

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 (NPB5-1a)

ISAS/JAXA	: 斎藤 芳隆、後藤 健、山田 和彦
東海大学工学部	: 中篠 恭一
東京工業大学院理工学研究科	: 秋田 大輔
明治大学理工学部	: 松尾 卓摩
横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院	: 河端 昌也
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、橋本 紘幸
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、所期の耐圧性能が 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、網線長とフィルム長を一致させる、極のロープリング部の遊びをなくす、といった気球の構造の見直しを行い、直径 3 m の小型気球を製作し、地上試験によって改良が有効であることを確認した。2013 年 5 月には 2 kg のゴム気球に同型の SP 気球を吊り下げて飛翔性能試験を実施した (BS13-04 実験)[4]。その結果、-60 ~ -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、2 時間にわたり 5,600 Pa の差圧に耐えることが確認された。その後、吊り下げ荷重 500 kg に耐え、引き裂き紐との干渉を避けた気球尾部の開発、気密性を確保した排気弁つき気球頭部構造の開発、ミシンを使った網と網、網とフィルムの結合方法の開発を行い、タンデム構成でなく、単独で飛翔試験が実施できる最小サイズである体積 5,000 m³ の小型 SP 気球 (NPB5-1 気球) を製作した。2014 年には、飛翔試験を試みたが、実験機会が得られず、地上試験によって性能を評価した [5]。その結果、気球引き裂き機構の頭部側が 425 Pa で破損し、この部分の強化が必要であることが判明した。本論文では NPB5-1 気球の地上実験以降に進めた SP 気球の開発の経緯、および、今後の開発計画について報告する。

2 体積 5,000 m³ の気球の地上試験結果の検証

2015 年 9 月 24~26 日に実施された体積 5,000 m³ の気球の地上試験では、気球は正常に展開したものの、設計上の耐圧性能は 1,900 Pa のところ、425 Pa の差圧がかかったところで、引き裂き機構のボタンよりも頭部側に数 10 cm² 程度の穴 (図 1) があいた。この強度不足の原因は、引き裂き機構の構造が、貼り付け後に縮む低温テープを長さ 6 m に渡って気球に貼り付けてあるため、低温テープ端部近くの気球フィルムに応力が集中したものと、考えている。これは、以下のような半定量的な推測と辻褄があう。

- 引き裂き部の構造は、図 2 上の上のようにになっている。気球の頭部から引き裂き機構までの間 2,275 mm は、10 μ m 厚の気球フィルムのみである。また、引き裂き機構の長さは 6,000 mm であり、フィラメントテープの上に低温テープ (40 μ m 厚) が貼り付けられている。
- 回収された引き裂き部は縮れており、自然長を測定したところ、150 mm (=2.5 %) 短くなっていた。これは、低温テープが貼り付け後に縮んだことが原因である。このテープ貼り付け後に縮むという現象は、今回利用したロットで顕著に見られた特徴であり、想定外の現象であった。

- 応力歪み曲線によると、400 Pa 印加時、頭部から引き裂き部分の末端までの長さ 9,000 mm の網は 3 % = 270 mm のびることになる。また、円筒気球のパンク割り試験から、15 % 程度の伸びでフィルムはクリープがはじまることが知られている。
- この 270 mm の網の伸びと、低温テープの縮み 150 mm の和に対応する伸びを、気球頭部と引き裂き部分の間の 2,275 mm のフィルムが引き受けたとすると、平均的には、割合にして $(270+75)/2275 = 0.151$ の伸びが発生する必要がある。これは、フィルムがクリープする伸びと同程度の伸びであり、この部位が破裂するのは尤もである。

また、円筒気球にテープを貼り付け、破壊する箇所を調べる実験を実施し、テープが長い場合には、テープ近くのフィルムが破損することが確認された(図 3)。これまでも引裂機構付きの気球の耐圧試験を実施し、問題がないことを確認してきたつもりだったが、過去の気球の引裂部の長さは 2 m と短かったため、応力集中の程度は小さく、十分な試験とはなっていなかった。

この問題に対し、二種類の対策を行った。一つは、図 2 下のように、引き裂き機構のテープ端部の上から低温テープを貼り付け、引き裂き部の頭部側の 10 μm 厚の気球本体フィルムを補強したことである。これにより、引き裂き部の低温テープに縮みが発生したとしても新規に貼り付けた低温テープも同様に縮む。したがって、気球の膨張に伴って発生する応力は、低温テープの縮みが解消するまで、フィルムでなく低温テープが負担することとなり、フィルムへの応力の集中を避けることができる。テープを貼り付けたことで、引き裂き開始時の力は増えるが、試作品での破壊開始強度試験により 4 kg の力で破壊が開始することが確認されており、その影響は十分小さい。

もう一つの対策は、これまで同一にしていた網とフィルムの長さの関係を変更し、網の長さをフィルムの長さよりも 3 % 短くしたことである。これにより、引き裂きテープ部分など、フィルムに局所的な引きつれがあったとしても、フィルムに力がかかる前に網が力を負担し、引きつれの影響が緩和されると考えられる。

3 改良版体積 5,000 m³ の気球の地上試験

上の対策を施した改良版体積 5,000 m³ の気球の地上膨張、破壊試験を、平成 27 年 6 月 16 日に大樹航空宇宙実験場 JAXA 格納庫で実施した。この気球は、平成 26 年 9 月に地上試験で利用した気球を改修したもので、引き裂き機構と気球頭部の間に低温テープを貼り付け、テープ端部への応力の集中を緩和すると共に、気球の上半分の網の長さを 3 % 縮め、網が伸びるまではフィルムに張力がかからなくする改良を施したものである。

前回同様に、天井から気球を吊り下げ、ブロウワで空気を注入し、図 4 のように膨張させた。当日は十分に意識していなかったが、非対称に展開しており、凹凸が発生していることがわかる。図 5 は尾部から気球内部を覗きこんだところである。頭部から左上へ向かう白い構造はガス注入口であるが、下へ向かう白い構造はフィルムが重なっているものである。さらに加圧を続けたところ、348 Pa の差圧がかかったところで気球が破裂した(図 6)。撮影したビデオカメラ映像の解析や気球の破壊状況の調査から、まず、網の端部の折り返し部分がはずれ、次に網が連続的に破断し、最後に網に覆われなくなったフィルム部が破壊したことが判明している。破壊の起点となった網端部の破壊状況を調べたところ、製造上の問題があることが判明し、強度が所期の強度の半分程度に落ちていた可能性があることがわかった。しかし、それでも平均的に網端部にかかった応力の倍の強度に耐える強度があり、これだけが破壊の原因ではない。上に加えて、網の長さを縮めたことで、子午線方向だけでなく周方向も小さい状態で気球が展開してしまったため、フィルムが展開せず、結果として網が不均等に配置され、一部の網端部に力が集中したという可能性はないか、数値シミュレーションによる検証を進めている [6]。また、網が連続的に破壊する可能性についても数値シミュレーションによる検証を進めおり、頭部のみを模擬した二次元のモデルでは、折り返し部分がはずれると隣の網線に大きな応力が発生することが判明し、より定量的な評価を進めているところである [6]。

今回発生した問題はゴアの形状を長手方向のみ伸ばした形状とすることで解消できると考えられる。そこで、まず、11 月に体積 10 m³ の気球を製作し、地上膨張試験を実施し、この対策が有効であることを確認する。次に、体積 2,000 m³ の気球を製作し、1 月に地上膨張試験を実施し、有効性を確認する。その上で飛翔試験用に体積 7,000 m³ 気球の設計、製作をする予定である。体積 2,000 m³ は、体積 7,000 m³ に比べて小さいが、スケール則によって大局的な構造強度の検証は可能である。また、引裂機構部の改良といった局所的



図 1: 引き裂きボタン近くの破損箇所。

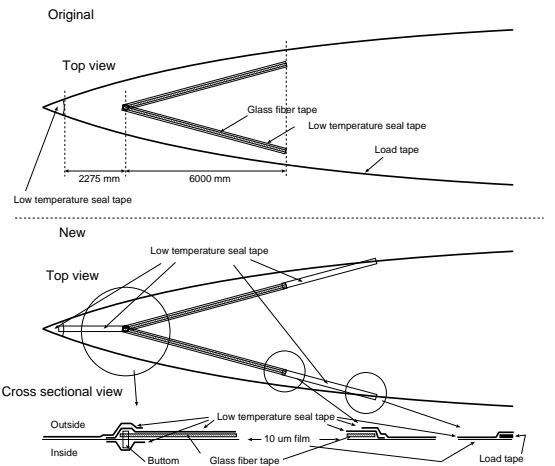


図 2: 引き裂き機構の構造と改良方法。

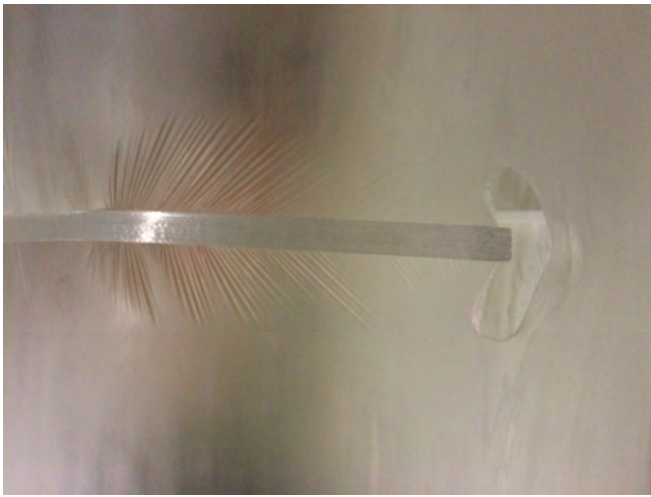


図 3: 円筒気球にテープを貼り付けて加圧、破裂させた結果。テープの端部のフィルムが破損する。



図 4: ひずみながら満膨張となった気球。



図 5: 気球尾部から覗き込んだ気球内部。

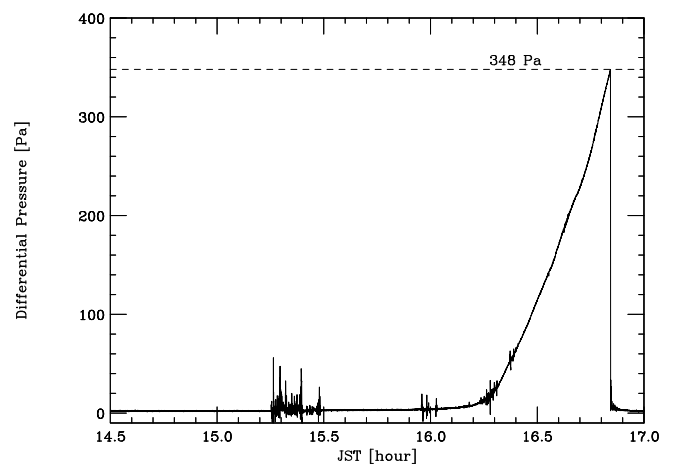


図 6: 気球にかかった差圧の時間変化。

な構造強度確認においても、全長は 24 m あり、6 m の引裂機構部を確認するのに十分な大きさである。逆に体積 5,000 m³ の試験には JAXA 格納庫を利用せざるを得なかったが、一般的な体育館で試験が実施できる大きさであり、上からの気球形状確認ができるといったメリットがある。

4 体積 7,000 m³ の気球の飛翔試験の提案

平成 28 年度には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 7,000 m³ の気球の飛翔試験を計画している。平成 26 年度に計画していた気球よりも体積を増し、気球を回収可能な領域に戻ってくる際の高度が 30 hPa を越えるようにすることで、戻り風が得られる機会を増加させたものである。

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り搭載機器は 2014 年に実施準備を完了した B14-03 実験のものを流用する予定である。また、将来の長時間飛翔実験における通信機器として、イリジウム衛星を用いた通信システムを搭載し、動作確認を行なう。実験手順は以下の通りである。

- 300 kg のバラストを搭載した状態で放球する。これにより、気球頭部が大浮力に耐えること、尾部が大重量の吊り下げに耐えること、が確認される。
- 上昇途中において、バラストを投下し、かつ、排気弁動作を行って上昇速度を適正に保つ。なお、回収可能領域に気球が到達する以前には、加圧しないものとする。
- 結果として、高度 26.5 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。
- 残量のバラストを投下し、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。飛翔条件が許されない場合には、最悪、500 Pa の加圧条件まで許容し、実験を実施することを優先させる。
- 最後に気球を破壊し、実験を終了させる。

謝辞

伸びないテープがシリンダー気球に貼り付けられた際、テープの端部に応力が集中して気球が破裂する現象の検証実験は、総合研究大学院大学の Ario Birmiawan さんと行いました。気球の膨張試験にあたっては、ISAS/JAXA の飯嶋 一征さん、松坂 幸彦さん、総合研究大学院大学の江口 光さん、東海大学工学部の中村 聡さん、東京工業大学院理工学研究科の今井 裕太さん、井上 陽晴さん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、JAXA-RR-13-011, pp.1-33, 2014
- [4] 斎藤 芳隆、他、JAXA-RR-13-011, pp.35-60, 2014
- [5] 斎藤 芳隆、他、平成 26 年度大気球シンポジウム集録, isas14-sbs-012, 2014
- [6] 中篠 恭一、他、平成 27 年度大気球シンポジウム集録, isas15-sbs-009, 2015