

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)

ISAS/JAXA	: 斎藤 芳隆、後藤 健
東海大学工学部	: 中篠 恭一、古田 良介、堂本 航大
東京大学生産技術研究所	: 秋田 大輔
名古屋大学理学部	: 田村 啓輔
岐阜大学工学部	: 大谷 章夫
長岡技術科学大学工学部	: 山田 昇
藤倉航装 (株)	: 松嶋 清穂、田中 茂樹
ナカダ産業 (株)	: 島津 繁之

1 はじめに

長時間 (数カ月程度) 飛翔できるスーパープレッシャー気球 (SP 気球) をゼロプレッシャー気球 (ZP 気球) と同程度の体積/重量比で実現する開発を進めており、搭載重量 1 トン、飛翔高度 37 km を体積 300,000 m³ の SP 気球で実現することと目標としている。2010 年に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手法 [1] を着想し、以後、体積 10 m³ の気球試作から順次気球の大型化を進め、2012 年には体積 3,000 m³ の SP 気球と体積 15,000 m³ の ZP 気球とのタンデム気球システムを飛翔させるに至った (B12-02 実験)[3]。この実験は、内部ガス圧と大気圧との差圧は最大 814 Pa に達し、25 分間にわたる水平浮遊時の間は正圧であり、タンデム気球の飛翔時の挙動を測定するといった成果をあげた。しかし、所期の耐压性能が 3,500 Pa であったにも拘わらず、400~500 Pa の差圧が印加された時点で数 $\times 10^{-4}$ m² の穴が生じ、ガス漏れが発生するという問題も生じていた。このため、気球の構造を見直し、小型気球を製作し、地上試験によって耐压性能を確認した後、同型の気球を用いた飛翔性能試験を実施した。並行して、単独で飛翔する SP 気球で必要となる、大重量吊り下げ機構、放球時のスプーラーからの気球皮膜の保護方法について開発を進めた。本論文では BS12-02 実験以降の開発の経緯、および、今後の開発計画について報告する。

2 応力集中の問題の解消¹

B12-02 実験においては、ガス漏れがはじまった以後も、穴が大きく広がることなく最大 814 Pa に耐えていた。したがって、穴の原因は抜本的な強度不足でなく、局所的な応力集中によるものと推測される。気球の構造を見直したところ、以下の点に問題があることが判明した。

- NPB3-1 気球においては、網線長がフィルム長よりも 2.7 % 短かい設計となっていた。これは、網の目が開くことによって網の長さが短くなるため、赤道部の網の長さの平均的な短縮量である 5.4 % の半分だけ網の長さを短かくしたものである。網が展開した状態においては、赤道部の網の長さはフィルムの長さよりも短くなるため、網が子午線方向の力を受持ち、フィルムに余計な力がかかることはないのだが、極に近い部分は網目が開かず、フィルムが網の長さになるまで伸ばされることになる。
- 極においては、網の端部をリング状に加工したロープに固定しているのだが、そこに遊びがあり、網に力がかかる前にフィルムに力がかかり伸ばされることが判明した。これは、ロープの加工時の縫い縮み、張力がかかった際のロープの伸び、ロープの太さの影響を考慮していなかったことによるものである。

そこで、網線長とフィルム長を同一とし、かつ、網の端部の遊びをなくす改良を施した気球を製作し、地上試験での常温膨張試験 (図 1)、-30 °C での破壊試験 (図 2) を通じてその有効性を確認した。その結果、

- 常温での耐压性能は 3,000 Pa 以上であること。
- 気球が設計形状に展開していること。
- -30 °C での耐压性能は 9,730 Pa であること。

¹本年度実験、および、それに向けた開発は、文献 [4] にまとめられている

- 上記の値が、文献 [1] の手法による推定値と 20 %の精度で一致しており、気球の耐圧性能を理解できていること。

が確認された。

そこで、同型の気球を製作し、2 kg のゴム気球に吊り下げて BS11-02 実験 [2] と同様にゴム気球との超小型タンデム気球として実施した。

飛翔実験は 2013 年 5 月 25 日に実施された。放球時の様子を図 3 に示し、高度曲線を図 4 に示す。高度 16.3 km にて SP 気球に圧力がかかり始め、高度 22.7 km で牽引用ゴム気球の切り離しを行なった。以後、気球は水平浮遊を行い、上空日昇の時点でも高度 22.8 km であった。その後、気球は上昇を開始し、高度 24.7 km に達した 5 時 1 分に飛翔用ゴム気球が破裂した。そこで、SP 気球の圧力を解放し、5 時 6 分に飛翔用ゴム気球を切り離し降下させ、実験を終了させた。

本実験を通じて、以下が判明した。

- $-60 \sim -50$ °C の低温環境下で 6,280 Pa 以上の耐圧性能を有すること (図 5)
- 2 時間にわたり 5,600 Pa の差圧に耐えること (図 5)。
- 事前の地上でも観測されていた 0.4 mm^2 の小さな穴からのガス漏れが発生していたが、それが拡大していないこと (図 5 の青線のモデルは 0.4 mm^2 の穴がある場合)。
- 日昇後の上昇速度は 0.4 m/sec と緩やかであり、気球内ガスの温度上昇の時定数 3000 秒で、 20 °C の上昇が発生すること (図 5 の赤線のモデルは 0.4 mm^2 の穴に加え、上記温度上昇がある場合)
- 気球の形状が所期のかぼちゃ型よりも 4 %小さくなっていること (図 6、文献 [5] に詳細)

この試験を通じて、改良を加えた気球が成層圏での飛翔にあたって、微少なガス漏れを除き問題がないことが確認された。

3 単独で飛翔する SP 気球の開発

本研究における最終的な目標は 1 トンの観測装置を吊り下げられる体積 $300,000 \text{ m}^3$ の SP 気球の開発であるが、これまで試験した気球は体積 $3,000 \text{ m}^3$ に留まっており、大型化に向けた開発が必要である。このため、以下の開発を進めており、来年度の飛翔実験によって検証を行なう。

1. 大重量吊り下げ構造の開発

現状の SP 気球は ZP 気球用弁座にアイボルトをたてて吊り下げる構造となっているが、これでは、300 kg すら吊り下げることができない。このため、図 7 のように 1 トンが吊り下げ可能な尾部構造を開発した。今後、引張試験による強度の確認、フィルムとの接合部からのガス漏れ量の定量化を行なう。なお、尾部には直径 30 cm のフィルムで塞がれた穴がありそこを気球を破壊する引き裂き紐が通過する仕様となっている。

2. 放球時の皮膜保護

現状の SP 気球は高張力糸で縛ることによって網と網、および、網とフィルムを結合させているが、放球時に気球はスプラーにかけられるため、結び目がフィルムに損傷を与える可能性がある。このため、ミシンで結び目なく縫合することを検討しており、図 8 のように、部分試作を行い作業性、および、強度の確認を行っている。今後、直径 3 m の気球にこの方法で網かけを行い、作業性の確認や、フィルムへの影響の評価を行なうと共に、実際に張力をかけた状態でスプラーにかけ、損傷の有無を調べる予定である。問題がある場合には、スプラーがあたる部分までフィルムを多層化する対応をとる。

3. ガス漏れ対策

フィルムからの透過量は文献上の値から問題ないと考えてきたが、用いているフィルムの透過量を実測し十分小さいことを確認した。加えて、地上試験で破壊した直径 3 m の気球を修繕し、ヘリウムリークディテクタを用いた漏れ調査を行ったところ、溶着部からの漏れが存在することがわかった。特に、溶着機を用いず小手による手作業での溶着されている極部での漏れが大きいようである。今後、溶着サンプルを用いて漏れの定量化を行なう。問題がある場合は溶着条件の最適化を行い、より漏れが小さくなる手法を開発する。



図 1: 常温での 3,000 Pa 印加時の気球。

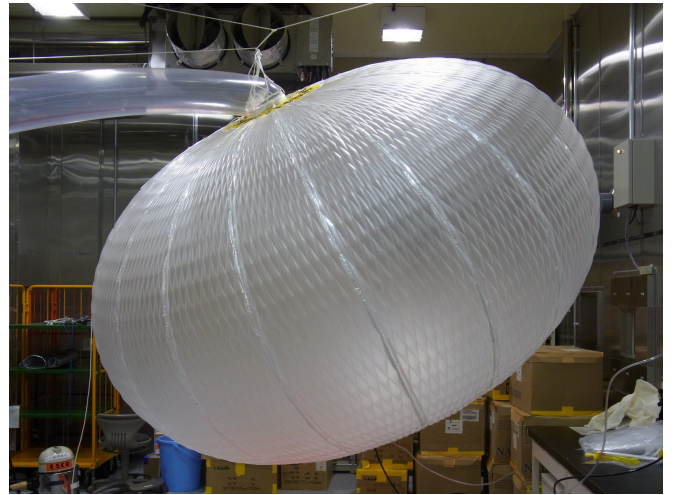


図 2: 低温 (-30°C) での 6,000 Pa 印加時の気球。



図 3: BS13-04 実験の放球。

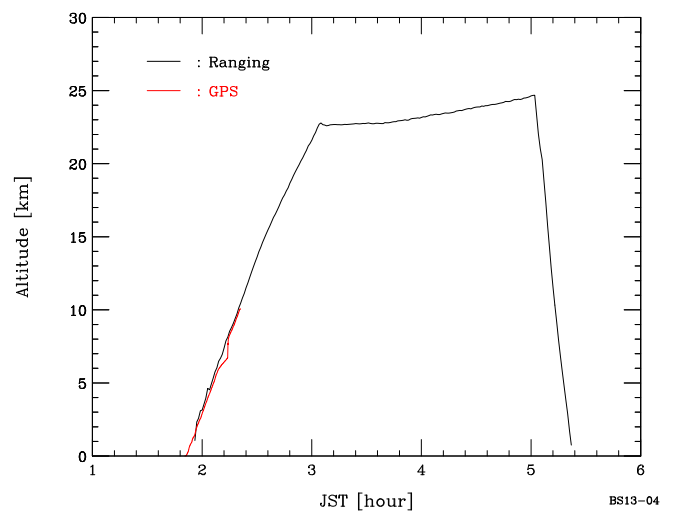


図 4: BS13-04 実験の高度曲線。

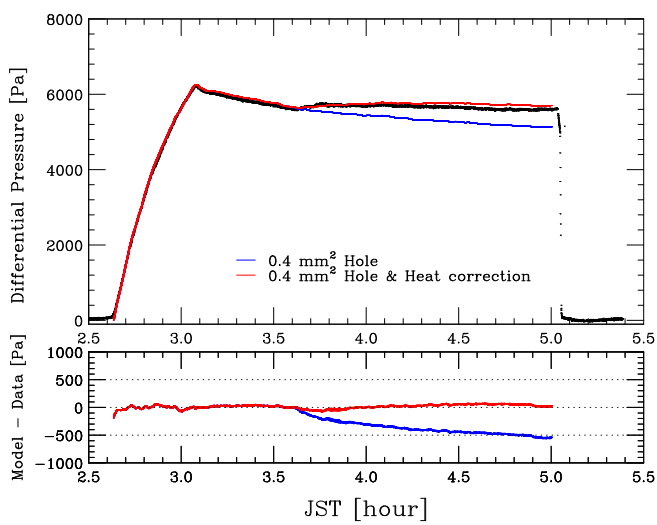


図 5: 気球の差圧の時間変化。モデルとの比較。

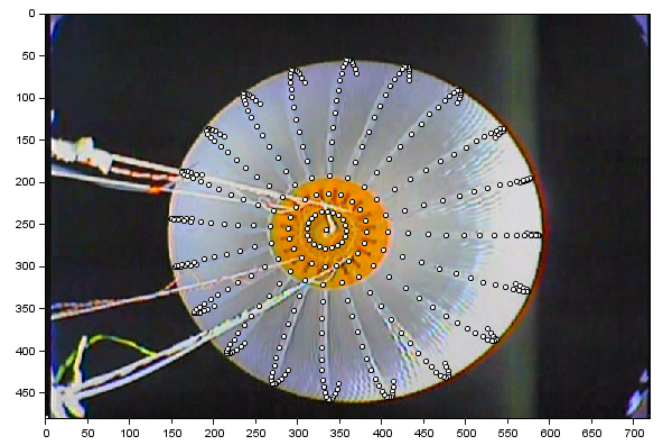


図 6: 得られた画像とかぼちゃ型形状との比較。



図 7: 1 トン吊り下げ用気球尾部金具。



図 8: 網と気球のミシンによる固定。

4 体積 5,000 m³ の気球の飛翔試験の提案 (平成 26 年度)

大型の単独で飛翔する気球にむけた開発項目の実証のため、体積 5,000 m³ の気球の飛翔試験を実施する。搭載機器は、基本搭載機器に加え、大気圧計、SP 気球の内圧測定用の差圧計、地球赤外線放射を観測する放射計、および、SP 気球を撮影する ITV カメラと画像送信機である。実験手順は以下の通りである。

- 300 kg のパラストを搭載した状態で放球し、気球頭部が耐圧性能、尾部の吊り下げ性能が確認される。
- 上昇途中において、パラストを 150 kg 投下し、かつ、排気弁動作を行って上昇速度を適正に保つ。結果として、高度 25 km のレベルフライトに入れる。
- レベルフライトで 30 分間、高度、および、差圧の安定度を測定する。
- 残量のパラストを投下し、1000 Pa 以上の圧力をかける。この際、将来の体積 300,000 m³ と比較して、フィルムには 10 倍、網には 2 倍の張力がかかる試験となる。
- 最後に気球を破壊し、実験を終了させる。

謝辞

気球の膨張試験にあたっては、藤倉航装株式会社の方々、東海大学工学部の草野 悠太さん、森川 和也さん、ISAS/JAXA の田村 誠さん、にお世話になりました。気球の低温膨張試験は、大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構国立極地研究所の低温実験室を利用させていただき、実験にあたっては、森本 真司さん、藤田 秀二さん、石田 依子さん、長元 裕子さん、門倉 昭さん、および、気水圏事務室にお世話になりました。飛翔試験 (BS13-04) 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] 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、宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR, 2013, 受理
- [4] 斎藤 芳隆、他、宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR, 2013, 投稿
- [5] 古田 良介、中篠 恭一、平成 25 年度大気球シンポジウム集録、isas13-sbs-016