

対流圏界面観測用超小型タンデム気球の開発

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

1 はじめに

提案者(斎藤)は、天体観測実験に利用できるような大型のスーパープレッシャー気球(SP気球)の開発を進めており、その一環として、平成25年6月に体積 10 m^3 のSP気球をゴム気球に吊り下げて飛翔させる実験を実施し(図1)、SP気球の耐圧性能として $6,280\text{ Pa}$ の耐圧を飛翔性能試験で実証した。この耐圧性能は極めて高く、このSP気球とゼロプレッシャー気球(ZP気球)とを組み合わせ、超小型のタンデム気球が実現できることに気付いた。タンデム気球では、昼夜で異なる安定高度をとりながら長時間の飛翔が可能となる。このタイプの気球はこれまで実現できていないが、自動的にある高度領域をスキャンできるため、実現できれば様々な大気観測の実験に利用できるのではないかと思いついた。そこで、提案者(藤原)らに相談したところ、極めて有用な利用方法があることがわかった。

提案者(藤原)らは、地球大気の大局的な循環の理解を最終目標とし、赤道域で生じている対流圏から成層圏への大気の流入を理解するため、インドネシアにおいて、100機以上のゴム気球を打ち上げ、風によって流れる同一大気を追いかけて、その水蒸気量の変化を測定する実験を行なっている。一つの気球で観測できるのは、一箇所の高度プロファイルに過ぎないため、大気塊の移動に合わせて異なる地点において次々と気球を打ち上げてきた。しかし、打ち上げ可能な地点が限られていること、大量の気球と搭載機器が必要となることから観測に極めて大きな制限がかかっている。この実験に体積 10 m^3 のSP気球と体積 100 m^3 のZP気球とを連結した気球を利用すれば、周辺大気と共に飛翔し、その成分の時間変化を計測できるようになり、実験に質的な変化をもたらすことができる。

長時間気球が飛翔する場合、気球は風によって飛翔し、気球と地上に設置した電波の送受信局との距離が大きくなり、最終的には直接波での通信が不可能となる見通し限界を越えることとなる。この対策には、多数の低軌道周回衛星を用いた双方向の通信システムである、イリジウム衛星通信システムを利用することが有効である。その具体化を進めている提案者(山田)とも検討を進め、データ転送の目処を立てた。

以上を合わせると、新しい気象観測システムが構築できる。 $10\text{ }\mu\text{m}$ 厚のポリエチレンフィルムで製作した体積 100 m^3 のZP気球と $20\text{ }\mu\text{m}$ 厚のポリエチレンフィルムで製作した体積 10 m^3 のSP気球とを連結した気球に、気温、風向、風速等を測定できるゾンデからのデータをイリジウム通信モジュールを経由して通信できる装置を搭載し、朝夕、対流圏界面を横切ってその場観測をする超小型タンデム気球システムである。将来的には、大樹町から太平洋を巡る航跡を飛翔させたり、インドネシアに持ち込んで飛翔させたり、Strateole II等の海外が主導する小型SP気球による大気観測と連携したり、といった可能性も考えられる。

本論文では、この超小型タンデム気球の構想を紹介する。

2 タンデム気球の特徴

通常、科学実験に用いられている気球はZP気球であり、気球尾部において、気球内部のガス圧力と大気圧が等圧になっている。日照条件によって、気球内部のガス温度が変化し、気球の体積が変化するため、夜間の浮力が昼間よりも小さくなる特徴がある。また、気球の浮力は、気球内ガスと大気の密度差と、気球内ガス体積の積であり、前者が大気圧に比例するのに対し、後者が反比例するため、浮力は高度に依存せず一定という特徴もある。したがって、夜間、浮力が低下すると気球は高度を下げ、最終的には地面まで降下することとなる。このため、夜間の飛翔を継続できるよう、通常、バラストと呼ぶ錘を投下することで浮力の減少を補償する運用が行われている。この量は、昼夜のガス温度の比によって定まり、全重量の10%程度である。日没のたびに浮力の補償が必要であり、これが気球を長時間飛翔させる上での障害となっている。

一方、SP気球は、密閉された袋を用いた気球である。打上げ時、気球内部のガスは大気と等圧であるが、気圧が下がるにつれて減圧すると共に体積は膨張し、袋の体積まで膨張する。日照条件によって、気球内部のガス温度は変化し、ガスの絶対圧は変化するが、体積は変化せず、浮力が変動しない、という特徴を持つ。ま

た、高度が下がると大気密度は上昇し、高度が上がると大気密度は減少する一方で、気球の重量と体積は変化しないため、復元力が働き、高度変化が抑制される、という特徴も有する。したがって、気球は同一高度を飛翔し、風と共に移動するため、常に同一空気塊に存在することができる。これを生かし、小型気球での観測実験（たとえば CONCORDIASI 実験 [5]）等で、大気成分の時間変化の観測に利用されている。

タンデム気球は、この二つの気球を連結した気球であり、両者の特徴をあわせ持つ。夜間、ZP 気球の浮力は減少し、高度が低下すると、SP 気球の浮力は増加し、それを補償するため、昼間よりも低い高度で安定する。単独で飛翔する SP 気球は、昼夜の温度差に起因する圧力差に耐えるだけの耐圧性能が要求されるが、タンデム気球の場合、この圧力差と昼夜の飛翔高度の大気圧の差に起因する圧力差との和に耐える必要があり、より高い耐圧性能が要求される。

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。機器質量が 3 kg であるならば、対流圏界面を横切る設定が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。

表 1: タンデム気球の飛翔高度

	Case 1	Case 2
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
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
ZP 気球内ガス体積 (m ³)	47	49
SP 気球差圧 (Pa)	340	420

3 高耐圧スーパープレッシャー気球開発の現状

SP 気球は、未だ開発途上の技術であり、これまで体積 1 万 m³ を越えるような大型の SP 気球は実用化されていない。しかし、2010 年、我々は開発の過程で、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を見出し、その実証に成功した [1]。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。我々はこの手法を用い、大型気球の開発を進めている。

2012 年には体積 3,000 m³ の SP 気球を体積 15,000 m³ の ZP 気球に吊り下げて飛翔させ、気球の正常展開、耐圧性能 400 Pa を確認すると共に、気球の大きさと差圧の関係や水平浮遊時の高度安定性の定量化を行った [3]。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 2 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、フィルムの安全率 62 倍、網の安全率 1.6 倍が確保されていることを確認している [4]。ただし、0.4 mm² の穴が開いている状態に相当する微少なガス漏れが、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ている。

タンデム気球に用いる SP 気球は、この体積 10 m^3 の気球をベースに開発を進めた。これまでの気球では $10 \mu\text{m}$ 厚のポリエチレンフィルムを用いており、重量は 2.5 kg であった。重量は、網、および、極部の網をまとめる構造が主であり、フィルム自体の重量は 250 g に過ぎない。同型の気球の地上で評価した耐圧性能は、常温で $6,000 \text{ Pa}$ 、 $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ で $9,370 \text{ Pa}$ であった (図 3) [4]。耐圧性能はフィルム強度で決定されており、倍の厚みの $20 \mu\text{m}$ 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限定的である。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。現在、 $20 \mu\text{m}$ 厚のポリエチレンフィルムでの体積 10 m^3 の気球の製作を依頼しており、11 月に地上での膨張、耐圧試験を実施する予定である。

4 イリジウム衛星を用いた通信システムの開発

見通し限界を越えた通信には、イリジウム衛星通信システムの利用が有効であり、これには、地上局の設営が不要という利点もある。我々は、これまでに飛翔体との通信用として開発してきたモジュールを発展させ、9602 型イリジウム SBD モジュールを用いた、小型 ($6 \text{ cm} \times 4.5 \text{ cm}$) の通信モジュール (図 4) を開発した [6]。明星電気製の気象ゾンデは、RS232C でのデータ出力が可能であり、SBD モジュール用 RS232C インターフェースと組み合わせることで標準気象観測データを通信することが可能となる。なお、SBD モジュール用 RS232C インターフェースは、本年度実施された B-EGG 実験でも利用されているものである。本年末を目処に、両システムを結合させ、通信試験を実施する予定である。

5 タンデム気球実験の提案

来年度、体積 100 m^3 のプラスチック気球に体積 10 m^3 の SP 気球を吊り下げたタンデム気球の飛翔試験を実施する予定である。これは、SP 気球の飛翔環境下での気密性、耐圧性能、を確認することを主目標としたもので、これに加えて、高度安定性や日昇時の上昇速度の測定など、タンデム気球としての特性評価や、イリジウム通信により基本気象データが通信できることも確認したい。飛翔実験を実施にあたっては、ATC トランスポンダーを搭載して航空安全を確保し、実験終了後は、確実に気球を海中に沈めることで海上安全を保証することを検討している。

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] 斎藤 芳隆、他、JAXA-RR-010-03, pp. 21-40, 2011
- [2] 斎藤 芳隆、他、JAXA RR-11-008, pp.1-16, 2012
- [3] 斎藤 芳隆、他、JAXA-RR-13-011, pp.1-33, 2014
- [4] 斎藤 芳隆、他、JAXA-RR-13-011, pp.35-60, 2014
- [5] Rabier, F et al., B. Am. Meteorol. Soc. 91, 1, pp.69-86, 2010 “The Concordiasi Project in Antarctica”
- [6] 永田 靖典、山田 和彦、平成 26 年度宇宙航行の力学シンポジウム



図 1: BS13-04 実験の放球。

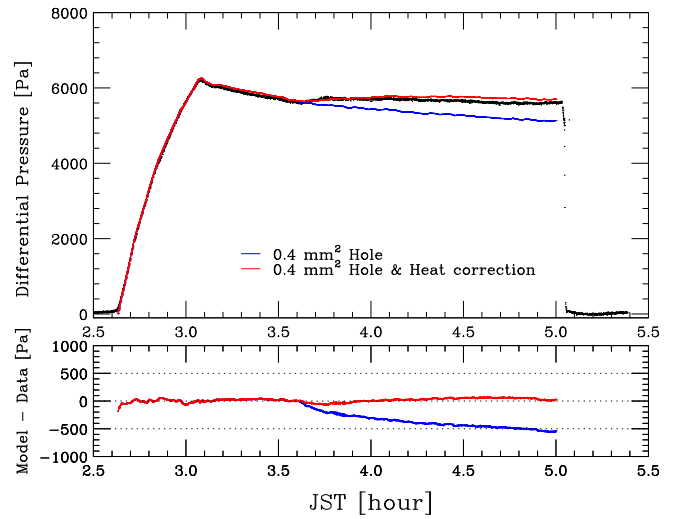


図 2: BS13-04 実験における SP 気球の内部ガス圧と大気圧との差圧の時間変化。モデルとの比較。



図 3: 低温 (-30 °C) での 6,000 Pa 印加時の体積 10 m³ の気球。

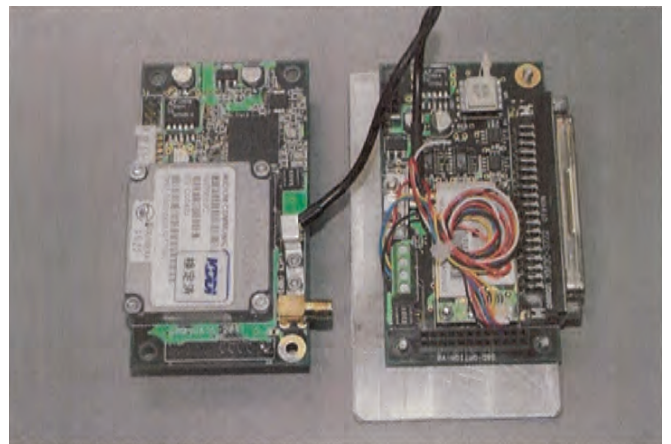


図 4: イリジウム SBD モジュール (9602 型) を用いた通信装置。