu University (Currently, Toyota Motor Corporation).

⁵ 日本タングステン. Nihon Tangusuten, 1-2-8 Minoshima, Hakata-ku, Fukuoka, 812-8538.

⁶ 福岡大学(現熊本県立大学). Ex-undergraduate student, Fukuoka University (Currently, Prefectural University of Kumamoto, 3-1-100 Tsukide, Higashi-ku, Kumamoto 862-8502).

* Corresponding author. E-mail: tonton@aero.kyushu-u.ac.jp

要旨: エアロゾルの数濃度鉛直分布観測やサンプリングにおいて、運用が手軽でありながら到達高度の高いゴム気球による観測方法と、自律飛行が可能な無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) の特徴を生かし、両者を組み合わせることによって、ゴム気球による観測では困難であった観測装置やサンプルの回収が可能となる新しいエアロゾル観測システムを開発した。本システムでは、UAV にエアロゾル数濃度観測装置およびサンブラを搭載し、気球に懸吊して上昇中に観測を行う。観測終了後に気球から UAV を分離し、自律滑空により放球地点まで UAV が帰還することによって回収を行う。このシステムを用いて、第 54 次日本南極地域観測隊の夏行動において 5 回の観測フライトを行い、最高高度 10km までの観測と分離・回収に成功した。本研究で開発された UAV システムによるエアロゾル粒径分布観測と、回収したエアロゾルサンプルの分析に基づき、2013 年 1 月の南極自由対流圏および成層圏底部には、中緯度の中規模火山噴火を起源とする硫酸を主成分としたエアロゾルが輸送されていた可能性が高いことが示された。

キーワード: 無人航空機, エアロゾル観測, 気球, 昭和基地, エアロゾル時空間変動

1. はじめに

大気中には様々な微粒子 (エアロゾル) が浮遊しており、熱収支や物質収支を通じて気象や気候変動に影響を与えている (Stocker *et al.*, 2013)。南極は、表面が一年中厚い水で覆われ、地殻の露出が少なく、陸上生物の活動、人為的な経済活動等から最も遠く離れた地域である。エアロゾルの濃度は、他の地域の数十分の一程度でありバックグラウンド的なエアロゾルの状態の監視に最適な場所である。また、南極は地球全体の熱収支においては冷源であるが、南極におけるエアロゾルの量が少ないために、熱収支に対する直接的な効果は大きくはない。しかし、雲や降水を通じて間接的に熱収支に関与しており、その分布や変動の機構を理解していくことは物質収支のみならず、気候変動予測のためにも必要である。

これまで、日本南極地域観測隊もエアロゾルの多様な観測を実施し、分布の特徴や変動システムについての知見を得てきている (山内, 2010)。しかし、南極観測は低温、長い極夜、貧弱な観測施設などの大きな制約の下で観測を行わなければならない。エアロゾルの数濃度鉛直分布観測やサンプリングには、ゴム気球 (Ito *et al.*, 1986, 木津ほか, 2010, Hara *et al.*, 2014)、係留気球 (Hara *et al.*, 2013)、有人航空機 (Iwasaka *et al.*, 1985, Yamanouchi *et al.*, 1999, 和田ほか, 2001, Hara *et al.*, 2006, 原ほか, 2010) などが使用されてきた。しかし、それぞれに一長一短がある。ゴム気球による観測は比較的手軽かつ安価でありながら、係留気球や有人航空機の到達高度をはるかに超える高高度 (20~30 km) まで到達可能である。しかし観測が終了し、気球の破裂後に地上に落下した機器や、採取したサンプルの回収は困難である場合が多い。したがって 1 台 100 万円前後の観測機器は使い捨てとせざるを得ないという問題がある。また、採取したサンプルの回収ができないことは致命的である。係留気球の場合には、そのような問題は生じない代わりに、係留索の強度および重量の限界から到達高度が数 km の範囲に限られることや、係留気球を浮揚可能な風速条件が限られるなどの

問題がある。有人航空機はこれらの制限から解放されるものの、到達可能な高度は成層圏最下部付近までであり、自由気球の到達高度には及ばない。また自由気球や係留気球と比較すると格段に大きな費用がかかるとともに、専属の機体と運用スタッフを所有していない限り、利用できるタイミングや期間を自由に選択することはできない。特に南極で運用するためには、費用のみならず、滑走路の整備等、設営面での負担も非常に大きい。

無人航空機 (UAV, Unmanned Aerial Vehicle) は、近年のコンピュータや MEMS (Micro Electronic-Mechanical System) センサ技術、複合材 (FRP, Fiber Reinforced Plastic) およびその成型技術の発展、バッテリーの小型・高性能化、米軍による GPS (Global Positioning System) の SA (Selective Availability) 解除等のタイミングが合致したことによって、21 世紀に入ってから急速な進歩を遂げた。特に軍用の実用化例が増えてきているが、科学観測用として南極など有人航空機の利用が困難な地域で使用される例も増えてきた (Spiess *et al.*, 2007, BAS, 2008, Higashino *et al.*, 2013, Higashino *et al.*, 2014, Funaki *et al.*, 2014)。

筆者らは、自由気球によるエアロゾル観測方法の手軽さと経済性を生かしつつ、エアロゾルサンプルや観測後の機器を容易に回収するために、自由気球と UAV の組み合わせによる新しい観測システムの構築を行い、南極昭和基地での試験運用を試みた。本システムでは、エアロゾル観測機器を搭載した UAV を自由気球に懸吊し、それらが上昇する過程において、自由気球による観測と同様にエアロゾル数濃度観測およびサンプル採取を行う。観測終了後、設定された高度で UAV は自由気球から自動的に分離し、放球点上空まで自律滑空によって帰還・回収することが可能である。本システムを用いて、第 54 次日本南極地域観測隊の夏期行動の一つとして実証観測フライトを行った。システムについては一部発表済み (Higashino *et al.*, 2014) であるので簡単にまとめ、今後同様の方式で観測を行う場合に参考となるであろう運用面の詳細を中心に述べる。

また本観測フライトによって得られた、エアロゾル粒径分布の直接観測データと回収されたエアロゾルの電子顕微鏡による形態分析等に基づき、2013 年 1 月に見られた昭和基地近傍の自由対流圏・成層圏エアロゾルの増大現象とその起源の検討を行った。

2. 気球分離型 UAV によるエアロゾル観測システム

2.1. 観測方式の概要

通常、ゴム気球に直接懸吊されるエアロゾルカウンタ (OPC, Optical Particle Counter) およびサンプラ (インパクト) を、本システムでは UAV の胴体内部に搭載 (2.6. で詳述) し、図 1 の①に示すように UAV の機首を真下に向けた状態でゴム気球に懸吊して放球する。気球が上昇する間、カウンタによるエアロゾル数濃度の観測およびサンプラによるサンプル採取が行われる。UAV があらかじめ定められた高度に達すると、図 1 の②に示すように UAV は気球から自動的に分離する。UAV は機首を下に向けたまま降下し、適切な飛行速度に達

すると機首の引き起こしを行う。引き起こしたあとの方位は放球点を向いているとは限らないため、放球地点方向への旋回を行い、図1の③に示すように放球地点までの自律滑空を開始する。放球地点まではほぼ一直線に滑空するよう飛行経路の制御が行われる。放球点上空に達したUAVは、1辺1km程度の周回経路にそって旋回降下を行い、高度100~200m程度で手動によりパラシュートを開傘し、海水上で回収される(図1の④)。気球からの分離に始まり、最終回収用パラシュート開傘の直前までの制御はすべて自動的に行われるが、海水上でのパラシュート開傘指令のみ、タイドクラックやパドルを避けるため手動による操作を行う。また滑走路が整備されていれば、タイヤまたはスキーによる滑走路への着陸も可能である。

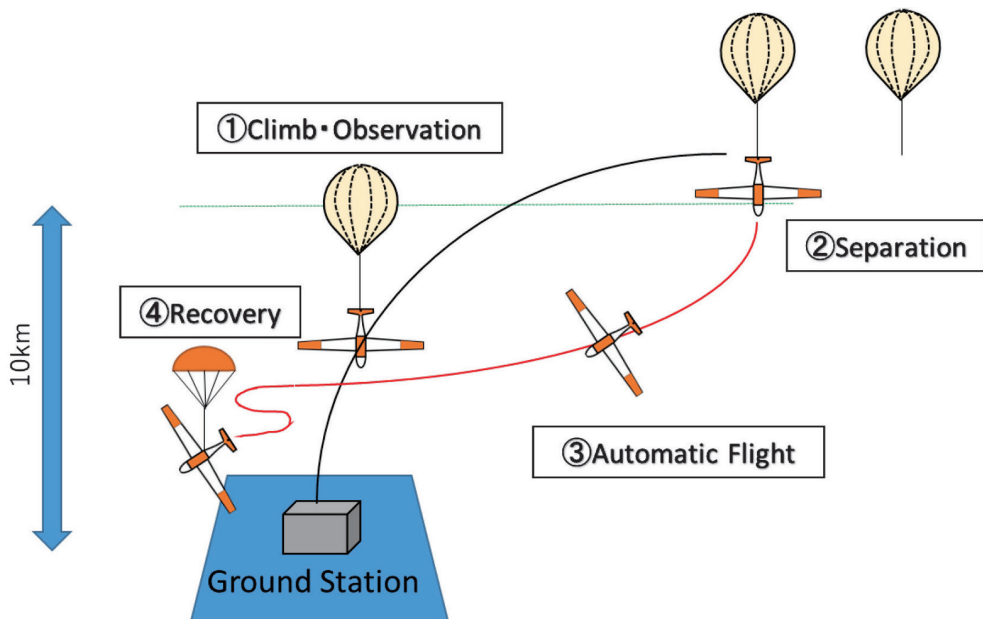


図1 気球分離型 UAV による観測のミッションプロファイル。

Fig. 1. Mission profile of the observation using the balloon-assisted UAV.

2.2. 気球分離型自律滑空 UAV

本システムにおける UAV は、主翼アスペクト比 14.8 の滑空型 UAV として、約 2kg の観測用ペイロードを重心付近に搭載できるよう低翼機として設計し、GFPR (Glass Fiber Reinforced Plastic, ガラス繊維強化プラスチック) によって製作した。Phoenix 3 号機と名付けたこの UAV の外観を図 2 に、表 1 に仕様を示す。

可搬性を考慮して左右の主翼、胴体、水平尾翼は分解できるように設計し、 $1.5 \times 0.5 \times 0.5$ m 程度の箱に格納して運搬できる。Phoenix 3 号機は滑空型ではあるが、滑走路への通常着陸

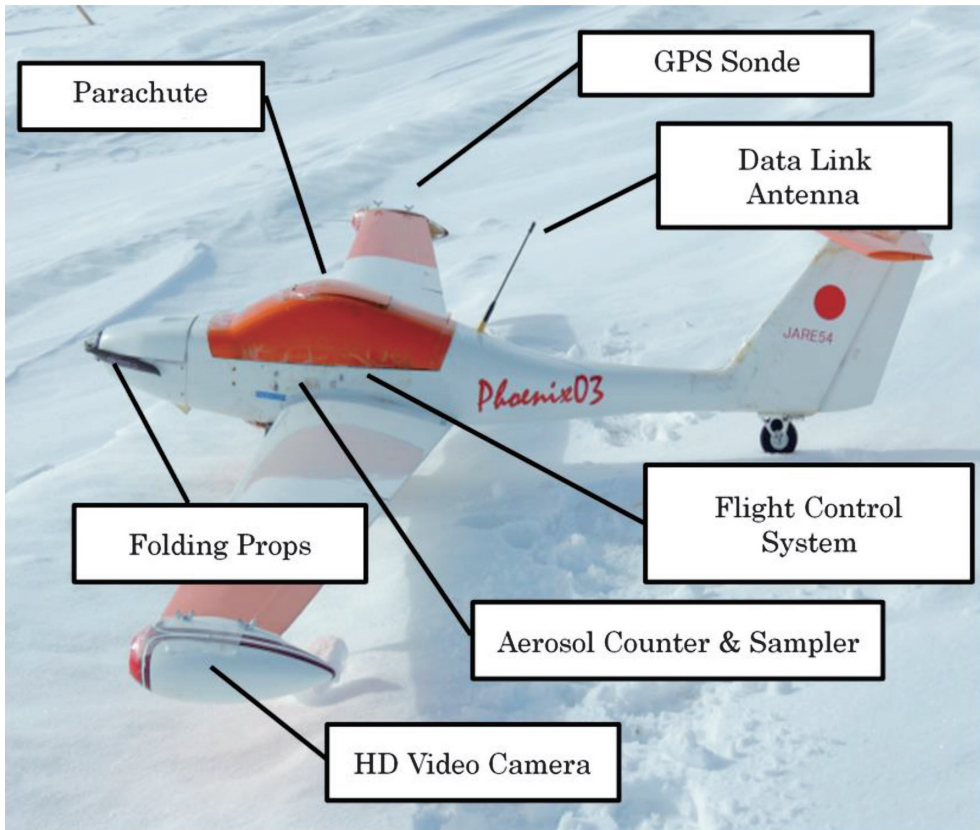


図 2 Phoenix 3 号機外観.
Fig. 2. Appearance of Phoenix 3.

表 1 Phoenix3 号機の諸元.
Table 1. Specifications of Phoenix 3.

翼幅	2.9 [m]
全備重量	9.0 [kg]
ペイロード重量	2.0 [kg]
翼面積	0.68 [m ²]
最大揚抗比	20
最大速度	260 [km/h@10km]
動力	電気モータ, 22.2[V]
動力飛行時間	5 [min]

時のやり直しや、パラシュートによる回収時に海氷上のバドルやタイドクラックを避けた適地への誘導のために、電動モータ駆動によるプロペラを備えたものとして設計し、約5分程度の動力飛行ができるように6セルリチウムポリマーバッテリー（容量4000mAh）を搭載している。プロペラは折り畳み式であり、不使用時には空気抵抗によってノーズカウルに沿って後方に折り畳まれるため、滑空時の抵抗を低減できる。この機体は失速速度である約17m/sから、飛行試験によって確認した約40m/sの範囲で飛行が可能であり、採用した制御則の制限から最高速度の1/2である風速20m/s程度が安全に帰還可能な風速の上限である。気球には機首を下方にした姿勢で細いロープを介して懸吊されるため、ロープと尾翼との干渉を避けるためにT尾翼形式としている。また降着装置は尾輪式として軽量化を図るとともに、ジュラルミン製のメインギアはパラシュートによる着地時の衝撃吸収装置を兼ねている。パラシュートは、海氷上での回収用に使用するとともに、何らかのトラブルによる緊急時の回収用としても使用でき、雪面や草地への着地でも機体が壊れることのない約5m/sの降下速度となるような面積としている。パラシュートの開傘は、地上局コンピュータあるいはラジコン用送信機からの指令による手動開傘のほか、開傘条件を指定したプログラムによる自動開傘と、機上電源喪失の場合にもコイルばねによる自動開傘が可能であり、3重の冗長系となっている。

2.3. 自律飛行制御システム

UAVの心臓部となる自律飛行制御システムは、夏期の南極において -25°C 程度までの低温を想定して開発した自律飛行制御システム（Higashino, 2006）をベースとして必要な改良を加えた、マイコンモジュールと、各種MEMSセンサおよびGPSレシーバを搭載している。いわゆるラジコン用の受信機からのサーボ駆動信号とマイコン出力とを切り替えることによって、手動操縦と自律飛行制御を人間パイロットによって切り替え、ラジコン送信機からの信号が途絶した場合には、自動的に自律飛行モードに切り替わる。マイコンモジュールの自律制御プログラムはC言語による内製である。PID制御を基本とした飛行制御則とGPSナビゲーション（河野ほか, 2007）によりウェイポイント飛行が可能であり、気球による上昇モード、分離高度を指定した自動分離～引き起こしモード、速度を指定した滑空モード、速度と高度を指定したプロペラ推進によるモード、および緊急モードが自動的に切り替わる。ウェイポイント飛行は滑空モードおよびプロペラ推進モードのみで行われ、滑空モードでは速度指定が可能であるが、高度指定はできない。緊急モードでは自動的に回収用パラシュートが開傘する。UAVからのダウンリンク（飛行状態）モニタおよびグランドステーションからのアップリンク（コマンドなど）のために2.4GHz帯無線モデムを使用している。すべての電源は、断熱材によって保温した5セルのニッケル水素バッテリー（容量4000mAh \times 2）で賄われ、 -60°C の低温環境下で約4時間程度の駆動が可能である。

2.4. 地上システム

地上システムは UAV とのデータ通信を行うための UAV 用地上局と、エアロゾル観測用地上局からなる。UAV 用地上局はバックアップを含む 2 台のノートパソコンと 2.4 GHz 帯無線モデム (Futaba 製 FDA-01)、エアロゾル観測用地上局はノートパソコンと 400 MHz 帯ゾンデ用受信機 (明星電気; RD-08AC) で構成され、いずれも八木アンテナを利用している。UAV 用地上局のソフトウェアは C++ 言語による内製であり、地図上の飛行経路や飛行速度、高度、飛行方位の飛行状態とコマンドがグラフィカルにモニタできるほか、ウェイポイントの指定や制御ゲイン等のパラメータを GUI (Graphical User Interface) によって飛行中であっても UAV に送信することができる。UAV 翼端には GPS ゾンデが搭載してあり、エアロゾルカウンタの観測データおよびサンプリングの動作状況がゾンデデータとともにダウンリンクされ、観測用地上局ではそれらをモニタすることができる。

2.5. 気球および分離装置

UAV の浮揚のために使用するゴム気球は 1500 g ラテックスゴム気球 (トーテックス製; TA-1500) であり、放球袋を使用して He ガスの充填を行う。約 9 kg の UAV を約 5 m/s の上昇速度で浮揚するために 7 m^3 の He ボンベ (14.7 MPa) 約 2 本を使用する。ゴム気球と UAV の間は、基本的に長さ 50 m の編み込み高密度ポリエチレン平ロープ (商品名; テクミロン, 2.5 mm^2 , 強度 32 cN/dtex) で結合した。UAV を接続した気球は図 3 に示すように以下の要領で放球した。まず機体付近から風下側にロープを展張したあと (図 3 (1)), He ガスを充填したゴム気球を風下側のロープ端に接続し (図 3 (2)), 気球の浮力とほぼ同重量の錘と滑車を利用して気球を立ち上げながら機体付近まで立ち上げる (図 3 (3))。機体の分離部分にのみ、溶断のしやすい細い高密度ポリエチレンロープ (商品名; ダイニーマ, 8 号, 直径 0.5 mm, 強度はテクミロンと同等) を使用した。機体下面中央付近のロープ接続点から後述の機体側分離装置を通して機体尾部後方約 1 m まで伸びており、機体尾部後方部分にはさらにバックアップ用気圧カッタ (分離装置) が通してある。機体とロープ端を接続し、同位置に放球用の軽い補助ロープを取り付ける。機体整備兼放球用の架台を機体ごと傾け (図 3 (4)), この放球用補助ロープで気球の浮力を支持しながら機体が地面から離れる程度まで上げたのち (図 3 (5)), 放球用補助ロープを手放して放球する方式 (図 3 (6)) とした。この方式によって 2~3 人でも容易に放球することが可能である。

機体側分離装置は、UAV の自律飛行制御装置からのサーボ駆動信号 (PWM) によってリレーを駆動し、ニクロム線によってダイニーマロープを溶断する内製品である。機体側分離装置は UAV の胴体下面外側に図 4 のように取り付けられている。分離高度は UAV 用地上局から指定・変更することができ、指定された分離高度を GPS 高度が上回ると自動的にロープが溶断される。また、地上局からのコマンドによって溶断することも可能である。この分

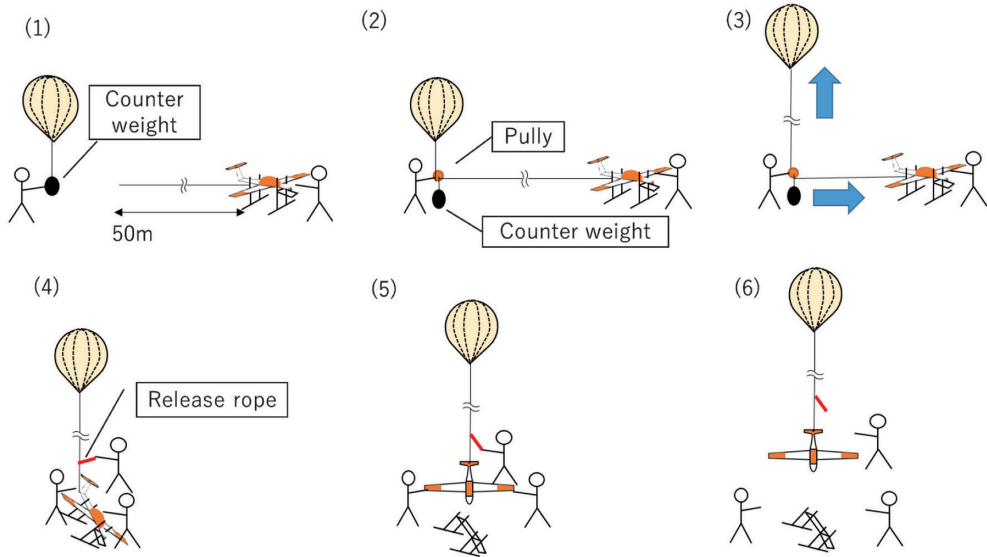


図 3 放球の手順.

Fig. 3. Procedure for the balloon release.

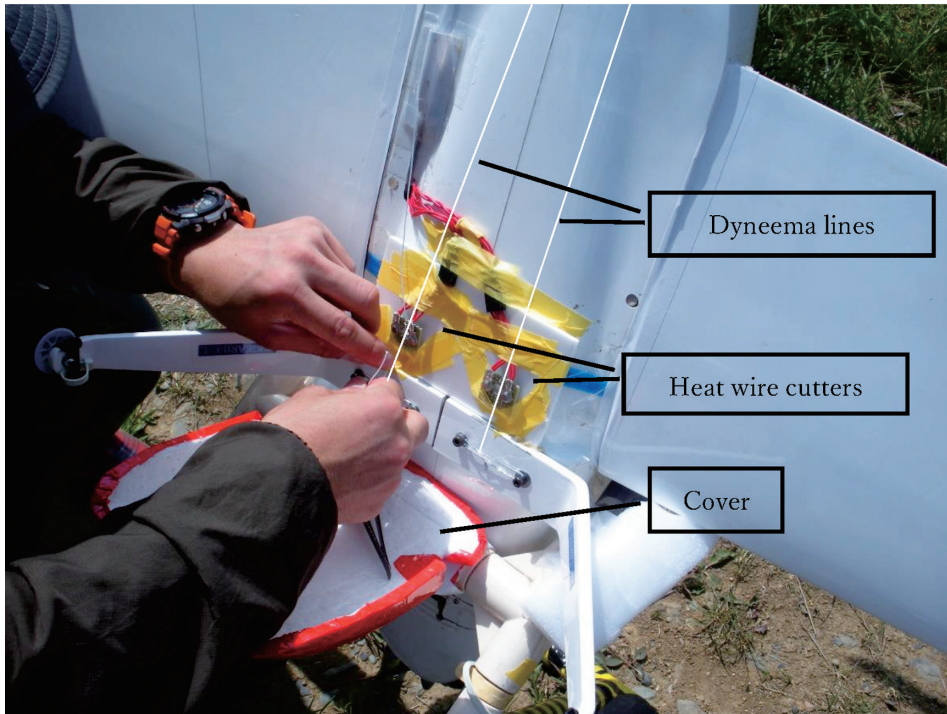


図 4 機体側分離装置の外観.

Fig. 4. Balloon separation device on the UAV.

分離装置によって分離できなかった場合、気球は破裂するまで上昇を続けたあと、破裂した気球が付いたまま UAV は降下を始めることになるが、それらが機体に絡みついて制御不能となる可能性もある。バックアップの分離装置を取り付けてあるのはこのためである。バックアップの接続装置もやはり溶断方式であるが、気圧高度センサとマイコンにより、UAV 側の指定分離高度よりも高く分離高度を指定しておくことにより、UAV 側分離装置に不具合が生じても気球からの分離が可能となっている。

2.6. エアロゾル観測システム

エアロゾル観測装置として、光散乱粒子計数装置（OPC；Optical Particle Counter）とエアロゾルサンプラー（AAS；Airborne Aerosol Sampler）を搭載した。両者の外観および機体内の搭載位置を図 5 に、仕様を表 2 に示す。OPC と AAS いずれも気球観測用に開発された観測装置を、UAV の胴体に収められるように小型化したものである。これらの電源は、重量、電力容量、内部抵抗による電圧降下のバランスを考慮し、10 本直列の単 3 型 Li 電池の 2 並列を OPC と AAS に並列供給した。サンプルエアは、胴体側壁から垂直につきだした長さ 5 cm、外径 5.5 mm 内径 4.7 mm のステンレスパイプから OPC、AAS へそれぞれ独立に導入した（図 5）。側壁につきだしたサンプリングパイプには、流線型のカバーをかぶせて滑空時の空力抵抗の増加を防いだ。

OPC においては、光学チャンバー内に導入したサンプルエアに波長 780 nm の光を照射し

表 2 Optical Particle Counter と Airborne Aerosol Sampler の仕様。
Table 2. Specifications of optical particle counter and airborne aerosol sampler.

散乱式粒子計数装置 Optical Particle Counter (OPC) 山梨技術工房	寸法	109 x 92 x 150 mm
	重量	700 g
	光学系	側方散乱（光軸交角 90°, 集光半角 60°）
	計測法	散乱光パルス数積算法
	粒径区分	0.3, 0.4, 0.5, 0.66, 0.8, 1.2, 2.0, 3.6, 7.0, 11.4 μm
	流量	3 liter/min.
	積算時間	4 秒
2 段分級サンプラー Airborne Aerosol Sampler (AAS) ARIOS Co. Ltd.	寸法	80 x 105 x 130 mm
	重量	650 g
	分級方式	慣性衝突（2 段）
	50%Cut-off 径	1 段目 1.4 μm , 2 段目 0.25 μm
	採取サンプル数	各ステージ 16 サンプル
	流量	1.6 liter/min.
	動作ドリガー	気圧
	吸引時間	3 分/サンプル（自由設定）

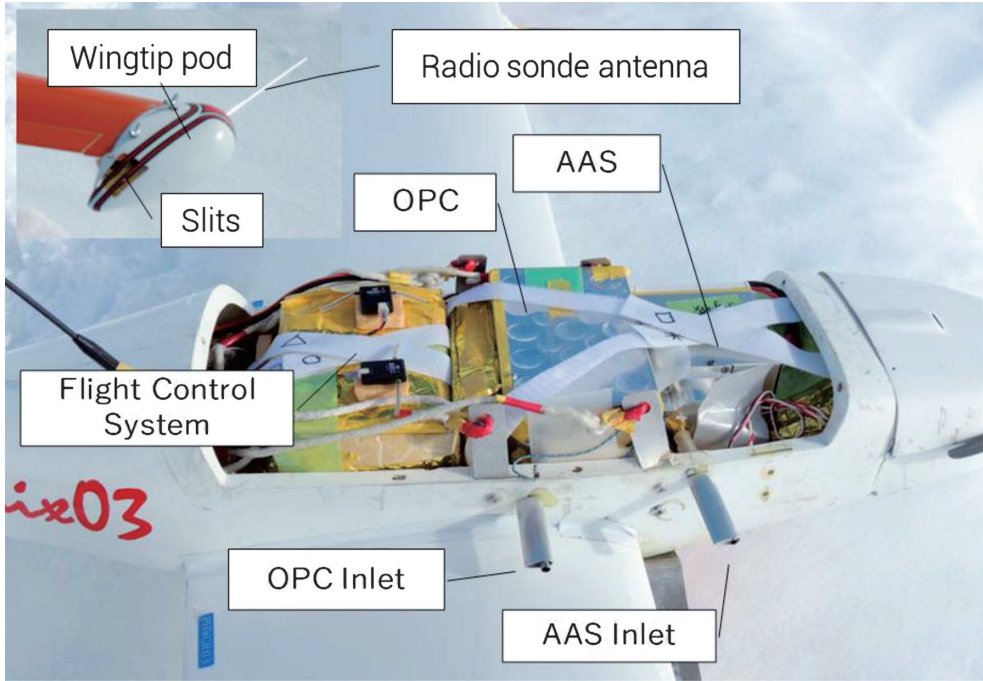


図 5 OPC および AAS の搭載状態。

Fig. 5. Mounted status of OPC and AAS.

て個々の粒子の散乱光パルスを含む時系列アナログ電圧出力を得る。電圧出力を 16 bit 高速 A/D 変換して得られたパルス波高値に対して、直径 $0.3\sim 10.4\ \mu\text{m}$ の 10 粒径に対応する電圧を閾値として粒径別の粒子数をカウントする。流量 $50\ \text{cm}^3/\text{s}$ で採取された空気中の 4 秒間の積算カウント数を基本データとする。気球による上昇中の上昇速度は $5\ \text{m/s}$ と計画しており、 $20\ \text{m}$ の空間分解能で粒子濃度の検出限界が $0.02\ \text{個}/\text{cm}^3$ である。4 秒積算による粒子計数における計測誤差 (1σ 値) は、 $0.5\ \text{個}/\text{cm}^3$ 、 $50\ \text{個}/\text{cm}^3$ の濃度に対して、それぞれ 10%、1% である。

エアロゾルの相状態や組成などのデータを得るための AAS は 2 段直列インパクトである。流量 $25\ \text{cm}^3/\text{s}$ で吸引し、1 段目で $2.0\ \mu\text{m}$ 以上、2 段目で $0.3\sim 2.0\ \mu\text{m}$ の粒子を採取する。採取時間は、1 サンプル当たり 3 分 ($4.5\ \text{l}$) とし、高度約 $900\ \text{m}$ の厚さの大気層からのサンプルを 1 枚のシート上に採取する。採取したサンプルは、シリカゲルで乾燥させたケース内に保管して、日本に持ち帰り、炭素蒸着後に個々の粒子の形態分析と原子番号 6 (炭素) 以上の元素組成分析を、それぞれ走査型電子顕微鏡 (SEM; FEI 製 Quanta 200 FEG) とエネルギー分散 X 線スペクトロメータ (EDS; EDAX 製 GENESIS 4000) で行った。

翼端ポッド内に気象ゾンデ (明星電気製 RS06G) を装着し (図 5 左上)、気温、湿度、緯度、経度、高度を計測する。気球による上昇中は、機体の機首が下方を向くため、上昇中のアン

テナ方向を考慮して翼端ポッドの前方に送信アンテナを突き出し、ポッド内部にセンサを設置した。翼端ポッド後部の気温・湿度センサの近くには、上昇中の空気の置換が速やかに行われるよう複数のスリットを空けた。気象ゾンデはシリアルインターフェースを介して OPC ゾンデの粒子データを、また 10 bit A/D コンバータを介してサンブラのポンプとステージの回転モータへの供給電圧を取得し、気温等の気象データとともに、400 MHz 搬送波の FM 変調により地上基地局に送信する。

3. 第 54 次南極地域観測隊夏期行動における観測フライト

3.1. 概要

第 54 次夏行動においては、予備を含む計 4 機の UAV と、10 フライト分の気球および He ボンベ 20 本を準備した。他のオペレーションとの兼ね合いや、天候および放球に適した地上風（5 m/s 以下）の条件を選んだ結果、気球からの分離高度を変えて計 6 回の観測フライトを試みた。放球直前に気球と UAV を接続するダイニーマロープが切断したため放球を断念した 1 回を除いて、計 5 回の観測フライトを実施できた。第 5 回目のフライトにおいては、当初目標であった観測・分離高度 10 km を達成し、回収に成功した。なお、UAV には着水対策が行われていないため、基本的に晴天のときのみフライトを実施した。後述するように、引き起こし直後の回収用パラシュート自動開傘により観測隊ヘリコプタによる回収を行った第 1 回のフライトのほかは、すべて自律帰還後に C ヘリコプタパッド沖の海水上でパラシュートによって回収した。また予備を含め同型機を 4 機準備したが、実際に使用したのは 1 機だけであった。

3.2. フライト手順

フライトの実施にあたっては、オーストラリア気象庁の南極地域の予報（BOM, 2020）および米国による南極メソスケール予報システム（UCAR, 2020）によって、地上および上空の風向・風速と雲量等の予想から予定日を数日前に決定した。万一、大陸氷床に着陸あるいは墜落してしまった場合、回収が困難となることが予想されたため、基本的に海水上空での浮揚および帰還経路が予想される風向のときのみフライトを予定することとした。予定日前日には、ワイオミング大学サイト内の気球軌跡予想（UWYO, 2020）も参考にして準備をすすめ、最終的には当日フライト直前の地上風向・風速と雲量によってフライトの可否を判断した。

UAV は組み立て式となっているため、一旦組み立てた機体は C ヘリコプタパッド近くの第二廃棄物保管庫を格納庫として利用し保管した。第 54 次南極観測隊においては、しらせが接岸を断念し、また水上輸送も不可能な状態であったため、ほぼ夏期全般にわたり昼間はヘリコプタオペレーションが実施された。このため、ヘリコプタオペレーションの終了した

夕方以降に、Cヘリコプタパッド上で準備を開始して約1~2時間後に放球した。気球からの分離高度によっておおむね放球から30分~1時間30分後にはCヘリコプタパッド上空に自律帰還したUAVを手動操縦に切り替え、Cヘリコプタパッド沖のタイドクラックやパドルを避けた海氷上に誘導したあと、パラシュートによって着陸させた。海氷上に着陸したUAVは2台のスノーモービル（1台はそり付き）に分乗した4名によって回収した。

UAV側および観測装置側のそれぞれにおいて、フライト前に確認すべきことが数十~百項目以上あるため、チェック漏れを防ぐためにチェックリストを利用した。いずれもフライト予定前日にも一度チェックを行っておき、さらに当日再度チェックすることで、時間を要する作業をフライト直前に行うことを避けた。また、UAVおよび観測装置の準備が終了する時刻に合わせてHeガスの充填が終了するよう、充填を開始した。これらにより、最終的には最少5名の人員により、1時間程度の準備時間で放球が可能となった。

3.3. 観測フライトの結果

図6に示すように、2013年1月4日（第1回、分離高度5km）、6日（第2回、分離高度5km）、18日（第3回、分離高度6km）、22日（第4回、分離高度8km）、30日（第5回、分離高度10km）の5日間で、1日それぞれ1回、計5回の観測フライトを実施し、最終的に高度10kmまでの観測と気球分離・回収に成功した。図6において白線は上昇経路を赤線は帰還経路を示している。5回の観測のうち、第1回については気球からの分離直後の急激な姿勢変化によると考えられるGPS受信器の捕捉衛星数の一時的な急激な低下により受信不良となり、予期せぬ緊急モード（パラシュート開傘）への遷移が生じた（Higashino, *et al.*, 2014）。第2回フライト以降では、これを防ぐようソフトウェアを変更し、すべて自律滑空帰還してCヘリパッド沖海氷上でのパラシュートによる回収に成功した。GPSの捕捉衛星数の一時的な減少はしばしば起きており、将来的にはこのGPSの受信不良対策として、推測航法（Dead Reckoning Navigation）の導入が必要である。

通常気球の上昇速度は約5m/sであるが、第5回フライトにおいては、高度約1900mから約3m/s~1m/sへの減少が見られた。気球のHeガス充填口は逆止弁付きのカプラ方式となっており、Heガス充填終了後に気球の口を紐で縛る必要がないようにしてある。気球の上昇速度は一旦低下したものの、その後はほぼ一定の上昇率であったことから、気球ゴムからのHe漏れであるとは考えにくく、カプラの逆止弁部分におけるHeガスの漏れによるものと考えられ、今後はカプラにキャップをつけるなどの対策が必要であると考えている。

3.4. 観測結果

表3にフライトの概要をまとめる。2回目（1月6日）のフライトでは、高度5000mで分離の後、滑空飛行を開始した4500mで、ラジオゾンデのデータの受信不良となった。その

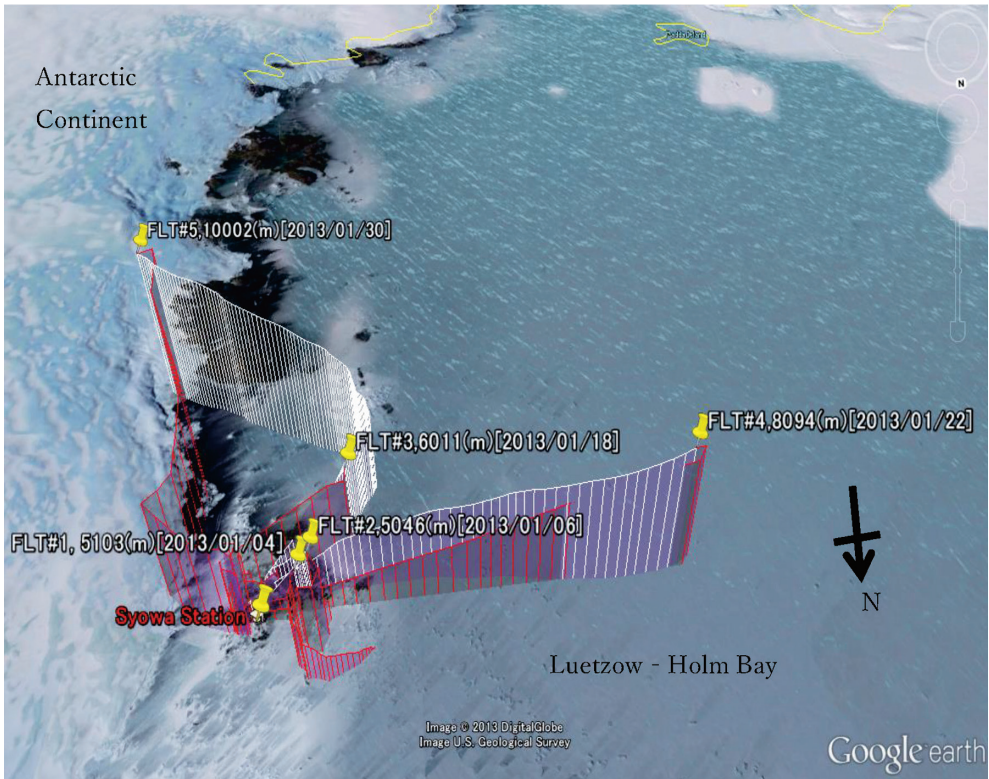


図 6 昭和基地における 5 回の観測フライトの上昇（白）および滑空軌跡（赤）.

Fig. 6. Climbing trajectories (white) and gliding trajectories (red) of five observation flights at Syowa Station.

表 3 各観測フライトのまとめ.
Table 3. Summary of observation flights.

観測日	放球時刻	気球分離高度	上昇速度	降下速度	備考
1月4日	15:30:02 LT	5 km	約 5 m/s	5~6 m/s	非常パラシュートで降下
1月6日	18:49:21 LT	5 km	約 5 m/s	3~6 m/s	降下中のゾンデデータなし
1月18日	17:00:24 LT	6 km	約 5 m/s	3~8 m/s	-
1月22日	17:01:04 LT	8 km	約 5 m/s	3~13 m/s	-
1月30日	17:02:52 LT	10 km	1~3 m/s	3~13 m/s	上昇速度が非常に遅い

他のフライトでは、気球上昇、滑空降下いずれの観測データも取得できた。なお、1回目（1月4日）のフライトはすでに述べたように、下降は滑空ではなくパラシュート降下によっている。

3.4.1. 上昇時のデータと下降時のデータの比較

a) 気温・湿度

5回目（1月30日）の無人航空機による気温・湿度と昭和基地における定常気象ゾンデ観測の気温、湿度を図7に示す。両者の観測時刻には約2時間の差があるが、無人航空機観測は南極夏季の大気の状態が比較的安定している時に実施したため、2時間程度では温度や湿度、特に温度の変化が大きくないことが期待できる。なお、上昇中と下降中の大気状態はある程度異なっているため、計測精度の絶対値の評価は困難であり、定性的な判断となる。図7の1月30日の滑空降下中（青色）は温度、湿度ともゾンデ観測（黒色）と比較的良好一致を示す一方、上昇中（赤色）は気象ゾンデ観測結果より、温度が高く湿度が低い。また、

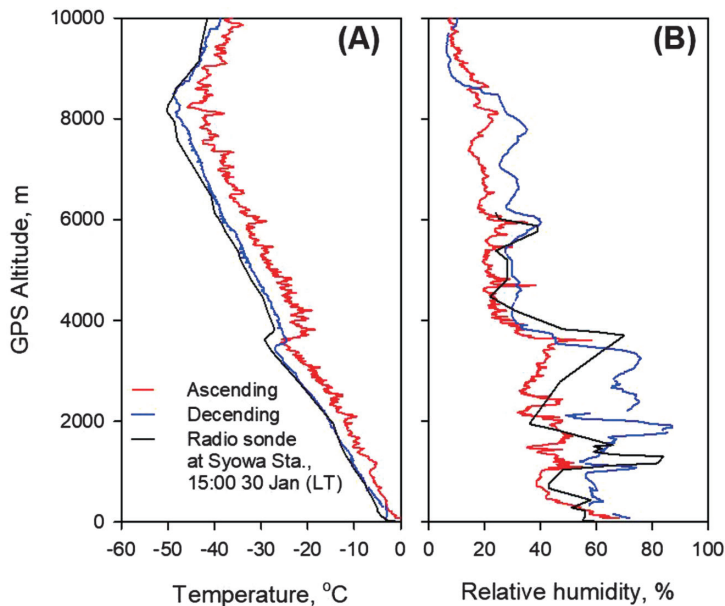


図7 2013年1月30日のUAVと定常高層ゾンデ観測（昭和基地）の温度（A）と相対湿度（B）の鉛直分布の比較

赤：気球による上昇中のUAV（上昇速度2~4 m/sec）による結果
 青：滑空による下降中のUAV（飛行速度約30 m/sec）による結果
 黒：定常気象観測

UAVおよび気象ゾンデの放球時刻は、それぞれ20:02 LTおよび15:00 LTであり約2時間の差がある。

Fig. 7. Vertical profiles of temperature (A) and humidity (B) obtained by UAV observation and routine balloon-borne meteorological observation at Syowa Station on 30th Jan. 2013

red: during balloon ascending of UAV (ascending speed : 4 m/sec)

blue: during gliding of UAV (gliding speed : 30 m/sec)

black: by a routine meteorological radio sonde operation

The difference between the launch time of the UAV (20:02 LT) and that of the meteorological sonde (15:00 LT) is around 2 hours.

上昇中は短い時間での変動に対応する高度方向の変動が大きい。上昇速度は、約 4 m/sec であり、センサ部周辺のポッドが日射により加熱され、周囲の大気より高温になったポッドに接した温度上昇とともに、湿度が低下した空気を計測していたと考えられる。滑空中（下降時）は、飛行速度が 30 m/s に近い高速になるため、ポッド表面温度が周囲の空気と熱平衡に近い状態になるとともに、温湿度センサに接する空気の置換も早く、ポッドによる加熱の影響をあまり受けないと考えられる。以上に基づき、温度・湿度データとしては滑空中の観測結果を使用する。観測中のデータがない 1, 2 回目については、上昇中のデータを参照する。

b) エアロゾル数濃度

上昇中と下降中の OPC の計測結果の一部を図 8 に示す。赤が上昇中、青が降下中のデータを示す。1 月 4 日は、気球上昇中とパラシュート降下中でよい一致を示した。一方、1 月 18 日、22 日、30 日の観測では、滑空中の特に高高度の粒径の大きな粒子の数濃度が、気球による上昇中の数濃度より低い傾向がある。空気の採取パイプは、採取空気の流線に対して直交するように設置し、流線を 90° 曲げて空気を採取している。粒径の大きな粒子の慣性が空気に対する抵抗よりも大きく、粒子が流線から外れて生じる採取損失が高高度、大粒径で顕著になる。滑空時の対気速度は約 30 m/s と大きく、直径 0.3 μm の粒子数濃度においても、上昇中の濃度より有意に低く粒子損失が起きていると考えられる。以上の検討に基づき、エアロゾル観測データとしては、気球による上昇中のデータのみを使用する。なお、滑空時における粒子の損失は、あらかじめ予想されていたため、エアロゾルの採取は上昇中に行った。

3.4.2. エアロゾルの分布と特徴

図 9 に 5 回の観測によって得られた粒径別粒子数濃度、気温、湿度の鉛直分布と粒子の採取高度を示す。図 9 中のエアロゾル鉛直分布に示されている黒横線はサンプリング開始高度を、数字はサンプル番号を示す。1 か月間に、高度分解能約 20 m で最高高度 10 km に至る自由対流圏を含むエアロゾル等の鉛直分布のデータを取得するとともに、高度分解能約 1 km のエアロゾルサンプルの回収に成功した。これらの結果は、本研究による無人航空機システム開発により、夏の極域対流圏から成層圏底部に至る大気エアロゾルの鉛直分布やエアロゾルサンプルを数日に 1 回の頻度で取得することができるようになったことを示している。

図 10 に示した 5 回のフライトで得られた 1 km ごとの単位質量空気に対する 0.3~1.2 μm の 4 つの粒径区分のエアロゾル数の混合比は、境界層と思われる地表付近では高濃度、自由対流圏では低濃度、成層圏と考えられる 1 月 30 日の高度 8 km 以上で高濃度という、1999 年から 2008 年の平均的な鉛直分布と共通の特徴を示している。それとともに、平均的には最も低濃度となる高度 1.5~7.5 km の自由対流圏において、境界層や成層圏の濃度と同程度の高濃度エアロゾルがしばしば観測されている（例えば、1 月 4 日高度 4.5 km, 1 月 6 日高度 4~4.5 km, 1 月 18 日高度 4 km, 1 月 22 日高度 2~7 km, 1 月 30 日高度 2~6 km など）。

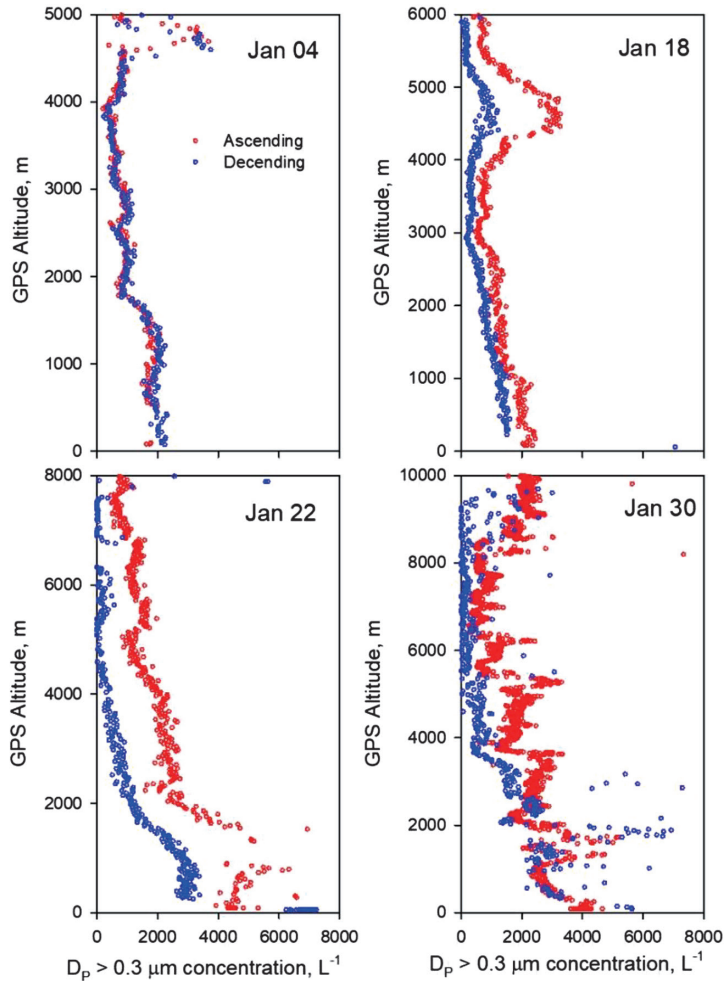


図 8 気球による上昇中（赤）と滑空による下降中（青）の $DP > 0.3 \mu\text{m}$ のエアロゾル数濃度鉛直分布観測結果。上昇速度と滑空速度は図 7 に同じ。

1 月 4 日の下降は、パラシュート降下（降下速度数 m/sec ）による。

Fig. 8. Vertical profiles of aerosol number concentration ($DP > 0.3 \mu\text{m}$) during ascent and descent. Ascending speed and gliding speed are similar to the listed values in Figure 7. The descent on January 4th was controlled using a parachute with a descending speed of several m/sec .

図 11 には、全 10 計測粒径区分を用いた 1 km ごとの粒径 $0.3 \sim 11.4 \mu\text{m}$ までの粒径分布を示す。図 10 に見られた高濃度エアロゾル層では、図 11 において高度 $4.5 \sim 5.5\text{ km}$ で 5 回すべての観測においてに見られるように、主に大気中で粒子化した 2 次粒子からなると考えられる直径 $1.0 \mu\text{m}$ 以下の粒子を含む、直径 $0.3 \sim 3.0 \mu\text{m}$ にわたる粒径で濃度がともに高い場合が多かった。また、高度 $4.5 \sim 5.5\text{ km}$ をはじめとする自由対流圏で濃度が増大している領域の粒径に対する $dN/d\log D_p$ の傾きは、高度 $0 \sim 0.5\text{ km}$ の傾きよりも大きく、高度 $8.5 \sim 10\text{ km}$ の傾

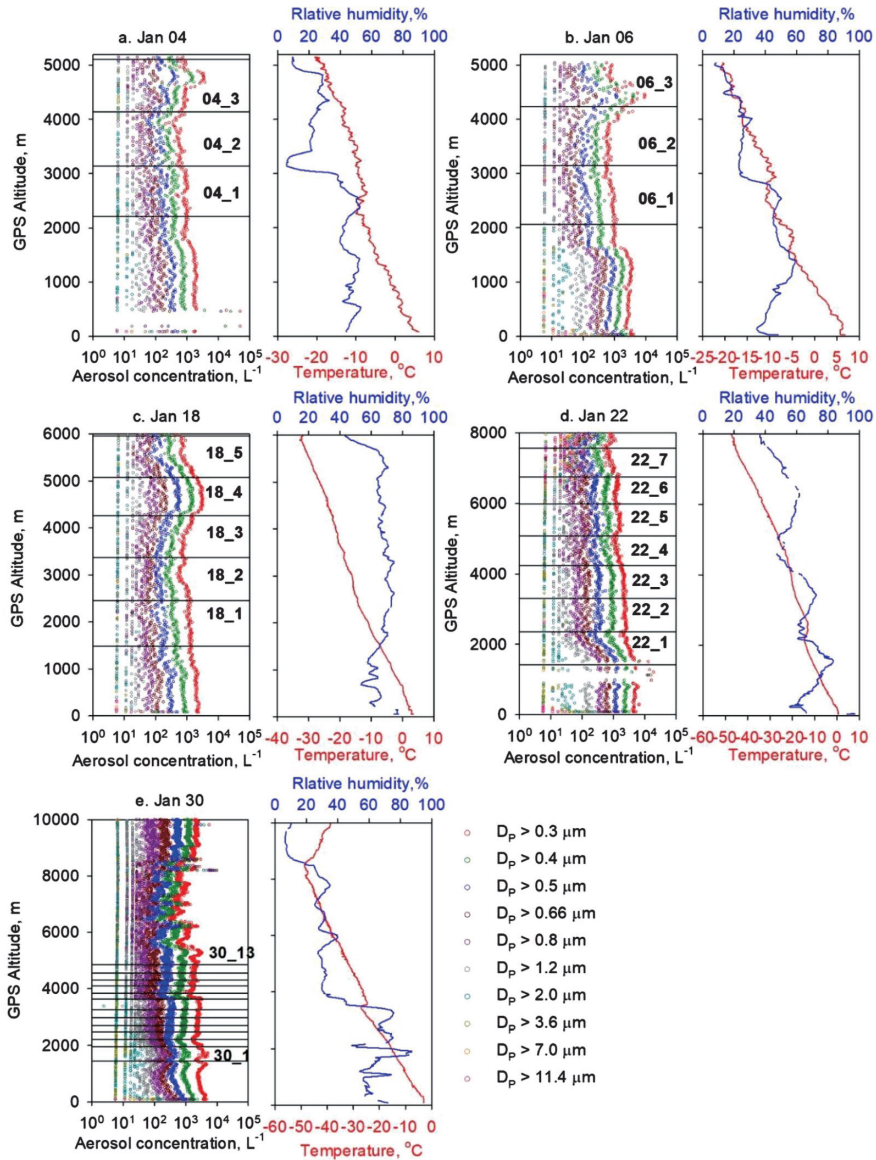


図 9 2013 年 1 月に 5 回の UAV 観測によって得られた昭和基地上空のエアロゾル数濃度と温度、湿度の鉛直分布。

黒線と dd_n (日付_番号): エアロゾルサンプルの採取高度域とサンプル ID.

1月30日 高度 8 km 付近に圏界面が認められる。

Fig. 9. Vertical profiles of aerosol number concentration, temperature, and humidity over Syowa Station observed by 5 UAV flights on 4th, 6th, 18th, 22th, and 30th in January.

Black bar and dd_n: aerosol sampling region and sample ID

Tropopause was identified only for Jan 30th flight, around 8 km in altitude.

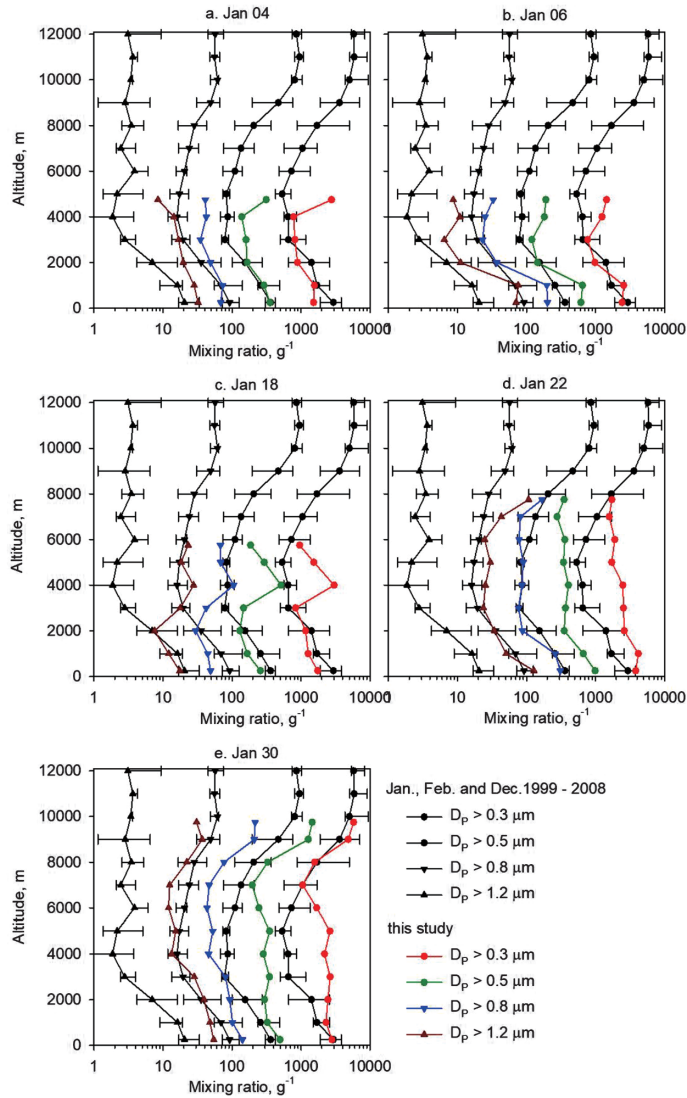


図 10 積算エアロゾル数混合比（単位質量の対するエアロゾル数： g^{-1} ）の鉛直分布。

色印：本研究による高度 1 km ごとの混合比の中央値

黒印：1999 年から 2008 年の 12 月、1 月、2 月に昭和基地において実施された気球搭載 OPC による 12 回の観測（木津ほか、2010）における高度間隔 1 km ごとの混合比（約 600 データ）の中央値（シンボル）、25% 値と 75% 値（誤差棒）（梅本、2012）

Fig. 10. Vertical profiles of integrated aerosol number mixing ratio (aerosol number per unit mass of air: g^{-1}).

color symbol: median value for every 1 km altitude by this study

black: median (symbol) and 25%, 75% values (error bar) for every 1 km altitude of 12 balloon-borne OPC observations in December, January, and February from 1999 to 2008 at Syowa Station (Kizu et al. 2010 and Umenoto et al. 2012)

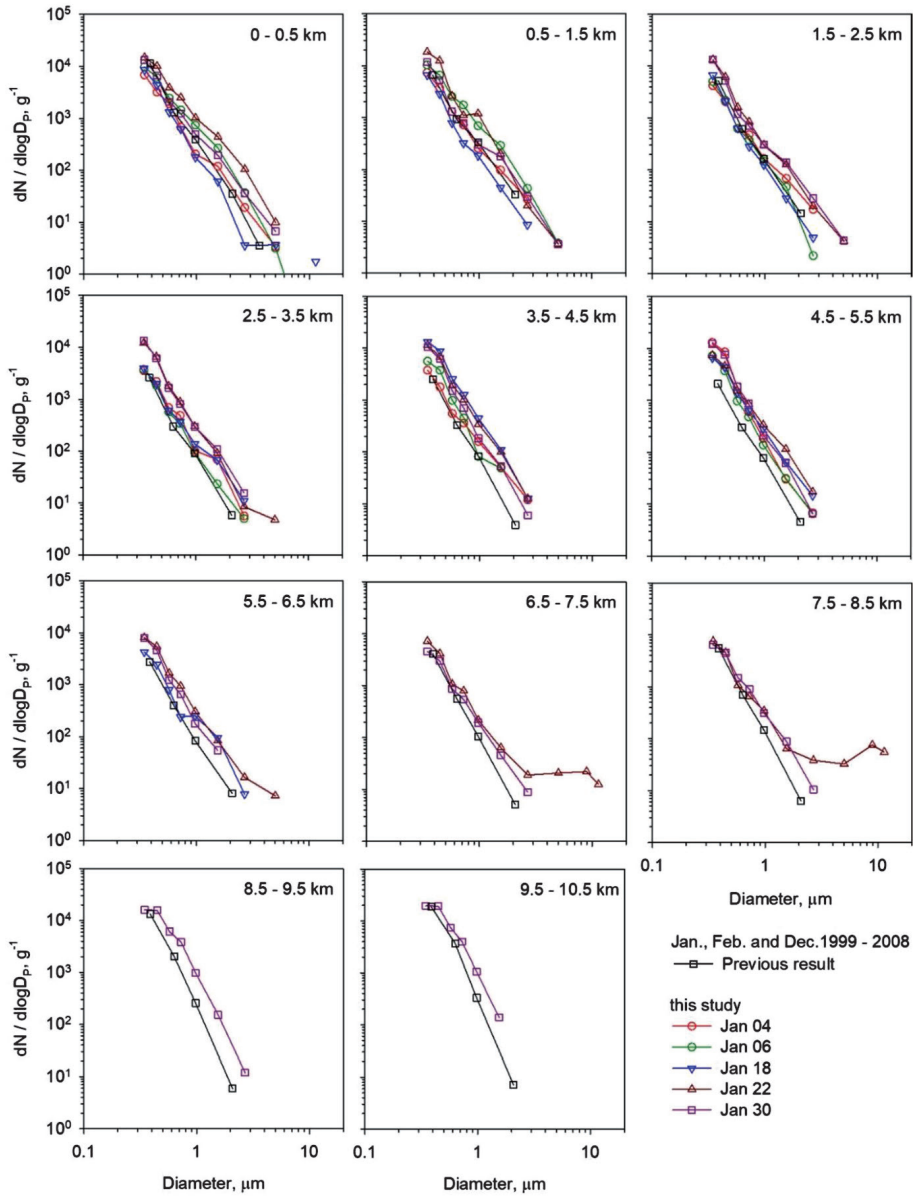


図 11 高度 1 km ごとの直径 $0.3 \sim 11.4 \mu\text{m}$ のエアロゾル数混合比 (g^{-1}) の粒径分布. 記号は図 10 と同じ. ただし, 25% 値 75% 値は示していない. 1 月 22 日の高度 $6.5 \sim 8.0 \text{ km}$ にみられる直径 $2 \mu\text{m}$ 以上の粒子は氷晶と考えられる.

Fig. 11. Size distribution, between 0.3 and $11.4 \mu\text{m}$ in diameter, of aerosol number mixing ratio (g^{-1}) as the median for every 1 km in altitude. Symbols are the same as in Figure 10, but no error bars for 25% and 75% value. Particles larger than $2.0 \mu\text{m}$ detected between 6.5 and 8.0 km on Jan. 22nd may be ice crystals.

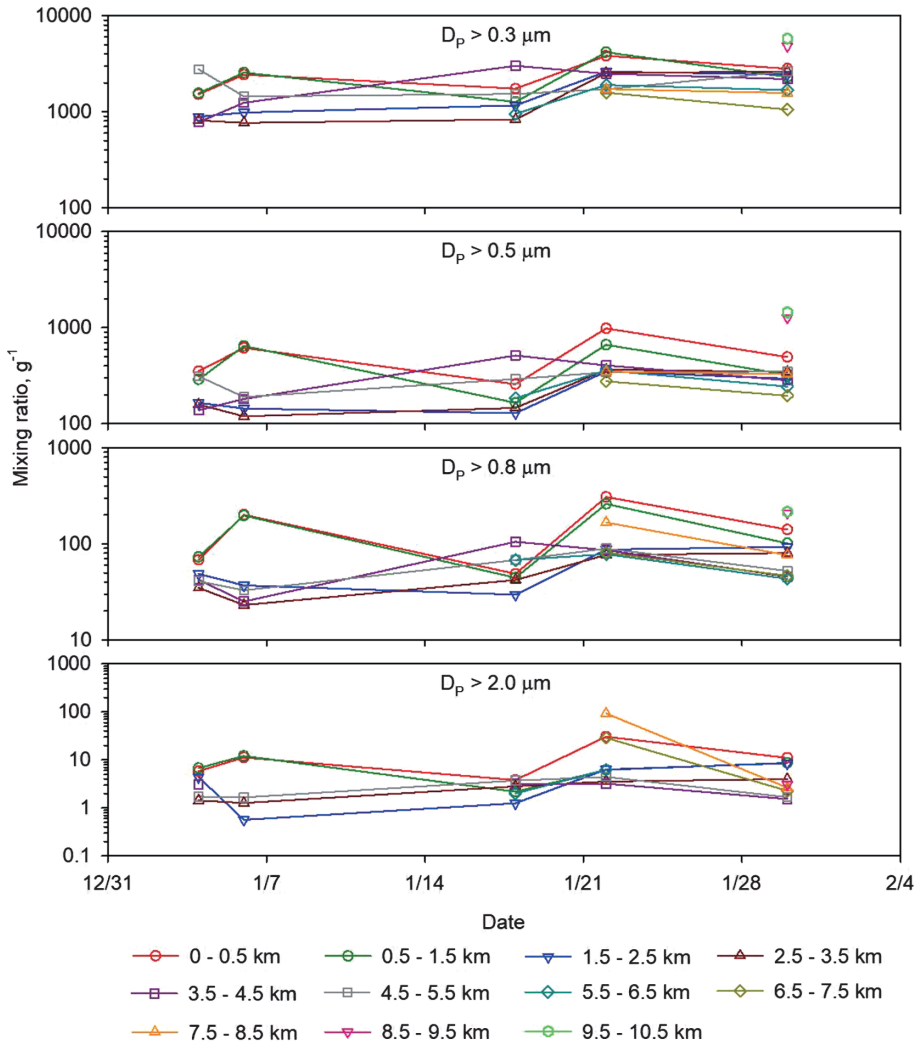


図 12 図 10 から得られた 1km ごとの積算エアロゾル数混合比 (g-1) の時系列変化.

Fig. 12. Time history of integrated aerosol number mixing ratio (g-1) as the median for every 1km in altitude.

きに近かった. このことは, 自由対流圏の濃度が増大したエアロゾル層が, 境界層ではなく成層圏のエアロゾルの特徴を反映している可能性を示唆している. 図 12 の高度ごとの混合比の時系列は, 1 月 18 日以前は高度 4~5 km 付近で高濃度層が時々出現したこと, また, 1 月後半は自由対流圏全体が高濃度の状態になっていたことを示している.

1 月 18 日のフライトの高度 4.3~5.1 km と高度 3.5~4.3 km で採取された代表的なエアロゾルの形態 (図 13) を見ると, 高濃度層の粒子の形態は, 1984 年に大陸上みずほ基地などで採取されたもの (Yamato *et al.*, 1987, Hara *et al.*, 2014) とよく似ている. 典型的な中和さ

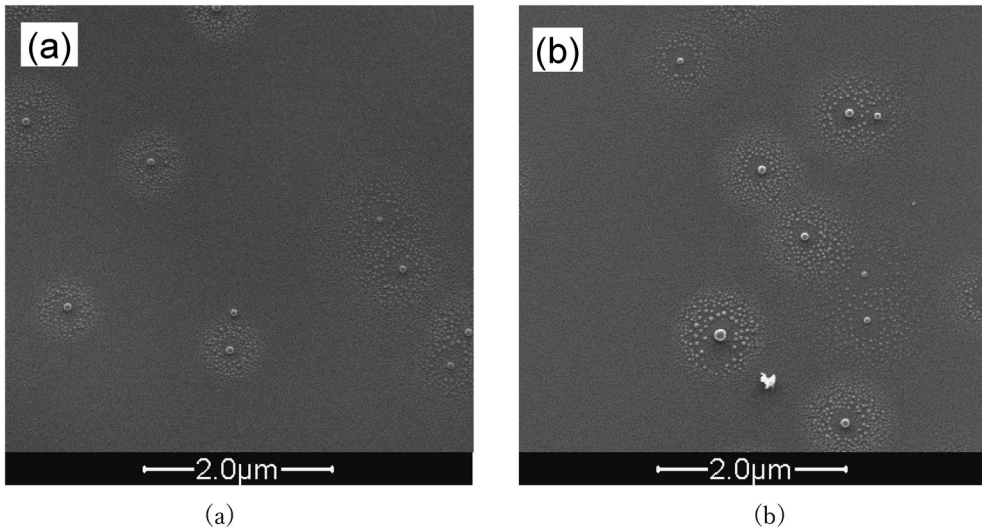


図 13 2013 年 1 月 18 日に昭和基地上空で得られたエアロゾル粒子の走査電子顕微鏡画像。エアロゾルは撥水性のあるカーボンの真空蒸着を施したコロジオン膜上に採取され、走査型電子顕微鏡で観察した。ほとんどの粒子が、硫酸エアロゾルに特徴的なサテライト構造を示した。

(a) 高度 3.5~4.3 km (b) 高度 4.3~5.1 km.

Fig. 13. SEM images of aerosol particle collected on collodion film coated with carbon, over Syowa Station on 18th Jan. 2013.

Aerosols were collected on the surface of collodion film coated with carbon and analyzed by Scanning Electron Microscope. Most particles show a "satellite" pattern, indicating the composition of sulfuric acid.

(a) 3.5 to 4.3 [km] in altitude (b) 4.3 to 5.1 [km] in altitude.

れていない硫酸粒子に特徴的なサテライト構造を示している。一方、1982 年の ElChichon の噴火の影響が強く残っていた 1983 年の昭和基地上空、高度 5 km の成層圏底部で有人航空機により採取された粒子も同様のサテライト構造を示していた (Iwasaka *et al.*, 1985)。また、Iwasaka ら (1985) は、噴火後 8 カ月の 1983 年 1 月の高度 8 km で火山灰粒子を採取しているが、今回の観測では自由対流圏および成層圏において火山を起源とする鉱物粒子は見られなかった。

エアロゾル濃度における増大は 1 月 30 日の高度 8.5~10.5 km の成層圏底部でも見られた (図 10, 図 11)。本研究における観測の約 1 年半前の 2011 年 6 月にチリの Puyehue-Cordón Caulle (40° 35' 25" S, 72° 07' 02" W, 2236 m a.s.l.) が噴火し、その噴煙が高度 14 km まで達し (NASA, 2011)、成層圏に 200 キロトンの SO₂ が注入された (Hopfner *et al.*, 2015, Smithsonian Institution, 2013) とされている。この噴火が、2013 年 1 月の南極の成層圏底部および自由対流圏に硫酸エアロゾルの増大をもたらしていた可能性がある。図 10 に見られるように 1 月 30 日の成層圏底部の混合比は、1 月中の対流圏の混合比より高い。南極成層圏底部を經由し

て対流圏に火山起源のエアロゾルが輸送された可能性がある。

4. おわりに

エアロゾルの数濃度観測およびサンプリングにおいて、手軽さや到達高度の点で係留気球や有人航空機と比較して有利なゴム気球の特徴を生かしつつ、通常のゴム気球では困難な観測装置やサンプルの回収のために開発した、気球と自律滑空型 UAV との組み合わせによる新たなエアロゾル観測システムについて述べた。また、本システムにより第 54 次南極地域観測隊夏行動において 2013 年 1 月の昭和基地において実施した高度 10 km までの 5 回の観測フライトについて、特に運用面における詳細と飛行結果を示し、本システムが成層圏底部までの観測装置や大気サンプルの回収、繰り返し使用が可能な安定した観測システムとして運用できることを示した。

この観測により、境界層、自由対流圏、成層圏最下層の直径 $0.3\sim 10\ \mu\text{m}$ のエアロゾルの濃度と組成の分布が得られた。これらの結果を 1999 年から 2008 年の 12 月から 2 月に昭和基地において実施された 12 回の気球観測によるエアロゾル粒径分布とも比較し以下の知見を得た。

- ① 2013 年 1 月の前半には硫酸を主成分とする $0.3\sim 3\ \mu\text{m}$ の粒径域にわたるエアロゾル高濃度層が自由対流圏に部分的に見られた。類似の高濃度エアロゾル濃度の増大は、1 月後半には自由対流圏全体で見られた。
- ② この高濃度エアロゾルは、中緯度における高度 10 km 以上に及ぶ中規模の火山噴火によって増大した成層圏エアロゾルが対流圏に流入した結果としてもたらされたものである可能性が高い。

これらの結果は、新たに開発した気球浮揚無人航空機システムが自由対流圏のエアロゾル変動の直接観測とその変動機構の解明に有効であることを示すものでもある。

謝 辞

昭和基地における観測フライトにあたっては、第 54 次南極地域観測隊員、第 53 次南極地域観測隊越冬隊員および砕氷船しらせの支援を得た。UAV のアピオニクス等の製作には九州大学の松原技術職員、永安技術職員、金城技術職員、平川技術職員の協力を得た。UAV の製作には X-Treme Composite Thailand の Rattanarrom 氏の協力を得た。国内の飛行実験には九州大学および福岡大学の学生諸君の協力を得た。また熊本県産山村フライングハイスカイスポーツクラブの山下氏、熊本県阿蘇観光牧場の井野氏、北海道美深町松山農場の柳生氏には飛行場の使用に関して協力を得た。また国内実験の空域使用の調整にあたっては、航空局および航空自衛隊の協力を得た。エアロゾルサンプリングメッシュの準備は、福岡大学理学部原圭一郎助教の協力を得た。深く感謝の意を表する次第である。なお、この研究は国立極

地研究所の観測プログラム AP11, AP14, 科研費 (23651019, 24403001) によって行われた。

文 献

- BAS (2008): Unmanned aerial vehicles mark robotic first for British Antarctic Survey. British Antarctic Survey. 2008-3-18, <https://www.bas.ac.uk/media-post/unmanned-aerial-vehicles-mark-robotic-first-for-british-antarctic-survey>, (accessed 2020-3-26).
- BOM (2020): Interactive Weather and Wave Forecast Maps: Australian Government Bureau of Meteorology, Southern Hemisphere. Updated every day. <http://www.bom.gov.au/australia/charts/viewer/index.shtml?type=mslp-precip&tz=AEDT&area=SH&model=G> (accessed 2020-3-26).
- Funaki, M., Higashino, S., Sakanaka, S., Iwata, N., Nakamura, N., Hirasawa, N., Obara, N. and Kuwabara, M. (2014): Small unmanned aerial vehicles for aeromagnetic surveys and their flights in the South Shetland Islands, Antarctica. *Polar Science*, **8**, 342–356.
- Hara, K., Iwasaka, Y., Wada, M., Ihara, T., Shibata, H., Osada, K. and Yamanouchi, T. (2006): Aerosol constituents and their spatial distribution in the free troposphere of coastal Antarctic regions. *J. Geophys. Res.*, **111**, D15216, doi: 10.1029/2005JD006591.
- 原 圭一郎, 長田和雄, 西田千春, 山内 恭, 林 政彦 (2010): 南極対流圏のエアロゾル鉛直分布とその季節変化. *南極資料*, **54**, 731–759, doi: 10.15094/00009582.
- Hara, K., Osada, K. and Yamanouchi, T. (2013): Tethered balloon-borne aerosol measurements: seasonal and vertical variations of aerosol constituents over Syowa Station, Antarctica. *Atmos. Chem. Phys.* **13**, 9119–9139, doi: 10.5194/acp-13-9119-2013.
- Hara, K., Hayashi, M., Yabuki, M., Shiobara, M. and Nishita-Hara, C. (2014): Simultaneous aerosol measurements of unusual aerosol enhancement in troposphere over Syowa Station, Antarctica. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 4169–4183, doi: 10.5194/acp-14-4169-2014.
- Higashino, S. (2006): Development of an UAV Flight Control Module for the Operation in Antarctica, Proc. the 5th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science, CD-ROM.
- Higashino, S., Funaki, M., Hirasawa, N., Hayashi, M., and Nagasaki, S. (2013): Development and Operational Experiences of UAVs for Scientific Research in Antarctica. *Autonomous Control Systems and Vehicles - International Series on Intelligent Systems, Control and Automation : Science and Engineering*, Springer, **65**, 159–173, doi: 10.1007/978-4-431-54276-6_11.
- Higashino, S., Hayashi, M., Nagasaki, S., Umemoto, S. and Nishimura, M. (2014): A Balloon-Assisted Gliding UAV for Aerosol Observation in Antarctica. *Aerospace Technology Japan*, **12**, a35–a41, doi: 10.2322/tastj.12.a35.
- Höpfner, M., Boone, C. D., Funke, B., Glatthor, N., Grabowski, U., Günther, A., Kellmann, S., Kiefer, M., Linden, A., Lossow, S., Pumphrey, H. C., Read, W. G., Roiger, A., Stiller, G., Schlager, H., von Clarmann, T. and Wissmüller, K. (2015): Sulfur dioxide (SO₂) from MIPAS in the upper troposphere and lower stratosphere 2002–2012. *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 7017–7037, doi: 10.5194/acp-15-7017-2015.
- Ito, T., Morita, Y. and Iwasaka, Y. (1986): Balloon observation of aerosols in the antarctic troposphere and stratosphere. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, **38**, 214–222, doi: 10.3402/tellusb.v38i3-4.15130.
- Iwasaka, Y., Okada, K. and Ono, A. (1985): Individual aerosol particles in the Antarctic upper troposphere. *Mem. Natl. Polar Res, Special Issue* **39**, 17–29.
- 河野道紀, 小材匠太郎, 東野伸一郎 (2007): シンプルなアビオニクスを用いた自律 UAV の開発と飛行実験. 日本航空宇宙学会第 45 回飛行機シンポジウム講演集 CD-ROM.
- 木津暢彦, 林 政彦, 山内 恭, 岩坂泰信, 渡辺征春 (2010): エアロゾルゾンデによる南極昭和基地上空の成層圏・対流圏エアロゾル濃度の季節・経年変化の観測. *南極資料*, **54**, 760–778, doi: 10.15094/00009583.
- NASA (2011): Puyehue-Cordón Caulle: NASA earth observatory, NASA, 2011-6-4. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/50862/puyehue-cordon-caulle> (accessed 2020-3-26).
- Smithsonian Institution (2013): Puyehue-Cordón Caulle: Smithsonian Institution Global Volcanism Program, 2013 –9. <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=357150> (accessed 2020-3-26).
- Spieß, T., Bange, J., Buschmann, M. and Vörsmann, P. (2007): First application of the meteorological Mini-UAV 'M2AV'. *Meteorol. Z.*, **16**, 159–169, doi: 10.1127/0941-2948/2007/0195.
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and

- Midgley, P.M. (2013): IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, Cambridge University Press, 1535 p.
- UCAR (2020): The Antarctic Mesoscale Prediction System: University corporation for atmospheric research. Updated every day. <https://www2.mmm.ucar.edu/rt/amps/> (accessed 2020-3-26).
- 梅本紫衣奈, 林 政彦, 原 圭一郎, 東野伸一郎 (2012): 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29回エアロゾル科学・技術研究討論会, 北九州, Aug. 28–30, YP12.
- UWYO (2020): Upper Air Data, Balloon Trajectory Forecasts: University of Wyoming. Updated every day. http://weather.uwyo.edu/upperair/balloon_traj.html (accessed 2020-3-26).
- 和田 誠, 猪原 哲, 芝 治也 (2001): 第41次南極地域観測隊航空機大気観測報告2000–2001. 南極資料, **45**, 257–278, doi: 10.15094/00009168.
- 山内 恭 (2010): 「極域大気・物質循環研究」の系譜. 南極資料, **54**, 245–273, doi: 10.15094/00009557.
- Yamanouchi, T., Wada, M., Fukatsu, T., Hayashi, M., Osada, K., Nagatani, M., Nakada, A. and Iwasaka, Y. (1999): Airborne observation of water vapor and aerosols along Mizuho route, Antarctica. *Polar Meteorol. Glaciol.*, **13**, 22–37.
- Yamato, M., Iwasaka, Y., Ono, A. and Yoshida, M. (1987): On the sulfate particles in the submicron size range collected at Mizuho Station and in East Queen Maud Land, Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **1**, 82–90.