

多層膜構造気球の設計と試験

井 筒 直 樹¹, 福 家 英 之¹, 飯 嶋 一 征¹, 松 坂 幸 彦¹, 並 木 道 義¹,
川 崎 朋 実¹, 瀬 尾 基 治¹, 鳥 海 道 彦¹, 山 田 和 彦¹, 斎 藤 芳 隆¹,
山 上 隆 正¹, 中 田 孝², 松 嶋 清 穂²

Design and Test for Scientific Balloons of Multi-Layer-Structure

By

Naoki IZUTSU¹, Hideyuki FUKU¹, Issei IJIMA¹, Yukihiro MATSUZAKA¹, Michiyoshi NAMIKI¹,
Tomomi KAWASAKI¹, Motoharu SEO¹, Michihiko TORIUMI¹, Kazuhiko YAMADA¹,
Yoshitaka SAITO¹, Takamasa YAMAGAMI¹, Takashi NAKADA², and Kiyoho MATSUSHIMA²

Abstract : Recent balloon-borne experimental apparatus tends to be larger and heavier. It requires a larger balloon to enable a gondola to float at high altitudes. Since a balloon for heavy payloads yields a large stress on its film under low altitude condition, multi layer structures of its envelope are necessary for an optimum balloon design. Standardized parameters were derived for the optimum design and evaluation of flight performance on the basis of consideration for controllable balloon design factors. By these methods, several capped balloons were manufactured for heavy payloads and were tested for criterion certification. The results proved that the analysis and stress evaluation method are proper and the design criteria are valid.

概 要

近年の気球実験では、観測器の大型化・大重量化、気球の大型化、観測高度の高々度化が進んでいる。これにともない、シングルシェルによる気球では気球フィルムに発生する応力が許容値を超えるため、気球を多層膜構造にすることにより最適化を図る必要がでてきた。まず、気球の設計に関連した基準を見直し、統一的に管理できる方策を考えた。そして、この方法を気球フィルムの多層化によるキャップ付気球の設計に応用した。さらに、このような最適設計法に基づくキャップ付気球を製作し、設計強度の評価を行うための地上実験を実施し、設計手法の妥当性を確認した。

重要語：科学観測用気球、気球の設計、多層膜構造、大浮力用気球、気球重量の軽減

1. はじめに

国産の気球は、1960年代後半から次第に大型化され、1973年には容積200,000m³のB200型気球を上げるに至っ

¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

² 藤倉航装株式会社

た。気球の打ち上げ方法も、気球頭部直下を直接保持するスタティック放球法 [1] から、1980年代に気球頭部をエアーバック式カラーで押さえローラーで立て上げるいわゆる立て上げ放球法 [2] に移行し、350機以上の放球に成功している。近年の気球実験では、気球の大型化（容積100,000～200,000m³）、観測器の大型化・大重量化（観測器本体の重量400kg以上）、観測高度の高高度化（高度40km以上）が進んでおり、2003年には容積500,000m³のB500-2号機の放球と飛翔に成功している [3]。この間、大型気球の安全な放球を可能にするセミダイナミック放球法 [4, 5] が確立され、気球のフィルムに大きな負荷を与える恐れも解消された。

一方、1990年代より、より高い高度に軽量のペイロードを飛翔させることを目的に、薄膜型高高度気球が開発されてきた。そして、1998年に新しい製造技術により厚さ3.4μm、2004年には厚さ2.8μmのフィルムの開発に成功している [6, 7]。同じ方法により大型気球用のフィルム（厚さ20μmおよび10μm）の製造も行われ、ともに良好な飛翔性能が得られている。また、2005年度より始まる海外共同気球実験（日伯共同気球実験）では1～1.5トンのペイロードを高度35～40kmに飛翔させる計画となっている [8, 9]。

このような気球およびペイロードの大型化による総浮力の増大に伴い、これまでに実績のあるシングルシェルによる国産気球では気球フィルムに発生する応力が許容値を超えるため、気球の多層膜構造化が必要となる。同時に、設計の最適化を行うことにより、気球の重量効率を向上させ、コストパフォーマンスを上げることを考える。その上で、気球の設計に関連した基準を再整理し、統一的に管理できる方策を考えた。そして、気球フィルムの多層化によるキャップ付気球（capped balloon）の最適設計について検討を行った。同時に、負荷を受け持つロードテープの強度の最適化についても検討した。また、この設計法に基づくキャップ付気球を実際に製作し、強度を評価するための地上実験を実施した。

2. 気球の設計基準と評価

2.1. 設計基準

気球の仕様を決定する上での主要な設計基準は以下の通りである。

- (1) 到達高度が観測上の要求を満たしていること。
- (2) 飛翔中のペイロード重量範囲が設計上の吊り下げ可能重量範囲内にあること。
- (3) 想定される最大吊り下げ重量に対して、気球フィルムに発生する最大応力が、地上でのガス注入満了時から上空で満膨張となって水平浮遊状態になるまでの全期間で、決められた許容値以下であること。
- (4) 想定される最大吊り下げ重量に対して、ロードテープに発生する最大張力が、地上でのガス注入満了時から上空で満膨張となって水平浮遊状態になるまでの全期間で、決められた許容値以下であること。
- (5) 気球重量が小さいこと。
- (6) 製作上の手間（コスト）はできるだけ少ないこと。

自由浮力分を含む所定のガスが充填された状態でランチャー上につなぎ止められた気球は、通常、気球に対する負荷が最も大きい状態である。また、気球の一部（頭部）にのみガスが入っているため、フィルムは周方向にかなり余ることになる（図1を参照）。この写真に示すように、頭部の下はカラーで締められているためここから下の気球部分は直線と見なされ、地上でも気球のベース角（通常は気球底部と中心軸のなす角度を意味するが、カラーを使用している場合はカラー位置における角度）は大きくなる。ただし、カラーが解放されるとベース角は0となる。また、このような状態の気球は軸対称と見なすことはできず、それぞれのゴアの開き方もその時々で異なる。このとき、気球頭部の内外の圧力差は数十Pa程度あり、各ゴアは、それぞれの状況に応じてロードテープ間で気球の外側（あるいは内側）に張り出た状態で全体としては所定の気球形状が維持される（図2を参照）。余ったフィルムは気球内部に落ち込み、その周辺では逆に頭部から飛び出た膨らみも形成れされる。この状態では全てのロードテープが負荷を受け持つ状態にはない。また、気球は、カラーがはずされた時や放球直

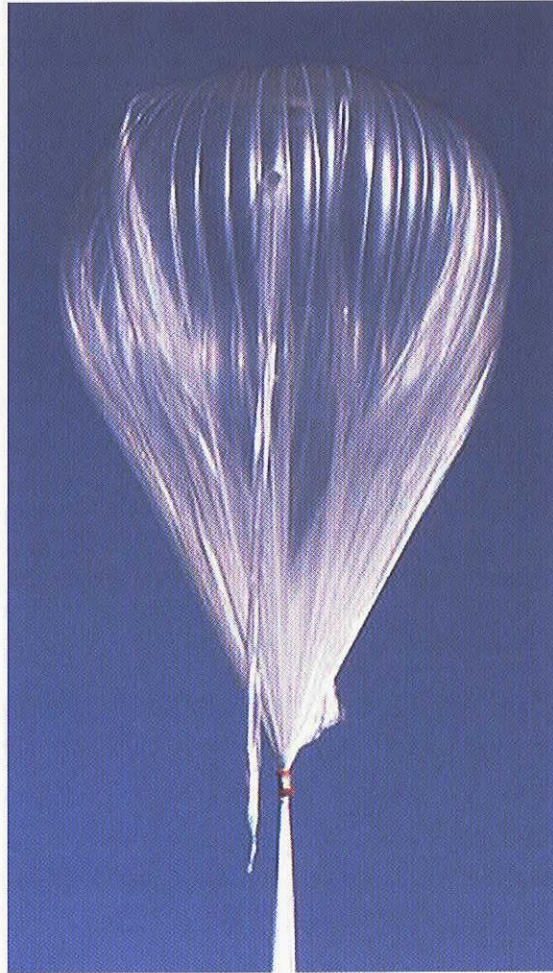


図1 地上でガス充填後の気球形状

後に上昇運動が定常状態に達するまでは変形が大きい．このような非軸対称かつ非定常な気球構造について，気球表面の応力分布を正確に求める試みも行われつつあるが，ここでは，気球の仕様を決定する際の判断材料として，簡単に計算可能な評価方法とそれに対する基準値を設定することを考える．この評価に対してデータを積み重ねることにより最適設計に反映させていくことが目的である．

2.2. フィルム応力の最大値の評価

地上では，気球の形は不定でフィルムは周方向に余っていて，しかも自由に動くことができる．一方，軸対称を仮定した平均的な気球形状は，余ったフィルムやロードテープを考慮した質量分布を与えることにより，正確に求めることができる．その結果得られる子午線にそった各位置における気球の周方向曲率半径と縦方向曲率半径の小さい方を応力評価の指標として採用することにする．これは，計算で得られた気球形状を，最小限の枚数のゴアで構成された気球を仮想した最悪条件で評価することに等しい．この応力の気球全長にそった分布を求め，その最大値をもって最大可能応力と見なすことにする．すなわち，フィルム応力の最大値 σ_{\max} を以下の式で評価することにする．

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

ここで， s はゴアにそった長さであり， r ， R_m ， Δp ， t は，それぞれ周方向曲率半径，縦方向曲率半径，気球内外の圧力差，有効フィルム厚み（フィルムの厚みによる強度の差を考慮した値）であり，すべて s の関数となる．

これは、最悪の場合に発生しうる仮想的な応力を示しており、実際に発生する応力ではないので、この評価基準に対する安全倍率は小さくて良いと考えられる。実際には、このような最大負荷が生じる前に両側の余っているフィルムが移動して小さな曲率半径が形成され応力が緩和されるはずだからである。

一方、満膨張になった気球については、ゴアセンターの曲率は気球全体としての曲率にほぼ等しい。原則としてフィルムの周方向の余りは発生しない。したがって、式(1)に示すように、各位置における気球の周方向曲率半径と縦方向曲率半径を求め、それらの小さい方に対して応力を計算し、気球全体で最大点をさがすことにより、実応力の評価が与えられる。この場合は通常的安全倍率を設定する必要がある。

2.3. ロードテープ張力の最大値の評価

所定のガスが入れられランチャー上につなぎとめられた気球の形状計算を行うと、子午線上の位置 s における気球断面における張力の和、すなわち、全張力 $T(s)$ を求めることができる。満膨張になるまでは、一部のロードテープが負荷を受け持つ（図2を参照）ことになるので、位置 s における気球形状の周長と本来の気球のその位置における周長の比から荷重を支えるために必要となるロードテープの最小本数を求めることができる。全張力を最小関与ロードテープ数で除した値が1本あたりのロードテープ負荷となり、その最大値をもってロードテープ張力の最大値と見なす。すなわち、最大ロードテープ張力 F_{\max} を以下の式で評価することにする。

$$F_{\max} = \left[T(s) / \min(\text{int}(Nr(s)/R(s) + 1), N) \right]_{\max} \quad (2)$$

ここで、 R 、 N はそれぞれ位置における満膨張時の気球半径、ロードテープの総数である。満膨張の場合には、吊り下げ重量が設計値に等しい場合には、通常、式(2)において $r(s) = R(s)$ とした場合に等しい。ただし、吊り下げ重量が設計標準値から大きくずれている場合は、式(2)により計算する必要がある。

なお、軸対称の気球の形状の計算方法は文献 [10]、[11] 等に述べられているが、気球の各構成部品とそれに伴う質量分布を導入する必要がある。すなわち、設計吊り下げ重量に等しい荷重の場合に計算された満膨張気球形状から得られた $R(s)$ に対して、気球の局所等価分布質量 w_e を以下の式で与える必要がある。

$$w_e(s) = w_f(s)R(s)/r(s) + Nw_t/2\pi r(s) + w_a(s) \quad (3)$$

ただし、 w_f 、 w_t 、 w_a は、それぞれ単位面積あたりの等価的気球フィルム（キャップや接着部を含む）の質量、

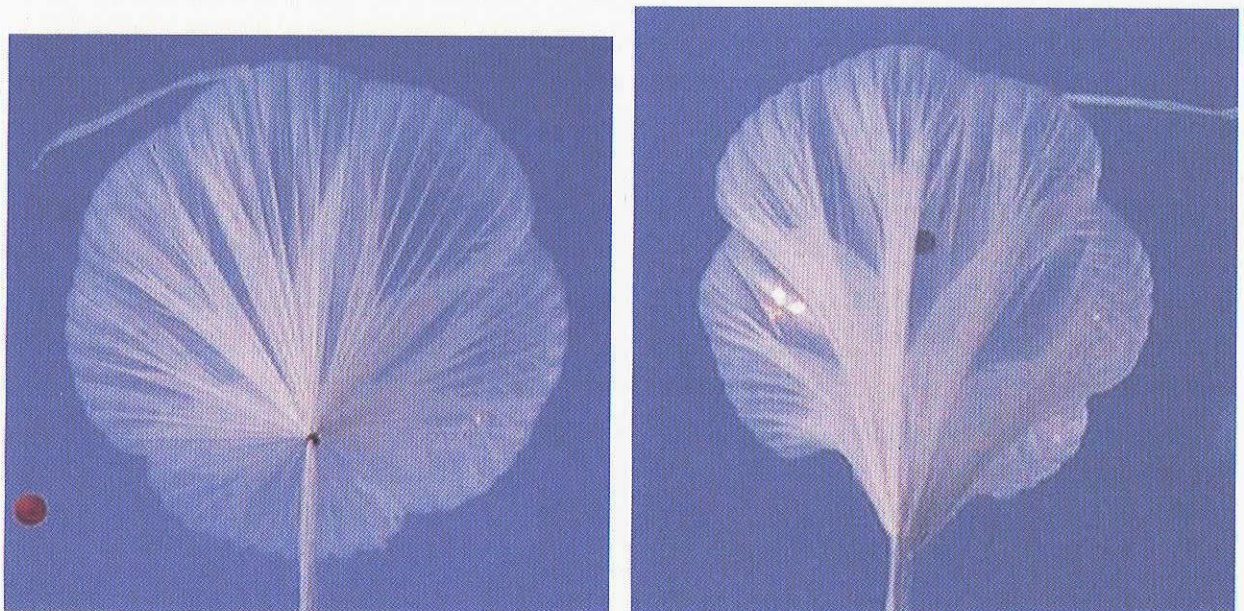


図2 地上でガス充填後の気球形状を下から見たところ、右側はカラー解放直後

単位長さあたりのロードテープ部の質量、頭部・気球尾部など特別な集中荷重の単位面積あたりの質量を表す。いずれも位置 s の関数となる。

2.4. 設計評価の例

容積200,000m³の気球を例にとり、式(1)による最大応力評価図を図3に示す。吊り下げ質量は700kg、フィルムの厚さは20 μ m、ゴア数およびロードテープ数はともに87である。地上につながれた状態と満膨張で水平浮遊状態にある場合で、図3の左端に示すように気球形状が変わる。この図では、式(1)中の $|r(s)\Delta p(s)/t(s)|$ と $|R_m(s)\Delta p(s)/t(s)|$ の両方の分布を表示してある。この2つの小さい方の値を連ねた線が実際の応力分布となり、その線上の最大値が式(1)で表される結果となる。図3の左側の図に示すように、式(1)による最大応力点は、地上では気球頭部の近傍、満膨張では中心から約2/3の位置の頭側にある。

横軸に気球のゴアにそう長さ s をとると図3の右側の図のようになり、水平浮遊時には、最大応力値が基準値以下であるのに対して、地上につながれた状態では、最大応力が基準値を超えていることがわかる。なお、ここでは基準値として、地上では25℃におけるフィルムの破断強度39MPaの1/2.25をとり、水平浮遊時は-40℃における破断強度53MPaの1/7とした。地上で安全倍率が小さいのは、2.2.で述べたように、地上では最悪条件を示しており、上空では実応力を評価しているからである。

同じ気球に長さ30m、1/2の厚み(10 μ m)を有するフィルム(長さ30m)を頭部に重ねると、図4に示すように頭部の応力分布が緩和され、基準値以内に収まることがわかる。図5は、図3および図4に示すように求められた最大応力を全高度について計算して、高度変化として示したものである。高度0付近で線が曲がっているのは、高度0すなわち地上につながり止められた状態の時のみ、自由浮力分を相殺する負荷が加算されているためである。なお、このキャップの付加による気球の重量増はこの場合は8%程度である。

3. 設計方法

気球に対する要求は、標準吊り下げ重量と到達高度により与えられる。通常は、この条件を満たす気球を用意されている標準的な仕様の中から選ぶ。キャップ付気球のように、新たに設計を行う場合は、以下の手順による。前提条件(制約条件)として、選択可能な気球フィルムの種類(現在は、厚さが20, 10, 6, 3 μ mの中から選択となっており、比重は厚さによらずほぼ0.95g/cc)、ロードテープの種類(現在は、200ポンド(破断強度890N)が標準として用いられているが、他に50ポンドから700ポンドまでは50ポンドおき、1200ポンドまでは100ポンドおきとなっている。強度が高いほど比強度は大きくなる傾向がある)が限られている。

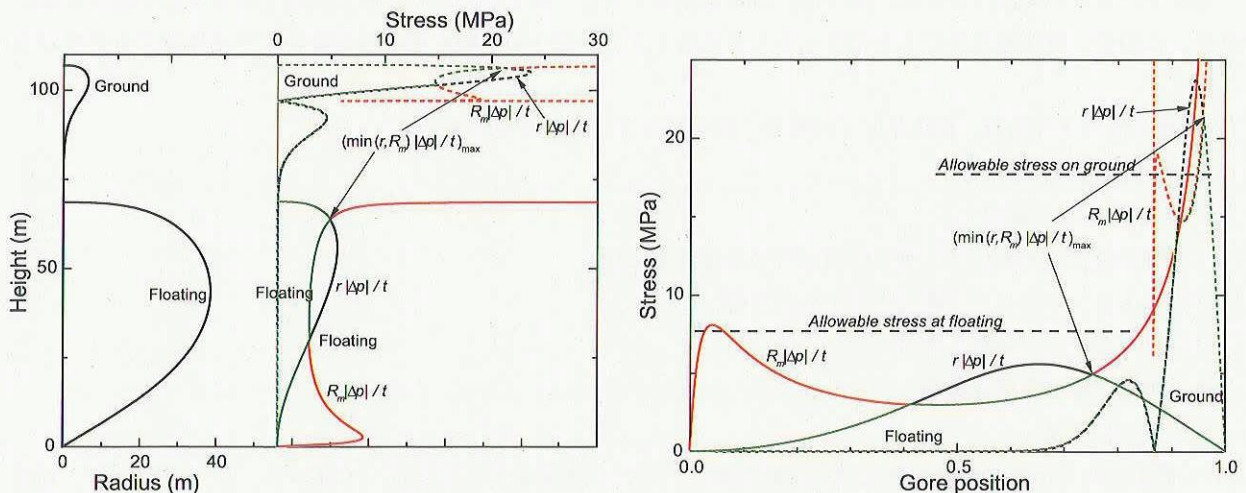


図3 地上および水平浮遊時の最大応力分布、B200型気球、吊り下げ重量700kg、20 μ m厚シングルシェル

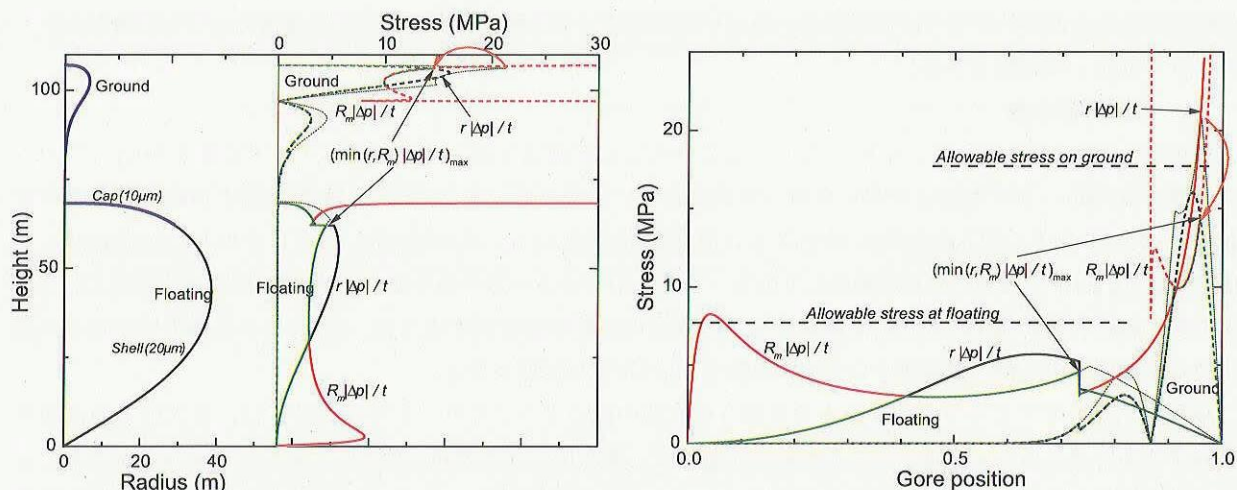


図4 地上および水平浮遊時の最大応力分布, B200型気球, 吊り下げ重量700kg, 20 μ m厚シェルに10 μ m厚キャップを付加

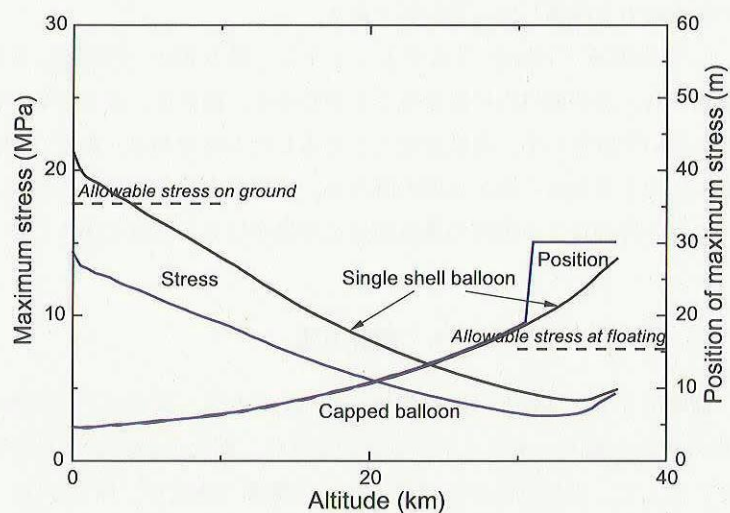


図5 最大可能応力および最大応力位置の高度による変化, B200型気球, 吊り下げ重量700kg

3.1. 計算方法

吊り下げ重量の範囲（最大値, 最小値）を仮に決めておく。以下の手順で、解が収束するまで繰り返し計算を行う。この時、気球重量をできるだけ小さくするとともに、製造の手間を増大させないように考慮する必要がある。

- (1) 最小吊り下げ重量, 標準吊り下げ重量, 最大吊り下げ重量を仮定する。
- (2) 気球容積を仮定する。
- (3) 以下の項目を仮定する。
 - 1) 気球全長（あるいは Σ 値またはベース角度でもよい）
 - 2) シェル・キャップの構成とゴアの最大幅
 - 3) ロードテープ強度と本数
 - 4) 頭部、尾部構成品重量
 - 5) 気球総重量
- (4) 最小吊り下げ重量に対して気球の形状計算を行う。気球重量が各構成品（フィルム、ロードテープ、補強テープ、頭部金具、尾部金具等）重量の和になるように計算を繰り返す。

- (5) 最小吊り下げ重量が形状計算結果における吊り下げ重量と異なる場合は、気球全長（ Σ 、ベース角度）を調整する。（実際はいくつかの設定値の中から選択して、代わりに最小吊り下げ重量を調整するのが普通である）
- (6) 自由浮力を仮定し、標準吊り下げ重量に対して、以下の計算を行う。
- 1) 地上、浮遊状態の両方におけるフィルム最大応力
 - 2) 地上、浮遊状態の両方におけるロードテープ最大張力
- (7) 最大応力、最大張力が基準値を超えている場合は、フィルムの厚みを増す、キャップの数を増す、あるいはロードテープの強度を大きくした後に(4)からやり直す。
- (8) 同様に、最大吊り下げ重量に対して、以下の計算を行う。
- 1) 地上、浮遊状態の両方におけるフィルム最大応力
 - 2) 地上、浮遊状態の両方におけるロードテープ最大張力
- (9) 最大応力、最大張力が基準値を超えている場合は、フィルムの厚みを増す、キャップの数を増す、あるいはロードテープの強度を大きくした後に(4)からやり直す。また、逆に安全倍率が大きすぎる場合は、フィルムの厚みを減らす、キャップの数を減らす、あるいはロードテープの強度を1段小さくするなどの変更をした後に(4)からやり直す。
- (10) 到達高度を計算し、要求を満たしていない場合は、以下のどちらかを実行する。
- 1) 気球容積を調整（実際はいくつかの設定値の中から選択する）して、(3)からやり直す。
 - 2) 安全倍率が大きい場合は、フィルムの厚みを減らす、キャップの数を減らす、あるいはロードテープの強度を1段小さくするなどの変更を検討して、(4)からやり直す。
- (11) 吊り下げ可能重量範囲を計算（満膨張形状から決まる最小値と安全倍率から決まる最大値）して、気球の仕様とする。

3.2. 設計基準値

2.2.で述べたように、式(1)によるフィルム応力の評価は起こりうる最大可能応力を示している。したがって、評価基準としては、表1に示すように、地上条件（自由浮力分を含んでランチャーにつなぎとめられた状態）において、設計上の最大吊り下げ重量時に最大可能応力の安全倍率が少なくとも2以上であるとする。標準吊り下げ重量時には最大可能応力の安全倍率が2.5以上であるとする。上空条件（自由浮力分のガスが排気された水平浮遊状態）においては、最大フィルム応力の安全倍率が7以上とする。ロードテープの最大張力に対する基準としては、安全倍率5以上とする。表1における $\sigma_{u,25}$ 、 $\sigma_{u,-40}$ 、 T_u は、それぞれフィルムの常温での破断強度、フィルムの -40°C における破断強度、ロードテープの破断強度を意味する。

また、以下の条件を付加する。

- (1) 跳ね上げローラーにかかる可能性のある部分までフィルムの最大厚さを保つ。
- (2) 最大許容応力に近いところで、フィルム応力分布の大きな不連続を避ける。
- (3) フィルム応力分布が急激に変化する高度では、上空条件の最大フィルム応力の基準を満たすこと。

表1 最大フィルム応力と最大ロードテープ張力に対する安全倍率の基準値

	地上条件		上空条件	
	標準吊り下げ重量	最大吊り下げ重量	標準吊り下げ重量	最大吊り下げ重量
フィルム	$\sigma_{u,25}/\sigma_{\max} \geq 2.5$	$\sigma_{u,25}/\sigma_{\max} \geq 2$	$\sigma_{u,-40}/\sigma_{\max} \geq 7$ $\sigma_{u,-40}/\sigma_{\max} \geq 10$ が望ましい	$\sigma_{u,-40}/\sigma_{\max} \geq 7$
ロードテープ	$T_u/T_{\max} \geq 5$	$T_u/T_{\max} \geq 5$	$T_u/T_{\max} \geq 5$ $T_u/T_{\max} \geq 7$ が望ましい	$T_u/T_{\max} \geq 5$

ここで、(2)に示した応力分布の不連続はキャップ端部におけるフィルムの不連続点で発生する．例えば、図3におけるゴア位置0.73付近に見られるようなギャップを意味し、この段差の非常に大きい状態が最大許容応力に近いところで発生しないように設計することが望ましいと考えられる．また、(3)に示した応力分布の急な変化は、最大応力点がフィルムの不連続点の存在により急に移動するために発生する．例えば、図5においてキャップ付き気球の最大応力位置が高度31km付近で12m移動しているが、このような最大応力点が移動する領域では、上空条件と同じ基準を適用することを意味する．すなわち水平浮遊時の最大許容応力以下でなければならないとする．

3.3. 基準値の妥当性

表2に2000年から2005年にかけて三陸大気球観測所における実験で使用された国産気球の仕様の一覧と、実験時の実際のペイロード重量および自由浮力をもとに計算した最大フィルム応力と最大ロードテープ張力の値をまとめてある．なお、国産フィルムの破断強度として $\sigma_{u,25}=39\text{MPa}$ 、 $\sigma_{u,-40}=53\text{MPa}$ を採用している[6]．ロードテープ強度 $T_u=890\text{N}$ である．薄膜型気球を除いて、実際に飛翔させた20機について評価値の分布を求め結果を表3に示す．サンプル数が少ないが、地上条件でのフィルム応力でみると、安全倍率の基準値を下回っている場合が5%あり、これを含めて48%が標準吊り下げ重量を上回る重量で使用していた．一方、上空条件での評価では、全てが基準値をクリアしているが、約半数は安全倍率15以上で使用されており、安全倍率の緩和の余地が残されていることがわかる．一方、ロードテープについては、同様に、基準値以下のものが10%ある．基準値以下で使用すると長時間飛翔時にクリープ等が問題になることが考えられる．ただし、フィルムとロードテープの両方とも基準値を満たしていないというケースはなかった．

表2 国産気球の仕様と放球条件および安全倍率の評価 (2000～2005年)

気球 容積 m ³	ゴア 数	フィルム		気球 直径 m	気球 質量 kg	吊下 質量 kg	自由 浮力 %	浮遊 高度 km	フィルム応力		フィルム安全倍率		ロードテープ 数	ロードテープ 強度 N	ロードテープ安全倍率	
		厚み μm	長さ m						地上 MPa	上空 MPa	地上	上空			地上	上空
5,000	27	20	33.5	22.6	44.0	151.1	11.0	26.0	6.5	6.0	6.0	18.6	11	890	7.8	7.5
15,000	39	10	47.3	33.4	49.5	90.2	14.0	33.2	10.8	3.6	3.6	18.6	16	890	7.4	7.2
15,000	39	20	47.3	33.4	79.8	197.2	10.0	32.6	8.4	4.6	4.6	18.6	26	890	6.3	5.8
15,000	39	20	47.3	33.4	81.3	606.8	9.2	24.8	15.3	2.5	2.5	9.3	39	890	3.6	4.4 **
30,000	46	10	59.9	41.9	72.4	213.1	13.1	34.0	17.5	2.2	2.2	11.3	25	890	5.3	5.4
30,000	50	20	60.6	41.4	113.4	247.8	11.0	31.1	13.7	2.8	2.8	11.0	50	890	5.3	5.2
30,000	50	20	60.6	41.4	128.9	469.8	9.0	29.1	14.0	2.8	2.8	10.6	36	890	3.8	3.7
30,000	50	20	60.6	41.4	126.5	107.2	12.0	36.0	7.9	4.9	4.9	28.4	25	890	6.9	7.0
50,000	59	10	72.3	48.7	100.3	150.4	12.0	38.5	16.0	2.4	2.4	15.9	30	890	7.4	7.6
50,000	59	20	72.3	48.7	174.2	457.2	10.0	32.4	14.6	2.7	2.7	12.3	59	890	5.8	5.8
80,000	70	10	82.6	58.5	135.2	104.1	12.0	41.6	15.5	2.5	2.5	20.0	20	890	5.4	5.6
80,000	70	10	82.6	58.5	143.5	109.0	12.0	41.7	16.0	2.4	2.4	18.6	20	890	5.1	5.3
80,000	70	20	82.6	58.5	236.7	521.3	9.0	33.9	16.4	2.4	2.4	11.7	70	890	5.7	5.8
100,000	73	20	88.6	63.4	253.0	184.9	10.0	41.3	11.5	3.4	3.4	23.5	37	890	5.3	5.7
100,000	73	20	88.6	63.4	263.1	485.6	9.0	36.1	16.1	2.4	2.4	12.9	73	890	6.0	6.1
100,000	73	20	88.6	63.4	263.0	456.1	9.1	35.7	15.8	2.5	2.5	13.5	73	890	6.3	6.4
100,000	73	20	88.6	63.4	265.1	557.5	9.0	35.3	17.3	2.3	2.3	11.7	73	890	5.5	5.6
100,000	73	20	88.6	63.4	246.6	209.0	10.0	41.4	11.7	3.3	3.3	21.6	37	890	5.5	5.4
100,000	73	20	88.6	63.4	265.1	358.0	9.5	-*	14.5	2.7	2.7	15.9	73	890	7.2	7.5
200,000	87	20	112.7	78.9	361.2	487.6	8.8	37.3	17.5	2.2	2.2	15.0	87	890	6.4	6.6
200,000	87	20	112.7	78.9	410.2	719.0	8.2	-*	20.9	1.9	1.9	11.0	87	890	4.8	4.9
500,000	130	20	159.5	115.2	799.0	346.2	10.2	42.0	21.0	1.9	1.9	16.9	130	890	6.9	8.1
1,000	18	5.8	19.4	13.4	4.7	6.1	30.0	32.4	3.7	10.5	10.5	60.0				
5,000	28	2.8	32.8	23.2	6.4	6.3	30.0	42.6	9.2	4.2	4.2	38.6				
5,000	48	3.4	33.1	22.9	7.0	4.4	30.0	43.0	6.6	5.9	5.9	60.0				
5,000	48	3.4	33.1	22.9	8.3	4.9	30.0	42.0	6.7	5.8	5.8	54.0				
5,000	48	3.4	33.1	22.9	8.7	6.3	30.0	42.1	7.3	5.3	5.3	49.1				
5,000	28	5.8	32.3	23.7	12.3	3.5	30.0	42.5	4.6	8.5	8.5	77.1				
5,000	28	5.8	32.3	23.7	13.7	18.6	25.0	36.0	7.0	5.6	5.6	36.0				
5,000	28	5.8	32.3	23.7	12.1	6.2	32.0	39.8	5.0	7.8	7.8	67.5				
5,000	28	6.0	32.8	23.7	12.4	5.6	30.0	39.8	4.8	8.1	8.1	67.5				
30,000	90	3.4	59.1	42.7	21.9	5.6	20.0	50.4	11.9	3.3	3.3	45.0				
30,000	90	3.4	59.1	42.7	21.4	4.2	20.0	51.0	11.4	3.4	3.4	49.1				
30,000	51	3.0	58.6	42.2	17.7	8.6	24.3	50.8	12.8	3.0	3.0	38.6				
30,000	90	3.4	59.1	43.7	22.9	3.8	25.0	49.8	12.0	3.3	3.3	45.0				
60,000	116	3.4	74.5	53.7	34.4	5.4	18.0	53.0	15.7	2.5	2.5	41.5				
60,000	116	3.4	74.5	53.7	35.9	9.5	18.0	51.5	14.3	2.7	2.7	41.5				

*未飛翔 **水平浮遊前にバラスト150kg投下

表3 国産気球の安全倍率（2000～2005年，薄膜型気球は除く）

	地上条件		上空条件	
	安全倍率	%	安全倍率	%
フィルム	～ 2	5	～ 7	0
	2 ～ 2.25	10	7 ～ 10	5
	2.25 ～ 2.5	33	10 ～ 15	43
	2.5 ～ 3	22	15 ～ 20	35
	3 ～	30	20 ～	17
ロードテープ	～ 5	10	～ 5	10
	5 ～ 5.5	30	5 ～ 5.5	20
	5.5 ～ 6	18	5.5 ～ 6	30
	6 ～ 6.5	17	6 ～ 6.5	10
	6.5 ～ 7	10	6.5 ～ 7	8
	7 ～	15	7 ～	22

表4 RAVEN/WINZEN 製気球の仕様と放球条件および安全倍率の評価（2000～2005年）

気球 容積 m ³	ゴア 数	フィルム 厚み μm	フィルム 長さ m	気球 直径 m	気球 質量 kg	吊下 質量 kg	自由 浮力 %	浮遊 高度 km	フィルム応力		フィルム安全倍率		ロードテープ		ロードテープ安全倍率	
									地上	上空	地上	上空	数	強度 N	地上	上空
42,475	58	25.4	67.4	47.1	202.8	664.2	10.0	30.5	14.0	4.0	2.9	13.8	58	890	4.5	5.6 **
56,634	64	17.8	73.97	52.0	177.0	142.7	10.0	36.8	10.5	2.3	3.8	23.9	64	670	9.1	9.9
56,634	64	17.8	73.97	52.0	177.0	399.0*	10.0	33.0	15.4	4.4	2.6	12.5	64	670	5.2	5.1
84,951	73	22.9	84.77	59.4	283.8	482.6	10.0	35.0	14.4	3.9	2.8	14.1	73	890	5.9	6.0
84,951	85	22.9	84.77	59.4	283.8	440.8	10.0	34.0	13.9	3.6	2.9	15.3	85	670	7.0	7.3
84,951	85	22.9	84.77	59.4	283.8	567.0*	10.0	33.0	15.5	4.3	2.6	12.8	85	670	5.8	6.1
131,317	85	17.8/17.8	98.03/31	69.0	341.5	576.1	8.6	36.7	10.4	3.5	3.8	15.7	85	890	5.8	6.6
150,570	89	17.8/12.7	102.83/32.6	71.9	380.8	577.2	10.0	36.0	12.4	3.9	3.2	14.1	89	890	5.8	6.1
150,700	89	17.8/12.7	102.83/32.6	71.9	376.0	662.0*	8.4	35.7	13.1	4.3	3.1	12.8	89	890	5.5	5.5
346,345	117	20/20/20	137.1/46/50.6	94.1	944.0	1500.0	8.5	35.5	11.8	5.6	3.4	9.8	117	1780	5.9	6.3
346,345	117	20/20/20	137.1/46/50.6	94.1	944.0	2007.0*	8.5	34.3	13.9	7.1	2.9	7.7	117	1780	5.0	5.1

*仕様上の最大吊り下げ重量 **水平浮遊前にバラスト100kg 投下，仕様上の最大吊り下げ重量を超過

表2の下段には薄膜型気球についての仕様と放球条件がまとめられている。総重量が小さいため，上空でのフィルム応力の安全倍率は40以上となっている。これに対して，地上におけるフィルムの安全倍率は，フィルムが薄くなり，気球が大型化するにしたがって小さくなり，厚さ3μmの気球では，容積60,000m³の気球で安全倍率2.5に到達している。これ以上大きな気球の場合には，最大応力が限界を超えるためキャップ化が必要となる。

表4には，国内で使用された米国 RAVEN または WINZEN 製の気球について，仕様と飛翔時の状況をまとめている。ここでは，フィルム SF372の破断強度として $\sigma_{u,25}=41\text{MPa}$ ， $\sigma_{u,-40}=54\text{MPa}$ を採用した。計算結果によると，フィルムの安全倍率については，地上条件において，最大吊り下げ重量の場合にも2.6以上が確保されていることがわかる。表2示した国産気球の実績と比較すると，地上での安全倍率がやや高く設定されているように思われる。これは，低温ではポリエチレンフィルムの降伏点強度が破断強度に非常に近いが，常温では降伏点強度が破断強度の1/3以下になることを反映していると考えられる。必要以上の安全倍率を持たせる必要はないが，一方で，放球時のフィルム破断やダメージの発生は危険を伴うため十分に安全性が確保されている必要がある。放球時の最大応力の評価をより実際の状態に近いものにしていくことが今後の検討課題となる。一方，上空での安全倍率はほとんどの場合において10～15の範囲に入っており，フィルム厚さの選択とキャップの使用が的確に行われている。ロードテープの安全倍率はおおむね5～6の範囲にとられている。

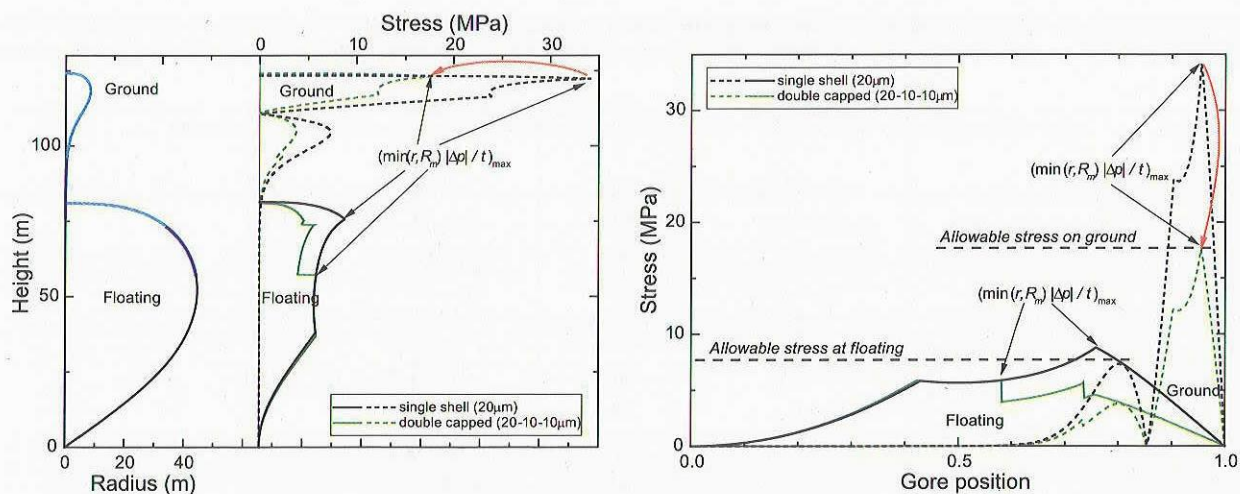


図6 地上および水平浮遊時の最大可能応力の分布, B300型気球, 吊り下げ重量1500kg

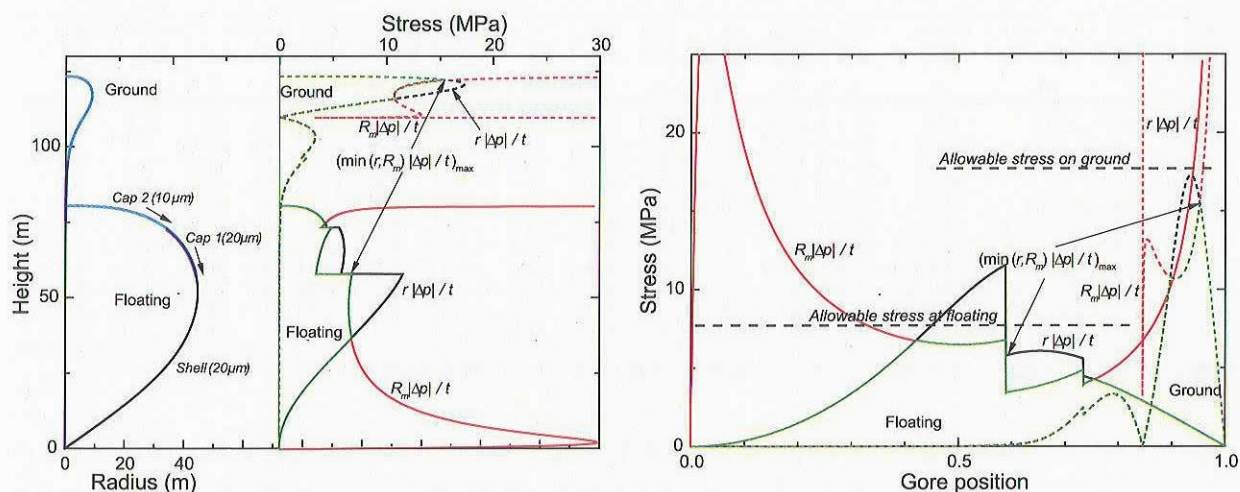


図7 地上および水平浮遊時の最大可能応力の分布, B300型気球, 吊り下げ重量2000kg

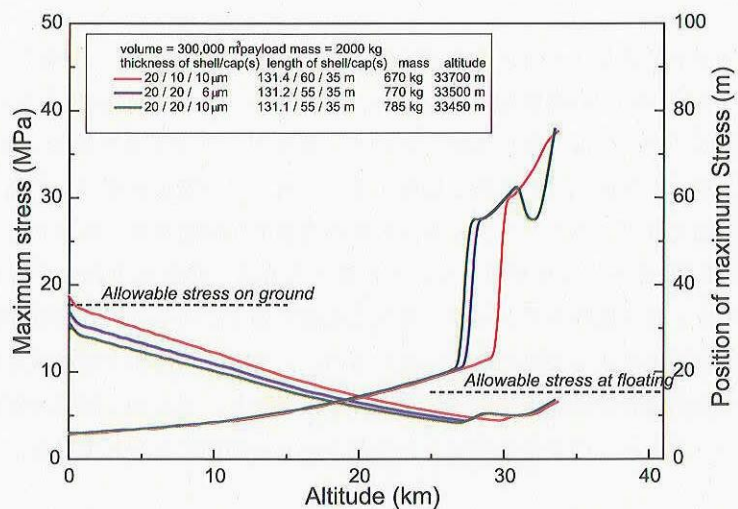


図8 最大可能応力および最大応力位置の高度による変化, B300型気球, 吊り下げ重量2000kg

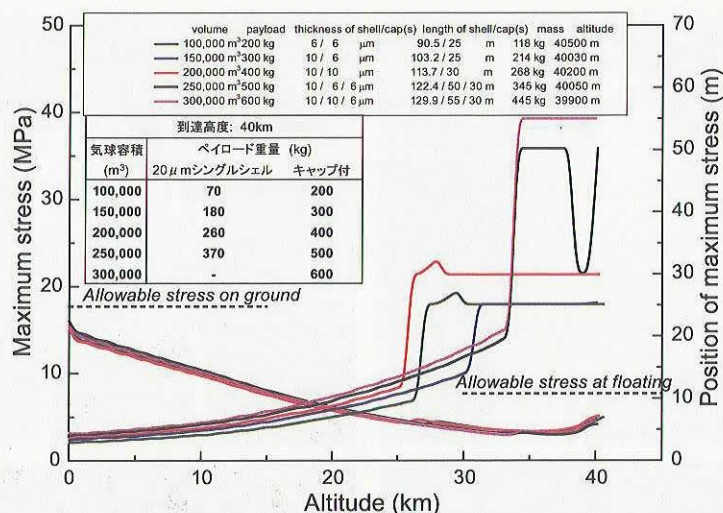


図9 最大可能応力および最大応力位置の高度による変化と吊り下げ可能ペイロード重量，到達高度40km

表5 新規設計の気球の仕様と安全倍率

気球容積 m³	ゴア数	フィルム厚み μm	フィルム長さ m	気球直径 m	気球質量 kg	吊下質量 kg	自由浮力 %	浮遊高度 km	フィルム応力地上 MPa	フィルム応力上空 MPa	フィルム安全倍率地上	フィルム安全倍率上空	ロードテープ数	ロードテープ強度 N	ロードテープ安全倍率地上	ロードテープ安全倍率上空
200,000	87	20/10	112.7/30	78.9	434.4	721.0	8.2	37.0	14.4	4.9	2.7	11.0	87	1110	5.9	6.0
500,000	119	20/20/10	152.2/60/35	107.8	1095.0	1500.0*	8.5	37.1	15.0	5.1	2.6	10.6	119	2230	6.9	7.5
300,000	98	20/10/10	130.6/60/35	89.2	655.0	1500.0	8.5	34.7	15.6	6.1	2.5	8.9	98	2230	6.3	6.4
300,000	98	20/20/10	130.6/55/35	89.2	815.0	2000.0*	8.5	33.4	15.7	6.8	2.5	7.9	98	2230	5.5	5.5
100,000	73	6/6	90.5/25	63.6	118.0	200.0	10.0	40.5	15.4	5.0	2.5	10.8	37	890	7.3	7.5
150,000	79	10/6	103.2/25	71.3	214.0	300.0	10.0	40.0	15.7	4.8	2.5	11.3	53	890	7.7	7.9
200,000	87	10/10	112.7/30	78.9	282.2	350.0	9.4	40.0	14.5	4.9	2.7	11.0	87	890	8.5	9.1
250,000	94	10/6/6	122.4/50/30	84.8	345.0	500.0	10.0	40.0	15.9	4.2	2.5	12.9	94	890	6.7	7.3
300,000	100	10/10/6	129.7/55/30	90.3	445.0	600.0	10.0	39.9	15.4	4.6	2.5	11.7	100	890	6.0	6.3
60,000	64	2.8	73.75	54.2	25.0	5.4	18.0	55.0	15.3	1.3	2.5	41.5				
300,000	110	2.8/2.8	125.5/5	94.5	75.9	4.5	14.0	60.0	13.4	1.8	2.9	30.0				

*最大吊り下げ重量

4. 多層膜構造の気球の設計と検証試験

4.1. キャップ付き気球の設計

図6は，B300型気球（容積300,000m³）に対して，標準吊り下げ重量1500kg，最大吊り下げ重量1744kgとして設計した例である．この図では単一のシェルで構成された気球の応力と比較してある．気球フィルム厚20μmに，長さ60mおよび35mの10μm厚のキャップを2枚重ねることにより，応力が緩和され許容応力範囲に入ることがわかる．図7は，最大吊り下げ重量を2000kgに増加させた場合で，1番目のキャップの厚さを20μmに変更している．図8には，吊り下げ重量が2000kgの場合にキャップの厚みを変化させるときの最大応力の高度変化の違いを示している．キャップの違いによる到達高度の変化はわずかであるため，ペイロード重量が増加することを考慮して余裕をもたせた設計にしておくことができる．

図9は，高度40kmに到達することが可能なキャップ付気球の設計結果を示している．厚さ10μmのフィルムをメインシェルに使用してキャップ化することにより，20μm厚のシングルシェルの気球と比較すると，同一容積の気球に対して100kg以上の搭載量の増加が得られることがわかる．これは，同一重量のペイロードを一回り小さな容積の気球で上げられることを示しており，気球の打ち上げ費用も軽減されることになる．ここに示した気球は，高々度に大重量の実験機を打ち上げる必要のある微小重力環境実験 [12] に使用される予定である．

以上で新しく設計された気球の諸元を表5に示す．いずれの場合にも表1に示した基準をほぼ満たしている．

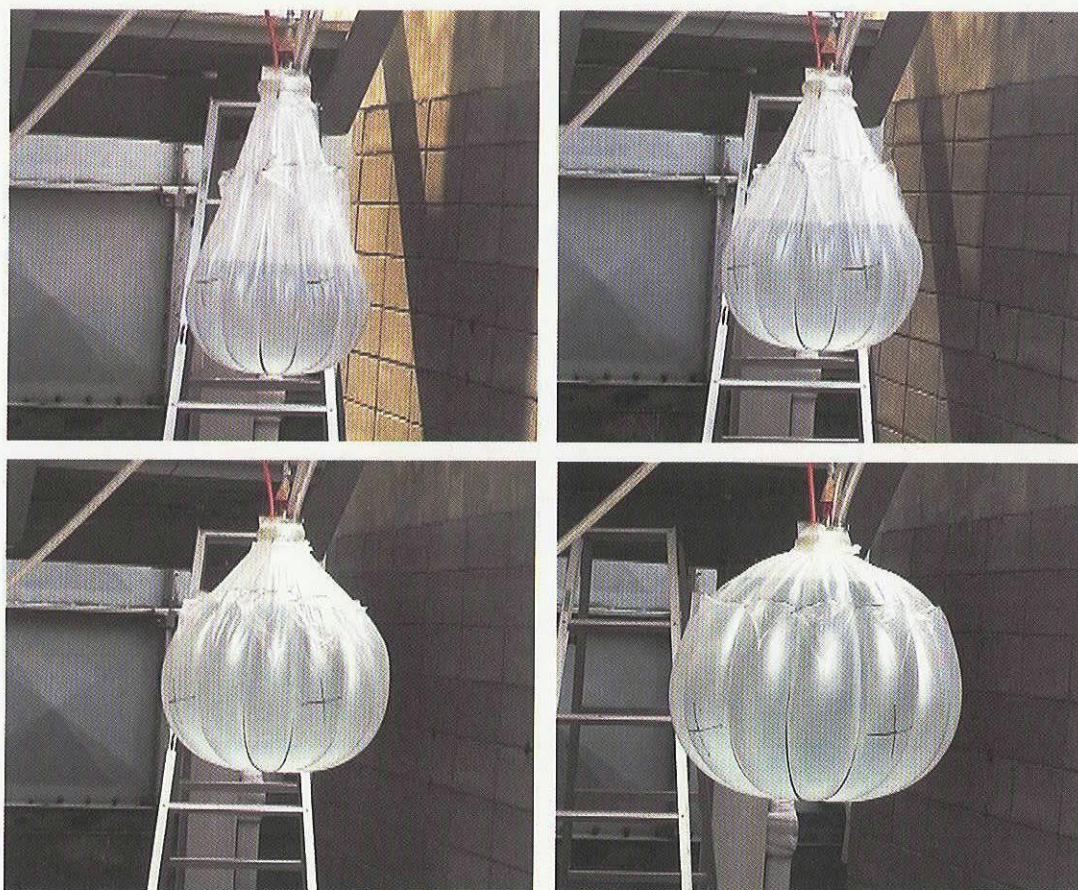


図10 水モデル試験，長さ0.75m，ゴア数12

また，高度60kmを目指すような大容積の薄膜型気球についても，フィルムが厚さ $2.8\mu\text{m}$ と非常に薄いため，地上における気球頭部への負荷を緩和するためのキャップ化が必要となることがわかった．総浮力が小さいためキャップの大きさは小さくてすむが，総重量が小さいため到達高度に直接影響すると考えられる．

4.2. 検証試験

前節で設計された標準吊り下げ重量 1500kg のB300型気球（フィルム厚さ $20/10/10\mu\text{m}$ ）に対する検証実験を行った．この気球の実機の仕様は，表5に示すように，全長 130.6m ，重量 655kg である．

ヘリウムガスのかわりに，図10に示すように逆さまにした気球に水を徐々に加えて頭部の破断強度を求めた（水モデル試験 [13]）．相似則により実験モデルは大きさが実機の約 $1/31$ となる [13]．ここでは，気球頭部を模擬するために，有効長さ 0.75m ，ゴア数12の気球を作った． $20\mu\text{m}$ 厚のフィルムのみで作られた気球とこれに $10\mu\text{m}$ 厚のキャップを2枚追加した実機と同じ構成の気球の2種類を作成し，比較を行った．破断時までに注入した水の重量は，シングルシェルの場合が実機換算で 2300kg であるのに対して，ダブルキャップにすると 3100kg 以上となった．すなわち，標準吊り下げ重量の1.5倍の吊り下げ重量に耐えられることがわかった．ただし，本実験では，最後の方でロードテープの1本が切れたこと，そして気球の長さが短かったため，破断直前の状態（図10の右下の写真）では気球の形状が変わったため，予定より小さい負荷で破断するに至った．気球の長さを 1m 程度にすれば，もっと高い本来の強度を示すと思われる．

次に，実機と同一仕様の気球を頭部から 50m まで製作し，設計上の最大吊り下げ重量 1744kg の時に充填するヘリウムガス（総浮力 2600kg に相当）を注入し，跳ね上げローラーを開放して気球を大型放球装置上に一気に立て上げる試験を行った．図11にその様子を示す．立て上げ過程，立て上げ後の様子にも問題なく，設計強度が

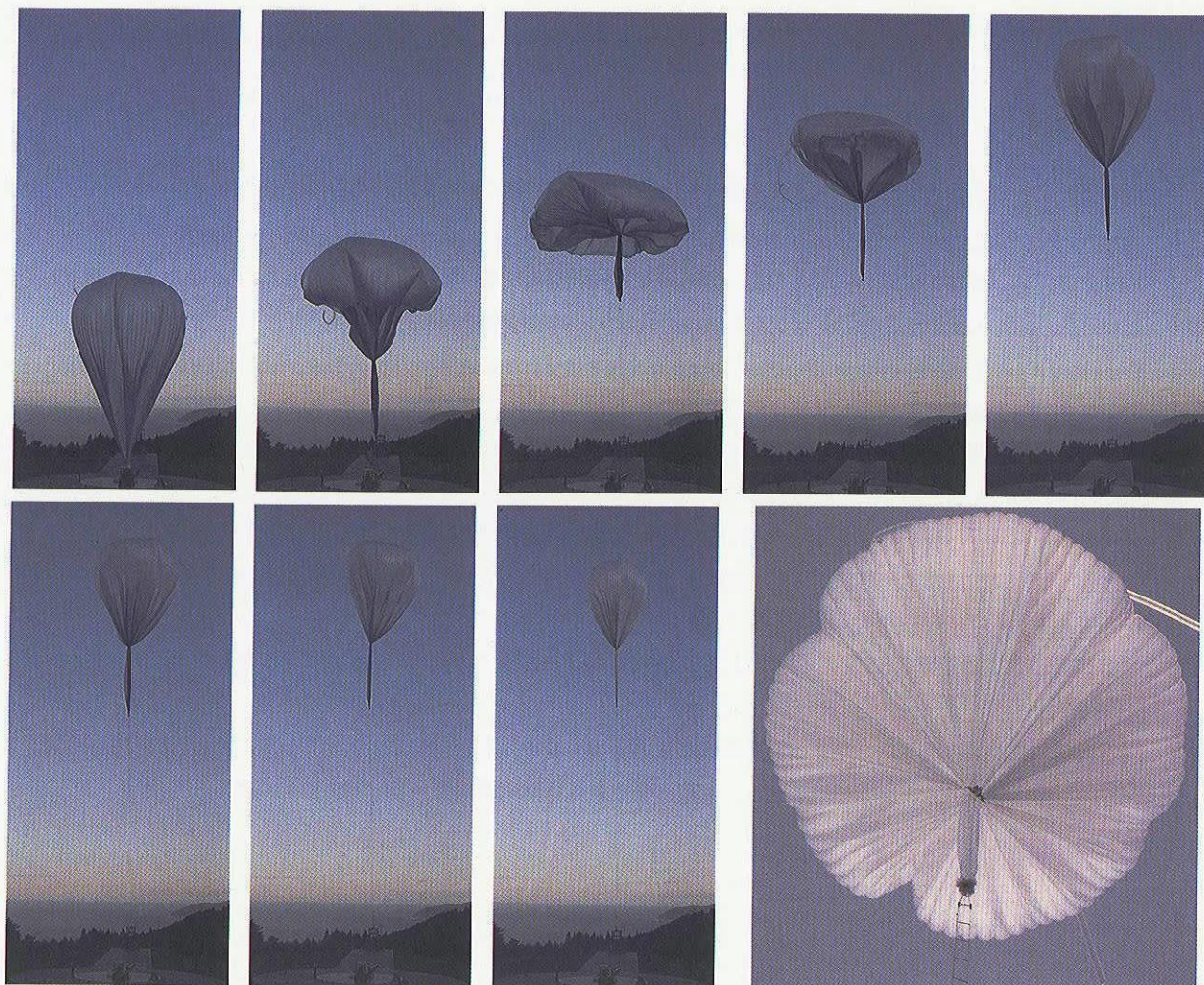


図 11 B300型気球（フィルム厚20/10/10 μ m）の立て上げ試験，総浮力2600kg

妥当なことが確認された。この実験結果を受けて、実際に海外共同気球実験において使用される予定である、最大吊り下げ重量2000kgのB300型気球、最大吊り下げ重量1500kgのB500型気球の設計を行った。結果は表5に示されている。いずれの気球も、20 μ mのシェルに20 μ mおよび10 μ mのキャップを付加したものになった。

5. おわりに

ペイロードの大重量化等により、気球フィルムの多層化を含めた設計の最適化が必要となってきた。設計強度の評価方法、フィルムとロードテープに対する安全倍率の取り方などに統一的な基準を設けた。この基準によって設計された標準吊り下げ重量1500kgのB300型気球に対して、2種類の検証実験を行い、設計方法の妥当性を確認した。さらに、10 μ m厚のフィルムをシェルに使用した大重量高々度気球の設計を行った。今後、必要十分な強度を有する気球の設計と製作および運用の効率化が可能になると思われる。今後の課題としては、地上条件におけるフィルム応力の最大値および安全倍率の取り方の確立が上げられる。そのためには、非軸対称かつ非定常仮定を考慮した応力解析と最大応力の評価方法について研究を行う必要がある。なお、今後も飛翔データの蓄積を行い、詳細な解析と設計基準の再評価を進めていく予定である。

なお、本研究の一部は、文部科学省の科学研究費補助金（学術創成研究「高高度気球を用いた微小重力実験装

置の開発」16GS0220)を受けて行ったものである。

参 考 文 献

- [1] 秋山弘光, 他: 立て上げ放球法, 宇宙科学研究所報告 特集, Vol.4, 3-16, 1982.
- [2] Akiyama H., et al.: A new static-launch method for plastic balloons, Adv. Space Res., Vol. 3, 97-100, 1983.
- [3] 井筒直樹, 他: B500型気球の放球と飛翔, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-04-015, 1-11, 2005.
- [4] 並木道義, 他: 大型放球装置を使用した大気球の放球, 宇宙科学研究所報告 特集, Vol.41, 25-34, 2001.
- [5] Yamagami T., et al.: Semi-dynamic launching method for scientific balloons, Adv. Space Res., Vol. 30, 1145-1148, 2002.
- [6] 斎藤芳隆, 他: 超薄膜型高高度気球の開発 (BT'30-1), 宇宙科学研究所報告 特集, Vol.44, 16-25, 2002.
- [7] 斎藤芳隆, 他: 超薄型高高度気球による世界最高気球高度記録の達成 (BU60-1), 宇宙科学研究所報告 特集, Vol.45, 1-10, 2003.
- [8] 小賀坂康志, 他: 気球搭載硬 X 線撮像観測 NUSMIT の提案, 平成16年度大気球シンポジウム, 94-97, 2004.
- [9] 芝井広, 他: 気球搭載遠赤外線干渉計 (FITE) 計画, 平成16年度大気球シンポジウム, 78-81, 2004.
- [10] D. L. Keese: Zero-Pressure Balloon Design, AIAA J., 17, 12-16, 1979.
- [11] 井筒直樹, 他: 格子解析気象データによる気球飛翔シミュレーション, 平成10年度大気球シンポジウム, 80-83, 1998.
- [12] 橋本樹明, 他: 高々度気球を用いた長時間微小重力環境の実現, 平成16年度大気球シンポジウム, 21-24, 2004.
- [13] 西村純, 他: 気球の水モデル破壊テスト, 東京大学宇宙航空研究所報告, 3, 379-384, 1967.