

# 俵型気球の開発と応用

井筒直樹<sup>1</sup>, 飯嶋一征<sup>1</sup>, 梯 友哉<sup>1</sup>, 加藤洋一<sup>1</sup>, 佐藤崇俊<sup>1</sup>, 莊司泰弘<sup>1</sup>, 田中茂樹<sup>2</sup>,  
田村 誠<sup>1</sup>, 新田宏大<sup>2</sup>, 濱田 要<sup>1</sup>, 福家英之<sup>1</sup>, 松坂幸彦<sup>1</sup>, 松嶋清穂<sup>2</sup>, 吉田哲也<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, <sup>2</sup>藤倉航装株式会社

## 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[3]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]。

本報告では、これまでの俵型 SPB の開発の経緯、今年度実施した地上試験の結果について述べる。また、俵型気球の応用面(俵型気球の本来の目的であった SPB の大型化と Powered balloon への適用, 容積可変型 SPB)についてもふれる。

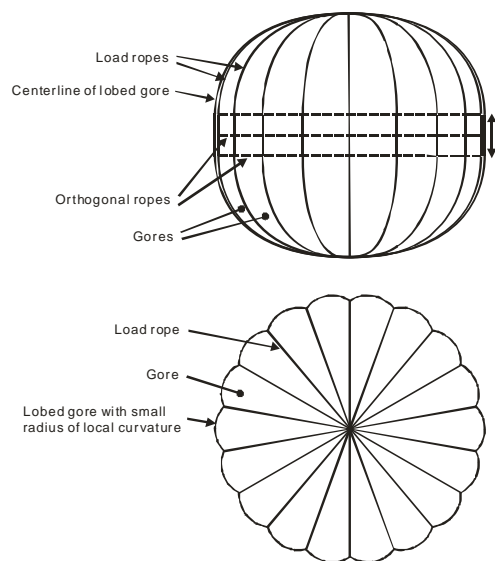


図 1 俵型気球の形状

## 2 俵型気球の開発

俵型 SPB の目的の一つは、SPB の大型化を容易にすることにあった。SPB では、基本的に、ある飛行高度に対して要求される耐圧性能は容積に関係なく同一であり、その時の差圧は気球赤道部の断面積に比例する。図 1 に示すように、俵型気球は、直径を変えずに円筒部の長さのみを変えることによって、頭部・尾部金具、フィルム、ロープの強度変更を行うことなく、また、ゴア的设计変更を伴わずに、気球容積の変更を可能にする。また、もう一つの目的は、気球の円筒部を長くとした形状により、気球本体の空気抵抗を従来のゼロプレッシャー気球と比較して大きく減少させることにあった。空気抵抗が減少すれば、何らかの推進力を与える機構を搭載することにより、能動的な進路変更の可能性が開ける。

その後、lobed-pumpkin 型 SPB のゴア数を増すと図 2 に示すような気球の変形が発生し、耐圧性能が低下することが判明した[4,5]。それに対して、俵型 SPB ではゴア数を増加させても、常に気球の全ゴアが正常に展開する(図3)利点があることがわかった[5,6]。表 1 にこれまでに実施した試験の一覧を示す。



図 2 変形した lobed-pumpkin 型 SPB



図 3 俵型 SPB (PB60S-2')

表 1 これまでに実施した俵型気球の試験

モデル	tawara1	tawara2	tawara3	PB60S-3	PB60S-2'	PB60S-3	tawara4	tawara4S1	tawara4S2	tawara4S3
実験目的	耐圧試験	膨張試験	形状計測 引裂機構	展開試験	展開試験	展開試験	飛翔試験	横ロープ 影響計測	横ロープ 影響計測	ポリエチレン 引裂機構
気球容積 (m <sup>3</sup> )	19	190	1,000	3,200	2,200	3,200	5,000	5,000	5,000	5,000
直径 (m)	2.9	5.8	11.6	18.6	17.3	18.6	20.9	20.9	20.9	20.9
子午線長 (m)	5.6	12.6	20.8	28.0	24.4	28.0	32.9	32.9	32.9	32.9
ゴア数 縦ロープ数	24	48	40	192	192	192	72	72	72	96
気球高さ (m)	3.3	8.1	11.6	14.8	12.1	14.8	18.0	18.0	18.0	18.0
円筒部の 長さ(m)	1.6	4.6	4.6	3.7	1.7	3.7	5.5	5.5	5.5	5.5
横ロープ数	7	13	6	13	7	13	7	7	7	9
アスペクト比	1.4	1.4	1.0	0.8	0.7	0.8	0.86	0.86	0.86	0.86
ゴア最大幅 (m)	0.40	0.40	0.96	0.32	0.32	0.32	0.96	0.96	0.96	0.72
質量 (kg)	-	-	-	71	62	71	102	99	101	119
最大試験 差圧(Pa)	7,340 (破壊)	200	600	40	57	24	100 (破壊)	104	452	502
ガスの種類	空気	ヘリウム	空気	ヘリウム・ 空気	ヘリウム・ 空気	空気	ヘリウム	ヘリウム・ 空気	ヘリウム・ 空気	ヘリウム・ 空気
短縮率(%)	5	5	5	5	5	5	5	5	5(10)	5(10)
試験日	2007/7/30	2007/9/9	2008/3/18	2010/5/19	2010/9/3	2010/9/9	2010/8/27	2011/6/10	2011/6/12	2013/9/13

tawara4S1 : 飛翔モデルtawara4と同一仕様

tawara4S2,S3: 4S1の円筒部上端から円筒部下端+4.5mの範囲で子午線方向にのみ5%の余剰を追加(この区間の短縮率10%相当)

一方、容積 5,000m<sup>3</sup> の俵型気球の飛翔試験(B10-03)を実施したが、この気球は、スーパープレッシャー状態となったものの、100Pa まで上昇した時点で気球下部のパネルが破断した[7]。こ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[8]。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実験により示され、上記不具合が解消できる見込みが得られた[8]。

しかし、なお、以下の未解決の問題が以前より認識されていた。

- (1) 低温環境下で気球が破裂したときに気球フィルムが飛び散る。これは、シェルに使用しているフィルム BH25 の低温特性による。結果的に回収が困難となる。
- (2) フィルム、ロープの両方とも比重が 1 より大きく、気球が海面に浮かない。そのため、海上では回収が困難である。
- (3) フィルムが強度を持ち、ゼロプレッシャー気球(ZPB)に使われている引き裂き機構が使えないため、引き裂き部に刃を使用していた。したがって、引き裂き部がロープに引っかかる可能性が残るため、引き裂き紐を切り離せるようにしなければならない。回収時の取り扱いに注意も必要となる。

### 3 今年度実施した地上試験

前節で述べた課題を解決するため、以下の改良を加えた気球(tawara4S3, 表 1 参照)を製作した。

- (1) 本体フィルムは、25 μm 厚の BH25(比重 1.06)の代わりに 30 μm 厚のポリエチレンフィルム(比重 0.9)とする。フィルムの強度は 6 割程度に低下するが、目的とする差圧に対しては十分なマージンがある。
- (2) 縦・横ロープにアラミド(比重 1.44)の代わりにスペクトラ(ダイニーマ, 比重 0.97)を使用する。スペクトラはクリープ特性がよくないが、荷重比 0.2 の場合で 200 時間以下では問題にならない。単位重量あたりの強度が高いので同じ重量ならば安全倍率を大きくとることができ、耐候性も問題ない。
- (3) 引き裂き機構は、ZPBと同機構(金属ボタン付き逆V字型引き裂きテープ)とし、薄膜軽量気球に採用されている引き裂きガイドテープ付き[9]とし、安定した低引き裂き力を実現する。また、気密を保つために

引き裂き紐の尾部貫通部にも金属ボタンを配置した。

なお、本気球は、通常の飛行用 SPB に要求されているキャップ(20 $\mu$ m 厚)付きとした。また、tawara4S2 と性能を比較するため、ゴア幅を tawara4S2 の 75%とし、同程度の破壊圧力設計値が得られるようにした。なお、ZPB と同じ設計強度評価を行うと、耐圧は 450Pa であり、実機での要求値の 2.5 倍となる。

地上試験は、2013 年 9 月 12~13 日に大樹航空宇宙実験場の飛行船格納庫内で実施した。試験気球の頭部、尾部の差圧、気球下部の内部温度、大気圧を計測した。まず、気球にヘリウムガスを注入し、浮力 170kg で立て上げた後に、送風機により満膨張になるまで空気を充填し、さらに差圧 500Pa まで加圧した(図 4)。

各部のフィルムの上方向への移動量は tawara4S2 と同程度であり、キャップ端部分、円筒部、下部のフィルム余剰を追加した部分とも膨張状態に問題は見られず、下部のフィルムの余剰も tawara4S2 同様、最後まで残っていることを確認した(図 5)。引き裂き機構の取り付け部、引き紐の尾部貫通部の気密・耐圧性能への影響がないことも確認した。この気球の重量は tawara4S2 の約 1.2 倍であるが、ゴア数を同じにすれば 1.1 倍程度にすることができる。今回の試験結果からは、ゴア数を同等にしても要求される耐圧性能は満たされると考えられる。

約 500Pa までの加圧で問題ないことを確認した後に、引き裂き機構の動作試験を実施した。差圧を実機で使用される差圧の上限と想定される 180Pa 程度まで下げた後に、引き紐を人力で下方に引っ張り、その際の引き裂き力とパネルの引き裂き状況を確認した(図 6)。その結果、尾部貫通部のボタン部の引き裂き力が約 10kg、頭部の引き裂きテープ部の初期引き裂き力(ピーク値)が約 30kg であることがわかった。なお、事前に実施した単体での静的引き裂き試験では最大 24.4kg(本気球同様の 30 $\mu$ m+20 $\mu$ m 厚構成)であった。また、今回のモデルでは引き裂きテープの長さを 6m としたため、その末端でパネルが破断した。実機では円筒部までの長さとする予定である。

#### 4 俵型気球の応用例

俵型気球の本来の目的の一つであった、同一設計の気球の円筒部だけを伸長させた容積の異なる気球の成立性を確認した。直径 5.7m、アスペクト比 0.86 の気球を基準に、アスペクト比 2.72 の気球を製作し膨張試験を実施した。体積比は約 3.7 となる。同一のアスペクト比で製作した気球と比較すると重量は 8%程度増加する[2]。製作工程、膨張過程に問題はなく、加圧して張力が大きい場合でも、気球の変形やゆがみは見られなかった(図 7)。この試験により、気球の重量増を押さえつつ容積を変更した気球が容易に製作できることが確かめられた。



図 4 加圧試験(tawara4S3), 圧力差 500Pa



図 5 キャップ端部と下部の拡大図(tawara4S3), 圧力差 500Pa

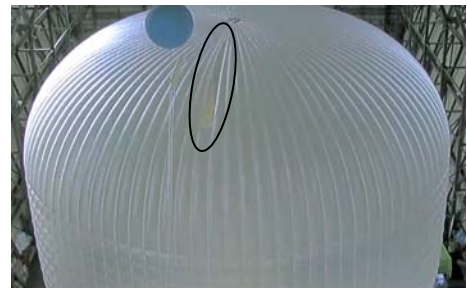


図 6 引き裂き後のパネルの状態



もう一つの目的であった、Powered balloon への応用についても図 8 に示す小型モデルを製作し、図 7 に示す通常の気球の状態から水平状態への移行方法についての検討と試験を実施した(図 9)。このモデルでは、推進機を保持する部分は放球時に部分的に空気を注入した状態を考え、上空で自動的に膨張するインフレータブル構造(ケブラー3 軸織, ウレタンコーティング)として試作した。ペイロードは頭部・下部間に渡されたロープに下げることを想定する(図 9)。直径が小さくなることによる上昇速度の増大が懸念されるが、最大でも 1.4 倍程度と見込まれ問題ない範囲と思われる。

一方, Lobed-pumpkin 型気球の考案時に提案された容積可変型気球[10]についても、俵型気球と極間距離を制御する方法(図 10 左)によれば可能となる。通常の俵型気球であれば、0.7 倍までの容積変更が可能であり(図 10 右)、高度換算では 1.5km となる。高度可変型気球が実現できれば、長時間飛翔の SPB とは別の用途として、短時間飛翔における飛翔方向制御に応用できる可能性がある。例えば、日中の運用に限れば、スーパープレッシャー圧は十分に小さくすることができ、気球への耐圧もそれほど要求されない。気球重量も軽減でき、ZPB に近いものが実現できる。なお、体積変更による差圧増大はないが、断熱圧縮(膨張)による温度変化を考慮する必要がある。



図 7 円筒部を伸長した俵型気球

#### 4 おわりに

これまでに実施した俵型気球の一連の試験により、実用化に目処がついたと考えられる。また、この種の気球の応用例について述べた。引き続き、検討および試験を実施していく予定である。

本研究の一部は科学研究費補助金(22360362)の助成を受けて行われた。



図 8 Powered balloon モデルの試作

#### 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] N. Yajima: Adv. Space Res., 26, 1357-1360, 2000.
- [4] 福家英之, 他: 平成 21 年度大気球シンポジウム, 13-16, 2009.
- [5] 福家英之, 他: 平成 22 年度大気球シンポジウム, 9-12, 2010.
- [6] H. Fuke, et al.: Adv. Space Res., 48, 1136-1146, 2011.
- [7] 井筒直樹, 他: 平成 22 年度大気球シンポジウム, 13-16, 2010.
- [8] 井筒直樹, 他: 平成 23 年度大気球シンポジウム, isas11-sbs- 030, 2011.
- [9] 井筒直樹, 他: 平成 24 年度大気球シンポジウム, isas12-sbs- 015, 2012.
- [10] N. Yajima, et al.: Adv. Space Res., 33, 1694-1699, 2004

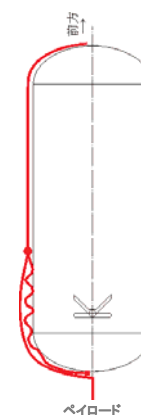


図 9 Powered balloon の吊り下げ部の構成例

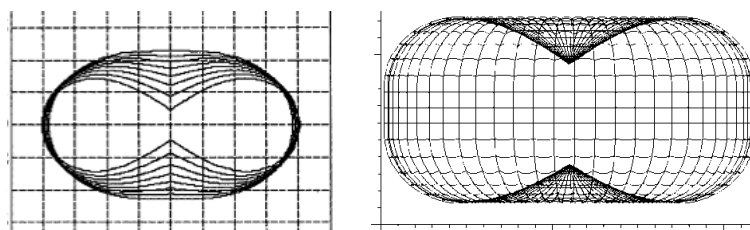


図 10 体積可変型気球(左:lobed-pumpkin 型気球, 右:体積比 0.7 の俵型気球)