

# 高張力網を被せたパンプキン型気球の応力分布 ならびに展開性能に関する数値構造解析について

東海大学 : 中篠 恭一  
ISAS/JAXA: 齋藤 芳隆

## 1. はじめに

現在、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所(ISAS)では、長期間に渡る飛翔が可能な成層圏気球として、Lobed-pumpkin 型スーパープレッシャー(SP)気球 (図 1) の開発が進められているが、ゴア数を増やして同気球の大型化を行った場合、展開の完全性に対する問題の生じることが明らかとなっている。より具体的に言えば、満膨張時に対称形状に完全展開せず、斜めにくびれが入った状態で気球形状が安定化してしまい、所期の耐圧性能を達成できない、という問題である[1]。ISAS では、この問題を解消するため、俵型気球と呼ばれる新たなデザインの気球を開発し[2]、展開の完全性が達成されることを実試験により確認した。著者等も有限要素法を用いた数値構造解析により、Lobed-pumpkin 型 SP 気球には複数の座屈モードが存在し (図 2) 展開完全性の達成が困難であること、これに対して俵型気球は座屈モードの生じにくい構造となっており、Lobed-pumpkin 型 SP 気球に比べて、はるかに優れた展開完全性が得られることを確認し、実試験と整合する結果を得ている[3]。以上より、俵型気球は SP 気球における展開完全性の問題を解消するための一つの解であることが明らかとなっているが、これに対し齋藤等は、菱目の網を被せた新たな SP 気球のデザインを提案し[4]、直径 3m 級の小型気球(NPB001-1)の実証試験から始め、同デザインの気球を徐々に大型化させた一連の試験を行っており、現在は体積 3,000m<sup>3</sup>、耐圧性能 3,600Pa を有する気球の飛翔実験へ向けて開発を進めている。著者等は以前に、菱目の網を被せた SP 気球のプロトタイプモデルである NPB001-1 について、その膨張時形状を数値構造解析により求めて、通常の Lobed-pumpkin 型 SP 気球との差異について定量的に考察した[5]。本稿では、さらに同気球のフィルム応力分布や展開完全性の問題に関して数値構造解析を行い、また菱目のアスペクト比を変更した場合の影響についても解析を行ったので、その結果を報告する。

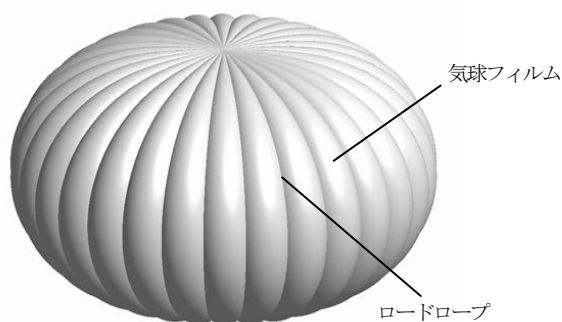


図 1: Lobed-pumpkin 型 SP 気球

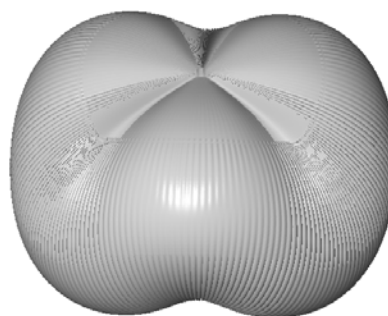


図 2: Lobed-pumpkin 型 SP 気球の座屈モードの例

## 2. NPB001-1 の数値構造解析

NPB001-1 は、菱目状ネットを固定したゴアフィルム 12 枚を溶着することにより製作されている。その外観を図 3 に示す。ゴア溶着後の気球は図 4 の菱目パターンが周方向に 48 回繰り返される構成となる。赤道部の菱目のアスペクト比 (図 4 の a/b) は 5.01 となる。NPB001-1 の主要設計諸元を表 1 に示す。



図 3: NPB001-1 外観

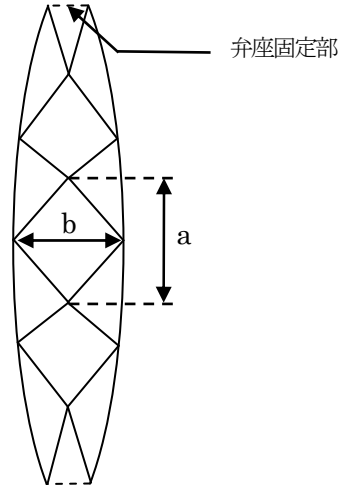


図 4: NPB001-1 菱目パターン

表 1: NPB001-1 の主要設計諸元

気球直径	2.99[m]
気球高さ	1.79[m]
フィルム種類	20 $\mu$ m 厚ポリエチレン
ネットを構成するロープの強度	1330[N]
公称容積	9.3 [m <sup>3</sup> ]
赤道部のロープ間隔	196 [mm]

斎藤等は同気球の破壊試験を行い、破壊時圧 2,460[Pa]との結果を得ている。また、その際の破壊箇所はフィルムの赤道部であった[4]。

この気球について、有限要素法に基づく数値構造解析を行った結果を図 5,6 に示す。図 5 は、差圧 800[Pa]時のフィルム応力(Mises 相当応力)のコンター図となっており、赤道部において最大の応力が発生していることが確認できる。このときの最大応力は、約 17.8[MPa]であった。図 6 は赤道部のフィルム応力について、周方向応力・子午線方向応力・Mises 応力の差圧に対する変化を示したものである。同図はフィルムを線形弾性体と仮定した場合の解析結果であるが、実際に使用された気球フィルムは、降伏応力が 22[MPa] (図 6 の破線部) 程度のもとなっている。したがって、Mises 応力がこの境界を超えた範囲の応力値は、実際の応力値を過大評価したものとなっている。一方、斎藤等は試験結果からフィルムの引張強度を 30[MPa]程度と推測しているが、破壊時圧 (2,460[Pa]、図 6 の赤線部) の Mises 応力は図 6 から 35[MPa]程度となっており、フィルムの降伏によって実際の応力がそれよりも低いものになっていることを考えると、NPB001-1 の破壊試験結果とほぼ整合する結果が得られていると言える。

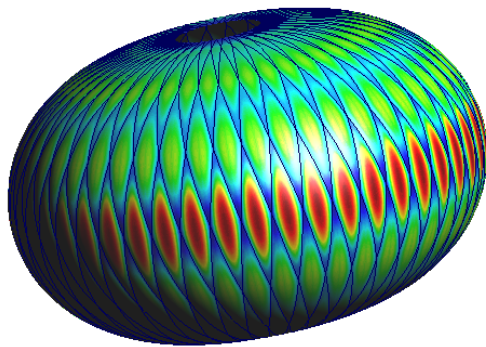


図 5: 差圧 800[Pa]時のフィルム応力分布

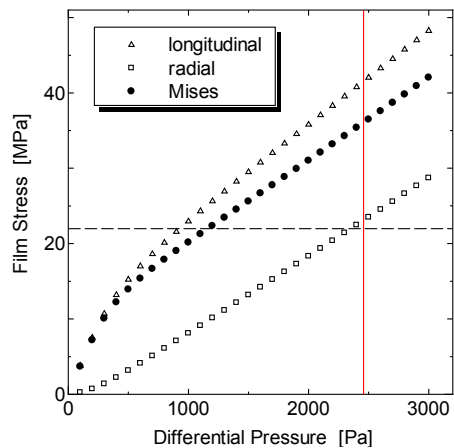


図 6: 差圧と赤道部フィルム応力

また、NPB001-1の展開完全性について検証するために行った固有値解析の結果を図7に示す。図中には代表的な低次のモードのみを示したが、全ての固有モードに対して正の固有値が得られており、本気球においてはLobed-pumpkin型SP気球に見られるような座屈モードが存在しないこと、すなわち展開完全性の問題が発生しないことが確認できる。

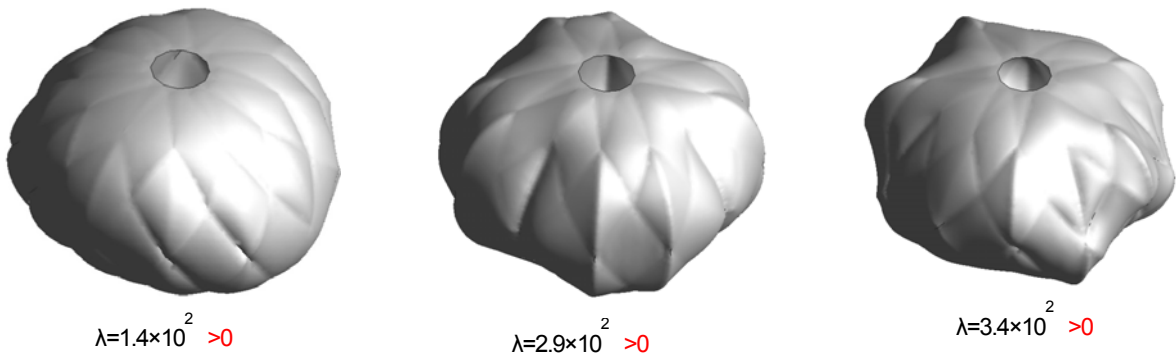


図7: 釣り合い時の固有モードと固有値

### 3. 菱目のアスペクト比が気球の構造特性に与える影響について

ここでは、菱目のアスペクト比が気球の構造特性に与える影響を調べるため、NPB001-1の気球半径・気球高さを同一に保ったまま、赤道部のローブ間隔(図4のb)を1/4にした場合の解析を行った。この場合の気球は、図4のパターンが周方向に192回(48×4回)繰り返される構成となり、アスペクト比a/bは4倍の約20.0となる。解析に際しては、気球全体での菱目状ネットの全剛性がNPB001-1と等しくなるよう、各ローブの軸剛性を1/4としている(したがって、ローブ強度も1/4の約332.5[N]となる)。解析の結果得られたフィルムの応力コンターを图8に示す。この場合もフィルム応力は赤道部で最大となったが、赤道部から離れた箇所にも同程度の応力が発生していることが確認できる。また、図6と同様に、赤道部フィルムの周方向応力・子午線方向応力・Mises 応力と差圧との関係を图9に示す。

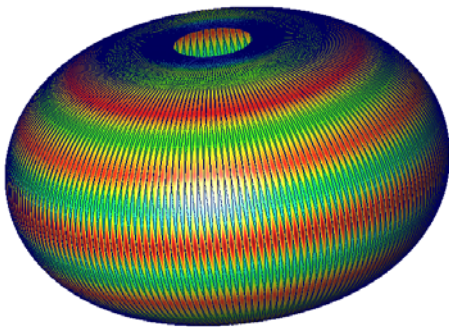


図8: 差圧800[Pa]時のフィルム応力分布

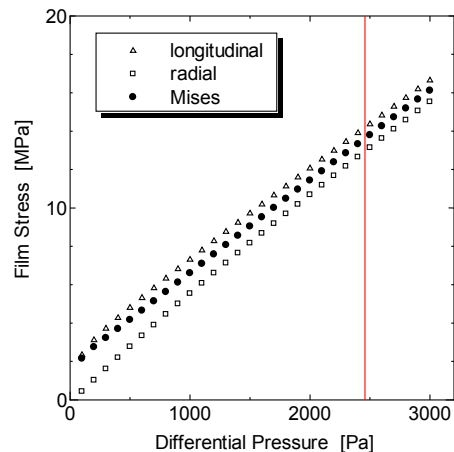


図9: 差圧と赤道部フィルム応力

図6と図9を比較すると、アスペクト比を4倍にした場合、フィルム応力は半分以下の値となり、また周方向応力と子午線方向応力との間の差異が殆ど無くなっていることが分かる。図6と図9の間の差異について、さらに考察を進めるため差圧800[Pa]印加時の両者の断面形状を比較した。その結果を図10に示す。図中、青の曲線がNPB001-1の断面形状であり、赤の曲線がアスペクト比を4倍にしたモデルの断面形状に対応している。また、参考のため同図中にTaylor's curveも併せて示した。同図から、NPB001-1の断面形状はTaylor's curveよりも僅かに高さ方向に膨らんでおり、アスペクト比を4倍としたモデルでは、断面形状がTaylor's curveに近づいていることが確認できる。

以上に示した結果から、アスペクト比の影響について以下のように説明することができる。

### 1) 周方向と子午線方向との応力比について

NPB001-1 では周方向と子午線方向とのフィルム応力に倍程度の違いがある。このときの膨張時形状は Taylor's curve よりも高さ方向に僅かに膨らんだ形となっているが、その結果として赤道部半径が若干小さくなり、赤道部のフィルムには周方向に余剰が発生する。この余剰により赤道部にバルジ（フィルムの膨らみ）が形成され、子午線方向の曲率半径よりも周方向の曲率半径の方が小さくなる。よって、周方向の応力は子午線方向の応力よりも小さくなる。一方、アスペクト比を4倍にしたモデルでは、この周方向のフィルム余剰がほとんど無くなるため、フィルムの周方向応力を低減させる効果がほとんど無くなる。

### 2) 図6と図9のフィルム応力の違いについて

アスペクト比を4倍にしたモデルの断面形状は Taylor's curve に、より近づいている。Taylor's curve は、その定義から気球差圧を子午線方向の力のみで負担した場合の形状となっており、Lobed-pumpkin 型 SP 気球のロードロープの変形形状にはほぼ等しい。一方、アスペクト比を大きくしていくと、菱目ネットは子午線方向とほぼ同一方向に配向されることとなり、Lobed-pumpkin 型と同様、菱目ロープが差圧の殆どを負担することとなる。ロープが負担していない残りの力をフィルムが負担する形となるため、結果として同一差圧におけるフィルム応力はアスペクト比を上げると小さくなる。以上の考察を敷衍すると、NPB001-1 に比べ、アスペクト比を大きくしたモデルでは菱目ロープの総軸力が大きくなっていることになる。そこで気球を赤道部で切断したとして、その断面状に表れる菱目ロープの総軸力を算出したところ、NPB001-1 では（ロープ一本の軸力 26.0[N]）×（ロープ本数 96）= 約 2,500[N]となるのに対し、アスペクト比を大きくしたモデルでは（ロープ一本の軸力 11.4[N]）×（ロープ本数 384）= 約 4,400[N]となっており、上記の考察を裏付ける結果が得られている。アスペクト比を上げたモデルでも、ロープ一本の軸力はロープ強度（約 332.5[N]）を大幅に下回っており、構造強度上は feasible な解となっている。なお、紙面の都合から割愛したが、アスペクト比を上げたモデルに対して固有値解析を行ったところ、同モデルでも座屈モードが存在しないことを確認している。

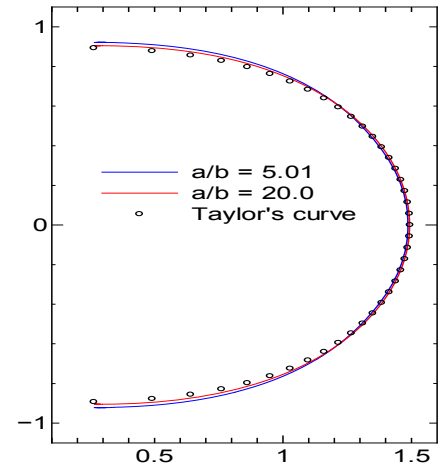


図 10: 断面形状の比較

## まとめ

本研究では、NPB001-1 を対象とした数値構造解析を行い、定性的に実試験と整合する結果を得た。また、菱目のアスペクト比を変更した場合の影響について実モデル（NPB001-1）との比較を行い、両者の差異を定性的に考察した。

## 謝辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究(A)「皮膜に網をかぶせた長時間飛行用スーパープレッシャー気球の開発」（課題番号 24246138）を受けて行ったものです。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 中籾恭一、”スーパープレッシャー気球の安定性解析 “ JAXA-RR-10-013、 2011.
- [4] 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.
- [5] 中籾恭一、他、”中籾恭一、”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” 平成 23 年度大気球シンポジウム、2011