

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
北海道大学理学部 : 藤原 正智

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る。地表から放出された物質は、この領域を通過して成層圏に入り、オゾン層の光化学過程を支配すると同時に全球の気候変動に影響を与えている。この領域のひとつの大きな特徴は極めて低温であることである。対流圏の湿った大気は成層圏へ入る直前にこの領域の気温値に従って凝結し乾燥する(脱水過程)。この脱水過程で決まる成層圏の水蒸気は、長期に渡り変動していることが知られており、放射過程を通じて地表気温の長期変動に寄与している、との議論がある。しかし、対流圏界面領域における水蒸気、雲粒子、気温の同時観測データは極めて限られており、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。

本研究は対流圏界面を朝夕に横切るように高度変動する長時間飛翔気球を開発し、空気塊の履歴を追う観測をすることで、脱水過程の理解と定量化にブレークスルーをもたらすことを目標とするものである。我々は、これまで、皮膜に網をかぶせる手法を用いて、軽量で高耐圧のスーパープレッシャー (SP) 気球により長時間(数カ月程度)の飛翔を可能にしようと開発を進めてきた。また、宇宙研には世界最高高度まで到達させることができる薄膜高高度気球の技術がある。これらを組み合わせ、タンデム気球とすると、昼夜で高度を変えながら長時間飛翔する気球が原理的に可能である。タンデム気球は、天体観測等を想定した大型の気球を長時間飛翔させる目的で 1970 年代にアメリカで検討されていたが、高耐圧の気球もなく、開発は中断している。また、昼夜で高度を変えることは、デメリットと考えられていた。しかしこの特徴は熱帯の対流圏界面領域の観測にはメリットである。

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ゼロプレッシャー (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、気球内ガスと大気との密度差と、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、風とともに移動するため、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 [1]) 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。

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(図1)[2]。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 m³ の気球をベースに開発を進めることを考えている。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、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 Pa、-30 °Cで9,370 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、例えば、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限定的である。

4 タンデム気球の設計例

熱帯の対流圏界面領域の観測に利用する場合の気球の構成例を表1にまとめた。ZP気球は体積100 m³ のものを用い、機器質量は3 kgとし、夜間高度の大気圧力が150 hPaとなる場合を求めた。以下がわかる。

- Case 1と2とを比較することで、SP気球に入れるガス量の影響をみることができ、SP気球の内部ガス圧と大気圧との差圧に下駄をはかせる効果があることがわかる。ガス量は夜間のSP気球の差圧が正圧になるように設定する必要がある一方で、昼間の差圧はできる限り小さい方が要求耐圧は小さくなる。したがって、他例では夜間の差圧が500 Paとなる場合で計算している。
- SP気球の体積を大きくすると、昼夜の高度変化が抑制される効果がある。したがって、観測に適した昼夜の高度差からSP気球の体積を決定する必要がある。
- ZP気球内のガス体積は昼夜で変動する。そのため、ZP気球の満膨張体積は、昼間のガス体積を越えないように設計する必要がある。ここでは、満膨張体積を100 m³ とした。
- SP気球に要求される耐圧性能は昼間の差圧で決定される。網を皮膜に被せる手法を適用し、SP気球に用いるフィルム厚を適切に選択することで、十分な安全率をもって製作可能である。

なお、気球につめるHeガス量は、ここで記した飛翔高度の観点に加えて、実験開始時に適正な上昇速度をもたせる観点からも検討する必要であり、後者はここで記した値よりも大きい。したがって、飛翔高度に達した時点で両者の差に相当するガスを排気する必要がある。

5 イリジウム衛星を用いた通信システムの開発

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。そのため、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を考えている。こ

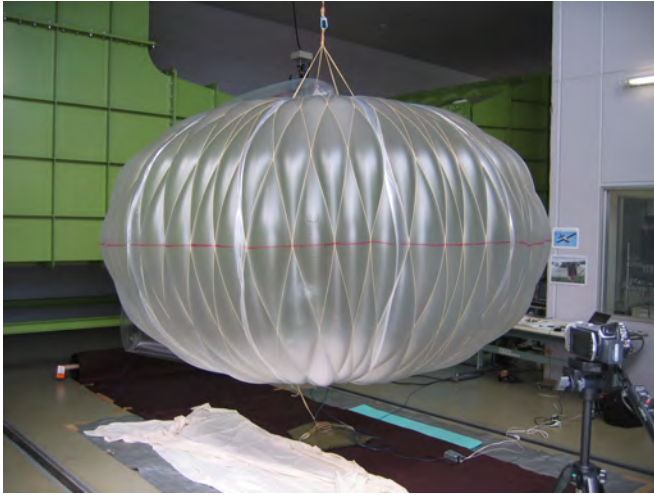


図 1: 皮膜に網をかぶせる手法の実証を行った気球。

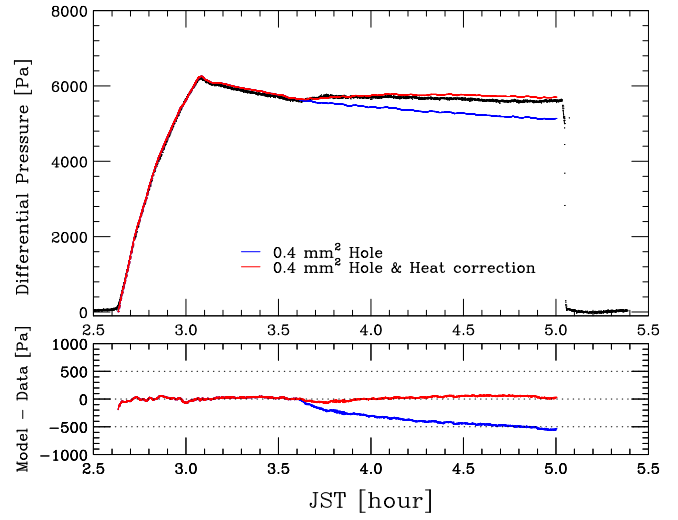


図 2: BS13-04 実験における SP 気球の内部ガス圧と大気圧との差圧の時間変化。モデルとの比較。

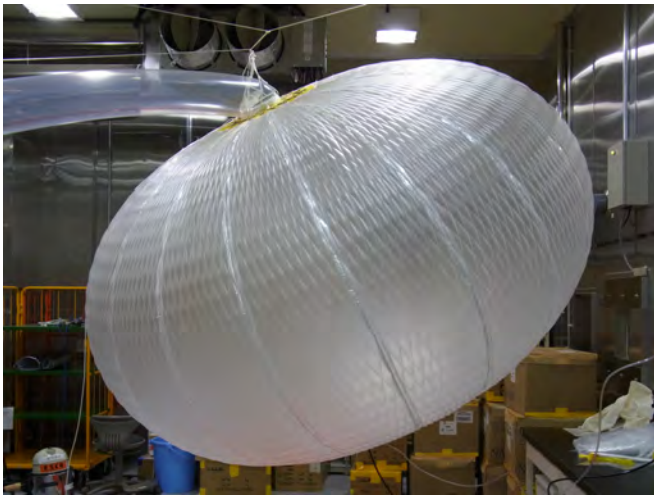


図 3: 低温 ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) での $6,000\text{ Pa}$ 印加時の体積 10 m^3 の気球。



図 4: イリジウム SBD モジュール (9603 型) を用いた通信装置。

表 1: タンデム気球の設計例

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
ZP 気球体積 (m ³)	100	100	100	100	100
ZP 気球質量 (kg)	5	5	5	5	5
SP 気球体積 (m ³)	10	10	8	20	30
SP 気球質量 (kg)	3	3	3	3	3
搭載機器質量 (kg)	3	3	3	3	3
SP 気球内部ガス質量 (kg)	0.35	0.4	0.28	0.7	1.05
ZP 気球内部ガス質量 (kg)	1.43	1.43	1.49	1.09	0.75
昼間 (ガス温度 233 K)					
飛翔気圧 (hPa)	91	90	73	127	140
ZP 気球内ガス体積 (m ³)	76	77	100	41	26
SP 気球差圧 (Pa)	7900	10000	9700	4200	3000
夜間 (ガス温度 213 K)					
飛翔気圧 (hPa)	150	150	150	150	150
ZP 気球内ガス体積 (m ³)	42	42	44	32	22
SP 気球差圧 (Pa)	510	2700	500	500	500

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 [5] を発展させ、9603 型イリジウム SBD モジュールを用いた、小型 (6 cm× 4.5 cm) の通信モジュール (図 4) を開発しており、現在、より軽量 (100 g、含アンテナ)、より小型化 (6 cm×4 cm×2 cm) する開発を進めている [5]。

6 課題と今後の計画

現状の SP 気球に残る課題はガス漏れの問題である。気球のフィルムは熱溶着されているが、構造が複雑な極部は機械でなく、手作業で溶着小手を使って行われており、稚拙な溶着箇所での漏れが発生していることが確認されている。現在、低温性能に優れた両面テープで接着する方法を試験している。

今後、上の技術を習得した後、2015 年度に体積 10 m³ の気球を試作し、地上での漏れ試験、耐圧試験を実施し、2016 年度には飛翔試験を実施することを検討している。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究 (A) 「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」(課題番号 24246138)、および、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] <http://www.cnrm.meteo.fr/concordiasi/>
- [2] 斎藤 芳隆、他、JAXA-RR-010-03, pp. 21-40, 2011
- [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] 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