

# 高張力網を被せたパンプキン型気球の 膨張時形状について

東海大学 : 中篠恭一, 橋本哲

## 1. はじめに

現在、宇宙線観測や大気の詳細観測など、観測用に使われている気球はゼロプレッシャー気球 (ZPB) と呼ばれる形式の気球が主体となっている。ZPB では、昼夜の温度差により気球内部のガスが徐々に流出して浮力が漸減するため、錘 (バラスト) を落下させて高度を維持する必要がある。そのため、ZPB では搭載しているバラスト量により飛行期間が制限されることとなり、飛行可能期間は極地を除いて1週間程度となる。これに対して、バラストが不要で排気口を持たず、100日以上の飛行が可能であると考えられているスーパープレッシャー気球 (SPB) が研究開発されている。現在、実用化が有力視されている SPB は、Lobed-pumpkin 型気球と呼ばれるもので、気球子午線方向の力をロードロープと呼ばれる高張力ロープに負担させ、気球フィルムには周方向のみの力を負担させる構造となっている(図1)。Lobed-pumpkin 型気球に関しては、これまでに多くの実験が行われており、国内外で既に、実用規模の気球を用いたフライト試験が実施されている[1,2]。しかしながら、その研究開発過程において、ゴア枚数が多く、フィルムの張り出し部が大きい気球において、気球が所期の対称形状に展開しないという、展開不完全性の問題が浮上してきた。展開不完全性の問題は、ISAS/JAXA および NASA いずれのフライト試験でも確認されており、さらに地上展開試験においても同様の展開不完全性が確認されている[3]。不完全展開時の気球は、表面に特徴的な S 字状の深いクレフトをもつ形状となり、S-Cleft と呼称されている。参考のため、図2に著者等が数値計算で再現した S-Cleft の変形形状を示す。この問題を解決するため、ISAS/JAXA では従来型の SPB である Lobed-pumpkin 型気球の発展型として俵型気球と呼ばれる SPB の研究開発を並行して進めている[4]。著者等は、俵型気球の展開性能について、非線形有限要素法に基づいた固有値解析を行い、その展開優位性について定量的に考察した[5]。一方、斎藤等は、俵型気球と同様の展開完全性を有し、なおかつ耐圧性能を向上させることのできる気球形式として菱目状ネットを被せた SPB を提案し、小型気球による実証試験を行なってモデル計算とほぼ一致する耐圧性能が得られることを確認した[6]。図3に、その際に使用された試験気球(NPB001-1)の外観写真を示す。菱目状ネットの気球ゴアへの貼付け法は図4に示すようなものとなっている。本研究では、菱目状ネットを被せた気球の数値構造解析を行い、膨張時形状について定量的な考察を行ったので、その結果を報告する。

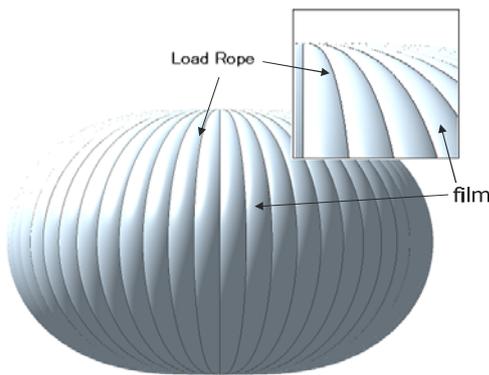


図1: Lobed-pumpkin 型気球



図2: 数値解析で再現された S-Cleft 変形の例



図3: 菱目状ネットを被せた気球(NPB001-1)

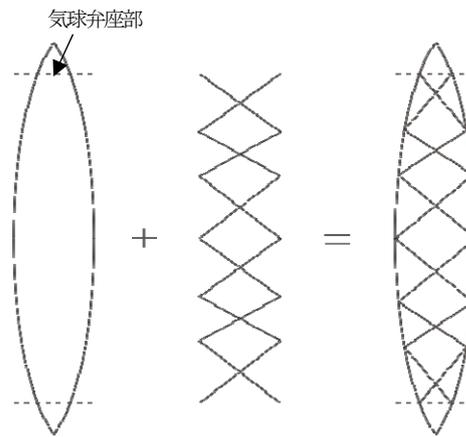


図4: 菱目状ネットの気球ゴアへの貼付け

## 2. 菱目状ネットを被せた気球の数値構造解析

### 2. 1 Lobed-pumpkin 型気球と菱目状ネットを被せた気球

Lobed-pumpkin 型気球の設計ゴア形状は、気球が子午線方向に伸長しないという条件の下で得られる膨張時形状に基づいて決定されている。以上の条件のもと 2 次元計算から得られる変形形状は Euler's elastica とよばれ、その形状は設計上、膨張時における Lobed-pumpkin 型気球のロードロープ変形形状に一致する。Lobed-pumpkin 型気球では、子午線方向の力をロードロープのみに負担させる構造となっているためである。一方、菱目状ネットを被せた気球においては、ネットを構成するロープが子午線方向からずれているため、各ロープは子午線方向の力に加えて周方向の力も同時に負担することになる。このことから、菱目状ネットを被せた気球の膨張時形状は、Euler's elastica とは若干異なるものになると予想される。そこで、本研究では、次項に述べる張力場膜要素を用いて菱目状ネットを被せた気球の膨張時形状を求め、Euler's elastica との差異について考察した。

### 2. 2 張力場膜要素

BH25 フィルムやポリエチレンフィルム等、気球に使用されるフィルムは膜厚が非常に小さく、その曲げ剛性はほとんど無視することができる。このような薄膜フィルムにリンクル（しわ）が発生した場合、フィルムの応力状態は一軸の引張状態となり、リンクルに直交する方向の応力は零になると考えられる。このとき、フィルムは見かけ上、リンクル直交方向の Young 率が零となり、リンクル方向のみに有限の Young 率をもつ弾性挙動を示すことになる。張力場膜要素とは、リンクル発生部における一軸引張の応力状態を表現するための膜要素であり、より具体的には図 5 に示すように、リンクル直交方向の Young 率が零となるような修正を加えた要素となっている[7]。張力場膜要素にリンクルが発生した場合、この要素はリンクル方向のみの力を伝達する構造要素として機能することになる。本研究では、張力場膜要素のもつこのような特性を利用し、次項に述べる方法で、菱目状ネットを被せた気球の膨張時形状を求めた。

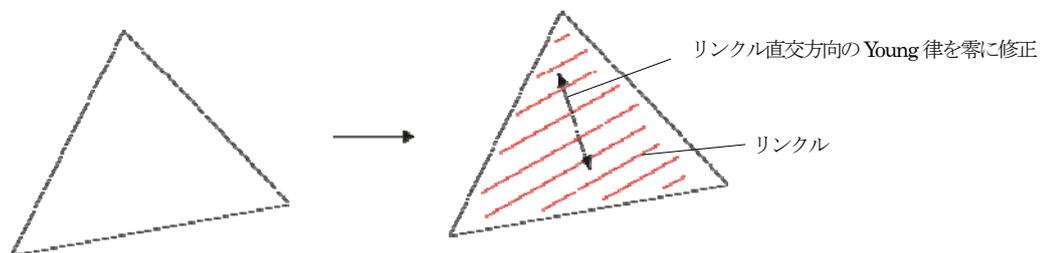


図5: 張力場膜要素の概念図

### 2. 3 菱目状ネットを被せた気球の構造解析手順

菱目状ネットを被せた気球の膨張時形状は、菱目ネットのパターン、ネットの各節点間のロープ長、およびフィルムゴア形状の 3 者に依存しており、さらに弾性変形も考慮するとロープとフィルムの弾性特性にも依存することになる。本研究では、菱目状ネットを被せた気球の膨張時形状を求めるにあたり、問題を単純化するため以下の仮定を設ける。

- a). フィルムは主に周方向のみの力を伝達するものとする

b). 菱目ネットを構成する各ロープは接線方向のみの力を伝達するものとする  
 仮定 a)が成立するよう、本研究では以下の手順で、膨張時形状を求めた。

- ① 菱目ネットを付加したストリップ状の有限要素モデルを作成する (図 6・最左図)。菱目ネットの間には、前項で述べた張力場膜要素 (線形三角形要素) を配置する。
- ② ストリップの左右端が Euler's elastica 曲線に一致するよう、強制変位を加える (図 6・中図)。この操作により、張力場膜要素には全面にわたり気球周方向のリンクルが発生することになる。したがって強制変位後のフィルムは周方向の力のみを伝達する構造要素として機能することになる。
- ③ ②で得られた形状におけるフィルム、および菱目ネットのロープが無歪み状態にあるものとして、所定の差圧を付加して気球の膨張形状を求める (図 6・最右図)。その際、周期対称性を考慮して下記の境界条件を与える。

**【境界条件】**

- x, y 方向固定 : ストリップの上辺および下辺
- z 方向固定 : 気球赤道部
- 内角一定の滑り境界条件 : ストリップの左右辺

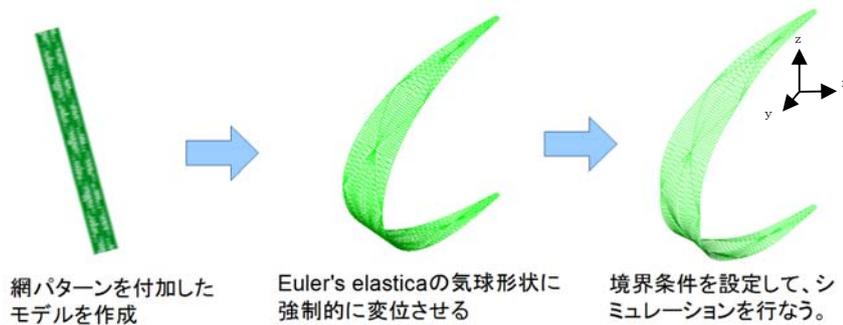


図 6: 膨張時形状算出の手順

解析時の諸元を表 1 に示す。菱目のパターンおよび、その他の諸元は試験気球 NPB001-1 に準じたものとなっている。なお、ロープおよびフィルムの弾性特性は、解析手順③の段階で適用した値である。また、表中の気球直径は、気球が完全軸対称な Euler's elastica の形状に変形した場合の値であり、解析結果で得られた直径は、諸元値とは異なる。両者の差異の検討が、本稿の主なる目的である。

表 1: 解析諸元

ロープ弾性率 (N)	$1.4 \times 10^4$
フィルム厚 ( $\mu\text{m}$ )	20
フィルムのヤング率 (GPa)	0.5
ポアソン比 (フィルム)	0.3
弁座部直径 (m)	0.25
気球直径 (m)	3.0
気球高さ (m)	1.79
菱目の数 (縦方向)	4

## 2. 4 解析結果

前項の手順に従って、菱目状ネットを被せた気球の膨張時形状を求めた結果を以下に述べる。本稿では、気球高さ、および赤道部最大半径に着目し (図 7)、差圧を変化させた場合の膨張時形状を調べた。図 8 に、その結果を示す。図 8 を見ると、気球高さは差圧の増加に伴って一様に増加しており、一方、気球最大半径は差圧の増加に伴って減少し、500[Pa]で最小値をとった後、増加に転じていることが分かる。気球最大半径の変化について、さらに考察するため、フィルム上のリンクルの有無を、差圧ごとに調べた。その結果、差圧が比較的小さい 100[Pa]においては、気球のほぼ全面にわたっ

てリンクルが発生しているが、差圧が大きくなるに従い、リンクル消失箇所が拡大していることが分かった。このことから、最大半径の変化については、以下のように考えることができる。差圧 100-500[Pa]の間は、差圧の増加に伴い、気球が扁平形状から球形状に近づく方向に変形しているため、最大半径が減少する。ところが、差圧が 500[Pa]を超えると、フィルム上のリンクルがほぼ消失し、フィルムが気球子午線方向に大きく弾性変形を始める。この弾性変形の影響により、最大半径の変化が減少から増加に転じるものと考えられる。以上が、気球最大半径の変化に対する定性的な説明となるが、より重要なことは、運用時の差圧 (100[Pa]程度) における膨張時形状と Euler's elastica との差異である。差圧 100[Pa]時における両者の差異を比較したところ、理想的な Euler's elastica の場合、気球最大半径が 1.495[m]となるのに対し、本研究で求めた菱目ネット気球の最大半径は 1.487[m]となった。気球赤道部の周長に換算すると、Euler's elastica の場合が 9.393[m]となるのに対し、菱目ネット気球の周長は 9.325[m]となる。したがって、菱目ネット気球のフィルムゴアを Euler's elastica に基づいて設計した場合、気球赤道部において約 6.8[cm]のフィルム余剰が生じることとなる。両者の差異は僅少であるが、本解析の結果は菱目ネット気球のゴアを設計する際、Euler's elastica から得られる設計形状に若干の修正を加える必要があることを示唆していると言える。

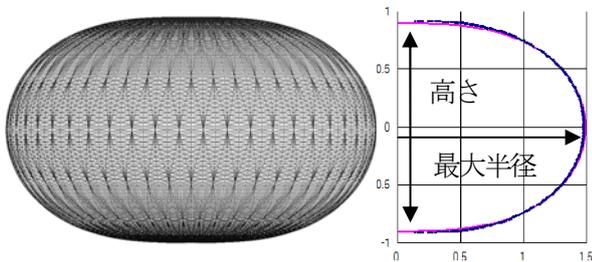


図 7: 気球高さと気球最大半径

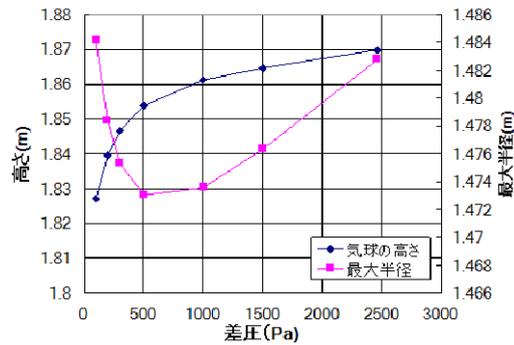


図 8: 気球高さと気球最大半径の変化

### 3. まとめ

本稿では菱目状ネットを被せた気球の膨張時形状を数値構造解析により求め、理想的な Euler's elastica との差異を定量比較した。その結果、直径 3[m]級の菱目ネット気球の場合、赤道部の周長は Euler's elastica よりも約 6.8[cm]短くなるということが分かった。本解析の結果は、菱目ネット気球のゴア形状を設計する際、Euler's elastica から得られる設計形状に若干の修正を加える必要があることを示唆している。しかしながら、解析モデルは比較的粗い有限要素メッシュを用いたものとなっており、両者の差異が菱目ネット気球の構造力学的な特性に起因するものであるかどうかは、さらなる詳細解析を行なって検証する必要があると思われる。また、実際の気球製作を鑑みた場合、膨張時形状はフィルムによる周方向の拘束に大きく依存するものと考えられる。今後は、詳細な有限要素モデルに基づいて、ゴアフィルムの形状と膨張時形状との関係を検証していく予定である。

### 参考文献

- [1] 福家英之, 他: スーパープレッシャー気球の開発, 平成 21 年度大気球シンポジウム, 2009.
- [2] H. Cathey, "Evolution of the NASA Ultra Long Duration Balloon," AIAA-Paper 2007-2615, 2007.
- [3] 福家英之, 他: スーパープレッシャー気球の展開試験, 平成 22 年度大気球シンポジウム, 2010.
- [4] 井筒直樹, 他: 俵型気球の飛行試験, 平成 22 年度大気球シンポジウム, 2010.
- [5] 佐々木誠, 中篠恭一: 俵型圧力気球の数値解析—応力分布および展開安定性—, 平成 22 年度大気球シンポジウム, 2010.
- [6] 斎藤芳隆, 他: はっさくのネット状の網をかぶたせたスーパープレッシャー気球の提案, 平成 22 年度大気球シンポジウム, 2010.
- [7] K. Nakashino, M.C.Natori, "Efficient Modification Scheme of Stress-Strain Tensor for Wrinkled Membranes," AIAA Journal, Vol.43, No.1, pp.206-215, 2005.