

ゴム気球を用いた極域、熱帯域での大気エアロゾル観測

林政彦¹、平沢尚彦²、東野伸一郎³、白石浩一¹、柴田隆⁴

¹福岡大学、²国立極地研究所、³九州大学、⁴名古屋大学

1. はじめに

大気中には、気体成分のみならず粒子状の物質が浮遊しており、「エアロゾル」と呼ばれている。地球大気においては、地表面に接する境界層と下部成層圏が特にエアロゾル濃度が高い領域となっている。下部成層圏のエアロゾル高濃度領域は全球を連続的に覆うエアロゾル層をなしており、その主成分は硫酸である。成層圏エアロゾル層は圏界面から熱帯では高度約 35km まで、極域では高度約 30km に存在する。成層圏のエアロゾル層は、極域では、冬季に量的な短い時間スケールの増大を起こす。これは、低温化に伴い、硫酸エアロゾルに硝酸が凝縮し、硫酸/消散/水系の 3 成分過冷却液滴を形成したり、硝酸 3 水和物や氷が析出して固体粒子となることによるものであり、オゾンホール形成のキーププロセスとなっている。このような成層圏エアロゾルには一定の割合で不揮発成分が含まれている。不揮発成分の一部は宇宙塵であると考えられる。このようなエアロゾル層の形成・維持機構を理解するためには、エアロゾル層の上下を含む領域の観測が重要であり、この領域の観測に最も適しているのが、気球である。ここでは、気球によるエアロゾル層観測の歴史を概観するとともに、著者らが取り組む最新のエアロゾル観測におけるゴム気球周辺の課題等について紹介を行う。

2. ゴム気球によるエアロゾル観測

比較的軽量のエアロゾル観測装置は、光の散乱を利用した粒子計数装置であり、1980 年代から気球搭載により成層圏エアロゾルの観測に利用されてきた。軽量とはいえ、その重量は、20kg 程度になるために、エアロゾル層上端の高度 30~35km までの観測をゴム気球で行うことは困難であった。そのため、日本では、南極地域観測隊により、2kg 気球や 3kg 気球を 2 連あるいは 3 連で使用してきた。当時の光散乱粒子計数装置の重量が大きくなっていった原因は、光源として使用するハロゲンランプの電力供給のためのバッテリーの重量にあった。1990 年代から半導体素子等の進歩に伴って様々な装置が小型化してきた。エアロゾル計数装置も例外ではなく、光源として

半導体レーザーを用い、電源としてリチウム電離を用いるなどして、小型・軽量化し、現在では、同等以上の性能のカウンター（山梨技術工房製作）が、重量 1kg 以下で構成されている。

装置の小型化は、多くの可能性を生んだ。一つは、気球の小型化によって放球作業負担が軽減し観測が広がる可能性が出てきた。第二に、2 台のカウンターを搭載して一方のサンプルエアを加熱するデニューダカウンタとすることで揮発特性を得るという観測の高機能化が可能となった。第 3 に無人航空機への搭載など機器回収の可能性が高くなったということである。このような可能性の広がりには、無人航空機の技術進歩によるところが大きいのが、成層圏高度のサンプル回収の道も大きく開かれることになった。

3. ゴム気球による成層圏エアロゾル観測

2000 年台には、0.3 μ m 以上の数濃度を計測する典型的なエアロゾル計数装置（OPC）の重量は 4kg 程度となり、高度 30km までの観測に 3kg 気球一つでの放球が可能となった。その後、2010 年には上述の 1kg 程度の OPC が開発され、2kg 気球で高度 30km までの観測が可能となった。

同時に、林らは、上述のデニューダ OPC と通常の OPC を組み合わせた Dual-OPC を 5kg 程度で構成し、熱帯対流圏界面層（TTL）、成層圏エアロゾル、北極成層圏エアロゾルの揮発特性などの観測に用いている。この場合、ペイロード重量 5kg に対し最高到達高度は 32km 程度となっている。かつての 4kg 程度の OPC の観測経験からも 3kg 気球の 5kg 級のペイロードの飛揚可能高度は 32km 程度と考えられる。

また、インドネシア Biak では、6kg 程度の重量のエアロゾルサンプリングゾンドの飛揚にも 3kg 気球を用い、後述するカッターを使用して高度 23km、25km で切り離し回収するという実験も行われている。

4. 気球浮揚滑空無人航空機システム

OPC やサンプラーの小型・軽量化とともに、小型無人航空機に搭載してエアロゾルの観測をすることも現実に行われるようになってきている。著者らのグループでは、2007 年ごろから小型無人機

をゴム気球で上空に飛揚して気球を分離、自動操縦により放球基地まで帰還させるシステムの開発に取り組んできた。Fig.1 は、2008 年 11 月に行った自動操縦カイトプレーンの放球時の様子である。観測装置としては、OPC あるいはサンプラーのどちらかを搭載し、1000g 気球で飛揚し、高度 2km でテレメトリにより分離、帰還させた。午前中に 2 回の観測に成功し、観測の容易さを実証した。



Fig.1 虹ノ松原における気球浮揚電動無人機実験 (2008 年 11 月 14 日)

カイトプレーンは、飛行速度が遅い(12m/sec 程度) ために、自由対流圏などの高高度の観測を行うためには、風が弱くなければならないという非常に制限された条件下でのみ観測が可能である。

無人機として、滑空機を用いることで成層圏高度までの観測を実現しようと試みてきた。

4.1 要求仕様とシステム

できるだけ機動性を持たせるために、観測項目を絞り、0.3-10um のエアロゾル粒径分布を得るための光散乱粒子計数装置とサンプル回収のために 2 段インパクタ、および、温度を得るための気象ゾンデを搭載した。気象ゾンデは、観測データのダウンリンクも兼ねる。ペイロード重量としては、2kg を目標として、小型・軽量化をおこなない、機体重量としても 11kg に抑えている (Table 1)。この機体は、一時的な動力としての電動モータを備えたモータグライダーである。

この滑空機を用いた高度 10km までの観測を第 54 次南極地域観測隊により、2013 年 1 月南極昭和基地において実施した。この時は、上限高度を 12km 程度と設定したために、比較的小型の 1.5kg 気球を用いた。使用ガス量は、7m³ ボンベおよそ 2 本であった。

この時の観測では、気球に無人機を直接吊るして、機体の自動操縦装置からの指令でロープをカットして気球を分離するシーケンスをとった。2013 年 1 月 30 日のフライトで、高度 10 km ま

Wing span	2.9[m]
Total weight	10.0[kg]
Payload weight	2.0[kg]
Wing area	0.68[m ²]
Maximum L/D ratio	20
Maximum airspeed	40[m/s EAS]
Power plant	Electric motor
Powered flight time	5[minutes]

でのサンプリングとエアロゾル濃度観測に成功した。

Table 1 エアロゾルサンプラー及び OPC を搭載した滑空無人機仕様

2013 年以降、高度 30km までの観測を実現するために、フライトシーケンスは、Fig.2 の様に計画したフライト実験を進めたい。自律 GPS ナビゲーションシステムを搭載した小型モータグライダーに観測装置を搭載し、3kg ゴム気球により、成層圏 (目標高度 30km) まで飛揚する。目標高度で気球を切り離し、パラシュートにより滑空飛行可能な高度まで降下させる。

滑空飛行が可能な高度 (現在 12km) まで降下したら、パラシュートを切り離し地上基地に向けて自律滑空飛行を行う。地上基地周辺に達したら高度を徐々に下げ、地表近くまで降下させたのち、着地用パラシュートを開傘し、着陸させる。

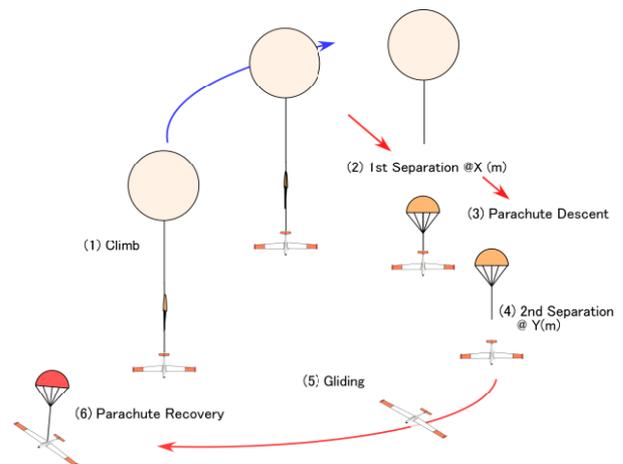


Fig.2-1 気球浮揚滑空規律無人機システムフライトシーケンス

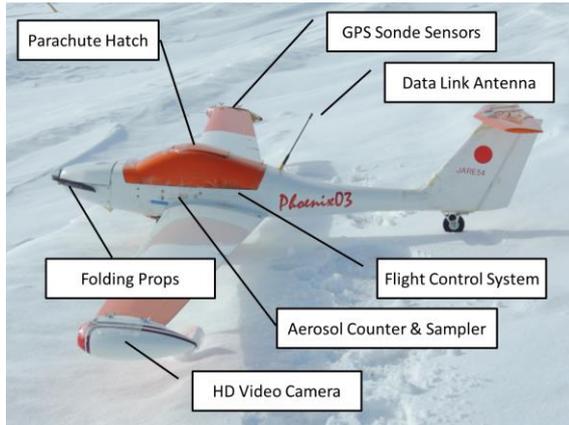


Fig. 2-2 使用している無人航空機

4.2 結果と考察

Figure 3に2015年1月24日に第56次日本南極地域観測隊により南極において実施した観測フライトパスを示す。また、その際に得られたエアロゾル鉛直分布をFig.4に示す。23kmという観測最高高度は、ER2 (NASA) の観測高度20kmを越え、現時点での航空機による観測の最高高度である。

観測としては、成層圏エアロゾル層中層までの観測に成功しているが、目標高度である30kmには達していない。最大の要因は、10kgのペイロードを搭載した場合に、7m³ボンベ約3本のガスを充てんしなければならず、様々な側面で気球への負荷が大きくなり、低高度でバーストしてしまうことになる。

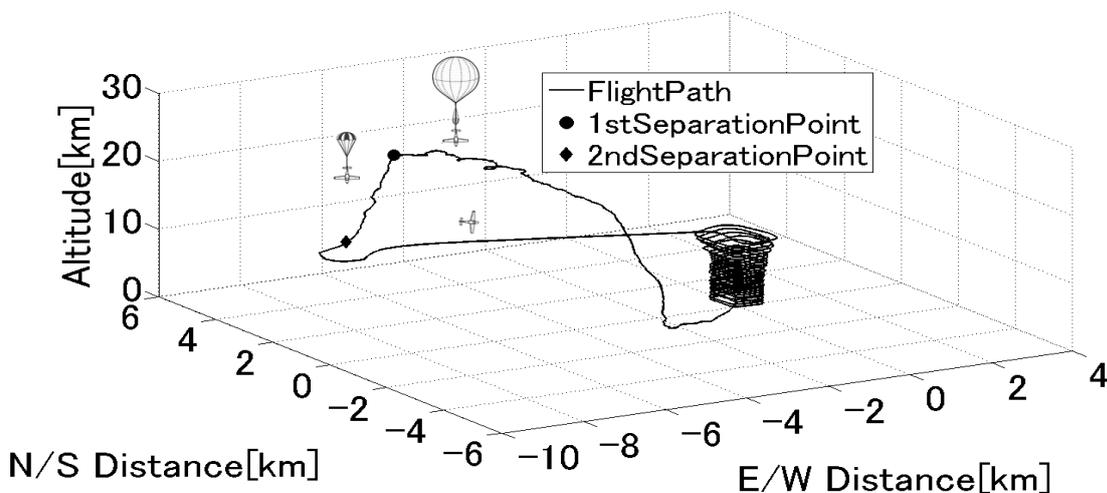


Fig.3 2015年1月24日 南極大陸上 S17 から放球し高度23kmまでの観測に成功した際のフライトパス

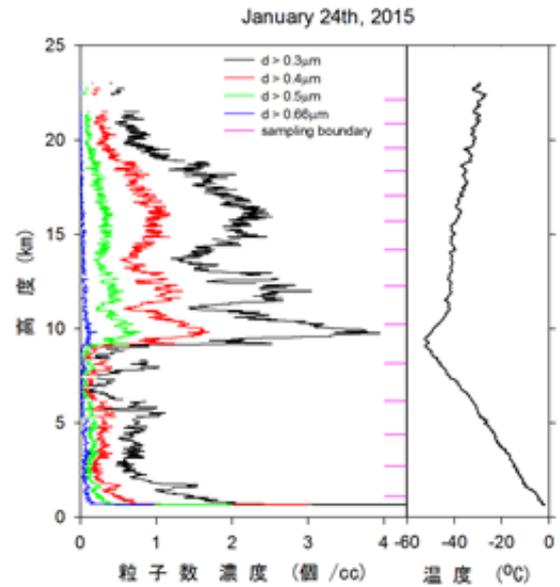


Fig. 4 2015年1月24日南極大陸上拠点S17上空のエアロゾル鉛直分布及び気温分布。

4.3 改善事項

以下、本システムを構成する各ユニットの必要な改善事項と改善状況を列挙する。

a) UAV

より高高度からの滑空飛行を可能とし、帰還可能条件の制約を小さくする。実験としては、飛行制御の安定性を確認しながらパラシュート分離高度を徐々に上げてゆく。

また、現在の沈下速度がゆっくりであり、迅速な回収を必要とする場合に対応が困難であるために、フラップを装着し、その試験を行うこととしている。

b) 気球

3kg 気球での 10kg ペイロードのバースト高度を実験によって確認したところ、最高到達高度が 29.5km で安定的に 30km を越えるのは困難であると考えられた。トーテックス社に 4kg 気球の作成を依頼し、実験を行っている。10kg ペイロードで

なお、Fig.5 に示すように、圏界面を越えたあたりで、急上昇速度が落ちた。この現象は、4kg 気球に限らず、3kg 気球で重ペイロードを飛揚する場合にも頻繁に見られており、フライトプランを立てるうえで、考慮に入れなければならないと考えられる。

c) 放球袋

重ペイロードを飛揚するために、ガス充填時には、13kg を越えるノズルリフトをかけることが必要になる。ゴム気球では、この時に上面膜が延びる現象が起き、バースト高度が低くなる要因の一つとなっている。また、風による気球動揺を抑えることも重要である。地上充填時の気球直径は 3.5m 近くになるため、大型の防球袋を作成した。また、気球の上面高さが人間の手をあげた高さより高くなるために、放球袋の離脱が困難になる。スムーズな理だを実現するために、側面の一経線部を上端までマジックテープで結合する構造とした。

d) 巻き下げ器

オゾンゾンデやエアロゾルゾンデなどの気象観測観測ゾンデでは、気球から測器までの距

離を通常 50m 程度とり、コンタミネーションを防いでいる。国内で使われてきた巻き下げ器は「66 運動式」やトーテックスのオリジナル巻き下げ器がある。トーテックスオリジナルは運動部が樹脂製で 10kg の荷重には耐えられない。66 運動式も本来の耐荷重は 2kg 程度であり、10kg ペイロードへの利用は無理がある。他にも検討したが、既製の巻き下げ器では、10kg の耐荷重を確保できるものはないため、試作品の特注をしている。構造は 66 運動式を踏襲しておおむね良好な結果が得られつつある。

e) カッター

カッターについては、現在までの実験により、ワンチップ気圧センサを用いた気圧動作カッターを降り次々作成し、概ね 0.5hPa の誤差で動作させることができる見込みがついている。この誤差は約 30km (約 10hPa) の高度で、400m 程度の誤差に相当し、要求誤差ギリギリの精度を確保したことになっている。

4.4 実験計画

現在、南極観測における冬季の極成層圏雲と成層圏エアロゾル層のエアロゾル組成の変化、冬季に上端高度が 20km まで低下する極域の成層圏エアロゾル層の上からの宇宙塵回収のための観測を第 59 次南極地域観測隊 (2017 年 11 月出発、2019 年 3 月帰国) で実施することを検討している。また、2016 年~2017 年にかけて、高度 30km までの観測を実現する試験観測と中緯度成層圏エアロゾル中の不揮発成分観測のための実験を行うことを計画している。

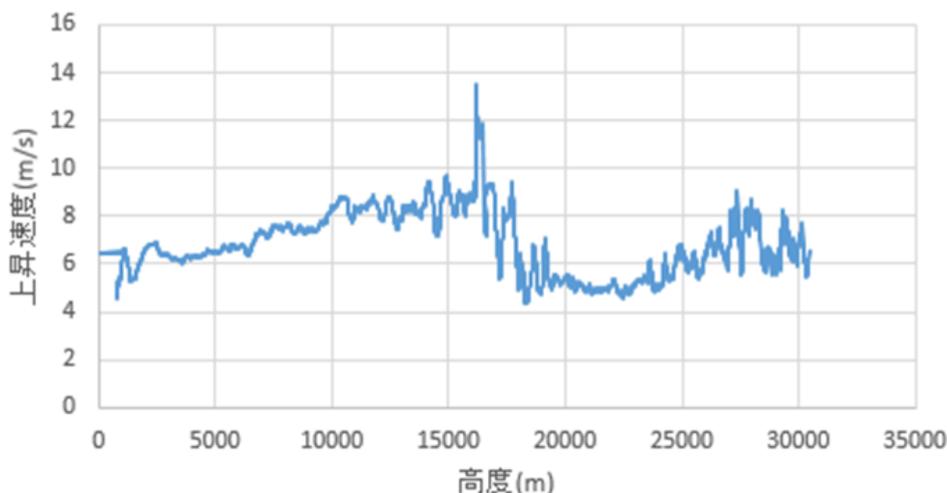


Fig.5 2015 年 8 月 20 日 大分県久住高原で行った 4kg 気球の 10kg ペイロード飛揚試験の際の上昇速度の高度分布
計画上昇速度 5m/sec 充填ガス量 7m³ ボンベ 3 本 ペイロード総重量 10.5kg