

## 薄膜高高度気球 (BVT80 型) の開発

ISAS/JAXA : 斎藤 芳隆、飯嶋 一征、井筒 直樹、加藤 洋一、梯 友哉、  
: 佐藤 崇俊、莊司 泰弘、田村 啓輔、鳥海 道彦、並木 道義、  
: 水田 栄一、福家 英之、松坂 幸彦、山田 和彦、吉田 哲也  
藤倉航装 (株) : 松嶋 清穂、田中 茂樹

### 1 はじめに

宇宙科学研究所大気球実験室では、数 kg の搭載機器をより高い高度に飛翔させるべく、薄膜高高度気球の開発を進めている。1997 年からは、薄い気球フィルムの開発を始め、2002 年には  $3.4 \mu\text{m}$  厚フィルムを用いた体積  $60,000 \text{ m}^3$  の気球により、高度 53 km の到達に成功した [1]。その後、2003 年に  $2.8 \mu\text{m}$  厚フィルムを開発し、2004 年には体積  $5,000 \text{ m}^3$  の気球の飛翔に成功した [2]。しかし、2005 年、2006 年、2007 年と体積  $60,000 \text{ m}^3$  の気球の飛翔に挑戦したが、いずれも予定高度に達することなく、降下している [3]。本論文では、BVT60 型気球に関して行なった調査、改良について述べ、BVT80 型気球の開発と飛翔試験結果について報告する。

### 2 BVT60 型気球の問題点

BVT60 型気球の不具合に対応して、1. フィルムの強度が不十分だった、2. 構造的にフィルムやロードテープに要求される強度が大きかった、3. 放球時に気球に損傷を与えていた、可能性について検討し、以下の対応を行なった。

#### 2.1 $2.8 \mu\text{m}$ 厚フィルムの特性調査

宇宙研では、気球フィルムの評価として、一軸での引張強度試験を縦方向 (MD)、横方向 (TD) に関して、常温、 $-40$  度、 $-80$  度について実施してきた。しかし、以下の点で不具合のある可能性が見出され、個別の試験により検証を行なった [4]。

- 従来、強度や伸びが小さいデータが得られた場合には、供試体の不具合として、そのデータを用いずに来たため、値が高くなる方向にバイアスがかかっている可能性があった。このため、他の厚みのフィルムを含め、常温 ( $23$  度) と低温 ( $-40$  度) におけるバイアスを排除した引張強度試験を実施し、 $2.8 \mu\text{m}$  厚フィルムと他の厚みのフィルムの特性を比較した。単位厚みあたりの降伏点強度と伸びは、他のフィルムと同程度であったが、その破断強度と伸びはフィルムが薄くなるにつれて、より小さくなることがわかった。ただし、 $2.8 \mu\text{m}$  厚フィルムが極端に弱いわけではない。
- 上記の引張試験における供試体の面積は  $10 \text{ cm}^2$  以下であり、気球の面積と比較すると大幅に小さく、局部的に弱い部分が存在していたとしてもそれが拾い出せない可能性があった。そこで、気球頭部に匹敵する面積となる、30 個の長さ 10 m の円筒気球に空気を注入し、破裂する圧力の分布を調べた。分布の標準偏差は 2.7 % であり、かつ、最低でも平均値の 94 % の耐圧性能を示しており、十分、均一であることがわかった。
- 引張強度試験は一軸の引っ張りであるが、実際の気球の場合は二軸の応力が働いており、その際に強度が極端に低下する可能性もある。そこで、長さ 3 m の円筒気球に空気を注入し、破裂する圧力を求める試験を他の厚みのフィルムと共に実施し、結果を比較した。円筒気球が破裂する圧力はフィルムの厚みに比例する結果が得られた。
- 気球にガス詰めを始めた以降、フィルムには継続的に力がかかることになるが、引張強度試験は 1 分以下の試験であり、フィルムがクリープすることで極端に劣化する可能性が捨て切れない。そこで、長さ 3 m の円筒気球に圧力を 3 時間にわたってかけても破裂しない圧力を、様々な厚みの気球フィルムに対して求めた。保持できる圧力が厚みに比例する結果が得られた。

- これまで、フィルムの脆化温度は−80度の引張試験結果をより高温の結果と比較することで、−80度以下であることを確認してきた。しかし、粘弾性試験によって直接確認する方が確実である。そこで、常温から−130度までの粘弾性試験を実施し、脆化温度が−130度以下であることを確認した。

これらの試験により、2.8 μm厚フィルムは、低温での破断強度を除き、他の厚みの気球フィルムと同等の性能を有することが確認された。

## 2.2 気球強度基準の検討

満膨張以前の気球の形状は不定形であり、構造強度を強度解析により評価することは極めて困難である。このため、無事に飛翔した気球を基準としてするスケーリング則を気球強度基準として利用してきた [5]。BVT60型の不具合を受け、スケーリング則の背景として考慮していた物理の見直しを以下に行なった。

フィルムにおいては、

$$\sigma_{\max} = \left| \min(r(s), R_m(s)) \frac{\Delta p(s)}{t(s)} \right|_{\max} \quad (1)$$

を用い、地上においては  $\sigma_{\max}$  がフィルムの常温における一軸引張破断強度の  $1/2.25$  以下、上空においては低温(−40度)における一軸引張破断強度の  $1/7$  以下となることとしていた。ここで、 $r$  は対称軸からの距離、 $R_m$  は子午線曲率半径、 $\Delta p$  は気球内外差圧、 $t$  はフィルムの厚み、 $r_f$  はゴア幅の総和を  $2\pi$  で除した値、であり、いずれもゴアに沿った極からの長さ  $s$  の関数である。これは、縦横の曲率半径のうち、小さい方が全圧力を受け持つことを念頭においている。しかし、気球には、二軸の応力がかかっているため、以下のように変更することとした。

$$\sigma_{\max} = \left| \frac{1}{\frac{1}{r(s)} + \frac{1}{R_m(s)}} \frac{\Delta p(s)}{t(s)} \right|_{\max} \quad (2)$$

加えて、フィルムに降伏強度よりも強い力が働いた場合、変形により応力が高まり気球が破壊される可能性があること、上空ではフィルム温度が−40度より高温となる場合もあることを念頭に置き、フィルム側の基準強度を常温の一軸引張降伏強度とし、地上においては  $\sigma_{\max}$  が  $1/1.15$  以下、上空においては同値の  $1/2$  以下とすることとした。

ロードテープに関しては、

$$F_{\max} = \frac{T_{\max}}{\min\left(\text{int}\left(N \frac{r(s_0)}{r_f(s_0)}\right) + 1, N\right)} \quad (3)$$

を用い、 $F_{\max}$  が破断強度の  $1/5$  以下となること、としてきた。ここで、 $T_{\max}$  は全周を積分した張力の最大値、 $N$  はロードテープの総数、 $s_0$  は  $r$  が最大となる位置、である。この式では、フィルムに働く張力を展開したロープによって支えることを想定しているが、張力には差圧に起因するものと、気球構成重量に起因するものがあり、後者は展開しないロープによっても支えられている。そこで、個別に影響を評価する、

$$F_{\max} = \frac{T_{\max} - m_b g}{N \frac{r(s_0)}{r_f(s_0)}} + \frac{m_b g}{N} \quad (4)$$

を用いることとした。ここで、 $m_b g$  は気球質量である。また、従来は、ロードテープのみの破断強度をこれと比較してきたが、実際のフィルムにはロードテープを溶着するための溶着代があり、特に薄膜気球の場合には無視できない強度の寄与がある。そこで、 $F_{\max}$  をロードテープの強度と溶着代の気球フィルムの破断強度の和の  $1/5$  以下とする基準を採用することとした。

これらの基準を用いると、飛翔に成功している気球と比較して、2.8 μm厚フィルムのBVT60型気球はロードテープ(溶着保護テープ)の強度が弱かったことが浮かび上がってきた。たとえば、3.4 μm厚フィルムを用いたBU60型気球では、テープらの強度は  $F_{\max}$  の7.3倍となるのに対して、BVT60型気球では、3.5倍に過ぎない。ロードテープが弱い場合、ロードテープが伸び、それに伴ってフィルムが伸ばされ、破断する可能性がある。

## 2.3 放球方法の検討

従来の薄膜高高度気球の放球は、カラーを兼ねたエアバッグで気球頭部を保持してガスを注入し、気球を伸展させた後に、気球頭部を解放する方式をとってきた [6]。ゴンドラを持った者は風による気球の移動方向に合わせて移動しゴンドラを離す。この方式には、浮力が大きい場合にエアバッグで保持する部分の気球フィルムを損傷する可能性があること、多くの人手が必要であり、気球に触れる機会が多いため、手で触れる際に傷つけるリスクがあること、カラー無しで立ち上げるため帆をはらむように気球が広がりフィルムが損傷する可能性があること、といった欠点があった。特に、今回の BVT80 型においては、気球の全長が 81.1 m、荷姿長も 40 m を越えるため、これらの課題が顕在化する。このため、カラーを装着すると共に、大型放球装置を利用し、極力、人手を介さない方法を考案した。新しい放球方法では、図 1 のように、通常気球と同様にスプーラーで折り返した頭部に格納庫内でガス詰めし、気球が地面をこすらないよう気球の一部を柔らかい布で持ち上げながら、同期走行により格納庫から外へ搬出し、後にスプーラーを解放して気球を立ち上げ、カラーを解放した後、放球装置から切り離して放球する。

この方式を用いるにあたり、カラーの開発と、気球への影響の評価を事前に行なった。カラーのエアバック部には標準型にくらべしなやかな布を用い、巻き付け方向の長さを 30 cm、幅を 16 cm とした。エアバック固定部は、標準型と同様に面ファスナーで二枚張り合わせる構造をとり、その幅は 8 cm、巻き付け方向の長さは 14 cm から 34 cm まで可変とした (図 2)。このカラーを装着した気球を格納庫内で膨らませ、カラーを解放する試験を行ない、後にカラー装着部のフィルムの損傷を調べ、問題ないことを確認した。

スプーラーは、ローラー部の直径が 10 cm、幅が 60 cm、板バネにより解放を補助する小型の装置を利用することとした。20 kg と極めて弱い張力で解放が可能であり、ロック機構は 300 kg までの張力に耐えられる。また、リリース機構は、放球プレートの穴を利用してリング状にかけた紐に荷姿に付けられた金属リングとカッターを通した状態で配置しておき、放球時にその紐をカッターで切断する方式とした (図 3)。

## 3 BVT80 気球の設計、開発

以上の検討により、新しい気球では、ロードテープ (溶着保護テープ) を 10  $\mu\text{m}$  厚 15 mm 幅から 20  $\mu\text{m}$  厚 30 mm 幅と強化した。また、カラーを利用することとしたため、カラー装着部の保護を念頭におき、そこまで二重化するよう頭部に 11 m のキャップを被せた。これにより、地上から高度 30 km に渡る高度においてフィルムにかかる最大応力が低減する。

薄膜気球においてキャップを導入することは初めての試みである。これに伴い、本体とキャップの両方に引き裂き部分を設け、それらを紐で連結させる、新しい引き裂き機構の開発を行なった。試験の結果、800 g の錘を 3 m 落下させた際の平均引き裂き距離は、内側フィルムで 1670 mm、外側フィルムで 1440 mm であった。また、引き裂きに必要平均荷重は、内側フィルムの破断に 11.6 N、外側フィルムに 15.5 N であり、継続引き裂き時の最大値は 10.2 N であった。実際の気球には、300 g の錘が 8 m 落下した後に気球を破壊する機構と、搭載機器を落して破壊する機構の二つ独立な機構を装着した。

また、従来の BVT60 型気球には排気口がなかったが、水平浮遊も可能にするため、ホーステイル型の排気口を新たに開発し、適用することとした。これまで、薄膜高高度気球の排気口は、重量バランスの観点から、気球尾部にフラフープ型を取り付けてきた [7]。しかし、新しい気球破壊機構 [8] においては、気球尾部の配線が複雑になるため、尾部に排気口を設けることは得策ではない。今回の気球では、気球全体重量に対して、排気口部の重量の割合が大きくなるため、ホーステイル型を採用した。実際の気球への適用に先立ち、排気口の試作を行ない、空気を注入して膨らませた状態において、引きつれが生じないこと、その状態で上下左右方向に 1.5 kg の力で引っ張っても支障がないことを確認した。

今回の気球では、ロードテープ、キャップ、排気口を導入することで重量が増えることが推測された。この状態においても BU60 型により到達した最高高度 53 km を越えて飛翔することを可能にするため、体積は 80,000  $\text{m}^3$  とした。実際に製作された気球の重量は 37.08 kg であった。

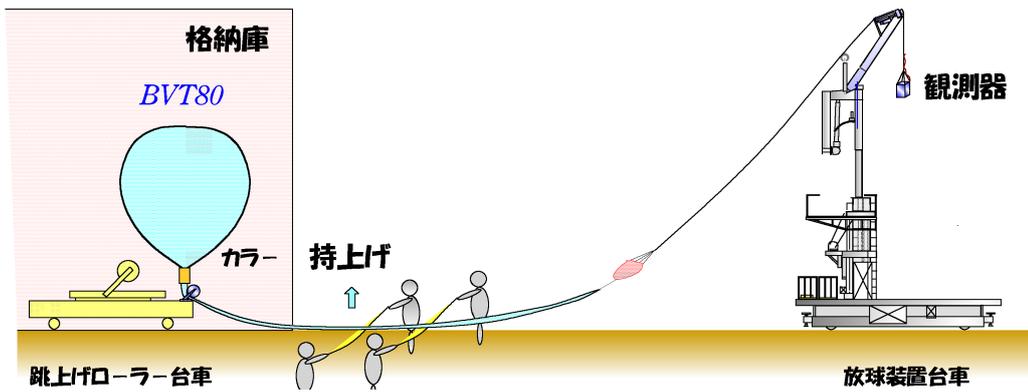


図 1: 大型放球装置を用いた薄膜高高度気球のガス充填時の配置



図 2: 薄膜気球用カラー

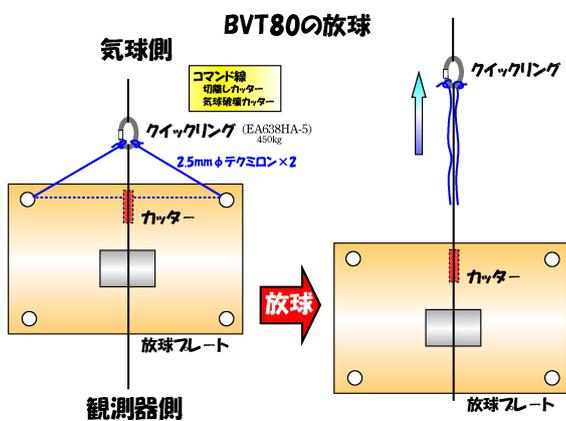


図 3: レリース機構

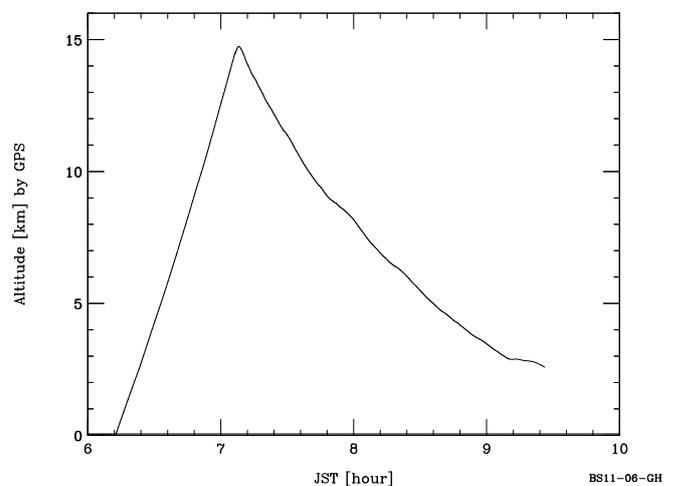


図 4: 気球の高度変化

## 4 飛翔試験

BVT80 型気球の飛翔試験は、BS11-06 実験として、2011 年 9 月 14 日に実施された。全重量は 41.49 kg であり、自由浮力は 23 %とした。先に述べた、大型放球装置を用いる方法で、問題なく放球された。上昇速度 4~5 m で順調に上昇したが、最高到達高度を 14.7 km として、以後、降下した(図 4)。現在、不具合の原因調査を進めているところである。早急に原因をつきとめ、再度、飛翔試験を実施する予定である。

## 参考文献

- [1] 斎藤 芳隆、他、宇宙科学研究所報告 特集第 45 号、pp.1-10, 2003
- [2] 斎藤 芳隆、他、JAXA-RR-04-015 大気球研究報告、pp.13-34, 2005
- [3] 水田 栄一、他、平成 19 年度大気球シンポジウム集録、pp.13-16
- [4] Saito, *et. al*, Submitted to Adv. Space Res., 2011
- [5] Izutsu, *et. al*, Procs of 26th ISTS, 2006-m-14p, 2006
- [6] Matsuzaka, *et. al*, Procs of 20th ISTS, pp.1198-1202, 1996
- [7] Yamagami, *et. al*, Adv. Space Res. **21**, 7, pp.983-986, 1998
- [8] 加藤 洋一、他、平成 20 年度大気球シンポジウム集録、pp.45-48