

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について

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

1 はじめに

現在、共著者の斎藤を中心に、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3 m級の試作気球から始めて順次大型化を図っていき、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3,000 m³級のSP気球の飛翔試験を実施するに至った。本飛翔試験では、飛翔時の差圧履歴からガス漏れが発生していたことが判明し、その後の気球構造の見直しへとつながった。以降、地上膨張試験の繰り返しを通じて必要な改良を適宜加えていき、2015年6月には5,000 m³級のSP気球（以下、本稿ではNPB5-1a気球と呼称する）の地上膨張試験を実施している。同気球の耐圧性能は1,900 Paと想定されていたが、本膨張試験では差圧が348 Paに達した時点で気球頭部の網線がはずれ、気球が破裂した^[1]。本稿では、次節においてNPB5-1a気球の基本構造特性について述べ、続く第3節でNPB5-1a気球が破壊に至った原因について数値解析を通じて考察する。

2 NPB5-1a 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, 2）。Taylor曲線から得られる回転体は、回転体内部の圧力を経線方向の力のみで支持した場合の釣り合い形状に相当し^[2]、したがって、この回転体を近似するゴアフィルムのみで気球を構成した場合、膨張時に発生する応力は経線方向のみに限られ、周方向の応力は零になると考えられる。さらに、このゴアフィルムに図2のような菱目状の網目を被せた場合、経線方向の力はフィルムに代わって網目が負担することとなり、その際の釣り合い形状はTaylor曲線の回転体にほぼ一致するものと考えられる。ただし、図2の網目に張力が発生した場合、経線方向の力に加えて周方向の力も負担することになるため、SP気球の膨張時形状とTaylor曲線の回転体との間には僅かな差異があるものと予想される。本節ではまず、NPB5-1a気球に関する有限要素解析の結果として、気球が軸対称に展開した場合の網目の軸力分布と釣り合い形状を示す。

有限要素解析にあたっては、本来気球のゴアフィルムと網目の双方をモデル化して実施する必要があるが、その場合、フィルムと網目の接触問題を扱う必要があり解析が非常に困難となる。このため、本稿では網目の部分のみをモデル化し、各菱目の部分に作用する圧力を網要素の各節点に配分することで釣り合い形状を求めた。

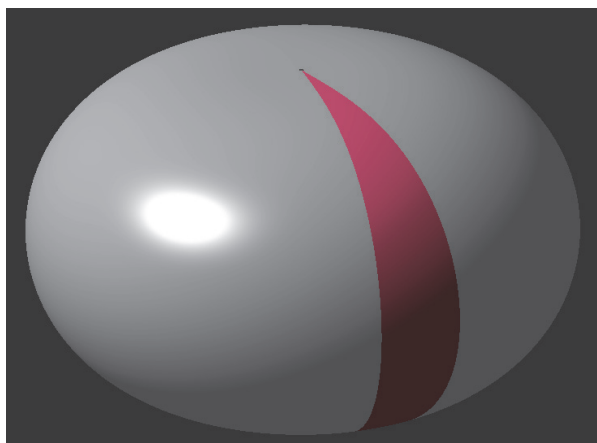


図 1. Taylor 曲線の回転体

図の色付き部を平面展開して近似ゴアを構成する

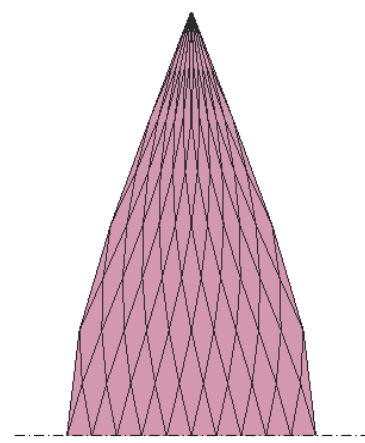


図 2. ゴアフィルムに被せる菱目状の網

1枚のゴアの上半分のみを图示

解析対象とする NPB5-1a 気球の諸元を表 1 に示す。解析にあたっては周期対称性を考慮して気球ゴア 1 枚分をモデル化し、差圧は、実試験において確認された破壊圧に相当する 350Pa とした。解析の結果得られた網線の軸力分布図を図 5 に、釣り合い時の断面形状を Taylor 曲線と比較した結果を図 6 に示す。

表 1. NPB5-1a 気球諸元

公称容積 (m ³)	5,000
直径 (m)	24.4
高さ (m)	14.6
ゴア数	32
縦ロープ数	3216
網交点間隔 (mm)	101

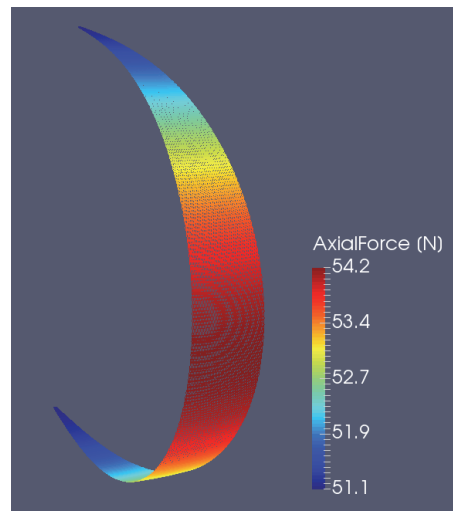


図 3. 差圧 350 Pa 時の網線軸力分布

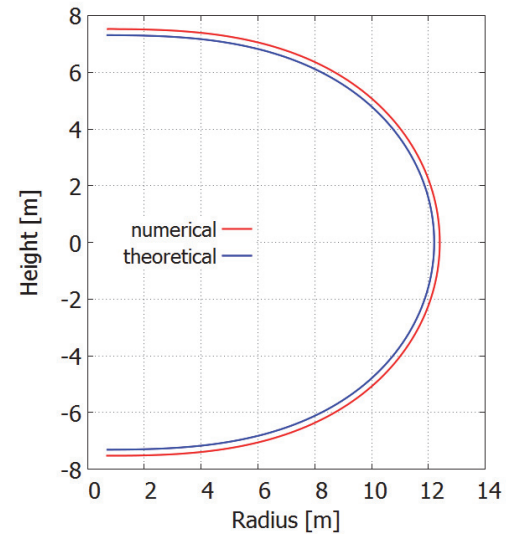


図 4. 断面形状 (数値解) と Taylor 曲線との比較

図 3 から、気球赤道部付近で網線軸力が最大となっているが、その値は赤道断面に作用する総圧力を網線が均等に負担する、と考えると概算した値に近く、妥当な解析結果となっている。極部に向かって網線軸力が減少している理由は、極部に近いほど菱目が縦方向に長くなり、その結果として網線の軸力負担が減少することによるものである。網線の破断強度は 350 N 程度であるため、図 3 の軸力分布は破断強度に対して十分小さな値となっている。

図 4 は、数値解で得られた気球断面形状と Taylor 曲線の回転体との比較である。図中の Taylor 曲線は不伸長変形を仮定した場合のものであるが実際の気球では網線に 3%程度の歪みが発生するため、比較対象の Taylor 曲線より一回り大きな変形形状となっている。両者の比較から気球は半径方向よりも高さ方向に引き伸ばされており（半径方向が 1.6%引き伸ばされているのに対して高さ方向は 2.9%）、Taylor 曲線から得られる回転体と比較すると、より球形に近い形状へと変形している。これは前節で述べた通り、網線が周方向の力も負担するためであると考えられる。

3 NPB5-1a 気球の破壊原因に関する考察

先に述べた通り、NPB5-1a 気球は差圧 348Pa に達した時点で破壊した。ビデオカメラの映像解析から、その破壊は、まず気球頭部に集められている網端部の一部がはずれ、その後に頭部の網が連続的に破断し、最後に網に覆われなくなったフィルムが破壊したことが判明している。NPB5-1a 気球は総数 3216 本の網線で構成されているが、これらの網線は極部に集められ、スリーブと呼ばれる端末部でまとめられて弁座付近に固定される。スリーブは極部 1 箇所につき周方向に 120 個配置されており、一つのスリーブには網線が 26 本、ないし 27 本束ねられて固定されている。今回の地上膨張試験では以下のことが判明している。

1. 120 あるスリーブのうち 2 つのスリーブに製造上の問題があったことが判明しており、本来 1 スリーブにつき 200[N]程度の網線軸力まで耐えられるところの強度が半分程度まで落ちていた可能性がある。破壊は製造上の問題があったスリーブから開始したものと考えられる。
2. 破壊後にスリーブ固定部を調査したところ、気球頭部のスリーブが本来の固定位置からずれており、ずれ角度は最大で 15° 程度であった。固定位置のずれにより網線軸力に不均等が発生した可能性がある。
3. 撮影データから、膨張時の気球上部にフィルムが重なっていると思しき箇所が確認される。NPB5-1a 気球はフィルムが周方向に余る設計となっており、ゴア 1 枚分に相当するフィルムが満膨張にいたる前ま

で未展開のままとなっていた。フィルムの重なりは、その影響によるものと思われる。

4. 満膨張時の形状を確認すると、気球は周対称には展開しておらず、表面にわずかな凹凸が発生した状態で展開していた。

本節では、まず上記項目 1 に関連して、スリーブ 2 つに相当する 50 本超の網線がはずれた場合に、その後の破壊のプロセスとして網線の連続的な破断が発生するかどうかについて検証を行う。検証にあたっては、以下に述べるような数値解析モデルを使用した。まず気球上部から半径 6 m までの範囲に相当する部分を取りだし、この部分を平面上に展開した網線モデルを作成する (図 5)。次に、このモデルの内周部節点を完全固定し、外周部の網線 1 本につき外向き 50 N の外力を作用させる。この外力は気球破裂時の差圧である 348 Pa が印加された場合の網線軸力に相当している。この状態で、さらに内周部の網線の一部切断し、網線切断後の状態における軸力分布を有限要素解析により求めた。なお図 5 は説明用の概念図であり、総網線数 120 本のモデルに相当している。実際の解析は NPB5-1a 気球相当のモデルに対して行っており、総網線数は 3200 本となっている。

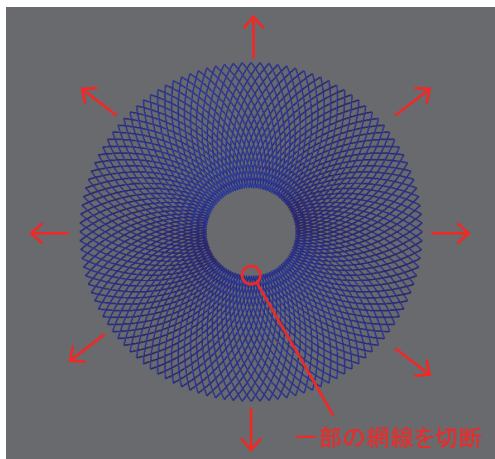


図 5. 検証用の簡易解析モデル

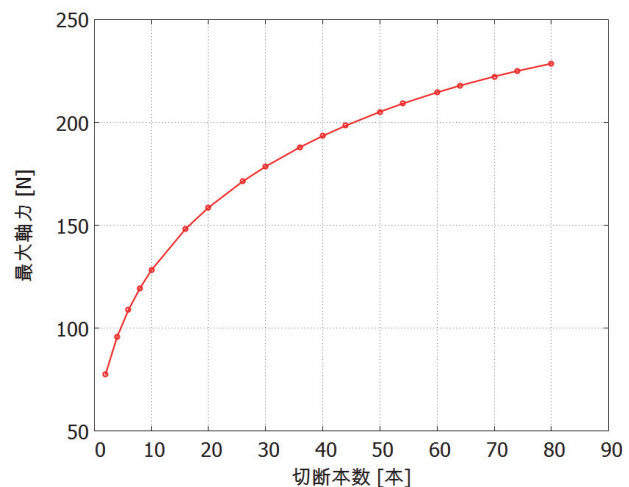


図 6. 網線切断本数と網線に発生する最大軸力

解析の結果、内周部の網線を切断していくと切断部に隣接する網線において軸力が最大となることが分かった。図 6 に、網線切断本数と網線最大軸力との関係を示す。同図から、スリーブ 2 つに相当する 50 本程度の網線が切断された場合、最大軸力が 210 N 程度に達することが見積もれる。なお、ここでの結果は静解析を通じて得られたものであり、網線が衝撃的にはずれた場合の影響は考慮していない。一方、網線が衝撃的にはずれた場合、その結果発生する軸力変化は静解析結果の 2 倍程度になると考えられる。よって上記結果から網線 50 本程度が衝撃的にはずれた場合の最大軸力を見積もると 370 N 程度となり、網線の破断強度を超えることが分かる。したがって、スリーブ 2 つ相当の網線が衝撃的にはずれた場合、その後に網線の連鎖的な破断が発生することは十分に考えられる。また、図 6 から同時に分かることとして、数本のみの網線が破断したとしても、破断の影響によって周囲の網線軸力が破断強度を超えることはなく、気球の大局的破壊が発生することはない、と結論することができる。

次に、先に挙げた事項中、項目 2,3 が要因となってスリーブがはずれる可能性を調査するため以下の解析を行った。まず、先の解析と同様にして気球上部から半径 6[m]までの範囲に相当する部分の平面展開モデルを作成する。次にこのモデルの外周部網線に 348Pa 印加時に相当する 50[N]の外向き外力を加えて、各網線の軸力を求める。その際、項目 3 のフィルムの重なりを模擬するため、半径 1.2~4.2[m]に相当する部分に仮想的な「ばね」を配置し、ばねの引張力によってフィルムが寄せ集められるようなモデルを考えた (図 7)。また、項目 2 のスリーブずれを模擬するため、弁座付け根部の網線位置に関して、試験後の実測データに相当する擾乱を加えた。以上の方法にしたがって求めた網線軸力の分布を図 8 に、各スリーブに集まる網線の平均軸力を図 9 に示す。

図 9 から、スリーブに集まる平均軸力に不均等が生じ、最大 90[N]程度のスリーブがあることが分かる。このスリーブはフィルムの重なりが発生している箇所直下の直下点に相当するものである。しかしながら、実際の NPB5-1a 気球において製作不良のスリーブが配置されていた位置は、フィルムの重なりが見られた部位とは離れていたことが分かっ

ており、この結果から今回の破壊の原因を裏付けることはできない。

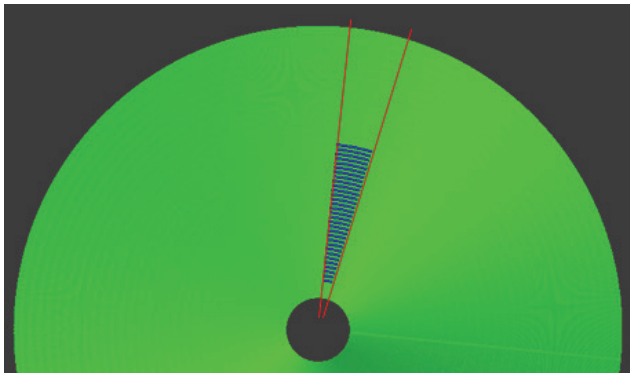


図 7. 平面展開モデルとばねを配置した位置（青線部）

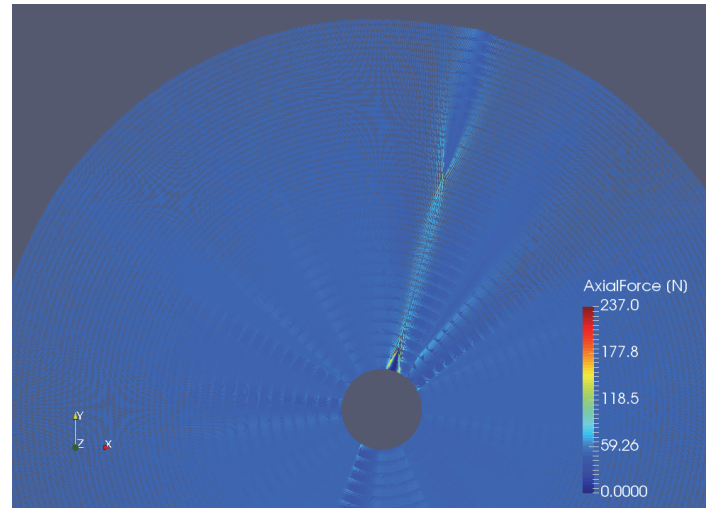


図 8. 網線軸力の分布

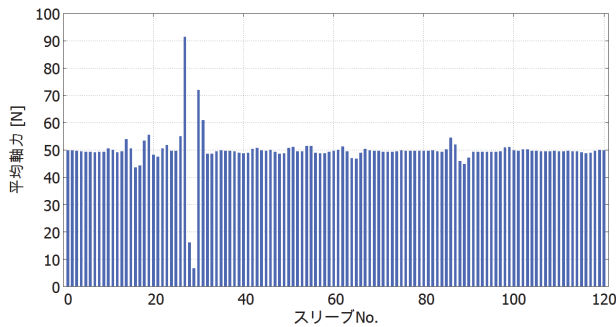


図 9. 各スリーブに集まる網線の平均軸力

そこで、図 7 で導入した仮想的な「ばね」を気球全体の 3 次元モデルに導入して解析を行った。その結果、解析結果の形状に試験時に観察された形状に類似した凹凸の形状が現れ、さらにこの形状に相応してスリーブの平均軸力にも不均等が発生する結果が得られた（図 10, 11）。

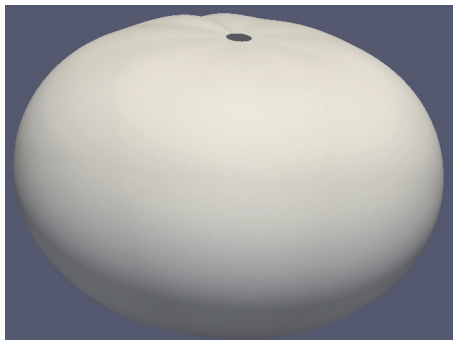


図 10. 解析結果から得られた気球の凹凸形状

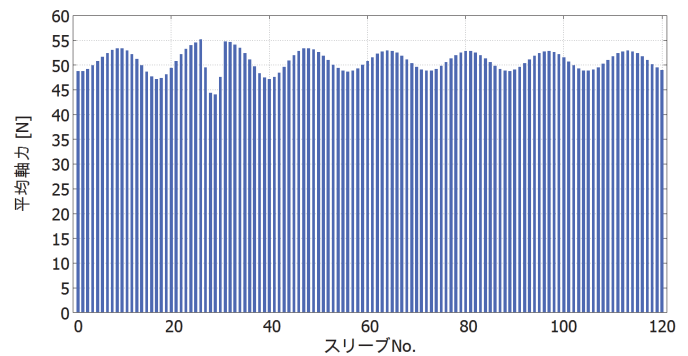


図 11. 各スリーブに集まる網線の平均軸力

スリーブに集まる網線の平均軸力は最大でも 55[N]程度であり、この結果のみでは同じく破壊の原因を裏付けることはできない。ただし、ここに示した解析ではスリーブのずれをまだ考慮しておらず、図 10 のモデルに対して、さらにスリーブずれを導入した場合、今回の破壊を裏付ける結果が得られる可能性はある。図 10 の形状は気球のもつ座屈モードが励起された結果と考えられ、実際の膨張試験時にもこのような座屈モードが励起されていたものと思われる。このような座屈モードの存在による非対称形状への移行は、スリーブがはずれたこと的有力な説明要因となりうる可能性があると考えられる。そこで今後は、**post-buckling** 解析を実施し、非対称膨張時の気球における網線軸力を調査する予定である。具体的には、本気球のもつ座屈モードを擾乱として導入して気球の局所的平衡解を複数個求め、これらの解の中にスリーブがはずれた原因を説明しうる解が存在するかどうかを調査する予定である。

参考文献

- [1] 斎藤芳隆、他、平成 27 年度大気球シンポジウム集録, isas15-sbs-008, 2015
- [2] M. Pagitz and S. Pellegrino, International Journal of Solids and Structures, Vol.44, No.21, pp.6963-6986, 2007.