

3次元ゴアデザインによるスーパープレッシャー気球の開発

井 筒 直 樹¹・矢 島 信 之¹・太 田 茂 雄¹・本 田 秀 之¹
黒 河 治 久²・松 島 清 穂³

Development of Superpressure Balloons by Three-Dimensional Gore Design

By

Naoki IZUTSU¹, Nobuyuki YAJIMA¹, Shigeo OHTA¹, Hideyuki HONDA¹,
Haruhisa KUROKAWA² and Kiyoho MATSUSHIMA³

Abstract: Having proposed a new design method to realize a stratospheric superpressure balloon for a long duration flight with a heavy payload, development of such balloons has been ongoing since 1998. The feature of the method is a balloon based on a pumpkin design with large bulges between adjacent load tapes without the help of film extensibility thus largely decreasing the stress of the balloon film. This type of balloon can be manufactured by adding film excess to the gore not only in circumferential direction but also in meridian and by fixing each gore side line to the corresponding load tape of a shorter length with a controlled shortening rate. It generates many wrinkles in circumferential direction and drastically decreases film tension. It is important that no meridian tension exists as a result of the film excess. This method increases the superpressure limit of the balloon, which does not depend on the balloon size.

In order to confirm the design method, an indoor burst test of a 3m-diameter-balloon was made to prove its effectiveness. This paper describes the development of superpressure balloons of larger volume and indoor full inflation tests for the verification of manufacturing processes. On May 15, 1999, a balloon with a volume of 3,000 cubic meters was successfully launched and became a superpressure balloon with a 20 % pressure difference to the ambient atmosphere. It climbed up to 21.6 km in altitude by dropping the ballast and held out against a 64 % pressure difference over the ambient atmosphere. Successive tests have proved the capability of large superpressure balloons with the new three-dimensional gore design.

概 要

我々は、大重量の観測器を搭載して長時間飛翔可能なスーパープレッシャー気球を実現するための新しい気球設計法を提案し、1998年よりこの概念に基づいた気球の開発を行ってきた。本設計法の特徴は、パンプキン気球をベースにし、その補強ロープの間にフィルムの伸びに依存することなく、周方向に大きなふくらみを形成することで皮膜張力の大幅な減少をはかることにある。このような3次元形状のふくらみはゴアのサイドにしわを寄せながら短縮して補強

¹宇宙科学研究所 ²工業技術院機械技術研究所 ³藤倉航装株式会社

ロープに固定することにより達成される。さらに、子午線方向には皮膜を余らせることにより張力を発生させないことが重要である。このように気球を設計することにより、気球の耐圧特性は飛躍的に増し、かつその大きさに依存しないことになる。

この設計法を実証するために、直径3mのモデルを用いた破壊試験がすでに行われており、その有効性が実証されている。その後、より容積の大きい本格的なスーパープレッシャー気球を製作し、屋内膨張試験を行い、気球製造上の問題点を洗い出した。さらに、1999年5月15日、容積3100立方メートルの気球を実際に飛翔させることに成功し、高度19.2kmにおいて大気圧の20%の圧力差をもってスーパープレッシャー気球となった。そして、バラストを投下して高度を上げることにより、高度21.6kmにおいて、大気圧の64%の圧力に耐えられることを確認した。一連の試験結果は新設計法の有効性が理論どおりであることを実証した。

重要語：スーパープレッシャー気球、3次元ゴア設計

1. は じ め に

排気口をもつゼロプレッシャー気球を用いて科学観測を長時間行うためには、日中に上昇したガス温度の日没時の低下によって浮力が減少し浮遊高度が低下するのを補償するために、毎夜、総重量の7～10%のバラスト投下が必要となり、長時間飛翔の問題点とされてきた。この問題を避けるためには、夜間でも気球容積がほとんど変化しないスーパープレッシャー気球を用いる必要がある。排気口をもつゼロプレッシャー気球に対して、排気口がなく気球下部にバイアス圧力をもつスーパープレッシャー気球は、従来からの気球形状の設計法によれば、同一高度においては、気球の容積を大きくするにしたがって、気球皮膜の強度もより大きいものが要求される。したがって、これまでのスーパープレッシャー気球の開発においては、比強度の非常に大きい皮膜が求められ、大型のスーパープレッシャー気球の実用化を阻んできた。これは、従来のスーパープレッシャー気球の耐圧限界が、気球の容積と等価な球の半径の逆数にはほぼ比例する[1]特性をもつためである。したがって、ペイロードが増加して気球の容積が増すにつれて、気球皮膜の曲率半径が大きくなり、通常のフィルムでは強度が不足する。たとえ、強度の強いフィルムを使用したとしても重量が重すぎて、巨大な気球になってしまい実用にならない。

我々は、視点を変え、ゴアの形状を見直すことにより、大型のスーパープレッシャー気球の実現可能性を検討し、圧力をささえる役目としての気球皮膜の最大張力を小さく抑えるための方法を提案し、その設計法の有効性の検討ならびに実証を行ってきた。まず、これまでの気球形状の設計上の問題点を明らかにし、高い耐圧性を有する気球の新しい形状設計・製造法が矢島により提案された[2,3]。従来の気球設計法においては、気球のゴアの長さは補強ロープ（ロードテープ）の長さに等しく、ゴア幅はその位置におけるロードテープ間の弧の長さとしていた。これに対して、新しい気球設計法の特徴は、補強ロープの間に周方向の大きなふくらみを形成することで皮膜の張力の減少を図り、子午線方向には皮膜を余らせることにより張力を発生させないことであり、結果として、気球の耐圧特性は、ふくらみの周方向曲率によってのみ決まり、気球の大きさには関係しない。このようなふくらみをもつ気球を平面形状のゴアから形成することは、ゴアのサイドにしわを寄せながら補強ロープに固定することにより可能となる。

次に、この設計法に基づく直径3mの気球を実際に製作し、破壊試験を行い、その耐圧性能が理論どおりであることを確認した[2,3]。本報告では、その後に実施した、より容積の大きい本格的なスーパープレッシャー気球の開発について述べる。一連の気球を製作し、屋内において膨張加圧試験を行った。そして、1999年5月15日、容積3100m³の気球を実際に飛翔させることに成功し、高度19.2kmにおいて日本で最初のスーパープレッシャー気球となった。これら一連の試験結果について述べる。

2. 計 算 方 法

自然型気球の形状は子午線方向の気球皮膜のつりあいを考えることにより求められる [4]. そのとき, 気球下端の内圧が周囲の大気圧より高いとおくことにより, スーパープレッシャー気球の形状が求められる. もし, 十分な圧力差があり, 気球内部の圧力が高さによらないとすることにより, 気球の形状はいわゆるパンプキン気球になることが知られている [5-7]. すなわち, 気球の天底から皮膜の子午線に沿う長さを s で表し, 中心軸からの距離を r_s , この位置における皮膜の傾きを θ_m , r_s の最大値を $r_{s,MAX}$ とおけば, パンプキン気球の形状は,

$$ds = (r_{s,MAX}^2 / 2r_s) d\theta_m \quad (1)$$

で表される [3,5,7]. この型は, 子午線の長さを一定とする拘束条件のもとで体積が最大となる形状であり Euler's elastica [5] とも呼ばれる. もちろん, パンプキン気球は, 自然型気球の形状を計算する場合と同様に, 軸対称形状であり, この時点で補強ロープは存在しないし, 円周方向の張力も存在しない. 次にこれを補強ロープの存在する気球に拡張するわけであるが, このとき, 隣り合った補強ロープ間の皮膜 (ゴア) の子午線方向の張力が 0 であるとする. このことは, 子午線方向に皮膜が余っていれば, 曲げモーメントおよび圧縮力が 0 であるとする膜理論により成立する. 圧力は局所的には補強ロープ間に大きく張り出した, 気球の曲率半径に比べて十分曲率の大きいふくらみ (バルジ) によってささえられ, このとき発生する皮膜の張力が両隣の補強ロープに伝達される. このようにして, 子午線方向にのみ張力の存在するパンプキン気球を, 補強ロープが子午線方向の張力を受け持ち, バルジが横方向張力のみ受け持つように役割を分担させることにより, バルジをもつパンプキン気球に発展させることが可能となる [3].

図 1 に示すように, 補強ロープ間にいたるところで曲率半径が一定の大きなバルジが無理なく形成されているとする. 補強ロープの数を N とし, 気球の天底から補強ロープに沿う長さを s とし, 補強ロープの位置を r_s, z_s , この位置における補強ロープの傾きを θ_m , 曲率半径を R_m とする. また, 隣り合った補強ロープのなす角度を 2α で表す. バルジは隣り合った補強ロープの間にこれらが作る面に垂直に形成されるものとし, そのバルジの曲率

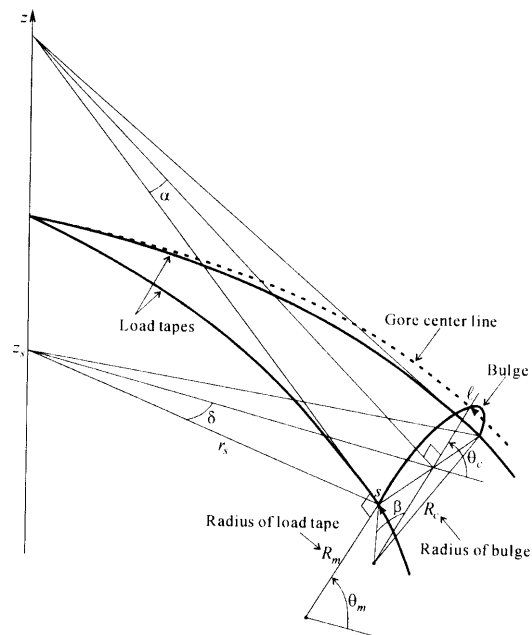


図 1 補強ロープ間にバルジをもつ気球

半径を R_c とする．このバルジの開き角度を 2β ，バルジの断面と r 軸のなす角度を θ_c とおく．ここで，補強ロープはパンプキン気球の表面を定義する式 (1) を満足するものとする．関係式，

$$\delta = \pi / N , \quad (2)$$

$$\sin \alpha = \sin \theta_m \sin \delta , \quad (3)$$

$$\tan \theta_c = \tan \theta_m \cos \delta , \quad (4)$$

$$\sin \beta = r_s \sin \delta / R_c , \quad (5)$$

を用いて，天底からゴアの中心線に沿う長さ l は以下の式で表すことができる．

$$dl = ds \cos \alpha + R_c (1 - \cos \beta) d\theta_c . \quad (6)$$

また，各 l の位置におけるゴアの幅は $2\beta R_c$ で求められる．式 (1)，(6) を天底から積分することによって気球およびゴアの形状を計算することが可能である．

以上の関係は気球内外の圧力差に無関係となり，ここでは，バルジのあるパンプキン気球の簡易計算法と呼ぶことにする．実際のスーパープレッシャー気球では，気球内外の圧力差と補強ロープの張力のつりあい式を解かなければならない [8]．この張力にはペイロードの荷重成分も加わる．まず，気球内外の圧力差は与えられる平均圧力差を p_o として，

$$p = p_o (\rho_a - \rho_g) g (z_s - z_{s,MAX} / 2) , \quad (7)$$

のように表される．ここで， ρ_a ， ρ_g ， $z_{s,MAX}$ はそれぞれ大気密度，気球内部のガス密度，気球の全高を表す．また，補強ロープの単位長さあたりの質量を w_s ，気球皮膜の単位面積あたりの質量を w_f とする．ここで，補強ロープと皮膜の間に働く張力をベクトル \mathbf{T} で表す．皮膜に作用する張力ベクトルを結んだ線（張力線）は，局所的には半径一定， R_c の円弧の一部となる [8]．隣り合った補強ロープは赤道を除いては，平行でないため，バルジの端に発生する張力ベクトルは傾き，結果として張力線は隣り合った補強ロープが作る面に垂直な軸と角度 ϕ をなすことになる．簡易計算法の場合と同様に座標および記号をとる．図2に示すように ξ 軸と水平面のなす角度を θ_c で表現すると，すでに示した式 (2)～(5) の他に以下の関係が得られる．

$$\sin \phi = \tan \alpha \tan \beta , \quad (8)$$

$$\sin \varphi = \cos \theta_m \sin \delta . \quad (9)$$

ただし，補強ロープに垂直で z 軸を通る軸と ξ 軸のなす角を φ とした．そして，図のように補強ロープ位置 s における局所直交座標 (x, y, ξ) 上で考えると，皮膜の張力 $\mathbf{T} = (T_x, T_y, T_\xi)$ は以下のように求められる．

$$T_x = R_c p (\cos \alpha \sin \beta \sin \phi + \sin \alpha \cos \beta) , \quad (10)$$

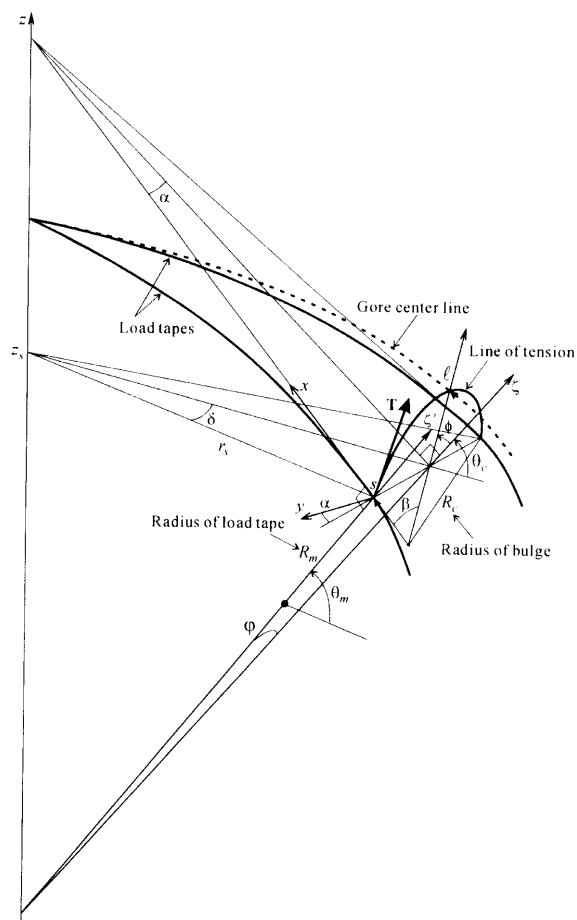


図2 補強ロープおよび気球皮膜に作用する張力

$$T_y = R_c p (\sin \alpha \sin \beta \sin \phi - \cos \alpha \cos \beta) \quad , \quad (11)$$

$$T_{\xi} = R_c p \sin \beta \cos \phi \quad . \quad (12)$$

したがって，補強ロープの曲率半径 R_m は次式により求められる．

$$T_s / R_m = 2 (T_z \cos \varphi + T_y \sin \varphi) \cos \alpha \cos \phi - w_b \sin \theta_m . \quad (13)$$

ここで、補強ロープに作用する張力 T_s は、

$$dT_s = -2dsT_i \cos \alpha \cos \phi + w_b \cos \theta_m \quad , \quad (14)$$

である。したがってゴアセンターの長さ l は以下の式で表すことができる。

$$dl = ds \cos \alpha \cos \phi + R_c(1 - \cos \beta)(d\phi + d\theta_c) \quad . \quad (15)$$

ただし,

$$w_b = (w_s ds + 2w_f R_c \beta dl) g, \quad (16)$$

ゴアの幅は $2\beta R_c$ で決定される. また, ペイロードの質量を m_p とすると, 気球天底において次の式が成立する.

$$NT_s \cos \theta_m = m_p g, \quad (17)$$

式 (14) および (15) を天底から適当な初期値 T_s を与えて積分することにより, バルジのあるパンプキン気球およびゴアの形状が求められる. 実際の気球はゴア位置 l のゴアサイドを補強ロープの s の位置に固定することにより行われる. この際に, 各点におけるゴアの長さとはそれに対応する補強ロープの長さとの差の分だけゴアが短縮され, しわがよって補強ロープに固定される. また, 補強ロープの伸びによる容積の増加と皮膜の伸びによるバルジの拡大を考慮した計算をする必要がある. 補強ロープの長さは設計圧力差が生じたときの長さを基準にして, 製造時には各部の伸びに応じて短縮すればよい. また, バルジの半径は圧力による伸びがない仮想的な状態を考慮して, このときの値をとることとする. したがって, フィルムが伸びて膨らむことにより, 圧力差が大きくなるにしたがってバルジの曲率半径は小さくなる. また, この伸びによってバルジは外側にさらにはりだすためゴア中心線の長さはこの分を考慮して余分にとっておかなければならない. 本計算では以上の効果をいれて計算しており, 設計圧力差が作用したときに子午線方向のしわがちょうど消えるように求めている.

3. 計 算 結 果

バルジのあるパンプキン気球の形状計算をいくつかの場合について行った. その計算条件 (気球容積, ゴア数, バルジ曲率半径, 圧力差, ペイロード重量) および計算結果を表1に示す. また, 図3は得られた気球の側面形状, ゴアの形状, 平面形状を表している. なお, この計算においては, 補強ロープと気球皮膜の特性・重量などは, 以下に述べる一連の気球製作において使用したものと同等の値を仮定して用いた. ゴア数が少ない場合では, ゴアは従来の設計法と比較するとかなり大きいサイズとなるが, ゴア数が増すにしたがって, ゴアの形状にはほ

表1 バルジのあるパンプキン気球の形状計算結果

		Balloon-2	Balloon-3	Balloon-4
容積	m ³	11.2	108.2	3100
ゴア数		12	18	55
バルジ曲率半径	m	0.5	0.8	0.8
設計圧力差	kPa	5	2	1
ペイロード重量	kg	0	0	100
直径	m	2.84	6.28	20.29
高さ	m	2.25	4.54	12.80
表面積	m ²	25.1	115.1	1125
補強ロープ自然長	m	4.07	8.70	26.77
ゴア自然長	m	4.54	9.35	27.82
ゴア最大幅	m	0.83	1.20	1.30
最大短縮率		0.22	0.14	0.06
補強ロープ最大張力	kN	2.8	3.6	6.0
到達高度	km	9.8	15.7	19.6
計算重量	kg	4	16	151
仮想パンプキン気球*の体積	m ³	10	100	3000
仮想パンプキン気球*のゴア最大幅	m	0.74	1.10	1.16

*この計算により求められた補強ロープを気球中心軸の周りに回転させてできる立体

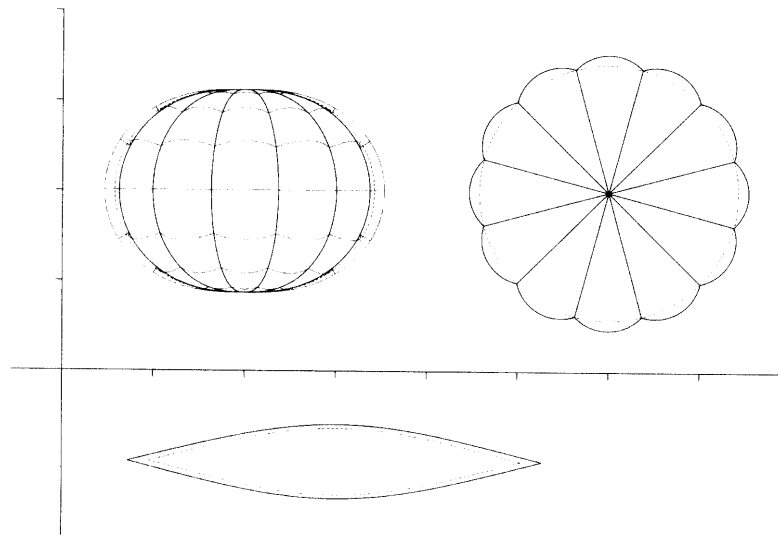


図3-(a)

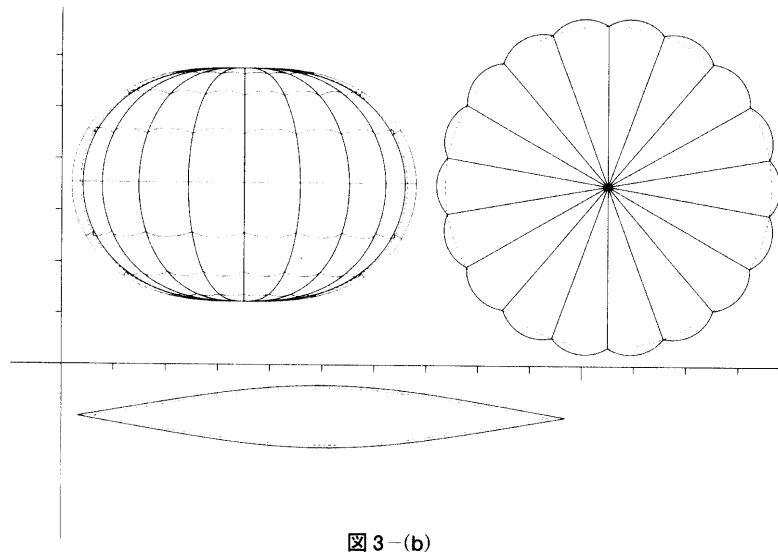


図3-(b)

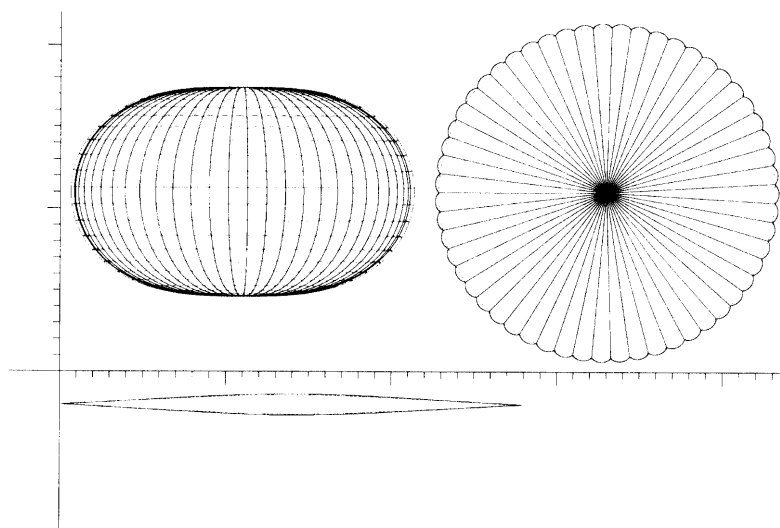


図3-(c)

図3 バルジのあるパンプキン気球の形状計算結果
気球容積：(a)11.2 m³，(b)108.2 m³，(c)3100 m³

とんど差がなくなるように見える。ゴアの長さの差は赤道部で最大となるゴア短縮率に反映されて3次元的なバルジが形成される。

各々の計算結果について、補強ロープに作用する張力、気球皮膜上の張力線の傾斜角度、気球皮膜に作用する張力、バルジの曲率半径、およびゴア短縮率について、無次元化したゴアの位置（天底が0、天頂が1）による変化を図4にプロットしてある。補強ロープの張力は、圧力差が大きいほど赤道部と極部における値の差が大きくなる。圧力差が非常に小さい仮想的な場合を考えると張力は一定値になる。張力線の傾斜角度、すなわちゴア

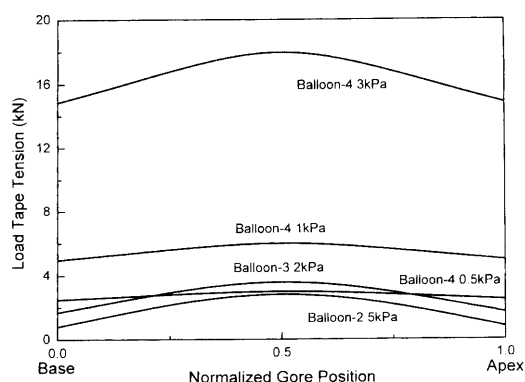


図4-(a)

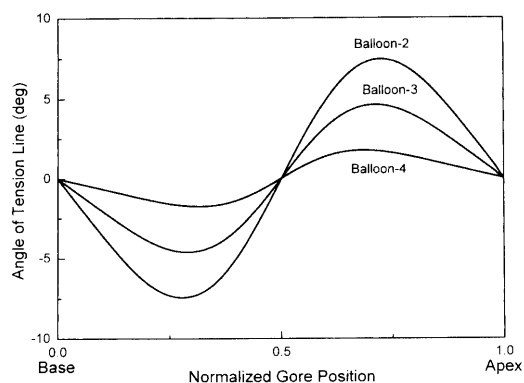


図4-(b)

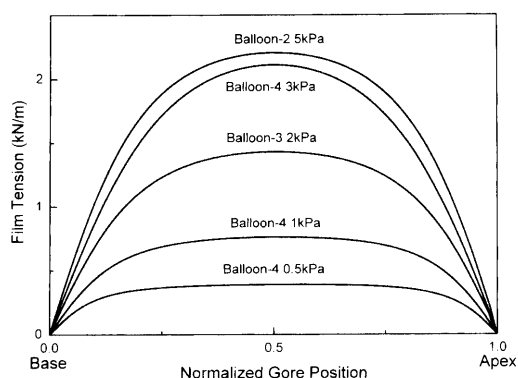


図4-(c)

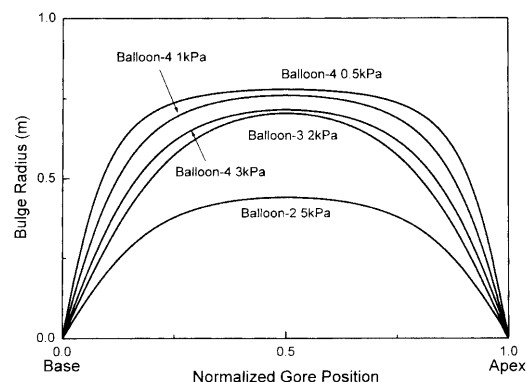


図4-(d)

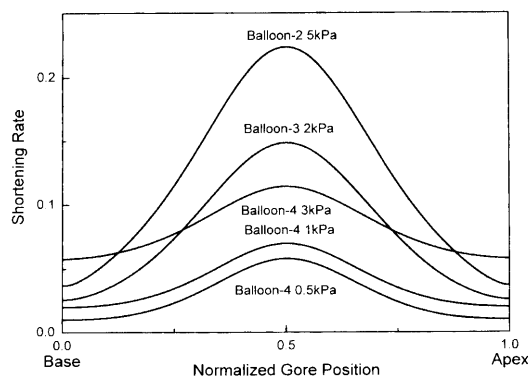


図4-(e)

図4 バルジのあるパンピング気球の計算結果

(a)補強ロープ張力, (b)張力線の傾斜角, (c)気球皮膜張力, (d)バルジの曲率半径, (e)ゴア短縮率のゴア位置による変化

中心線と隣り合った補強ロープが構成する面のなす角度は赤道部と天頂、天底では0となるが、その中間では極側に傾くことになる。その傾向はゴアの数が少ないときに大きく、たとえば Balloon-2 の場合で最大7.5度バルジが傾斜していることになる。気球皮膜に作用する張力は赤道部で最大となり、極に近づくにしたがって小さくなる。これは、バルジ半径がフィルムの伸びによって、赤道部での値から極に向かうにしたがって小さくなるためである。また、圧力差が小さくなるにしたがって Balloon-4 の圧力差 0.5 kPa の例に示すように張力がほぼ一定の領域が広がり、バルジ半径は極近傍でのみ小さくなることがわかる。圧力差が設計圧力差に比べて非常に小さい仮想的な場合には、いたるところで設計時に与えられたバルジ半径が形成されることになる。ゴアの短縮率は、赤道部で最大となり、極に近づくにしたがって小さくなるが、ゴアの周方向伸びによるバルジの張り出し量の増加を計算に入れているため、天頂・天底でも0にはならない。当然ながら、この値は同一の皮膜に対しては圧力差を高くするほど大きくなる。

4. 気球の製作

これまでに製作し試験を行った気球の諸元を表2に示す。この中で、UB001-1に関してはすでに製作・試験結果が報告されている [2,3,8]。ここに示した気球は、いずれも簡易計算法により設計したもので、気球皮膜の伸びを考慮していないものである。したがって、加圧するにしたがって子午線方向にも張力が発生する形状となっている。結論から言えば、このように設計・製作しても子午線方向と周方向の曲率の大きな違いにより、気球内外の圧力差を支える役割は主として曲率半径の小さな周方向すなわちバルジによるものであり、子午線方向の張力はこの意味では圧力を支えるのにほとんど寄与はしていない。

ゴア本体に使用したフィルムは UB001-1 の製作に用いたものと同等のナイロン格子織でヘリウムガスの透過を防ぐために片面をウレタン引した布 (UNC) である。このフィルムの破断強度は常温で 7 kN/m、破断時の伸びは約 30 % である。フィルムの厚みはコーティング膜を含んで 130 μm 、重量は 80 g/m² である。気球の製作方法は以下の通りである。まず、2枚のゴアとナイロン布による補強ロープ固定用補助テープを重ねて縫い合わせる。そして、裏面からシールのためのウレタンホットメルトテープを縫合部に溶着する。次に、コンピュータ制御によるいせ込み機能つきミシンを使用して、補強ロープ固定用補助テープに所定の短縮率でしわを寄せながら、ケブラーアラミド組打紐を縫い付ける。その後、この補助テープをロープのさやを形成するように縫い閉じた。このようにすることにより、補助ロープ固定用テープに作ったしわが、無理なくゴアサイドのしわとなり、また、補

表2 製作したバルジのあるバンブキン気球の諸元

気球名称	UB001-1	UB01-1	UB3-1/UB3-2
頭部重量(kg)	-	-	68.2
全重量(kg)	-	19.4	151.5
直径(m)	2.8	6.3	20.3
全長(m)	4.3	9.2	27.5
容積(m ³)	11.2	108	3100
ゴア数	12	18	55
バルジ曲率半径(m)	0.5	0.8	0.8
フィルム	ナイロン片面ポリウレタン引布		
重量(g/m ²)	90	80	80
厚み(μm)	130	130	130
破断強度(kN/m)	10	7	7
補強ロープ	ケブラーアラミド組打紐		
破断強度(kN)	15.7	18.0	18.0
ガス注入口	長さ(m)×本数	-	20×1
引き裂き紐		なし	あり
吊り手		-	リング

強ロープが2枚のゴアのつなぎ目にちょうどおさまる。この際の接合部の強度は皮膜の強度と同等である。このようにすることにより、ゴアサイドが設計通りに短縮、しわよせされて補強ロープに確実に固定される。気球頭部と尾部のフィッティングはクロムモリブデン銅製の外径0.25 m 内径0.2 m のリングに各補強ロープを結びつけることにより構成された。ガス注入口は頭部に設けたが、屋内膨張加圧試験の際に注入時間を短縮するために尾部にもガス注入口を取り付けた。

5. 屋 内 試 験

これまでに製作した気球に関する加圧試験結果を表3にまとめている。このうちUB001-1に関しては破壊試験が行われており [2,3,8]、その破壊圧力 18.7 kPa がほぼ設計値どおりであることが確かめられている。ただし、計算結果においても示したように、直径約 3 m の小型モデルでは、ゴアの数12と極端に少ないため、大型気球とは形状・性質や製作工程など、異なる点が多々ある。そこで、段階的により大型の気球を製作し、試験を行うこととした。なお、表3においては、限界圧力は補強ロープの破断強度によるものとフィルムの破断強度によるものがあり、この小さいほうが気球の理論的な破壊強度となる。

まず、1999年2月に容積 108 m³ の気球 UB01-1 を製作し屋内において膨張加圧試験を行い、気球形状や気球皮膜の伸びを測定するとともに、気球製作工程の確認を行った。続いて容積 3100 m³ の気球を2機 (UB3-1 および UB3-2) 製作し、これらを用いて1999年3月および4月に屋内において膨張加圧試験を行った。なお、UB3-1 と UB3-2 の違いは主として製作上の取り扱いの違いである。いずれの屋内試験とも、気球頭部を天井から吊り下げ、気球頭部および尾部からブローアで空気を注入しながら、気球の形状変化の様子を観察するとともに、天底における気球内外の圧力差および赤道部を含む3～4ヶ所でゴア中心線付近における気球皮膜の曲率半径と皮膜の伸びを計測した。すべての屋内加圧試験は福島県小野町町立体育館において行った。

図5 (a) は気球 UB01-1 について、圧力差が 3 kPa になった時の様子を示している。図5 (b) は気球 UB3-1 の圧力差が 1 kPa のときの写真である。いずれの場合も、補強ロープ間のおおきなバルジが設計どおりに形成されていることを確認した。なお、気球 UB3-2 については、加圧中、圧力差が 1 kPa になった時点で天頂から約 0.4 m 地点に補強ロープにそって皮膜縫合部に約 5 cm の破断が生じたため加圧試験を中断した。その後の調査により頭部近傍におけるゴア縫合後の周方向長さの全長が規定の周長より短かったためと判明した。これは主としてミシンにより縫合する際の誤差の集積によるものであることがわかり、気球 UB3-1 にその対策を施した。

図6および7はそれぞれの気球について、皮膜の伸びとバルジの曲率半径の圧力差による変化を示したものである。圧力は天底で計測した。伸びはゴアにあらかじめマーキングした直行する長さ 0.5 m の線の伸びを実測することにより求めた。曲率はあらかじめ用意した円弧測定定規をゴア面に押し当てて測定した。図6からわかるように、子午線方向の張力は周方向の約 60 % 生じている。この傾向は UB001-1 の試験結果 [3] と一致する。圧

表3 試験結果

気球名称			UB001-1	UB01-1	UB3-2	UB3-1	UB3-1
理論破断圧力	フィルム	kPa	20.0	8.8	8.8	8.8	8.8
	補強ロープ	kPa	26.7	8.3	3.0	3.0	3.0
試験方法			屋内膨張加圧試験				飛翔試験
最大試験圧力		kPa	18.7	5.0	1.0*	1.6	2.9
破壊圧力		kPa	18.7	-	-	-	2.9
最大試験圧力時の赤道部	赤道部	m	0.5	0.70	-	0.75	0.8**
バルジ曲率半径	赤道と極の中間	m	-	0.50	-	0.55	-
最大試験圧力時の円周方向	円周方向	%	20	12.4	-	6.0	-
気球皮膜の伸び率	子午線方向	%	15	8.0	-	4.0	-

*頭部ゴア縫合部破損により試験中断

**ゴンドラ搭載カメラの映像より推定

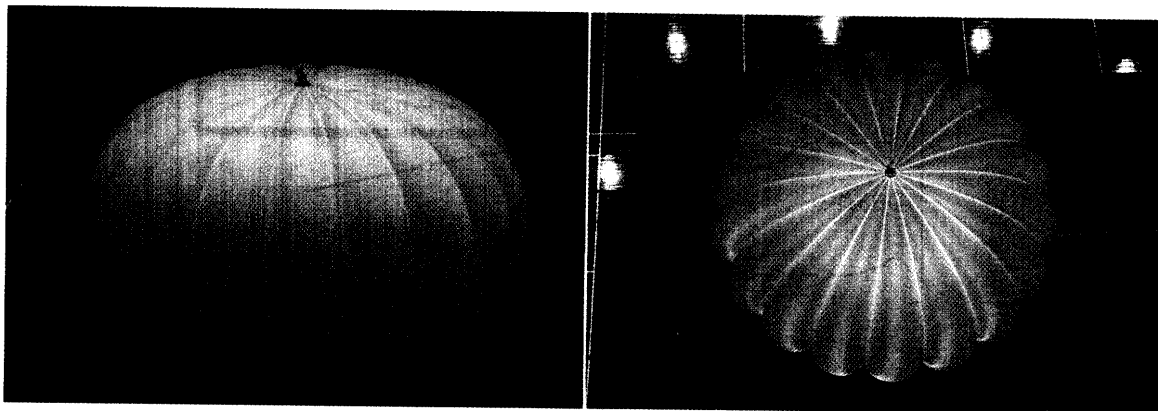


図 5-(a)

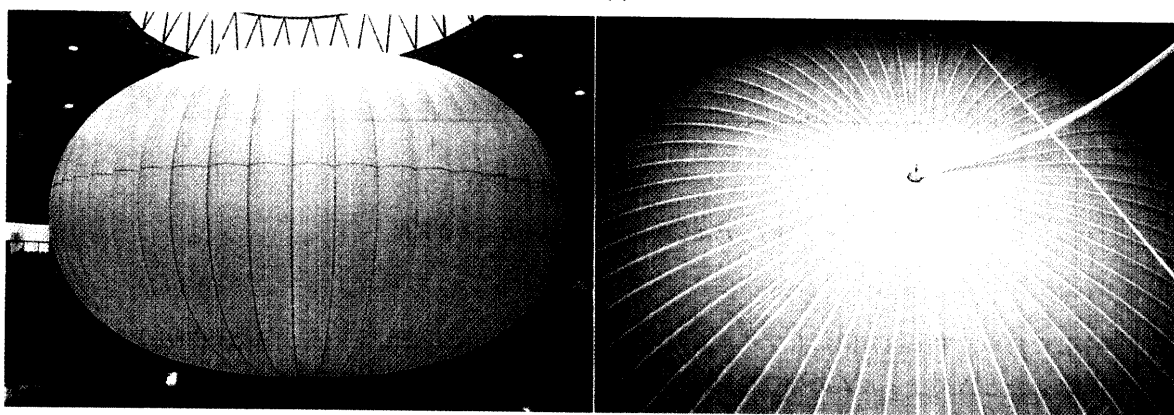


図 5-(b)

図 5 屋内膨張加圧試験
(a)UB01-1, 容積 108m^3 , 圧力差 3kPa , (b)UB3-1, 容積 3100m^3 , 圧力差 1kPa

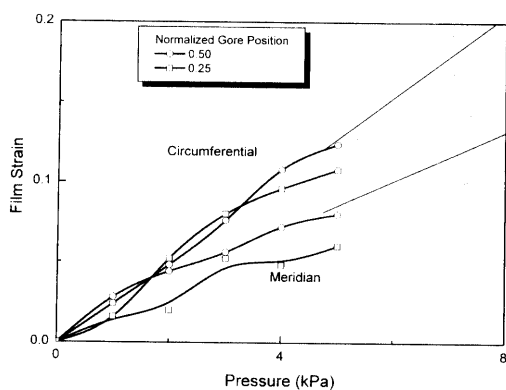


図 6-(a)

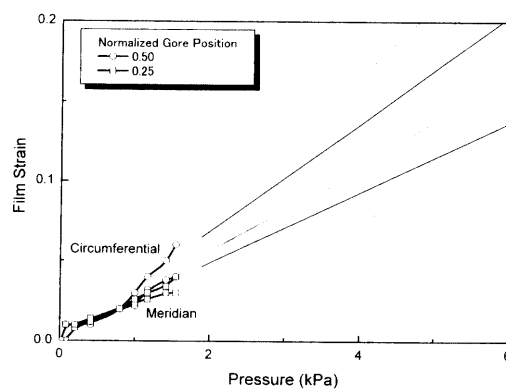


図 6-(b)

図 6 気球皮膜の伸び率の圧力による変化
(a)UB01-1, 容積 108.2m^3 , (b)UB3-1, 容積 3100m^3

力がかかり始めた後、圧力差が大きくなるにしたがって設計された曲率半径のバルジに近づいていくのがわかる。そして、さらに皮膜の伸びにより、曲率半径は設計値からさらに小さくなる傾向が見られる。これは図 4 (d) に示した計算結果とも一致する。また、計算結果と同様に、ゴア位置 0.25 (赤道部と天底との中間地点) におけるバルジ曲率半径も設計値より小さい値となっている。

これらの気球には、フィルムの周方向の伸びによるゴアの張り出し量増加に対応したゴア長の付加を入れるこ

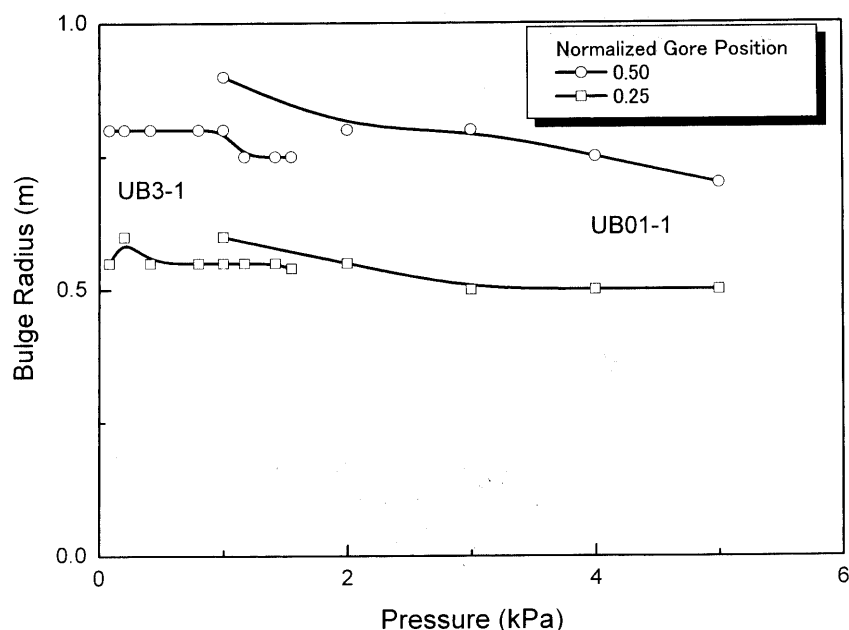


図7 バルジの曲率半径の圧力による変化

となく製作したため、子午線方向にもフィルムの伸びが発生し張力が存在している。気球 UB001-1 の試験結果によれば、破断したときのフィルムの伸びは赤道部において周方向に 20 %、子午線方向で 15 % であった [3]。この値になったときに破断すると仮定して、今回の試験結果より皮膜の伸び値を外挿して求めると、気球 UB01-1 の場合は図 6 (a) に示したように約 8 kPa となり、これはこのフィルムの破断強度に近い値である。一方、気球 UB3-1 については、屋内実験の安全上の問題から 1.6 kPa までの加圧試験しか行っていない。このデータを用いて無理に外挿を試みると、図 6 (b) に示すように、破断圧力は約 6 kPa となる。この値は設計値より小さいが、これは測定値が低い圧力差に限られていることによる誤差と考えられる。

6. 飛 翔 試 験

屋内膨張加圧試験を行った気球 UB3-1 を用いて実際に飛行試験を実施した。この時の重量表を表 4 に示す。ゴンドラにはパラスト 90 kg を搭載した。これは、スーパープレッシャー気球になって水平浮遊している状態から、パラストを投下することにより高度を上げ、さらに圧力差を大きく上昇させ、気球の耐圧性能を確認するためである。気球内ガス圧力 P_g とまわりの大気圧 P_a の差を測定するためにフルレンジ 3.8 kPa の圧力トランスデューサ

表 4 気球重量構成

気球	151.5kg
ゴンドラ	36.0kg
パラシュート等	10.7kg
パラスト	90.0kg
総重量	288.2kg
自由浮力	(12%) 34.6kg
総浮力	322.8kg

(セトラ製モデル 290) を搭載した。得られたデータの分解能は約 0.9 Pa である。他に大気圧を測定するための圧力計 (セトラ製モデル 270) が標準搭載されている。気球の様子を観察するために 1/3 インチ CCD カラービデオカメラ (8 倍ズーム) を搭載した。画角は 44.3 度 (H) × 34.9 度 (V) から 5.8 度 (H) × 4.4 度 (V) まで可変である。また、カメラの方位角をコマンドにより変更することが可能である。広角側にしたときに気球全体が写るように気球とゴンドラ間の距離を 27.5 m に調整した。バラストおよびパラシュートを含めて打ち上げ時のペイロード重量は 136.7 kg であり、自由浮力は 12 % とした。図 8 は気球のフィッティング部の写真である。頭部にはガス注入口があり、尾部には内圧測定口を設けた。

UB3-1 は 1999 年 5 月 15 日、午前 7 時 14 分に三陸大気球観測所から放球された。図 9 は放球の様子を示した写真である。気球の高度と気球内外の圧力差の時間変化を図 10 に示している。なお、気球の上昇速度は図 11 に示すように毎分 260 ~ 330 m の範囲で推移し通常の大気球と同一の傾向を示した。圧力差はゴンドラ上で計測しているため、得られたデータは気球中心における圧力差に補正換算してある。この気球は高度 19.2 km (大気圧 6.5 kPa) で上昇速度が 0 となり日本ではじめてのスーパープレッシャー気球となった。これはまた、世界ではじめての大重量のペイロードを搭載可能な本格的なスーパープレッシャー気球である。この時点での気球内外の圧力差は約 1.3 kPa であった。図 13 からわかるように、このうち半分の 0.65 kPa はガス温度 T_g がまわりの大気温度

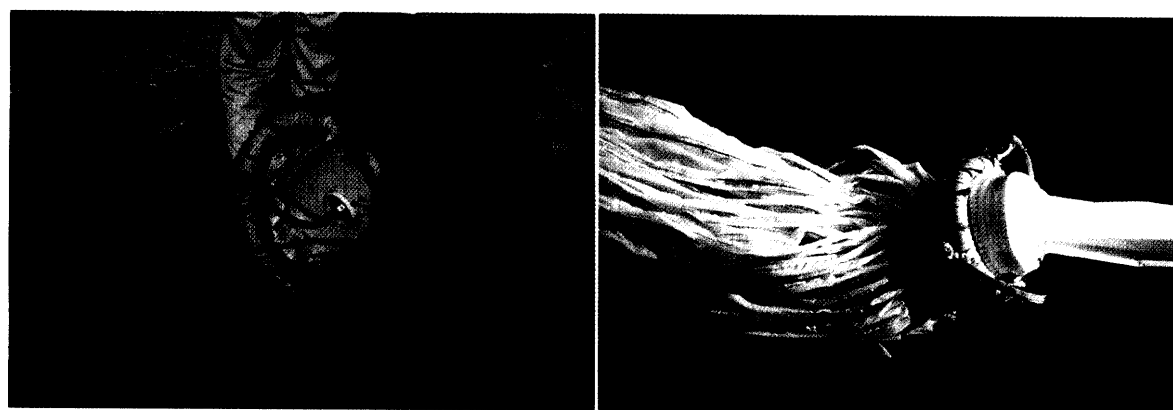


図 8 気球 UB3-1 の頭部 (右) と尾部 (左) の形状

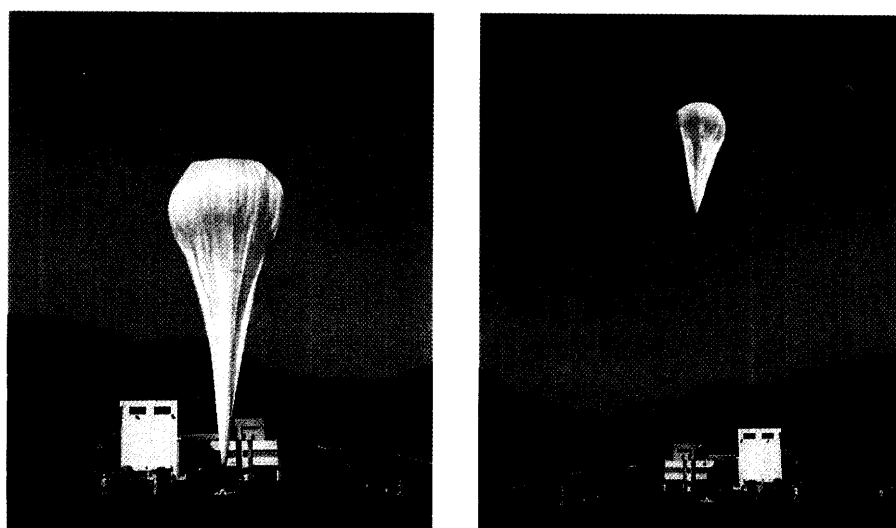


図 9 UB3-1 放球の様子

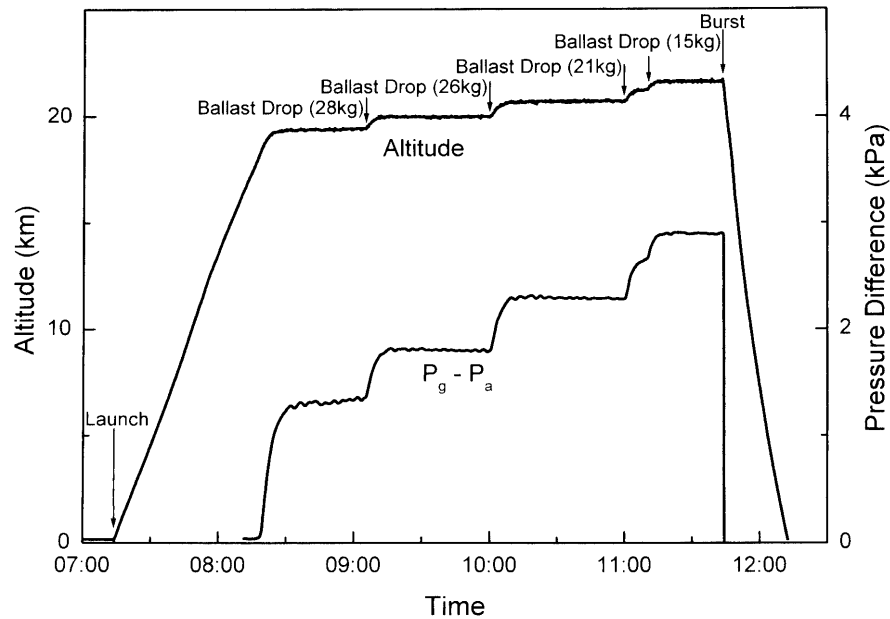


図10 気球高度および圧力差の時間変化

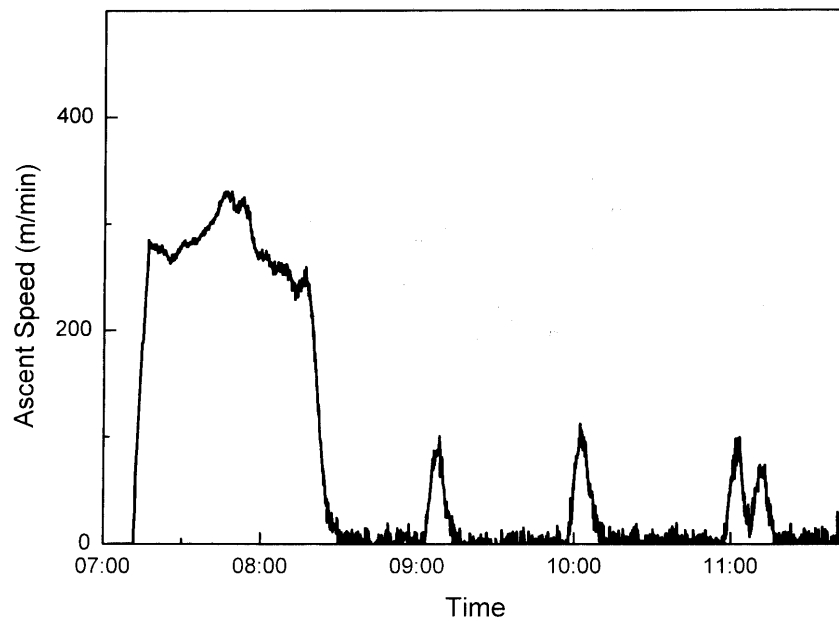


図11 気球上昇速度の時間変化

T_a と平衡していると仮定したときの気球の自由浮力分に由来しており、この場合は大気圧の10.2%に相当する。残りの0.65 kPaはガス温度が上昇したためである。図12 (a)はこの時の気球の様子を示しており、補強ロープ間に大きなバルジが構成されていることが見て取れる。この映像からバルジの曲率半径を推定したところ約0.8mの値が得られており、設計値に等しいことが確認された。

この後、図10の高度変化に表れているように、間欠的に4回に分けて、各々の時点における総重量の10%に相当するバラストを投下し、高度を上昇させるとともに、外気圧の低下に伴い圧力差をさらに上昇させ、気球の耐圧性を確認した。90 kgのすべてのバラストを投下した後に、最高高度21.6 kmに到達し、このときの圧力差は

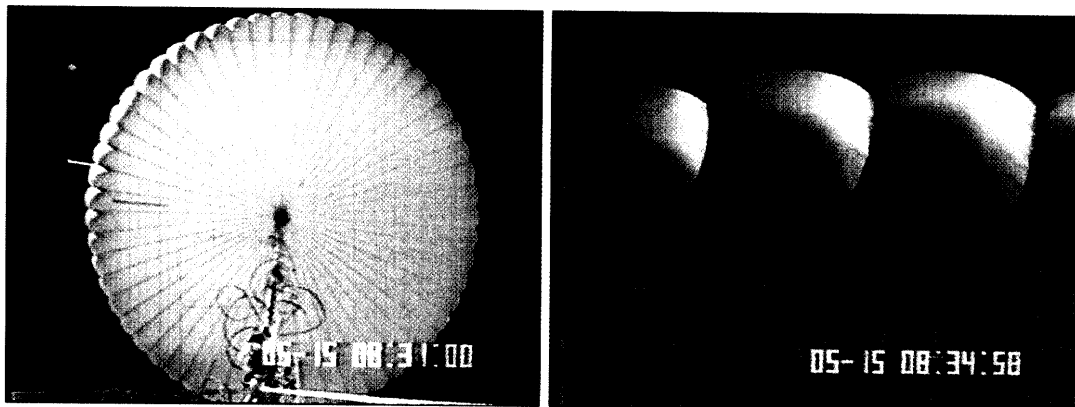


図 12-(a)

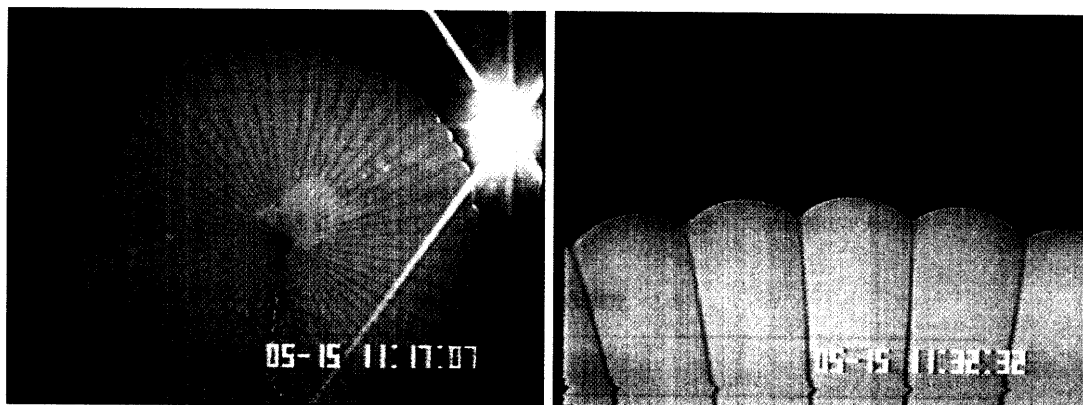


図 12-(b)

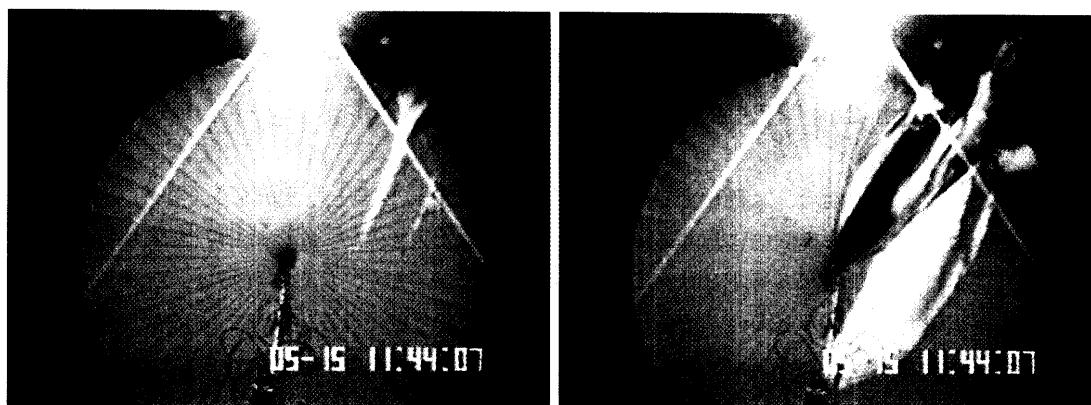


図 12-(c)

図 12 ゴンドラ搭載カメラによる気球の映像
(a)圧力差 1.3 kPa, (b)圧力差 3 kPa, (c)気球破壊の様子

2.9 kPa となった。これはこの高度における大気圧の 64 % の圧力に相当する。またこの圧力差のうち大気圧の 50 % に相当する分が、バラストなしで同じ量のガスをつめて放球したと仮定した場合の自由浮力 (63 %) に由来する分である。最高圧力差に到達してから約 30 分後に気球は破壊した。このときの補強ロープ 1 本あたりの最大張力は約 17.5 kN と推定され、この値は破断強度にほぼ等しく、補強ロープの限界強度に到達して気球が破壊

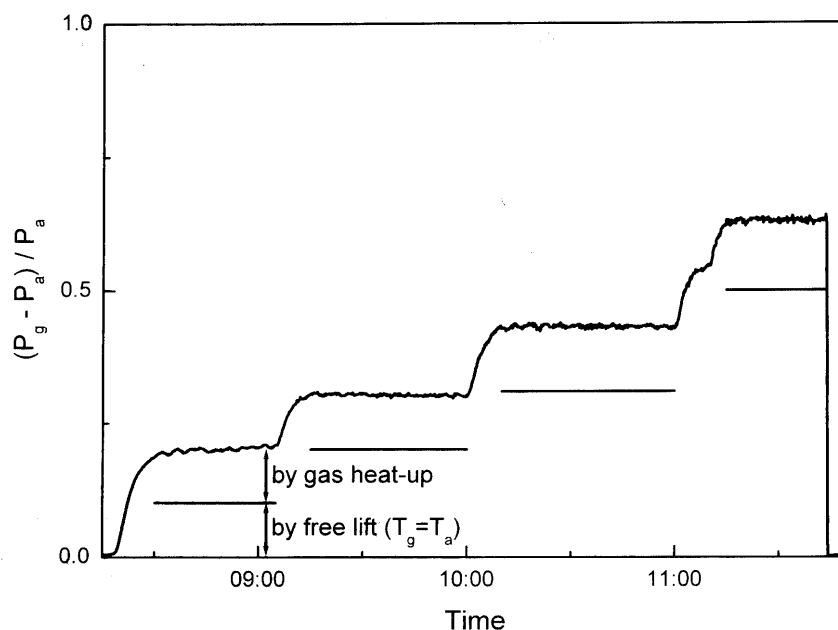


図13 圧力差の大気圧に対する割合の時間変化
短い水平の線はガスが大気温度と等しい場合の自由浮力分の圧力差を表している。

表5 気球の容積とガス温度

高度 (km)	総重量 (kg)	大気圧 (kPa)	大気温度 (K)	圧力差 (kPa)	気球容積 (m ³)	ガス温度と大気温度の差 (deg)
19.1	288	6.52	216	1.33	3220	18.4
19.8	260	5.93	217	1.80	3260	17.2
20.6	234	5.32	217	2.29	3330	18.5
21.4	198	4.59	217	2.90	3370	17.6

したと結論することができる。ゴンドラ搭載のカメラからも、図12(c)に示すように、補強ロープの1本が破断の様子が確認された。

気球が一定高度を浮遊する場合、太陽輻射によってガス温度が上昇して圧力差が大きくなる。これまでも、気球内部の温度上昇を理論的、実験的に求める試みが行われてきた[1,9,10]が、今回の実験から、スーパープレッシャー気球における気球内部の温度上昇がはじめて求められた。まず、気球の容積は、計測した大気圧から計算により求めた大気密度とこのときの浮遊総重量から計算することができる。次に、求められた気球容積、計測したガス圧力、地上でつめたヘリウムガスの量からガス温度を計算することが可能である。大気温度として、同時刻に気象庁がラジオゾンデを用いて測定した値を適用することにより、ガス温度の上昇分が求められる。この計算結果を表5に示す。計算された気球容積は設計値より若干大きめであった。ガス温度上昇はどの場合も約18度であることがわかった。

7. お わ り に

補強ロープ間に、皮膜の伸びに依存することなく周方向にふくらみを有し、かつ皮膜の子午線方向に張力の存在しない、いわゆるバルジのあるパンプキン気球について、その計算方法と計算例を示した。さらに、この原理に基づいた大きさの異なる複数の気球を実際に製作し、屋内加圧試験および飛翔試験を行い、その製造方法と耐圧性能を確認し、この新しい気球設計法の有効性を実証した。

今回使用した皮膜の破断強度は7kN/mであり、通常のスーパープレッシャー気球に必要とされる強度の20倍以上の性能を有するものである。この皮膜を使用したのは、最初に直径3mの気球を作る際に、過去に実施した通常のパンプキン気球の試験結果と比較できたこと、ならびに、この皮膜を用いた気球の飛翔実績があるという理由からである。図14に、この皮膜をそのまま使用した場合の異なる3種類の容積のスーパープレッシャー気球について、ペイロードと到達高度の関係を計算した結果を示す。なお、バルジの曲率半径は0.8mとし、補強ロープの数は周方向単位長さあたりの本数を同一にしている。ここでは、浮遊高度における大気圧の10%のスーパープレッシャー気球とし、この圧力差に必要な強度に対して安全係数4をとっている。この図からわかるように、容積3,000m³ではペイロード200kgが限界であり、容積30,000m³の気球では、500kgのペイロードを高度24kmに浮遊させることができる。しかし、容積を100,000m³にしても到達高度は28kmにしかない。これは、当然のことで、使用する気球皮膜の強度がオーバースペックであり重いためである。

そこで、半分の重量で強度が2kN/m程度の皮膜を使用した場合の浮遊高度を計算した結果を、2種類の容積について同じ図14上に示す。容積100,000m³の気球によってペイロード500kgを高度31kmに浮遊させることができることがわかる。高度が高くなるにしたがって、補強ロープ1本あたりの張力および皮膜の張力は減少する。したがって、十分高い高度においては、現在ゼロプレッシャー気球用皮膜に使用されているポリエチレンフィルムでも強度的には十分である。たとえば、20μm厚のポリエチレンフィルムを使用したスーパープレッシャー気球の例を2つの容積について図14にプロットしてあるが、容積100,000m³の気球によりペイロード500kgを高

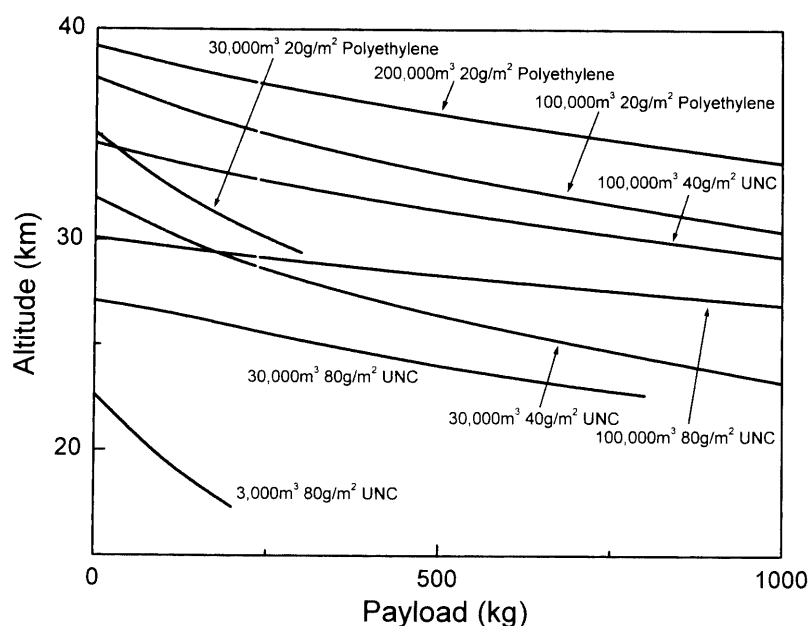


図14 スーパープレッシャー気球のペイロードと到達高度の関係

表6 バルジのあるパンプキン気球の到達高度 (ペイロード 500 kg)

気球皮膜	容積 (m ³)	重量 (kg)	高度 (km)	圧力差 (Pa)	補強ロープ張力(kN) 1本当たり	合計	皮膜張力 (N/m)
UNC (80g/m ² , 7kN/m)	30,000	690	24.0	300	3.8	457	230
	100,000	1530	28.3	160	2.9	525	120
UNC (40g/m ² , 2kN/m)	30,000	344	26.2	210	2.7	325	170
	100,000	766	31.3	100	1.9	341	80
ポリエチレン (20g/m ² , 0.4kN/m)	100,000	473	33.0	76	1.5	261	60
	200,000	755	35.9	51	1.2	274	40

度 33 km に浮遊させることが可能である。容積 200,000 m³ の気球を用いれば到達高度は 36 km になる。表 6 に示すように、気球の重量もそれほど重くなく、また、フィルムの強度は安全係数にして 5 以上ある。このように、実用的な長時間観測に利用することが可能な本格的なスーパープレッシャー気球は、子午線方向に張力が存在しない、小さな曲率半径をもつバルジを有する気球によってはじめて可能になる。

8. 謝 辞

高耐圧気球の実現法に関しては、宇宙科学研究所の雛田元紀教授ならびに名取通弘教授より多くの有益な示唆を受けた。青森大学の藤井正美教授には、ナイロン布地気球に関して多くの貴重な助言をいただいた。ここに心から御礼申し上げる。また、本研究を行うにあたって、気球の開発費の一部は、科学技術振興事業団の平成 10 年度独創的研究成果育成事業により資金援助を受けた。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- [1] 太田茂雄, 松坂幸彦, 鳥海道彦, 並木道義, 他: エバール気球, 宇宙科学研究所報告, **34**, 1-16, 1997.
- [2] N. Yajima: A New Design and Fabrication Approach for Pressurized Balloon, 32nd Scientific Assembly COSPAR, 1998.
- [3] 矢島信之: 自然型気球の基本特性—高耐圧気球実現のための再検討と新しい設計・製作法の試み—, 宇宙科学研究所報告, **39**, 1-22, 1999.
- [4] J. H. Smalley: Determination of the Shape of a Free Balloon, AFCRL-64-734, 1963.
- [5] J. H. Smalley: Development of the e-Balloon, Proc. 6th AFCRL Scientific Balloon Symp., 167-176, 1970.
- [6] M. Rougeron: Up to Date CNES Balloon Studies, Proc. 10th AFGL Scientific Balloon Symp., 39-55, 1978.
- [7] 西村純: パンプキン気球について—内圧の高いハート型気球—, 宇宙科学研究所報告, **30**, 3-11, 1992.
- [8] N. Yajima, N. Izutsu, H. Honda, H. Kurokawa, and K. Matsushima: A New Design Concept of Natural Shape Balloon for High Pressure Durability, AIAA paper 99-3880, 1999.
- [9] H. M. Cathey, Jr.: Advances in the Thermal Analysis of Scientific Balloons, AIAA paper 96-0695, 1996.
- [10] 西村純: 気球内ガス温度の測定, 平成 10 年度大気球シンポジウム, 76-79, 1998.