

スーパープレッシャー気球とゼロプレッシャー気球を組み合わせた 長時間飛翔気球の開発

ISAS/JAXA : 斎藤 芳隆、飯嶋 一征、松坂 幸彦
 藤倉航装(株) : 松嶋 清穂、田中 茂樹
 ナカダ産業(株) : 梶原 幸治、島津 繁之

1 はじめに

長時間(数カ月程度)飛翔できる気球ができれば、新しい実験手段による新しいサイエンスの創出が期待される。長時間飛翔気球の切札はスーパープレッシャー気球(SP気球)である。宇宙研気球グループでもLobed-pumpkin型、俵型などの開発が進められており、SP気球の実現が現実的な状況となっている[1]。しかし、一方で、現状のSP気球が必ずしも万能ではなく、たとえば、飛翔航跡制御の方法が確立していない、気球自体の重量が重いといった問題点を抱えていることもわかっている。

実は、気球を長時間飛翔させるもう一つの方法が知られている。SP気球とゼロプレッシャー気球(ZP気球)のタンデム気球である。夜間、ZP気球が浮力を失いシステム全体が降下すると周辺大気密度が上昇するため、体積が一定であるSP気球の浮力が増加し、気球の降下は停止する[2]。この原理を利用した気球はSky Anchor気球として1970年代に研究が進められたが[3]、大きなSP気球が実現できなかったこともあり、それ以後全く研究が進んでこなかった。しかし、我々にはこれをつくる技術があり、原理的には実現可能である。

タンデム気球と単一のSP気球の特徴の違いを一言でいえば、高度変化を利用するならばタンデム気球、嫌うならば単独のSP気球が優れる。タンデム気球が実現すれば、日々、高度別の大気成分の詳細観測をするといった新しいミッションが可能となる。

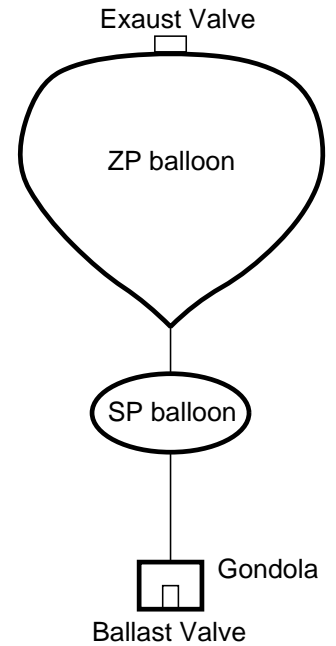


図 1: タンデム気球

2 タンデム気球システムの開発

このような観点から、2009年からタンデム気球システムの開発を開始した。実現のためには、技術開発要素として、1. 高耐圧気球、2. 放球方法、の開発が必要であり、飛翔実験により、1. 要求耐圧性能の定量化、2. 浮力を補償する原理の実証が必要である。以下、開発状況を報告する。

2.1 高耐圧気球の開発

高耐圧化は、フィルムの局所曲率半径を小さくすることで実現できることが知られている。我々は、気球に高強度繊維の網を被せることで、薄く軽いポリエチレンフィルムで耐圧性能を向上させる方法の検討を進めている[4]。2010年4月に、直径3mの気球を20 μm 厚のポリエチレンフィルムにケブラーロープで作った網をかぶせて製作し、2,460 Paの耐圧性能を実証した。2010年11月には直径6mの気球を10 μm 厚フィルムに開発した網をかけて製作し、展開試験を行なったが、正常な展開ができない問題が発生した。網の展開形状を変更し、2011年1月には直径3mの気球を20 μm 厚フィルムに改良した網をかけて製作した。その後、改良を加え、2011年4月には、その気球を正常に展開させ、9,600 Paの耐圧性能を発揮させることに成功した。同一タイプの気球(NPB001-3)を製作し、2011年6月の飛翔実験を実施した。並行して、2011年5月には、直径6mの気球を10 μm 厚フィルムに網をかけて製作し、耐圧試験を行なったところ、設計値3,400 Paのところ、1,800 Paを発揮するに留まった。頭部尾部に応力集中することが原因とわかり、以後は改良した構造をとることとした。2011年8月には直径12mの気球を10 μm 厚フィルムに網をかけて製作し、正常に展開し、

表 1: 網をかぶせた気球の諸元

気球番号	NPB3-1	NPB1-1	NPB01-2	NPB01-1	NPB001-2	NPB001-1
公称容積 (m ³)	3,000	593	106	106	9.6	9.3
直径 (m)	20.6	12.0	6.76	6.75	3.03	2.99
全長 (m)	27.0	15.72	8.86	8.85	3.97	3.92
高さ (m)	12.3	7.18	4.05	4.04	1.80	1.79
ゴア数	30	16	12	12	20	12
最大ゴア幅 (mm)	2156	2354	1768	1767	516	783
フィルム厚 (μm)	10	10	10	10	20	20
網線強度 (N)	415	415	415	400	415	1330
縦網線数	3015	1608	603	864	402	96
網交点間隔 (mm)	101	101	101	320	101	500
赤道網線間隔 (mm)	43	47	71	49	48	196
弁座直径 (mm)	530	530	530	530	300	530
耐圧予想値 (Pa)	3,600	5,100	3,400	4,930	10,000	2,100
実測耐圧値 (Pa)	—	>800	1,800	試験せず	9,600	2,650
気球重量 (kg)	未確定	28	19	26	3	16

800 Pa 以上の耐圧性能を有することが確認された。現在、来年度の飛翔実験に向けて、体積 3,000 m³、耐圧性能 3,600 Pa の気球を製作しているところである。網をかぶせた気球の諸元を表 1 にまとめた。

並行して、気球の破壊機構についての開発も進めている。通常の気球では搭載装置重量を利用し、気球と搭載装置の分離後に、その重さを利用して気球皮膜を引き裂く。しかし、この気球の場合、引き裂き紐が網に絡み付き気球と搭載装置が分離されない可能性がある。そこで、薄膜型高高度気球で用いられている錘による方法を採用した。具体的には、気球内部に 600 g の錘をつり下げて配置し、破壊時にはそのつり紐を切断する。これまでに以下の試験を実施した。

- 長さ 1.5 m のウレタン布でつくったシリンダー気球に窓を設け、10 cm 角のポリエチレンに装着した破壊機構を装着して、破壊機構周辺から洩れがないことをアンモニアテストで確認し、1 時間にわたり 720 Pa の圧力が保持できること、4,500 Pa 以上の耐圧性能を有すること、を確認した。
- 破壊機構を装着しても耐圧性能に影響がないことを、NPB01-1 気球での試験 (1,800 Pa) により確認した。
- 落下による引き裂き試験を実施し、少なくとも長さ 1 m が引き裂けること、継続的に引き裂くには 20 N の力が必要であることを求めた。

今後、NPB1-1 気球の試験の最後に引き裂き機構を動作させ、動作の確認を実施する予定である。

2.2 放球方法の開発

宇宙研では、これまでも SP 気球の飛翔試験を行なうため、タンデム気球としての飛翔を行なってきた。この際は、SP 気球にスリーブと呼ぶ袋を被せ、棒状に膨らませようとしてきた。しかし、放球後に袋が破れるように入れたミシン目から放球前に破れかかるという問題が発生した場合があり、この対策として、気球の外側のスリーブにミシン目を入れるのなく、ファスナーを取り付け、放球直前に解放することを検討している。

小型のモデルを製作しファスナーが展開する条件出しを行なった上で NPB1-1 気球の膨張試験の際に適用した。実機 (NPB3-1) とは気球長の違いはあるが、端部の構造、スリーブの径は同一となっている。棒状に膨らませることに成功したが、ファスナーの展開は不調であった。今後、この気球を用いて、展開の条件を試験する予定である。なお、このスリーブの耐圧性能は常温においても 1,200 Pa であり、しかも低温において強度が劣化する構造を用いているため、万が一ファスナーが展開しなかったとしても、SP 気球の展開は心配ない。

2.3 要求耐圧力性能の定量化

2011年6月1日に、2 kgのゴム気球と体積 10 m^3 の超小型SP気球のタンデム気球を日の出をまたいで飛翔させ、昼夜の気球の温度変化を定量化する実験を実施した。

図2に気球内圧と大気圧との差圧の時間変化を示す。2時20分ごろから加圧がはじまるが、最大差圧150 Paを示した後、次第に差圧が低下し、牽引気球を切り離し上昇が停止した時点で、差圧はゼロに戻っている。気球に穴があいており、正常な加圧がなされなかったものと思われる。穴の面積は、気球ガスの上昇に伴う膨張速度とガス排気速度のつり合いから 0.7 cm^2 と推定される。この程度の穴は、気球圧計測チューブと気球との接合部のもれ、溶着が数cmはずれていた、といった原因で発生し得る大きさである。地上試験においてはガス注入速度は $1\times 10^{-1}\text{ m}^3/\text{sec}$ 以上で実施しており、この場合、この程度の穴があっても気づかないレベルの試験となってしまう。大型気球の場合にはガス計測部の構造は従来型であり、気球部分の製造方法はゼロプレッシャー気球と同じであるため、同様の問題は生じ得ないが、こういった超小型気球の場合は洩れについて特別な対応が必要である。

図3に3時から5時の気球皮膜の温度の時間変化を示す。SP気球の皮膜の温度は、日昇直後から上昇をはじめ、最大 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ に到達した。周期10分の変動がみられ、これは、気球の回転に対応し、直接光の有無に対応しているものと思われる。気球の温度はむしろ最低温度に対応していると思われる。図中の曲線は時定数0.7時間で $-30\text{ }^\circ\text{C}$ に収束する曲線であり、気球の温度を推定することができた。今後、この温度とフィルム等の光学特性とから、大型気球で要求される必要耐圧を求めることが可能である。

これらに加えて、牽引気球切り離し後に $60\text{ m}/\text{min}$ の速度で緩やかに降下したことから、夜間のゴム気球のガス温度が周辺大気温度よりも低く $-70\text{ }^\circ\text{C}$ 程度となることがわかった。これが判明したことで、今後、ゴム気球による水平浮遊の際の浮力を精度よく推定することができるようになった。

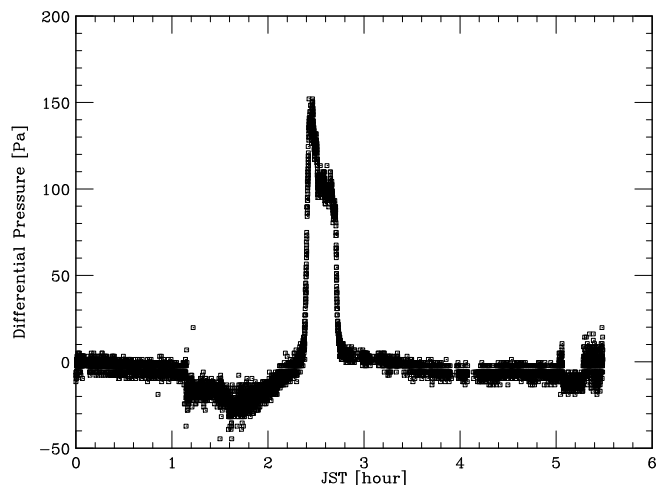


図 2: SP 気球の差圧の時間変化。

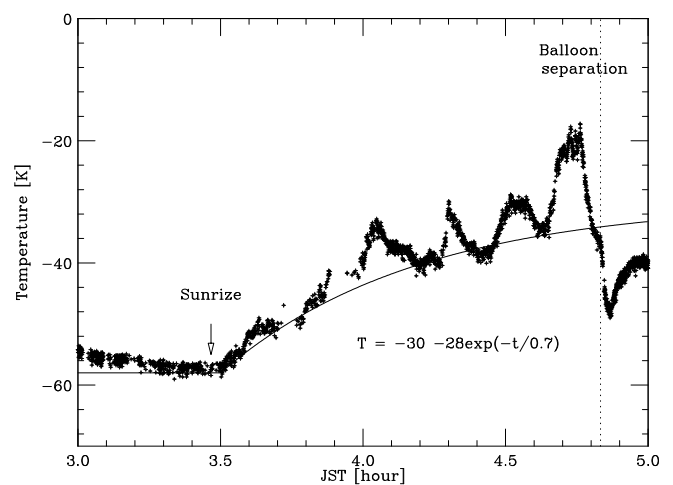


図 3: SP 気球の皮膜温度の時間変化。

3 体積 $3,000\text{ m}^3$ の気球の飛翔試験と将来計画

3.1 小型タンデム気球システムの飛翔性能評価

タンデム気球システムの諸元を表2に示す。平成24年度には体積 $15,000\text{ m}^3$ のZP気球に体積 $3,000\text{ m}^3$ のSP気球を吊り下げて飛翔させる実験を計画している。大気圧と共に、SP気球の内圧を差圧計で計測し、SP気球の展開の様子をITVカメラでモニターする予定である。実験手順は以下の通りである。

- 安全に放球できることを確認する
- レベルフライトに到達させた後、SP気球が温められることによる内圧の上昇を測定する。これにより、SP気球の昼間の温度が評価でき、耐圧設計にフィードバックをかけることができる。

表 2: タンデム気球システムの諸元

名称	B50A+NPB10	B15A+NPB3	ゴム 2 kg+NPB001
ZP 気球体積 (m ³)	50,000	15,000	—
ZP 気球重量 (kg)	120	80	2.0
SP 気球体積 (m ³)	10,000	3,000	9.6
SP 気球重量 (kg)	150	70	2.3
ペイロード重量 (kg)	100	50	3.0
バラスト重量 (kg)	60	60	0
荷姿重量 (kg)	30	30	0.7
吊下重量 (kg)	180	190	3.7
昼間飛翔高度 (km)	35.5	30.1	25.6
夜間飛翔高度 (km)	31.1	26.5	17.9
SPB 要求耐圧 (Pa)	720	1,740	4,450

- ZP 気球の排気弁を開き、気球を降下させる。バラストによる浮力補償なしに、降下が停止することを確認する。
- バラストを投下して再上昇させ、気球の耐圧性能を確認する。
- 気球を破壊し、実験を終了する。SP 気球には薄膜高高度気球と同様の引き裂き破壊機構が装備されている。

3.2 将来計画

本研究は、体積 50,000 m³ の ZP 気球に体積 10,000 m³ の SP 気球を吊り下げて飛翔させることを目標としており、ISAS/JAXA の気球プロジェクトの一環として PI に提供できるシステムとして完成度を高め、科学実験への適用を行なう予定である。平成 25 年度には、本年度実験を実施したゴム 2 kg+NPB001 気球に改良を加え、衛星通信の機能を追加することにより、一日程度の飛翔を実施することで長時間飛翔の原理実証と通信機能を確認する実験を実施することを検討している。

謝辞

超小型タンデム気球の飛翔試験 (BS11-02) にあたっては、JAXA/ISAS/大気球実験室にお世話になりました。本研究は、科学研究費補助金若手研究 (A)「スーパープレッシャー気球とゼロプレッシャー気球を組み合わせた長時間飛翔気球の研究」(課題番号 21686081) を受けて行っています。

参考文献

- [1] 福家 英之、他、”スーパープレッシャー気球の展開試験” 平成 22 年度大気球シンポジウム集録
- [2] 矢島 信之、”複合気球構成によるスーパープレッシャー気球の高度化”, 宇宙科学研究所報告 特集 No. 40, pp.19-26, 2000
- [3] Smith Jr., I.S., ”Development of the Sky Anchor Balloon System”, Proc of 10th AFCRL Scientific Balloon Symposium, pp.81-101, 1978
- [4] 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” JAXA-RR-010-03, pp. 21-40, 2011
- [5] 斎藤 芳隆、他、”スーパープレッシャー気球とゼロプレッシャー気球を組み合わせた長時間飛翔気球の飛翔性能試験計画” 平成 22 年度大気球シンポジウム集録, pp.25-28, 2010