

## 皮膜に網をかぶせたスーパープレッシャー気球の構造特性

東海大学工学部	:	中篠 恭一
ISAS/JAXA	:	斎藤 芳隆, 後藤 健
東京工業大学院理工学研究科	:	秋田 大輔
明治大学理工学部	:	松尾 卓摩
藤倉航装株式会社	:	松島 清穂, 橋本 紘幸
ナカダ産業株式会社	:	島津 繁之

### 1 はじめに

現在,我々は数ヶ月程度の長期間にわたって飛翔可能なスーパープレッシャー気球(SP気球)の開発を進めている。本気球は薄いフィルム製の気球皮膜に高張力繊維で構成された菱目状の網を被せた構成となっており,2010年4月に製作された3m級の試作気球から始めて順次大型化を図るかたちで開発を進めてきた<sup>[1]</sup>。2012年にはゼロプレッシャー気球とのタンデム飛翔により体積3,000m<sup>3</sup>級のSP気球の飛翔試験を実施し,現在は7,000m<sup>3</sup>級のSP気球の製作を終え,飛翔試験の機会を模索している。

本SP気球は,気球フィルムに外側からかぶせた菱目状の網が一次構造部材として機能し,気球差圧を保持する構造となっている。そのためフィルムに発生する応力を極力抑えることが可能であり,結果として薄く軽いフィルムを用いて高い耐圧性能を実現することができる。フィルム応力を小さくするためには,同時に菱目間に生成されるバルジの曲率半径を小さくする必要があるが,本気球にかぶせる網の菱目寸法は十分に小さいため,僅かなフィルム余剰で小さなバルジ曲率半径を実現できる。SP気球の展開安定性の観点からは,フィルム余剰を出来得る限り抑えることが望ましい。例えば,Lobed-Pumpkin型と呼ばれるSP気球では,フィルム余剰がある閾値を越えると展開不安定性が発現することが確認されており,このような場合,気球表面にはS-Creftと呼ばれる深い折り目が発生し,気球は非対称形状に膨張することが実験的にも明らかとなっている。

以上の点から,本SP気球は展開安定性に関しても優位性をもっていると考えられていたが,現在までに実施された地上膨張試験においては,一部試験気球において展開不良が確認されており,これには何らかの座屈現象が介在していると考えられる。本研究では,菱目に網をかぶせたSP気球の展開安定性に関して,有限要素法により調査を行ったので,その結果を報告する。

### 2 菱目に網をかぶせたSP気球の基本構造特性

本研究で提案・開発されているSP気球はIsotensoid(Taylor曲線の回転体)を近似するゴアフィルムに,菱目状の網目を被せることで構成される。図1にNASAを中心に開発が進められているLobed-pumpkin型SP気球と対照する形で本SP気球の概念図を示した。Lobed-pumpkin型SP気球では,高張力ロープを気球経線方向に配置し,膨張時にはロープ間からフィルムがバルジ状に張り出す構成となっている。各ロープに生じる張力は基本的に経線方向成分のみとなる。一方,本SP気球では図1(b)に示すように,気球皮膜全体に菱目状の網をかぶせた構成となっている。このため,各網線には経線方向の張力成分に加え周方向の張力成分も発生する。この構成の気球は,図2に示すようにゴアフィルムに菱目状の網をかぶせ,網目形状をゴア境界に添わせたうえでゴア同士を溶着することで得られる。膨張時に形成される菱目形状は,網の交点間隔や気球赤道部を横切る網の本数を調整することで変更可能である。例えば,赤道部を横切る網の本数を2倍にすると,膨張時に形成される赤道部菱目の周方向長さは1/2となり,縦長の菱目が得られる。なお,図2から明らかのように,菱目の周方向長さは赤道部から極部に向かうにつれて次第に短くなり極部ほど縦長な菱目となる。気球表面に形成される菱目形状は,気球の膨張時形状ならびに気球の展開安定性に大きな影響を与えるパラメータであり,本項では赤道部菱目のアスペクト比を次式で定義し,以降 $A_d$ として参照する。

$$A_d = \frac{\text{赤道部菱目の周方向長さ}}{\text{赤道部菱目の経線方向長さ}} \quad (1)$$

上記のアスペクト比 $A_d$ の値が小さいほど、赤道部に形成される菱目は縦長形状となる。

先に述べた通り、本 SP 気球ではフィルムに被せた網が一次構造部材として機能し差圧を保持する。一方、アスペクト比 $A_d$ の値が小さいと、網目に発生する張力は経線方向成分が支配的となり、気球差圧は主に経線方向の張力によって保持されることになる。気球差圧を経線方向のみの張力で保持する場合に得られる膨張時形状は Isotensoid として知られており、このことからアスペクト比 $A_d$ の値が小さい場合、本 SP 気球は Isotensoid に近い形状に膨張し、逆に $A_d$ の値が大きい場合は網目張力の周方向成分が無視できなくなり、膨張時形状は Isotensoid から離れて球形状に近づいていくものと考えられる。赤道部菱目のアスペクト比 $A_d$ が、本 SP 気球の膨張時形状に与える影響に関しては著者等による有限要素解析の結果を既に報告しており、上記の予測を裏付ける結果が得られている<sup>2)</sup>。

次に、アスペクト比 $A_d$ の影響を Lobed-pumpkin 型 SP 気球との対照から考えてみる。 $A_d$ の値が小さい場合、上記から網目に発生する張力は経線方向成分が支配的となるが、このときの張力分担構造は Lobed-pumpkin 型 SP 気球と類似のものになると考えられる。本 SP 気球では網目が気球の全表面を覆っている点で Lobed-pumpkin 型と異なるが、本 SP 気球で $A_d$ の値を小さくとした場合と、Lobed-pumpkin 型 SP 気球で高張力ロープの本数を増加させた場合を比較すると、両者はいずれも張力部材が気球経線方向の力を負担する構造となり、類似の張力分担構造となる。この考察を敷衍すると、本 SP 気球においてもアスペクト比 $A_d$ の値がある一定値を下回ると Lobed-pumpkin 型 SP 気球と類似の展開不安定性が発現する可能性が考えられる。次節以降では、この観点から本 SP 気球の展開安定性に関して、有限要素解析を通じて考察する。

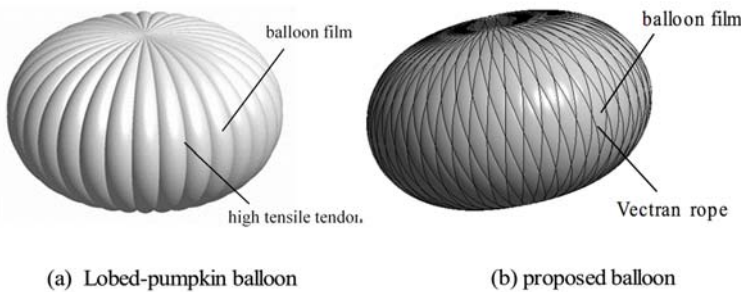


図 1. Lobed-pumpkin 型 SP 気球と本 SP 気球の概念図

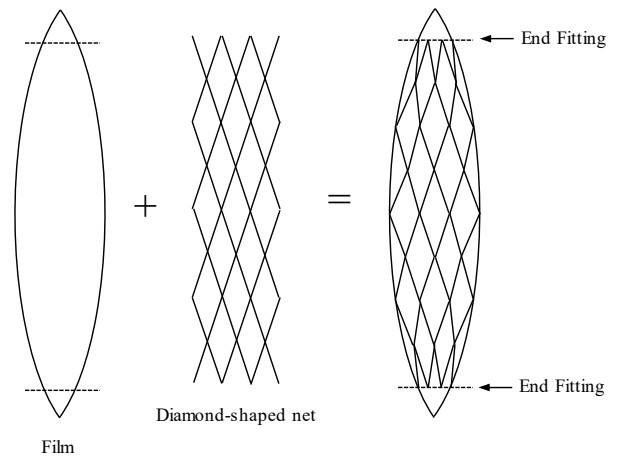


図 2. 本 SP 気球の構成法

### 3 菱目に網をかぶせた SP 気球の展開安定性

本節では、表 1 に示す各試験気球に関して、有限要素解析を通じて行った展開安定性の評価結果について報告する。これらの気球はいずれも地上膨張試験ないしはフライト試験に供された試験気球であり、唯一 NPB01-1 型気球についてのみ展開不安定性が確認されている(図 3)。表 1 から分かるように、NPB01-1 型気球では他の試験気球と比べ極端に小さいアスペクト比が採用されている。

有限要素解析では、本 SP 気球の網目部のみをケーブル要素でモデル化し、気球差圧については各菱目部に作用する圧力を隣接するケーブル要素の節点に配分することで表現した(図 4)。本来、菱目部にはフィルムがバルジ状に張り出しており、フィルムによって付与される幾何剛性が気球全体の構造特性に影響を与えることは明らかである。しかしながら、本 SP 気球では網目が気球フィルム上を自由に滑ることができるような構造となっており(ただし、網目の一部結節点はフィルムに固定されている)、このためフィルムと網目の複合構造を直接取り扱うには大規模接触問題を解く必要があり現実的でない。そのため、本稿で報告する有限要素解析では気球フィルム部は有限要素モデルに組み入

れず、網目部のみをモデル化して解析を行った。

表 1. 各試験気球の諸元

Balloon name	NPB01-1	NPB01-2	NPB1-1	NPB3-1
Volume [m <sup>3</sup> ]	106	106	593	3,000
Diameter of balloon [m]	6.75	6.76	12.0	20.6
Number of gores	12	12	16	30
Film thickness [ $\mu$ m]	10	10	10	10
Mesh size of net [mm]	320	100	100	100
Distance of neighboring ropes at the equator [mm]	49	71	47	41
Diameter of endcap [mm]	530	460	520	600
Full Deployment	fail	success	success	success
Design value of $A_d$ at the equator	0.077	0.380	0.242	0.220



図 3. NPB01-1 試験気球で確認された展開不安定性

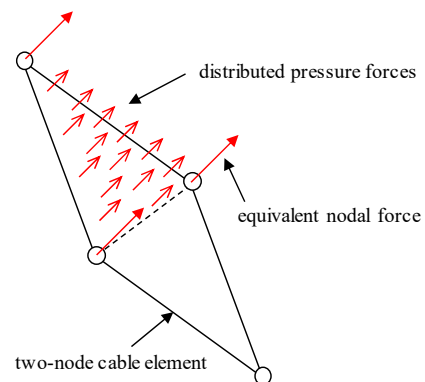
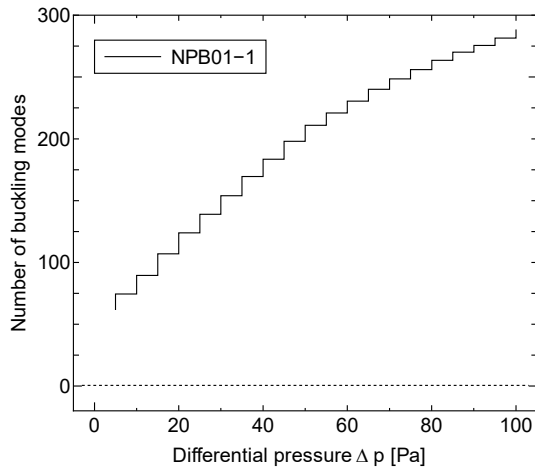


図 4. 気球差圧のモデル化

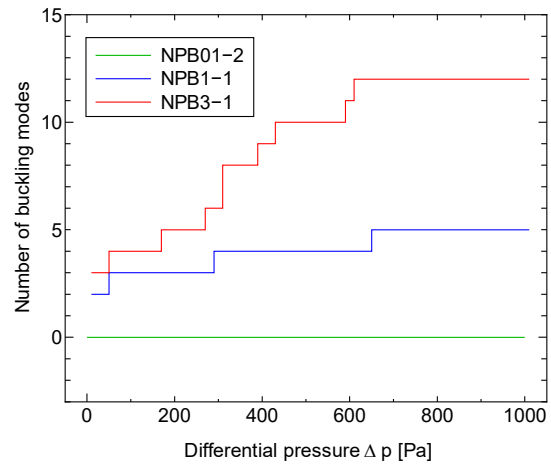
気球の展開安定性の評価は、下記の手順に基づき行った。

1. はじめに一定差圧下における膨張時の気球形状を算出する。上に述べたモデル化の結果、この際に得られる気球形状は、差圧を網目の張力のみで保持した場合の形状となる(すなわち、気球フィルムのもつ材料剛性と幾何剛性は考慮されていない)。ただし網目は一次構造部材として機能するため、ここで算出される膨張時形状はよい近似になっているものと考えられる。
2. 続いて、求めた気球膨張形状に対応する接線剛性マトリクス固有値を算出する。このとき、負値の固有値が含まれている場合は膨張時の状態において座屈モードが存在することになる。したがって、その気球は 1 で定めた差圧下において展開不安定性を有すると判断した。

上記の手順に従い、各試験気球の安定性評価を行った結果を図 5 に示す。図 5 で横軸は気球差圧を表しており、縦軸は各差圧下において確認された座屈モード数を表している。同図から分かるように、今回解析の対象とした四種の試験気球中、差圧によらず安定であると判断された気球は NPB01-2 試験気球のみであるという結果となった。不安定と判別された気球のうち、NPB01-1 気球に関しては特に多数の座屈モードが確認され、この点は図 3 に示した地上膨張試験の結果と整合している。しかしながら、同じく不安定と判別された NPB1-1 ならびに NPB3-1 気球は、それぞれ地上膨張試験、フライト試験で正常展開が確認されており、有限要素解析の結果と整合しない。先に述べた通り本研究の有限要素モデルでは気球フィルムの影響を考慮しておらず、このため図 5 に示した結果は、気球の展開安定性を過小評価したものになっていると考えられる。実際の試験気球では、各菱目間にバルジ状に膨張したフィルムが存在しており、これらのフィルムのもつ幾何剛性と材料剛性が気球の展開安定性を向上させている可能性が高い。以上のように本稿の有限要素解析結果と実際の試験結果との間には明らかな不整合がある。とはいえ、ここでの解析結果は、赤道部菱目のアスペクト比  $A_d$  が気球の安定性に大きな影響を与えていることを示しており、気球の展開安定性を向上させるうえでは NPB01-2 気球のように  $A_d$  として十分に大きな値を採用する方が優位であることが推察される。

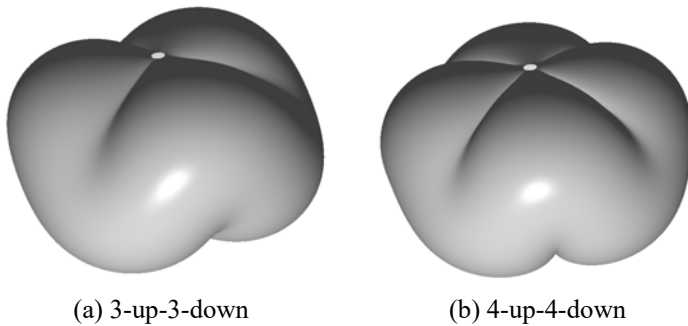


(a) NPB01-1



(b) NPB01-2, NPB1-1 and NPB3-1

図 5. NPB01-1, NPB01-2, NPB1-1 and NPB3-1 試験気球の座屈モード数変化



(a) 3-up-3-down

(b) 4-up-4-down

図 6. 気球の座屈モード形状の例 (NPB1-1)

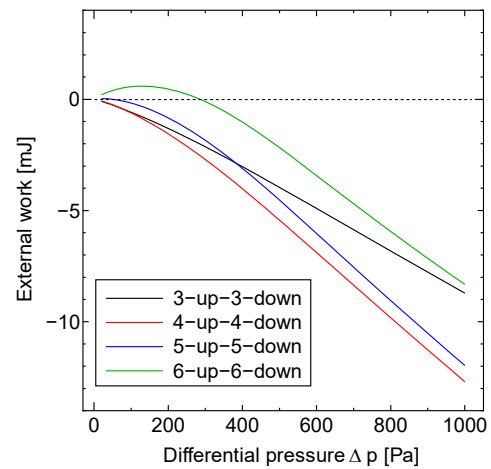


図 7. 各固有モードの固有値変化 (NPB1-1)

先に述べた通り、本稿の有限要素解析ではフィルム剛性の寄与を無視しているため一部試験結果との間に明らかな不整合がある。しかしながら数値解析上で発現した座屈モード形状を調査することは本 SP 気球の構造特性把握において有意義であると考え。図 6 に今回の解析で得られた座屈モード形状を二例示す(いずれも NPB1-1 試験気球の解析結果)。同図に示すように本 SP 気球の座屈モードは周方向に周期的な凹凸が繰り返される形状となっている。本稿では凹凸が  $n$  回繰り返されるモードを  $n$ -up- $n$ -down モードと呼称することにする。これらの座屈モードは Lobed-pumpkin 型 SP 気球でも確認されているモード形状であり、前節での考察通り、本 SP 気球でもアスペクト比  $A_d$  が一定値を下回ると Lobed-pumpkin 型 SP 気球と同様の不安定モードが発現することが推察される。図 7 は NPB1-1 気球について差圧に対する各固有モードの固有値変化を示したものである。同図から 3-up-3-down および 4-up-4-down のモードは全ての差圧領域で座屈モードとなっており、差圧の上昇とともにその他の固有モードも座屈モードへと遷移していることが分かる。

#### 4 まとめ

本稿では皮膜に網をかぶせた SP 気球の構造特性に関し、有限要素法を用いて展開安定性の評価を行った。現在、フィルム剛性の寄与を考慮した、より詳細な安定性解析の手法を検討中である。

#### 参考文献

- [1] 斎藤芳隆, 他, 大気球研究報告, JAXA-RR-16-008, 2016.
- [2] 中篠恭一, 他, 平成 27 年度大気球シンポジウム収録, isas15-sbs-009, 2015.