

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—

矢島 信之*

Fundamental Behavior of Natural Shape Balloon

—Review of the concept for a pressurized balloon and
the trial of a new design and fabrication method—

By

Nobuyuki YAJIMA*

Abstract: It is one of the most important research subjects of the scientific ballooning that a large stratospheric balloon capable of a heavy payload will be actualized as a super pressure balloon. Though, the major efforts have been made in order to develop a revolutionary high quality balloon film, the author is confident that there are great possibility to increase pressure durability by improving not only the film strength but also the balloon shape design. For this purpose, at first, the theory of Smalley's natural shape balloon with road tapes, which is adopted as a standard design of modern scientific balloons, is reviewed from this view point. The study shows that the current balloon shape is not always designed suitable for a pressurized balloon. Then a new design and fabrication concept, named three dimensional (3-D) gore design method, is proposed. This new method can easily realize stronger balloon than the conventional ones. In addition, the pressure durability does not depend on the balloon volume. These superior characteristics are quite different from those we are using now. To verify the effect of the new design concept, a pressurized test was accomplished by means of a small pumpkin shape balloon designed by a 3-D gore method. The burst pressure of the small model balloon was almost three times larger than the same size balloon designed by the conventional manner. The experimental results are also presexted in detail.

概 要

重いペイロードを搭載できる大型気球をスーパープレッシャー気球として実現することは、気球工学の重要な研究目標の一つである。このために、強力な気球皮膜の選定あるいは開発が試みられている。本論文では、視点を変え、気球の形状設計の改良で耐圧特性を改善できないかを検討する。まず、気球の基本形状である Smalley の自然型気球をロードテープを挿入して強化する場合の機能を再検討し、これまでの気球設計と製作上の問題点を指摘する。その上で、新しい気球設計方法として3次元ゴア設計法を提案する。この方式によれば、同一の皮膜を用いても、耐

*宇宙科学研究所

圧特性を容易に大きく向上できる。さらに耐圧特性が気球の容積によらないことにも新しい方式の大きな特徴である。こうした特性は従来の気球と大きく異なっているため、新しい着想の有効性を確認する第一歩として、赤道直径3mのパンプキン型気球を作り、破壊するまで加圧して形状変化と耐圧特性をテストした。結果は、同種の小型モデルでの実験結果と比べ、3倍以上の強度を示した。実験結果についても詳しく述べる。

重要語：科学気球, 自然型気球, スーパープレッシャー気球, 膜構造

1. はじめに

気球皮膜への負荷が小さいため、薄く軽い皮膜で実現可能なゼロプレッシャー型気球は、今日の科学観測用成層圏気球の主流となっている。米国では1,500,000m³もの巨大な気球に数トンのペイロードを搭載して飛翔させている。こうした大型気球を実現できる利点があるものの、ゼロプレッシャー気球は日没時の内部ガス温度の低下による浮力の減少が避けられず、高度の維持には中緯度で1日当たり10%程度のバラストを投下しなければならない。このため、1週間以上の長期間飛翔には不向きである。これにたいし、バラストを投下による高度補償の必要のないスーパープレッシャー気球は長時間飛翔を実現させる有効な手段として長い間渴望されてきた。ただし、小型でペイロードも軽い場合は別として、直径50mを超える巨大な閉じた袋となる気球を、外気圧より10%以上も高い圧力に耐えるようにすることは、大型で重いペイロードを搭載する場合には容易なことではない。

スーパープレッシャー気球に挑戦しようとする場合、まず取り上げられるのは強力な気球皮膜材料の開発である。ポリエチレンフィルムが科学観測用気球として定着して30年以上が経過している。この間、皮膜素材については革命的進歩があったであろうと人は期待するのではなかろうか。あるいは、皮膜材料研究分野からもそのような期待を抱かせる情報が出されてもいるであろう。しかしながら、そうした革命的皮膜材料によるスーパープレッシャー気球の実現は、それだけでは必ずしも期待通りに進んでいるとは思えない。その場合、気球の形状のデザインに関しては基本的には問題とされず、単純な球形かあるいは標準的な自然型気球のこれまでの設計方法が使われるのが通例である。しかし、気球の強度は、皮膜に加わる圧力だけでなく、その形状の関数であるから、後者にも改良の余地がないかを検討することは重量な課題のはずである。特に、大型のゼロプレッシャー気球と同様の規模の大重量のペイロードを搭載しようとする場合には不可欠の問題であると考えられる。

スーパープレッシャー気球については、1990年代初等よりNASAは大型気球の100日間の超長時間飛翔を実現しようとする意欲的計画を策定した[1]。以来多くの努力が主に皮膜材料およびその接着・製造技術開発を中心に進められている[2]。こうした状況の中で、筆者としては、かねてから釈然としない部分のあった自然型気球の形状と強度の関係を整理し、スーパープレッシャー気球を実現するために気球の構造に改良の余地がないか否か検討してみることにした。結論を先に述べるならば、荷重を支えるためにゴアの接合線に沿って挿入されているロードテープは、現行のデザインでは必ずしも十分にその機能を発揮しているとは言えず、形状設計の改良により気球の耐圧特性が向上する可能性は、理論的には十分あると考えられる。そこで、数値計算により検討を進めるとともに、直径3mの小型モデル気球を作り、地上での加圧試験を行った。その結果を過去の同種の実験結果と比較し新しい気球設計法の有効性を確認することにした。

2. 自然型気球とは何か

2.1 ロードテープなしの自然型気球

周知のことではあろうが、現在の大型気球の標準形状とされている自然型気球の意味について、ここで簡単に再確認しておく。この気球形状は、Smalleyによって定式化され、1960年代に発表されている[3]。単純な構成のゼロプレッシャー気球から、頭部に荷重が加わった場合、あるいは2つの気球を直列に接続した場合、さら

にはスーパープレッシャー気球まで、ほとんど全てのバリエーションがすでにそこに示されている。

図1-(a)は、その形状計算のための単純な概念図である。皮膜にかかる周方向および経線方向の張力 T_c 、 T_m のうち、あらかじめ $T_c=0$ という前提条件の下で皮膜に作用する力のバランス式を解く。皮膜の微小単位面積 ΔS にその場所での圧力差 P が作用し、 $\Delta F=\Delta S \cdot P$ が皮膜の面に垂直に発生し、この力を皮膜の経線方向の張力 T_m で支えるように皮膜は経線方向に湾曲する。この湾曲の連なりとして気球の形状が求まる。張力 T_m は、気球底部に吊り下げられているペイロードの重量と微小皮膜の重量により生ずる成分からなる。前者は気球下部の開き角を θ とすれば $W_p/\cos\theta$ であり、後者は微小部分の皮膜重量の経線方向の成分を下部から積分して求められる。形状計算は通常気球下部から始めるが、その際底部の圧力を大気圧 P_0 と同じにすればゼロプレッシャー気球、正の圧力差を与えると加圧された気球、負の圧力差では満膨張前の気球の形状が得られる。

このように、周方向の張力 $T_c=0$ を拘束条件として形状計算が可能な理由は、圧縮力あるいは曲げモーメントが発生しないとして扱える膜構造物特有の性質から来ている。すなわち、経線方向の長さは固定されているが、周方向の皮膜の長さに必要とする量と同一あるいはそれ以上の余剰があれば、皺が経線方向に発生し、この皺を横切る方向には張力が発生しないという事実Smalleyのモデルは依存している。このことが、自然型気球が成り立つ重要な前提条件である。

このような形状が大型の科学気球の標準形状として採用されてきた理由は、長い紡錘型のゴアを縦に接着して気球を作る際、ゴアの幅に関しては高い寸法精度が要求されず、薄く柔らかい気球フィルムを接着する製作工程が容易となり、かつ気球の信頼性も確保できることにある。また、次節で述べるように、ロードテープをゴアの接合線に沿って挿入することで、ペイロードの荷重の気球皮膜への伝達と気球の補強が容易になることも大きな理由である。

ただし、このSmalleyのモデルはあくまで数理上のものであって、実際に即して扱う際には以下の点を考慮しなければならない。

(a) 頭部と底部の皮膜張力

気球の頭部と底部で経線方向の張力が一点に集中して無限大となり、現実的には気球として成立しない。もし、今後の議論でこの点が障害になる場合には、図1-(b)のように半径が気球の最大半径 R_{max} と同じで長さ L_0 が経線と同一の円筒状の皮膜の上下を束ねて気球にしていると仮定すればよい。皮膜の重量を無視すれば、気球の形状が同一であるばかりでなく、皮膜の周の長さもどの位置でも一定であるから、経線方向の張力もどの高さでも同一となる。

(b) 皮膜の伸びを考慮していない。

この点は、この段階では特に問題とはならない。実際には、経線方向の張力により、皮膜もその方向に若干伸びるが、そのことで周方向の皮膜の余剰が失われない限り（周方向に張力が発生しない限り）、体積の変化はあるとしても自然型の形状は維持される。むしろ、Smalleyのモデルが、皮膜の伸びを前提にせず理論的に成立していることに注意を払うべきである。これは、構造力学におけるトラスの静定問題に対応する関係にある。

2.2 自然型気球とロードテープの機能

ラジオゾンデのような10kg以下の軽いペイロードを吊り下げる場合は別として、数百kgから1トンを超えるような重い観測器を搭載する大気球では、現在は図1-(c)のようにロードテープを挿入して補強する方法を採用している。ここでは、このロードテープの機能と自然型気球の形状との関係について考察する。そして、これまで見落とされていた、気球の耐圧性を高めるための極めて重要な問題点を指摘する。

(1) ロードテープの荷重分散機能

重い観測器を搭載する場合には、分散して荷重を支える皮膜にペイロードの集中荷重をいかに伝えるかが実際上の大きな問題となる。古い気球の絵や写真では、気球に網をかぶせてゴンドラを吊したり、最も径の大きい外周にスカートのようなひだを付け、そこから多数のロープを垂らしてゴンドラを吊し、皮膜に分散して荷重を伝

えているのを見ることができ、現在の気球では、周知のように、ゴアを縦に接合する際、強度があり伸び率が皮膜に比べ十分小さいロードテープと一緒に接合し、ペイロードの荷重をまずこのロードテープに伝え、ロードテープと皮膜の間で荷重を分散して伝えるスマートな構造をとっている。その一般的利点は、

- (a) ロードテープの挿入が、ゴアの皮膜接合工程と同一であって、気球の製作が容易である。
- (b) 気球の一部にガスが詰まっている満膨張前の状態から満膨張に至る気球の形状変化に無理なく対応している。
- (c) ロードテープの材料として、軽い高張力繊維を用いることが可能であるため、気球重量の増加は僅かである。

ここで、荷重が分散して皮膜に伝わるためには、皮膜はロードテープの間で周方向に張り出し、ロードテープを引き上げる方向に皮膜の張力の分力が発生しなければならない。この時、周方向にゴアが張り出すには、中心線に近くなるほどゴアの経線方向の長さも増大しなければならない。従来この条件は、後に詳しく述べるように、皮膜の伸びによる変形で満たされてきた。当然、皮膜には経線方向にも大きな張力が発生する。しかし、ここで発想を変え、経線方向のゴアの長さが、皺が発生するほど十分に余裕があるように気球を作ると仮定すれば、ロードテープがない場合の Smalley のモデルと同様のアナロジーを適用して、皮膜には経線方向の張力 T_m は発生せず、周方向にのみ張力 T_c が発生するとしてよいはずである。すなわち、ロードテープを挿入した気球では、経線方向に皮膜を余らせ、かつ周方向には円弧状の張り出しを発生させる。そうすれば、ペイロードの荷重はロードテープのみで支え、皮膜にはロードテープがない場合と異なって 90 度回転した周方向にのみ張力が発生し、ロードテープを外側に引き上げることにだけ皮膜の張力を機能させることができる。これまで明確に指摘されたことはなく、かつ誰も試したことはなかったが、このようにロードテープと皮膜の機能をその特質に応じて分担させることを可能とする構造こそ、「理想的なロードテープ付自然型気球」とでも呼べる、ロードテープを挿入した場合の Smalley のモデルの正しい拡張である。当然、張力 T_c は周方向の曲率半径 R_c と皮膜に作用する圧力 P の積、 $T_c = R_c \cdot P$ である。

この、理想的なロードテープ付自然型気球では、ロードテープの本数が十分多ければ、ロードテープの形状は、それが無い場合の Smalley の自然型気球の形状に近似できる。その理由は、ロードテープ間で周方向に微小な帯状の小単位を取ると、帯状の皮膜の投影断面に作用する圧力により発生する面に垂直な力が、ロードテープを外側に引き上げている。この力のバランスは、周方向の平均をとれば、ロードテープがない Smalley のモデルでの微小単位上の力のバランスと同一であることは明らかである。この関係は、皮膜の周方向の膨らみの程度にかかわらず成立する。すなわち、気球の形状は同一でも、皮膜の周方向曲率半径の大小が発生する張力の大きさを左右することになる。このことは、ゴアの周方向の曲率半径を小さくすることが、気球の耐圧性を向上させる重要な要素であることを意味する。

(2) ロードテープの気球補強機能

ロードテープを挿入することにより、僅かな気球重量の増加で、効果的に気球の耐圧特性を向上させることが可能となる。この機能は、前記の荷重分散機能と重複する部分もあるが、独立の機能である。それは、気球に外側と同一の気体を注入し、浮力を発生させずに圧力を加えた場合にも、ロードテープの挿入により耐圧特性を向上させることが可能なことから自明である。

(a) 皮膜張力の改善率

(1) で述べた、ロードテープ入りの理想的な Smalley のモデルでは、気球が最も膨らんで半径が最大 R_{max} となっている場所での皮膜の経線方向の張力 T_m は、その場所での皮膜に加わる圧力を P とすれば、

$$T_m = P \cdot \pi \cdot R_{max}^2 / (2 \cdot \pi \cdot R_{max}) = P \cdot R_{max} / 2 \quad (1)$$

となる。

ここで、挿入する N 本のロードテープの強度の総和は、図 1-(b) に示すモデルでの皮膜の経線方向の強度の

総和（一周の強度）に等しと仮定する。このような構造の気球を想定すれば、最も気球の半径の大きい場所（ゴアの幅が最も広い場所）で皮膜の張り出しが理想的に半円を描いている場合には、半径 R_c と張力 T_c の関係は簡単になり、

$$R_c = R_{\max} \cdot \sin(\pi/N) \quad (2)$$

$$T_c = P \cdot R_c \quad (3)$$

である。従って、ロードテープを挿入したことによる皮膜の張力の減少率、すなわち耐圧特性の向上率 K は、

$$K = T_c/T_m = 1 / \{2 \cdot \sin(\pi/N)\} \quad (4)$$

となる。例えば、 $N=100$ なら、 $K=16$ 、 $N=200$ なら $K=32$ となる。皮膜の強度が厚さに比例するとすれば、ロードテープの重量が皮膜の重量の K 倍以下であれば、ロードテープの効果が皮膜の厚さを増す強化法に優ることになる。

ここで、ロードテープの本数 N を増大させてみる。その際、ロードテープに使われている材質の総量を変えずに、総量を N 分割することで分割数を増大させるとする。こうすると、ロードテープの単位太さ当たりの張力は変わらないが、半円状に張り出す半径 R_c は N に比例して減少するので、張力 T_c も比例して減少する。 N を無限に大きくした極限では、皮膜の周方向張力は零となり、ロードテープの縦方向張力のみが残る。この状態は、ロードテープのない最初のモデル図1-(b)と同一であるが、気球の表面が皮膜からロードテープの材質に置き換わったことに相当する。

一般に、耐圧特性に優れた容器を作るには、材質の比強度が大きい程有利である。気球フィルムのような薄くかつ2軸方向に均質な膜材料の比強度は小さく、 $0.3 \times 10^6 \text{cm}$ 程度である。これに対し、細い高分子繊維は、長い分子構造を作ることが容易であるため、高い比強度が実現できている。表1は、代表的な高強度高分子繊維の比強度である。気球用ポリエチレンフィルムに比べ約100倍の相違があるため、ロードテープに採用すれば僅かな重量の増加で効果的に気球の構造強度を増すことが可能になる。

表1. 代表的な高強度繊維の比強度。

材 料 名	ケブラー	テクミロン	炭素繊維	タイヤヤーン
比強度($\times 10^6 \text{cm}$)	24	36.5	20	8.5

(b) 耐圧性能と気球のサイズ

実際に気球を作る場合には、材料を有効に使うため、ゴアの最大幅 L_{\max} は材料の皮膜の幅 L_{fil} に近い値にする とすれば、ゴアがロードテープの間で周方向に張りだす曲率半径の最小値 R_{\min} は、その半円の長さが L_{fil} となることであるから、

$$R_{\min} = L_{\text{fil}} / \pi \quad (5)$$

である。当然、圧力 P が作用すれば、理想的ロードテープ付自然型気球としての実現可能な最小張力 T_{\min} は、

$$T_{\min} = P \cdot R_{\min} \quad (6)$$

となる。この R_{\min} 、 T_{\min} が皮膜の素材の幅にのみ依存し気球のサイズによらないということは、気球の耐圧がそのサイズによらないことを意味する。この結論は、従来の気球のフライトで経験する耐圧特性とは大きく異なっている。それは、次に述べるように、現在の気球の形状デザインは上記の理想的な形状とは大きな隔りがあるからである。

3. 実際のロードテープ付き自然型気球

3.1 概 要

実際の気球では、ロードテープは2.2で述べた気球補強機能を十分発揮できるように用いられてこなかった。

以下にこの点を少し詳しく述べる。通常的设计法では、図1-(a)の Smalley のモデルの表面に等間隔にN本のロードテープを貼り付ける構成を想定している。すなわち、気球のゴアは、Smalley のモデルを経線でN等分し、そのセグメントの中心線をゴアの長さとし、周方向の長さを幅としている。このゴアの縁同士を接合して気球を製作する課程で、ロードテープを一緒に接着する。この方法は、気球製作工程としては無駄のない合理的な方式であるので、これまで特に疑問をもたれず、唯一の方法としてアプリオリに受入れられてきた。

ただし、この製法では、平面状の皮膜でゴアを作るので、その中心線の長さは接合線の長さより明らかに短く、圧力が加わらず、皮膜に伸びがない状態では、気球の断面形状は図2-(a)に示ような多角形となり、その頂点にロードテープがあることになる。この形状は2.2で述べたロードテープが気球を補強する構成とは大きく異なっていて、このままでは、荷重の加わったロードテープを皮膜の張力で外側に引き上げることはできず、気球として成立しない。実際には、皮膜の伸び特性によってゴアはロードテープの外側に膨らみ、断面は図2-(b)のような状態になる。この時、皮膜は周方向だけでなく、経線方向にも伸びなければならない。しかし、図2-(a)から図2-(b)への周方向の伸び率は1軸の伸びとしても大きく、その上、実際は2軸延伸であるから、相互干渉であるポアソン比が気球皮膜の場合には0.8程度と大きいので、伸びによる皮膜の膨らみはさらに小さくなる。結果として、曲率半径は大きくなり、皮膜の張力はロードテープによる理論的な耐圧特性改善率を下回る。かつ、破壊圧力は気球のサイズに依存する。

NASA は1995年頃にポリエチレンフィルム製のゼロプレッシャー気球の排気孔を閉じて、耐圧特性を調べるフライトテストを容積 $60,000\text{m}^3$ および $800,000\text{m}^3$ の2種の気球を用いて行っている[4]。また、三陸大気球観測所でも、それより小型の気球により同様の実験を行っている。それらの実験結果にたいし、西村等は皮膜強度と破壊圧力から導かれる曲率半径は、同じ容積の球の半径に符合すると指摘している[5]。以上のように耐圧性が小さく、かつ気球サイズにより特性に差が生じる理由は、先に述べたように、伸びを前提にしない本来の Smalley のモデルと違い、圧力による皮膜の伸びが気球の前提になっているためであり、構造力学的には不静定問題になる。

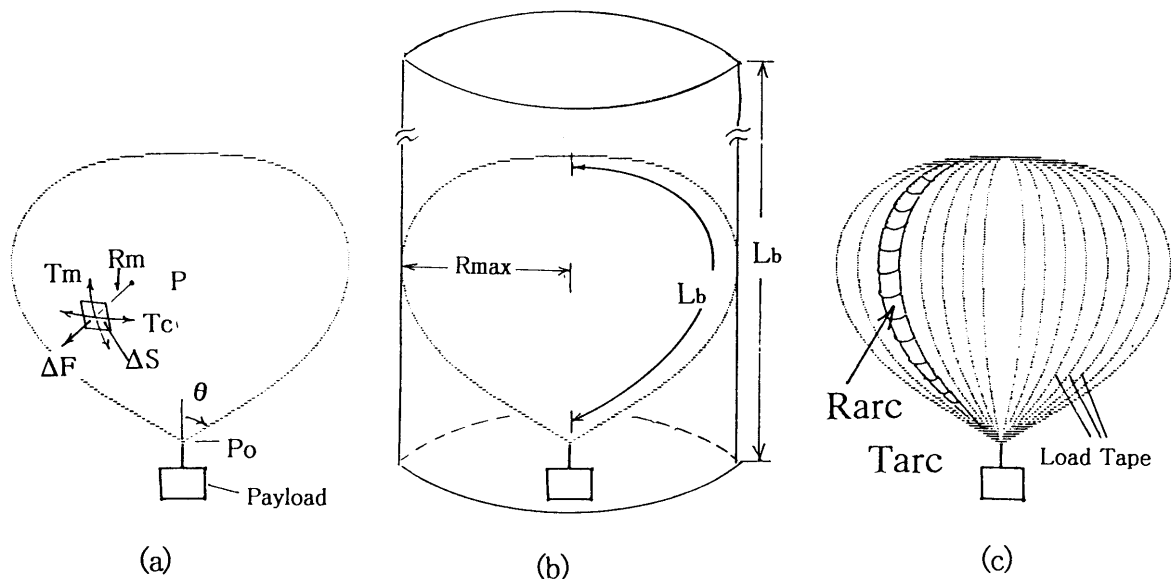


図1. 自然型気球のモデル.

(a) Smalley による一般形.

(b) フィルム張力を無限大にしない構成.

(c) ロードテープの付与.

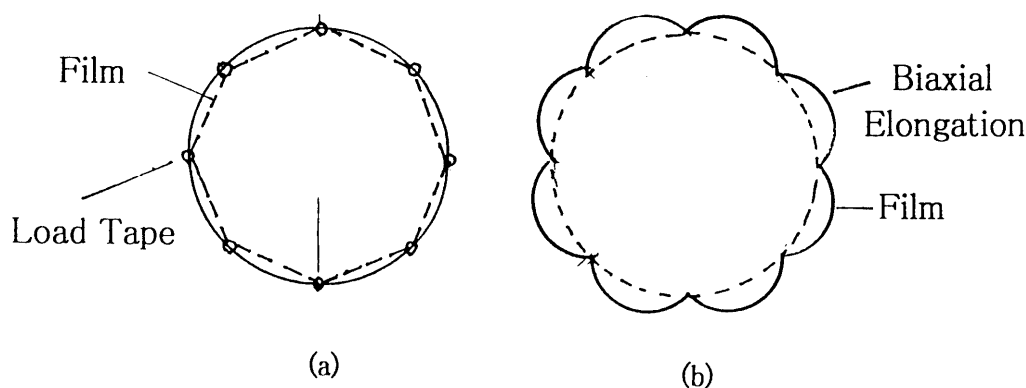


図2. ロードテープ付き気球の断面図.

(a) 皮膜に圧力がかからない場合. (b) 皮膜に圧力がかかった場合.

このように、現状のロードテープ付き気球では、皮膜の大きな伸びが前提となるため、初期の段階では飛翔中の気球の破壊が多く、対策としてポリエチレンフィルムの伸び率の改善が求められた。1960年代後半、伸び率が小さくなりがちなフィルム製造工程の引上方向と直交する方向にたいし、米国では伸び率の目標を最低20%とし、わが国でも開発に努力した結果、その指標を上回る200%を実現したと、当時気球皮膜の開発を進めた河田等が報告している[6]。

3.2 解析上の問題

気球の形状が Smalley のモデルから離れた結果、ゴアの膨らみは単純な円弧ではなく、かつもともと中心軸に対し回転対称面でないため、皮膜の変形や発生する張力等の解析は著しく難しくなっている。皮膜の張力を解析的に求めようとした研究としては、たとえば Alexander 等の試みがあるが[7]、解析はかなり大幅な近似を行うことになる。ロードテープの効果の実験的な検証方法としては、我国では、西村、岡本等により比重の大きい水を注入する縮小モデルでの実験が行われている[8][9]。現象を直接観察でき優れた方法であるが、皮膜は平面で、その上に繊維強化テープを放射状に張りつけたものであるため、フィルムの周方向の幅は気球底部に行くほど広くなり、地上でガスが注入された気球を模擬することにはなっても、上空で満膨張となった状態での皮膜の伸びを正確に反映してはいない。その後、コンピュータを用いた有限要素法のような数値解析法の導入によって直接的解析が可能になった。ただし、大きな伸びを伴う膜構造物の計算は容易ではなく、NASA ではコード名 ABAQUS と呼ばれる数値解析プログラムを開発し、もっぱらそれによって解析を行っている。こうした数値計算科学の進歩により、解析そのものの精度は大きく改善され、かつ、さまざまな設計パラメータの変化の影響も比較的容易に検証できるようになっている。

ただし、そうした労力を要する気球強度解析の努力は、現状ではたとえ詳しく解が得られたとしても、複雑な気球形状の状態を理解するためには役立つものの、前提となる気球モデルそのものに問題があるため、その結果を気球の強度の改善や信頼性を向上させることにはさほど大きく役立っているようには思えない。この間、気球の構造強度の解析に関するさまざまな研究がなされてきたが、前提となる気球形状モデルの妥当性、Smalley のモデルとの関係など、基本的前提に立ち返って考察が加えられるということはほとんどなかった。それほど、従来のロードテープ付き気球の形状が疑問なく受け入れられてきていたと言える。

そうなった大きな理由は、気球製造上の一見した合理性とともに、気球用のフィルムの開発が急速に進み、2軸方向に伸び率が良く、かつ低温特性にも優れた気球フィルムが安定して供給されるようになったため、1970年代には、少なくともゼロ・プレッシャー気球では気球強度の確保がさほど深刻な問題ではなくなったためでもあ

ろう。しかし、皮膜に加わる圧力が10倍以上となるスーパープレッシャー気球で、かつ重いペイロードを搭載する場合は、強度の大きい皮膜の開発とともに、どのようにして構造的にも皮膜に発生する張力を減少させるかは避けて通ることはできないと課題となっていると考える。また、皮膜自体の開発にとっても、どのような強度特性がスーパープレッシャー用に適するかは、気球の構造とその下での張力の発生のしかたに大きく関係しているはずである。

3.3 殻の膜理論による検討

気球フィルムのような薄い膜材料の挙動解析は、弾性力学に於いて材料の曲げ変形に対する剛性がないものとする殻の膜理論で扱われる [10]。そのような制約が設けられてもなお一般論は複雑であるが、形状が平面曲線とその面内の軸周りに回転させた回転対称殻の場合は扱いがかなり容易になる。ここでは、気球のロードテープの間の膜面の変形を回転対称殻として扱えるように近似し、従来の気球デザインにおけるロードテープ間の皮膜の変形と発生する張力について考えてみる。

図3-(a)に示すように、ある間隔を隔てて平行に置かれた半径 X_0 の2枚の固い円盤の間に幅 $2 \cdot Y_0$ の皮膜が円環状に張られているとする。内圧 P を加えた場合に、この皮膜が外に張り出す形状と発生する張力を求める。気球のゴアが紡錘状をしているのにたいし、この皮膜の展開した形状は短冊型である。しかし、皮膜がロードテープを斜めに引く張力は小さいとすれば、円盤の半径 X_0 、皮膜の幅 $2 \cdot Y_0$ に実際の気球のそれぞれの場所の値を当てはめれば、気球の皮膜の膨らみをかなり良く近似できると考えられる。

皮膜上に図4のように微小要素をとり、平面曲線から回転軸への垂線の長さを R_0 、曲線の曲率半径を R_1 、曲線の法線の回転軸までの距離を R_2 および回転軸となす角を φ とする。また、回転軸に垂直な面内での微小要素の開き角を $d\theta$ とする。 θ 方向と φ 方向の張力を T_θ 、 T_φ 、微小要素に直角に働く圧力を P とすれば、

$$T_\varphi / R_1 + T_\theta / R_2 = P \quad (7)$$

である。また、膜の変形と張力の関係は、フックの法則が成り立つ弾性変形の範囲であれば、せん断力を無視することで、

$$\varepsilon_\varphi = (T_\varphi - \nu \cdot T_\theta) / (E \cdot h) \quad (8)$$

$$\varepsilon_\theta = (T_\theta - \nu \cdot T_\varphi) / (E \cdot h) \quad (9)$$

ここで、 ε_θ 、 ε_φ はそれぞれの方向の歪みであり、 E はヤング率、 h は膜の厚さ、 ν はポアソン比である。今、 R_0 が回転軸 y の関数として、

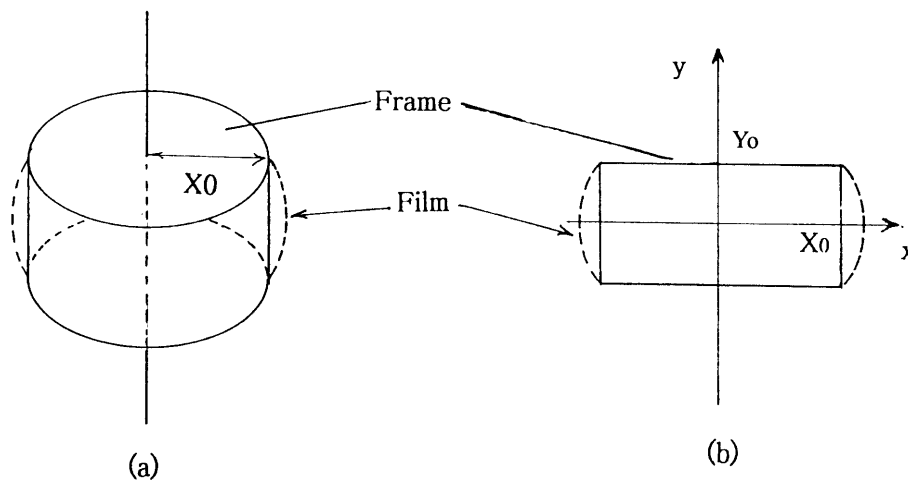


図3. 円環状皮膜の2軸延伸。

$$R_0 = f(y) \quad (10)$$

と表わせるとすれば、曲率半径 R_1 、 R_2 は、

$$R_1 = - \{1 + (f')^2\}^{3/2} / f'' \quad (11)$$

$$R_2 = R_0 \sqrt{1 + (f')^2} \quad (12)$$

となり、これらを式(7)に代入すれば、関数 f の常微分方程式が得られ、これを解くことで、形状変化と張力が求まる。そうした方法で得られた一例として、気球サイズをB30型程度として、その気球の最大半径とほぼ同じ値2.0mを円盤の半径とし、皮膜の幅2.7mとした場合の皮膜の端から中央部までの伸びの形状、曲率半径および経線方向の張力の変化を皮膜に加わる圧力を変えて求める。その結果をそれぞれ図5-(a)、図5-(b)、図5-(c)に示す。気球の高さは35m、ゴアが最大幅となる場所の高さは25mとし、飛翔高度を30kmとすれば、ゼロプレッシャー気球の場合の頭部の圧力は $7 P_a$ 、25mの高さで $5 P_a$ である。ここで皮膜の特性は、通常気球のフィルムを参考に、フィルム膜厚 $h = 20$ ミクロン、ヤング率 $E = 250 MP_a$ 、ポアソン比 0.82 とした。図中の圧力の数値は、ゼロプレッシャー気球の場合の頭部圧力の5倍および10倍の圧力が加算された場合である。皮膜張力はやや少ないように思えるが、概ね良い傾向を示している。

高耐圧用の高強度皮膜の候補は、上記ポリエチレン気球フィルムと比べ一般に伸び率は小さい。そこで前記と同様の加圧された円環上のフィルムの膨らみを、ヤング率 E を10倍の $2,500 MP_a$ として求めて見る。結果は、図6-(a)、(b)、(c)に示すように、同じ圧力の $70 P_a$ でも、皮膜の伸びが小さいため、張り出す曲率半径は約3倍に増加し、張力は2.5倍に増大している。破断強度の大きいフィルムを実現する場合、ヤング率が強度の増大率を越えて大きくなると、皮膜の伸びが前提となっている従来の設計法による気球では、引張り試験器で示される強度の改善率ほど実際の効果が現れないことになる。この問題は、一般論としては、皮膜の歪・応力特性において、応力を歪みで積分した量、靱性 (Toughness)、すなわち伸びた皮膜に貯えられる弾性エネルギーが、気球皮膜の適正を測る指標となることを意味する。Tielking等は、このような視点から各種高強度皮膜の評価を試みている [11]。

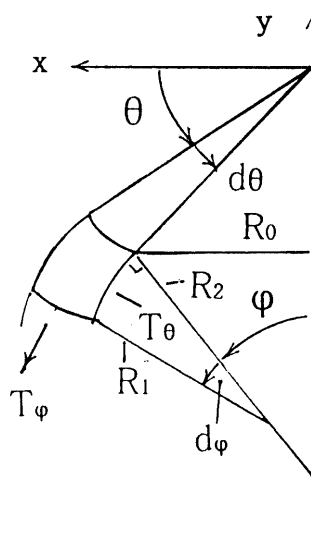


図4. 軸対称曲面の延伸.

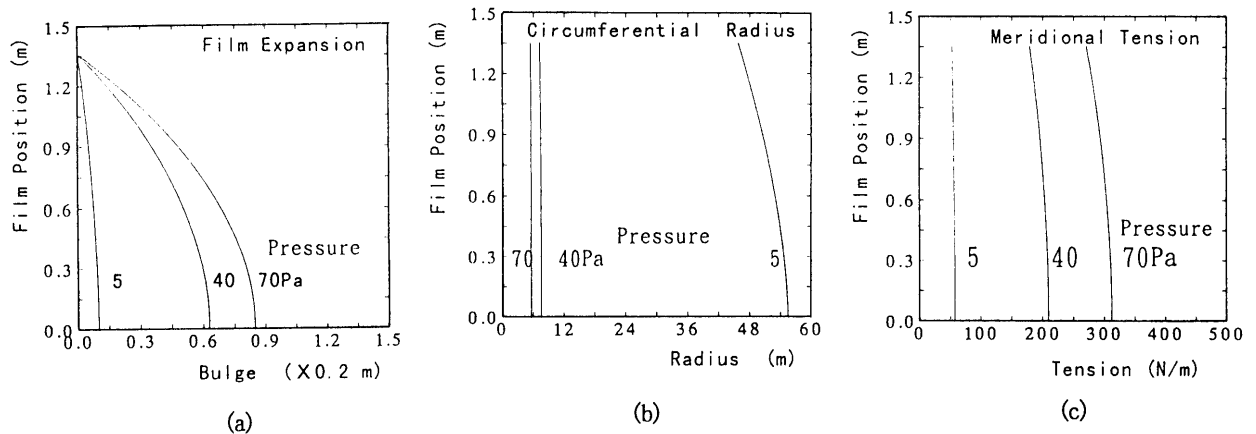


図5. 円環状皮膜の変形と張力.

(a) 皮膜の周方向の膨らみ. (b) 周方向の曲率半径の変化. (c) 経線方向の張力.

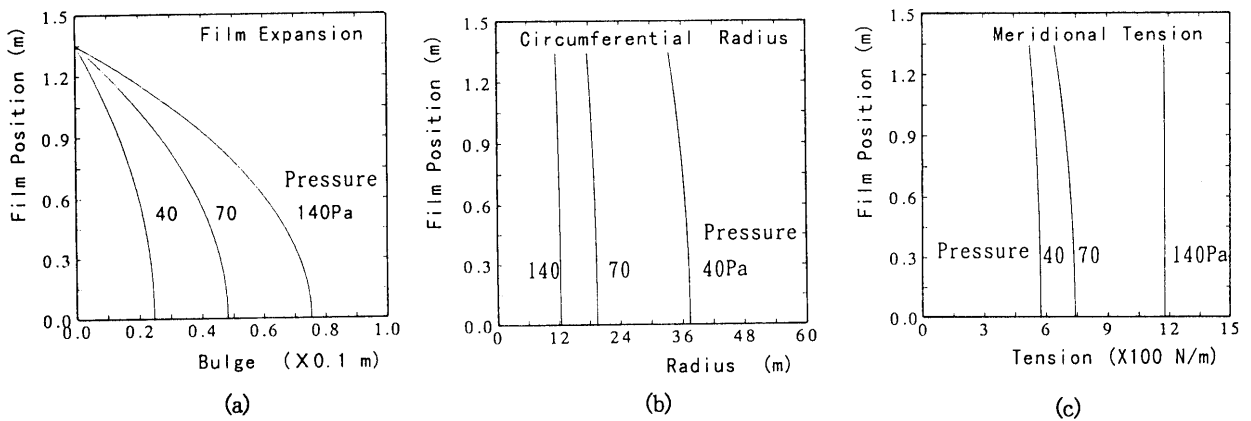


図6. ヤング率の大きい(硬い)場合の皮膜の変形と張力.

(ヤング率は、図5の場合の10倍)

次に、比較の意味で、この皮膜が同じ圧力で1軸方向にのみ引き伸ばされた場合を考える。図7-(a)のように、幅が L_0 で無限に長い皮膜の両端が長さ方向には自由に動けるように固定されているとする。この状態で圧力が加われば、1軸のみの理想的伸びとなり、曲率半径 R_0 で円弧状に膨らむ。解析は上記の2軸延伸の場合より格段に簡単で、張力を T 、皮膜厚さを h 、歪みを ϵ 、ヤング率を E とすれば

$$T = P \cdot R_0 \tag{13}$$

$$= \epsilon \cdot E \cdot h \tag{14}$$

また、ひずみ θ は、図7-(b)の断面図より明らかなように、

$$\epsilon = (L - L_0) / L = 1 - \sin\theta / \theta \tag{15}$$

(13), (14), (15)式より、

$$\sin\theta (1 - \sin\theta / \theta) = P \cdot L_0 / (2 \cdot E \cdot h) \tag{16}$$

が得られる。この(16)式を満たす θ となるように皮膜は膨らむ。ヤング率を上記通常気球フィルムの 250MPa の場合と、その10倍の $2,500\text{MPa}$ にした場合の圧力変化にたいする皮膜の曲率半径および張力の変化を図8に示す。 5Pa では曲率半径 6.7m で張力 $36\text{N} \cdot \text{m}$ 、 40Pa では 3.5m で 139N/m 、 70Pa では 3m で 203N/m である。2軸延伸との差は張力で60%程であり、相互干渉の影響が大きいことが分かる。なお、球形気球を加圧する場合は、伸びが2軸方向に均等であるため、ポアソン比の影響はより大きい。すなわち、式(8)で $T_c = T_m = T$ で

あり, $\epsilon_\phi = \epsilon_\theta = \epsilon$ であるから,

$$= T \cdot (1 - \nu) / (E \cdot h) \tag{17}$$

となり, たとえば $\nu=0.8$ とすれば, ヤング率 E は1軸の伸びに換算すれば, $1/(1-0.8)=5$ となり, 5倍大きな値となったことに相当する.

従来の気球設計法では, フィルムの伸びが前提になっていることが問題であることは, 繰り返し述べてきた. さらにその伸びが2軸延伸であり, かつ通常の皮膜では2軸の間の干渉の度合いであるポアソン比が大きいので, 気球の耐圧性の向上が妨げられていることが上記の解析により明らかとなっている.

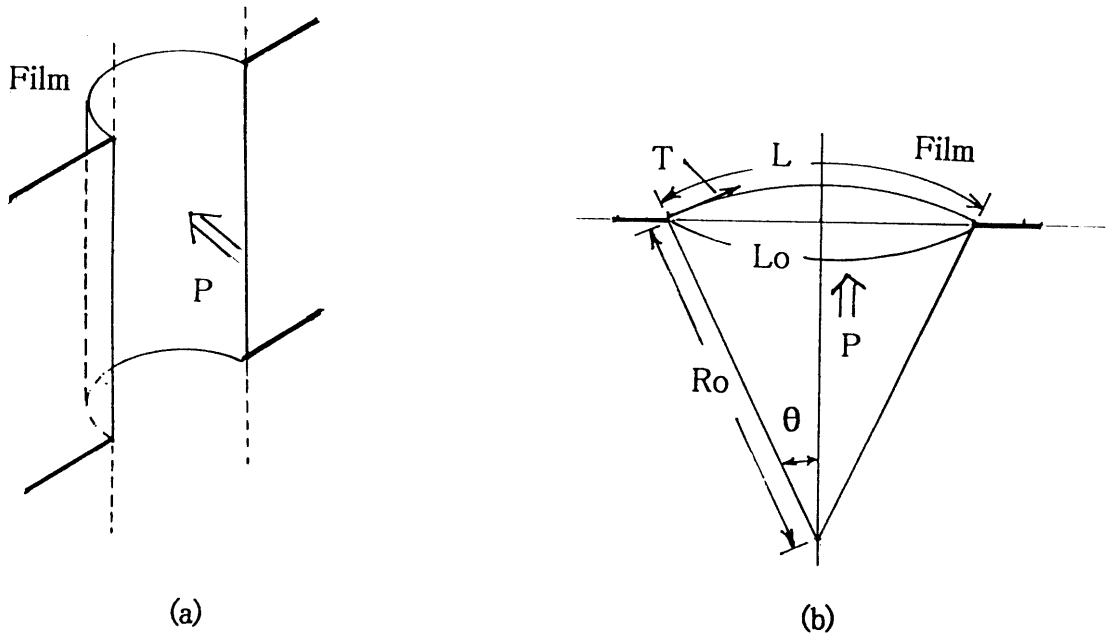
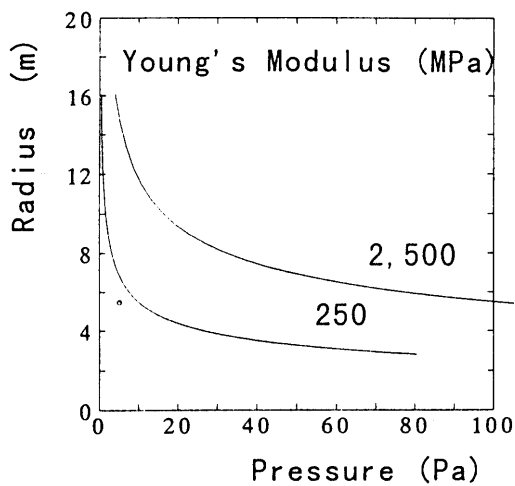
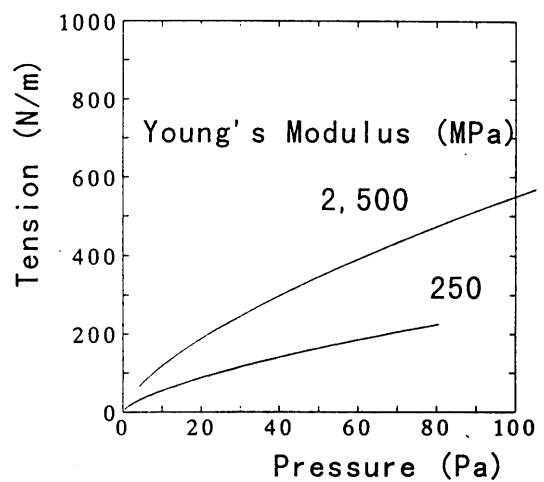


図7. 無限に長いフィルムの1軸延伸.



(a)



(b)

図8. 無限に長いフィルムの1軸延伸の曲率半径と発生張力.

4. 高耐圧気球のための形状

ロードテープを挿入した気球は、ロードテープの間で皮膜の伸びによらずにあらかじめ形状設計として小さな曲率半径で外側に膨らんでいることが、Smalley のモデルにもとづく自然型気球の概念に合致することを明らかにしてきた。そして、現実の気球設計がこのモデルとは大きく異なることを指摘してきた。ここでは、どのようにすれば3次元的に膨らんだゴアを実現できるか、ゴアの設計法および気球製法について述べる。

4.1 3次元状の膨らみを持たせるためのゴアの形状設計

通常自然型気球と同様に、3次元状に膨らみを持つ気球のゴアの形状は、Smalley のモデルをもとに図9のように計算される。図中、ロードテープの位置でもある気球の皮膜の位置 X 、 Y およびその点での経線方向の極率半径 R_m およびその傾き角 θ_m は、通常自然型気球の計算で求められる。3次元ゴアは、図のように二つのロードテープをまたぐ円弧として定義される。この円弧は、当然皮膜面と直交して外に張り出している。張り出した皮膜の曲率半径を R_{arc} とすれば、図から明らかなように、円弧の長さ L_{arc} は、

$$L_{arc} = 2 \cdot R_{arc} \cdot \theta_1 \quad (18)$$

である。ここで θ_1 は円弧の開き角の半角であって、

$$\theta_1 = \sin^{-1} (L_1 / R_{arc}) \quad (19)$$

である。ここで、曲率半径 R_{arc} は、ロードテープ間の直線距離の半分の長さ L_1 よりも大きい任意の値を取りうる。すなわち、ロードテープの本数を N とすれば、

$$L_1 = X \cdot \sin (\pi / N) \quad (20)$$

$$R_{arc} \geq L_1 \quad (21)$$

となる。当然この N は、2.2の(2)(b)で述べたように、 L_{arc} の最大値が素材の皮膜の折径よりやや小さくなるように選ばれる。 R_{arc} の最小値もこの関係から定まる。実際には、ゆとりをとって多少最小値より大きい値となろう。

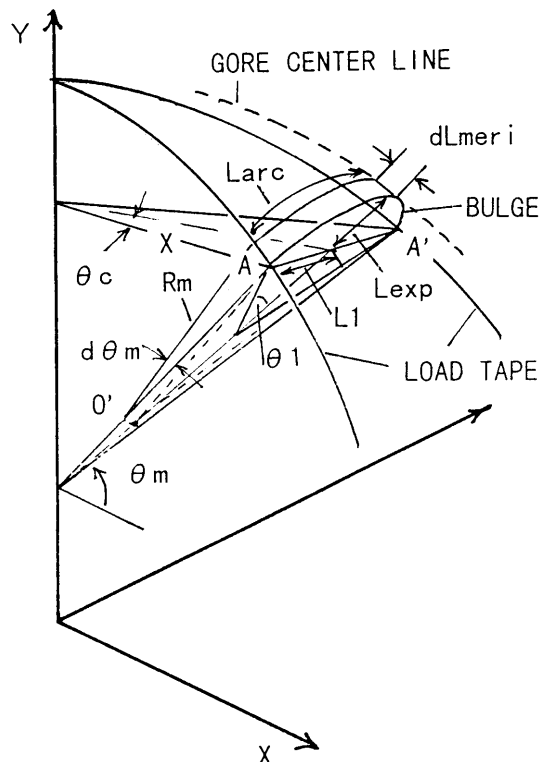


図9. 3次元ゴアの設計法.

R_{arc} を決めると、その場所での皮膜に加わる圧力から、皮膜に発生する張力の実現可能な最小値が得られる。この曲率半径を基準に、それよりもロードテープ間の距離が短い任意のゴアの位置では、そこで皮膜に加わる圧力と前記の最小張力から、その場所での曲率半径が決定できる。こうすれば、皮膜の張力がどの場所でも一定な気球が実現できる。スーパープレッシャー気球では、皮膜に加わる圧力差はどの場所でもほぼ一定であるので、 R_{arc} も一定値として扱ってよい。

以上の関係から、曲率半径の線の傾き角を d_m だけ進めた場合の張り出した皮膜の中心線の微小増分 dL_{meri} は、以下のように求まる。

$$dL_{meri} = (L_{exp} + \sqrt{R_m^2 - L_1^2}) \cdot d\theta_m \quad (22)$$

ここで L_{exp} は皮膜の張り出した高さであって、

$$L_{exp} = R_{arc} \cdot \{1 - \cos(\theta_1)\} \quad (23)$$

である。ゴアの中心線の長さ L_{meri} は、気球の自然型の形状計算を気球底部から頂点に向かって積分計算する課程で同時に dL_{meri} を積分して求まる。こうして得られたゴアは、長さが L_{meri} 、幅が L_{arc} となる。従来のゴアは、長さがロードテープの長さ、幅が L_1 であるから、明らかに一回り大きい。このことは、気球の表面積の増加、すなわち気球本体重量の増加を意味する。図10は、上下対象なパンプキン気球についてゴア数をパラメータに気球の重量の増加分を求めたものである。ゴア数が30以上であれば、重量の増分は20%以下に止まる。

4.2 3次元的な膨らみを持ったゴアの実現

4.1で設計したゴアは、そのままでは平面状であって、長さ L_{meri} と幅は L_{arc} は3次元状の膨らみを持ったゴアの寸法に合致しているが、ゴア同士を接合する縁の長さは、従来の設計法によるものと同様に、ゴアの中心線の長さより長い。もしこのまま、ゴアの縁の長さと同じロードテープを用いて気球を作れば、1サイズ大きい気球ができるだけである。そこで、この縁をロードテープに接合する際、図11のように、所定の短縮率に従って縮めながら接合すれば、ゴアの縁の長さも、3次元ゴアの長さに合致する。短縮率は、図9において、傾角が $d\theta_m$ だけ進んだ場合のロードテープの増分 $R_m \cdot d\theta_m$ とゴア中心線の増分である dL_{meri} の比である。短縮率は、経線方向の曲率半径が小さい部分ほど大きく、またゴア数が多ければ小さくなる。パンプキン気球における経線に沿った短縮率の変化を、ロードテープの本数をパラメータとして図12に示す。この気球は、浮力のない、上下対象なパンプキン気球であり、容積変化に対し相似な形状であるので、短縮率は気球の大きさに関係しない。ペイロード重量が加わったスーパープレッシャー気球でも、圧力が高い場合はほぼこれに近い形状であるので、実際の

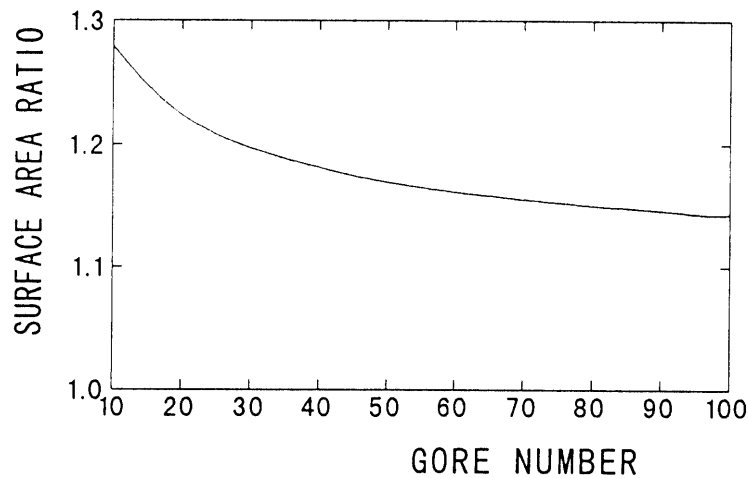


図10. 3次元ゴア設計による重量増加率。

気球の製作でも、短縮率はこの程度の値と考えてよい。

もしゴアを分割してよければ、図13に示すように、長いゴアを複数のパネルで構成し、各パネルの斜線を引いた部分を除いて接合すれば、意図する3次元的に膨らみを持ったゴアが実現できる。この方法は、熱気球のデザインの一つとして行われている。しかし、この方法を科学観測気球に用いることは、接合線の大幅な増大による製造工程数の増加と気球の信頼性の低下をもたらす好ましくない。

ゴアを一枚構成のまま短縮するには、斜線部分を除かずに皺として寄せれば実現できるはずである。この皺はゴアの中心線に向かって広がりながら解消して行く。この皺の気球強度への影響は、周方向の長さは同じであるが経線方向に皮膜が余っているために生じるものであるから、よほど分布が偏ったり、集中して重なり合う部分ができない限り応力集中等の問題は起こらず、むしろ素材が多くあって強度が大きいと考えて良い。

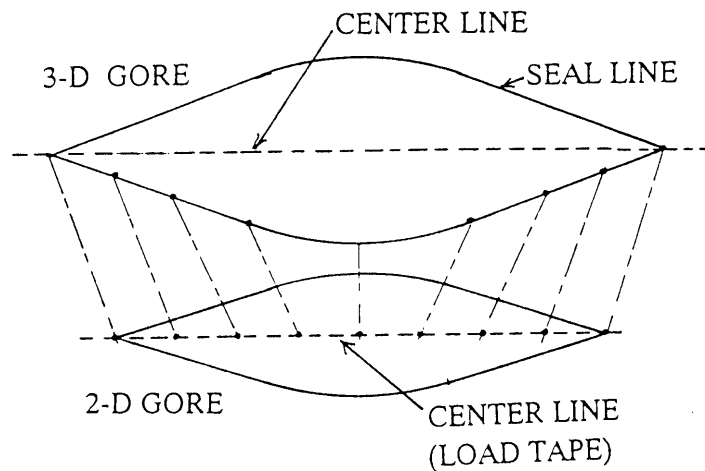


図11. 3次元ゴアの実現法.

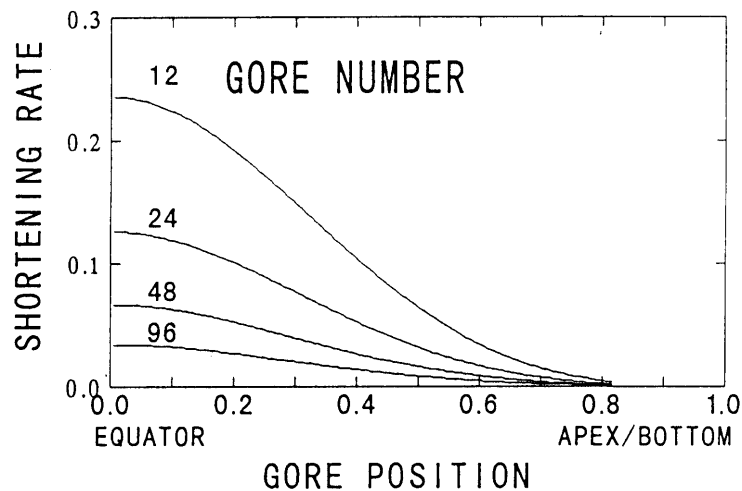


図12. ゴアの経線方向の短縮率.

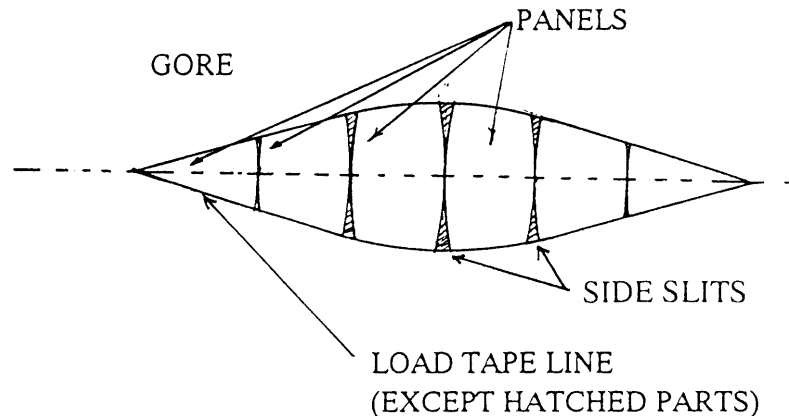


図 13. 複数パネル構成による 3 次元ゴアの製作.

5. 小型モデル気球による検証

5.1 3次元ゴアの実現法

3次元ゴア方式によって気球の耐圧特性がいかに向上するかを、小型のモデル気球を製作し、室内での加圧実験により検証した。製作する上で最も問題となる点は、長いゴアをどのような方法で皺を寄せて短縮しながらロードテープに固定するかである。幸い、1990年頃に開発が進められた特殊な気球の製作方法は、この3次元ゴア方式の適用が容易であることに気付いた。この気球では、皮膜に薄いナイロン布地を用い、ゴア相互はミシン縫いで接合し、ロードテープはゴアの縫い合わせ線に沿って挿入した。このような構成では、3次元ゴア的设计データをもとに、あらかじめゴアの縁とロードテープの上に、互いに合わせるべき位置に目印を付けておき、ゴアに皺を寄せながら目印同士を固定すれば、4.1で述べた3次元ゴアが容易に実現できる。

使用したナイロン布地の仕様を表2に示す。破断強度は従来の気球用ポリエチレン皮膜の10倍強である。

5.2 小型モデルの仕様

試作した気球は、耐圧特性の検証のみを目的としているので浮力をあたえる必要がない。このため、皮膜の重量も無視し、上下対象のパンプキン型の形状とした。赤道での半径 R_e は1.5m、ロードテープの本数 N は12本とした。1990年に同一サイズのモデル気球を従来の設計法に基づいて製作し、加圧テストを行なっている[12][13]。両者の比較は3次元設計法を検証する上で有効であるので、このサイズを選んだ。

赤道上では、ロードテープの間の距離は $2\pi R_e/N=0.79$ (m)であるので、ロードテープ間に張り出すゴアの半径は、その半分より多少余裕を見て0.5mとして設計した。この気球の3次元設計法によるゴアの寸法と従来のゴアの寸法を表3に示す。従来の設計によるゴアの中心線の長さがロードテープの長さに相当し、4.2で述べたように、3次元ゴアの縁の長さをこの長さに合わせて短縮する。

表 2. ナイロン布地気球皮膜の仕様.

布地厚さ (含むコーティング膜)	130 μ m
単位重量	80g/m ²
破断強度(20度C)	7.5kgf/cm(定格値)
	約 10.0kgf/cm(実測値)
破断伸び	30%

表 3. ゴアの寸法.

	中心線の長さ	最大幅
3次元設計法によるゴア	4.35	0.48
従来の設計法によるゴア	3.92	0.40

ロードテープには、伸びの少ないケブラーを用いた。破壊圧力 P_{\max} の予想値は、もし曲率半径 $R_c=0.5\text{m}$ が実現できていれば、 $P_{\max}=T_{\max}/R_c=10,000/0.5=20,000$ (Pa) = 200 (hPa) となる。その場合に 1 本のロードテープに加わる張力 T は、赤道上で考えれば、 $T=\pi \cdot R_c^2 \cdot P_{\max}/12=11,800\text{N}$ となるので、定格破断強度 3500 LBS (16,000N) のロープを用いた。気球への装着は、図 14 に上部と下部の写真が示すように、頭部にはアタッチメントの金具を付けず、1 本のロープで頭部を回し、両端を下部金具で固定した。従って頭部では 12 本のロープが重なり合って交差したが、特に支障はなかった。3次元ゴアの要であるゴアの縁の短縮は、ロードテープ上の 6 点で、あらかじめ双方に付けた目印を合わせ、縫い糸で固定した。

5.3 実験結果

試作した気球に空気を注入し加圧試験を行った。気球は浮力がないため頭部をクレーンで吊し、下部金具に付けた注入孔より圧縮空気を注入した。実験の経過は 2 台の ITV カメラで異なる方向から写すとともに、空気の注入圧力を 5 hPa おきに停止し、外形写真を撮り、以下の測定項目を計測した。

- ①赤道上でのゴア幅
- ②赤道上のゴア中央に描いた直交する長さ 40cm の基準線の 2 軸の伸び量
- ③赤道上のゴア中央部の周方向の曲率半径

(1) 外形形状

一見して著しい外形上の特色は、内圧が 5 hPa 程度の低い段階である。従来のデザイン方式の気球では、図 15-(a)のように、ゴアはロードテープのところで窪んでいる以外は、ほぼフラットな形状を示している。これに対し、3次元設計法で作られた気球は、図 15-(b)に示すように、この段階からすでに外側に円弧状に張り出した外形をしている。内圧が増加するとともに、いずれの気球も張り出し量は増大するが、3次元設計法による気球

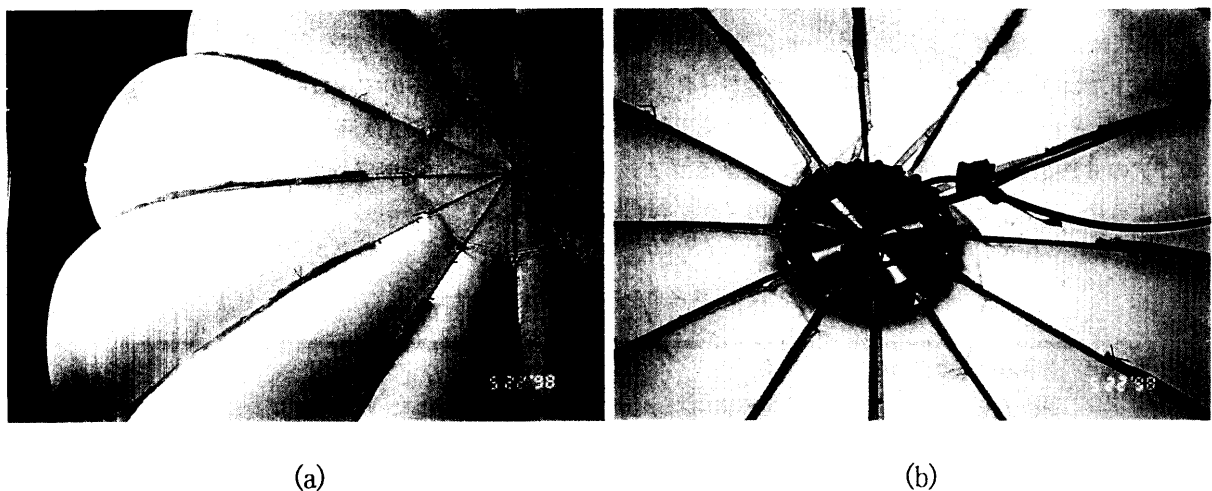


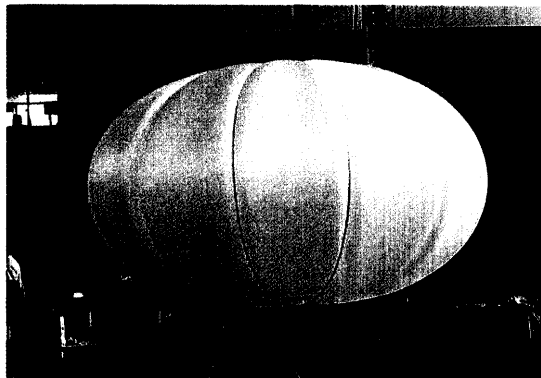
図 14. 試作 3m パンプキン気球の頭部と底部.

の方が明らかに大きな張り出しとなっている。図 16 に 20hPa 程度まで加圧した状態での二つのモデルの比較を示す。ただし、図 17-(a), (b) に示すように、3次元設計法による気球も、その張り出し形状は内圧が 50hPa 以上では外形的にはさほど大きく変化しているようには見えない。

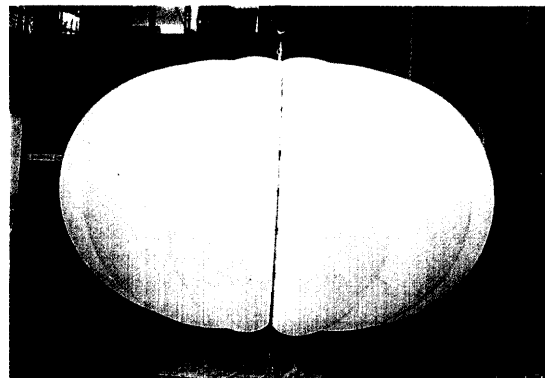
ロードテープに沿って発生させたゴアの皺は、ゴア中央部へと無理なく放射状に広がり、目視では中心線までの距離の半分以下で解消していた。皺が伸びる課程で応力集中による部分的引きつれのような現象も発生しなかった。特に内圧が破壊圧近くになっても、皺が原因で構造的に弱くなったと見られる場所は発見されなかった。

(2) ゴアの周方向曲率半径

3次元ゴアの曲率半径は、半径 0.5m の前後を 5 cm 間隔で凹の円弧に切り出した型紙の治具を作っておき、それをゴアの表面の周方向に押し当てて測定した。得られた曲率半径と内圧の関係を図 18 に示す。先に、内圧が低い場合にも外側に大きく張り出して見えると書いたが、実測値からするとゴア中心部はかなり平坦であることになる。このような傾向は 3.3 で解析的に求めた圧力が低い場合の曲率半径の場所的变化にも現れている。皮膜端部ほど経線方向の伸びの影響を受けないためである。しかし、実測値は計算上の傾向よりかなり大きい。この現象の解析的に厳密な説明はできないが、皺の部分の曲げモーメントなど、膜構造材として零として扱っている要素が、内圧が低いこの段階では無視できず、皺それ自体の自発的伸びにより、経線方向の伸び率が小さいロードテープ付近が設計形状より多く膨らむため、中心部に行くほど平坦になっていると考えられる。この現象は、内圧が上昇するとともに減少し、破壊圧力の $1/3$ 以上では曲率半径の設計値である 0.5m に収束している。このことから、この圧力に対する曲率半径の変化は、高い耐圧性を得ようとする 3次元ゴア設計法の目的には問題のない現象であると言える。



(a)

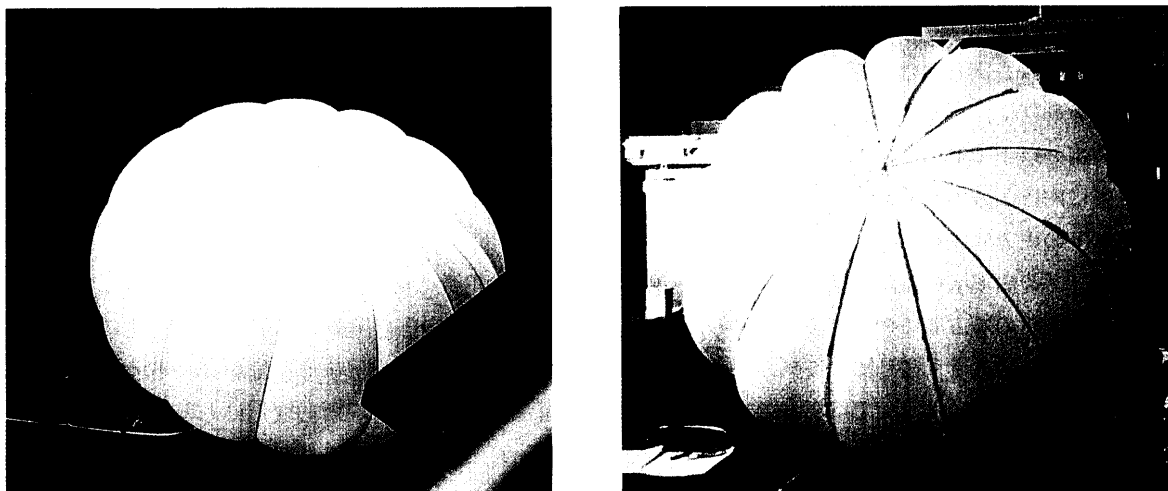


(b)

図 15. 加圧前の気球の形状。

(a) 通常デザインによる気球。

(b) 3次元ゴア設計法による気球。



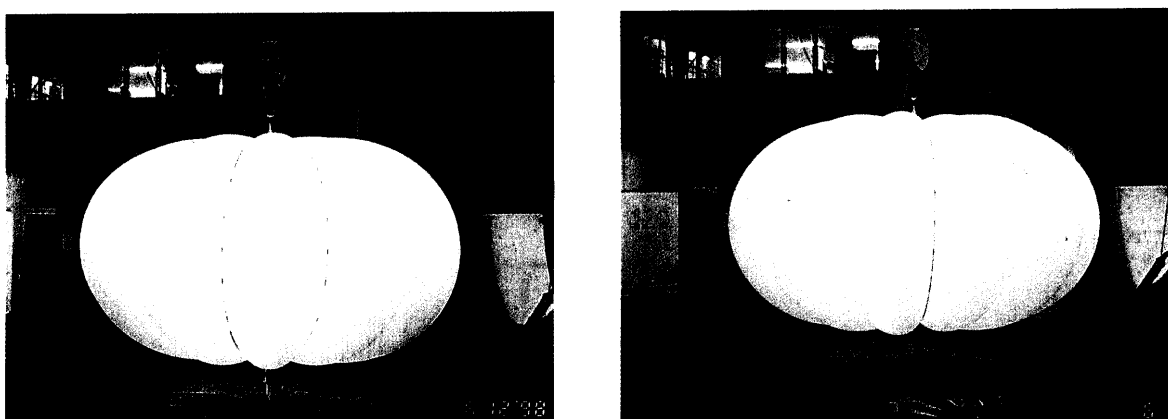
(a)

(b)

図 16. 加圧状態のゴアの形状 (圧力約 20hPa).

(a) 通常デザインによる気球.

(b) 3次元ゴア設計法による気球.



(a)

(b)

図 17. 加圧状態の気球 (50 hPa).

(a) 50 hPa

(b) 120 hPa

(3) 皮膜の伸び

上記(2)で述べたように、周方向の曲率半径は、内圧が大きくなるとともに設計値に収束したが、その間、皮膜の2方向の伸び量は圧力にはほぼ比例して増加した。その結果を図19に示す。経線方向の伸び率が周方向の伸び率を下回ったのは、ゴアの長さを経線方向に短縮した効果と考えてよいであろう。ただし、伸び率の差はさほど大きくない。3次元ゴアの設計方針から言えば、経線方向のゴアのゆとりをもう少し大きくとり、伸びの差異を大きくしても良いように思われる。

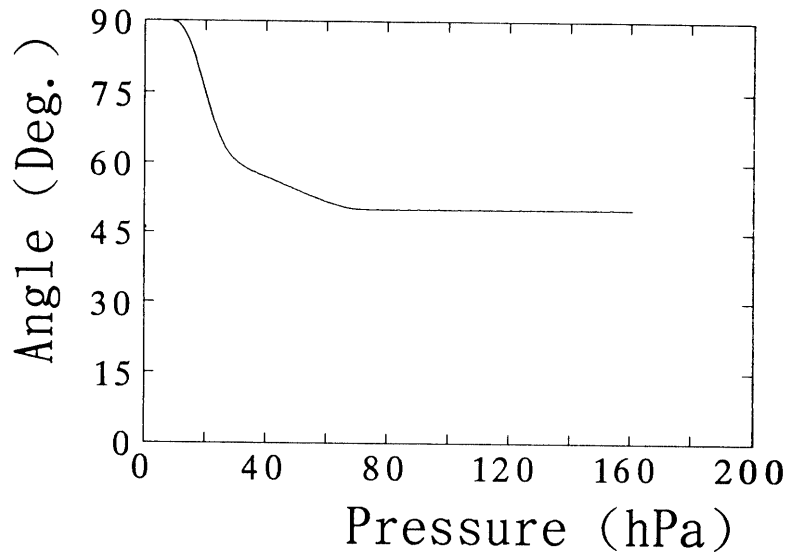


図 18. 3次元ゴア気球の周方向曲率半径.

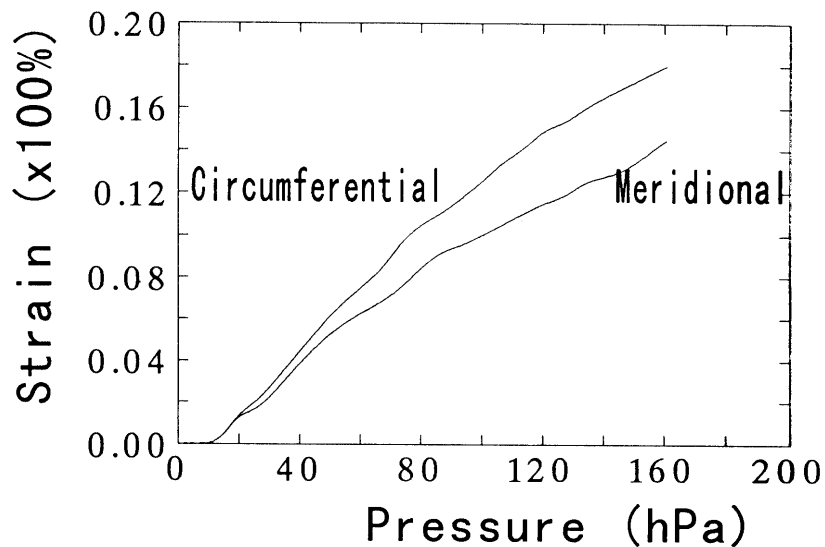


図 19. 3次元ゴア気球の皮膜の伸び.

5.4 実験結果の考察

気球は、内圧 187hPa の圧力まで耐え、図 20 の ITV 画像からも、ほぼ中央付近から破壊したと判断できる。破壊直前の目視によれば、ゴアの接合線上のミシン目が皮膜の張力で周方向に引かれ、孔が横に開いてきた。明らかに強度は皮膜そのものより低下しており、破壊はまず接合線より始まったと思われる。ただし、反対側から写していた ITV カメラ側にも破壊が写っており、破壊箇所は一カ所ではなく一部は皮膜がちぎれて飛び散っている。破壊開始時の衝撃波等によりほぼ同時に複数箇所の破壊が生じたと考えられ、接合箇所が他の部分に比べ著しく強度が低下していたとは考えられない。皮膜が圧力を支えているのは、主に曲率半径の小さい周方向だと近似して考えると、破断時の内圧 187hPa では、周方向に $T_c = P \cdot R_c = 18,700 \cdot 0.5 = 9,350 \text{ (N/m)} = 9.5 \text{ (kgf/cm)}$ の張力が発生したことになる。この値は、皮膜材料の破断特性とほぼ一致している。

同じ皮膜を用いた従来の設計法によるパンプキン気球では、内圧が 3次元ゴアの $1/3.4$ の 54hPa で破壊している。破壊は、頭部から 20cm ほど下部に補強として周方向に取り付けたリング状のテープのミシンの縫い目に沿ってまず破断し、次にロードテープに沿って経線方向に破断が進んだ。この気球では、ゴア設計時に幅の値に

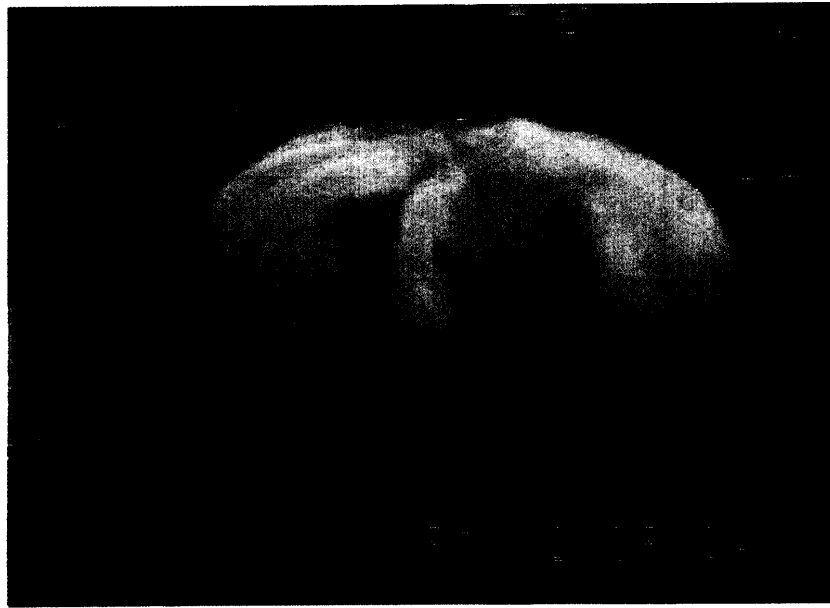


図 20. 3次元ゴア気球の破壊時の形状.

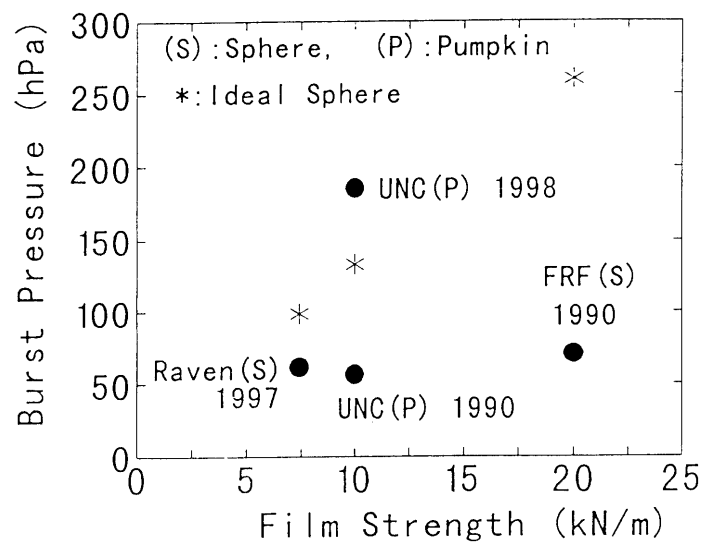


図 21. 同等規模の気球の破壊テストの結果.

10%弱のゆとりを付与している。このため、通常的设计以上に経線方向に大きな張力が発生したと考えられる。ただし、加圧時の皮膜の伸び具合から見て、通常的设计による気球の強度を大幅に下回っているとも考えられず、通常のコア設計法による気球の耐圧特性と大きな差はないと考えてよいであろう。

比較できる他の実験例としては、有翼飛翔体実験で用いられた繊維強化フィルム気球の開発段階で行われた、直径3mの球形気球による強度テストがある。皮膜の破断強度は19kgf/cmであり、気球の破壊圧力は70hPaであった[14]。また、米国REVEN社は、NASAの100日気球計画用のスーパープレッシャー気球を開発するプログラムの一環として、同じく直径3mの球形気球の加圧試験を行っている。引張強度約7.3kgf/cmの皮膜を用い、破壊圧力は61hPaであったと報告されている[15]。これらの結果を、横軸に皮膜強度、縦軸に破壊圧力をもって示すと図21となる。完全な球の場合の理論破壊圧力を比較として加えている。こうした、同等規模の気球

の破壊テストの結果からも、3次元ゴア法による気球の耐圧特性が優れていることは明確である。

6. 終わりに

大重量を搭載する大型気球をスーパープレッシャー気球として実現する方策として、気球の構造上の改善により耐圧特性を向上する可能性はないかという視点から、自然型気球の機能の再検討を行った。その結果、ロードテープの間で理想的な円弧を描いてゴアを張出させることができれば、同一の皮膜材料を用いても耐圧特性を大きく向上させることができることを明らかにした。その場合に、気球のデザインの要となるのは、ゴアの経線方向の長さにゆとりを持たせることである。実際に気球を作るには、長い一枚仕立ての紡錘型のゴアの集まりで気球を構成するとすれば、ゴアの縁を理論的短縮率に従って皺を寄せて縮めながらロードテープと結合すればよい。ゴアの幅は、当然張り出す円弧の長さとする。

こうした新しい気球の設計概念によれば、気球の耐圧性はほぼロードテープの本数に比例して強化され、かつ気球の容積に依存しない。この設計法を通常のポリエチレン気球フィルムに適用できるとすると、ゴアの設計上の曲率半径を少し大き目の2mとし、皮膜に加わる圧力を高度30kmの大気圧(約10hPa)の1/10の1hPaとしても、皮膜に発生する張力は200N/mとなる。この数値は、通常のゼロプレッシャー気球用のポリエチレンフィルムの破断強度を大きく上回っており、安全率は必ずしも十分でないが、スーパープレッシャー気球が実現できることを意味する。

こうした結論は、これまでの実際の気球の特性とは大きく異なるものである。そこで、第一歩として、赤道での直径が3mのパンプキン気球を作り、破壊テストにより設計理論の妥当性を検証した。同等のサイズの気球によるテストは、高強度気球を開発する際の初期段階でよく試みられる。それらの実験結果と比較すると、新しい設計法に基づく気球は約3倍以上の強度を示し、三次元ゴア設計方式がいかに有効であることを示すことができた。

7. 謝 辞

本研究の中心課題である、高耐圧気球の実現法に関しては、著者の所属するシステム研究系主幹の雛田元紀教授より多くの有益な助言を受けた。また、青森大学藤井正美教授からは、ナイロン布地気球に関し多くの貴重な助言を頂いた。ここに心から御礼申し上げる。新しい着想である、三次元ゴア設計法の妥当性については、宇宙膜構造物の研究を進めておられる宇宙探査工学研究系の名取通弘教授および樋口健助教授に詳しく御検討頂いた。工業技術院機械技術研究所の小鍛治繁首席研究官、黒河治久振動工学研究室長並びに筆者の研究上の同僚井筒直樹助手、斎藤芳隆助手には討議に多くの時間を割いて頂き、有益な助言を得た。赤道直径3mの新型気球の試作・試験には藤倉航装(株)松島清穂技術開発担当次長に大変お世話になった。これら多くの方々の協力に心から感謝する次第である。

参 考 文 献

- [1] V.W.Jones, Current Status of the NASA Long Duration Balloon Program, Adv. Space Res. 114, 191-200, 1994.
- [2] Magdi A.Said, et al, Recent Advancement in the Development and Selection of Materials for Long Duration Scientific Ballooning Applications, Proc. of AIAA 34th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 1996.
- [3] J.H.Smalley, Determination of the Shape of a Free Balloon, AFCRL-64-734, 1963.
- [4] G.Dwayne ORR, The long Duration Balloon Vehicle (LDBV) Flight System Development, Proc. of AIAA 34th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA-96-0357, 1996.
- [5] 太田茂雄, 西村 純, 他, エパール気球, 宇宙科学研究所報告, 特集34号, pp1-16, 1997
- [6] 河田幸三, 橋本彰三, 本堂 明, 昭和41年以来最近6年間における気球用フィルムの性能と飛揚結果の向上, 東京大学宇宙航空研究所報告, 第9巻, 第1号(B), pp138-141, 1973.

- [7] H. Alexander and P. Agrawal, The effect of Material Deformation on the Shape and Stress State of a High Altitude Balloon, Proc. of 7th AFCRL Scientific Balloon Symposium, pp397-414, 1973.
- [8] 西村 純, 太田茂雄, 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, 第3巻, 第2号(B), pp142-158, 1967.
- [9] 岡本 智, 縦補強型気球の補強本数の効果と薄いフィルムの開発, 東京大学宇宙航空研究所報告, 第9巻, 第1号(B), pp142-158, 1973.
- [10] たとえば, 小林繁夫, 近藤恭平, 弾性力学, 工学基礎講座7, 培風館.
- [11] J.Tielking and V.Thomas, Fracture Toughness of Fiber Reinforced Polymeric Film, Proc. of AIAA 34th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA-96-0688, 1996.
- [12] 藤井正美, 他, ウレタン布気球について, 平成2年度大気球シンポジウム集録, pp42-48, 1990.
- [13] 西村 純, パンプキン気球について, 一内圧の高いハート型気球一, 宇宙科学研究所報告, 特集30号, pp3-11, 1992.
- [14] R.Akiba, et al, The Development of High-Strength Balloons Made of New Materials, Proc. of AIAA International Balloon Technology Conference (AIAA-91-3663-CP), pp55-60, 1991.
- [15] M.S.Smith and L.G.Seely, Current Status of Advanced Materials and Seaming Research, Proc.of 21st ISTS, 98-j-17, pp1614-1620, 1998.