

6400m³網気球（NPB7-1）の地上膨張試験

東京工業大学 環境・社会理工学院	: 秋田 大輔、泉 芙由美
JAXA/ISAS	: 齋藤 芳隆、山田 和彦
東海大学 工学部	: 中篠 恭一
明治大学 理工学部	: 松尾 卓摩
松嶋技術士事務所	: 松嶋 清穂
藤倉航装（株）	: 橋本 紘幸
ナカダ産業（株）	: 島津 繁之

Ground Inflation Test of 6400m³ Netted Super Pressure Balloon (NPB7-1)

AKITA Daisuke, IZUMI Fuyumi, SAITO Yoshitaka, YAMADA Kazuhiko, NAKASHINO Kyoichi, MATSUO Takuma, MATSUSHIMA Kiyoho, HASHIMOTO Hiroyuki, and SHIMAZU Shigeyuki

1. はじめに

長期間飛翔可能な高高度気球が実現できれば、人工衛星の代替として、科学観測等の一部を大幅に低いコストで行える可能性がある。スーパープレッシャー気球を用いれば、日照日陰のサイクルによる浮力低下を補償するためのバラスト投下が必要ないため、長期間（数ヶ月程度）の飛翔が可能となる。しかし、日陰時でも気球の体積を維持するために、日照時に飛翔高度の気圧の約 10%（高度 35 km で約 100 Pa）の耐圧性能が必要になる。気球のフィルムにかかる応力は曲率半径に比例するため、従来のスーパープレッシャー気球は、子午線方向にロープを張ってその間に気球のフィルムを張り出すことで、気球の大きさと無関係にフィルムの局所曲率半径を小さくし、気球の耐圧性能の向上をはかってきた。この場合、スーパープレッシャー気球は、より細いロープをより多く使うことで、質量を変えずに耐圧性能を上げることができる。しかし、ロープ本数の増加はフィルムの溶着長さの増加を意味し、結果として気球の製造コストの大幅な増加につながる。

そこで、我々の研究グループでは、2010 年頃からロープの代わりに網を気球にかぶせることで、溶着線に関係なく気球フィルムの局所曲率半径を小さくし、製造コストを上げずにスーパープレッシャー気球（網気球）を実現する方法を開発してきた[1]。網を使うと、気球フィルムの局所曲率半径を十分に小さくすることができ、薄いフィルムでも十分な耐圧を得られることから、これまでのスーパープレッシャー気球に比べて大幅なペイロードの増加が期待できる。最終的な目標は、1,000 kg のペイロードを高度 37 km 以上に飛翔させられる体積 300,000 m³ の網気球を開発することである。

2. 本膨張試験に至る経緯

2017 年に、体積 2,000 m³ の網気球（NPB2-2）の地上膨張試験を行い、耐圧約 1,000 Pa を達成した[2]。これは網の安全率で 2.1 倍、フィルムの安全率で 10 倍を意味しており、小型かつ地上の環境ではあるものの、開発してきた網気球に十分な耐圧性能があることを示した。その結果を受け、2017 年に同様の設計方法で体積 6,400m³ の網気球（NPB7-1）を製作し、大樹航空宇宙実験場にて飛翔試験を試みた。しかし、2017 年と 2018 年は気象条件がそろわず、2019 年はヘリウムガスが調達できないという理由で飛翔試験を行うことはできなかった。そこで、より現実的な実験計画を検討した結果、NPB7-1 気球は地上での膨張試験によって耐圧性能を確認するために使い、大樹航空宇宙実験場での飛翔試験は体積 2,000m³ の小型の気球（NPB2-3）を使って飛翔環境での耐圧性能のみを確認し[3]、水平浮遊時の特性は体積 7,000 m³ 級の 2 つ目の気球（NPB7-2）を用いて豪州にて実施する計画を立てた。本稿では、2019 年 11 月に実施した体積 6,400m³ の網気球（NPB7-1）の地上膨張試験の結果を報告する。

3. 膨張試験の概要

NPB7-1 気球の地上膨張試験は、福井県越前市のサンドーム福井にて 2019 年 11 月 26 日から 28 日の日程で行なった。表 1 は、本試験で使用した網気球（NPB7-1）の諸元である。図 1 に示すように、気球

を天井に吊り下げた状態から空気を送風して気球を膨張させた。図2に、差圧 200 Pa 時の気球の様子を示す。計測項目は、気球内圧と大気圧の差圧および子午線長と周長とし、最終的に気球が破壊するまで段階的に加圧を行なった。

表1 NPB7-1 気球の諸元

気球番号	NPB7-1
形状	かぼちゃ型
体積	6,400 m ³
直径	26.5 m
全長	34.8 m
高さ	15.9 m
ゴア数	32
最大ゴア幅	2680 mm
	(2 パネルのみ1432 mm)
フィルム	10 μm ポリエチレン
網材料	ベクトラン
網線強度	415 N
網交点間隔	102 mm
赤道網間隔	46 mm
期待耐圧	1000 Pa
気球重量	93.46 kg



図1 膨張前の吊り下げた網気球 (NPB7-1)



図2 200 Pa 時の網気球 (NPB7-1)

4. 膨張試験の結果

図3に、気球内圧と大気圧の差圧の時間変化を示す。一旦、200 Pa まで加圧した後、一晩放置し翌日さらに段階的に加圧して、最終的に NPB7-1 気球は 740 Pa で破壊した。この耐圧は、体積 2,000 m³ の NPB2-2 気球で記録した 1,000 Pa には及ばないものの、豪州で予定している NPB7-2 の飛行試験で想定している差圧 300 Pa に対して安全率 2.5 倍と十分な安全率があることが確認できた。また、この耐圧性能は、高度 27 km に 70 kg のペイロードを搭載して飛行させた際に安全率 2 が確保できる値でもある。

図4に、気球破壊時の様子を示す。大きく変形しながら破壊していることがわかり、これは差圧が大きくなった際に生じる座屈による不安定モードによる変形と考えられる[4]。このような破壊過程は、NPB2-2 気球でも同様であった。つまり大型の網気球は、局所的なフィルムや網が応力や張力に耐えられなくなり破壊するのではなく、それよりも前に上記のような構造的な不安定生によって応力集中がおこり破壊することがわかる。

リークレートは、差圧に依存するが、図3から差圧 200 Pa 以下では 10 時間のスケールで見ると 100 Pa 程度低下していることがわかる。ただし、定量的なリークレートを求めるには、大気圧と温度の変化分を補正する必要がある。現在のリークレートは、飛行試験では大きな問題とはならないが、実応用に向けては大きな課題となる可能性がある。一つの改善策としては、気球フィルムの 2 重化が考えられる

[5].

図5と図6に、それぞれ差圧と子午線長、差圧と気球半径の関係を示す。図6の気球半径は設計値よりも若干小さい値となっている。図7に、気球半径と子午線長の関係を示す。子午線長の誤差は測定値の0.1%、半径の誤差は6通りの測定の平均値からの標準偏差を誤差として誤差棒を示している。図7の結果より、気球半径と子午線長の比は、網気球の形状を仮定した場合の計算結果（実線）とよく一致しており、パンプキン形状を仮定した場合（破線）と比べ有意な差が確認できる[6]。

その他、網は溶着線に沿ってフィルムに固定されているが、一部で網が絡まり破断した箇所（図8）や、フィルムが偏り正常に展開できなかつた箇所（図9）があり、膨張過程で網とフィルムの相対的な位置が偏らないようにする工夫も必要である。

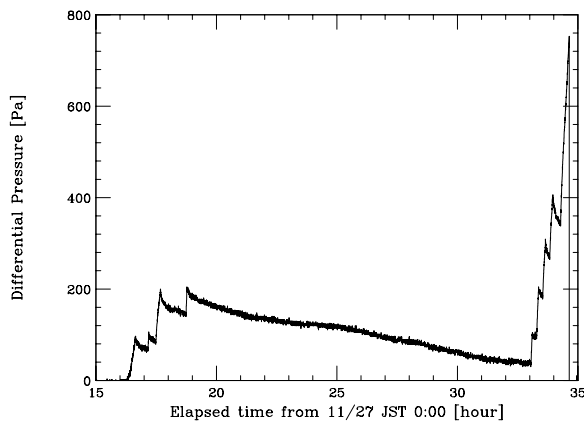


図3 NPB7-1 気球の差圧の時間変化



図4 変形しながら破壊する NPB701 気球

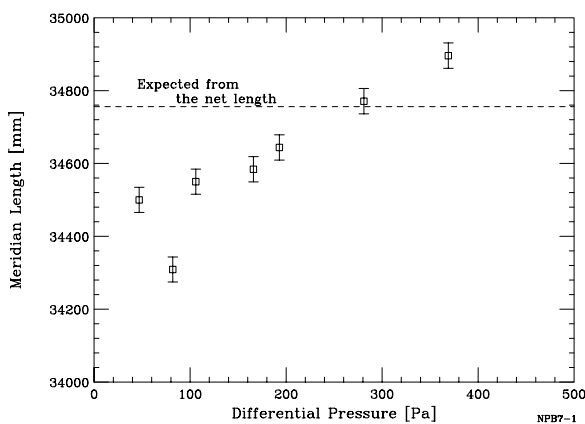


図5 差圧と気球子午線長の関係

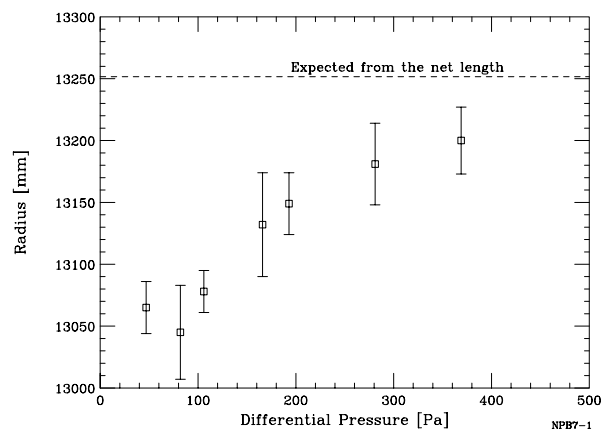


図6 差圧と気球半径の関係

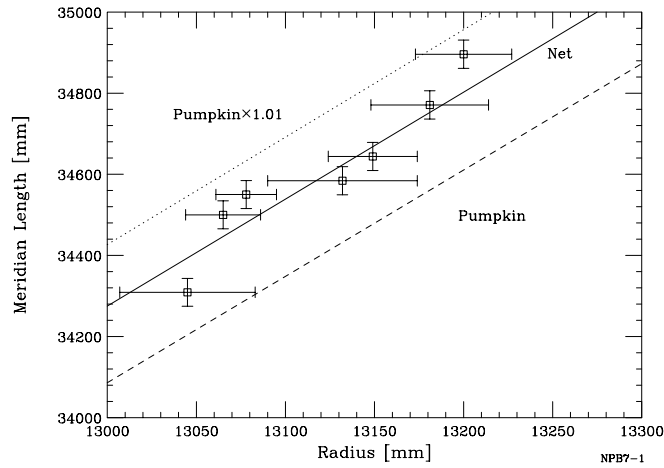


図7 気球半径と子午線長の関係



図8 網の絡まり

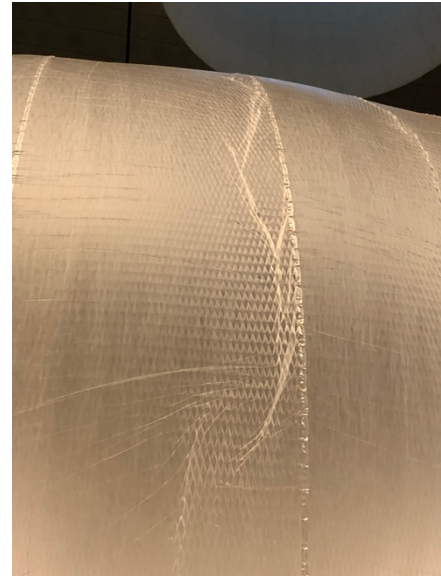


図9 フィルムの偏り

5. まとめ

体積 6,400m³ の網気球 (NPB7-1) の地上膨張試験を行い、十分な耐圧性能を有することを確認した。今後は、飛翔環境下での耐圧やリーク性能の評価を行なっていきたい。

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大型スーパープレッシャー気球に向けた基礎技術の開発」 (課題番号 17H01352) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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—新しい網と皮膜の結合方法の開発—、JAXA-RR-17-007, pp.1-13, 2018.
- [3] 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 NPB2-3 の飛翔試験 (B20-03) 結果と地上放球試験の提案、大気球シンポジウム isas20-sbs-024、2020.
- [4] Nakashino K. et al, Super Pressure Balloon with Diamond-shaped Net: A Numerical Study of its Structural Characteristics, Proc. of AIAA SciTech Forum, AIAA 2017-1117, 2017.
- [5] 斎藤芳隆、他、LODEWAVE 実験に向けたスーパープレッシャー気球の開発 (I)、大気球シンポジウム isas20-sbs-025、2020.
- [6] 中篠恭一、他、皮膜に網をかぶせたスーパープレッシャー気球の膨張時形状、大気球シンポジウム isas20-sbs-023、2020.