

菱目の網を被せたスーパープレッシャー気球

斎藤 芳隆¹, 松坂 幸彦¹, 水田 栄一¹, 莊司 泰弘¹, 松嶋 清穂², 田中 茂樹²

A super-pressure balloon with a diamond-shaped net

By

Yoshitaka SAITO¹, Yasuhiro SHOJI¹, Yukihiro MATSUZAKA¹, Eiichi MIZUTA¹,
Kiyoho MATSUSHIMA², and Shigeki TANAKA²

Abstract

The lobed-pumpkin shaped super-pressure balloon is able to withstand high pressure due to its small local curvature of the film being independent of the balloon size. It yields the small local curvature as a bulge among adjacent load ropes connected between the top and the bottom fittings. The small curvature is also expected if the balloon is covered by a diamond-shaped net with vertically elongated shape. In addition to the merit of the small curvature, the method using the diamond-shaped net has following merits; 1. the weight of the film is reduced since a weak but light film is able to be used by covering the balloon with a fine mesh net which mesh size is determined without depending on the gore width, 2. the deployment problem known for the lobed-pumpkin balloon can be solved due to its lack of additional films, 3. the capacity of resist pressure is not reduced due to the manufacturing error, since the local distortion of the mesh size does not affect the global balloon shape. We made a small balloon with a 3 m diameter using a 20 μm polyethylene film and a Kevlar net, and performed an inflation test which showed an expected burst pressure. We are going to make larger balloons for the ground inflation tests and launch a larger super-pressure balloon as a part of a tandem balloon system in 2011.

Keywords: Scientific Balloon, Super-pressure Balloon, Membrane Structure

概要

Lobed-pumpkin 型のスーパープレッシャー気球が高い耐圧性能を発揮できるのは、気球フィルムの局所曲率半径を気球の大きさと独立に小さくできるからである。Lobed-pumpkin 型は頭部尾部の両極を結ぶロードロープの間にフィルムを張り出させることで小さな局所曲率半径を実現している。気球に縦に長い菱形の網目を持つネットを被せ、網目からフィルムを張り出させることでも同様の効果が期待できる。加えて、網目をフィルムの幅と独立に小さくすることができるため、フィルムに要求される強度が小さくなり、軽いフィルムが利用できること、フィルムに余長を設ける必要がなく展開の完全性が期待できること、製作誤差の影響が網目一つに留まり耐圧性能に直接影響しないこと、といったメリットがある。20 μm 厚のポリエチレンフィルムの上にケブラーロープで編んだ網を被せた直径 3 m の気球を試作し、膨張破壊試験を実施したところ、所期の耐圧性能を発揮することが確認された。今後、順次、気球の大型化を進め地上で膨張試験を実施すると共に、2011 年度にはタンデム気球用のスーパープレッシャー気球として飛翔性能試験を実施する予定である。

重要語: 科学観測用気球, スーパープレッシャー気球, 膜構造物

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

² 藤倉航装株式会社

1. はじめに

長時間飛行気球の切札として宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (ISAS) で開発が進められている Lobed-pumpkin 型のスーパープレッシャー (SP) 気球 [1] には、展開の完全性、気球フィルムの重量と強度、製作誤差に起因する強度劣化などに課題が残っている。

展開の完全性の課題とは、満膨張時に完全に展開するのではなく、斜めにくびれが入った状態となり、所期の耐圧性能が発揮できない問題の解消である。ISAS の気球では 2009 年に飛行した PB60-2 気球において判明し (図 1)[2]、NASA の気球実験においても 2006 年の飛行において判明している [3]。定性的にはゴア数が多く、フィルムの張り出しが大きい場合に出現しやすいことが知られており、現在、定量的な議論 [4] が進められている課題である。ISAS 大気球実験室では、Lobed-pumpkin 型の発展型である俵型気球 [5] へとデザインを変更することでこれを解消することを検討しており [6]、NASA は余剰なフィルムを少なくした形状とすることでこの問題に対処している [7]。

現在、ISAS の SP 気球に用いられているのはグンゼ製の BH25 フィルムである。このフィルムは、中心にある EVOH をナイロン、および、ポリエチレンで順に挟んだ 5 層構造を持つ、厚さ 25 μm のフィルムである。ISAS の大型のゼロプレッシャー気球で用いられている 20 μm のポリエチレンフィルムと比較すると、単位面積あたりのフィルム重量は少し重い、BH25 フィルムの方が伸びにくく、引張試験時の破断強度が強い。BH25 の単位面積あたりの重量は 26.5 g/cm^2 であり、20 μm 厚のポリエチレンフィルムは 18.6 g/cm^2 である。また、引張強度を室温の円筒気球降伏点圧力で比較すると BH25 の方が 5.8 倍の強度を有する。一方で、BH25 フィルムは、引き裂きには弱いため傷が入った場合に非常に弱くなる、フィンシールでなくラップシールしないと低温での強度が出ないため製作に手間がかかる、といった欠点がある。できれば、従来から利用してきたポリエチレンフィルムを使いたい、そのためには重量を 5.8 倍にせざるを得ない。気球軽量化のため、いたしかたなくこのフィルムを利用している面がある。そもそも、現状の SP 気球は、ゼロプレッシャー気球と比較すると、気球重量が重い [1]。

また、製作には誤差がつきものである。ロープの長さの誤差が生じ、設計値よりも長くなった場合、そのロープの部分は外側に張り出すこととなり、そのロープの両側のフィルムは張り出した分だけ、所期の曲率半径よりも大きな曲率半径をとる (図 2)。張り出した場合に影響が出る長さ誤差は、ゴア幅のオーダーであり、一方、ロープの長さはゴア幅とは独立に気球の大きさで定まるため、要求される誤差率は大きな気球ほど小さくなる。仮に影響がでる長さ誤差を 1 m とすると、体積 300,000 m^3 の気球において要求される長さ精度は 0.8 % であり、管理が難しい領域に入っている。したがって、大型気球の設計に当たっては、この影響を含めて耐圧性能を考慮する必要がある。本論文で提案する手法は、これらの課題をいずれも解消するものである。以下に原理の説明と、小型気球を用いた実証試験の結果を示す。

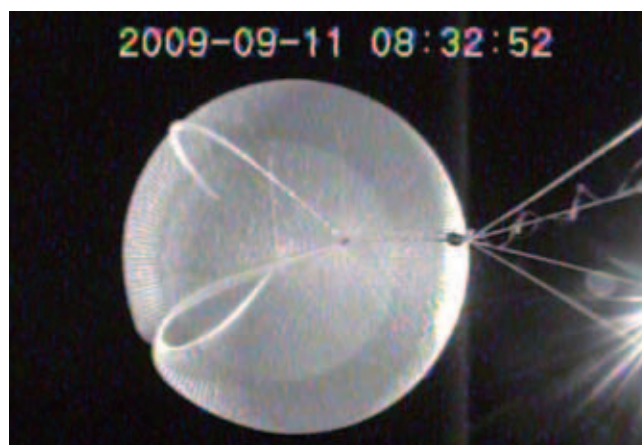


図 1: 2009 年度の PB60-2 気球の不完全な展開

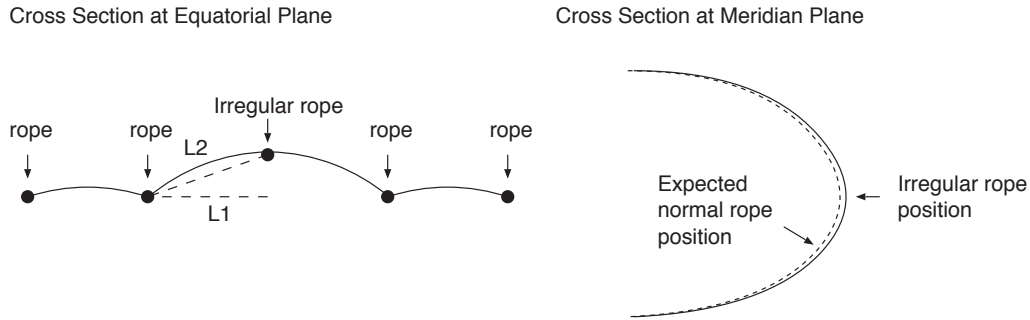


図 2: ロープの余長と張り出しの関係. L1 よりも L2 の方が長い場合、ロープ間のフィルムの曲率半径は大きくなってしまふ。

2. SP 気球の耐圧性能

Lobed-pumpkin 型気球が内圧に耐えるのは、フィルムにかかった圧力をかぼちゃ型に組まれたロードロープを外側に引っ張る力に変え、ロープがその力を支えるためである。フィルムの曲率半径を小さく取ることにより、フィルムにかかる力を軽減できることがこの構造のメリットである。

フィルムにかかる張力 T_{film} は横方向張力のみであり、フィルムの局所曲率半径を R_{local} 、気球にかかる内圧を Δp とすると、

$$T_{\text{film}} = \Delta p R_{\text{local}} \quad (1)$$

である。フィルムの局所曲率半径は自由に選ぶことができるため、フィルムの引っ張り強度、必要耐圧から必要な半径を選べばよい。一方、ロープにかかる張力の和 T_{rope} は、気球の赤道半径を R_{balloon} とすると、

$$T_{\text{rope}} = \pi R_{\text{balloon}}^2 \Delta p \quad (2)$$

であり、気球の大きさと必要耐圧から自ずと定まり、フィルムの局所曲率半径には依存しない。従来の気球設計では、気球の大きさと必要耐圧、および、フィルムの製造幅から、ゴア数およびロープ数を定め、そこからロープ強度、および、フィルムの曲率半径を定めてきた。

ここで、ゴア幅を狭くし、ロープ間隔を縮める影響を考えてみる。耐圧性能を保ちつつロープ間隔を縮めると、ロープの本数は増加するが、一本あたりに要求される強度が減少するため、ロープの全体量に変化はない。ここで、フィルムの曲率半径を同一にとれば、同一耐圧となるが、この際、フィルムの横幅が少なくてすむメリットがある。

この効果は以下のように定量化できる。図 3 のように長さ $2l$ の間隔にロープが配置され、その間にフィルムが張り出している場合を考えてみる。フィルムの曲率半径を r 、その弧の頂角を 2θ とすると、弧の長さは $2r\theta$ 、弦の長さは $2l$ である。ここで、 $l = r \sin \theta$ である。曲率半径は無限大から弦の半分の長さまで変化させることができるが、その際のフィルムの量の変化を示したのが図 4 である。横軸は弦長の半分と曲率半径の比 (l/r)、縦軸は弧長と弦長の比 ($r\theta/l$) である。曲率半径が弦長に比べて十分に大きい際は弧と弦の長さはおおよそ等しく、曲率半径が弦の長さの半分に一致した時点では $\pi/2$ となる。同一の曲率半径の場合、ロープ間隔が狭い方が弧の長さとの比が小さく、フィルムの横幅が少なくなる。

ここで、ゴアの幅を曲率半径よりも十分小さく ($l/r \sim 0.1$) 設定すれば、現在、ISAS が行っているようにフィルムの張り出し分を考慮して気球を製作せずとも、フィルムの伸びだけで弧と弦の長さの違いを吸収できる。余剰にフィルムがあることが気球の不完全展開の要因であり、これがないことはこの不定性がないことも意味し、この点からもメリットがある。この際、フィルムの伸びや気球の耐圧特性は、補遺 A のようにモデル化できる。

耐圧性能は、シリンダー気球の破壊試験における降伏点と図 4 の関係から推定することができる。ゼロプレッシャー気球に用いられている $20 \mu\text{m}$ 厚のポリエチレンフィルムは、折径 1.5 m のシリンダー気球の破壊試験における降伏点の伸び率は 9% 、一軸換算強度（降伏圧を円筒半径で除した値）は 22 MPa である。図 4 から、降伏点伸びにおける弧と

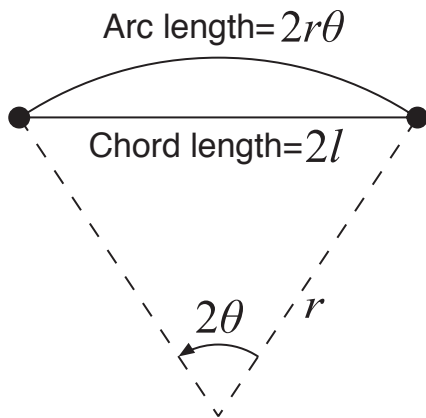


図 3: 弧長と弦長の関係

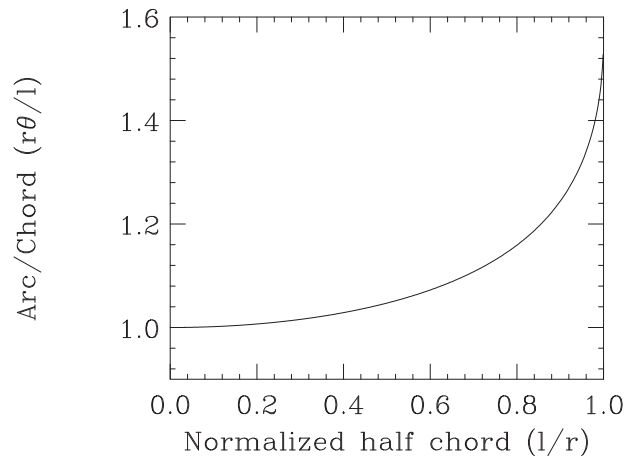


図 4: 弧長と弦長の比と弦長の半分と曲率半径の比との関係

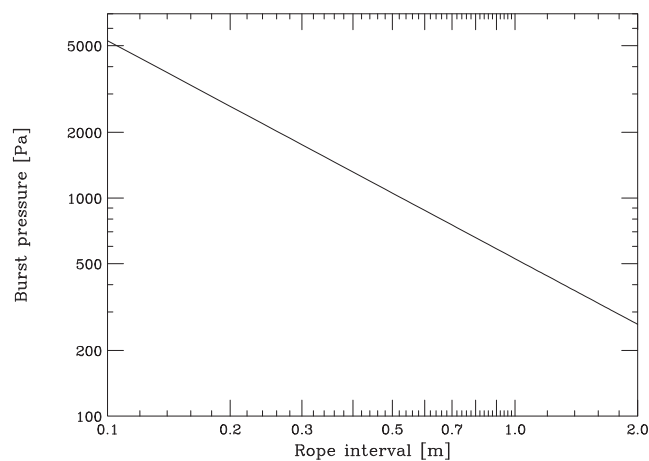


図 5: 20 μm 厚ポリエチレンフィルムを用いた際の耐圧性能とロープ間隔の関係

弦の比 ($r\theta/l$) を求めると、0.652 であり、図 5 のように、ロープ間隔と耐圧性能の関係が求まる。高度 35 km を飛翔する SP 気球の要求耐圧は 100 Pa 程度であり、50 cm のロープ間隔で必要耐圧に対して 10 倍の安全率を持たせることができる。

3. はっさくのネットのように組んだロープをかぶせる製作法

このように、ロープ間隔を狭くすることで、ロープの重量を増やすことなく、20 μm 厚のポリエチレンフィルムが利用できるよくなることわかったが、一方で、単純にゴア幅も狭めて製作すると、溶着が必要となる長さが増大し、信頼性が劣り、製作費用も増大する。これを解消する方法を検討するうち、図 6 のような、菱目のネット状にロープを組んで気球にかぶせる方法に気がついた。このネットは、図 7 のような構造をとり、横に広げる幅がロープの交点間の距離よりも十分小さいならば、横に広げた際の縦方向の長さの変化が十分小さいところがポイントである。このネットは図 8 のように、気球用ゴアの形に変形することができ、ゴアへはりつけることができる。ゴアへのネットの固定は、ゴアの周囲とネットを構成する一番外側の縦ロープとを固定するだけでよい。その方法の一案として、ロープにポリエチレンのテープを縫いつけ、そのテープと気球とを熱溶着する方法が考えられる。なお、この構造では、網の重量は従来のロープ重量と同一であるためフィルムを軽くできる分だけ気球の全体重量は軽くできる。また、ロープの長さの誤差の影響は網目一つ一つに留まるため、全体形状の変形には至らず、耐圧性能への影響は小さい。



図 6: はっさくのネットをゴム気球にかぶせたところ.

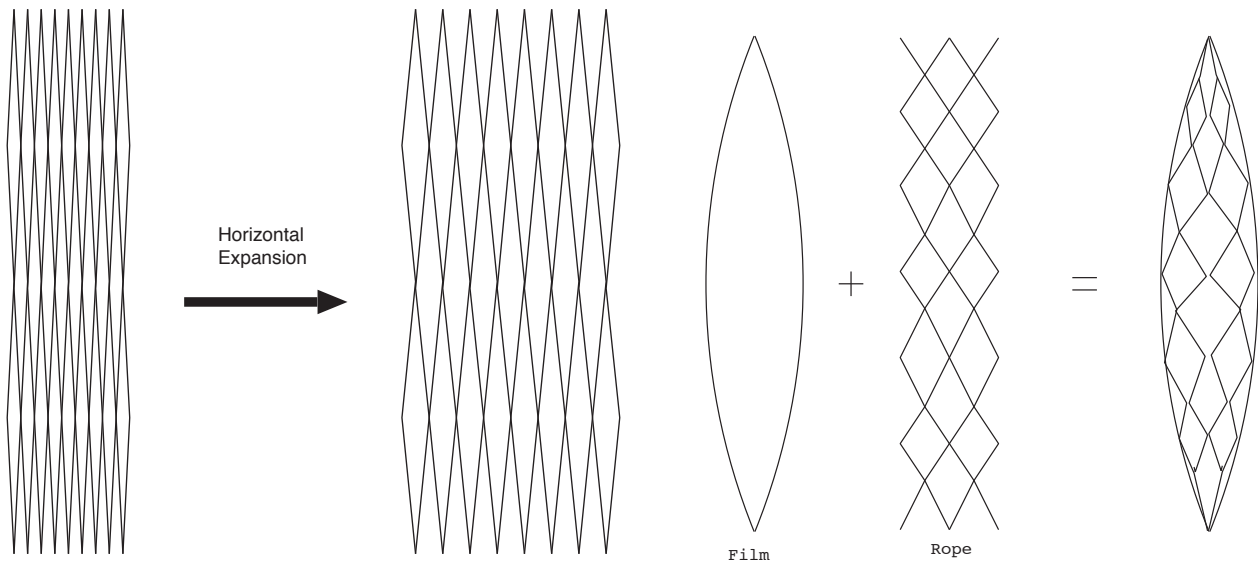


図 7: はっさくのネットの構造. 横に広げた際の縦の長さ変化が小さい

図 8: はっさくのネットの気球ゴアへのはりつけ.

4. 小型気球による実証試験

4.1 小型気球の仕様

本手法の実証のため、直径 3 m の小型気球を製作し、膨張、破壊試験を実施した。気球形状は、オイラーの楕円形（張り出しなしのかぼちゃ型）であり、20 μm 厚ポリエチレンフィルムを用いて、最大幅 78.3 cm のゴア 12 枚をフィンシームで溶着して製作した。これに、赤道部で 19.6 cm 間隔となる破断強度 300 ポンドのケブラーロープで作った網をかぶせた。ゴア一枚あたりに網線は 8 本、網目は 4 つである。表 1 に気球の諸元を示す。

4.2 試験概要

この気球の膨張、破壊実験を 2010 年 4 月 21 日、藤倉航装株式会社船引工場の風洞にて実施した。気球の膨張の様子を 120 度ずつ離れた 3 方向、および、上からの 4 方向からビデオカメラで撮影した。横から撮影したカメラの視野

表 1: 直径 3 m のはっさく気球 (NPB001-1) の設計諸元

気球番号	NPB001-1
公称容積 (m ³)	9.3
直径 (m)	2.99
全長 (m)	3.92
高さ (mm)	1790
ゴア数	12
ゴア長 (mm)	3920
最大ゴア幅 (mm)	783
フィルム種類	20 μ m 厚ポリエチレン
ロープの溶着線からの距離 (mm)	10
ロードロープ強度 (l bs)	300
縦ロープ数	96
縦ロープ束縛間隔 (m)	0.5
赤道ロープ間隔 (mm)	196



図 9: 破壊直前の気球 (NPB001-1)

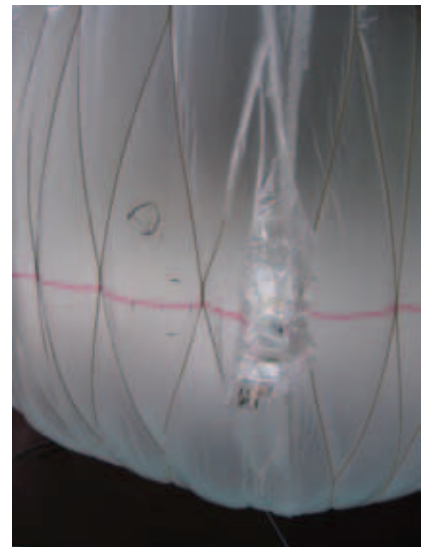


図 10: 破裂した箇所

の正面の気球フィルムにマークを書き込み、印加圧力による変化を撮影すると共に、定規で縦横の伸びと、中央点における縦横の曲率を計測した。気球の内圧は、気球尾部に取り付けた圧力ポートより差圧計により計測し、その電圧値を 1 秒ごとにデータロガーで記録した。膨張した気球の様子を図 9 に、破壊箇所を図 10 に示す。気球の破壊圧は 2460 Pa であった。

4.3 ゴアの伸びと曲率

気球に図 11 のように 120 度ずつ離れた 3 つのゴアの赤道部に縦 10 cm、横 10 cm の長さのマークを入れ、その長さの変化と、その中央点での曲率を計測した。気球展開後にマーキングしたため、長さの絶対値の精度は低い。図 12 に、網とマークの関係を示す。マーク 2 に関しては、網目の中央付近で計測できたが、マーク 1、3 については網目の端に位置していた。マーク 3 についてはロープが被さっていたため、曲率の計測はできなかった。

図 13 に印加した圧力の時間変化を示す。200 Pa、400 Pa、600 Pa、800 Pa と順に上げ、40 分程度放置した後、140 Pa、800 Pa にて計測した。結果を表 2 に示す。曲率は、0.5 ~ 3.0 m の曲率定規で計測した。

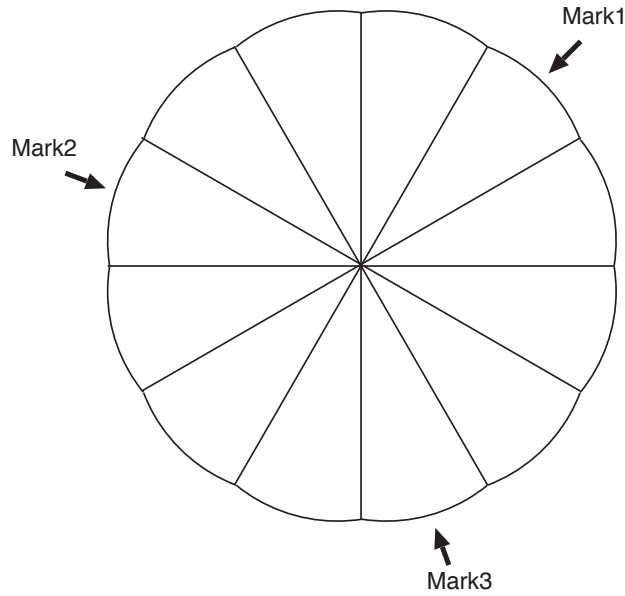


図 11: マークの位置



図 12: マークの位置. 左から順にマーク 1, 2, 3 の周辺の写真. 気球の赤道に赤線が入っており, ゴア幅の中央から縦横 5 cm づつ離れた点にマークが入っている (左図, 青矢印先). 膨張時に撮影したため, 変形している. マーク 3 の位置にはロープが被さっており, 横方向の曲率の計測はできなかった.

長さの変化を気球の内圧の関数として示したのが図 14 である. 横方向はわずかながら圧力が上がるにつれて伸びているが, 縦方向の長さの変化はない. これを詳細にみるため, マーク長を 200 Pa での値で規格化したのが図 15 である. 三箇所のマークのデータをすべて使って, 直線でフィッティングしたのが図中の直線であり, 規格化した長さを l , 気球の内圧を $p[\text{Pa}]$ とすると,

$$l = 0.989 + 4.6 \times 10^{-5} \times p \text{ (横方向)} \tag{3}$$

$$l = 1.000 + 0.3 \times 10^{-5} \times p \text{ (縦方向)} \tag{4}$$

である. 計測誤差を 1 mm として, 一次の係数の誤差 (1σ) を評価すると横が 1.4×10^{-5} , 縦が 1.3×10^{-5} であり, 横の伸びは有意であり, 縦は伸びていないと無矛盾である.

図 14 において塗りつぶされているマークは 40 分間たった後で計測したものである. 前後でフィルムの長さの変化は小さくクリープはさほど大きくないことがわかる. フィルムの伸びは横方向でも 5% 以下であり, フィルムの降伏点伸び (9%) より小さいため, クリープは小さいと考えられる.

図 16 にフィルムの曲率半径と差圧の関係を示す. 横方向の曲率半径は気球の内圧が上がるにつれて小さくなり, 縦方向のそれは大きくなっている. フィルムの伸びと曲率半径の関係は図 4 の関係にある. この関係を用いて, 横方向の曲率半径が 0.5 m 以下となる伸びを求めると 0.68% 以上であり, 圧力と伸びの関係式 (3) を用いて気球の内圧を求め

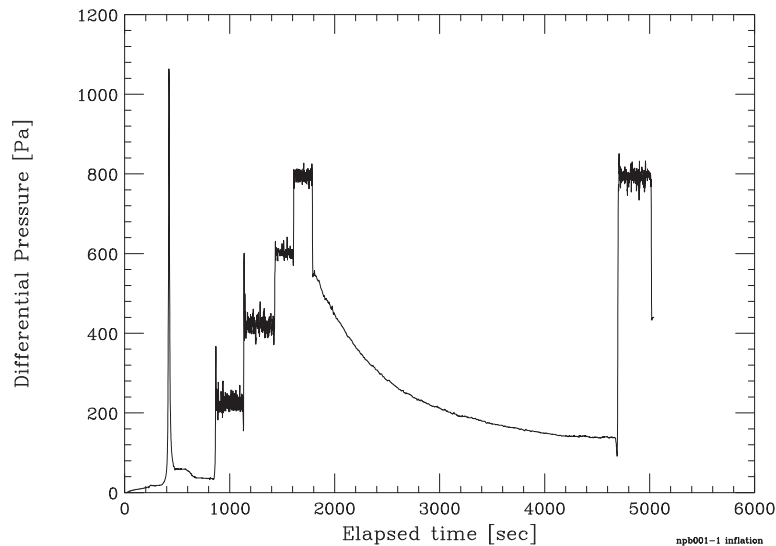


図 13: 膨張試験中の差圧変化

ると 147 Pa となる。200 Pa, 400 Pa の点ではより大きい曲率半径が計測されており、完全に円弧形状には当初なっていないものと考えられる。一方、図 16 の塗りつぶされている点は 40 分経過後の測定であるが、140 Pa, 800 Pa 双方の時点での横方向の曲率半径は 0.5 m 以下に変化している。計測にかからない程度の伸びによりフィルム形状が変形し、最終的には円弧形状に近い形に落ち着いたものと考えられる。

また、同様の計算により縦方向の伸びを求めると 5 % といった大きな伸びがあることになるが、伸びの計測により、伸びは実測できないほど小さいことが判明している。したがって、こちらも完全に円弧形状にはなっていないものと思われる。40 分経過後の測定値は増加傾向にあり、こちらも伸びにより円弧形状により近い形に変形したものと考えられる。

赤道部の周長を 800 Pa において計測したところ、9330 mm であった。この長さは、赤道部のゴア幅の和、9396 mm よりも 0.7 % 小さい。これは網が横方向に広がったがために、気球の子午線が網の長さよりも短くなり、それと共に赤道も短くなったことに起因している。今回の網は交点の間隔が 50 cm であり、横方向には赤道部で平均的には 20 cm に広がる。この際、網の縦方向の長さは 2 % 短縮される。一方、この測定では、網のかかっている部分のくびれを無視して、張り出している部分を直線的に結んで計測している。従って、網で規定されているかぼちゃ型の大きさはさらに小さい。曲率半径が 50 cm 以下であるとしかわからないが、仮に曲率半径 26 cm であったとすると網で規定されているかぼちゃ型の赤道長は、張り出している部分を直線的に結んだ長さよりも 1 % 小さくなる（補遺 B）。なお、この際の弦長と弧長の比からフィルムの伸びは 3 % となるが、式 (3) から求まるフィルムの実測伸びは $4 \pm 1 \%$ となり、両者は誤差の範囲で一致している。まとめると、網が横に広がったために網で規定されている気球の大きさが 2 % 小さくなり、計測の際に張り出している部分を直線的に結んだために 1 % 長く計測され、結果としてゴア幅の和より 1 % 小さい値が測定されたものと考えられる。

4.4 フィルムの幅の分布

図 12 からわかるように、網目の横方向の大きさは、まちまちであった。幅が広いほど曲率半径は大きくなるので耐圧性能の劣化につながる。そこで、赤道部にある 48 個の網目のうち、22 個について横方向の幅を計測したところ、表 3 の結果を得た。

図 17 に頻度分布を示す。ガウス分布でフィッティングすると平均値 202 ± 13 mm, 幅 50 ± 14 mm (誤差は 1σ) となる。平均値は設計値 196 mm と無矛盾である。今回の気球においては 300 mm を越えるゴアは 2 つあった。一つは上記で計測されているもの、もう一つは、破壊箇所である。300 mm の幅は平均値から 2σ 離れており、300 mm 以上のゴア数の期待値は 2.2 個である。これは今回の気球での実測値と一致する。

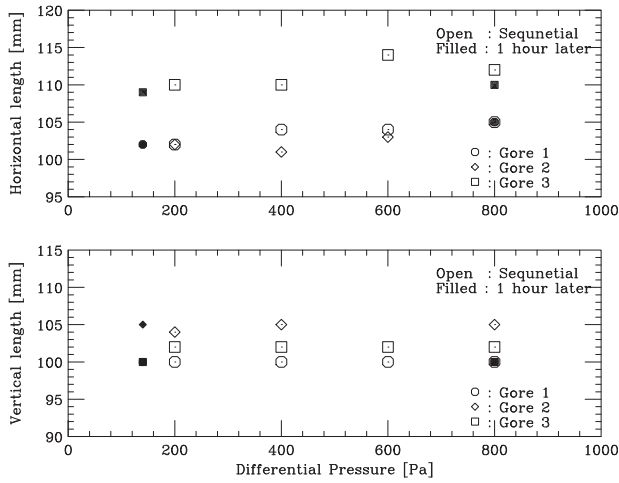


図 14: フィルム上のマーク長との差圧の関係

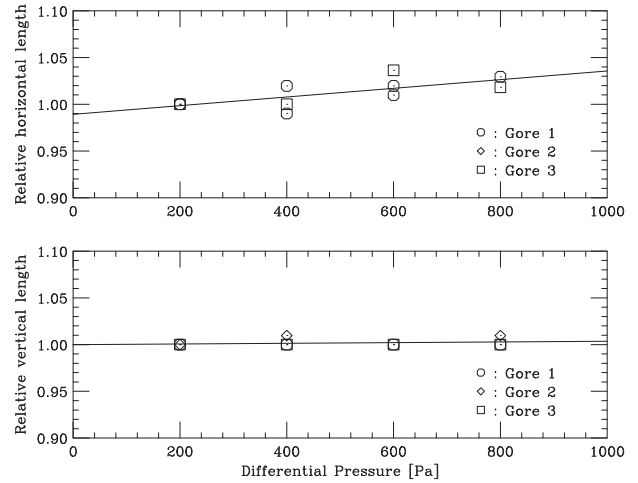


図 15: 規格化したフィルム上のマーク長との差圧の関係

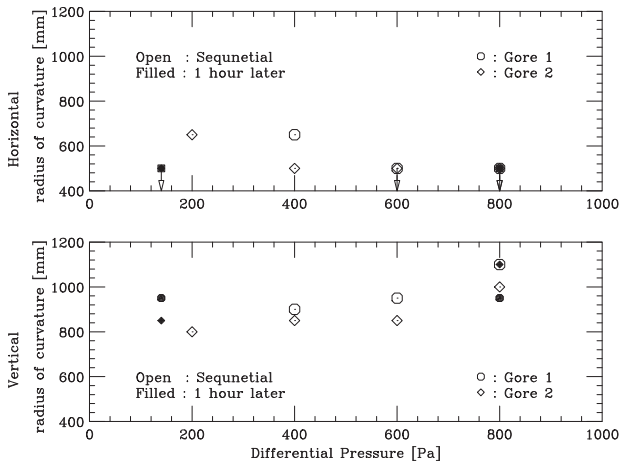


図 16: フィルムの曲率半径と差圧の関係

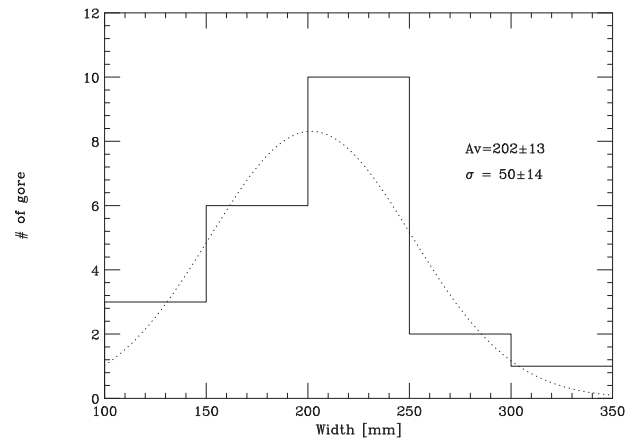


図 17: 網目の幅の頻度分布

表 2: フィルムの伸び, 曲率の変化

差圧 [hPa]	200	400	600	800	140	800
1 横長さ [mm]	102	104	104	105	102	105
1 縦長さ [mm]	100	100	100	100	100	100
2 横長さ [mm]	102	101	—	103	102	—
2 縦長さ [mm]	104	105	—	105	105	—
3 横長さ [mm]	110	110	114	112	109	110
3 縦長さ [mm]	102	102	102	102	100	100
1 縦曲率 [mm]	—	900	950	1100	950	950
1 横曲率 [mm]	—	650	< 500	< 500	500	< 500
2 縦曲率 [mm]	—	850	850	1000	850	1100
2 横曲率 [mm]	—	500	< 500	< 500	600	< 500

表 3: 赤道部の網目の横方向の幅 [mm] (平均 196.6 mm, 標準偏差 10.5 mm)

網目番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
幅 [mm]	312	256	166	128	237	224	125	203	208	158
網目番号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
幅 [mm]	103	227	205	175	225	264	168	154	208	225
網目番号	21	22								
幅 [mm]	150	205								

4.5 破壊圧

図 18 に、気球破壊時の圧力上昇を示す。破壊圧は 2459 Pa であった。破壊箇所は、横幅が 300 mm 強あった最も幅の広い網目の中央であった (図 10)。

図 5 のロープ間隔と耐圧の関係を用いて、破壊圧を求めてみる。網目の横方向の間隔が 0.3 m であったとすると、破壊圧は 1800 Pa, 0.2 m であったとすると 2600 Pa となる。網目の横方向の間隔は 0.3 m 程度であり、ここから求まる破壊圧は実測値より少し小さい (破壊予想圧は実測値の 73%) が、同程度である。

予想と実測との違いは、図 5 ではフィルムの伸び剛性のデータとしてシリンダー気球試験での評価値を用いたことに起因している可能性がある。シリンダー気球の試験の場合、フィルムにかかる応力は円筒の長手方向と周方向とで 1:2 となる。一方で、この気球形状における応力比がこの比を保存しているとは限らない。フィルムの降伏点強度や伸びは応力の比に依存しており、23°C での横方向を固定しない一軸引張試験における 20 μ m 厚ポリエチレンの破断強度は 59 MPa に達する。この強度は図 5 の推定で用いているフィルム強度 22 MPa の 2.7 倍に相当する。実測された破壊圧はフィルム強度が 30 MPa であれば説明ができ、この応力比の違いで説明できる可能性が高い。また、今回の試験時の気温は 15°C 程度であり、シリンダー気球の試験時は 10°C であった。一般にポリエチレンフィルムは温度があがるにつれて降伏点までの伸びが大きくなる。仮に、降伏点伸びが 10% だったとすると (10°C での値は 9%)、図 4 から求まる弧と弦の長さの比は 0.681 となり、降伏点強度が同一であるならば、4% 大きな破壊圧となる。

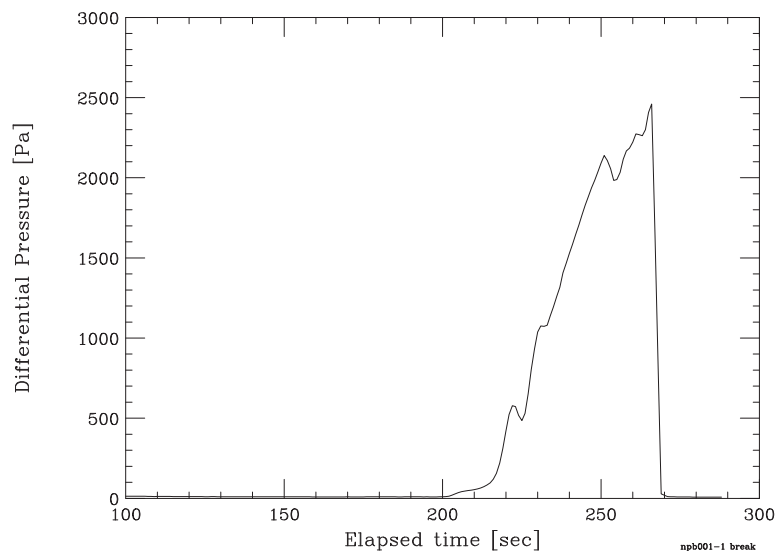


図 18: 破壊試験中の差圧変化

4.6 実験結果のまとめ

本実験により、以下が判明した。

- 網が広がる間隔が一定でなく、横方向の対角線長は赤道部においては平均的には 20 cm となるところが、場合によっては 30 cm 以上となっていた。耐圧性能を評価する上では、この分布の評価が欠かせないことがわかった。
- 破壊は、網目が最も荒くなった箇所で生じ（図 10）、急激にフィルムの一部が伸ばされ、最終的に破裂に至った。
- フィルムのマークの計測により、800 Pa 印加時において、縦方向のフィルムの伸びは 1 % 以下であったのに対し、横方向の伸びは 3.7 % と有意であった。
- 破壊圧 2460 Pa はフィルムの間隔が 0.3 m であった場合に補遺 A のモデルに基く図 5 から得られる値 1800 Pa と同程度であり、モデルの確からしさが確認できた。

5. まとめ

はっさくのネットのように組んだロープを、オイラーの楕円形の気球にかぶせるスーパープレッシャー気球は、原理的に展開の不定性が少なく、20 μm 厚ポリエチレンフィルムが利用できるほどフィルムへの要求性能が小さく、かつ、製作誤差が耐圧性能に響きにくい、という特徴をもつ。直径 3 m の小型気球において、この手法でスーパープレッシャー気球が製作できることを実証し、モデル計算と 30 % の精度で一致する耐圧性能が得られることを確認した。今後、順次大型の気球を製作し、地上試験を実施すると共に、来年度、タンデム気球の SP 気球として実際に飛翔させ、成層圏の低温環境における耐圧性能を評価する予定である [8]。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金若手研究 (A) 「スーパープレッシャー気球とゼロプレッシャー気球を組み合わせた長時間飛翔気球の研究」(課題番号 21686081) を受けて行っています。

参考文献

- [1] 井筒直樹, 他, JAXA-RR-09-01, pp.1-22 (2007)
- [2] 福家英之, 他, 平成 21 年度大気球シンポジウム集録, pp.13-16
- [3] Henry M. Cathey, Jr., AIAA 2007-2615
- [4] たとえば, 中篠恭一, 佐々木誠, 平成 22 年度大気球シンポジウム集録
- [5] 井筒直樹, 他, 平成 21 年度大気球シンポジウム集録, pp.17-20
- [6] 福家英之, 他, 平成 22 年度大気球シンポジウム集録
- [7] Henry M. Cathey, Jr. and David L. Pierce, AIAA 2009-2808
- [8] 斎藤芳隆, 他, 平成 22 年度大気球シンポジウム集録

補遺 A. ロードロープ間にフィルムが張り出す構造においてフィルムに働く張力

図 19 にあるように、二つの伸びないロードロープ間（間隔 $2l$ ）にフィルムが張られており、内圧によって伸ばされ、曲率半径 R で張り出しているモデルを考える。ここでは、フィルムには縦方向の張力がかからず、縦方向の張力はロードロープによってのみ支えられているとものとする。

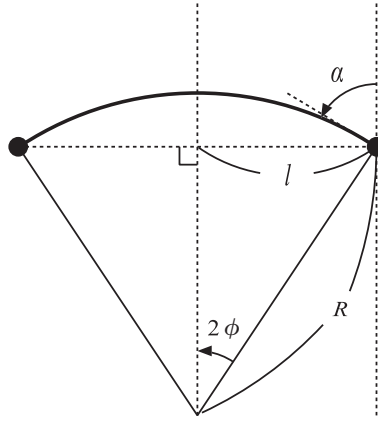


図 19: 伸びないロードロープ間に張られたフィルムが伸びて圧力を閉じ込めるモデル

幾何学的に、

$$R \sin 2\phi = l \quad (5)$$

の関係がある。皮膜にかかっている圧力を Δp とし、張力を T とすると、図 19 の面内の釣り合いとして、

$$T = \Delta p R \quad (6)$$

が成り立っている。また、図 19 の面に垂直な面内の釣り合いとして、ロードロープ一本にかかる張力を T_1 、縦方向のロードロープの曲率半径を r_v とすると、

$$T_1 = 2 \cos \alpha \cdot T \cdot r_v \quad (7)$$

が成り立っている。ここで、 α と ϕ は、

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - 2\phi \quad (8)$$

であるため、

$$\cos \alpha = \sin 2\phi \quad (9)$$

の関係にある。これを式 (5) を代入すると、

$$\cos \alpha = \frac{l}{R} \quad (10)$$

であり、式 (7) に代入し、式 (6) を用いると、

$$T_1 = 2l \cdot \Delta p \cdot r_v \quad (11)$$

となる。この式は、ロードロープ間のフィルムにかかった圧力がロードロープの張力によって支えられていることを示している。この式からは、フィルムの曲率半径やフィルムに働く張力は定まらない。これらは、フィルムの剛性によって定まっており、

$$T = k \frac{2R\phi - l}{l} \quad (12)$$

である。ここで、フィルムのバネ定数（一軸方向の伸び剛性）を k とおいた、フィルムの曲率半径、かかる張力は、式 (5), (6), (12) の3式を連立させて解くことによって求まる。

図 20, 21 に、フィルム幅 ($2l$) が 20 [cm], フィルムのバネ係数が 10 [N/m], 100 [N/m], 1000 [N/m] の条件下において、気球にかかる差圧と曲率半径、かかる横方向張力の変化を示す。伸びやすい、バネ定数が小さいフィルムの方がかかる張力は少なくなっている。三種類のバネ定数の場合で、ほぼ平行な等間隔の直線となっているのは以下の事情による。

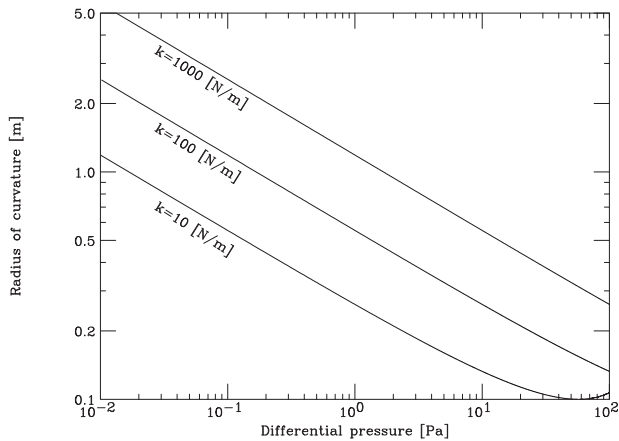


図 20: バネ定数 k が 10, 100, 1000 [N/m] である場合におけるフィルムの圧力と曲率半径の関係

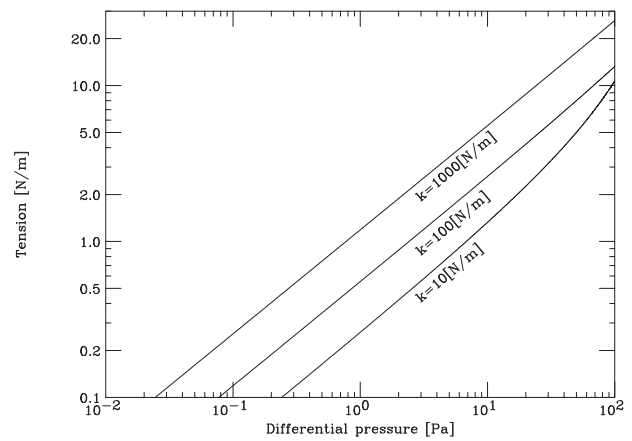


図 21: バネ定数 k が 10, 100, 1000 [N/m] である場合におけるフィルムの圧力とかかる張力の関係

頂角 ϕ が 1 にくらべ十分小さい場合、以下が成り立つ。

$$\sin 2\phi = 2\phi + \frac{(2\phi)^3}{3!} \quad (13)$$

これを式 (5), (12) に代入し、整理すると、

$$T = k \frac{4R\phi^3}{3l} \quad (14)$$

が得られる。さらに、式 (6) に代入すると、

$$\Delta p = \frac{4k\phi^3}{3l} \quad (15)$$

$$\phi = \left(\frac{3l}{4k} \Delta p \right)^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

が得られる。ここで、式 (5) に式 (13) の第一項のみを代入すると、

$$R = \frac{l}{2\phi} \quad (17)$$

であるから、これを式 (14) に代入し、式 (16) を用いると、

$$\begin{aligned} T &= k \frac{4\phi^3}{3l} \cdot \frac{l}{2\phi} \\ &= \frac{2}{3} k \phi^2 \\ &= \left(\frac{1}{6} \right)^{\frac{1}{3}} k^{\frac{1}{3}} \cdot l^{\frac{2}{3}} \cdot \Delta p^{\frac{2}{3}} \end{aligned} \quad (18)$$

が得られ、さらに式(6)を用いると、

$$R = \left(\frac{1}{6}\right)^{\frac{1}{3}} k^{\frac{1}{3}} \cdot l^{\frac{2}{3}} \cdot \Delta p^{-\frac{1}{3}} \quad (19)$$

が得られる。これらの式は、曲率半径、張力が圧力やバネ定数のべき乗となっており、このため、図 20, 21 において、平行等間隔な直線となる。直線が曲がるのは、 $\phi \ll 1$ の条件が成り立たなくなる場合である。バネ定数が 10 [N/m] の場合、曲率半径の 2 倍がフィルム幅になる圧力は 57 [Pa] であり、これに近い圧力においては ϕ は十分大きくなり、直線からのずれが推定される。実際に図 20, 21 では直線からのずれが見られている。

一般に同一レジンをを用いて作った厚みの異なるフィルムでは、破断強度 T_{\max} は厚み t に比例する。比例係数を C とすると、

$$T_{\max} = Ct \quad (20)$$

である。また、この議論では、補遺 A の冒頭にあるように、フィルムについては一軸応力状態を仮定している。このため、ヤング率 E とバネ定数の関係は、

$$k = Et \quad (21)$$

である。この関係を式(18)に代入し、最大圧 Δp_{\max} を求めると、

$$T_{\max} = \left(\frac{1}{6}\right)^{\frac{1}{3}} k^{\frac{1}{3}} \cdot l^{\frac{2}{3}} \cdot \Delta p_{\max}^{\frac{2}{3}} \quad (22)$$

$$Ct = \left(\frac{1}{6}\right)^{\frac{1}{3}} (Et)^{\frac{1}{3}} \cdot l^{\frac{2}{3}} \cdot \Delta p_{\max}^{\frac{2}{3}} \quad (23)$$

$$\Delta p_{\max}^{\frac{2}{3}} = 6^{\frac{1}{3}} CE^{-\frac{1}{3}} l^{-\frac{2}{3}} t^{\frac{2}{3}} \quad (24)$$

$$\Delta p_{\max} = 6^{\frac{1}{2}} C^{\frac{3}{2}} E^{-\frac{1}{2}} \frac{t}{l} \quad (25)$$

となる。したがって、破壊圧はフィルムの厚みに比例し、ロープ間距離に反比例する。また、ヤング率の平方根に反比例しており、伸び易いフィルムの方が耐圧性能が高くなることがわかる。

補遺 B. 赤道面の周長と張り出した部分をつないだ長さの関係

今回の気球ではフィルムが伸びることによってロープ間にフィルムが張り出してくる。この状態で巻尺を当てて赤道面の周長を測定するとフィルムが張り出している分だけ、ロープで規定される赤道面の周長よりも長い値が得られる。この増加量はフィルムの曲率半径の関数であり、以下の仮定のもとで両者の関係を求めることができる。

- 張り出した部分の断面は円弧とする。
- ロープの伸びは小さく、無視できるものとする。実際、ケブラーの破断時の伸びは4%であり、今回の実験では、破断強度の1/10程度までの張力しかかかっていないため、十分無視できる小ささである。

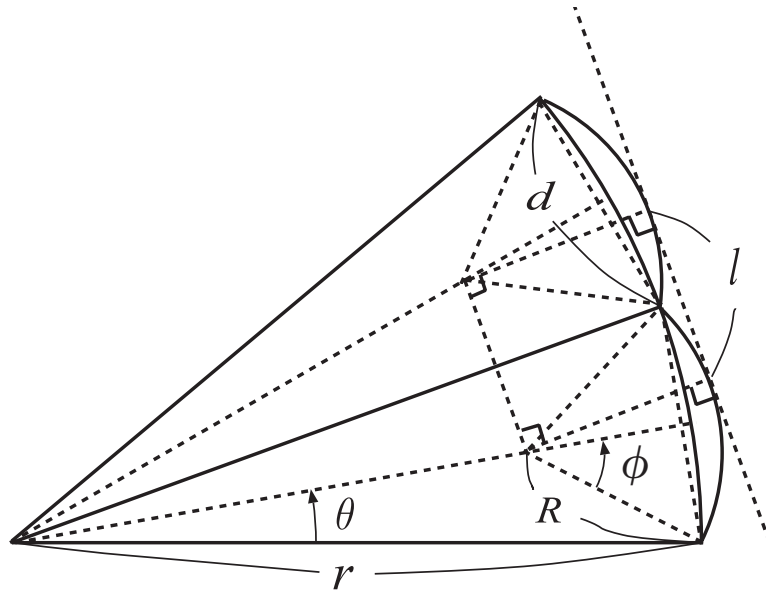


図 22: 文字の定義

図 22 のように文字を定義する。ここで、赤道面のロープの数が n 本であった場合、

$$\theta = \frac{\pi}{n} \tag{26}$$

であり、

$$r \sin \theta = R \sin \phi \tag{27}$$

である。また、図中の l が、

$$l = 2(r \cos \theta - R \cos \phi) \sin \theta \tag{28}$$

であるため、赤道面における周長 L は、

$$L = 2\pi R + nl = 2(\pi R + n(r \cos \theta - R \cos \phi) \sin \theta) \tag{29}$$

で表せる。ここで、

$$R = ar \tag{30}$$

という a を導入すると、元の周長で規格化した周長は、

$$\frac{L}{2\pi r} = \frac{2(\pi ar + n(r \cos \theta - ar \cos \phi) \sin \theta)}{2\pi r} \tag{31}$$

$$= a + \frac{n}{\pi}(\cos \theta - a \cos \phi) \sin \theta \quad (32)$$

$$= a + \frac{\sin \theta}{\theta} \left(\cos \theta - \sqrt{a^2 - \sin^2 \theta} \right) \quad (33)$$

となる。この値は θ が小さくなると1に収束する。ただし、この式が適用できるのは、 R が d よりも小さい場合、つまり、 $a \geq \sin \theta$ の場合に限られる。

今回の実験は、 $n = 48$ の場合に相当する。この場合の a と $L/2\pi r$ の関係を図23に示した。1%の違いが生じるのは、 $a = 0.175$ の場合であり、 $r = 150$ cmであるため、フィルムの曲率半径が26 cmの場合である。

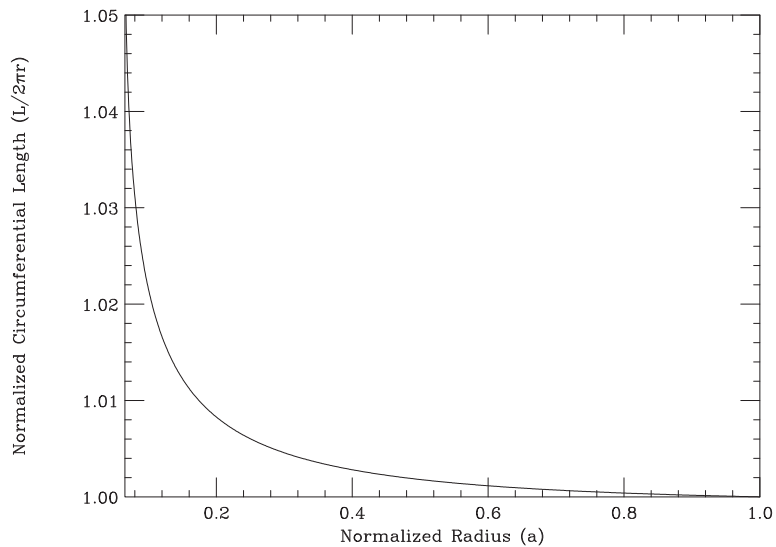


図 23: 規格化した周長と曲率半径との関係