

# 皮膜に網をかぶせた長時間飛翔用スーパープレッシャー気球の開発

## — 新ゴア形状の気球の展開試験 —

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所	:	齋藤 芳隆、後藤 健
東海大学工学部	:	中篠 恭一
東京工業大学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
横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院	:	河端 昌也
名古屋大学理学部	:	田村 啓輔
岐阜大学工学部	:	大谷 章夫
藤倉航装(株)	:	松嶋 清穂、橋本 紘幸
ナカダ産業(株)	:	島津 繁之

### 概要

搭載重量 1 トンで高度 37 km に数カ月間にわたり飛翔できる軽いスーパープレッシャー気球の開発を進めている。高張力繊維でできた菱形の目の網を薄いフィルム製の気球皮膜にかぶせる手法を考案し、以後、体積 10 m<sup>3</sup> の気球試作から順次気球の大型化を進め、地上膨張試験により手法の実証、具現化方法の確立を進めてきた。2015 年 6 月には、体積 5,000 m<sup>3</sup> の気球の地上膨張試験を実施したが、348 Pa で気球が破裂した。これは、気球が非対称に展開したことで応力の偏りが生じたことが原因と考えられている。この問題の解消のため、子午線方向のみ余長を設けたゴアとすることで、展開の対称性を確保しつつ、子午線方向のフィルムに余長を確保して製作精度要求を軽くする設計が提案された。この方法で体積 10 m<sup>3</sup> の気球を製作し、膨張、破壊試験を実施したところ、気球は正常に展開し、予想耐圧性能に近い 10,000 Pa の耐圧性能を有することがわかり、この改良の有効性が確認された。今後、体積 2,000 m<sup>3</sup> の気球の地上での膨張、破壊試験で有効性を確認した後、体積 7,000 m<sup>3</sup> の気球の飛翔性能試験を実施することを計画している。

## 1 はじめに

長時間(数カ月程度)飛翔できる気球が存在すれば、地球周回衛星で行なわれている科学実験の一部を気球で実現することができ、ロケットで衛星を打ち上げることと比較して 1/100 以下の圧倒的な低コスト化が可能である。また、地球大気中を飛翔する気球の特性を生かし、成層圏大気のモニタリング観測を極めて高い精度で行なうといった新しい観測も可能になる。このため、ISAS/JAXA 気球グループでは、設立以来、最重要項目として長時間飛翔の研究に注力してきた。スーパープレッシャー気球(SP気球)は、気球のガスを常に加圧状態に保ち、昼夜のガス温度変動による気球体積の変化に起因する浮力の変動を抑えることで長時間飛翔を可能にする気球である。その原理は人類が最初に空を飛んだ 230 年前から知られているものの、日照条件下のガス圧を飛翔高度気圧よりも 10 % 高く保つという成立条件が満たせず、実用化は小型気球に滞っている。この状況は米仏のような気球先進国においても同様である。近年、米国での SP 気球開発の進捗が目覚しく、平成 27 年 3 月には体積 53 万 m<sup>3</sup> の気球ニュージーランドから放球し、高度 33 km 上空で 32 日間飛翔させるに至った [1]。しかし、37 km 以上の高度での飛翔が要求される X 線観測、宇宙線観測には依然利用できず、この課題を解決するためには、気球の抜本的

な軽量化が必要である。我が国にとって大型の SP 気球は、依然として開発の過程にある技術である。

ISAS/JAXA 気球グループは SP 気球の開発を主要研究テーマとし、材料進歩の後押しを受けつつ、理論的、技術的なブレークスルーを重ね、着実に成果をあげてきた。小型気球の地上加圧試験による検証を繰返し、平成 18 年には、体積  $2,100 \text{ m}^3$  の小型 SP 気球をフィールドで飛翔させ、必要な耐圧性能を 12 倍の安全率で確保するに至った [2]。以後、研究所の予算を投入し、気球の開発が進められている。

我々は、この開発過程で、高張力繊維でできた菱形の目の網を薄いポリエチレンフィルム製の気球皮膜にかぶせることで耐圧性能を向上させる手法を見出した [3]。網の目を細かくするほど気球皮膜への要求強度が下がるため、目の細かい網を使うことで、皮膜を薄くして重量を減らし、気球を軽量化することが可能となる。我々は本研究における最終的な目標を 1 トンの観測装置を吊り下げられる体積  $300,000 \text{ m}^3$  の SP 気球の開発におき、平成 21 年より開発を開始した。

平成 21 年にはその原理の実証に成功し、以後、地上試験を通じて、気球の大型化を進めた。平成 24 年には、体積  $3,000 \text{ m}^3$  の SP 気球を体積  $15,000 \text{ m}^3$  の ZP 気球に吊り下げて飛翔させ、気球の正常展開、耐圧性能  $400 \text{ Pa}$  を確認すると共に、気球の大きさと差圧の関係や水平浮遊時の高度安定性の定量化を行った (B12-02 実験) [4][5]。平成 25 年には体積  $10 \text{ m}^3$  の SP 気球をゴム気球に吊り下げて飛翔させ、 $6,230 \text{ Pa}$  の耐圧性能を実証し、フィルムの安全率 62 倍、網の安全率 1.6 倍が確保されていることを確認した (BS13-04 実験) [6]。平成 26 年には、体積  $5,000 \text{ m}^3$  の SP 気球の飛翔試験を計画したが、飛翔機会に恵まれず、代わりに実施した地上試験において、 $420 \text{ Pa}$  の差圧まで耐えることが実証された (NPB5-1 気球) [7]。一方で、飛翔終了時に作動させる気球破壊機構部が所期の耐圧性能以下で破壊してしまうことが課題として残った。そこで、網線の長さをフィルムのゴアよりも 3 % 短縮することで、フィルムに余裕を持たせる改良を行った。その気球 (NPB5-1a 気球) の地上、膨張試験を平成 27 年 6 月に実施したところ、加圧開始時にパネルが展開せず、不均一な形状に展開するという問題が発生し、耐圧性能が  $348 \text{ Pa}$  に留まることも判明した [8]。

## 2 新ゴア形状の気球の設計と試験項目

網線の長さを縮めることは、ゴアを子午線方向、周方向の両方に余裕を持たせることに相当するが、周方向に余裕があると不安定な展開となる恐れがある。そこで、子午線方向のみに余裕を持たせたゴアを用いることとし、まず、直径  $3 \text{ m}$  の気球を製作し、膨張試験によって展開の正常性を確認することとした。

この気球は、BS13-04 実験で用いられた NPB001-5 気球とは、以下の点に違いがある。

- $10 \mu\text{m}$  厚でなく、 $20 \mu\text{m}$  厚のフィルムを利用している点。これは、耐圧性能を倍 (以上) にすることで、網線にかかる張力を体積  $7,000 \text{ m}^3$  の気球の破壊圧に相当する張力以上での試験を実施するためである。
- ゴアの子午線方向を網線長よりも 3 % 長くとり、周方向の長さは、網線長で規定されるかぼちゃ型と同じ長さになるよう、細長いゴア形状とした点。
- 従来、気球頭部と尾部とでクラウンカバー、リングの設計が異っていたが、尾部のクラウンリング、頭部のクラウンカバーを用いることで、共通化した点。

この気球の試験項目は以下のように設定した。

- 新規に導入した細長いゴアでの気球展開の正常を確認する。
- $200 \text{ Pa}$  ごと、 $1,000 \text{ Pa}$  まで気球の周長、子午線長を計測し、気球の形状を調べる。
- $10,000 \text{ Pa}$  まで加圧し、耐圧性能が  $10,000 \text{ Pa}$  までであることを確認する。 $10,000 \text{ Pa}$  加圧時に網線にかかる張力は  $180 \text{ N}$  であり、NPB300 気球での網線使用強度  $60 \text{ N}$  の 3 倍に相当する。

### 3 展開実験

実験は2015年11月11日、12日に藤倉航装船引工場風洞実験室にて実施した。11日の作業時の気温は16℃だった。気球の膨張の様子を水平1方向、および、上からの2方向からビデオカメラで撮影した。気球の内圧を気球尾部に取り付けた圧力ポートと差圧計をつないで計測した。差圧計は2 kPa、あるいは20 kPa レンジものを用い、その電圧値を0.1秒ごとにデータロガーで記録した。

気球へのガス注入は頭部のカッター取り付け用の突起部を破った箇所から行い、差圧の計測は気球下部の圧力計測ポートを用いて行った。気球を天井から吊り下げ、空気で膨張させた。ガス計測用のチューブが気球の内側に飛び出ることとなり、その先端がフィルムを傷つけるのをさけるため、気球尾部が展開するまで、手で保持して膨張させた。気球は順調に展開した(図1、2)。200、400、600、800、1,000 Paにおいて周長と子午線長を計測した。結果を表1に示す。

翌12日は、気球に空気を注入し加圧し、1,000 Paごとに気球の状況を確認しながら、加圧を続けた。図4は5,000 Pa印加時、図5は10,000 Pa印加時の写真である。加圧に伴って気球のしわが解消されているのがわかる。また、従来と比較すると、網目からのフィルムの飛出しが大きくなり、曲率半径は小さくなっているように見受けられる。10,000 Paまで加圧し、気球の状況を調べていたところ、気球下部から破裂した(図6)。

### 4 結果と考察

#### 4.1 差圧の時間変化、耐圧性能

測定された差圧の時間変化を図7、8に示す。気球にかけられた最大差圧は10,020 Paであり、破壊時の差圧は9,830 Paであった。最大圧で約1分間耐えた後、破壊したことがわかる。

表2に、今回試験したNPB001-6気球の諸元、および、これまでに試験した直径3mの網をかぶせた気球である、NPB001-2C気球、NPB001-4気球の諸元を示す。NPB001-2Cはフィルム長よりも網線長が2.7%長い気球、NPB001-4はフィルム長と網線長を揃えた気球である。NPB001-6はフィルム長が網線長よりも3%長い。耐圧性能がフィルムを余らせた効果により改善したことはNPB001-2C気球との比較により明らかではあるが、NPB001-4気球の倍には到達していない。

#### 4.2 赤道長と子午線長

表1、図9、10に赤道長と子午線長の差圧に対する変化を示した。NPB001-4気球とNPB001-6気球とでは網線長が等しい。両者の子午線長はほぼ一致している一方で、赤道長には違いがみられる。網線の長さだけで気球の形状が定まっているわけではないことがわかる。

#### 4.3 破壊の状況とその原因

破壊箇所を調べたところ、以下が判明した。

- 破壊箇所は気球の尾部近くであり、フィルムに穴があくと共に網が破断している。
- 破壊箇所は2パネルに跨っている。
- 破壊箇所付近の網とロードテープの結合糸が4箇所破断している。破断箇所のロードテープは健全なままである。
- 気球が破壊した箇所の子午線方向にはフィルムが横方向に伸ばされた跡がある。

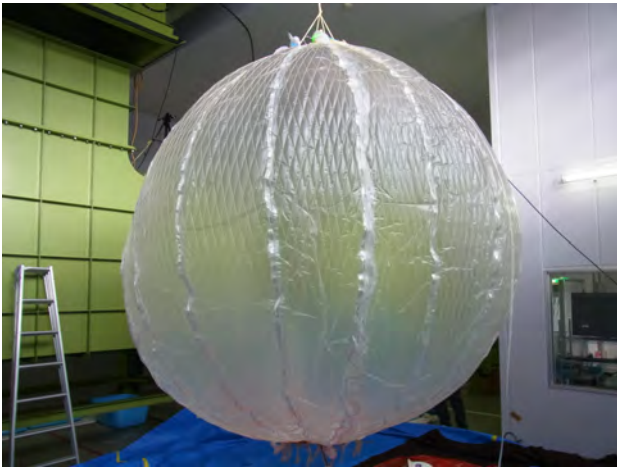


図 1: 気球の展開の様子 (その 1)



図 2: 気球の展開の様子 (その 2)

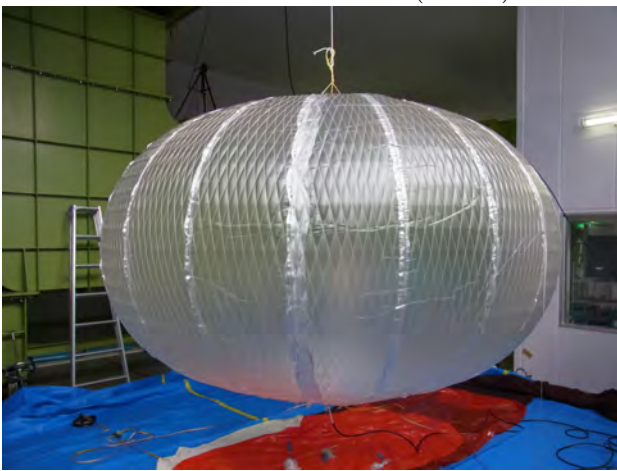


図 3: 800 Pa 印加時

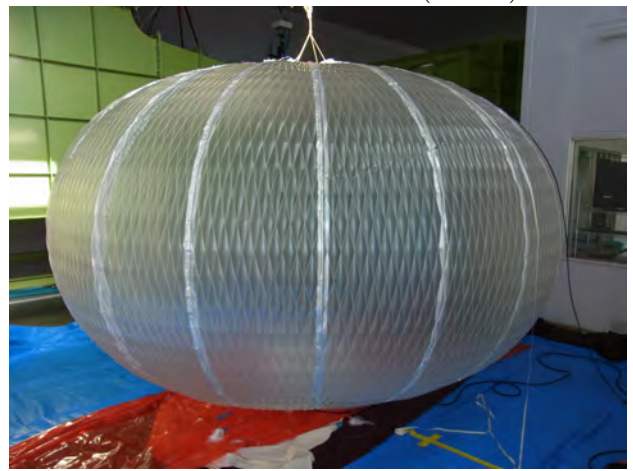


図 4: 5,000 Pa 印加時

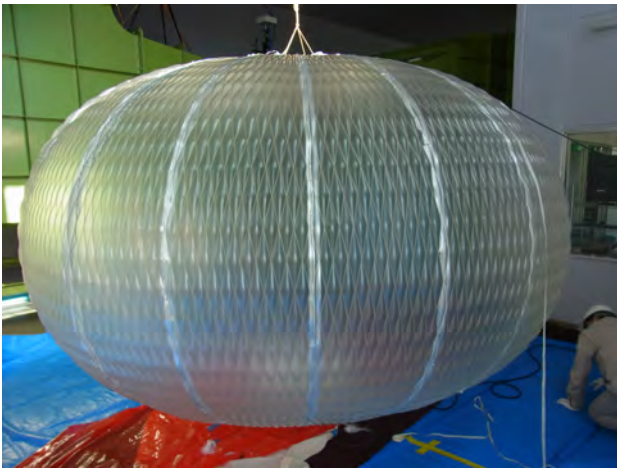


図 5: 10,000 Pa 印加時



図 6: 気球尾部近くから破壊

表 1: 赤道長と子午線長

差圧 [Pa]	赤道長 [mm]	子午線長 [mm]
190	9,272	3,884
390	9,328	3,896
590	9,362	3,896
790	9,395	3,896
990	9,418	3,904
554	9,396	3,910
1,000	9,396	3,914

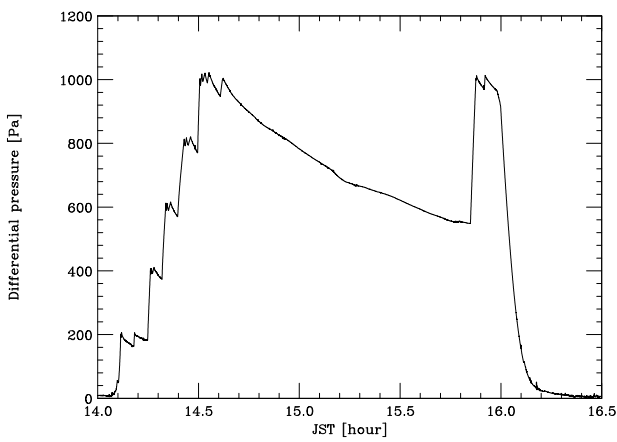


図 7: 2015/11/11 膨張試験時の差圧変化。

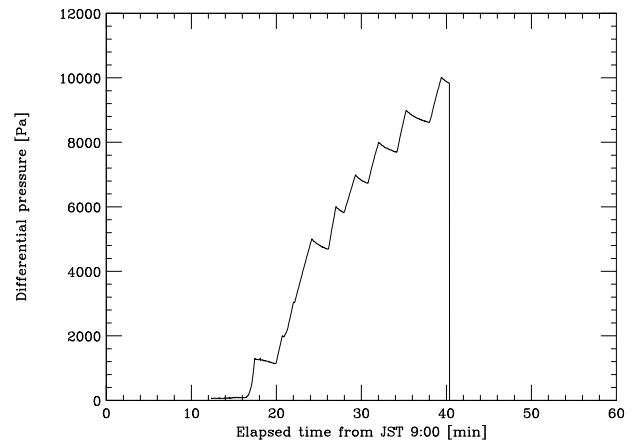


図 8: 2015/11/12 破壊試験時の差圧変化。

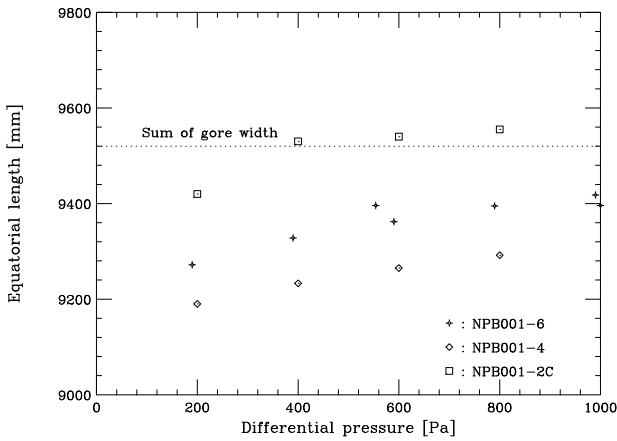


図 9: 差圧と赤道長の関係。

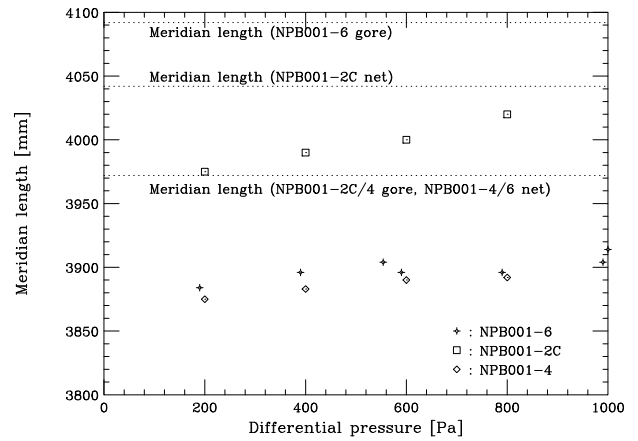


図 10: 差圧と子午線長の関係。

表 2: 網をかぶせた気球の諸元

気球番号	NPB001-6	NPB001-2C	NPB001-4
公称容積 (m <sup>3</sup> )	9.5	9.5	9.5
直径 (m)	3.03	3.03	3.03
全長 (m)	3.97	3.97	3.97
高さ (m)	1.80	1.80	1.80
ゴア数	20	20	20
最大ゴア幅 (mm)	516	516	516
ゴア長 (mm)	4,092	3,972	3,972
フィルム厚 (μm)	20	20	10
網線強度 (N)	415	415	415
網線数	402	402	402
網線長 (mm)	3,972	4,079	3,972
網交点間隔 (mm)	102	101	101
赤道ロープ間隔 (mm)	48	48	48
常温耐圧値 (Pa)	10,020	9,600	6,000
気球重量 (kg)	2.86	2.90	2.84

この破壊は、NPB001-2C、NPB001-4 で見られたような、赤道部のフィルムに穴があくのと異なっている。破壊の原因は、まず、網とフィルムの結合系が破断し、次にフィルムに密着していた網線が急激に左右に移動するのに伴ってフィルムが破損したことによるもの、と推定している。耐圧性能が予想値 (NPB001-4 の倍) に至らなかったことも、破壊のメカニズムが従来と異っていることを示唆している。

結合系が網線にかかった張力で破断しうるか検討する。まず、結合系の破断強度は 69 N であり、これをジグザグステッチでロードテープに縫い付けている。この部分の結合強度は 27 試料の破壊試験によって評価されており、強度の平均値は 203 N、分散は 45 N であり、最低破壊強度は 120 N であった。

一方、10,000 Pa が印加された際、網線にかかる平均応力は、

$$10000\pi \left(\frac{3.03}{2}\right)^2 / 402 = 179 \text{ [N]} \quad (1)$$

である。NPB001-2C 気球では、6,500 Pa において、網と網を結合していた強度 102 N の糸が破損している。上と同様の計算により、この圧力が印加された際には網線に 117 N の平均応力がかかると推定される。この結果は、気球が変形し、網線に 117 N の応力がかかった際に、強度 102 N の結合系が破損したと考えることができる。仮にこれと同程度の偏りが発生した場合を考えると 180 N の張力がかかった際には 156 N の力がかかるとなる。したがって、10,000 Pa の差圧がかかった際に今回の結合系が破断する可能性は十分に考えられる。

表 3 に、他の大きさの気球の場合に網線にかかる張力の比較を示す。これをみると、今回の気球でかかった力は NPB7-1 においてかかる力よりも大きい、同程度であり、今回と同じモードでの破壊が発生する可能性があることがわかる。一方で、NPB300-1 については 3 倍とマージンがある。

網とフィルムとの結合を強化するには、網線とロードテープ繊維とを絡める糸の数を増やすことが有効である。NPB001-6 気球における結合状態を調べると、1 本かかっている場合と 2 本かかっている場合とがあることが判明した。また、NPB5-1a 気球での結合系の破壊試験では、結合系でなく、ロードテープ繊維が破損しているケースも存在している。より高い耐圧性能を発揮させるには、結合強度を高く保つ方法について、検討が必要である。

表 3: 気球による要求圧時網線応力の比較

気球番号	NPB001-6	NPB2-1	NPB7-1	NPB300-1
公称容積 (m <sup>3</sup> )	9.5	2,000	7,000	30,000
直径 (m)	3.03	18.0	27.3	95.6
フィルム厚 (μm)	20	10	10	10
網線数	402	2,412	3,618	12,060
要求耐圧 (Pa)	10,000	1,000	1,000	100
要求圧時網線応力 (N)	179	105	162	59

## 5 まとめ

子午線方向のみ余長を設けたゴアで製作した体積 10 m<sup>3</sup> の気球は正常に展開し、10,000 Pa の耐圧性能を有することが確認された。耐圧性能は、網とフィルムとの結合強度で制限されていることが判明し、今後の気球開発に支障はないものの、より高い耐圧性能を発揮させる上では改良が必要となることがわかった。今後、体積 2,000 m<sup>3</sup> の気球の地上膨張、破壊試験を実施し、引裂機構が取り付けられた大型気球において、今回の対策が有効であることを確認した後、体積 7,000 m<sup>3</sup> の気球の飛翔性能試験を実施する予定である。

## 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翔用スーパープレッシャー気球の開発」(課題番号 24246138) の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] Cathey, H. M., “Qualification of the NASA Super Pressure Balloon” AIAA 2015-2909, 2015
- [2] 井筒 直樹、他、“スーパープレッシャー気球の開発と試験”、JAXA RR-07-009, pp.1-22, 2008
- [3] 斎藤 芳隆、他、“菱目の網を被せたスーパープレッシャー気球”、JAXA-RR-010-03, pp. 21-40, 2011
- [4] 斎藤 芳隆、他、“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 II” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-13-011, pp.1-33, 2014
- [5] Saito, Y *et. al* “Development of a super-pressure balloon with a diamond-shaped net”, Adv. in Space Res. Vol. 54, 8, pp.1525-1529, 2014
- [6] 斎藤 芳隆、他、“皮膜に網をかぶせた長時間飛翔用スーパープレッシャー気球の開発 (BS13-04 実験)” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-13-011, pp.35-60, 2014
- [7] 斎藤 芳隆、他、“皮膜に網をかぶせた長時間飛翔用スーパープレッシャー気球の開発 (NPB5-1)” 平成 26 年度大気球シンポジウム集録, ISAS14-SBS-012, 2014
- [8] 斎藤 芳隆、他、“皮膜に網をかぶせた長時間飛翔用スーパープレッシャー気球の開発 (NPB5-1a)” 平成 27 年度大気球シンポジウム集録, ISAS15-SBS-008, 2015