

対流圏界面観測用超小型タンデム気球の開発と飛翔性能試験の提案

ISAS/JAXA : 斎藤 芳隆、山田 和彦
 北海道大学大学院地球環境科学研究院 : 藤原 正智
 長岡技科大学大学院工学研究科 : 山田 昇

1 はじめに

熱帯の対流圏界面領域は、対流圏大気が成層圏へ入る主たる経路にあたり、地球規模での物質循環の理解にとって極めて重要である。たとえば、対流圏の湿った大気は成層圏へ入る直前にこの領域で凝結し乾燥する脱水過程を経ており、この過程で決まる成層圏の水蒸気量が放射過程を通じて地表気温の長期変動に寄与している。成層圏の水蒸気濃度が過去数十年に渡り増加傾向にあることや2000年前後に一時的な急減を示したことが知られているが(たとえば、Fujiwara et al., 2010 [1])、脱水過程の詳細の理解が不十分であり、それらの原因はまだ特定できていない。脱水過程を理解するためには、その現場である対流圏界面領域において、水蒸気、雲粒子、気温等の同時観測を実施し、状況を理解することが必要であるが、定量的な議論ができるほどの観測は実施されておらず(たとえば、Hasebe et al., 2013 [2])、脱水過程の定量化、モデル化にはいまだ大きな不確かさがある。

従来、この観測は、ゴム気球を放球場所と時間を調整し、同一空気塊が観測できるように順次打ち上げて観測したり(Fujiwara, et al. 2010 [1])、10年に一度程度、高高度を飛翔する航空機による観測を実施したり、人工衛星による観測を実施したり、といった観測が行われてきた。しかし、ゴム気球による観測は、いくつかの放球拠点を用意して互いに連動しながら実験する必要があること、多数の気球とセンサーが必要になることが難点であり、航空機の利用は高額なコストが課題であり、人工衛星による観測は鉛直方向の情報に弱点があった。

ここで我々が提案するのは、体積100 m³のゼロプレッシャー気球と体積10 m³のスーパープレッシャー気球を組合せ、搭載重量10 kg弱を吊り下げ可能な超小型タンデム気球システムによる観測である。この気球は対流圏界面を朝夕に横切るように高度変動しながら、数ヶ月程度にわたり飛翔することが原理的に可能である。この気球を用いて水蒸気、雲粒子、放射等の総合観測が実現すれば、流れていく空気塊の中における水蒸気の収支および濃度変動過程を正確に測定することができ、脱水過程の理解にとって決定的な観測データを取得することができる(斎藤、山田、藤原 2014 [3])。従来の観測と比較すると、ゴム気球と異って一回の飛翔で多数のデータが取得でき、航空機よりは一桁以下の低コストで観測が実施でき、高度情報を含む詳細なデータをその場観測によって得ることがメリットである。

我々は、この観測を赤道上で実現するべく、小型軽量なセンサーの開発(大気放射計(山田、他、2014 [4])、雲粒子センサー(Fujiwara, et al. 2016[5])、水蒸気センサー(杉立 2014 [6]))を行うと共に軽量高耐圧のスーパープレッシャー気球の開発(斎藤、他 2011[7]、斎藤、他、2014[8]、斎藤、山田、藤原、2014[3]、斎藤、山田、藤原、2016[9])、見通し外通信のためのイリジウム衛星通信システムの開発(永田、山田、他 [10])を進めてきた。センサー、およびイリジウム衛星通信システムについては、いずれも気球による飛翔時点を含む機能の実証まで完了している。一方、スーパープレッシャー気球自体の飛翔実証はされたものの、プラスチック製のゼロプレッシャー気球に吊り下げたの飛翔実証、飛翔特性の取得が未実施である。今回の提案は、赤道上で科学観測に先駆けて、これを実施するものである。

熱帯の対流圏界面領域の観測に利用する場合を念頭におき、気球の構成を検討した結果を表1にまとめた。高い耐圧性能を軽い気球で実現しているため、従来は不可能であった安定高度の差が大きいシステムが構成でき、機器質量が3 kgであるならば、対流圏界面を横切る設定も可能であることがわかる。また、搭載重量が3 kg増えた場合でもシステムとしては成立するが、飛翔高度が20~30 hPa程度下がる。今回は、搭載重量6 kgを想定している。

表 1: タンデム気球の飛翔高度

ZP 気球体積 (m ³)	100	100
ZP 気球質量 (kg)	5	5
SP 気球体積 (m ³)	10	10
SP 気球質量 (kg)	3	3
搭載機器質量 (kg)	3	6
SP 気球内部ガス質量 (kg)	0.33	0.4
昼間 (ガス温度 233 K)		
飛翔気圧 (hPa)	72	92
飛翔高度 (km)	18.3	16.8
ZP 気球内ガス体積 (m ³)	100	100
SP 気球差圧 (Pa)	8600	10400
夜間 (ガス温度 213 K)		
飛翔気圧 (hPa)	140	172
飛翔高度 (km)	14.1	12.8
ZP 気球内ガス体積 (m ³)	47	49
SP 気球差圧 (Pa)	340	420

2 軽量高耐圧スーパープレッシャー気球開発の現状

スーパープレッシャー気球は、未だ開発途上の技術である。科学実験への利用を念頭におき、2010年から我々は高張力繊維でできた菱形の目の網を薄いポリエチレンフィルム製の気球皮膜にかぶせることで耐圧性能を向上させる手法の実用化に向けた開発を開始した(図1、斎藤、他 2011 [7])。皮膜の張力は、圧力と局所曲率半径の積で定まる。したがって、網の目を細かくすれば、局所曲率半径を小さく留めることができ、フィルムへの要求強度が下がる。すなわち、目の細かい網を使うことで、フィルムを薄くして重量を減らし、気球を軽量化することが可能である。2013年には体積10 m³のSP気球をゴム気球に吊り下げて飛翔させ、図4のSP気球の内部ガス圧と大気圧との差圧の時間変化に見られるように、最大差圧6,230 Paに耐えること、5,600 Paの差圧に2時間以上耐えることを実証している(斎藤、他 2014 [8])。ただし、微少なガス漏れが、主に極部のフィルムの溶着部から発生しており、この解消が課題として残った。

この気球では10 μm厚のポリエチレンフィルムを用いており、同型の気球の地上で評価した耐圧性能は、常温で6,000 Pa、-30 °Cで9,370 Paであった(図5)。耐圧性能はフィルム強度で決定されており、倍の厚みの20 μm厚のフィルムを用いることで耐圧性能を倍にすることができる。その場合でも、気球重量への影響は全重量2.5 kgに対して250 gの増と限定的である。さらにフィルムが厚くなり溶着条件が緩和されるため、溶着部からのガス漏れ問題の解消も見込まれる。

そこで、2015年に20 μm厚のポリエチレンフィルムで体積10 m³の気球を製作し、地上での膨張、耐圧試験を実施したところ、10,020 Paで破裂、と耐圧性能は十分だったが、気球の極部のコテ溶着部分に微小ながらガス漏れが発生しており、気密性に課題が残っていることが判明した(斎藤、山田、藤原、他 2016 [9])。そこで、極部の構造の改良を進め、2016年8月に部分試作によって漏れないことを確認するに至った。現在、上の気球の極部を改修した気球の製作を依頼しており、地上膨張試験によってその有効性を確認することを計画している。その後、飛翔用気球を製作し、飛翔前に地上で膨張、加圧試験を実施し、その性能を確認する予定である。

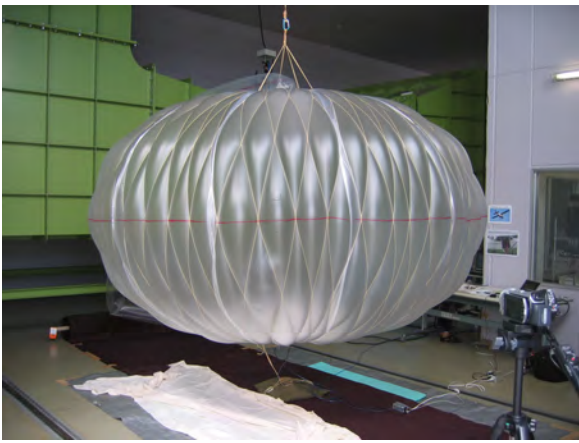


図 1: 皮膜に網をかぶせた気球の耐圧実証。

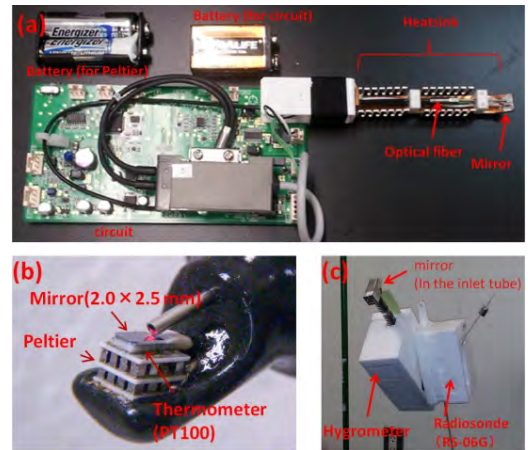


図 2: 水蒸気センサー (杉立 2014 [6])。



図 3: イリジウム SBD モジュール (9603 型) を用いた通信装置

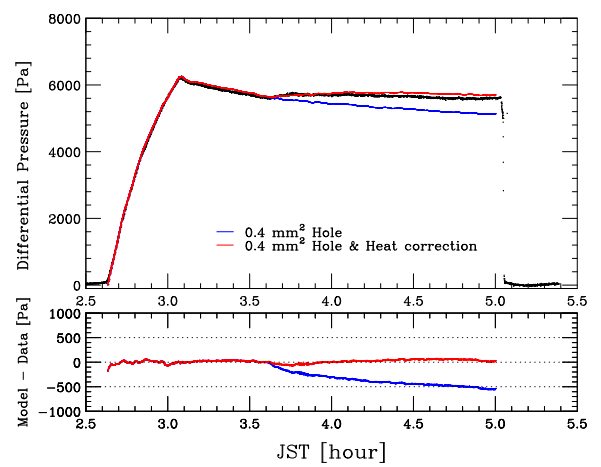


図 4: BS13-04 実験における SP 気球の内外差圧の時間変化。モデルとの比較。

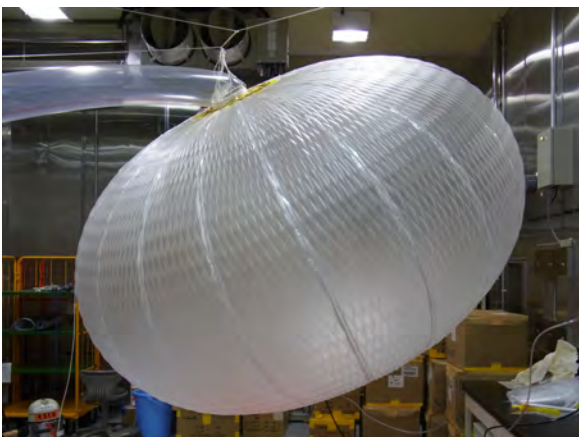


図 5: 低温 (-30 °C) で 6,000 Pa 印加時の体積 10 m³ の気球 (10 μm 厚フィルム使用)。

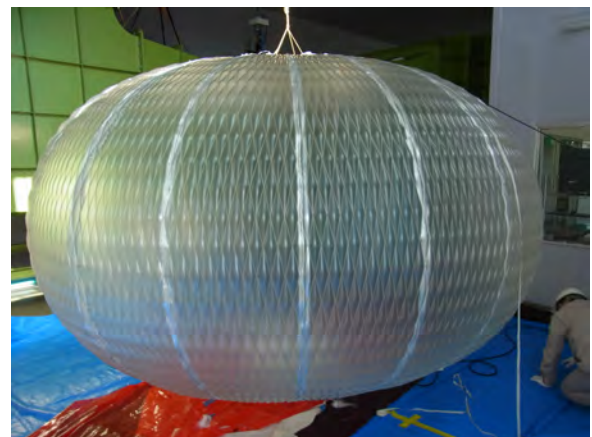


図 6: 常温で 10,000 Pa が印加時の体積 10 m³ 気球 (20 μm 厚フィルム使用)

3 タンデム気球実験の提案

体積 100 m³ のゼロプレッシャー気球に体積 10 m³ のスーパープレッシャー気球を吊り下げた気球に、大気放射計、雲粒子センサー、水蒸気センサーを搭載し、飛翔システムへの要求を詳細化するため必要な日昇時の高度変化、差圧変化を測定すると共に、赤道上での観測に先駆けて、中緯度帯での気象観測を実施する実験を提案する。実験の手順は BS13-04 実験と同様である。すなわち、午前 2 時半に放球し、日昇前に水平浮遊高度に到達させ、日昇前後の変化を測定した後、2 時間程度、次第に高度が上昇する挙動を測定する。実験終了時は、ゼロプレッシャー気球には気球破壊機構で穴をあけ、スーパープレッシャー気球は頭部に設けられたガス排出口をカッターで切断することで穴をあけ、気球を降下させる。

今回の実験の主目的は飛翔システムへの要求を詳細化することであるが、実験でえられる中緯度の対流圏界面領域の水蒸気収支も温暖化のプロセスの一要素を定量的に確定する一助となる。中緯度の対流圏界面領域は、湿った対流圏の空気と乾燥した成層圏の空気が活発に混合している領域である。歴史的には、さまざまな航空機観測キャンペーンが特に北米大陸上やヨーロッパ上空で実施されてきているが、偏西風の強度も変動も世界で最も強く、冬季にはしばしば爆弾低気圧が発達する領域である東アジアから北西太平洋域にかけての観測はあまりない。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金挑戦的萌芽研究「対流圏界面観測用超小型タンデム気球の開発」(課題番号 26630448) を受けて行っています。

参考文献

- [1] Fujiwara, M., et al. “Seasonal to decadal variations of water vapor in the tropical lower stratosphere observed with balloon-borne cryogenic frostpoint hygrometers”, JGR, 115, D18304, doi: 10.1029/2010JD014179, 2010
- [2] Hasebe, F., et al. “Cold trap dehydration in the Tropical Tropopause Layer characterized by SOWER chilled-mirror hygrometer network data in the Tropical Pacific”, ACP, 13, 4393-4411, doi: 10.5194/acp-13-4393-2013, 2013
- [3] 斎藤 芳隆、山田 和彦、藤原 正智、“対流圏界面観測用超小型タンデム気球の開発” 第 28 回 大気圏シンポジウム集録 P-8、2014
- [4] 山田 昇、他、“放射観測ラジオゾンゾンデ用薄膜放射フラックスセンサーの検証 (B14-01 ピギー)” 平成 26 年度大気球シンポジウム集録、isas14-sbs-034、2014
- [5] Fujiwara, M., “Development of a cloud particle sensor for radiosonde sounding”, AMT, in review, September 2016. <http://www.atmos-meas-tech-discuss.net/amt-2016-170/>
- [6] 杉立卓治, “Studies on the tropospheric and stratospheric water vapor measurements for climate monitoring (気候監視のための対流圏・成層圏水蒸気測定に関する研究)”, 北海道大学大学院環境科学院・博士論文, 138 pp., 2014. <http://hdl.handle.net/2115/55416>
- [7] 斎藤 芳隆、他、“菱目の網を被せたスーパープレッシャー気球”、宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-010-03, pp. 21-40, 2011
- [8] 斎藤 芳隆、他、“皮膜に網をかぶせた長時間飛翔用スーパープレッシャー気球の開発 (BS13-04 実験)” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-13-011, pp.35-60, 2014
- [9] 斎藤 芳隆、山田 和彦、藤原 正智、“対流圏界面観測用超小型タンデム気球の開発 II” 第 29 回 大気圏シンポジウム集録 P4、2016
- [10] 永田 靖典、柳瀬 眞一郎、山田 和彦、“イリジウム SBD 通信の宇宙飛翔体への適用について” 平成 27 年度大気球シンポジウム集録、isas15-sbs-012、2015