

# 俵型スーパープレッシャー気球の開発

井筒 直樹<sup>1</sup>, 飯嶋 一征<sup>1</sup>, 加藤 洋一<sup>1</sup>, 斎藤 芳隆<sup>1</sup>, 佐藤 崇俊<sup>1</sup>,  
莊司 泰弘<sup>1</sup>, 高田 淳史<sup>1</sup>, 田村 啓輔<sup>1</sup>, 福家 英之<sup>1</sup>, 松坂 幸彦<sup>1</sup>,  
松嶋 清穂<sup>2</sup>, 水田 栄一<sup>1</sup>, 山田 和彦<sup>1</sup>, 吉田 哲也<sup>1</sup>

## Development of Tawara Type of Super-Pressure Balloons

By

Naoki IZUTSU<sup>1</sup>, Issei IJIMA<sup>1</sup>, Yoichi KATO<sup>1</sup>, Yoshitaka SAITO<sup>1</sup>, Takatoshi SATO<sup>1</sup>,  
Yasuhiro SHOJI<sup>1</sup>, Atsushi TAKADA<sup>1</sup>, Keisuke TAMURA<sup>1</sup>, Hideyuki FUKE<sup>1</sup>, Yukihiro MATSUZAKA<sup>1</sup>,  
Kiyoko MATSUSHIMA<sup>2</sup>, Eiichi MIZUTA<sup>1</sup>, Kazuhiko YAMADA<sup>1</sup>, and Tetsuya YOSHIDA<sup>1</sup>

### Abstract

A zero-pressure balloon used for scientific observation in the stratosphere has an unmanageable limitation that its floating altitude decreases during a nighttime because of temperature drop of the lifting gas after a sunset. Once a practical size of super-pressure balloon without venting ducts was developed, its lifetime can extend very long because the volume may not change. We proposed a new super-pressure balloon design, which is constructed by a concept of ‘lobed-pumpkin with lobed-cylinder’ and can adapt a single design for balloons of a wide range of volumes. The advantage and formulation of this new design are presented in this paper. The results of a flight test as well as indoor inflation experiments are also considered to study the validity of the design and fabrication method. This new shape could realize a powered balloon system in the future because of its reduced drag shape.

**Key words:** Scientific Balloon, Super-Pressure Balloon, Powered Balloon

### 概要

科学観測用に使用されているゼロプレッシャー気球には、日没後に浮揚ガスの温度が低下するため夜間に浮遊高度が低下するという根本的な問題がある。排気口がなく体積変化がほとんどないスーパープレッシャー気球が開発されれば、浮遊時間を大きく延ばすことが可能となる。我々は、lobed-pumpkin に lobed-cylinder 構造を付け加え、幅広い容積に対して1つの設計が適応可能な新しいスーパープレッシャー気球形状を提案した。この新しい形状の定式化と利点について述べ、その妥当性と製造方法を検証するために実施した地上膨張試験および飛翔試験の結果について述べる。この方法により気球の空気抵抗を大きく減らすことができ、将来、パワードバルーンシステムを実現することが可能になる。

**重要語:** 科学観測用気球, スーパープレッシャー気球, パワードバルーン

---

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

<sup>2</sup> 藤倉航装株式会社

## 1. はじめに

現在、成層圏の30～40 kmの高度に長い時間滞空できる手段は、科学観測用気球に限られる。しかし、この時に使用されるゼロプレッシャー気球（ZPB）には2つの大きな問題がある。第1は、排気口があるため皮膜への負荷が小さく大型化が容易であるものの、日中に上昇した浮揚ガスの温度が日没時に低下することにより、浮力が減少し浮遊高度が継続的に低下することである。夜間の高度低下を防ぎ飛翔高度を安定させるためには、毎夜相当量のバラスト投下が必要となり、長期間飛翔を困難にしている。第2に、気球の飛翔制御の手段が、バラスト投下と浮揚ガスの排気による高度変化の結果、異なる方向の風に乗せるという間接手法に限られていることである。能動的な飛翔制御手段を持っていないことにより、事実上自由な飛翔制御は不可能と見てよい。

第1の問題に対しては、排気口がなく気球底部にバイアス圧力をもつスーパープレッシャー気球（SPB）を用いて、昼夜における気球形状の変化を小さくすることにより、高度変動に対して安定化させることができる。高度変化を最小限にとどめることが可能になれば、バラストを搭載する必要もなくなるため長時間飛翔が容易になるが、昼間のガス温度が高くなった時の気球内外の圧力差は非常に大きくなり、長い間大型SPBの実用化を阻んできた。このような高い圧力に耐えられる手法として、lobed-pumpkin型気球と呼ばれる局所曲率半径を気球の大きさとは無関係に小さな値に設定可能な3次元ゴア設計法が考案・開発されてきた[1-5]が、大型化に伴いゴア展開の不安定性[6-8]という問題点が顕在化してきた。

第2の問題については、能動的な飛翔制御を実現するために、飛行船のように自由な飛行を可能にする推進装置を装備したパワードバルーン[9]が古くから考えられてきたが、気球は直径が100 m以上の空気抵抗が大きな形状であり、この巨大な物体の進路を制御するための有効な推力を積載可能な重量範囲で求めるのは事実上不可能であり、これまでに実用的な飛翔経路制御は実現できていない。しかし、もし飛翔経路の自由な制御が可能になれば、飛翔の安定性および安全性を向上させることが可能となり、飛翔機会および飛翔時間の増加に寄与すると考えられ、その利点は非常に大きい。

上に示した2つの問題（長時間飛翔が困難、能動的飛翔制御が困難）を同時に解決するためには、ZPBより空気抵抗が格段に小さいSPBが必要となる。そこで、通常のlobed-pumpkin型SPBの赤道部の断面形を保ったまま延長した形状である俵型SPB[10]の開発を行ってきた。これまでに設計手法及び製造手法を検証するためのスケールモデルを用いた屋内膨張試験を行い、また、小型気球の飛翔試験も実施した。本報告では、俵型SPBの実用化に向けた開発および試験の経過について述べる。

## 2. 俵型気球の構造と利点

### 2.1 気球のデザイン

図1に示すように、SPBはlobed-pumpkin形状にすることにより、局所曲率半径を気球の大きさとは独立に小さく設計することが可能になり、耐圧が非常に大きくなる。元となる軸対称でバルジのないパンプキン気球（以下単にパンプキン気球と呼ぶ）は、子午線の長さを決めると形状が1つに定まることが知られている。図2(a)はそのようにして得られた気球を子午線によって切り分けることにより求められたSPBのゴアパターンを示している。lobed-pumpkin型気球を作るには、元になるパンプキン気球のゴアより一回り大きいゴアを用意し、隣り合うゴアの縁を熱接着により結合する。熱接着の方法には、ZPBを作るときに用いられるフィンシール（フィルムの同じ面同士を合わせて接着する手法）とラップシール（2枚のゴアをそのまま重ねて重なった部分を接着する手法）があるが、接合強度のより高いラップシールを用いている。その後、シール線の外側に余ったフィルム部分（耳部）に伸びの小さいロードロープをフィルムの縁（耳）を縮めながら縫いつけることにより固定する。その結果、ゴアが隣り合ったロープの間で元のパンプキン気球の表面より周方向に局所的に膨らんだ形状が、圧力差のない状態でも作られる[1,2]。このように余分の皮膜によりバルジを3次的に形成することがこの設計法のポイントになっている。

これに対して、我々が提案した新しい形状は、図2(a)に示したゴアの中央部（赤道に相当する部分）をそのまま直線状に延長した図2(b)に示すゴアを使用する。その結果、図3に示すように、従来のlobed-pumpkin型SPBの赤道部

断面形状をそのまま延長した円筒部を有する構造である俵型の形状が得られる。新たに付け加えられた円筒部分（破線で示した領域）は、lobed-pumpkin の赤道部でゴアがロープ間で外側に張り出して小さな局所曲率半径を形成している構造をそのまま継承するものとする。このため、円筒部の子午線にそって配置されているロードロープ（以下縦ロープと呼ぶ）が、元のパンプキン気球の赤道半径位置に留まるよう拘束する必要がある。

隣り合った縦ロープ間の距離を拘束するために、縦ロープと直交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互いに紐で縫うことにより結合する（図4）。この工程は縦ロープがすべて取り付けられた後に行う。その結果、新しく付け加えた円筒部の皮膜には、それ以外のパンプキン部分と同様に縦横両方向に余剰が生じ、圧力差がない状態で小さな局所曲率半径を持ったバルジが形成される。この形状（lobed-pumpkin with lobed-cylinder）を俵型気球と呼ぶ。なお、横ロープは図4に示すように、縦ロープと赤道断面の交点が形成する円に内接する多角形の周長に設定して、気球の内部に配置することもできるが、縦ロープとの交点を結合する際に皮膜を貫通するため何らかの工夫が必要となるので採用していない。

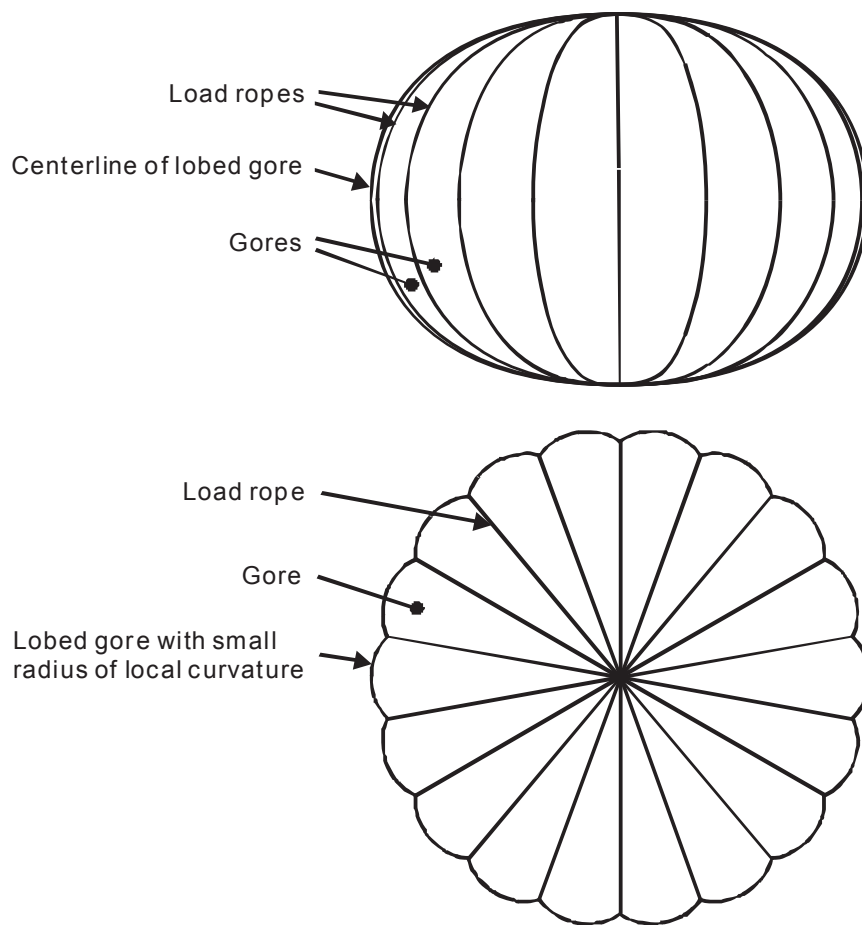


図1 lobed-pumpkin 型 SPB の形状

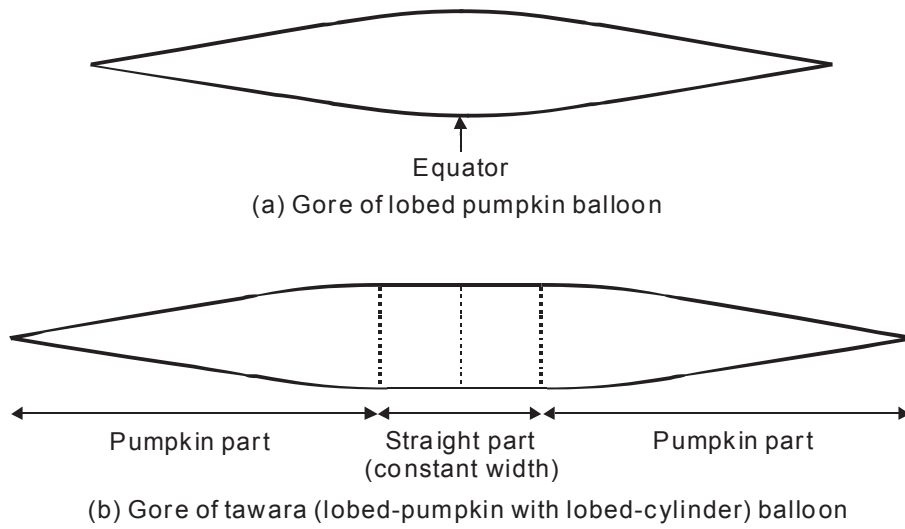


図2 lobed-pumpkin 型 SPB のゴア形状 (上) と俵型 SPB のゴア形状 (下)

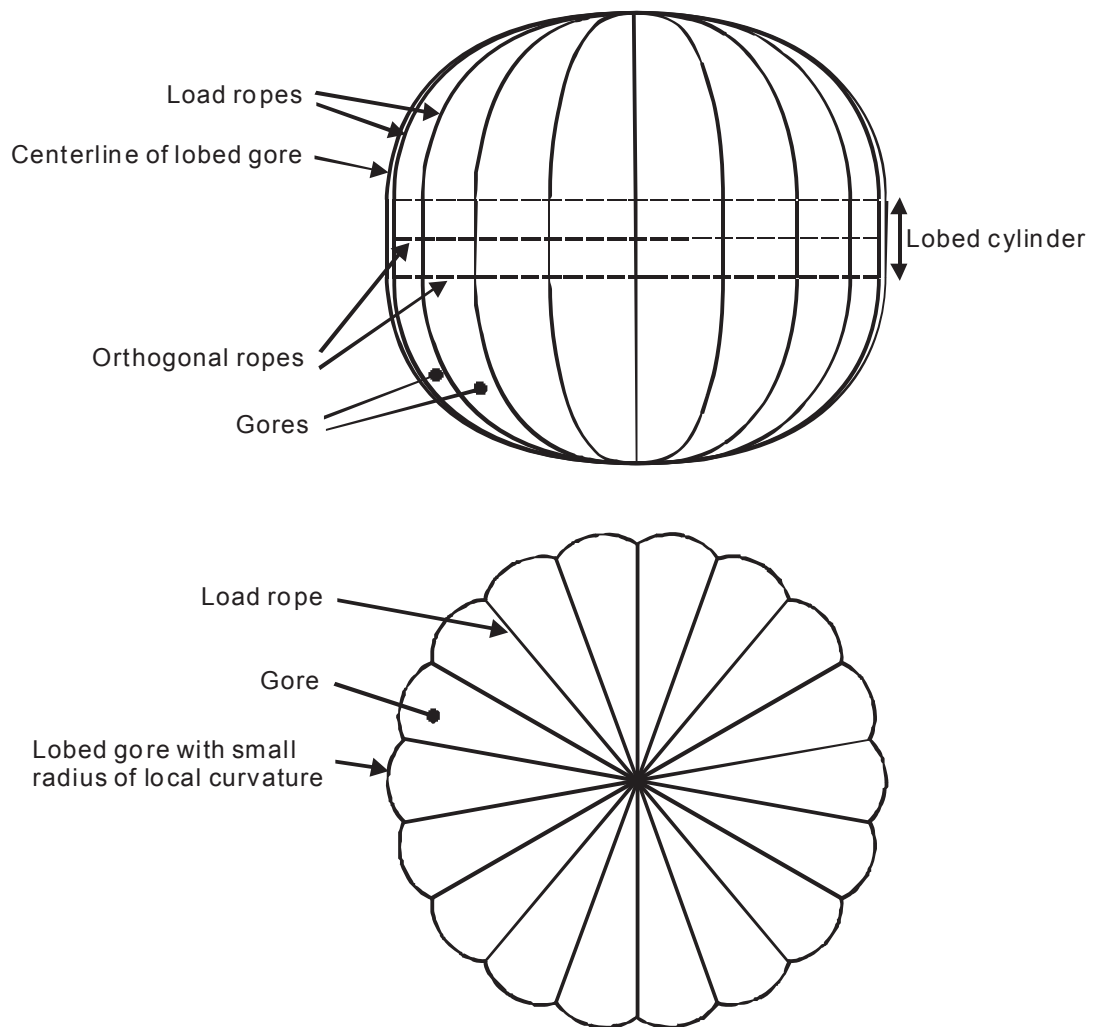


図3 俵型 SPB の形状

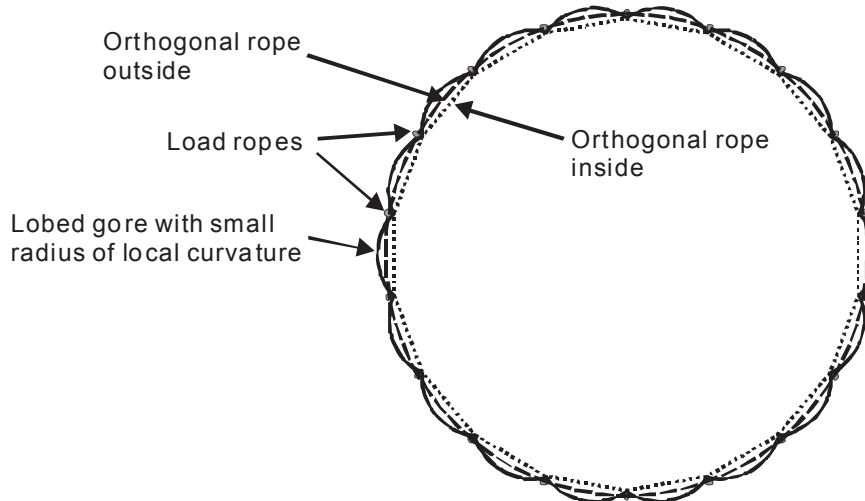


図4 俵型 SPB の赤道断面形状

## 2.2 俵型気球の利点

このような lobed-pumpkin with lobed-cylinder 構造を持つ俵型 SPB には以下の利点がある。

- (1) ある気球より大きな容積の気球を作る際に、ゴア数（ロードロープ数、縦ロープ数）を増す必要がなく、その代わりに円筒部を延長すればよい。このとき、ゴアの形状は途中の円筒部に相当する直線部の長さだけに変更される。したがって、パンプキン部分に相当するゴアの形状は同一であり、張り出しを形成するためのゴア余剰率に同じ設計値が適用される。すなわち、気球容積を変更した場合でも同一設計であるため信頼性の向上につながる。
- (2) 大きな容積の気球を作る際にも直径を大きくする必要がないため、ロードロープにかかる張力の和（気球の断面積に比例する）は増加しない。したがって、各ロードロープの強度を増す必要がなくロープは太くならない。通常の SPB の場合は同じゴア幅を使用すると気球が大きいほど高強度（太い）のロープを使用する必要がある。ロープが太くなると決められた余剰率でのフィルムとの接合や端部の処理が難しくなる。ゴア幅を直径に逆比例させれば細いロープをそのまま使用できるが、ゴア数に比例して製造コストが増大する。
- (3) 気球の容積を大きくしてもロープ数が変わらないため、ロープの集中する気球端部のアンカーリングも同じものが使用でき重量増加がない。通常の SPB の場合は気球の直径に比例した大きさのリングが必要になり、また、リング断面積はロープ張力の和に比例するため、結果的に、リングの重量は気球の容積に比例して増大することになる。俵型気球ではわずかながら重量減が可能となる（詳細は 3.3 で述べる）。
- (4) ゴアの枚数が増える、あるいはゴアの余剰率が増加すると、lobed-pumpkin 型 SPB のゴアの全てが完全には展開せず、不安定な状態になり所定の耐圧性能が確保されないことがある [11]。このことが大型 SPB の実現を阻んでいるが、このような不安定現象が俵型気球では発生しないと予想し実験により確かめた（詳細は 4. で述べる）。
- (5) 俵型気球では、アスペクト比（気球全高／気球直径）を大きくすることによって、ZPB、あるいは通常型 SPB と比較しても、正面面積を 1/3 以下にすることができる（図 5）ため、空気抵抗の減少が期待できる。これは、ZPB では実現が難しかったパワードバルーンの可能性が増すことを意味する。もし、これまでの気球では不可能であった飛翔経路の積極的な制御が可能になれば、飛翔運用の観点から自由度と安全性を向上させることが可能となり、飛翔機会の増加に寄与することが期待できる。

なお、俵型気球では横ロープが必要となるが、必要となる縦・横ロープの量は通常の SPB のロープの量とほとんど変わらないため、ロープの材料費や接合工程にかかる費用も同程度である。横ロープがあるため製造後の気球をたたんで保護袋に収納する際に取り扱いに注意を要する。また、総浮力が大きくなり放球時に跳ね上げローラーに横ロープのある気球部分が位置すると不具合につながる可能性があるため、気球ごとに総浮力に上限を設定する必要がある。

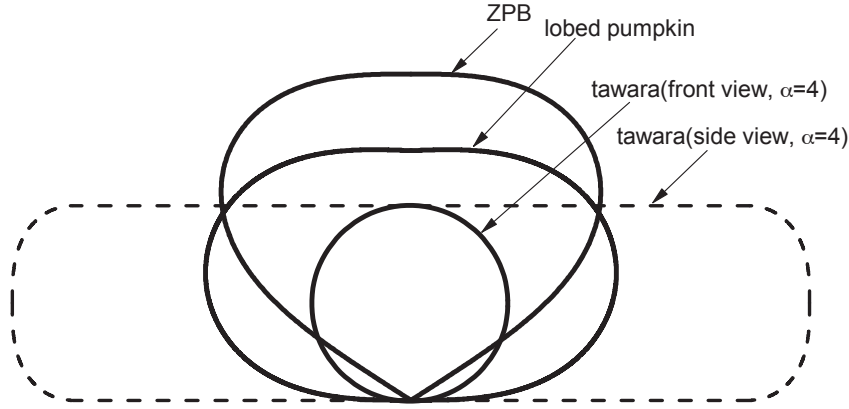


図5 同一容積のZPB, lobed-pumpkin型SPB, 俵型SPB(アスペクト比 $\alpha=4$ )の断面形状

### 3. 気球形状の定式化とデザイン

#### 3.1 パンプキン気球

気球の内圧が周囲の大気圧より十分に高い自然型気球の形状はいわゆるパンプキン型になる。バルジのない元の軸対称なパンプキン気球の形状は、気球の下端からの高さを $z$ 、気球下端から気球面にそった子午線長さを $s$ 、 $z$ 軸からの距離を $r$ 、曲線 $s$ の接線と $z$ 軸のなす角を $\theta$ とすると、

$$\frac{d\theta}{ds} = -2 \frac{r}{R_b^2} \quad (1)$$

のように表される [12]。ここで、 $R_b$  は気球の赤道部の半径である。左辺は曲線 $s$ の曲率半径 $R_m$ の逆数である。この式を、初期値、

$$s = r = z = 0, \theta = -\pi/2 \quad (2)$$

から数値積分するとパンプキン気球の形状が求められ、同時に、気球の子午線長 $L_p$  (以下、気球の長さと呼ぶ)、表面積 $A_p$ 、体積 $V_p$ 、気球の高さ(気球下端から上端までの距離) $H_p$ を計算することができ、以下の近似値が得られる。ここで、添え字 $p$ は元のバルジのないパンプキン気球を意味する。

$$L_p = 2.62206 R_b \quad (3)$$

$$A_p = 9.86960 R_b^2 \quad (4)$$

$$V_p = 2.74581 R_b^3 \quad (5)$$

$$H_p = 1.19814 R_b \quad (6)$$

このとき、気球子午線の曲率半径 $R_m$ すなわち $ds/d\theta$ は赤道で最小であり、その値は赤道の気球半径 $R_b$ の1/2となり、周方向の曲率半径である $R_b$ より小さい。

パンプキン気球の皮膜(フィルム)に要求される比強度 $\sigma_f$ は、過去に行われた実験により以下の式で概算可能である [1]。

$$\sigma_f = \frac{F_f \Delta p_{\max} R_b}{\rho_f t_f} \quad (7)$$

ここで、 $\Delta p_{\max}$ は設計上の最大差圧、 $F_f$ はフィルムの安全倍率、 $t_f$ はフィルムの厚さ、 $\rho_f$ はフィルムの密度である。

#### 3.2 lobed-pumpkin 型気球

一般的に、気球の皮膜に要求される比強度 $\sigma_f$ は、以下の式で求められる。

$$\sigma_f = \frac{F_f \Delta p_{\max} R_{c,\max}}{\rho_f t_f} \quad (8)$$

ここで、 $R_{c,\max}$ はフィルムの局所曲率半径の最大値である。もし、 $R_{c,\max}$ を気球半径 $R_b$ と無関係に非常に小さくするこ



とができれば、同一の材料を用いて耐圧性能を飛躍的に向上させることが可能となる。気球の大きさと無関係に気球の周方向の局所曲率半径を小さくすることは、気球のゴアを一回り大きくして、ゴアの縁を縮めながら伸びのないロードロープに固定して立体形状を形成する3次元ゴア設計法により達成することができ、この形状はlobed-pumpkin型と呼ばれる。この立体形状は、基本的にはフィルムの伸びによらずに、すなわちフィルムに余分な負荷をかけずに形成することが重要となる。なぜなら、フィルムの張り出しにともないゴアの縦方向の長さが特に赤道部中央で余分に必要となるが、その場合でも、圧力は基本的に周方向の張り出しによってささえられないと耐圧性能が低下するからである。したがって、縦方向に張力をかける必要性はなく、むしろ縦方向にできるだけ張力が発生しないように設計している。低温環境下でのフィルムの降伏点強度までの伸びは意外に小さく、ここで伸びを前提にすると耐圧性能としてのマージンが極端に少なくなるので望ましくない。ゴアの余剰率は、このような条件を満足するように決定される。

ここでパイロードおよび浮揚ガスを含む総浮遊質量  $m_{total}$  と気球質量  $m_b$  の比を定義し  $\beta$  とする。すなわち、

$$\beta = \frac{m_{total}}{m_b} \quad (9)$$

また、浮遊高度における大気圧、温度をそれぞれ  $p_a$ 、 $T_a$  とし、気球体積を  $V_b$  とする。また、大気的气体定数を  $R_a$  とする。設計上の最大差圧を周囲の大気圧の20%と仮定する[5]と、

$$\Delta p_{max} = 0.2 p_a = 0.2 \beta m_b \frac{R_a T_a}{V_b} \quad (10)$$

となる。

一方、ロードロープの安全倍率を  $F_l$ 、ロープ数（ゴア数）を  $N$ 、ロープの単位長さ当たりの質量を  $\rho_l$  とすると、ロープに要求される比強度  $\sigma_l$  は、

$$\sigma_l = \frac{F_l \Delta p_{max} \pi R_b^2}{\rho_l N} \quad (11)$$

と表される。ここで、 $\Delta p_{max} \pi R_b^2$  は赤道断面における子午線方向の張力の総和を表す。気球質量の大部分はフィルム質量とロープ質量であるから、まず、バルジの寄与を無視して、パンプキン気球の表面積および長さを用いれば、式(10)は、

$$\Delta p_{max} = 0.2 \beta (\rho_f t_f A_p + \rho_l N L_p) \frac{R_a T_a}{V_p} \quad (12)$$

と表せるから、式(8)と(11)を式(12)に代入すると、

$$\Delta p_{max} = 0.2 \beta \left( \frac{F_l \Delta p_{max} R_{c,max}}{\sigma_f} A_p + \frac{F_l \Delta p_{max} \pi R_b^2}{\sigma_l} L_p \right) \frac{R_a T_a}{V_p} \quad (13)$$

となる。目標とする浮遊高度33~36 kmでは  $T_a$  はおよそ235 [K]であり、 $R_a = 287.03$  [J/kgK]とすると、これらの値と式(3)~(5)の計算値を式(13)に代入すれば、要求される最大局所曲率半径と材料の比強度の関係が近似的に以下のよう求められる。

$$\left[ \frac{R_{c,max}}{R_b} \right]_{req} \approx \frac{\sigma_f}{F_f} \left( \frac{2.0623 \times 10^{-5}}{\beta} - 0.8346 \frac{F_l}{\sigma_l} \right) \quad (14)$$

SPBに使用可能な材料の特性[5]は、フィルムの（降伏点）比強度が  $10^4$  [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]程度、ロープの（破断）比強度が  $10^6$  [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]程度である。また、各安全倍率を  $F_f=2$ 、 $F_l=5$ と仮定すると、 $\beta$ と最大局所曲率半径の関係は図6に示すように求められる。総重量に占める気球重量を小さくする、すなわちパイロードの比率を高めるためには、局所曲率半径の気球直径に対する割合をできるだけ小さくする必要がある。また、同じ局所曲率半径の場合には、気球が大きいほど  $\beta$  を大きくすることができることを意味している。

次に、実際のlobed-pumpkin型SPBの質量の評価を行う。ゴア数をできるだけ少なくすることにすれば、最もゴア幅の大きい赤道部のゴア幅  $w_{max}$  はフィルムの材料幅から自動的に決まる。このとき、半径  $R_{c,max}$  のバルジの開き角は  $w_{max}/R_{c,max}$  であるから、幾何学的な関係から以下の式が得られる。

$$R_b \sin \frac{\pi}{N} = R_{c,max} \sin \frac{w_{max}}{2R_{c,max}} \quad (15)$$

したがって、式(14)から得られる  $R_{c,max}$  を与えれば、必要となるゴア数  $N$  が決定される。また、一般的に、気球の端部は、ガス注入口や必要に応じて排気弁を配置するための弁座と呼ばれる円形の金属平板にフィルム端部をはさんで固定し気密を確保する。一方、ロードロープはアンカーリングと呼ばれる金属リングに結ばれ、このアンカーリングは移動しないように弁座上に固定される。フィルムはお互いに接着されるためその末端のゴア幅には接着作業上の下限がある。弁座の縁（アンカーリング位置）におけるこの下限であるゴア幅を  $w_{min}$  とすると、アンカーリングの半径  $R_r$  は、

$$R_r = \frac{Nw_{min}}{2\pi} \quad (16)$$

により求められる。したがって、アンカーリングに要求される比強度  $\sigma_r$  は、リングの断面積を  $A_r$  とすると、

$$\sigma_r = \frac{F_r \Delta p_{max} R_b^2}{\rho_r 2A_r} \quad (17)$$

と表される。ここで、 $\rho_r$ 、 $\sigma_r$ 、 $F_r$  はそれぞれ、アンカーリングの密度、比強度、安全倍率を示す。

ゴアのロープに対する余剰率を  $\xi$  とし、元のパンプキン気球の子午線にそった長さすなわちロードロープの長さの  $1+\xi$  倍のゴア長になるように縦横一様に拡大されたゴアを使用するものとする。そうすると、気球のゴアの余剰率と最大ゴア幅の関係は以下ようになる。

$$2\pi R_b = Nw_{max}(1-\xi) \quad (18)$$

Lobed-pumpkin 気球の質量  $m_{bo}$  はフィルム、ロープ、上・下端部アンカーリングの各質量、 $m_{fo}$ 、 $m_{lo}$ 、 $m_{ro}$  の和であり、それぞれの比強度を表す式を用いて以下のように評価することができる。ここで、添え字  $o$  は lobed-pumpkin を意味している。

$$m_{bo} = m_{fo} + m_{lo} + m_{ro} \quad (19)$$

$$m_{fo} = \rho_f t_f \frac{A_p}{(1-\xi)^2} = F_f \frac{R_{c,max} \Delta p_{max}}{\sigma_f} \frac{A_p}{(1-\xi)^2} \quad (20)$$

$$m_{lo} = \rho_l N L_p = F_l \frac{\pi R_b^2 \Delta p_{max}}{\sigma_l} L_p \quad (21)$$

$$m_{ro} = 2\rho_r \cdot 2\pi A_r R_r = 2F_r \frac{\pi R_b^2 \Delta p_{max}}{\sigma_r} R_r \quad (22)$$

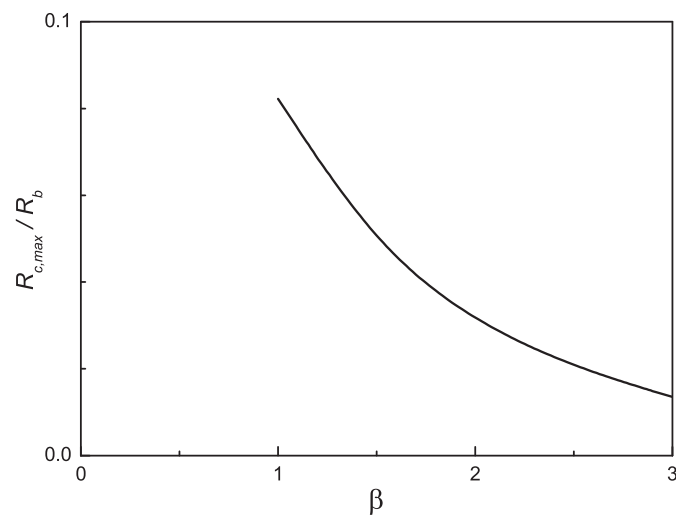


図6  $\beta$ と最大局所曲率半径の関係



### 3.3 俵型気球

俵型気球は、lobed-pumpkin 気球の赤道断面を延長した形状であるから、この直線部に相当する長さ、表面積、体積を追加することにより、式(3)～(6)は以下のように書き換えられる。添え字のない  $L$ ,  $A$ ,  $V$ ,  $H$  はそれぞれ俵型気球の長さ、幾何学的表面積、同体積、高さを表す。

$$L = (1.42392 + 2\alpha)R_b \quad (23)$$

$$A = (2.34147 + 4\pi\alpha)R_b^2 \quad (24)$$

$$V = (-1.01826 + 2\pi\alpha)R_b^3 \quad (25)$$

$$H = 2\alpha R_b \quad (26)$$

ここで、 $\alpha$  は気球のアスペクト比を表しており、 $\alpha = 0.59907$  とすれば通常の lobed-pumpkin 気球の状態を表す。ストレート部分の高さ  $H_s$  は、

$$H_s = H - 1.19814R_b \quad (27)$$

である。円筒部分において縦ロープと横ロープは正方形を形成するように配置されるものとする。円筒部に配置される横ロープ（強度は縦ロープの2倍）の数は、

$$n = \frac{H_s}{w_{\max}(1-\xi)} + 1 \quad (28)$$

により求められる。ただし、円筒部の高さ  $H_s$  は  $n$  が整数になるように調整されるものとする。

バルジのある俵型気球の質量は、式(19)～(22)と同様の方法で求められ以下のようなになる。

$$m_b = m_f + m_l + m_r \quad (29)$$

$$m_f = \rho_f t_f \frac{A}{(1-\xi)^2} = F_f \frac{R_{c,\max} \Delta p_{\max}}{\sigma_f} \frac{A}{(1-\xi)^2} \quad (30)$$

$$m_l = \rho_l (NL + 2n \cdot 2\pi R_b) = F_l \frac{\pi R_b^2 \Delta p_{\max}}{\sigma_l} [L + 2H_s + 2w_{\max}(1-\xi)] \quad (31)$$

$$m_r = 2\rho_r \cdot 2\pi A_r R_r = 2F_r \frac{\pi R_b^2 \Delta p_{\max}}{\sigma_r} R_r \quad (32)$$

式(19)～(22)および式(29)～(32)によって計算されるそれぞれの気球質量の比較を行う。通常の lobed-pumpkin 気球の容積と気球半径・気球質量の関係を図7に破線で示す。また、図7の実線は俵型気球の半径を固定してアスペクト比を変えたときの気球質量の変化を示している。気球半径と気球質量はある容積（この図では  $60,000 \text{ m}^3$ ）の lobed-pumpkin 気球の各値によって無次元化されている。アスペクト比 2.1 までの範囲で俵型気球は同じ容積の lobed-pumpkin 気球より軽いことがわかる。アスペクト比が 2.1 の俵型気球の容積は、同一直径の lobed-pumpkin 気球の容積の約 4.4 倍である。

これまでに製作した気球を例にとると、容積  $300,000 \text{ m}^3$  の lobed-pumpkin 型気球のアンカーリングを含む頭部・下部金具の質量は合計  $60 \text{ kg}$  である。これに対してゴア数を 80% に減らすと、他の条件が同じであれば、単純計算で金具の重量を約半分にすることができ、わずかながら重量減に寄与する。

図8は、気球容積を一定（この図では  $300,000 \text{ m}^3$ ）にした場合にアスペクト比によって気球質量および気球直径がどのように変化するかを示している。この場合も、アスペクト比が 2.1 以下の場合に俵型気球の質量は lobed-pumpkin 気球の質量より最大 3% 程度ではあるが小さくなる。破線で示した気球質量の内訳に示すように、気球質量の軽減はアスペクト比が 0.9 付近で最小となる気球表面積とアンカーリングを含む頭部・下部金具の径が小さくなることによる軽量化による。以上から、体積比で 4.4 倍までは同一ゴア数の俵型気球を使用することが重量的には若干有利であることがわかる。なお、気球を大きくすると、地上付近でのフィルムの応力緩和のため実際にはキャップをつける必要がある。キャップの総質量も若干であるが俵型気球の方が軽くなる。

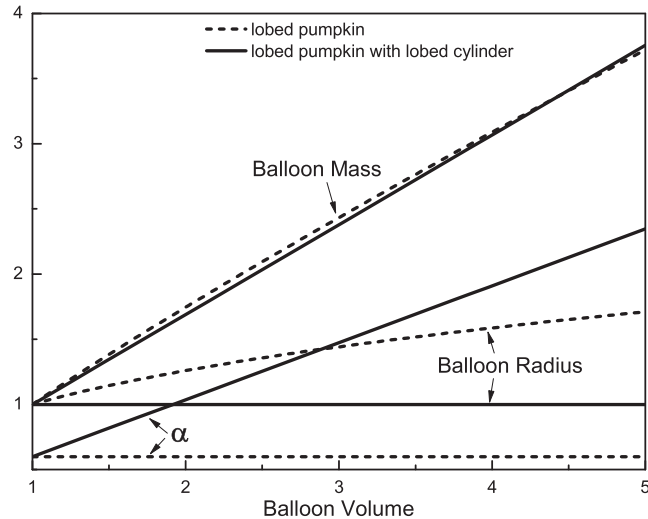


図7 気球質量, 気球半径の気球容積による変化

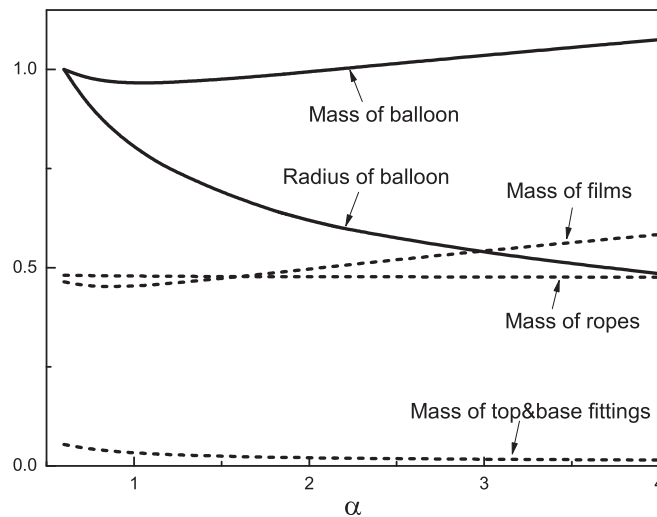


図8 アスペクト比と気球質量, 気球半径の関係

#### 4. 地上試験

これまでに3機のスケールモデルを実際に製作し, 地上における膨張試験を実施した. 各試験で使用した気球の諸元を表1内のモデル#1~#3として示す. フィルムとロープにはこれまでのSPB[5]と同様にそれぞれゲンゼの多層膜フィルム・ヘプタックス, アラミド組み打ち紐を用いた.

まず, 直径約3mのモデル#1で, 俵型気球の耐圧性能を確認する試験を行った. 頭部を吊った状態で尾部から空気を注入したところ, 7,340 Paにて図9に示すように気球の円筒部に近いパンプキン部分のフィルムが破断して破壊に至った. 同じ直径の通常型SPB(図10)の場合は6,700 Paでリークが発生している[5]. この試験により, 俵型SPBが通常型SPBと同等の耐圧性能を持つことが示された.

次に, 横ロープが気球膨張程で正しく機能することを確認する目的で, 直径約6mのモデル#2を製作し, ヘリウムガスを用いて最後まで膨張させる試験を行った. 図11に示すようにヘリウムガスで膨張させることにより実際の気球のように頭部から順に広がる過程を模擬した. 図12は満膨張後の差圧200 Paの状態を示している. この試験により, 俵型気球が問題なく展開・膨張することが確認された. 横ロープが膨張を妨げるような現象は認められなかった.

さらに, 直径約12m, 容積約1,000 m<sup>3</sup>のモデル#3の膨張試験を行った. この気球では実機のゴア幅と同等の最大

幅約 1 m のゴアを使用した。膨張後、圧力差 200, 400, 600 Pa において、ゴア各部の局所曲率半径、フィルムの伸び、気球直径、気球高さ等の測定を行った [10]。曲率半径は曲率測定定規を用いて測定し、フィルムの伸びはあらかじめフィルム上に引かれた長さ 100 mm の線の長さの変化を直接計測した。また、直径は気球赤道部からの垂線と地面との交点を 4 点同時測定し相互間の距離から演算により求め、気球高さは上記垂線の長さから求めた。

図 13 は圧力差 200 Pa の時の気球を示している。図 14,15 に測定結果を示す。圧力差が増すと、パンプキン部分の高さは変わらないが気球直径と気球の全高は大きくなる。パンプキン部分では、圧力差が増すと直径が増大し高さは減少するが、僅かな伸びがこの高さの減少を打ち消していることがわかる。一方、円筒部は圧力差が増すにつれて縦横にはほぼ同じ程度の割合で大きくなっている。

パンプキン部分では子午線方向の伸びは 1.5~3.5 % で、円周方向の伸び (0~1.5 %) より大きい。これは、気球が小さくバルジの形成に伴うゴアセンターの相対的な張り出し量が無視できない (ゴア縁の長さとの差が大きい) ため、子午線方向の設定されたフィルムの余剰率に比べて局所的に大きくなっている部分のフィルムが伸びているためと考えられる。しかし、気球が大きくなれば両者の違いは余剰率に比べて小さくなるためこの伸びもより小さくなると考えられ問題はない。円筒部では、周方向の伸び (1~2 %) が子午線方向伸び (0~1 %) より大きくなっているが、円筒部では縦横の応力比が 1:2 であることから妥当な値と考えられる。最も大きなバルジが形成されるのは気球の肩の部分 (円筒部に近いパンプキン部分) であるからこの部分では余剰率を大きくした方が最大応力を小さくすることができる。ただし、製作上は途中で余剰率を変えない方が容易である。円筒部では 2 つの隣り合うロープに囲まれた領域は正方形を作り、縦横の長さは等しいはずであるが、測定結果は、横ロープの方が圧力の高いときに少し長かった。この原因は、2 つのロープの弾性率が異なっていて、設計圧力差以外では両者の伸び率が異なるためであり、耐圧性能に影響はない。また、製作過程の検証も行われ、横ロープを取り付ける工程が加わるものの、縦ロープ数の減少によりほぼ相殺されることが確認された。

SPB では ZPB と違い強度の高いフィルムを使用していること、および、気密構造を確保するため、通常の ZPB 用の気球破壊機構 (気球頭部フィルムに貼り付けた引き裂きテープをゴンドラの自重により内側に引いて気球フィルムを引き裂いて気球を破壊する方式、引き紐は気球下部の穴を通してパラシュート頭部に接続される) [13] は使用できない。そこで、ゴンドラの自重によって気球外部に配置された引き裂き装置がフィルム面に沿って引かれフィルムを引き裂く機構をもった SPB 用の気球破壊装置を開発した [14]。両者の比較を図 16 に示す。図 17 は実際に気球に取り付けられた破壊装置を示している。破壊装置本体は図の右側に示すような複数のナイフが円周上に配置された引き裂き部から構成されており、図の左側に示した円筒形ケース内に仮縛され、反対側には引き裂き紐が接続されている。この引き裂き紐はフィルムが二重化されたゴア部分のフィルム間を通して気球にそってロードロープに仮縛され、引き裂き紐の末端は通常型気球と同様にパラシュートの上に接続される。気球・パラシュート間をロープカッターにより切り離すと、引き裂き紐はゴンドラ自重により下方に引かれ、破壊装置本体が収納ケースから引き出され、2 枚のフィルムの間を上下両方のフィルムを切り裂きながら進む構造になっている。この装置の試作品はモデル #3 に取り付けられ破壊動作試験が行われた。その結果、図 18 に示すように、一気に気球を破壊できることが確認された。

気球の展開安定性を調べるために、ゴア数が多いときの俵型気球と通常の SPB の比較が行われている [15]。この試験では、直径が同じ気球を途中までヘリウムガスで膨張させた後に空気で満膨張にもっていき展開過程が調べられた。図 19 は表 1 に示したモデル PB60S-3 の底部圧力差 30 Pa での状態を示していて、俵型気球が完全に展開していることがわかる。一方、同じ直径の通常型 SPB (表 1 に示すモデル PB60S-1) では、図 20 に示すように底部圧力差 50 Pa においても完全に展開せず、安定的に Cleft [8] が存在する状態であった。このことから、俵型気球の完全展開性が示されたと言える。lobed-pumpkin 型気球はパンプキン気球と同一の子午線長を持つため、満膨張形状であるパンプキン気球には周方向応力が存在しない [1,2]。一方で、lobed-pumpkin 型気球のフィルムの周長の合計は本来必要なパンプキン気球の周長より長い余りが生じる。この余りは周方向に均等に配分されるとは限らず、実際には数カ所に集中する傾向があり、満膨張後に非展開部が残った場合にそれを強制的に開かせる力が存在しない。これに対して、俵型気球では、満膨張後も、圧力差に比例した円筒部の周方向応力が発生するため、この力が円筒部の上下に非展開部があったとしてもそれらを押し広げる力が伝わるからと推測されている [15]。このような展開不安定性に関して数値解析による検討も平行して進められており、俵型気球での展開性の良さが示されている [16]。

表 1 気球の諸元

モデル番号		#1	#2	#3	#4	PB60S-3	PB60S-1
実験目的		耐圧試験	膨張試験	形状計測	飛翔試験	展開試験	展開試験
気球容積	m <sup>3</sup>	19	190	1,000	5,000	3,200	2,200
直径	m	2.9	5.8	11.6	20.9	18.6	18.6
子午線長	m	5.6	12.6	20.8	32.9	28.0	24.4
ゴア数(縦ロープ数)		24	48	40	72	192	192
気球高さ	m	3.3	8.1	11.6	18.0	14.8	11.1
円筒部の長さ		1.6	4.6	4.6	5.5	3.7	0
横ロープ数		7	13	6	7	13	0
アスペクト比		1.4	1.4	1	0.86	0.8	0.599
最大試験圧力差	Pa	7,340	200	600	(500)	40	70
ガスの種類		空気	ヘリウム	空気	ヘリウム	ヘリウム・空気	ヘリウム・空気
試験日		2007/7/30	2007/9/9	2008/3/18	2010/8/27	2010/5/19	2010/5/13

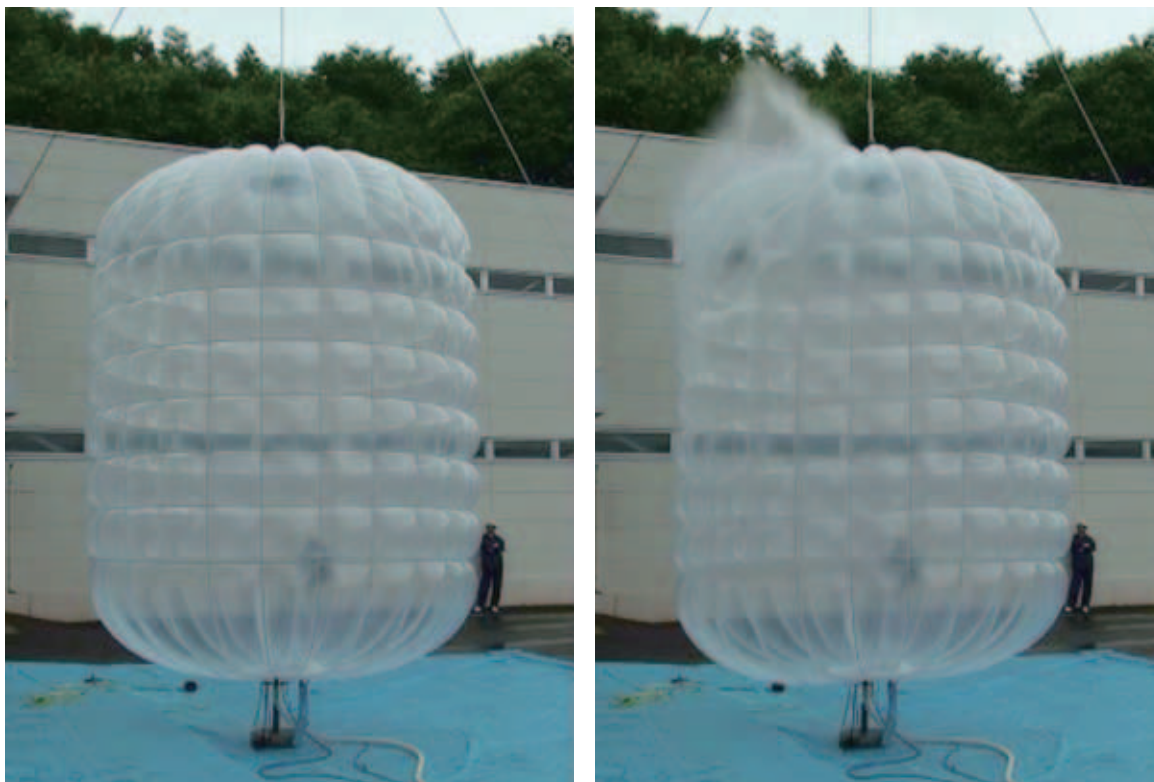


図 9 モデル #1 の耐圧試験, 圧力差 7,340 Pa で破壊





図 10 モデル #1 と同一直径の lobed-pumpkin 型気球の耐圧試験

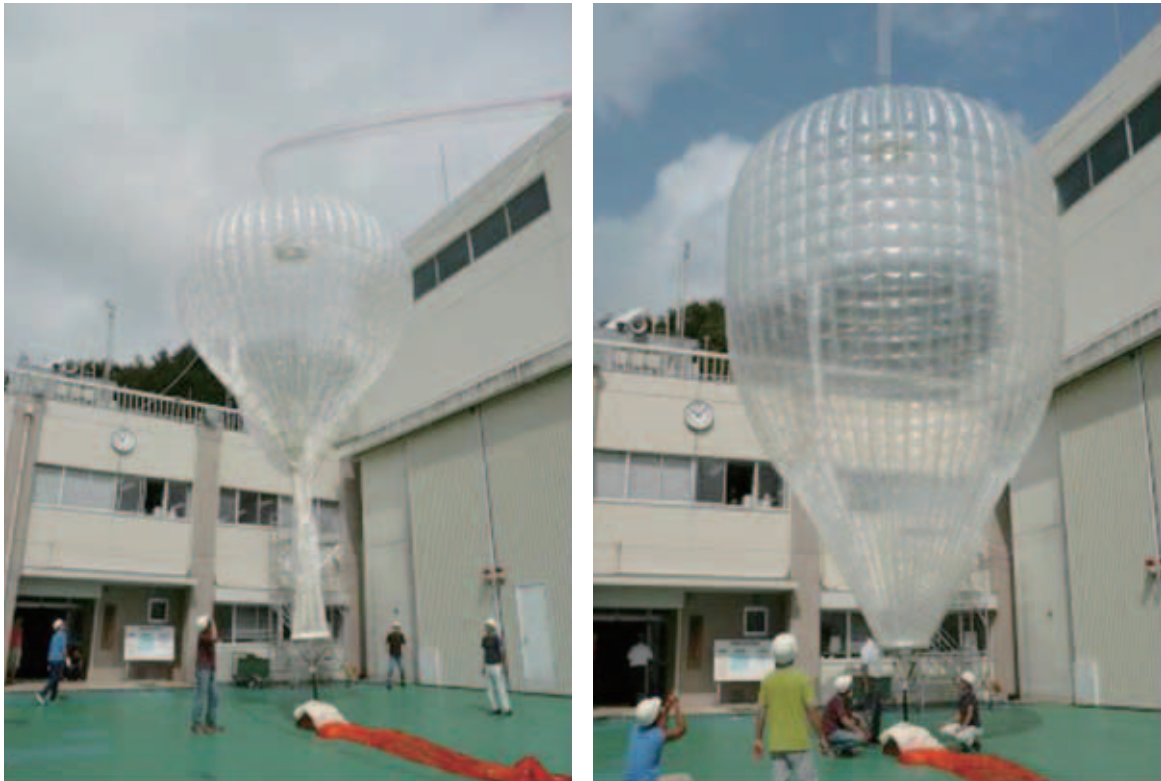


図 11 モデル #2 の膨張試験



図 12 満膨張状態のモデル #2, 圧力差 200 Pa



図 13 モデル #3 の膨張試験, 圧力差 200 Pa



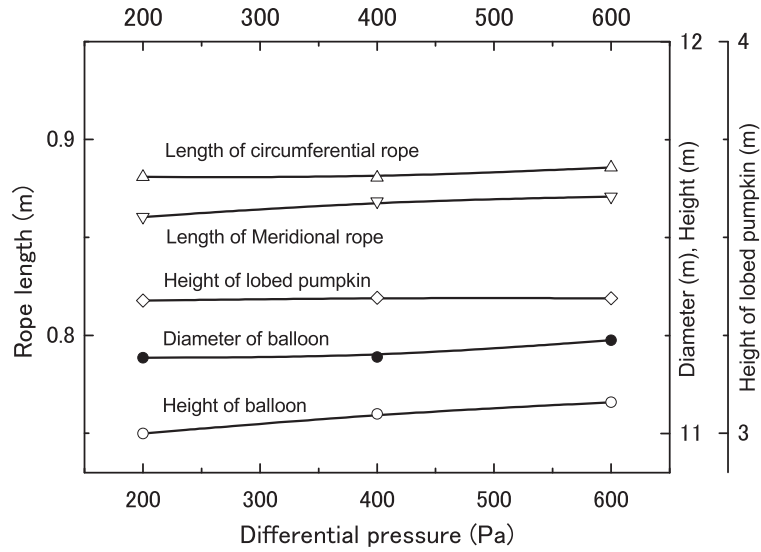


図 14 圧力差とロープ長，気球直径，気球高さの関係

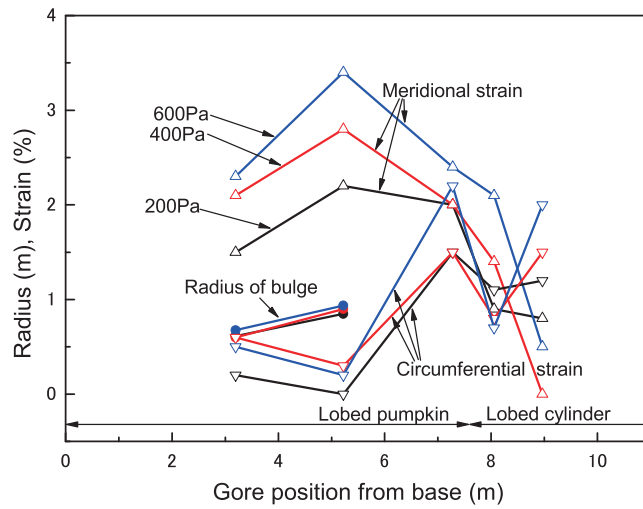


図 15 フィルムの伸びと曲率の変化

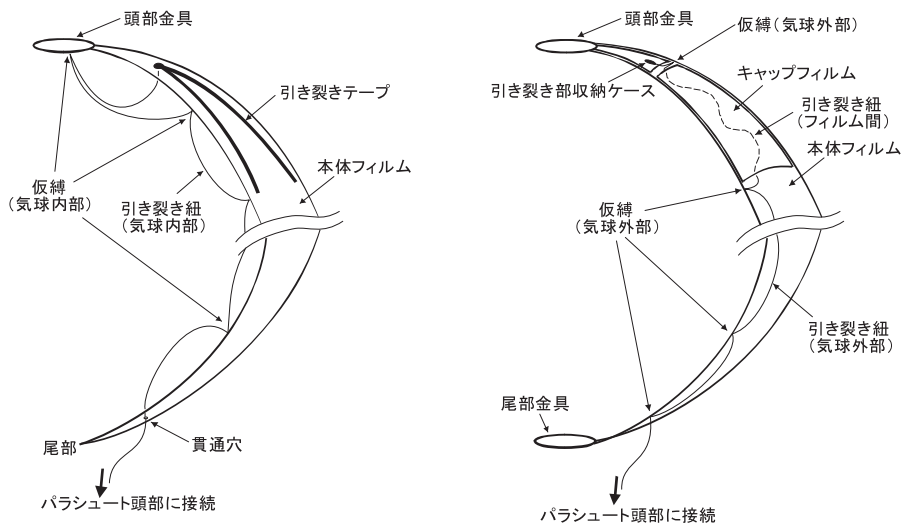


図 16 気球破壊機構の比較，左：ZPB，右：SPB



図 17 気球破壊装置の取り付け状態と破壊装置本体 (右)

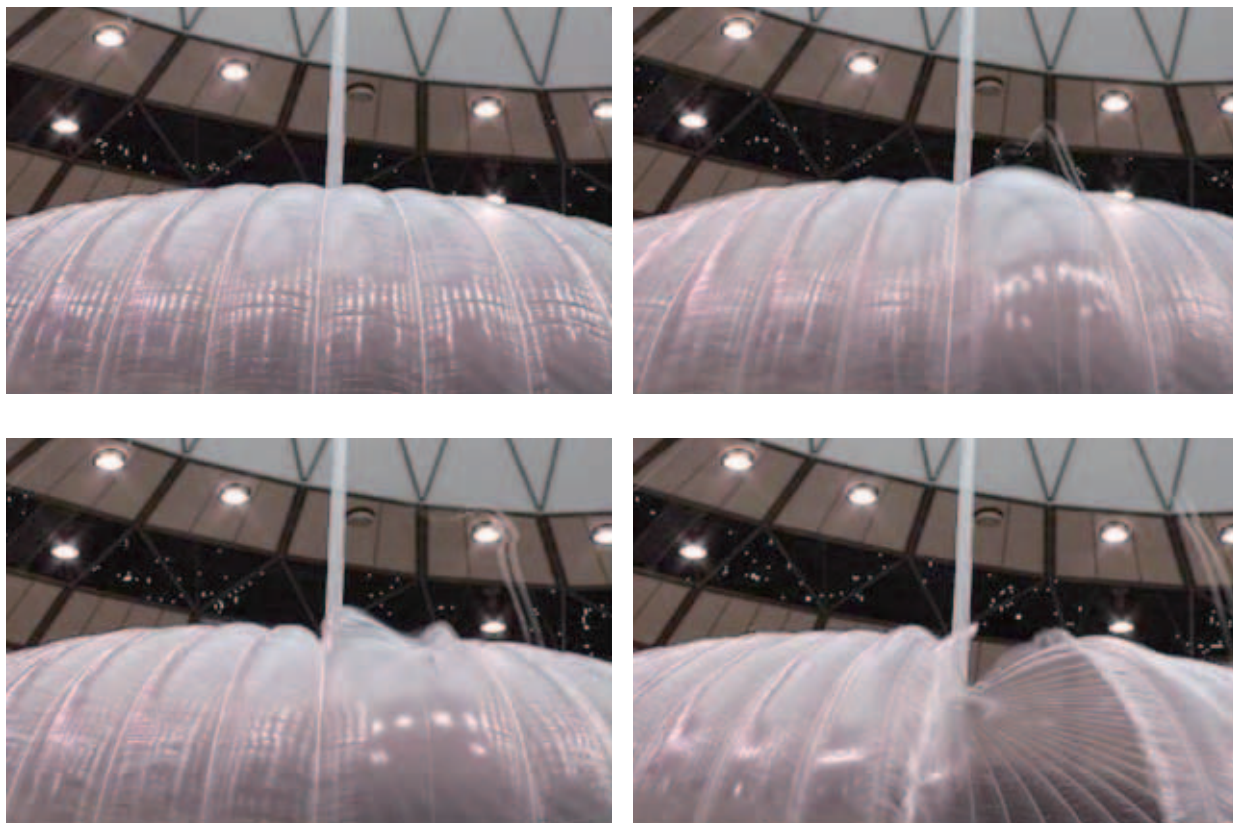


図 18 SPB 用気球破壊機構の動作試験



図 19 モデル PB60S-3, 底部圧力差 30 Pa

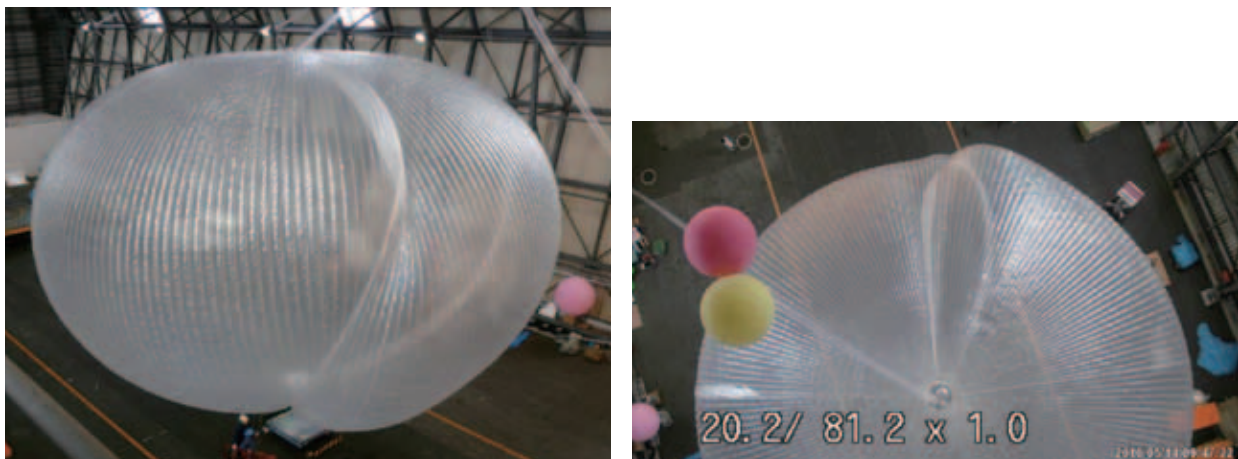


図 20 モデル PB60S-1, 底部圧力差 50 Pa

## 5. 飛翔試験

実際に成層圏を飛翔させることを目的とした直径約 21 m のモデル #4 を製作した (表 1)。この飛翔試験の目的は以下の通りである。

- (1) 地上試験では再現できない実際の上昇時における膨張過程を映像で確認する。
- (2) 全ゴアが正常に展開することを映像で確認する。
- (3) 成層圏の低温環境下における耐圧性能を搭載差圧計により取得する。
- (4) 新規に開発された SPB 用気球破壊装置の動作確認を行う。

ゴンドラは気球尾部金具に直接取り付けられた上ゴンドラ (気球尾部搭載機器) と通常の下ゴンドラに分かれ、上ゴンドラ (図 21 右) には差圧計 (Setra 239, レンジ  $\pm 7.5$ ”WC) および気球尾部に標準搭載されている冗長系システム [17] (気圧計と GPS が内蔵されている) を収納した。下ゴンドラには ITV カメラ (モスウェル MS-55B-MD55) と ITV 用送信機が搭載された。また、この気球のロードロープ (縦ロープ) にはレーダーヤーンが織り込まれていないため別途レーダー反射板を気球尾部下に搭載した。図 21 左に示した気球頭部には、ガス注入口と SPB 用排気弁が取り付けられている。飛翔時の重量構成を表 2 に示す。予定浮遊高度は 25 km, そのときの最大圧力差は 500 Pa (この気球の設計上の耐圧の 1 kPa の 1/2) の予定であった。なお、通常の SPB に要求される耐圧は 100 ~ 200 Pa である。

総浮力が大きくなり放球時に跳ね上げローラーに横ロープのなる気球部分が位置するとカラーの装着がしづらくな



りが不具合につながる可能性があるため、気球ごと（横ロープの始まる位置）に総浮力に上限を設定する必要がある。それ以外は通常の気球と同じ扱いが可能である。ただし、今回の気球は小さいため、総浮力が小さく通常の放球設備は使用できないため、電動台車（ロボコン）上に取り付けた小型跳ね上げスプーラと移動式ランチャ車を使用した。ゴンドラは台車上に置かれ風向きと風速に合わせてランチャ車から適切な距離に配置された（図 22）。気球は 2010 年 8 月 27 日午前 5 時 39 分に放球され（図 23）、240～300 m/分の速度で正常に上昇し、7 時 23 分頃から気球尾部の差圧がプラスになった。その後 100 Pa まで上昇した高度 25.1 km で気球下部に小さな穴が出現し、そこから尾部に向かってパネルが縦に裂けて、気球はゼロプレッシャー状態になり緩降下を始めた。（図 24, 25）そこで 7 時 29 分に気球の切り離しを行ったところ、図 26 に示すように引き裂き紐に引かれて気球は一気に破壊され、通常の ZPB と同等の降下速度で海上に降下した。図 24 によりゴンドラの降下開始から数秒遅れで気球が降下を始めている様子がわかる。最終的には、気球の降下速度はゴンドラより早いため先に着水している。フィルムがはったスーパープレッシャー状態より切り裂きにくいゼロプレッシャー状態で正常に気球破壊を実行できたため、新しい気球破壊機構はスーパープレッシャー状態でも問題なく作動すると思われる。

気球の下部に穴が開い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 27 に示すように破壊点の位置が特定され、パネル番号の特定と尾部からの距離が約 8 m であることがわかった。この位置はパンプキン部分と円筒部分の境目から約 5.7 m 離れた位置である。次に、製造時の記録を点検したが、破壊したパネル自体には、製造時にフィルムの欠陥や不具合は見つかっていない、パッチ当ても実施されていない。また、このパネルおよび両隣のパネルには、電線袋・標識布・引き裂き装置等のアクセサリの取り付けも行われていない。映像からは破壊点付近のゴアはバルジを形成していることが確認できており、これまでの地上試験でも差圧 100 Pa（設計上の耐圧の 1/10）で不具合が生じた事例はない。

破壊の原因として考えられることは以下の通りである。（1）当該フィルムに放球までの間で何らかの損傷があったかあるいは発生した。（2）製造時にゴアの余剰が適切に確保されない部分があり応力集中が発生した。（3）通常の SPB にはない横ロープが原因となり何らかのフィルムの応力集中を招いた。

（1）については、もし、放球後の気球フィルムにピンホールや深い傷などがあった場合には、小さい圧力差でもフィルムの裂けにつながった可能性は否定できない。実際、PB300-1[18]の放球時にはカラーを装着した部分に傷が生じ、その後、この部分が膨張して圧力がかかり始めた直後に裂けた。その対策として、放球までに気球本体フィルムが露出する部分については、ZPB と同様の方式のキャップ化を行い傷が付くのを防ぐ処置がとられた。この対策を施した PB60-2 を製作・放球した結果、フィルムが原因での不具合は発生しなかった [11]。気球は製造後の検査ができないため欠陥をゼロにすることは困難である。ZPB では多少の傷があっても差圧がほぼ 0 のため気球の破壊に至ることはないが、SPB ではこのような小さな傷が致命的になる可能性もある。露出しない部分についても何らかの対策が必要となる可能性は残されている。（2）については製造上の誤差を吸収するためにゴア幅の狭い頭部・尾部の一定区間には余剰率の上乗せ [5] を行っており、応力集中を避ける処置がすでにとられている。（3）については横ロープの展開過程でフィルムに応力集中を発生させる何らかの事象が発生した可能性も否定はできないが検証は難しい。今後、再現試験などを実施することにより原因の特定を行い、必要に応じて対策を施したいと考えている。

表 2 重量構成

気球 (排気弁を含む)	102.2 kg
気球尾部搭載機器	3.8 kg
荷姿	7.4 kg
ゴンドラ	29.0 kg
パラスト	19.8 kg
総重量	162.2 kg
自由浮力	21.5 kg (13.25%)
総浮力	183.6 kg



図 21 気球頭部（左）と気球尾部（右）



図 22 放球前の状態



図 23 放球直後の気球、既膨張部の下側に横ロープが見えている



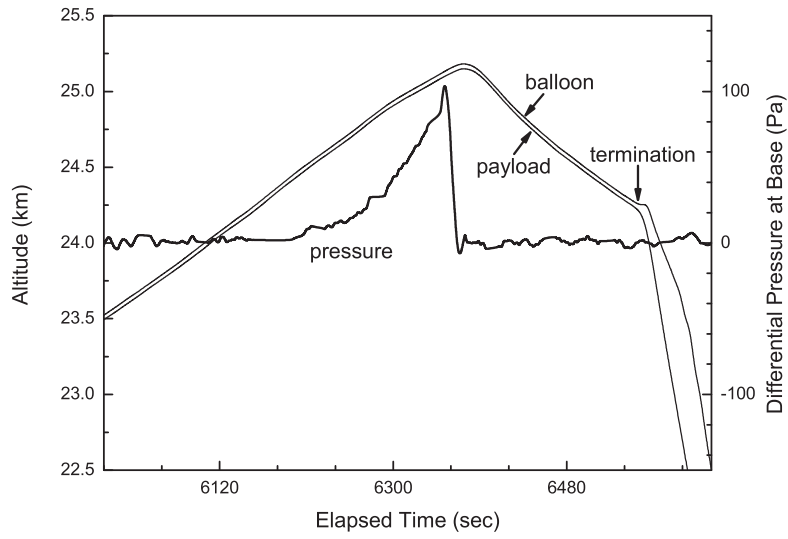
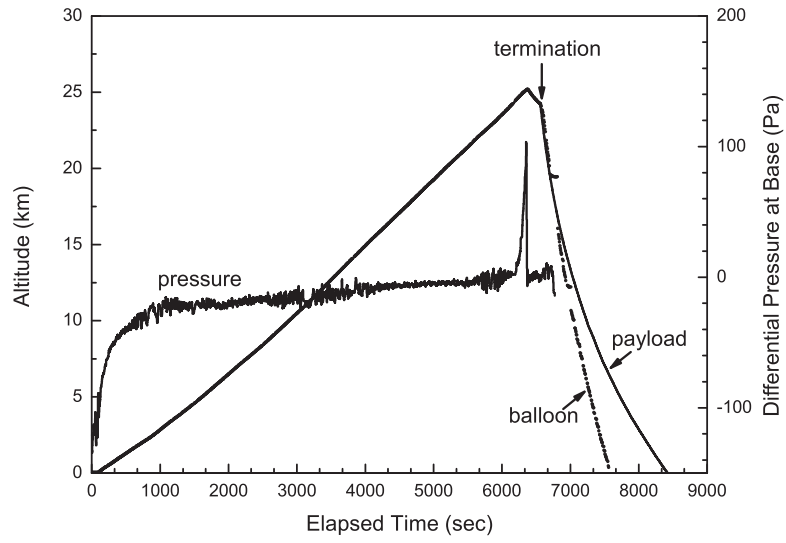


図 24 高度と差圧の変化, 下側の図は最高高度付近を拡大したもの

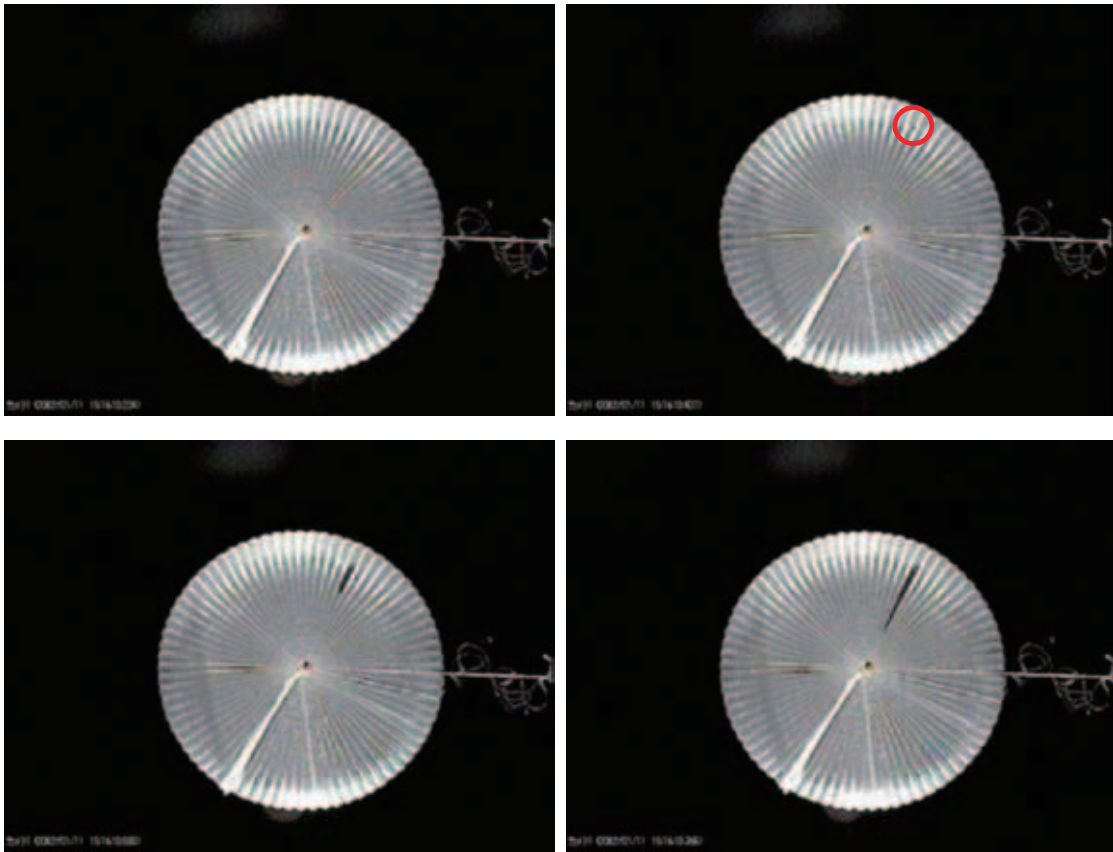


図 25 差圧 100 Pa の時の気球と下部破断後の気球，赤丸が破壊点

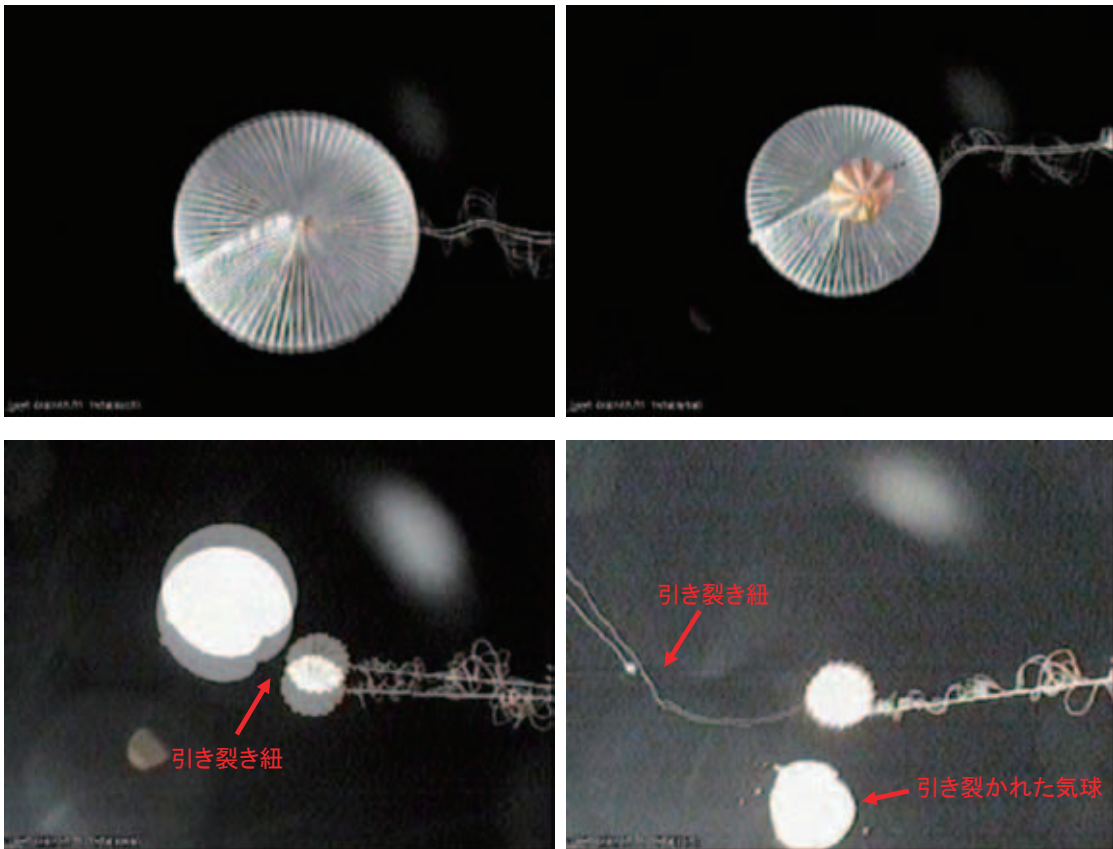


図 26 気球切り離しと気球破壊装置の動作

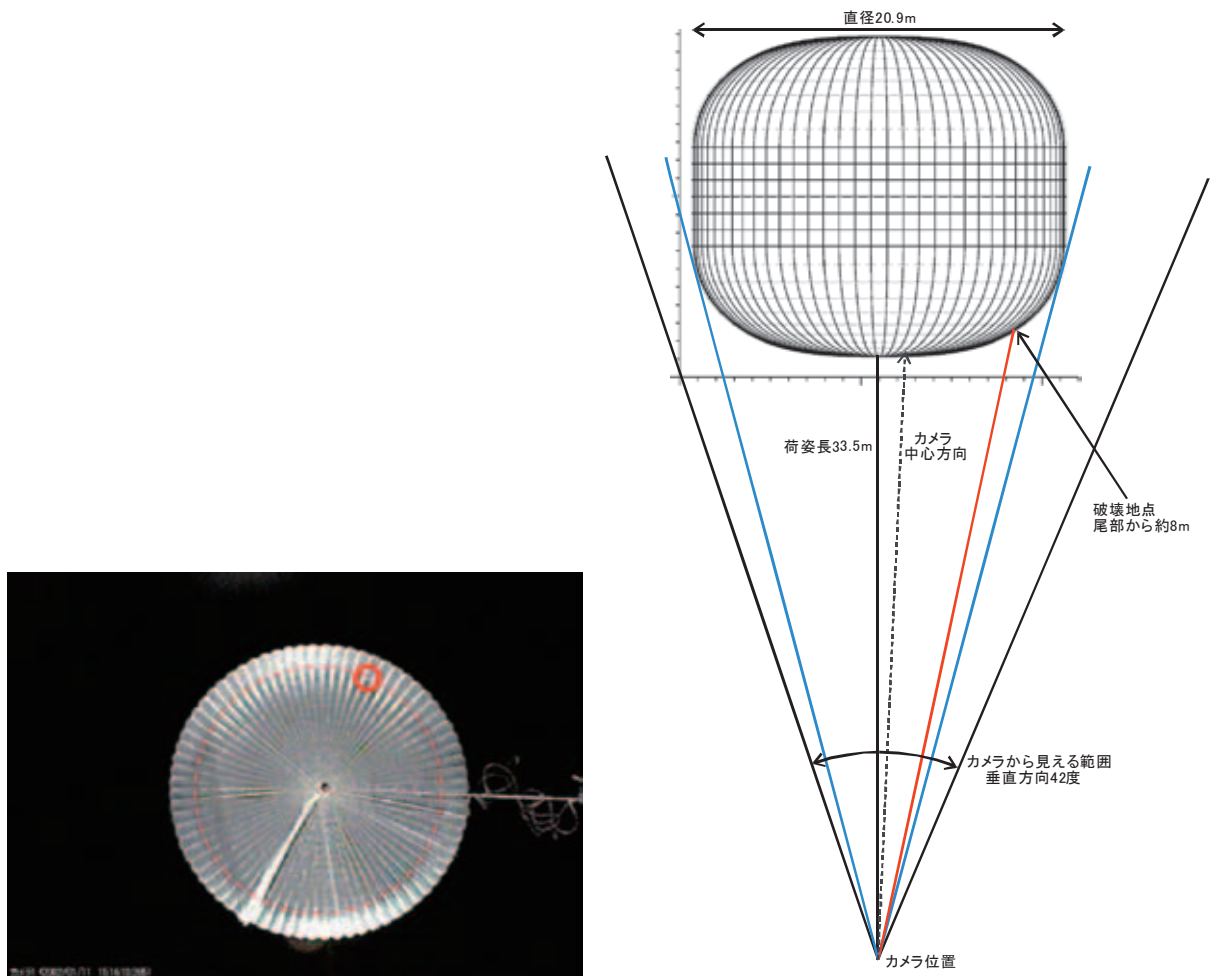


図 27 気球破壊位置，黒線は撮像範囲，カメラは若干傾いている

## 6. まとめ

スーパープレッシャー気球の新しい形状である俵型気球の定式化を行い，その構造の利点について述べた。スケールモデルを用いた地上膨張試験を行い，耐圧性能，膨張過程，形状，展開安定性を確認した。また，容積 5,000 m<sup>3</sup> の気球の飛翔試験を実施した。この気球はスーパープレッシャー状態になったものの差圧 100 Pa で気球底部に穴が開いた。また，スーパープレッシャー気球用に開発した気球破壊装置の正常な動作を確認できた。一連の試験により俵型気球の特性を確認できたと考えている。これらの結果を将来のパワードバルーン計画につなげたい。

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] 矢島信之: 自然型気球の基本特性, 宇宙科学研究所報告 特集, 39, 1-22, 1999
- [2] N. Yajima: A New Design and Fabrication Approach for Pressurized Balloon, Adv. Space Res., 26, 1357-1360, 2000
- [3] N. Yajima, et al.: Three-Dimensional Gore Design Concept for High-Pressure Balloons, J. Aircraft, 38, 738-744, 2001
- [4] N. Izutsu, et al.: Flight Demonstration of a Superpressure Balloon by Three-Dimensional Gore Design, Adv. Space Res., 30, 1221-1226, 2002
- [5] 井筒直樹, 他: スーパープレッシャー気球の開発と試験, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-07-009, 1-22, 2008

- [6] C. R. Calladine: “Stability of the ‘ENDEAVOUR’ Balloon” in ‘Buckling of Structures: Theory and Experiment edited by I. Elishakoff et al.’, Elsevier Sci. Pub., 133-149, 1988
- [7] B. A. Lennon, et al.: Stability of Lobed Inflatable Structures, AIAA Paper, 2000-1728, 2000
- [8] F. E. Baginski: Cleft Formation in Pumpkin Balloons, Adv. Space Sci., 37, 2070-2081, 2006
- [9] J. J. Vorachek: A Comparison of Several Very High Altitude Station Keeping Balloon Concepts, 6th AFCRL Sci. Balloon Symp., 355-381, 1970
- [10] 井筒直樹, 他: 新しい形状のスーパープレッシャー気球の開発, 平成 20 年度大気球シンポジウム, 49-52, 2009
- [11] 福家英之, 他: スーパープレッシャー気球の開発, 平成 21 年度大気球シンポジウム, 13-16, 2009
- [12] J. H. Smalley: Development of the e-Balloon, Proc. 6th AFCRL Sci. Balloon Symp., 167-176, 1970
- [13] 加藤洋一, 他: 気球引き裂き機構の改良, 平成 20 年度大気球シンポジウム, 45-48, 2008
- [14] 加藤洋一, 他: スーパープレッシャー気球 (PB300) の破壊機構の検証, 平成 19 年度大気球シンポジウム, 9-12, 2007
- [15] 福家英之, 他: スーパープレッシャー気球の展開試験, 平成 22 年度大気球シンポジウム, 2010
- [16] 中篠恭一: 俵型圧力気球の数値解析－応力分布および展開安定性－, 平成 22 年度大気球シンポジウム, 2010
- [17] 河田二郎, 他: 新しい気球管制冗長系テレメータ・コマンドシステムの開発, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-09-007, 1-18, 2010
- [18] 井筒直樹, 他: スーパープレッシャー気球開発 (PB300-1), 平成 19 年度大気球シンポジウム, 5-8, 2007