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 II

ISAS/JAXA	:	斎藤 芳隆、	後藤 健、	飯嶋 一征、	松坂 幸彦
東海大学工学部	:	中篠 恭一			
東京工業大学工学部	:	秋田 大輔			
名古屋大学理学部	:	田村 啓輔			
岐阜大学	:	大谷 章夫			
藤倉航装 (株)	:	松嶋 清穂、	田中 茂樹	đ	
ナカダ産業 (株)	:	梶原 幸治、	島津 繁之	2	

1 はじめに

長時間 (数カ月程度) 飛翔でき、軽量化が見込める気球システムとして、スーパープレッシャー気球 (SP 気球) とゼロプレッシャー気球 (ZP 気球) を連結したタンデム気球システムの開発を 2009 年より進めてきた。この 気球システムでは、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の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 [1]。この原理を利用した気球は 1970 年代に Sky Anchor 気球として研究が進められたが [2]、大きな SP 気球が実現できなかったこともあり、それ以後は研究 が進まなかった。我々は、タンデム気球システムの開発の一環として、高耐圧気球の開発を進め、高張力繊維 でできた菱形の目の網を薄い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 [3]。この方法を用いると、網の目を細かくするほどフィルムへの要求強度が下がるため、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となる。当初の予 定では、タンデム気球を大型化することで、軽量の長時間飛翔気球とすることを予定していたが、計画を変更 し、この手法を用いて単独の SP 気球で長時間飛翔する気球の開発を本年度より開始した。本論文では、これ までの開発の経緯、体積 3,000 m³ の SP 気球を体積 15,000 m³ の ZP 気球とのタンデム気球システムを飛翔さ せた結果、および、今後の開発計画について報告する。

2 高耐圧気球の開発

2010年1月に網をかぶせる手法を発案し、当初は、ZP気球とSP気球とのタンデム気球システムに用いる720 Paを使用耐圧とする SP 気球の開発を進めた [3]。2010 年 4 月に、直径 3 m 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 $6 \mathrm{~m}$ の気球を $10 \mathrm{~\mu m}$ 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3 m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 (図1)。同一タイプの気球 (NPB001-3)を製作し、2011 年6月にゴム気 球に吊り下げたタンデム気球システムとして昼夜をまたいだ飛翔実験を実施し、皮膜温度が昼夜で30度変化 すること、夜間のゴム気球の浮力が地上での値と比較して5%減少することを測定した[4]。目的の一つだった 低温での耐圧性能評価は、SP 気球に $0.6~{
m cm}^2$ 程度の大きさの穴が加圧以前に生じていたため、実施すること ができなかった。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 (図2)。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、800 Pa 以上の耐圧性能を有することが確認された (図 3)。2012 年 4 月には、飛翔試験用の直径 20 m、体積 3,000 m³ の気球を 10 µm 厚フィルムに網をかけて製作 し、地上膨張試験により、正常に展開すること、リークレートは10⁻² Pa/sec 以下であることを確認した。使 用後、ガスを抜いて丁寧に畳み、畳んだ際の損傷箇所を補修し、飛翔性能試験を行った。網をかぶせた気球の 諸元を表1にまとめた。

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	9.5	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 $\left(\mu \mathrm{m} ight)$	10	10	10	10	20	20
網線強度 (N)	415	415	415	400	415	1330
縦ロープ数	3015	1608	603	864	402	96
網交点間隔 (mm)	101	101	101	320	101	500
赤道ロープ間隔 (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)	300	>800	$1,\!800$	試験せず	$9,\!600$	$2,\!650$
気球重量 (kg)	66	16	19	26	3	16

表 1: 網をかぶせた気球の諸元



図 1: 飛翔実験用直径 3 m の気球。



図 2: 直径6mの気球の正常展開。



図 3: 直径 12 m の気球の正常展開。



図 4: 直径 20 m の気球の正常展開。

2.1 体積 3,000 m³の気球の飛翔性能試験

2012年6月9日に、体積15,000 m³のZP気球に体積3,000 m³のSP気球を吊り下げたタンデム気球シス テムとして飛翔試験(B12-02実験)を実施した。図5のように、SP気球は、ZP気球とゴンドラの間に紡錘形 に膨らませ、連結した二つの気球のスライダー放球装置による放球に成功した。気球は途中、ブーメラン飛翔 を行ないながら、順調に上昇し、高度29.5 kmで水平浮遊状態となった。システムが上昇すると、SP気球は、 ある高度で満膨張となり、以後、大気圧が減少することによってSP気球内圧と大気圧の差が増加する。図6 はその差圧の計測結果である。5時30分頃から増加がはじまるが、水平浮遊に入ったところで、減少しはじめ ている。これは、気球に穴があいたことを意味する。6時20分頃、バラストを投下して、高度を上昇させた 後、ZP気球から排気させて、ZP気球が満膨張でない状態での挙動を調べた。7時5分にSP気球を破壊し、7 時15分にZP気球と切り離して降下させ、実験を終了させた。

解析の結果、以下が判明している。

- SP 気球内圧と大気圧の差の時間変化は、気球体積の変化がなく、気球ガスが等温であり、差圧が 300 Pa に達した時点で面積 4.5 cm²の穴があき、さらに、差圧が 700 Pa に達した時点で穴の面積が 8 cm² に広 がるモデルで説明できる (図 6)。これらの圧力は設計破壊圧 3,600 Pa と比べると非常に小さい。また、 穴があきながらも、穴が大きく広がることなく、最大 814 Pa に耐えている。しがたって、穴の原因は抜 本的な強度不足ではなく、局所的な応力集中によるものだと推測される。
- 画像データの解析により、気球が正常に展開し、その直径も予測値と一致することが確認された。また、
 その大きさが差圧と共に変化する様子も得られており、網自体の応力ひずみ曲線のヒステリシスに対応した加圧時と減圧時のヒステリシスが観測されている(図7)。
- タンデム気球システムの水平浮遊時の高度変化を初めて測定することに成功した。高度変動は分布を正規分布で評価した際のσにして11.2 mにとどまり、単独のZP気球での飛翔時にくらべ、高度変動が抑圧されることが確認された。
- ・飛翔試験の最後には、錘を落とす方式の気球破壊機構を動作させ、地上試験時と同程度のフィルムの引き裂きが行われることを確認した。

3 体積10 m³の気球の飛翔試験の提案

2012年に実施した体積3,000 m³の気球の飛翔実験で気球に小さな穴が生じた不具合は、極部のフィルムと保護テープとの接合部の応力集中が低温になったことで顕在化したものと考えている。今後、この対策を施した気球を製作し、地上で低温試験を実施することで、この有効性を確認すると共に、実際に成層圏を飛翔させる試験でも確認を行いたい。この飛翔試験は、BS11-02実験と同様にゴム気球との超小型タンデム気球として実施する。この試験の目的は以下の通りである。

- 成層圏の低温環境における耐圧性能を確認する。
- BS11-02 実験で得られた昼夜の皮膜の温度変化、ゴム気球の浮力の変化の再現性を調べる。
- SP 気球の圧力の変化の測定から昼夜の SP 気球のガス温度変化を定量化する。
- 映像により、SP 気球の大きさと SP 気球の圧力の関係を定量化する。
- 日昇により、再上昇する際の上昇速度を定量化する。

これらの測定を通じて、タンデム気球システムの理解を深め、将来の対流圏界面観測などの科学観測実験への 適用の準備とする。なお、風速が弱く長時間飛翔させるために適していることから飛翔高度は20kmとする。 また、回収が不要なゴム気球を利用することで、夜間の飛翔が可能となる。



図 5: B12-02 タンデム気球実験の放球。



図 6: SP 気球内圧と大気圧の時間変化のモデルとの 比較。



図 8: 水平浮遊時の高度変化。

謝辞

小型タンデム気球の飛翔試験 (B12-02) の実施にあたっては、JAXA/ISAS/大気球実験室を中心とする大気球 実験班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)、および、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) を受 けて行っています。

参考文献

- [1] 矢島 信之、宇宙科学研究所報告 特集 No. 40, pp.19-26, 2000
- [2] Smith Jr., I.S., Proc of 10th AFCRL Scientific Balloon Symposium, pp.81-101, 1978
- [3] 斎藤 芳隆、他、JAXA-RR-010-03, pp. 21-40, 2011
- [4] 斎藤 芳隆、他、JAXA RR-11-008, 2012, 出版予定