

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 (NPB2-1)

ISAS/JAXA	:	齋藤 芳隆、後藤 健、山田 和彦
東海大学工学部	:	中篠 恭一
東京工業大学院環境・社会理工学院	:	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
京都工芸繊維大学教育研究基盤機構系	:	大谷 章夫
長岡技術科学大学工学部	:	山田 昇
藤倉航装 (株)	:	松嶋 清穂、橋本 紘幸
ナカダ産業 (株)	:	島津 繁之

1 はじめに

長時間 (数カ月程度) 飛翔できるスーパープレッシャー気球 (SP 気球) をゼロプレッシャー気球 (ZP 気球) と同程度の体積/重量比で実現する開発を進めている。搭載重量 1 トン、飛翔高度 37 km を体積 30 万 m^3 の SP 気球で実現することが目標である。NASA は 2015 年に体積 53 万 m^3 の SP 気球の飛翔試験に成功し [1]、2016 年には科学観測を開始するに至った [2] が、飛翔高度は 33 km に滞っており、大型化、軽量化に課題がある。我々は高度 37 km を飛翔する気球を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 [3] で実現しようとしてきた。

2013 年 5 月には体積 10 m^3 の SP 気球の飛翔試験により、 $-60 \sim -50 \text{ }^\circ\text{C}$ の低温環境下で 6,280 Pa 以上の耐圧性能を有すること、2 時間にわたり 5,600 Pa の差圧に耐えることが実証された [4]。その後、大型気球の開発を進めたが、多くの課題と向き合うこととなった。2014 年に体積 5,000 m^3 の SP 気球 (NPB5-1 気球) の地上試験を実施したところ、気球引き裂き機構の頭部側が 425 Pa で破損し、この部分の強化が必要であることが判明した [5]。2015 年には、ここを強化し、加えて網線長をフィルム長より短縮し、製造誤差によって発生しうるフィルムの引きつれを予防する改良を同じ気球に施し (NPB5-1a 気球)、地上試験を実施したところ、気球が軸対称に展開しないという問題が発生し、348 Pa の差圧がかかったところで気球が破裂した [6]。この問題はゴアの形状を子午線方向のみ伸ばした形状とすることで解消できると考えられる。本論文では、この対策を施した体積 10 m^3 の気球の膨張破壊試験の結果を報告すると共に、その方法で製作した体積 2,000 m^3 の気球の膨張破壊試験の結果を報告する。

2 体積 10 m^3 の気球 (NPB001-6) の膨張破壊試験

NPB5-1a 気球においては、網線の長さをフィルムのゴアよりも 3 % 短縮する設計を行ったところ、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た。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展開しにくい、という問題がある。このため、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、体積 10 m^3 の気球を製作し、膨張試験を実施して展開の正常性を確認することとした。

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。気球を天井から吊り下げ、空気で膨張させた。気球は正常に展開した (図 1)。差圧が小さい段階では気球に横皺があったが、加圧するにつれて解消された。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。この際、フィルムに穴があくだけでなく、網も破断した。

測定された差圧の時間変化を図 2 に示す。気球にかけられた最大差圧は 10,020 Pa であり、約 1 分間耐えた後、差圧が 9,830 Pa まで下った後に破壊した。同体積で網線長がフィルムよりも 2.7% 長い気球である NPB001-2C 気球の耐圧性能は 9,600 Pa であり [7]、耐圧性能にも少し改善が見られた。しかし、破壊箇所は気球下部のロードテープ近くであり、NPB001-2C で見られたような、赤道部のフィルムに穴があくのとは異なっている。破

表 1: 網をかぶせた気球の諸元

気球番号	NPB7-1	NPB5-1	NPB3-1	NPB2-1	NPB1-1	NPB01-2	NPB001-5
公称容積 (m ³)	7,000	5,000	3,000	2,000	593	106	9.5
直径 (m)	27.3	24.4	20.6	18.0	12.0	6.76	3.03
全長 (m)	35.8	32.0	27.0	23.6	15.7	8.9	3.97
高さ (m)	16.4	14.6	12.3	10.8	7.2	4.1	1.80
ゴア数	30	32	30	20	16	12	20
最大ゴア幅 (mm)	2857	2394	2156	2360	2354	1768	516
フィルム厚 (μm)	10	10	10	10	10	10	10
網線強度 (N)	415	360	415	415	415	415	415
縦ロープ数	3618	3216	3015	2412	1608	603	402
網交点間隔 (mm)	102	100	101	102	101	101	101
赤道ロープ間隔 (mm)	48	48	43	47	47	71	48
弁座直径 (mm)	700/530	700/530	530	700/530	530	530	300
耐圧予想値 (Pa)	1,800	2,500	3,600	2,700	5,100	3,400	6,000
実測耐圧値 (Pa)	—	425/348	>814	—	>800	1,800	>6,800
試験環境	上空	地上	上空	地上	地上	地上	上空
気球重量 (kg)	100	90	66	60	16	19	3

壊の原因は、まず、網とフィルムの結合糸が破断し、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。

破損した際、網線にかかった張力は平均的には 179 N である。この値は、飛翔実証試験を想定している体積 7,000 m³ の気球に 1,000 Pa が加わった際の値である 162 N と同程度である。したがって、今回と同じモードでの破壊が発生する可能性がある。一方、最終目標である体積 300,000 m³ の気球に 100 Pa が印加されている状況で働く張力は 59 N であり、3 倍のマージンがある。

3 体積 2,000 m³ の気球 (NPB2-1) の膨張破壊試験

NPB001-6 気球と同様に子午線方向のゴア長さがかぼちゃ型よりも 3 % 長い体積 2,000 m³ の気球 (NPB2-1) を開発し、地上膨張破壊試験を実施した。飛翔性能試験は体積 7,000 m³ の気球で実施することを予定しているが、地上試験は以下の観点から体積 2,000 m³ の気球での試験を実施した。

- 大樹航空宇宙実験場 JAXA 格納庫では、体積 5,000 m³ の気球の試験が可能だが、天井から気球全体を下げることも真上から撮影することも困難である。一方、体積 2,000 m³ であれば、体育館で天井から気球を吊り下げ、天井から撮影する試験が可能である。
- NPB2-1 気球の全長は 24 m あり、引き裂き機構の全長 9 m が余裕をもって収まり、引き裂き機構の応力集中の解消の有無の試験も可能である。
- 過去に 2,100 m³ の Lobed-pumpkin 型気球が試験されており [8]、耐圧性能等の比較が可能である。

2016 年 3 月 14 日から 15 日にかけて、小野町町民体育館において膨張、破壊試験を実施した。気球には、7 m³ ガスボンベ 3 本分のヘリウムガスを注入し、気球頭部が展開した後、ブローワで、空気を注入した。気球は正常に展開した (図 3)。400 Pa まで印加後、問題ないことを確認し、一晩、この状態を保持した。

翌朝も気球は膨張したままで、160 Pa の残圧が測定された。さらに 1,000 Pa まで加圧し、その状態で 2 時間保持して様子を見ていたところ、気球の肩の部分に穴が発生した。そこで、引裂機構を動作させ、気球を破壊した。問題なく動作し、引き裂かれたフィルムが尾部から引張り出され、分離することが確認された。

気球の破壊箇所は、ロードテープの横のフィルムであった。破壊箇所の他にも、破壊箇所から子午線方向に、フィルムが横方向に伸ばされた跡がついており (図 4)、周方向に引っ張られたことで破壊したものと考えられ

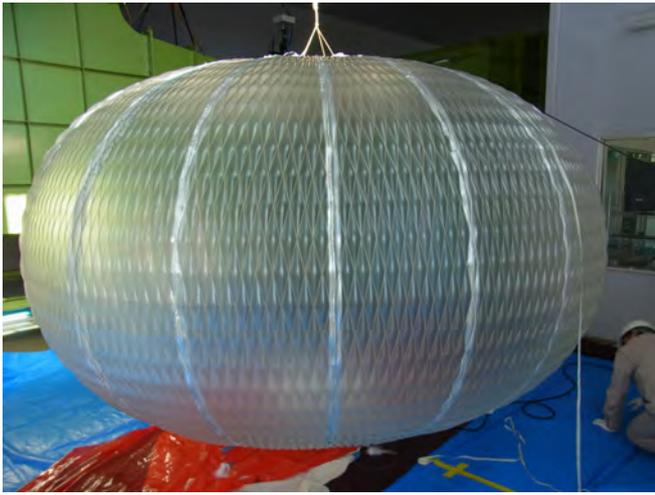


図 1: NPB001-6 気球の正常展開 (10,000 Pa 印加時)。

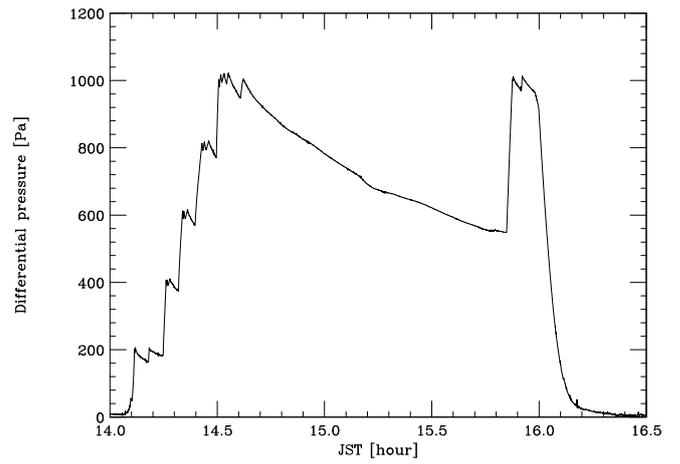


図 2: NPB001-6 気球の膨張試験時の差圧変化。



図 3: NPB2-1 気球の 200 Pa 印加時。

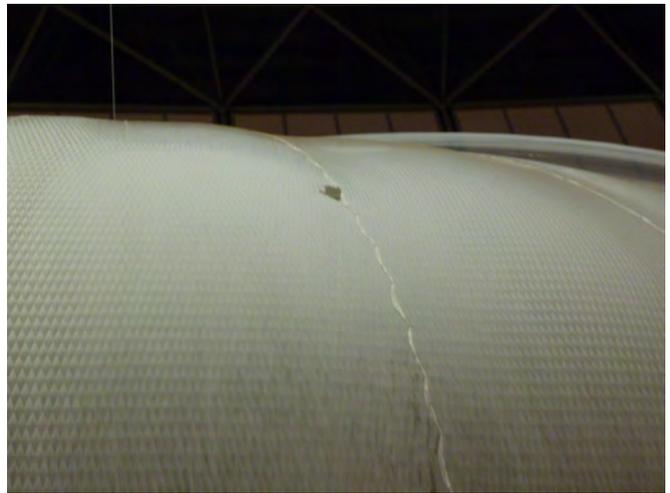


図 4: NPB2-1 気球の破壊箇所。

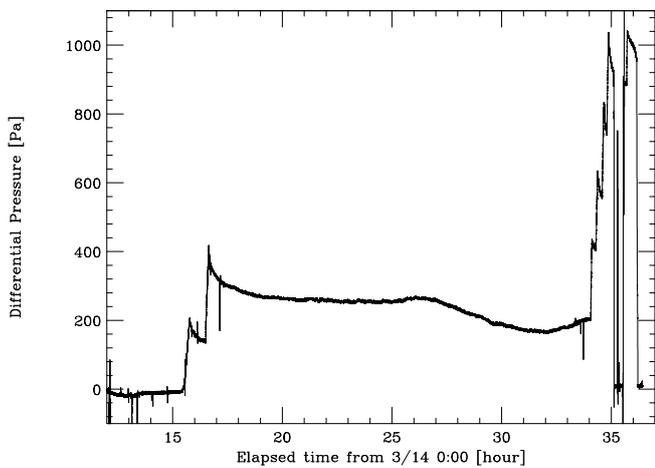


図 5: NPB2-1 気球の差圧の時間変化。

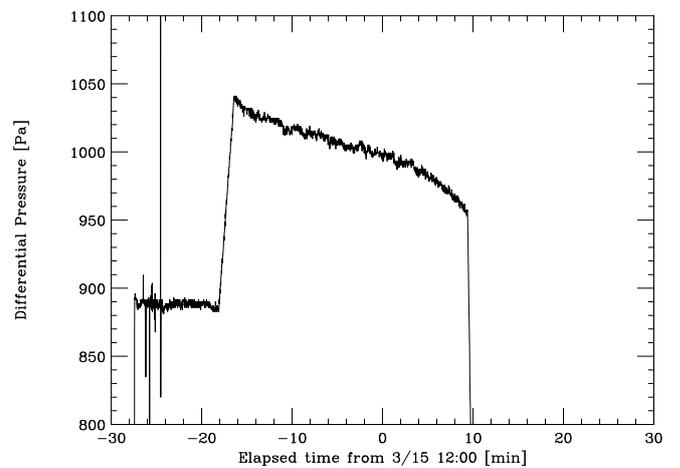


図 6: NPB2-1 気球の破壊時の差圧の時間変化。

た。穴があいた部分はロードテープが蛇行しており、フィルムの余長がフィルムが周方向に移動することで吸収されていたところに、圧力がかかって網が伸びたことに対応して、フィルムを周方向に引き戻そうとしたことで破壊したものと考えられる。

図5に差圧の時間変化、図6に破壊時の拡大図を示す。最大1,040 Paの差圧に耐えていたことがわかる。また、12時2分過ぎから次第に上に凸になっていることから、少しずつガスが漏れはじめ、12時10分になって急激に漏れたことがわかる。最初、小さな穴があき、それが拡大したのだと考えられる。気球の差圧は午前3時(図5での27時間後に相当)で下降に転じている。別途測定した気圧計のデータから同じタイミングで大気圧が上昇していることが判明しており、大気圧変化の影響と考えられる。また、午前8時(図5での32時間後に相当)から上昇している。これと同じタイミングで気温も上昇しており、気温の変化の影響と考えられる。

破壊圧1,040 Paは、所期の値2,700 Paよりも小さかった。これは、網が偏り、それにフィルムがひきずられたことで、加圧当初からフィルムに大きな張力がかかっていたためであり、網とフィルムの固定間隔を狭めることで改善できると考えられる。

この気球の重量は54 kgであった。2006年に飛翔試験を実施し、1,260 Paの耐圧性能が確認されたLobed-pumpkin型の体積 $2,100 \text{ m}^3$ の気球の重量は88 kgであり、実に4割の減量に成功したことになる[8]。これだけ軽くなると、40 kgのペイロードを搭載して高度22 kmの上空を長時間飛翔させることが可能であり、たとえば成層圏の気象観測等に利用できる。高度22 kmにおける大気圧は40 hPaであり、この高度を飛翔する気球にはその大気圧の10%に相当する400 Paの圧力差が昼夜で発生するため、昼間は400 Pa以上に加圧しておく必要がある。今回確認された耐圧性能1,000 Paは、これを2倍以上のマージンをもって達成できる値である。科学観測に利用できるSP気球の具現化は我が国では初めてとなる快挙であった。

4 まとめと今後の計画

子午線方向のゴアの長さをかぼちゃ型よりも3%長くすることで、安定に展開し、かつ、局所的な皮膜へのストレスを解消する気球を製作できることが確認された。一方、気球の破壊箇所は、網とフィルムの結合部近くと理論的な予想と異っており、改善の余地がある。破壊の原因は網の偏りと推定され、より網とフィルムの結合間隔を小さくすることで改善が見込まれる。製作工数を抑えた新しい結合方法が考案されており、それを用いて11月に体積 10 m^3 の気球を製作、膨張、破壊試験を実施することで、その有効性を確認する。その後、体積 $2,000 \text{ m}^3$ の気球の地上膨張破壊試験で検証した上で、体積 $7,000 \text{ m}^3$ の気球での飛翔実証試験を実施する予定である。

謝辞

NPB2-1気球の膨張試験にあたっては、ISAS/JAXAの石村 康生さん、佐藤 崇俊さん、松坂 幸彦さん、明治大学理工学部の田中 理紗子さんにお世話になりました。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)を受けて行っています。

参考文献

- [1] Cathey, H.M., et al. AIAA BAL Conference 2015, AIAA 2015-2909, 2015
- [2] <https://blogs.nasa.gov/superpressureballoon/2016/06/25/nasas-super-pressure-balloon-at-40/>
- [3] 斎藤 芳隆、他、宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-10-03, pp. 21-40, 2011
- [4] 斎藤 芳隆、他、宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-13-011, pp.35-60, 2014
- [5] 斎藤 芳隆、他、平成26年度大気球シンポジウム集録, isas14-sbs-012, 2014
- [6] 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
- [7] 斎藤 芳隆、他、宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA RR-11-008, pp.1-16, 2012
- [8] 井筒 直樹、他、宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-07-009, pp.1-22, 2008