

俵型気球の地上膨張試験

井筒直樹¹, 飯嶋一征¹, 加藤洋一¹, 梯 友哉¹, 斎藤芳隆¹, 佐藤崇俊¹, 莊司泰弘¹
 田村啓輔¹, 福家英之¹, 松坂幸彦¹, 松嶋清穂², 水田栄一³, 吉田哲也¹

¹宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ²藤倉航装株式会社, ³宇宙航空研究開発機構 研究開発本部

1 はじめに

俵型スーパープレッシャー気球(SPB)[1,2]は、図1に示すように、従来のlobed-pumpkin型SPBの赤道部断面形状を延長した円筒部を有する。この円筒部分は、lobed-pumpkin型SPBの赤道部でゴアがロープ間で外側に張り出して小さな曲率半径を形成する構造をそのまま継承している。そのため、円筒部を縦断している縦ロープが本来の半径位置に留まるように、各縦ロープ間の距離を拘束する横ロープを気球の外側からまわし縦ロープとの交点を結合する構造を持つ。その結果、円筒部の皮膜にもそれ以外の部分と同様に縦横両方向に余剰が生じるとともに小さなバルジが形成され、耐圧性能はlobed-pumpkin型SPBと同等となる[1,2]。

俵型気球は多くの利点を有するとともに、lobed-pumpkin型気球とは異なり、ゴア数を増しても気球の全ゴアが正常展開することがわかっている[3]。昨年度、容積5,000m³の俵型気球の飛行試験を実施したが、気球はスーパープレッシャー状態になったものの加圧過程で気球底部のパネルが破断した[4]。この不具合原因を調べ対策を講じるために地上膨張試験を実施したので、その結果について述べる。

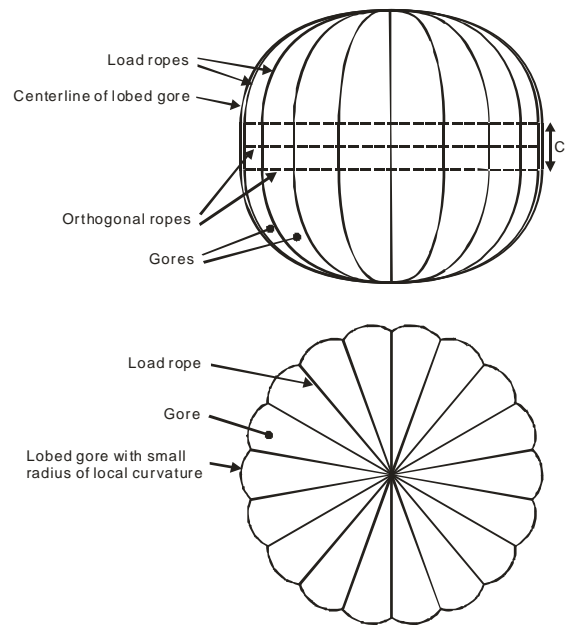


図1 俵型気球の形状

2 飛行試験の結果と破断過程

飛行試験用気球(B10-03)は2010年8月27日に放球され正常速度で上昇し、高度24.5km程度から気球底部の差圧が正になった。その後100Paまで上昇した高度25.1kmにおいて、パネルの1枚が破断して縦に裂け(図2)、気球はゼロプレッシャー状態となり緩降下を始めた。破断した原因を特定するために、まず、映像とカメラの位置・画角の関係から図3に示すように破断開始点が尾部から8~9mの位置であることを求めた。この点は円筒部下端から約4.5m下にある。映像を詳細に分析すると、まずパネルの一部がへこんだ(伸びた)ように見えた後に、溶着部付近に小さな穴が生じそこから

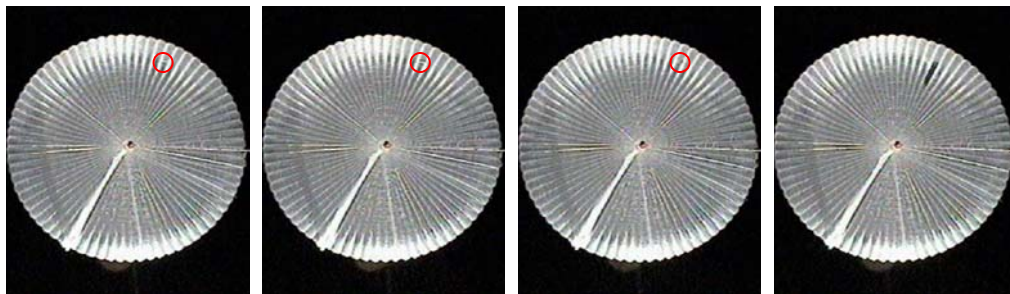


図2 気球下部破断の過程(ゴンドラからの映像, 4/30秒ごと, 赤丸は破断開始位置)

小片が飛び出すとともに、まず横方向に裂け、次にパネルの尾部に向かって裂け目が広がったことがわかる(図2)。

このようなことから、パネルが子午線方向に引っ張られてゴアの縁から破断したと推定される。その主要因として、パネルの子午線方向のゆとり(この気球では短縮率 5%相当)が何らかの理由によりなくなったことが考えられる。その原因として横ロープによるフィルムの上方向への移動が疑われた。気球は頭部から下部に向かって順に膨らむため、まず、横ロープの上側のフィルムが内圧により外側に押し出され、その際、フィルムは規定の位置から上側に移動することが予想される。この現象の有無と加圧に伴う振る舞いを地上膨張試験によって確認することとした。

3 地上膨張試験

表 1 に本試験で使用した気球の諸元を示す。#4-1 は B10-03 で飛行させた気球と同一仕様の気球である。#4-2 は #4-1 の円筒部上端から円筒部下端より下 4.5m 位置(破断開始点)までの範囲で短縮率を 5% から 10% に変更したもので、この区間のみ余裕が 5% 追加されている。また、気球の円筒部上端から円筒部下端の各横ロープが位置するパネル部分には、あらかじめ水平の線が描かれており、この線とロープの間隔を測定することにより各パネルのフィルムずれ量を求めることができる。

試験は大樹航空宇宙実験場の格納庫内にて行われた。それぞれの気球にヘリウムガスを注入し飛行時と同一の総浮力

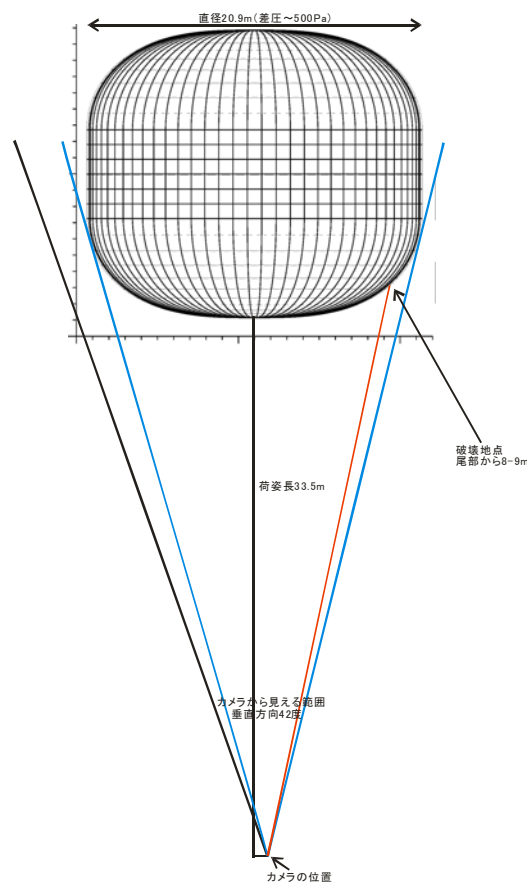


図3 気球破断開始点

表 1 試験用気球の諸元

| モデル番号 | #4-1 | #4-2 |
|------------------------|---------|--------------|
| 気球容積 (m ³) | 5,000 | 5,000 |
| 直径 (m) | 20.9 | 20.9 |
| 子午線長 (m) | 32.9 | 32.9 |
| ゴア数 (縦ロープ数) | 72 | 72 |
| 気球高さ(m) | 18.0 | 18.0 |
| 円筒部の長さ (m) | 5.5 | 5.5 |
| 横ロープ数 | 7 | 7 |
| アスペクト比 | 0.86 | 0.86 |
| ゴア最大幅 (m) | 0.96 | 0.96 |
| 最大試験差圧(尾部) (Pa) | 104 | 452 |
| ガスの種類 | ヘリウム・空気 | ヘリウム・空気 |
| 短縮率 | 5% | 5% (一部 10%*) |

*#4-1 の円筒部上端から円筒部下端+4.5m までの範囲のみ 10%



図4 立て上げ直後の気球(#4-1)

(約180kg)で立て上げ(図4),その後,送風機によって満膨張まで空気を入れ続けた。満膨張後に,高所作業車を用いて,円筒部上端,中央,下端の3箇所について全72パネルのフィルム移動量を測定した(図5)。

試験の結果,図6に示すように,フィルムの上方向へのずれが発生することが確認された。また,フィルムの移動量はパネルごとに異なるが,基本的には圧力差が大きくなるにつれて小さい小さくなることがわかった。全72枚のパネル中の最大移動量に着目すると,円筒部下端で大きい,円筒部中央・上端では小さくその差は小さかった。また,#4-1と#4-2でフィルムの最大移動量に差は見られなかったが,フィルムの大きな移動が生じている部分では,#4-2の方が,余剰が多い分フィルム上のしわの方向も水平に近く余裕が見られた。

測定終了後,#4-2を送風機の限界差圧の450Pa(設計耐圧1kPaの45%)まで加圧したが気球に問題はなかった。



図5 フィルムの移動量の測定

4 試験の結果と対策

図7は測定時の圧力差と各高さ位置における最大フィルム移動量の関係を示している。この図より,気球#4-1と#4-2のデータは同一線上にあると見なすことができ両者の差はないと考えられる。また,円筒部下端のみ移動量が大きく,中央と上端は同程度で小さい。満膨張到達時(気球底部の圧力差がない状態)では,円筒部下端でのフィルムの最大移動量は112mm,圧力差が80Paでは35mm程度であった。

円筒部下端から飛翔時のパネル破断開始点までの距離は約4.5mであり,35mmは全長の約0.8%に相当する。この量はあらかじめフィルムに与えられている余剰(短縮率)5%よりかなり小さく,この移動量が残ったとしてもこのことだけでフィルム破断を説明することはできない。しかし,圧力差0時点での最大移動量112mmは円筒部下端から飛翔時のパネル破断開始点までの距離の約2.5%に相当する。

一方,気球容積が $5,000\text{m}^3$ と小さいため,縦ロープ間でゴアが小さな曲率半径で膨らむために必要となるゴアセンターの外側への移動量は大型気球よりも大きい。つまり,図8に示すように,ゴアセンターにそう長さは縦ロープ位置の子午線長さよりかなり長くないと所定のバルジが形成されない。この長さの差を円筒部下端から破断開始点までの4.5mの区間で求めると約1.8%となる。したがって,あらかじめ与えられている余剰5%のう



図6 フィルム移動量の変化例(#4-2, 左:0Pa, 右:80Pa)

ちフィルムの移動とゴア中央の外側への移動とを合わせた 4.3%を使うことになり余剰の残りは 0.7%となる。

逆に、短縮率 5%分を消費するフィルム移動量を計算すると 144mm となる。すなわち、もし、円筒部下端で 144mm のフィルム移動が圧力差 100Pa 時点で残っていれば、フィルムの子午線方向には大きな張力が発生し、気球耐圧は子午線方向曲率半径によって決まるといえる。破断開始点における子午線方向の曲率半径は約 7m であり、バルジの最大半径 0.8m の約 9 倍になる。耐圧は設計値 1kPa の約 1/9 となり 100Pa で破壊した状況に近い数値が得られる。

このような大きなフィルム移動量が残る状況は地上試験では発生しなかった。しかし、膨張速度が実機では 0 から 80Pa まで 100 秒かかっているのに対して地上試験では送風機的能力により 2000 秒要し約 1/20 であった違いが影響した可能性が考えられる。また、折りたたまれて Cleft が形成された状態からの膨張過程は毎回異なっていることも関係しているかもしれない。もし 144mm のフィルム移動が残ったまま加圧されたと仮定すると飛行時の気球破壊を説明することが可能となる。

このような移動量が発生したとしても、#4-2 のように不足すると想定される区間に余剰を追加すれば設定された短縮率を確保することができ耐圧も保たれる。このような追加の余剰を加えた際の気球の重量増加は 0.8% 程度でありペイロード搭載能力に大きな影響はない。今後、このような改良を加えた仮型気球を製作し飛行試験によってその是非を確認したい。

5 おわりに

2010 年に実施した飛行試験 (B10-03) で使用した仮型気球の不具合原因を調べるために同種のモデルを用いた地上膨張試験を実施した。その結果、横ロープの影響によってフィルムの上方向への移動が発生することがわかった。大きなフィルム移動量が保持されたまま加圧されたと仮定すると気球が破壊した状況を説明することが可能である。また、適宜余剰量を増やすことによりこのような状態が回避できることも示され、今後の飛行試験によって確認したいと考える。

本研究の一部は科学研究費補助金 (19360385) の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] 井筒直樹, 他: 平成 20 年度大気球シンポジウム, 49-52, 2008.
- [2] 井筒直樹, 他: 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-10-013, 1-24, 2011.
- [3] 福家英之, 他: 平成 22 年度大気球シンポジウム, 9-12, 2010.
- [4] 井筒直樹, 他: 平成 22 年度大気球シンポジウム, 13-16, 2010.

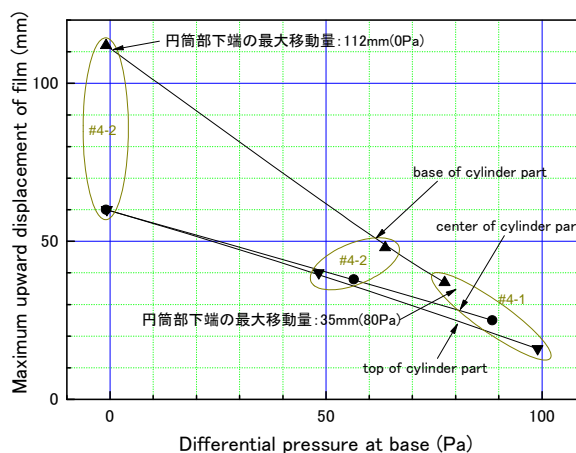


図 7 フィルムの最大移動量と圧力差の関係

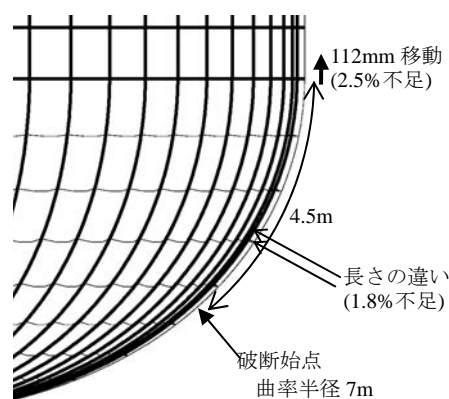


図 8 フィルムの移動と余剰