

皮膜に網をかぶせたスーパープレッシャー気球の 力学的特性に関する数値構造解析

中村 聡^{*1} 中篠 恭一^{*2} 斎藤 芳隆^{*3}

Numerical Study on Structural Characteristics of Superpressure Balloon with Diamond-Shaped Net

by

Satoshi NAKAMURA^{*1}, Kyoichi NAKASHINO^{*2} and Yoshitaka SAITO^{*3}

(Received on Apr. 5, 2017 and accepted on May 11, 2017)

Abstract

Compared to conventional zero-pressure balloons, the ‘lobed-pumpkin’ type superpressure balloon requires a heavy structural weight, reducing payload weight that can be carried. To improve this limited capacity, we have been developing a novel type of superpressure balloon in which the envelope is covered with a diamond-shaped net. For this type of balloon, the gross weight of the balloon film is largely reduced, because the film stress is relaxed due to the covering net. The present paper discusses the structural characteristics of the proposed superpressure balloon based on the finite element method. Topics include the inflated shape of the balloon, tensile force distributions of the covering net and the stability characteristics of the balloon, evaluated through eigenvalue analysis of the finite element model. It was found that the stability of the proposed superpressure balloon is largely influenced by the geometry of the covering net. The results suggest that the use of an appropriate geometrical pattern for the net will effectively improve the stability of the balloon.

Keywords: Superpressure balloon, Finite element method, Buckling analysis

1. 序

科学観測用の成層圏気球として従来から使用されているゼロプレッシャー気球(ZPB)は、気球フィルムに発生する応力を緩和するため気球底部に排気口を持った構造となっている。そのため、昼夜の温度変化により浮力が低下するという特徴があり、浮遊高度を保つためバラストを投下する必要がある。このことから、観測機器をはじめとする気球への搭載機器の重量が制限され、また長期間の浮遊も困難となる。

これに対し、スーパープレッシャー気球(SPB)は、排気口を持たない構造となっており、気球内部の空気を密閉して浮力の低下を抑えるため、バラストの投下を必要としない。したがって長期間の浮遊が可能となり、ZPBとは異なる新たな成層圏飛行システムとして注目されている。SPBの実用化にあたっては、高い耐圧性能をいかに達成するか、という点が大きな開発課題とされていたが、3次元ゴア設計法に基づくLobed-pumpkin型SPBが提案され、その有効性が確認されて以降、同型のSPBの研究開発が国内外で盛んに行われるようになった^{1,2)}。

Lobed-pumpkin型SPBに関しては、多くの地上試験・飛行試験が行われているが、その過程でゴア数が非常に多い場合に気球が所期の対称形状に展開しない、という展開性の問題が新たに浮上してきた。具体的には、気球形状が本来の対称性を失った状態で安定化してしまい、気球表面にS字状の折り目(S-Cleft)が発生してしまう事例などが報告されている²⁾。これに対しNASAでは、気球フィルムのゴア設計に着目し、ゴアに発生する膨らみ(バルジ)を無くすFlat Facet Designを採用することで、SPBの展開安定性を向上させることに成功した³⁾。さらに2016年には、体積532,200 m³のSPBのフライト試験を実施し、47日にもおよぶ長期間飛行を成功させた。これらの成果からLobed-pumpkin型SPBは現在、実用段階の一手手前まで来ているといえる。しかし、Lobed-pumpkin型SPBには、必要耐圧を確保するためにフィルム重量が増加し、そのため搭載可能なペイロード重量が制約されてしまうという問題がある⁴⁾。

一方、国内ではISAS/JAXAにおいてZPBと同程度の体積/重量比で長時間飛行を可能にするSPBの開発が進められている^{4),5)}。同SPBは、膜厚10 μm程度の薄いポリエチレンフィルムに高張力繊維でできた菱形の目の網を被せることで耐圧性能の向上を図っており、従来のSPBのようにフィルム重量が増加することがない。ISAS

*1 工学研究科航空宇宙学専攻修士課程

*2 工学研究科航空宇宙学専攻准教授

*3 宇宙航空研究開発機構准教授

は 2010 年に小型気球を用いた地上膨張試験で基本構造デザインの有効性を確認し、以後は順次大型化を進め、2012 年には体積 $3,000 \text{ m}^3$ の SPB の飛翔試験を実施し 25 分間にわたるレベルフライトを成功させた。その後もさらなる大型化へ向けて、体積 $5,000 \text{ m}^3$ の気球の地上膨張試験等を実施しているが、これらの試験においては気球が予想耐圧を下回る差圧で破壊する事象や、気球極部が歪みながら膨張する事象等が確認されている(Fig. 1)⁵⁾。

本研究では、同気球の基本的な構造特性を調査するため、気球を構成する網目に注目して有限要素解析を実施した。本稿では、網目の応力解析結果、ならびに気球形状の安定性評価のために行った固有値解析結果について報告する。



Fig. 1 Non-uniform deformation of balloon near the polar part.

2. 気球の構成

本研究で解析対象としている SPB の構成について説明する。同気球は、Fig. 2 の最右部に示したゴアをゴア境界部で互いに接合することにより構成される。この気球ゴアは、Fig. 2 の最左部に示した形状のフィルムに上から菱目状の網を被せたものとなっている。フィルムと網はゴア境界上の所定箇所で固定されており、それ以外の

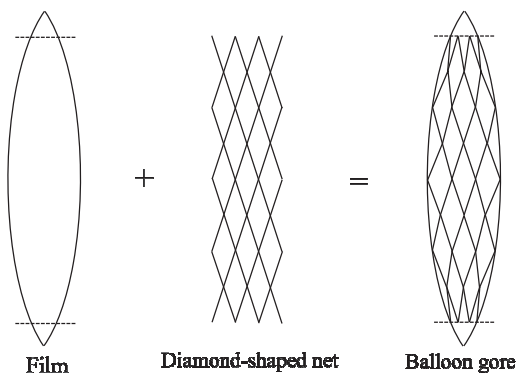


Fig. 2 Balloon film and covering net.

箇所では網目がフィルム上に自由にすべることができるような構造である。

気球膨張時は、網の張力が差圧をほぼ負担するかたちとなり、フィルムにはわずかな応力しか発生しない。そのため従来の Lobed-pumpkin 型 SPB に比べフィルム重量を抑えることが可能である。

以上から明らかな通り、本気球では菱目状の網が一次構造部材として機能する。気球フィルムも構造要素としての役割をもっているが、本気球のフィルムは膜厚 $10 \mu\text{m}$ のポリエチレンフィルムであり、網目に使用している高強度のポリアリレート系繊維に比べれば、その剛性は極めて小さい。そこで本研究では、フィルム剛性の寄与を無視し、網目部のみを有限要素でモデル化して構造解析を行った。

3. 解析モデル

有限要素解析を行う際に採用した網目部のモデル化を Fig. 3 に示す。有限要素としてモデル化したのは網目部のみであり、網目を構成する各ロープを 2 節点のケーブル要素によって表現した。菱目内のフィルムには面積に比例した分布圧力が作用する。そこで菱目を上下に三角形で分割し、それぞれの三角形に作用する分布圧力を等価節点力としてケーブル要素の各節点に分配し差圧の影響を考慮した。Fig. 3 には上部三角形に作用する分布圧力の分配法が示してある。下部三角形についても同様に扱った。

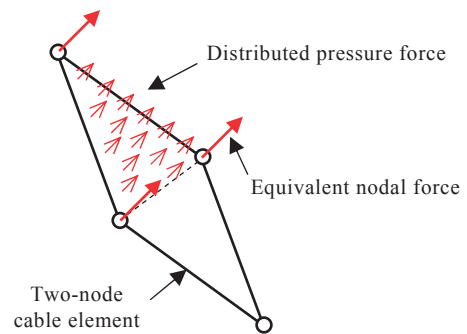


Fig. 3 Finite element model of diamond-shaped net.

有限要素解析の際に適用した境界条件を Fig. 4 に示す。気球ゴアは上部と下部において弁座と呼ばれる円盤状の金属部材に接合されている。この固定条件を表現するため、気球ゴア下部の弁座接合部に関しては完全固定とし、上部の弁座接合部は Fig. 4 の X, Y 自由度のみを完全固定とし、Z 自由度を開放している。

以上のように上部接合部の節点は Z 方向に自由度を持っているが、金属部材に接合していることを考え、MFC(Multi-degrees of Freedom Constraint)型の拘束条件を適用している。この拘束条件は、上部弁座の Z 変位が等しくなるような拘束条件である。Fig. 5 に MFC 型の拘束

条件を図解した。

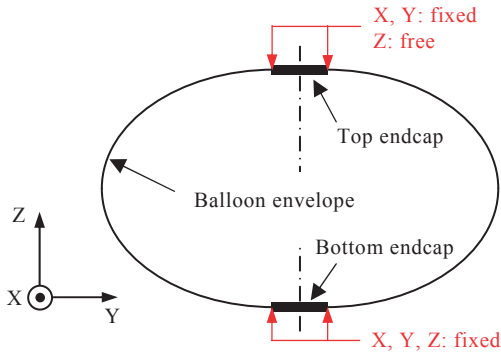


Fig. 4 Boundary conditions of balloon model.

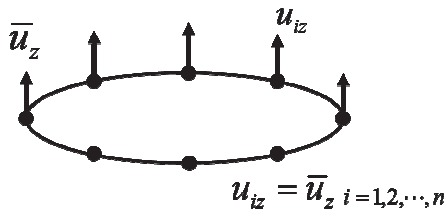


Fig. 5 MFC on nodes along top endcap boundary.

Table 1 Properties of model balloons.

Balloon name	NPB01-2	NPB1-1	NPB3-1
Volume [m ³]	106	593	3,000
Diameter of balloon [m]	6.76	12.0	20.6
Number of gores	12	16	30
Film thickness [μm]	10	10	10
Mesh size of net [mm]	101	101	101
Distance of neighboring ropes at the equator [mm]	71	47	41
Number of ropes crossing the equatorial plane	600	1,600	3,000
Aspect ratio of diamond at the equator	0.38	0.24	0.22
Diameter of endcap [mm]	460	520	600

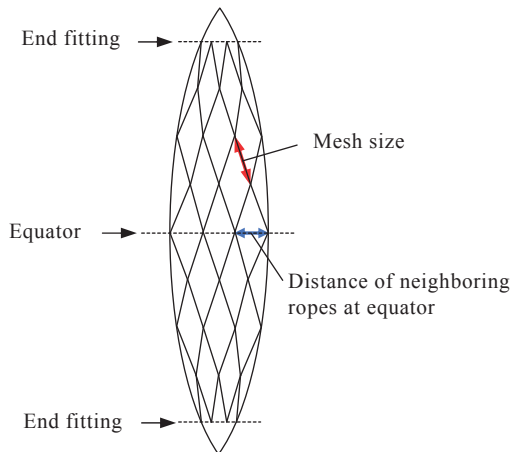


Fig. 6 Mesh size and distance of neighboring ropes at equator.

本研究では、実際に地上膨張試験に供された NPB01-2, NPB1-1, NPB3-1 の三種の試験気球を対象として有限要素解析を実施した。これらの気球の諸元を Table 1 にまとめた。表中、網交点間隔とは菱目を構成する各ケーブルの長さを指しており、これは Fig. 6 に示した赤矢印部の長さに対応している。また赤道ロープ間隔とは、気球赤道面における周方向のケーブル交点間隔の事であり、Fig. 6 の青矢印部の長さに対応している。

4. 解析結果

4.1 網線の軸力分布

本項では、差圧を印加した際に発生する網線の軸力分布に関する解析結果を述べる。有限要素解析は、前項でふれた NPB01-2, NPB1-1, NPB3-1 の三種の試験気球すべてについて行っているが、いずれの気球においても同様の傾向が確認されたので、ここでは NPB01-2 を例として解析結果を報告する。

Fig. 7 は、NPB01-2 試験気球に差圧 100 Pa を作用させた場合の網線軸力分布をカラーコンター表示したものである。気球の赤道部に最大軸力が生じ、極部に近づくにつれ、軸力の値が低くなっていくことが確認できる。これは、両極部に近づくにつれ、菱目が縦方向に長くなり、網線が負担する軸力が減少するためである。ただし最大軸力と最小軸力との差は 12 % 程度であり、網線の軸力は気球全面にわたってほぼ均等に分布しているといえる。

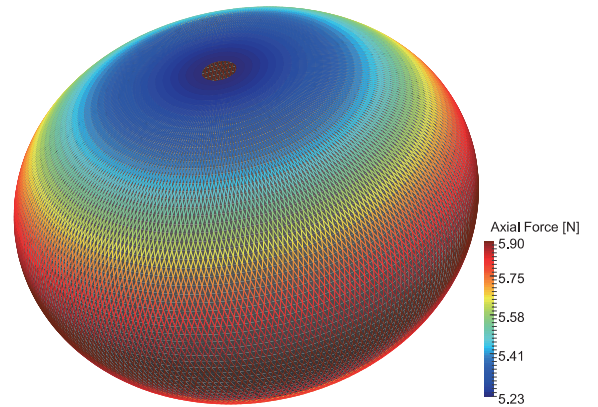


Fig. 7 Axial force distribution of NPB01-2 (100 Pa).

4.2 気球の膨張時形状

気球の膨張時形状に関しても NPB01-2, NPB1-1, NPB3-1 の三種の試験気球で同様の傾向が見られた。ここでは NPB1-1 試験気球を例として結果を報告する。Fig. 8 は差圧 100 Pa 時の NPB1-1 試験気球の膨張時断面形状を示したものである。同図には NPB1-1 気球の幾何形状に対応する Taylor 曲線も併せて示してある。Taylor 曲線とは、Fig. 9 に示すように、気球差圧を経線方向の力のみで負

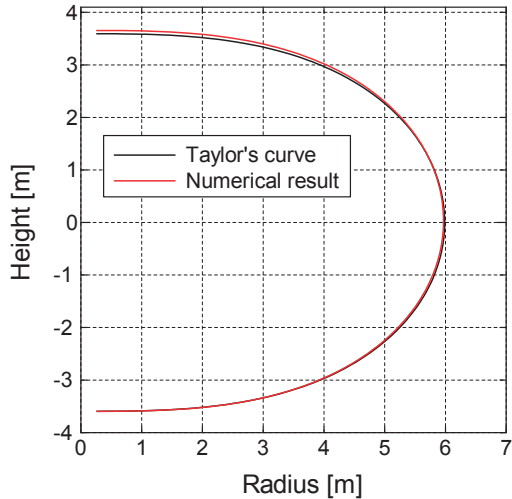


Fig 8. Taylor's curve and inflated shape of balloon (NPB1-1 100 Pa).

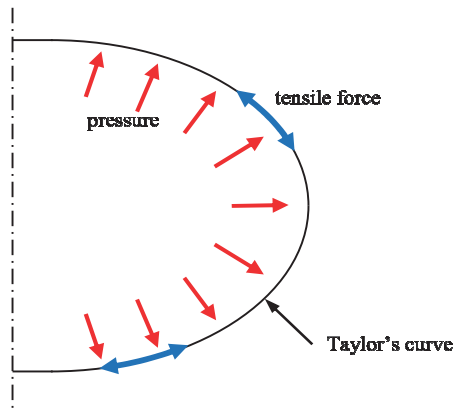


Fig. 9 Taylor's curve and internal pressure.

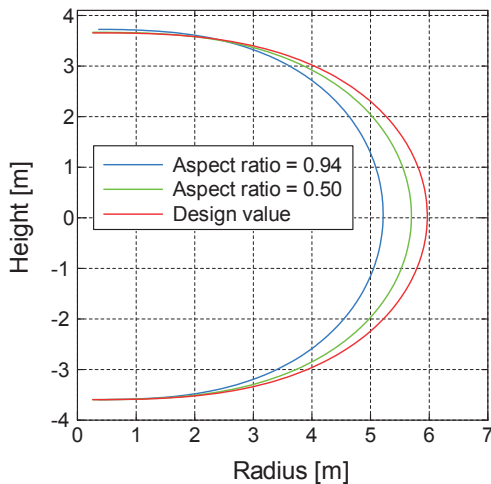


Fig. 10 Inflated shape of balloon.

担した場合に得られる釣合い形状である。両者を比較すると、NPB1-1 気球の断面形状は、対応する Taylor 曲線にほぼ近い形状となっていることが分かる。本解析で対象としている気球は、膨張時に菱目が経線方向に十分引き伸ばされた形状となるよう設計されている。よって網

線軸力は周方向よりも経線方向の成分が支配的となり、その結果、気球の内外差圧は経線方向の軸力成分によってほぼ負担されるかたちとなる。Fig. 8 において膨張時断面形状が対応する Taylor 曲線に極めて近い形状となっているのは、このためである。

ところで本気球では菱目状の網が一次構造部材として機能しており、そのため膨張時の形状は網目のコンフィグレーションによってほぼ決定されると考えられる(その他、わずかな影響として気球フィルムの剛性寄与がある)。そこで、網目のコンフィグレーションが気球全体形状に及ぼす影響を調査するため、菱目のアスペクト比を設計値から変更した場合の膨張時形状を有限要素解析によって算出した。具体的には、Fig. 6 で説明した網交点間隔を一定としたまま、赤道ロープ間隔を変更することで菱目のアスペクト比を変更した。菱目の形状は赤道部から極部に近づくにつれ縦長となるが、本稿では菱目のアスペクト比を表すパラメータとして、気球赤道部における菱目の「横方向長さ/縦方向長さ」を採用した。NPB1-1 気球において菱目のアスペクト比を設計値から変更した場合の膨張時断面形状を Fig. 10 に示す(差圧はいずれの場合も 100 Pa である)。

NPB1-1 の設計値のアスペクト比は 0.24 であり、赤道部においても菱目は十分縦長な形状となっている。このアスペクト比を 1 へ近づけていくと菱目は正方形へと近づくが、その結果として網線軸力の周方向成分の影響が無視できなくなってくる。Fig. 10 を見るとアスペクト比が 1 に近づくにつれ、断面形状が Taylor 曲線から球断面形状へと近づいていることが確認できる。

4.3 気球の安定性解析

Lobed-Pumpkin 型 SPB には S-Cleft に代表される展開不安定性の問題があるが、その原因は膨張時の気球が複数の座屈モードを有しているためであると考えられている。Lobed-Pumpkin 型 SPB の構造不安定性に関しては有限要素法を用いた詳細な研究がなされている^{6),7)}。

本研究で対象としている SPB は Lobed-Pumpkin 型 SPB とは基本的に全く異なった構造であるが、Fig. 1 で指摘したような膨張時の凹凸形状は何らかの座屈モードに関連している可能性がある。そこで、この観点から三種の試験気球のそれぞれについて有限要素法に基づいた安定性解析を行った。

安定性解析においては、はじめに膨張時の気球の釣合い形状を求め、その後に釣合い状態における接線剛性マトリクスの固有値を調べ、負値の固有値が含まれているか否かで座屈モードの有無を判別した。同時にサブスペース法を用いて接線剛性マトリクスの固有ベクトルを最低次から算出し、座屈モードの抽出を行った。ところで、本気球は Fig. 6 に示したように、赤道部から気球上端部へと近づくにしたがい、網目のアスペクト比が小さくなる構造となっている。安定性解析では、この効果も忠実に考慮した上で座屈モードの抽出を行っている。

なお、本研究では気球フィルムの剛性を完全に無視して安定性解析を行っている。座屈モードの有無に関しては、フィルム剛性の寄与が少なからぬ影響をもっている可能性があり、そのため以下に紹介するような不安定現象が実際の試験気球においても発現するかどうかは議論の余地があるところである。事実、三種の試験気球はいずれも地上試験ないしは飛翔試験において正常展開が確認されている。実試験では NPB1-1 に関してのみ、極部にわずかな凹凸変形が認められ、ここに座屈変形の可能性が示唆される程度である。

安定性解析の結果から得られた座屈モードの例を Fig. 11 に示す。同図は NPB1-1 試験気球について確認された座屈モードを 2 例示したものである。図に示すように、本気球の座屈モードは気球の周方向に周期的な凹凸が現れるような形状となっており、凹凸の数が異なる複数のモードが確認された。本稿では、この凹凸の数に応じて各座屈モードに名称を付すこととし、 n 個の凹凸が存在する座屈モードを mode n と呼称することにする。この命名法に従えば、Fig. 11 に示したモードは左図が mode 3、右図が mode 4 となる。また、同図から分かるように、これらのモードには凹凸形状が上下反対称になるという特徴がある。

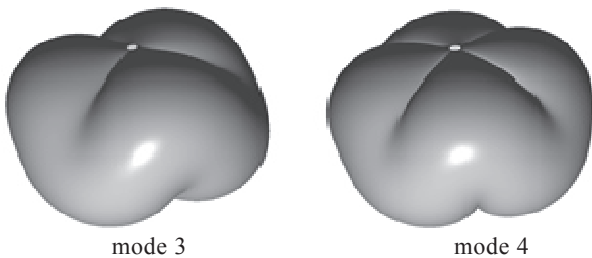


Fig. 11 Buckling modes of NPB1-1 (mode 3 and mode 4).

なお、これらのモードに対応する固有値は必ずしも常に負値をとるわけではなく、条件によっては固有値が正値となる安定モードとして発現することもある。安定性解析の結果、各固有モードは一般に差圧が大きくなるに従って座屈モードへと遷移する傾向のあることが確認された。ただし、各固有モードの固有値変化に関しては三種の試験気球でそれぞれ異なっていた。以下、各試験気球について安定性解析の結果を述べる。

(1) NPB01-2

NPB01-2 に関しては、1000 Pa までの差圧範囲で安定性解析を実施したが、この差圧範囲内では座屈モードが一切存在せず、Fig. 11 に示したような固有モードは全て安定モードとなった。NPB01-2 における各固有モードの固有値と差圧の関係を Fig. 12 に示す。mode 2, 3, 4, 5 の固有値は全ての差圧範囲で正値となっており、常に安定なモードであることがわかる。

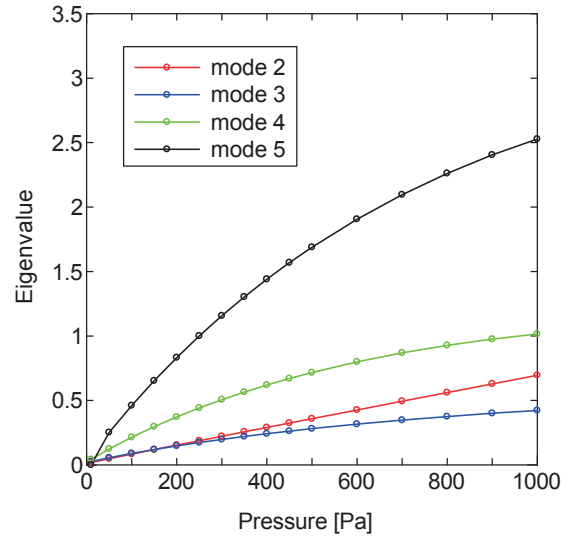


Fig. 12 Relation between eigenvalue and pressure (NPB01-2).

(2) NPB1-1

NPB01-2 と同じく周方向に凹凸が繰り返される固有モードが確認されたが、これらのうちいくつかのモードが座屈モードとして発現することが分かった。具体的には 500 Pa までの差圧範囲において、mode 3～mode 6 の総計 4 種のモードが座屈モードとしてあらわれた。Fig. 13 に NPB1-1 における各固有モードの固有値と差圧の関係を示す。mode 3, 4 の 2 モードは全ての差圧範囲で負値となっており、これらの固有モードは常に座屈モードとして存在していることがわかる。一方、mode 5, 6 の固有値は差圧の低い領域では正値となっており、その後差圧の上昇とともに 5, 6 の順で座屈モードへと移行することがわかる。

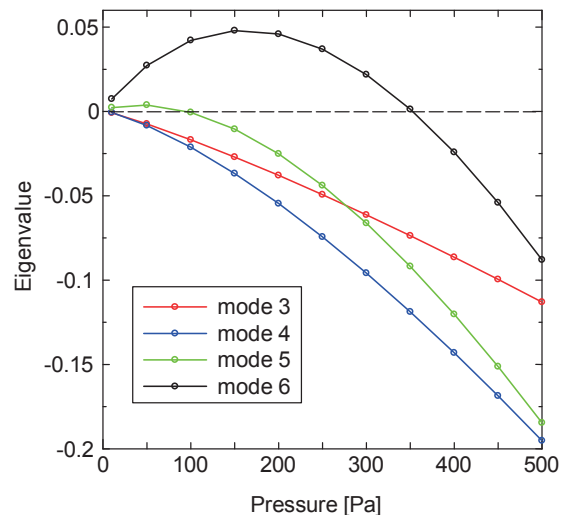


Fig. 13 Relation between eigenvalue and pressure (NPB1-1).

(3) NPB3-1

本気球でも同様に、周方向に周期的な凹凸が繰り返さ

れる固有モードが確認され、NPB1-1と同じく、一部固有モードが座屈モードとしてあらわれることが分かった。これらに加え、NPB3-1では新たな座屈モード群も確認された。これらのモードも周方向に周期的な凹凸が現れる形状となっていたが、凹凸の形状に関して上下で周期的なずれがない。このことから、これらは今までの座屈モードとは異なる、新たな座屈モードであると考えられる。本稿では、新たに確認された、周方向の凹凸が n 個であり上下で周期的なずれのない座屈モードを mode n' と呼称することとする。モード形状の一例として Fig. 14(a)に mode 9 を、Fig. 14(b)に mode 9' を示す。

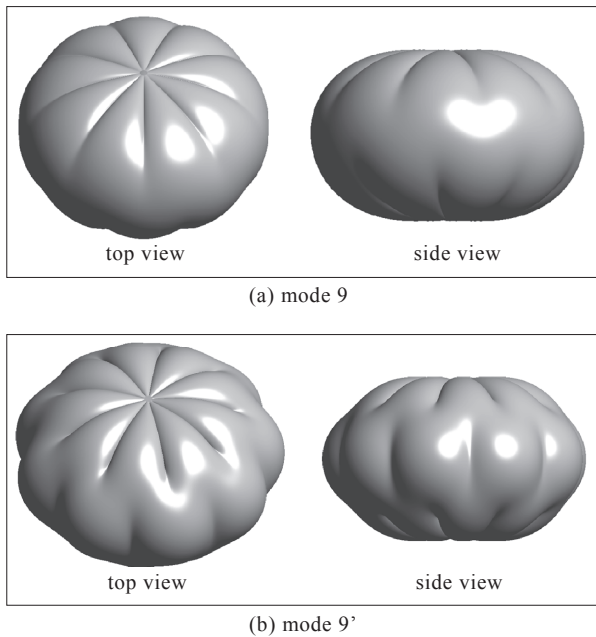


Fig. 14 Eigenmode of NPB3-1 (mode 9 and mode 9').

NPB3-1では、差圧 500 Pa において mode 3～mode 9 及び mode 8'～mode 12' の総計 12 の座屈モードが確認された。ここでは mode 3, 4, 5, 6 の固有値と差圧の関係を Fig. 15 に示す。Fig. 13 の固有値と比較すると、NPB1-1 の場

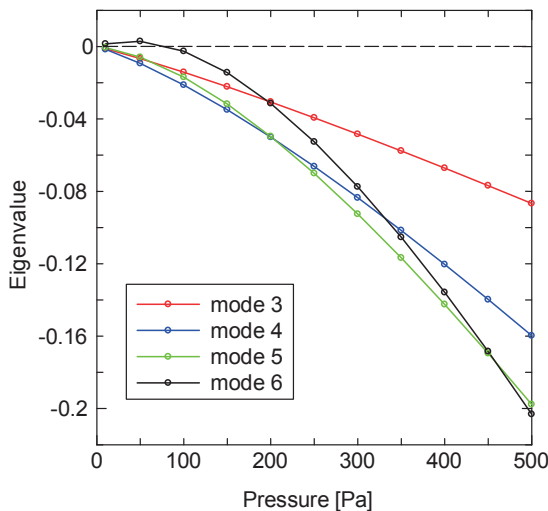


Fig. 15 Relation between eigenvalue and pressure (NPB3-1).

合は mode 3, 4 の 2 モードが差圧の全領域で座屈モードとなっていたのに対し、NPB3-1 では mode 3, 4 に加えて mode 5 も全差圧領域で座屈モードとなっている。また mode 6 に注目すると、NPB3-1 の方が負値をとる範囲が広く、より低い差圧値で座屈モードへと移行していることが分かる。これらの結果から、同じ差圧レンジで比較した場合、NPB1-1 と比べ、NPB3-1 の方が展開不安定性が増加していると推論される。

(4) ケーブル剛性の変化が展開性能に与える影響

気球の安定性に関するパラメトリックスタディとして、ケーブルの剛性値が展開性能に与える影響を考察した。Fig. 16 にケーブル剛性を変化させた際の mode 2～mode 6 の固有値変化を示す。同図は解析対象の気球を NPB1-1 として、差圧を 100 Pa に固定した場合の解析結果である。なお、本研究ではケーブル剛性を Young 率で評価するのではなく、Young 率に断面積を乗じた軸剛性により評価している。よって、ケーブル径の変化は軸剛性の変化として解析に反映される形となっている。

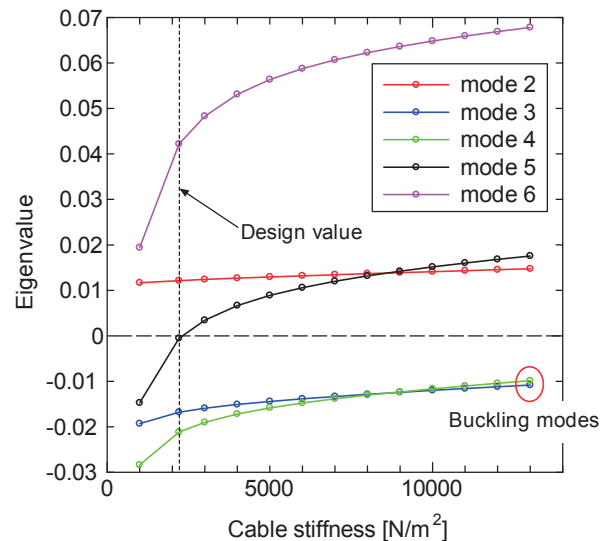


Fig. 16 Relation between eigenvalue and cable stiffness (NPB1-1 at 100 Pa).

本節(1)～(3)項に示した解析では、ケーブルの引張り試験の結果をもとに、ケーブル剛性の基準値として 2,210 N/m²を採用した。この剛性値を Fig. 16 中に Design として示した。Fig. 16 をみると、mode 2, 3 のようにケーブル剛性が変化しても固有値の変化があまりみられないモードと mode 5, 6 のようにケーブル剛性の値によって固有値が大きく変化するモードがあることが分かる。なお、軸剛性を変化させても各モードのモード形状に本質的な変化は現れなかった。

直感的には、本気球のように内圧で形状を維持する構造物の場合、安定性に大きな影響を及ぼすのは幾何剛性であり、材料剛性の影響はさほど大きくないと考えられる。しかしながら Fig. 16 の結果は、本気球においては幾何剛性のみならずケーブル剛性も展開安定性に大きな影

響を及ぼすことを示唆している．とはいえ，ケーブル剛性を7倍程度まで増加させた場合でも，全ての座屈モードが消失するわけではなく，ケーブルの高剛性化によって気球の展開性能を向上させることは困難であると言える．

(5) アスペクト比変化が展開性能に与える影響

本項では，三種の試験気球 NPB01-2, NPB1-1, NPB3-1 のそれぞれについて，赤道部の菱目のアスペクト比を設計値から変化させた場合，展開安定性にどのような影響があるかを考察する．Fig. 17 は，赤道部菱目のアスペクト比を変化させた際，各試験気球の座屈モード数がどのように変化するかをプロットしたものである．なお，同図は，差圧を 100 Pa に固定して解析を行った際の結果である．各試験気球の設計アスペクト比は，NPB01-2 で 0.38, NPB1-1 で 0.24, NPB3-1 で 0.22 であり，気球直径は NPB01-2 が 6.76 m, NPB1-1 が 12 m, NPB3-1 が 20.6 m となっている．Fig. 17 を見ると，いずれの試験気球においてもアスペクト比を高くすることにより座屈モード数が減少することが分かる．ただし，座屈モードの減少傾向は三種の気球で異なっており，同じアスペクト比でも気球サイズが大きい方が座屈モードの数も多い傾向がある．

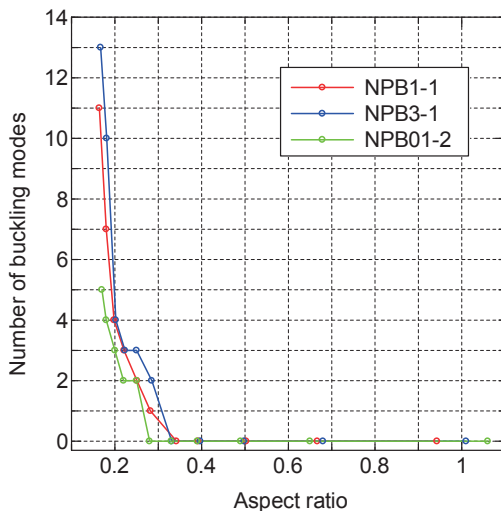


Fig. 17 Relation between number of buckling modes and aspect ratio (100 Pa).

前項の結果と比較すると，気球の安定性を向上させるうえでは，菱目のアスペクト比を増加させることが有効であり，いずれの試験気球においても十分な大きさのアスペクト比を採用することで座屈モードを完全に消失できることが分かる．

(6) スケール効果が展開性能に与える影響

三種の試験気球である，NPB01-2, NPB1-1, NPB3-1 のそれぞれについて，気球の全体寸法が展開安定性に対してどのような影響を与えるかを考察した．本項の解析では網目の細かさは一定のまま(すなわち Table 1 記載の網

交点間隔を 101mm に固定したまま)，気球寸法をスケール倍した際，座屈モード数にどのような変化が生じるかを調査した．なお，各試験気球の最大半径は NPB01-2 が 3.38 m, NPB1-1 が 6 m, NPB3-1 が 10.3 m となっている．本項の解析では，各試験気球をスケール倍し，最大半径が 3.3 m, 6 m, 10.3 m にほぼ一致するような気球モデルを新たに作成した．例えば NPB01-2 に関しては，網交点間隔を一定に保ったまま気球サイズを大きくして，最大半径が 6 m にほぼ一致するモデル，および最大半径が 10.3 m にほぼ一致するモデルの 2 モデルを新たに作成した．また，その際，気球弁座についても同様にスケール倍を行い，サイズを変更している

ところで前項の解析結果から，同一差圧で座屈モード数を比較した場合，気球サイズが大きくなるほど座屈モード数が増加すると予想される．そこで本項では試みに網線に発生する最大軸力が同程度となる差圧で，座屈モード数を比較してみた．得られた解析結果を Table 2 に示す．

青色で示した欄は，各試験気球の実際のサイズに対応しており，その他の欄はオリジナルの気球サイズをスケール倍したモデルとなっている．サイズごとに解析条件の差圧が異なっているが，これは前述の通り，網線に発生する最大軸力が同程度となるような解析条件で比較を行っているためである．Table 2 の結果から，各試験気球についてみると，気球サイズが変化してもケーブルが負担する最大軸力が同程度であれば，座屈モードの数はほぼ変わらず，展開安定性には影響がないことが分かる．なお，同一サイズの気球で比較すると，座屈モードの数が NPB01-2, NPB1-1, NPB3-1 の順で増加しているが，これは第一に前項(5)で述べたアスペクト比の影響であると考えられる．加えて，同一サイズの気球であっても弁座のサイズは各気球で異なっており，このことも座屈モード数の差異に影響を与えているものと思われる．

Table 2 Number of buckling modes for different balloon sizes.

	Balloon size					
	3.3 m		6 m		10.3 m	
	Pressure [Pa]	Number of buckling modes	Pressure [Pa]	Number of buckling modes	Pressure [Pa]	Number of buckling modes
NPB01-2	900	2	225	2	100	2
NPB1-1	955	6	289	5	100	5
NPB3-1	1111	7	278	7	100	7

(7) 網交点間隔が展開性能に与える影響

ここでは，三種の試験気球それぞれについて，気球サイズを一定にしたまま，網交点間隔を変化させた場合の座屈モード数について調査した．気球サイズは三種の気球全てを前項で作成した半径 10.3 m 級とし(したがって NPB3-1 以外はオリジナルの気球サイズではない)，NPB01-2 については，網目をさらに細かくしたモデルを，NPB1-1 と NPB3-1 については，逆に網目をさらに粗くしたモデルを作成した．各気球モデルについて得られた

座屈モード数を Table 3 に示す．差圧条件は全て 100 Pa となっている．

表中，reference は網交点間隔が基準値の 101 mm であるモデル，half は網交点間隔を半分にしたモデル，twice，quadruple はそれぞれ網交点間隔を 2 倍，4 倍にしたモデルに対応しており，表中では右側ほど網目の粗いモデルとなる．なお，NPB1-1 については，ケーブル長を 4 倍にした場合の解析も行ったが，軸対称の平衡解が見つからず座屈モード数を同定することができなかった．空欄部は，計算機資源の関係からメモリが不足し計算が実行できなかった解析条件に対応している．同表から，ケーブルの形成する網目が細かいほど座屈モードの数は減り，展開安定性が向上することが示唆される．

Table 3 Number of buckling modes for different mesh sizes.

	mesh size of net			
	half	reference	twice	quadruple
NPB01-2	1	2		
NPB1-1		5	8	
NPB3-1		7	9	20

5. まとめ

網を被せたスーパープレッシャー気球に関して，三種の試験気球 NPB01-2, NPB1-1, NPB3-1 を対象とした有限要素解析を行った．その結果，膨張時の網線軸力に関しては，気球全体においてほぼ均等に分布することが分かった．また，気球膨張時の断面形状については，赤道部菱目のアスペクト比を増加させ，その値を 1 に近づけると球断面形状へと近づき，逆にアスペクト比を減少させていくと Taylor 曲線へと近づくことが確認された．

固有値計算に基づく安定性解析の結果から，NPB01-2 は 1000 Pa までの差圧範囲で座屈モードが一切確認されず高い展開安定性をもつことが分かったが，これに対し NPB1-1 と NPB3-1 は全ての差圧範囲において何らかの座屈モードが存在することが確認された．

NPB1-1 気球に対して実施したパラメトリックスタディにおいては，ケーブル剛性を増加させた場合に座屈モード数が減少することが分かったが，一方でケーブル剛性を 7 倍程度まで増加させても全ての座屈モードを抑制することはできないことが確認された．これに対し，赤道部菱目のアスペクト比を高くする，定性的には菱形を正方形に近づけた場合は，座屈モード数が効果的に減少していき，気球サイズによって差異はあるものの，三種の試験気球全てにおいて，座屈モードを消失できることが分かった．

気球寸法のスケール効果に関する検証から，網交点間隔を一定として気球サイズを変更した場合，気球サイズが変化しても網線の軸力が同程度であれば，展開安定性はほぼ変わらないことが確認された．また，気球サイズ

を一定のまま，網交点間隔のみを変更した解析では，網目が細かいほど座屈モードの数が減少し，展開安定性が向上することを明らかにした．

ISAS では現在，試験気球の大型化が進められているが，目下使用している網交点間隔 101 mm の網を今後も採用すれば，結果として相対的に網目が細くなることになり，展開安定性の向上にとっては有利である．一方で，気球サイズが大型化した場合，低い差圧でも網線には大きな軸力が発生することとなるため，この点では展開安定性の向上に不利に働くものと考えられる．

なお，本稿の有限要素解析では気球フィルムの剛性を無視したモデル化を行っており，気球の展開安定性に関する上記傾向は，フィルム剛性を考慮した上で総合的に判断すべきと考えられる．事実，本稿で解析対象とした三種の試験気球は，いずれも実試験において正常展開が確認されている．今後は，気球フィルムの剛性を有限要素モデルに反映させ，詳細な安定性解析を実施する予定である．さらに実際のフライトを想定した場合，温度変化や外気圧変化の影響，風による変形等も考慮する必要がある．本研究における今後の課題となっている．

参考文献

- 1) 井筒直樹，矢島信之，太田茂雄，本田秀之，黒川治久，松島清穂：3 次元ゴアデザインによるスーパープレッシャー気球の開発，宇宙科学研究所報告 特集 40, pp.17-44 (2000).
- 2) H. M. Cathey Jr: The NASA super pressure balloon – A path to flight, Advances in Space Research, Vol. 44, No. 1, pp.23-38 (2009).
- 3) X., Deng, Clefted Equilibrium Shapes of Superpressure Balloon Structures, PhD thesis, California Institute of Technology, Division of Engineering and Applied Science (2012).
- 4) 斎藤芳隆，飯島一征，松坂幸彦，松嶋清穂，田中茂樹，梶原幸治，島津繁之：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タンデム気球の開発 I，宇宙研究開発機構研究開発報告，JAXA-RR-11-008, pp.1-16 (2012).
- 5) 斎藤芳隆，後藤健，山田和彦，中篠恭一，秋田大輔，松尾卓摩，川端昌也，田村啓補，大谷章夫，山田昇，松嶋清穂，田中茂樹，橋本紘幸，島津繁之：被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(NPB5-1a)，大気球シンポジウム，isas15-sbs-008 (2015).
- 6) M. Pagitz and S. Pellegrino: Buckling pressure of “pumpkin” balloons, International Journal of Solids and Structure, Vol.44, No.21, pp. 6963–6986 (2007).
- 7) 中篠恭一：スーパープレッシャー気球の安定性解析，宇宙航空研究開発機構研究開発報告，JAXA-RR-10-013, pp.41-49 (2011).