

# 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

## — 網と皮膜の新しい結合方法の開発 —

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所	:	斎藤 芳隆、後藤 健
東海大学工学部	:	中篠 恭一
東京工業大学環境・社会理工学院	:	秋田 大輔
明治大学理工学部	:	松尾 卓摩
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。気球の長時間飛翔を可能にする最も有力な方法がスーパープレッシャー気球(SP気球)である。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。近年、米国でのSP気球開発の進捗が目覚しく、2016年には体積53万 $\text{m}^3$ の気球をニュージーランドから放球し、46日間にわたり、高度33.5 km上空で科学観測を実施するに至った[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。

我々は、この問題を解消するべく、2010年から高度37 kmに900 kgのペイロードを飛翔させられるSP気球の開発を開始した。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[2]を用いるもので、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。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。

2016年3月には、重量は54 kg、体積2,000  $\text{m}^3$ の気球の地上膨張試験を実施し、1,000 Paの耐圧性能を確認するに至った[3][4]。これは、40 kgの機器を搭載して高度22 kmを長時間飛翔できる性能であり、長時間飛翔が可能なスーパープレッシャー気球の具現化は我が国では初めてとなる快挙であった。一方で、1,000 Paという耐圧性能は理論的予想値2,900 Paの1/3に過ぎず、改善の余地がある。また、破壊箇所も想定されていた赤道部のフィルムでなく、肩あたりの溶着線に近いフィルムの破損であった。また、気球展開時には本来、真っ直な溶着線が蛇行していた。こららから、網が偏った状態で気球が展開し、その後、加圧に伴って網がフィルムを引っ張るという想定外の応力がかかったために耐圧性能が劣化したものと推定している。本報告では、まず、この対策として検討した網とフィルムの固定方法について述べ、その方法を適用した体積10  $\text{m}^3$ の気球NPB001-6cの耐圧試験の結果を報告する。

## 2 網とフィルムの固定方法の検討

耐圧性能を向上させるためには、網とフィルムとの固定間隔を狭める必要がある。NPB2-1気球では、網の目一つ目おきに、ロードテープにダブル千鳥のジグザグステッチで縫い付けて固定していた(図1左)。単純には、すべての目で固定すれば、倍のピッチで固定できるが、気球制作工数に対する網をフィ



図 1: 新旧の網とフィルムの固定方法。左図が従来のダブル千鳥縫い、右図が新規に採用した二列直線縫い。

フィルムに固定する工数の割合が大きく、コストへの影響は深刻である。そこで、新しい網の固定方法を検討することとした。

試行錯誤の末に辿り着いたのが図 1 右である。これは、二列ミシンで直線縫いを行なうもので、ステッチが単純であるため単位長さを縫う時間が短く、従来と変わらない作業時間ですべての網の交点を固定することが可能となった。また、千鳥縫いは、網が長手方向に引っ張られると交点が移動する嫌いがあったが、この方法では、交点を取り囲むように縫い針を刺すことで、交点の位置を周囲の縫い目の内側に限定することができるメリットもある。さらに、ミシンの針が網線を貫かないように制御することも容易である。この縫い方では、網の目が縦に細長くなった場合、ロードテープに縦方向に皺が入ることになるが、実害はないと考えられ、この方法で気球を制作することとした。

NPB001-6 気球は、2015 年 11 月に膨張破壊試験を実施した気球であり、10,020 Pa の耐圧性能を発揮した [5][4]。この気球から網を剥し、二列直線縫いで固定しなおすこととした。以後、改修した気球を NPB001-6c と称する。この気球が NPB001-6 気球と同じ 10,000 Pa の耐圧性能を有することを確認する試験を実施することとした。

### 3 NPB001-6c 気球の耐圧試験

#### 3.1 耐圧試験

耐圧試験は 2016 年 12 月 15 日に藤倉航装船引工場風洞実験室にて実施した。気球の膨張の様子を水平 1 方向、および、上からの合計 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 レンジのものを用い、その電圧値を 0.5 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。気球は順調に展開した。200、400、600、800、1000 Pa において周長と子午線長を計測した。その後、5,000 Pa まで加圧し、その状態でガス注入口を閉じた。この時点でガス漏れ音に気づき、調査したところ、頭部側のクラウンカバーをロードテープに糸で固定している辺りでガス漏れが発生していることがわかった。漏れ箇所はロードテープの下であり、加圧状態ではテープがめくれず、漏れを塞ぐのは不可能であった。ロードテープの上から低温テープを貼り付ける応急処置をとったが気密の確保はできなかった。

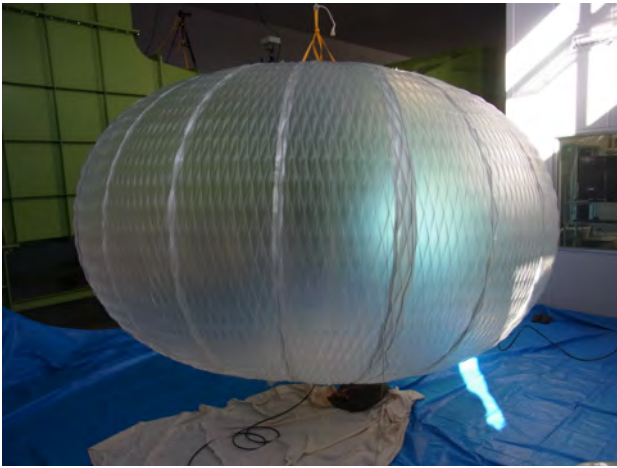


図 2: 10,000 Pa 印加時。

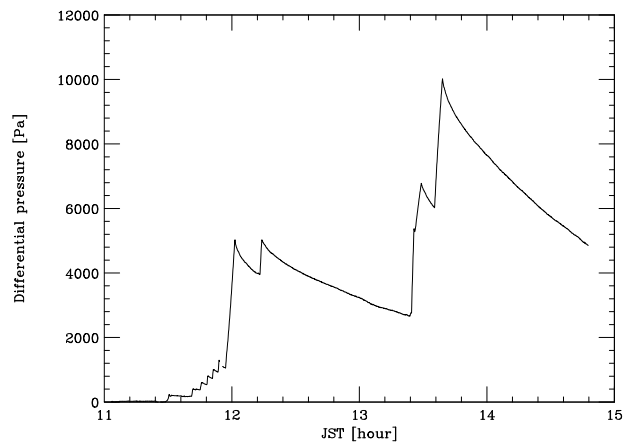


図 3: 差圧の時間変化。

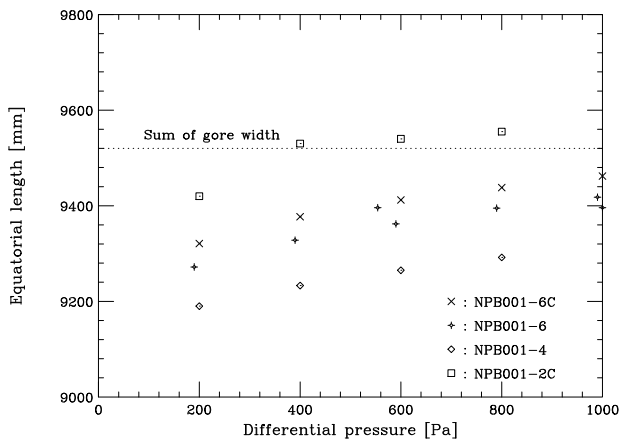


図 4: 周長と差圧の関係。

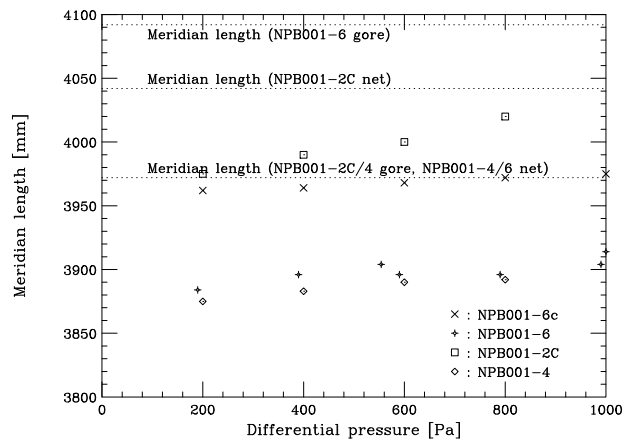


図 5: 子午線長と差圧の関係。

1 時間後、加圧を再開し、10,000 Pa に達することに成功した (図 2)。そのまま放置しところ、1 時間後、差圧は 5,000 Pa 程度まで下っていたが、気球は健全なままであった。気球頭部側のガス注入口を切開し、そこからガスを抜いて撤収した。

### 3.2 結果の評価

差圧の時間変化を図 3 に示す。周長と子午線長の圧力による変化を図 4、5 に示す。気球 NPB001-2C 気球はフィルム長よりも網線長が 2.7 % 長い気球、NPB001-4 気球はフィルム長と網線長を揃えた気球である [6]。NPB001-6、NPB001-6c はフィルム長が網線長よりも 3 % 長い。NPB001-6c の値は、NPB001-6 の計測値と異っていて、周長は 0.4%、子午線長は 1.8% 長い。NPB001-6c は 10,000 Pa まで加圧した後の計測結果であり、網に不可逆な伸びが発生した可能性がある。網は 90 N の力がかかった場合、1 % の不可逆な伸びが発生することが知られており [7]、10,000 Pa の差圧がかかることによって 179 N の力がかかることになる [4] ため、1.8 % の伸びは考えられる伸びである。しかし、周長の違いはこれよりも小さ

く、相似な形状で大きくなったわけではない。NPB001-6c 気球では、フィルムに子午線方向に余裕があり、1,000 Pa の差圧が印加された時点では横皺が入った状態である。すなわち、周方向のフィルムには余裕がなく、フィルムが伸ばされている一方で、子午線方向には余裕がある状態となる。周方向の差が小さいのは、圧力が小さい状態で周長を決めているのはフィルムであり、フィルムが不可逆な変化を受けていないことを反映しているため、と考えられる。

## 4 まとめと将来計画

網と皮膜の固定を二列ミシンで直線縫いする方法を開発した。この方法は、従来のダブル千鳥縫いにくらべ、固定にかかる時間が半分程度ですむこと、交点の位置をよりよく制御できること、縫い針が網を痛めるリスクが低いこと、がメリットである。この固定方法の有効性を確認するため、体積 10 m<sup>3</sup> の気球への網の固定をこの方法で実施し、膨張試験を実施した。気球は正常に展開し、ダブル千鳥縫いで固定した際に達成した 10,000 Pa 以上の耐圧性能を確認することができた。今後、2017 年 2 月にはこの方式で網を固定した体積 2,000 m<sup>3</sup> の気球の膨張試験を実施して有効性を確認した後、2017 年 6 月に体積 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)、および、挑戦的萌芽研究「対流圏界面観測用超小型気球の開発」(課題番号 26630448) の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] “NASA’s super pressure balloon at 40” <https://blogs.nasa.gov/superpressureballoon/2016/06/25/nasas-super-pressure-balloon-at-40/>
- [2] 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
- [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の開発 (NPB2-1)” 平成 28 年度大気球シンポジウム集録, ISAS16-SBS-019, 2016
- [4] 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 (大重量搭載用大型気球の開発)” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, 受理, 2017
- [5] 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—新ゴア形状の気球の展開試験—” 第 16 回宇宙科学シンポジウム講演集, P-212, 2016
- [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 (BS13-0 4 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、“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