

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)

斎藤 芳隆^{*1}、後藤 健^{*1}、中篠 恭一^{*2}、古田 良介^{*2}、堂本 航大^{*2}、秋田 大輔^{*3}、
松嶋 清穂^{*4}、田中 茂樹^{*4}、島津 繁之^{*5}

Development of a super-pressure balloon with a diamond-shaped net (BS13-04)

By

Yoshitaka SAITO^{*1}, Ken GOTO^{*1}, Kyoichi NAKASHINO^{*2}, Ryosuke FURUTA^{*2}, Kodai DOMOTO^{*2},
Daisuke AKITA^{*3}, Kiyoho MATSUSHIMA^{*4}, Shigeki TANAKA^{*4} and Shigeyuki SHIMADU^{*5}

Abstract

A light super-pressure balloon of which weight will be comparable to the weight of the zero-pressure balloon has been developed using a method to cover a balloon with a diamond-shaped net of high-tensile fibers. To solve a stress concentration problem found through the flight test of B12-02 in 2012, a new 3-m balloon setting the meridian length of the balloon gore film equal to the length of the net was developed. Through the ground inflation tests at room temperature and at $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, it was confirmed that the problem was solved and the balloon had sufficient capacity for the resist pressure. On May 25, 2013, a super-pressure balloon of the same model was launched in the tandem balloon configuration with 2 kg rubber balloons. It stayed at a level altitude before and after the sunrise. It was confirmed that the balloon could withstand the maximum differential pressure of 6,280 Pa, could withstand the differential pressure of 5,600 Pa for 2 hours, and there was a small gas leak through a hole with an area of 0.4 mm^2 which was also found in the ground leakage test. It was also found that the ascending speed after the sunrise was gentle with a low speed of 0.4 m/sec, and the gas temperature rose by $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ with a time constant of 3,000 sec. These results indicated that the improvement was adequate and there was no problem for the super-pressure balloon to fly in the environment of the stratosphere except for the problem of the small gas leak.

Keywords: Scientific Balloon, Super-pressure Balloon, Membrane Structure

概要

気球に高張力繊維の菱形の目の網をかぶせる手法を用いて、現状のゼロプレッシャー気球と同程度の重量のスーパープレッシャー気球の開発を進めている。2012年に実施したB12-02実験において発生した飛翔環境下での耐圧性能の劣化への対策として、フィルム長と網線長を一致させた直径3mの気球を開発し、地上での常温膨張試験、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ での低温膨張、破壊試験を通じて改良が有効であることを確認した。2013年5月25日に、同型のSP気球と2kgのゴム気球を連結させた超小型タンデム気球システムの飛翔試験として日昇をまたがって飛翔させる実験を実施し、 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ の低温環境下で耐圧性能6,280Paを有すること、2時間にわたり5,600Paの差圧に耐えること、地上実験でも観測されていた 0.4 mm^2 の小さな穴からのガス漏れが発生していることを確認した。また、日昇後の上昇速度は0.4 m/secと緩やかであり、気球内ガスの温度上昇の時定数3,000秒で、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ の上昇が発生することが判明した。この試験を通じて、改良を加えた気球が成層圏での飛翔にあたって、微少なガス漏れを除き、問題がないことが確認された。

重要語: 科学観測用気球、スーパープレッシャー気球、膜構造物

*1 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

*2 東海大学工学部

*3 東京大学生産技術研究所

*4 藤倉航装株式会社

*5 ナカダ産業株式会社

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これで実現することができ、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ー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当初から長時間飛翔気球の開発に注力し、現在も最重要課題の一つとして開発が進められている。

スーパープレッシャー気球(SP気球)は長時間飛翔を実現する有力な方法である。現在、多くの科学実験で利用されている気球はゼロプレッシャー気球(ZP気球)と呼ばれている気球であり、気球のガス圧力が気球尾部において大気圧と等圧になるよう、排気口が取り付けられている気球である。気球は打上げ時に全重量の数10%に相当する自由浮力を持つようにガスが詰られ、気球が上昇して満膨張に達すると余分なガスが排気口を通じて放出され、気球はレベルフライトを開始する。この時点では、ガスの浮力と全重量とは釣り合っているが、夜間、気球ガス温度が下がると体積が減少するためにガスの浮力が低下し、気球は降下する。飛翔を続けるためには、パラストと呼ぶ錘を投下し浮力の減少を補償するのだが、この量は全重量の10%程度に相当し、日没のたびにこの量が必要となるのが長時間飛翔の妨げとなっている。一方、SP気球は排気口がなく、大気圧よりも気球ガス圧力を10%強高く設定した気球である。夜間、ガス温度が低下した場合、ガス圧力が低下するのみで、体積が減少しないため、浮力の低下はなく長時間の飛翔が可能である。そもそもSP気球はJ.Charlesが1783年に最初の水素気球を飛翔させた際からの課題であったが、未だ大型気球では実用化されていない。また、SP気球にpumpkin型を利用する案は1970年にSmalley[2]が、1978年にRougeron[3]が提案していたが、それを実用化することはできずにいた。

NASAは1990年代の中頃から長時間飛翔気球(Ultra Long Duration Balloon: ULDB)の開発プロジェクトを開始した[4]。当初は、球形から開発が初められたものの、途中でLobed-pumpkin型へとデザインが変更された[5]。Lobed-pumpkin型は、気球の子午線方向に張られた比強度の大きな材料でつくられたロープの間に気球皮膜を張り出させた構造をとる気球である。皮膜の曲率半径を小さくできたことで、皮膜への要求強度が下がり、皮膜材料として軽いフィルムを利用することが可能となり、気球の自重を大幅に軽量化することが可能となった。開発の過程においては、気球が設計形状に展開せず、所期の耐圧性能を発揮できないという問題が発生した[6]が、ゴア形状を工夫(Flatfacet型を採用)することによってこの問題を解決した。2008年には体積201,000 m³の気球で南極を周回させる54日間の飛翔に成功し[7]、2011年には体積422,400 m³の気球で南極を周回させる22日間の飛翔に成功した[8]。2012年には体積532,200 m³の気球をエスレンジで放球し、160 Paの圧力差に1時間以上耐えることを実証している[9]。

我が国では、1999年に矢島[10]によって、Lobed-pumpkin型気球を製作する具体的な手法が提案され、それ以後、本格的な開発が着手された[11][12]。気球の展開の問題は2009年に見出され、Lobed-pumpkin型の赤道部に円筒を差し込んだ俵型[13]を開発することで解決された[14]。2010年には5,000 m³の気球を飛翔させ展開することに成功している[15]。

このように、近年、SP気球の技術には大きな進展があり、実用化が近付いている。しかし、この過程で現在のSP気球の問題点も明らかになってきた。気球自体の重量がかさみ、科学実験機器の可能搭載重量が不十分なのである。一般に、硬X線観測や宇宙線観測実験においては、大気の影響を避けるため、高度37 km、あるいは、残留大気圧5 hPa以下での飛翔が要求される。しかし、現状のJAXA、および、NASAのいずれのSP気球においても自重が重過ぎるため、この高度の実験は不相当である。たとえば、JAXAが製作した最大のSP気球は体積300,000 m³、自重1,150 kgであり、搭載可能重量は490 kgであった。一方、科学実験に供されている同体積のZP気球の重量は640 kgに過ぎず、搭載可能重量は1,000 kgである。したがって、SP気球の搭載可能重量はZP気球の半分に過ぎない。また、NASAにおけるSP気球の自重は文献には露わには示されていないが、気球体積、飛翔高度と搭載重量から推測するに、体積532,200 m³の気球において2,200 kgであり、高度37 kmを飛翔させる際の搭載可能重量は700 kgである。そもそも、NASAの気球は高度33.5 kmに1トンの科学観測機器を飛翔させることを目標に設計されている。

そこで、斎藤らは、長時間飛翔を実現するもう一つの方法として、ZP気球とSP気球とのタンデム気球システムを提案し、2010年から開発を進めてきた[16]。これは、SP気球が高耐圧ながら小さくすみ、多少の軽量化が可能であると共に、開発、製作コストを抑えることができるシステムであったためである。この気球の開発の過程において、斎藤らは、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ことで耐圧性能を向上させる手法を見出し、その実証に成功した[16]。この方法を用いると、網の目を細かくするほどフィルムへの要求強度が下がるため、目の細かい網を使うことで、フィルム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。当初の予定では、タンデム気球を大型化することで、軽量の長時間飛翔気球とすることを予定していたが、SP気球自体を軽量化する目処がたつ

たため、計画を変更して、この手法を用いて単独の SP 気球で長時間飛翔する気球の開発を最終目標として開発を進めることとした。

2011年に直径3mの気球により網をかける手法の原理実証試験を行った後、順次、大型の気球を開発し、地上試験、および、飛翔試験を通じて性能の確認を進めた[17]。2012年6月9日には、体積3,000 m³のSP気球(NPB3-1)と、体積15,000 m³のZP気球からなるタンデム気球システムの飛翔性能試験(B12-02実験)を実施した[18]。この結果、内部ガス圧と大気圧との差圧は最大814 Paに達し、25分間にわたる水平浮遊の間は正圧であったため、タンデム気球の飛翔時の挙動を測定するといった成果をあげた。しかし、400～500 Paの差圧が印加された時点で数×10⁻⁴ m²の穴が生じ、ガス漏れが発生するという問題も生じていた。

この問題を解消するため、対策を施した気球を開発し、地上での膨張試験によりその有効性を確認した上で、同型の気球の飛翔性能試験を行った。本論文は、この開発の経緯と飛翔試験の結果を報告するものである。まず、2章において、改良を施した気球の地上での常温、低温試験を通じた改良の有効性の評価結果を報告し、3章において同型の気球の地上試験結果、4章においてその気球の飛翔性能試験の経緯とその結果について報告する。5章において全体をまとめる。

2. NPB001-4 気球による地上試験

2.1 NPB3-1 気球の問題点

NPB3-1気球の飛翔性能試験においては、400～500 Paの差圧が印加された時点でガス漏れがはじまったが、その後、穴が大きく広がることなく最大814 Paに耐えていた。したがって、穴の原因は抜本的な強度不足でなく、局所的な応力集中によるものと推測される。気球の構造を見直したところ、以下の点に問題があることが判明した。

- NPB3-1気球においては、フィルム長が網線長よりも2.7%短かい設計となっていた。これは、網の目が開くことによって網の長さが短くなるため、赤道部の網の長さの平均的な短縮量である5.4%の半分だけフィルムの長さを短かくしたものである(図1)。網が展開した状態においては、赤道部の網の長さはフィルムの長さよりも短くなるため、網が子午線方向の力を受持ち、フィルムに余計な力がかかることはないのだが、極に近い部分は網目が開かず、フィルムが網の長さになるまで伸ばされることになる。
- 極においては、網の端部をリング状に加工したロープに固定しているのだが、そこに遊びがあり、網に力がかかる前にフィルムに力がかかり伸ばされることが判明した。これは、ロープの加工時の縫い縮み、張力がかかった際のロープの伸び、ロープの太さの影響を考慮していなかったことによるものである。

そこで、網線長とフィルム長を同一とし、かつ、網の端部の遊びをなくす改良を施した直径3mの気球(NPB001-4)を製作し、改良の有効性を評価した。気球の諸元を表1に示す。先に製作したNPB001-2気球とは、ゴア形状は完全に同一であるが、フィルム厚が半分、網線長が長い、という違いがある。

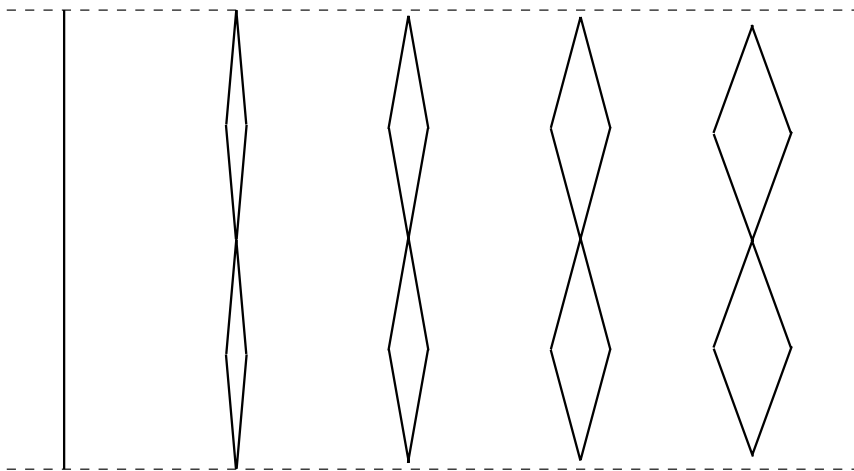


図1 菱形の目の網が横方向に広がると縦方向の長さが縮まる様子。気球に網をかぶせる場合、緯度によって横方向への広がりが異なるため、縦方向の長さ変化の程度も異なる。NPB3-1気球においては、赤道部において網の縦方向の長さは広がる前と比較して5.4%短くなるが、極部においては短縮は発生しない。したがって、膨張時の気球の子午線長は、短縮量の最大値と最小値の平均値である2.7%程度、展開前の網の長さよりも短くなる。そこで、NPB3-1気球のフィルム長は網線長よりも2.7%短かくした。

2.2 NPB001-4 気球の常温膨張試験

2.2.1 試験の経緯

2013年2月4日、藤倉航装船引工場風洞実験室にてNPB001-4気球の常温膨張試験を実施した。当日の気温は4℃だった。気球の膨張の様子を120度ずつ離れた水平3方向から、および、上からの4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5kPaレンジのものを用い、その電圧値を0.1秒ごとにデータロガーで記録した。

気球を天井から吊り下げた後、ガスボンベ1本分のヘリウムガスを最初に注入し、その後、空気で膨張させた。満膨張になった状態においても気球には横方向にしわが入っていた(図2、3)。これは、網目が広がることで、網線よりもフィルムの子午線長が長くなるためである。200、400、600、800Paにおいて周長と子午線長を計測した。結果を表2に示す。800Paにおいては、赤道部の網目の広がり、および、4本のロードテープに沿って、網目の縦方向の間隔を測定した(表3、4)。800Paの状態ではガス注入口を閉じ、一時間その状態で保持し、気密性の評価を行った。その後、空気の注入を再度行い、圧力を3,000Paまでかけても損傷のないことを確認した(図4)。

表1 網をかぶせた気球の諸元

| 気球番号 | NPB3-1 | NPB001-2 | NPB001-4 |
|------------------------|--------|----------|----------|
| 公称容積 (m ³) | 3,000 | 9.5 | 9.5 |
| 直径 (m) | 20.6 | 3.03 | 3.03 |
| 全長 (m) | 27.0 | 3.97 | 3.97 |
| 高さ (m) | 12.3 | 1.80 | 1.80 |
| ゴア数 | 30 | 20 | 20 |
| 最大ゴア幅 (mm) | 2156 | 516 | 516 |
| フィルム厚 (μm) | 10 | 20 | 10 |
| 網線強度 (N) | 415 | 415 | 415 |
| 縦ロープ数 | 3015 | 402 | 402 |
| 網線長 (m) | 26.3 | 3.86 | 3.97 |
| 網交点間隔 (mm) | 101 | 101 | 101 |
| 赤道ロープ間隔 (mm) | 43 | 48 | 48 |
| 弁座直径 (mm) | 530 | 300 | 300 |
| 常温耐圧予想値 (Pa) | 3,600 | 10,000 | 5,000 |
| 気球重量 (kg) | 66 | 3 | 3 |

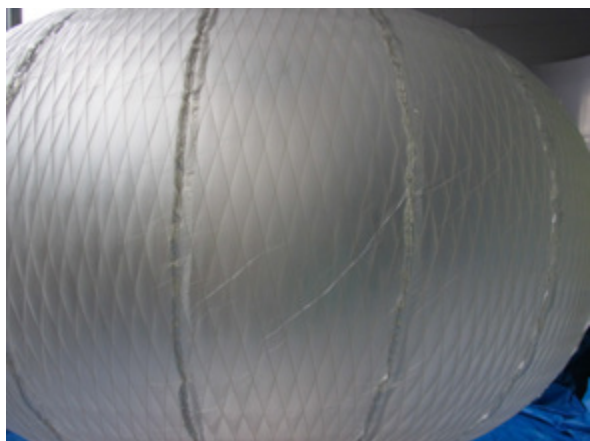


図2 赤道部のしわ

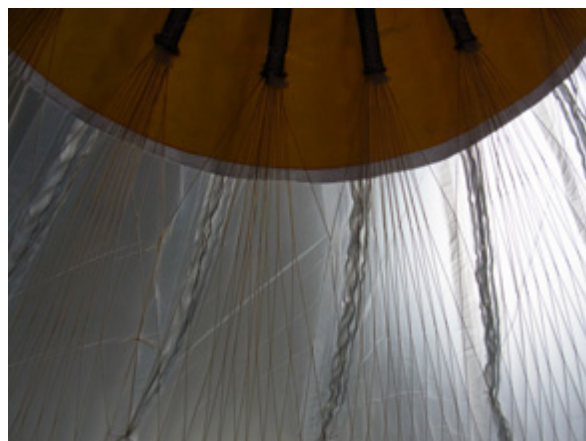


図3 極部のしわ

表 2: 赤道長と子午線長

| 差圧 [Pa] | 赤道長 [mm] | 子午線長 [mm] |
|---------|----------|-----------|
| 200 | 9190 | 3875 |
| 400 | 9233 | 3883 |
| 600 | 9265 | 3890 |
| 800 | 9292 | 3892 |

表 3 赤道上のパネル番号ごとの網の交点の幅 [mm]

| パネル番号 | 幅 | | | | | | | | | |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 54 | 54 | 47 | 45 | 42 | 43 | 43 | 42 | 51 | 54 |
| 2 | 54 | 55 | 56 | 40 | 45 | 42 | 38 | 45 | 48 | 48 |
| 3 | 45 | 59 | 47 | 42 | 40 | 45 | 45 | 43 | 50 | 52 |
| 4 | 49 | 51 | 48 | 50 | 46 | 46 | 46 | 45 | 46 | 45 |
| 5 | 51 | 48 | 46 | 45 | 43 | 45 | 45 | 47 | 49 | 50 |
| 6 | 48 | 48 | 46 | 44 | 43 | 43 | 44 | 47 | 51 | 52 |
| 7 | 47 | 49 | 48 | 45 | 45 | 44 | 44 | 46 | 51 | 50 |
| 8 | 45 | 46 | 42 | 43 | 42 | 43 | 45 | 50 | 55 | 55 |
| 9 | 49 | 50 | 43 | 41 | 43 | 45 | 47 | 48 | 50 | 52 |
| 10 | 51 | 51 | 47 | 46 | 45 | 45 | 45 | 43 | 50 | 48 |
| 11 | 42 | 46 | 50 | 43 | 43 | 47 | 46 | 45 | 48 | 48 |
| 12 | 50 | 50 | 47 | 43 | 46 | 46 | 44 | 43 | 46 | 44 |
| 13 | 45 | 48 | 47 | 47 | 46 | 44 | 40 | 47 | 45 | 45 |
| 14 | 48 | 50 | 52 | 47 | 45 | 45 | 44 | 45 | 43 | 35 |
| 15 | 45 | 48 | 46 | 47 | 46 | 46 | 45 | 47 | 48 | 45 |
| 16 | 50 | 48 | 49 | 46 | 45 | 45 | 46 | 43 | 44 | 47 |
| 17 | 50 | 49 | 50 | 46 | 45 | 43 | 43 | 43 | 45 | 45 |
| 18 | 50 | 51 | 49 | 46 | 45 | 43 | 43 | 45 | 47 | 45 |
| 19 | 45 | 48 | 47 | 46 | 44 | 45 | 44 | 48 | 46 | 48 |
| 20 | 55 | 48 | 47 | 44 | 43 | 45 | 43 | 41 | 49 | 49 |

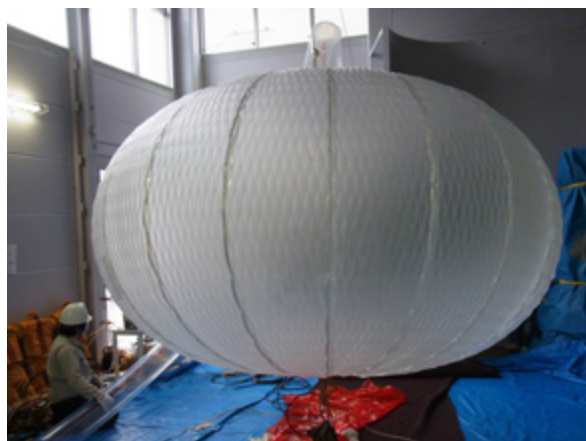


図 4 3,000 Pa が印加された状態

2.2.2 圧力の変動

図5、6に圧力の時間変化を、図7、8に室温の時間変化を示す。14時30分から15時30分にかけてがガス漏れ試験の時間帯である。当初680 Paだった差圧は30分程度かけて安定し、結局560 Paと120 Pa小さくなっている。

表4 子午線方向の間隔 [mm]

| ロードテープ番号 | 1 | 6 | 11 | 16 | 平均 |
|------------------------|------|------|------|------|-------|
| 極点からフェルトの端 | 305 | 310 | 306 | 307 | 307.0 |
| 極点からロープリングの端 | 185 | 185 | 180 | 185 | 183.8 |
| 極点から最初の網の交点まで (0-1 間隔) | 560 | 560 | 560 | 565 | 561.3 |
| 1-2 間隔 | 202 | 203 | 201 | 203 | 202.3 |
| 2-3 間隔 | 200 | 200 | 200 | 203 | 200.8 |
| 3-4 間隔 | 200 | 200 | 201 | 197 | 199.5 |
| 4-5 間隔 | 198 | 200 | 198 | 201 | 199.3 |
| 5-6 間隔 | 198 | 195 | 195 | 197 | 199.3 |
| 6-7 間隔 | 195 | 200 | 195 | 196 | 196.5 |
| 7-8 間隔 | 195 | 196 | 198 | 196 | 196.3 |
| 極点から8までの和 | 1948 | 1954 | 1948 | 1958 | 1952 |

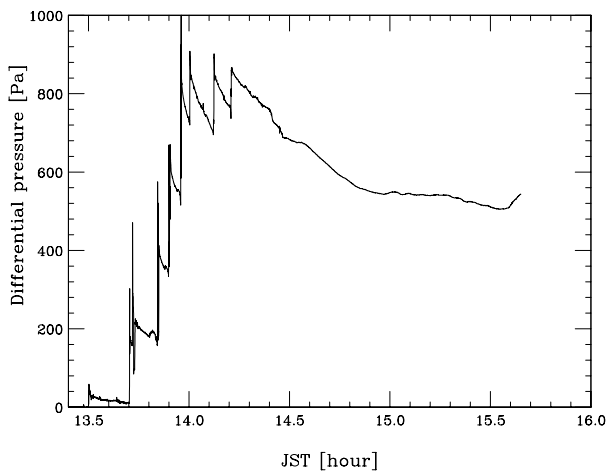


図5 膨張試験、ガスもれ試験時の差圧の時間変化

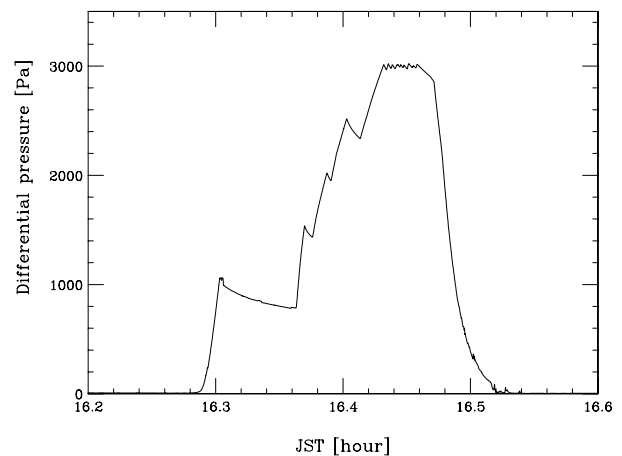


図6 加圧試験時の差圧の時間変化

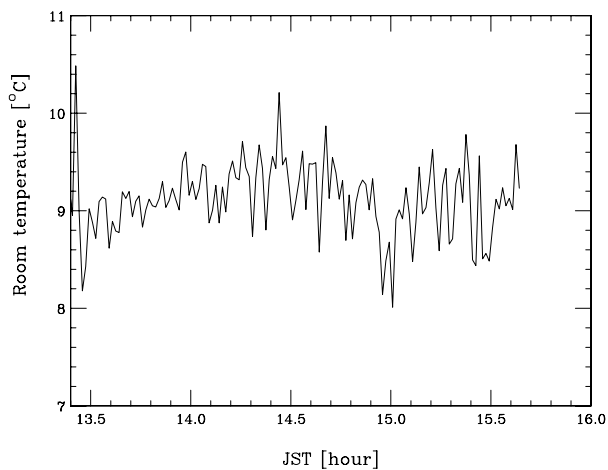


図7 膨張試験、ガスもれ試験時の気温の時間変化

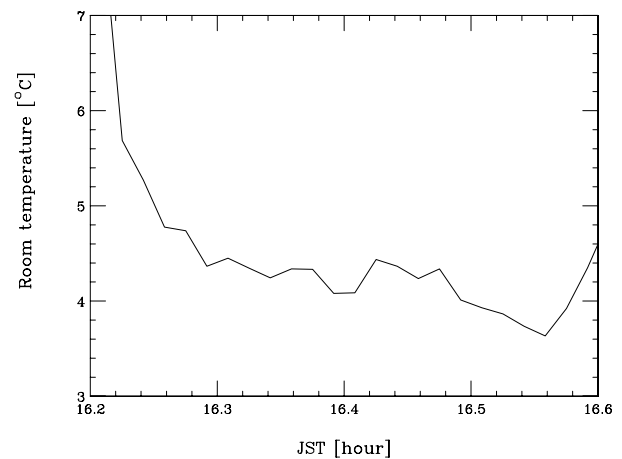


図8 加圧試験時の気温の時間変化

まず、圧力の下がる速度が途中で低下しているので穴があるとは考えにくいですが、これが小さな穴からの漏れだと考えて穴の大きさの上限値を求めてみる。気球の体積は 9.6 m^3 であるから、漏れ出た 120 Pa の差圧分のガスの体積 V は、

$$V = 9.6 \times 120 / 101300 = 1.1 \times 10^{-2} \text{ [m}^3\text{]} \quad (1)$$

である。内部のガスは、ヘリウムガスと空気の混合気体であり、その比は概ね 1 対 1 であるから、ガスの密度は概ね 0.7 kg/m^3 である。この密度を用いると、ベルヌーイの定理より、ガスの流速 v は、

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 620}{0.7}} = 42 \text{ [m/sec]} \quad (2)$$

である。従って、穴の大きさ A の上限値は、

$$A = \frac{1.1 \times 10^{-2} / (30 \cdot 60)}{42} = 1.5 \times 10^{-7} \text{ [m}^2\text{]} = 0.15 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3)$$

と求まる。飛翔試験で想定している高度 18.5 km 、気圧 70 hPa 、気温 $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ において、 $5,000 \text{ Pa}$ の圧力がかかった際のガス流速 v' は、

$$v' = \sqrt{\frac{2 \cdot 5000}{0.18 \frac{70}{1013} \frac{273}{213}}} = 790 \text{ [m/sec]} \quad (4)$$

である。この穴から実験の継続時間である 5 時間で漏れるガス量 V' は、

$$V' = 790 \cdot 1.5 \times 10^{-7} \cdot 5 \cdot 3600 = 2.1 \text{ [m}^3\text{]} \quad (5)$$

と全体積の 20 % であり、圧力の変化にして 20 % である。したがって、仮にこの大きさの穴があったとしても何とか実験が成立するレベルの大きさである。

次に、実際に生じた現象について検討する。考えられる可能性は、ガス温度変化、体積膨張、外気圧変化、の三通りである。

まず、ガス温度変化の可能性を検討する。 120 Pa の圧力変化は、 $1,013 \text{ hPa}$ の気圧に対する変化でみると、0.12 % の減圧である。これは、温度の変化で考えると 0.34 K の変動に相当する。この変化は、外気温が 0.34 K 上昇するのでも、気球内のガス温度が 0.34 K 上昇するのでもよい。図 7 の外気温の時間変化をみると、差圧と相関をもって気温が変化しているわけではなく、気温による影響ではないと考えられる。

外気温は差圧の変化よりも早いタイムスケールで変動しており、部分的に冷えた空気と暖かい空気がまざりあわずに混在している環境だったようである。実験を行った風洞試験棟は外気と扉一つでつながっている環境であり、破裂の際のガラス窓などへの損傷を避けるため、16 時 20 分頃に窓や扉を開けたところ、図 8 にあるように、部屋の気温が下がると共に早い時間スケールでの気温の変動がおさまった。締め切った状況において、時に侵入してくる外気が部分的に冷えた空気に対応し、部屋にあった空気が暖かい空気に対応しているものと考えられる。

次に、体積変化の可能性を検討する。気球フィルムがクリープして体積が増えていった可能性が考えられる。ガスが注入されて張力が増したことでフィルムや網が伸び、気球の体積が膨らんだことで圧力が下がる可能性である。圧力が減少する現象は、加圧した直後には毎度見られていることから、この可能性が考えられる。

最後に、外気圧が変動している可能性が残るが、外気圧の計測は行っていないため、定量的には評価できない。

2.2.3 赤道長と子午線長

図 9、10 に赤道長と子午線長を圧力の関数として示す。NPB001-4 は、NPB001-2 と比較して網の長さが 2.7 % 短い。全体形状が相似で小さくなっているとすると、赤道長と子午線長も同じ割合だけ小さくなる。同じ圧力で二つの気球での値の比を求めると 2.5 ~ 3.2 % であり、気球は相似形で小さくなっているものと考えられる。

2.2.4 赤道部の網線間隔

図 11 に赤道部の網線間隔の頻度分布を示す。平均間隔が $47.1 \pm 0.3 \text{ mm}$ 、その標準偏差は $3.5 \pm 0.2 \text{ mm}$ であった。この分布は、図 12 に示した NPB001-2 気球においては、平均間隔が $47.7 \pm 0.3 \text{ mm}$ 、その標準偏差は $5.9 \pm 0.2 \text{ mm}$ であった。二つの気球の子午線方向のフィルムの長さは等しく、網の長さは NPB001-2 気球の方が 2.7 % 長い。いずれも 20 パネルを貼り合せてできているが、NPB001-4 気球においては 20 本すべてのロードテープ上で網と気球を固定しているのに対して、NPB001-2 気球は一本おきに 10 本のロードテープ上で固定としていた。NPB001-4 気球の方が分布が狭いのは、

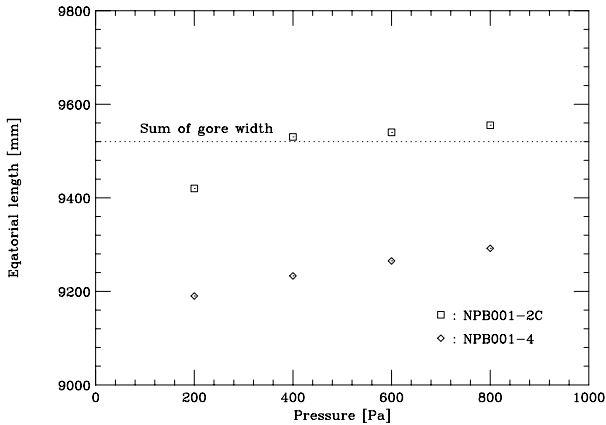


図 9 圧力による赤道長の変化

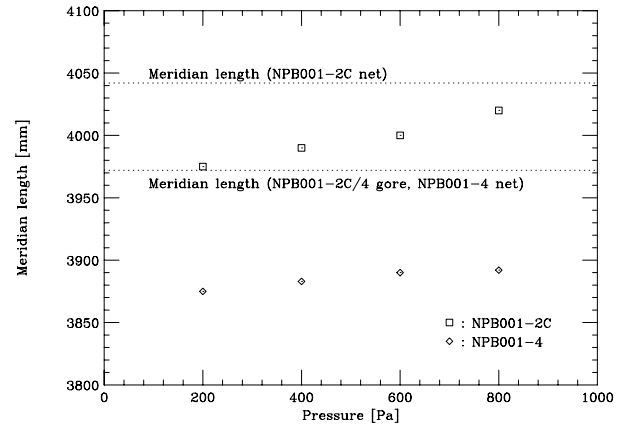


図 10 圧力による子午線長の変化

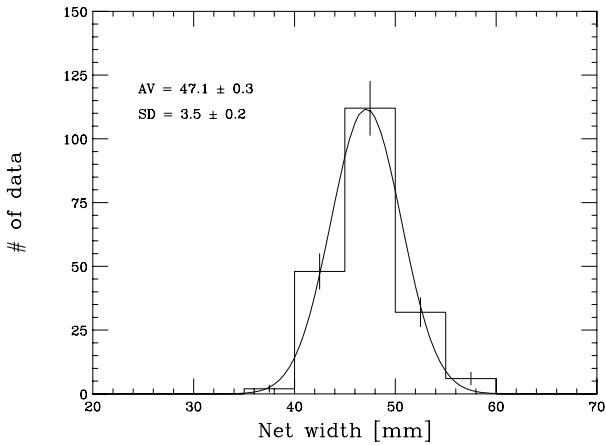


図 11 NPB001-4 気球における赤道部網線間隔の頻度分布

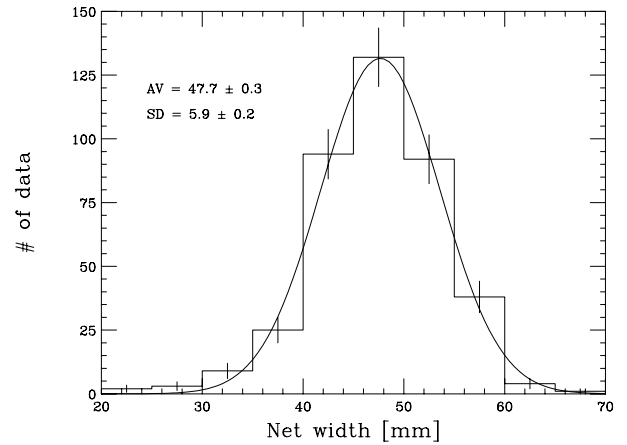


図 12 NPB001-2 気球における赤道部網線間隔の頻度分布

気球と固定する間隔が狭まったためと考えられる。網線の子午線長が短くなったことで気球の大きさが小さくなったために、平均間隔が狭まると予想され、それを示唆する結果も得られているが、違いは 2σ に過ぎず、統計的に有意に狭まったとはいえない。なお、すべての網線間隔の和は、9,294 mm であり、赤道長の計測値 9,292 mm とほぼ一致する。

2.2.5 子午線方向の網線間隔

表 4 の子午線方向の網線間隔をみると、極から赤道に向かって少しずつ網が開き、網線間隔が短くなっていることがわかる。

7-8 間隔の平均値は 196.3 mm である。交点 8 は赤道であり、横方向の間隔の平均値は 47.1 mm であった。この二つの値から網の交点間隔を求めると、

$$\sqrt{\left(\frac{196.3}{2}\right)^2 + \left(\frac{47.1}{2}\right)^2} = 100.9 \text{ [mm]} \quad (6)$$

となり、設計値の 101 mm と同程度であった。300 m 製作した網において間隔を計測したところ、網の中央部で 101.6 mm、60 m 製作した網では、102.1 mm であった。この計測では、網の長手方向の揺らぎについても計測しており、100.3 mm ~ 103.0 mm の値であった。従って、縦横の交点間隔から推定された網線上での交点間隔 100.9 mm は、取り得る数値である。

中心から交点 8 までの間隔の和は、気球の周長の半分に対応する。この値の平均値の倍は 3,904 mm であり、これは 800 Pa 印加時の子午線長の 3,892 mm とほぼ一致する。

2.3 NPB001-4 気球の低温膨張試験

2.3.1 試験の経緯

常温膨張試験を実施した後、気球の点検を行ったところ、4箇所外力によって伸ばされた傷が見付かった。それらの補修作業を行った後、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ での低温膨張、破壊試験を実施した。実験は2013年2月7日に情報・システム研究機構国立極地研究所の低温環境実験室[19]にて行った。セットアップを図13に示す。気球は壁の間に張ったロープに吊り下げている。 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ に設定されている低温環境実験室にて気球を膨張させ(図14)、気球尾部に取り付けた圧力ポートから隣接する常温の超低温冷凍庫室に設置した差圧計まで圧力計測用のチューブを引っ張って差圧の計測を行った。差圧計は $\pm 2.5\text{ PSI}$ レンジものを用い、その電圧値を1秒ごとにデータロガーで記録した。気球の膨張の様子は120度ずつ離れた水平3方向のビデオカメラで撮影した。

気球は空気で膨張させた。200、400、600、800 Paにおいて周長と子午線長を計測した。結果を表5に示す。800 Paにおいては、赤道部の網目の広がり、および、4本のロードテープに沿って、網目の縦方向の間隔を測定した(表6、7)。その後、800 Paの状態ではガス注入口を閉じ、1時間半、その状態で保持した。

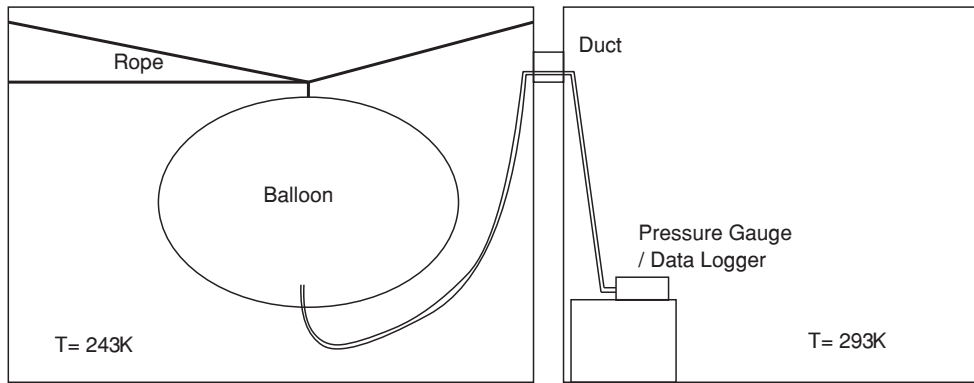


図13 NPB001-4 低温破壊試験のセットアップ



図14 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ の低温環境実験室で膨張させた気球

表5 赤道長と子午線長

| 差圧 [Pa] | 赤道長 [mm] | 子午線長 [mm] |
|---------|----------|-----------|
| 200 | 9230 | 3944 |
| 400 | 9252 | 3945 |
| 600 | 9272 | 3948 |
| 800 | 9290 | 3952 |

次に、破壊圧を測定するため、乾燥空気ポンプを用いて空気を注入して加圧した(図 15)。最大圧力 7,000 Pa に達したところで、差圧の上昇が鈍ったため、ガスの注入を中止したところ、差圧が下がるのが観測された。気球に近付き、穴を探したところ、気球の尾部付近から空気が流れ出ていることがわかったが、穴の位置を特定することはできなかった。気球からガスを放出して畳み、撤収した。

表 6 赤道上のパネル番号ごとの網の交点の幅 [mm]

| パネル番号 | 幅 | | | | | | | | | |
|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 50 | 47 | 44 | 43 | 44 | 47 | 44 | 43 | 52 | 52 |
| 2 | 48 | 51 | 53 | 39 | 44 | 42 | 42 | 45 | 46 | 47 |
| 3 | 53 | 56 | 43 | 39 | 38 | 45 | 43 | 43 | 48 | 48 |
| 4 | 50 | 48 | 48 | 48 | 47 | 47 | 46 | 44 | 47 | 43 |
| 5 | 50 | 49 | 49 | 48 | 44 | 46 | 47 | 48 | 47 | 50 |
| 6 | 51 | 54 | 48 | 47 | 43 | 42 | 42 | 43 | 46 | 48 |
| 7 | 45 | 51 | 47 | 46 | 45 | 46 | 45 | 43 | 46 | 47 |
| 8 | 52 | 54 | 48 | 45 | 44 | 43 | 43 | 44 | 47 | 44 |
| 9 | 48 | 44 | 43 | 41 | 41 | 42 | 46 | 48 | 53 | 53 |
| 10 | 50 | 48 | 44 | 46 | 44 | 38 | 44 | 44 | 52 | 51 |
| 11 | 46 | 47 | 50 | 40 | 39 | 41 | 44 | 48 | 53 | 54 |
| 12 | 52 | 52 | 47 | 42 | 39 | 39 | 43 | 45 | 50 | 48 |
| 13 | 47 | 50 | 48 | 48 | 40 | 43 | 41 | 47 | 50 | 51 |
| 14 | 49 | 44 | 46 | 42 | 42 | 41 | 54 | 49 | 51 | 50 |
| 15 | 48 | 49 | 47 | 44 | 42 | 42 | 44 | 46 | 49 | 50 |
| 16 | 50 | 47 | 45 | 44 | 41 | 42 | 42 | 43 | 47 | 51 |
| 17 | 50 | 48 | 47 | 42 | 43 | 42 | 45 | 47 | 50 | 50 |
| 18 | 48 | 43 | 41 | 40 | 40 | 42 | 47 | 50 | 52 | 52 |
| 19 | 45 | 45 | 46 | 44 | 44 | 45 | 45 | 49 | 50 | 50 |
| 20 | 51 | 42 | 48 | 42 | 43 | 46 | 44 | 45 | 52 | 54 |

表 7 子午線方向の間隔 [mm]

| ロードテープ番号 | 1 | 6 | 11 | 16 | 平均値 |
|----------------------|------|------|------|------|-------|
| 極点からフェルトの端 | 314 | 312 | 305 | 308 | 309.8 |
| 極点からロープリングの端 | 185 | 190 | 185 | 185 | 186.3 |
| 極点から最初の交点まで (0-1 間隔) | 572 | 574 | 563 | 568 | 569.3 |
| 1-2 間隔 | 200 | 198 | 202 | 200 | 200 |
| 2-3 間隔 | 202 | 200 | 200 | 198 | 200 |
| 3-4 間隔 | 202 | 199 | 202 | 200 | 200.8 |
| 4-5 間隔 | 200 | 200 | 202 | 198 | 200 |
| 5-6 間隔 | 198 | 198 | 198 | 198 | 198 |
| 6-7 間隔 | 196 | 197 | 197 | 200 | 197.5 |
| 7-8 間隔 | 196 | 196 | 200 | 198 | 197.5 |
| 極点から 8 までの和 | 1966 | 1962 | 1964 | 1960 | 1963 |

2.3.2 破壊箇所の調査

宇宙研で気球を展開し、破壊箇所を調査した。その結果、図 16 にあるように、圧力計測用ポートの溶着部が 4 cm 程度に渡り破損していることが判明した。

圧力計測用ポートは折径 40 mm であり、半径にすると 13 mm である。ここに 6,800 Pa の圧力が加かった際に働く張力 T は、

$$T = 6800 \cdot 0.013 = 88 \text{ [N/m]} \quad (7)$$

に過ぎない。圧力計測用ポートに用いられているポリエチレンフィルムの破断強度¹は 3000 N/m 以上と考えられ、これにくらべると極めて小さい値であり、溶着強度が不十分だったものと考えられる。

気球の尾部は構造が複雑であるため溶着機でなく、こてを使っている。一般に、こてによる溶着は強度の制御が困難であるため、通常は低温テープを上から貼り付け、低温テープで強度をもたせる設計とするが、この部分は低温テープでの保護はなされていなかったことが問題であった。

2.3.3 圧力の変動

図 17 に膨張試験時の差圧の時間変化を示す。14 時 30 分から 15 時 50 分にかけては、ガス注入口を閉じている。当初 800 Pa だった差圧は、一度 250 Pa まで低下した後、上昇に転じて、最後には 900 Pa に達している。ガス漏れが十分小さいことは明らかである。圧力変動の要因としては、差圧計の参照圧をとっている超低温冷凍庫室の気圧が変動している



図 15 6,000 Pa 印加時の気球



図 16 圧力計測ポートの破損箇所。左図中央の溶着部が剥離している。右図は剥離した溶着部にカッターの刃を挿入したところ。4 cm にわたる剥離が発生している。

¹ 20 μm 厚のポリエチレンフィルムの -40 °C における破断強度は 80 MPa であり、フィルムが厚いほどこの値は大きくなる傾向がある。

可能性や、部屋の温度制御のために吹き出す冷風が吹き出しているか否かで、気球内ガスの気温が変化している可能性が考えられる。

図 18 に破壊試験時の差圧の時間変化を示す。16 時 22 分頃に差圧の上昇速度の変化が見られ、ビデオに記録されていた音声からは、破裂音が聞こえるため、この時点で穴があいたものと考えられる。この圧力は 6,800 Pa であった。

2.3.4 赤道長と子午線長

図 19、20 に赤道長と子午線長を圧力の関数として示す。常温での結果と比較すると、赤道長は圧力が小さい場合には長く、上がるにつれて一致している。200 Pa での違いは 0.4 % 程度である。一方、子午線長は -30 °C での測定の方が 1.5 % 程度長い。これは、常温で 3,000 Pa まで加圧したことによる影響と考えられる。網をかけた気球の形状は、実験的にもかぼちゃ型よりも縦長になることが知られている [16]。したがって、かぼちゃ型で製作された気球は、低圧時はかぼちゃ型であるものの、圧力が増加するにつれて子午線長が選択的に伸ばされ、縦長の形状へと変形してゆくと考えられる。常温での加圧試験において、周方向にくらべ子午線方向での変形が大きく、それによって塑性変形した効果を見ているものと考えられる。

2.3.5 赤道部の網線間隔

図 21 に赤道部の網線間隔の頻度分布を示す。平均間隔が 46.4 ± 0.3 mm、その標準偏差は 4.1 ± 0.2 mm であった。これは常温での値、平均間隔 47.1 ± 0.3 mm、標準偏差 3.5 ± 0.2 mm とは、平均間隔も標準偏差も有意に異っており、低温の方が網線間隔が狭く、ばらつきは大きくなっている。分布の形状も常温では極めて正規分布に近いが、-30 °C での分布は正規分布からのずれがみられる。網線間隔の分布を決定する要因は不明だが、温度によってこの分布が変化すること

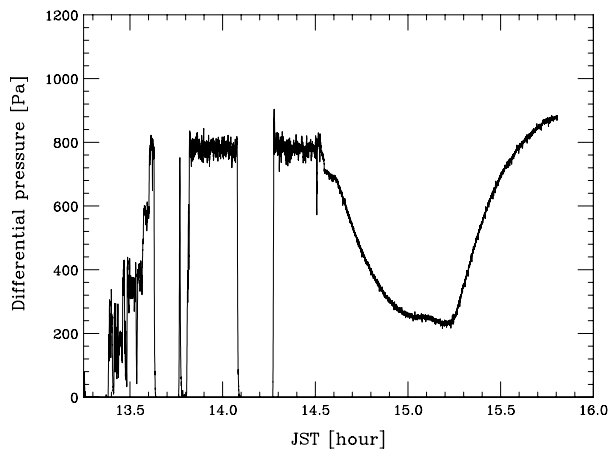


図 17 膨張試験時の差圧の時間変化

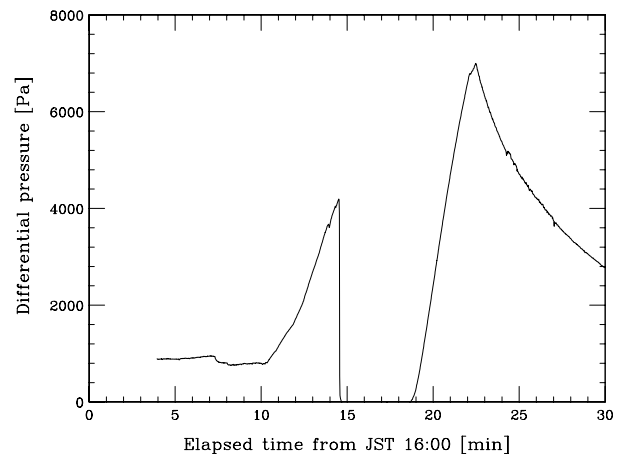


図 18 破壊試験時の差圧の時間変化

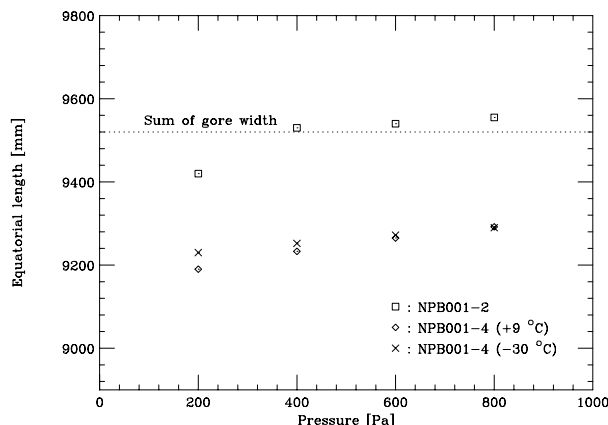


図 19 圧力による赤道長の変化

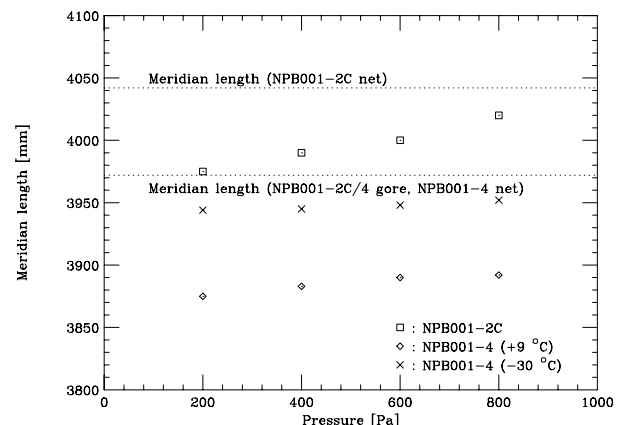


図 20 圧力による子午線長の変化

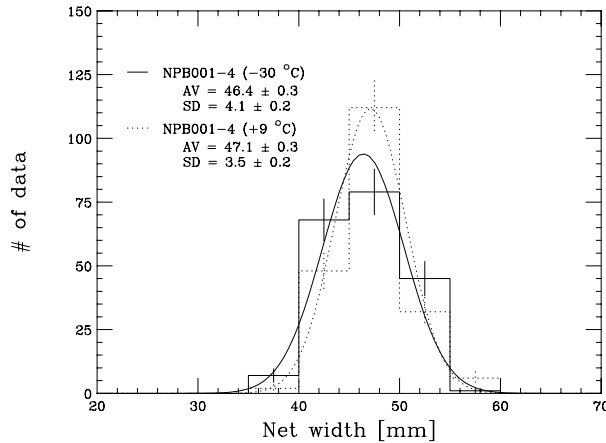


図 21 NPB001-4 気球における赤道部網線間隔の頻度分布

がわかった。要因の候補としては、網とフィルムとの摩擦や、網の剛性が考えられる。なお、すべての網線間隔の和は、9,248 mm であり、これは、赤道長の計測値 9,290 mm とほぼ一致する。

2.3.6 子午線方向の網線間隔

表 7 に子午線方向の網線間隔を示す。極から赤道に向かって少しずつ網が開き、網線間隔が短くなっている。

7-8 間隔の平均値は 197.5 mm である。交点 8 は赤道であり、横方向の間隔の平均値は 46.4 mm であった。この二つの値から網の交点間隔を求めると、

$$\sqrt{\left(\frac{197.5}{2}\right)^2 + \left(\frac{46.4}{2}\right)^2} = 101.4 \text{ [mm]} \quad (8)$$

となる。この値は、設計長 101 mm とも、常温で同様の計算で求めた値 100.9 mm とも同程度である。網の材料であるベクトランの伸びの温度係数は -6.0×10^{-6} であり、温度による変化は小さいことが予想されており、今回の結果はそれを裏付けるものである。また、中心から交点 8 までの間隔の和は、気球の子午線長の半分に相当する。この値の倍は 3,926 mm であり、これは 800 Pa 印加時の子午線長の 3,952 mm とほぼ一致する。

2.4 NPB001-4 の低温破壊試験

気球本体の耐圧性能を評価するため、気球を補修して再度低温破壊試験を実施した。このため、ガス圧力計測ポートの破損部を溶着して補修し、溶着代を手で引っ張って強度が十分あることを確かめた。また、極に近い部分の網に破損が見受けられたので、その補修もあわせて行った。

2.4.1 実験の経緯

試験は 2013 年 7 月 2 日、3 日に情報・システム研究機構国立極地研究所の低温環境実験室にて行った。セットアップは前回実験と同じである。

気球は空気で膨張させた。確認のため、800 Pa において赤道長を計測したところ、9,330 mm であった。これは、前回の値 9,290 mm と同程度である。その後、空気ポンプを用いて加圧したところ、破裂音と共に、気球が破壊した。図 22 に破壊箇所の写真を示す。赤道より縦方向に半目離れた広めの網目の中央部に穴があった。その後、気球からガスを放出させて畳んだ。

次に、フィルムの $-30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ における二軸引っ張り時の特性を評価するため、 $10 \mu\text{m}$ 厚フィルムで作った二つのシリンダー気球に空気を注入し、降伏する圧力を測定する試験を行った。この気球は、折径 150 cm の円筒状に成膜されたフィルムの両端を塞ぐことによって気球としたもので、円筒部分の長手方向は 2 m、半径は 95.5 cm である。当初、破壊圧も計測する予定であったが、フィルムが降伏して気球の直径は圧力とともに大きく膨張したため、破壊まで至らずに、膨張試験を終了とした。

2.4.2 破壊圧の考察

図 23 に NPB001-4 気球の差圧の時間変化を示す。ガスボンベによる加圧時には、差圧は直線的に変化し、最大圧は 9,370 Pa であった。図 24 は、シリンダー気球の膨張試験時の差圧の時間変化を示したものである。いずれの気球も 450 Pa で降伏していることがわかる。450 Pa の差圧をシリンダーの周方向の張力だけで支えていると考えて、その差圧とシリンダー気球の半径 95.5 cm の積を膜厚 10 μm で除して一軸換算強度を求めると、43 MPa となる。

シリンダー気球の降伏時の伸びを一軸での引張試験結果から推定する。文献 [20] によると、10 μm 厚フィルムの一軸引張試験では、23 $^{\circ}\text{C}$ における TD 方向の降伏点強度は 9.2 MPa、その際の伸びは 7.0 %、-40 $^{\circ}\text{C}$ での値はそれぞれ 26.1 MPa、2.6 % である。この二つの計測値から -30 $^{\circ}\text{C}$ の値を一次式で補間して推定すると、それぞれ 23.4 MPa、3.3 % となり、それぞれ、23 $^{\circ}\text{C}$ における値の 2.5 倍、および、0.47 倍に相当する。



図 22 NPB001-4 気球の破壊箇所

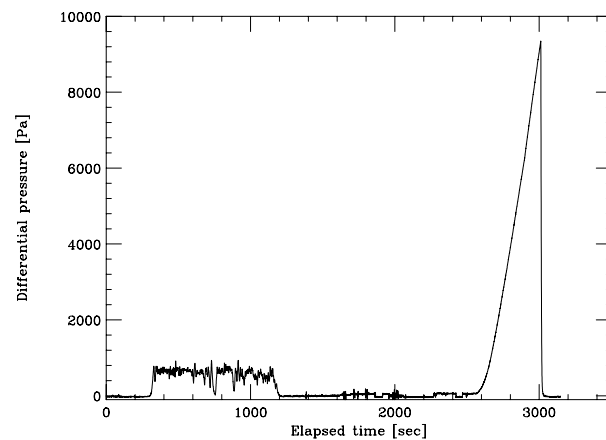


図 23 NPB001-4 気球の膨張試験時の差圧の時間変化

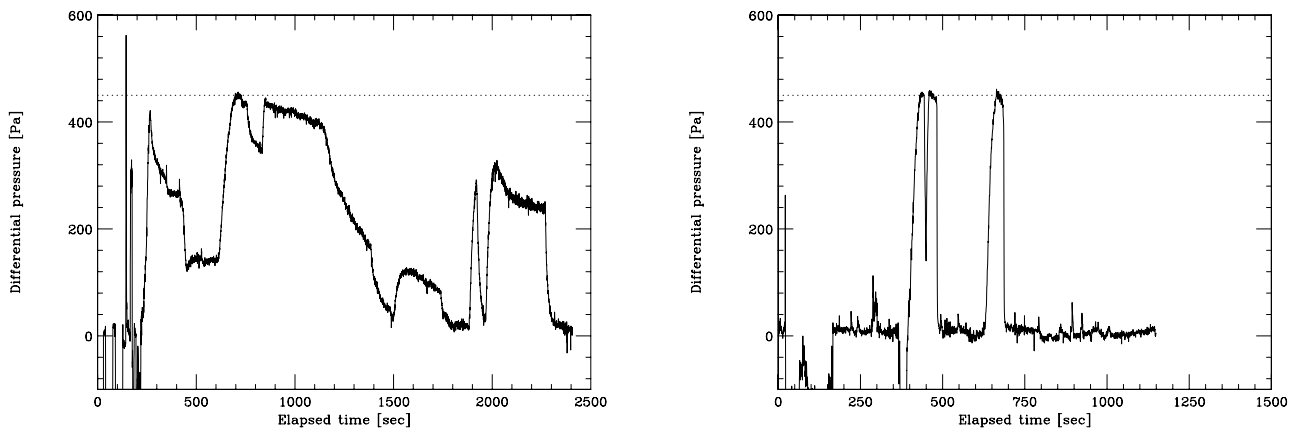


図 24 シリンダー気球膨張試験時の差圧の時間変化。点線は 450Pa

一方、シリンダー気球の膨張破壊試験では、常温での降伏圧は 205 Pa、伸びは 15 %、-30 °Cでの降伏圧は 450 Pa である。両者の降伏圧の比は 2.2 倍であり、一軸引張試験で降伏点強度の比 2.5 倍と同程度である。そこで、シリンダー気球の膨張試験における-30 °Cでの降伏時の伸びと常温での伸びの比が、一軸引張試験における降伏点伸びの比 0.47 倍と同一であると仮定すると、-30 °Cでのシリンダー気球の膨張試験における伸びは 7 % と推定できる。

この値を用いて、文献 [16] の方法で耐圧性能を求める。加圧された気球フィルムは網よりも張り出し、弧長は弦長よりも長くなる。両者の比は、曲率半径と半弦長の比の関数として求めることができる。この関係を用いると、弧長が弦長よりも 7 % 長くなる曲率半径と半弦長の比は 0.592 であることがわかる。この気球における弦長を設計周長の 1/200 の長さである 47.6 mm と考えると、曲率半径は 39.9 mm となる。フィルムの耐圧性能が 43 MPa であり、厚みが 10 μm であることから、気球の耐圧性能 ΔP は、

$$\Delta p = 43 \times 10^6 \cdot 10 \times 10^{-6} / (39.9 \times 10^{-3}) = 11,000 \text{ [Pa]} \quad (9)$$

と求まる。

また、この気球の場合、網に拘束されているため、フィルムで決まる大きさよりもすべての大きさが 2.7 % 小さくなっているものと考えられる。そこで、フィルムの伸び 7 % に加えて 2.7 % の余剰なフィルムがあるので、弧長が弦長よりも 10 % 長くなるまで耐えられると考えてみる。この場合、曲率半径と半弦長の比は 0.680 となり、曲率半径は 35 mm となる。したがって、気球の耐圧性能 ΔP は、

$$\Delta p = 43 \times 10^6 \cdot 10 \times 10^{-6} / (35 \times 10^{-3}) = 12,000 \text{ [Pa]} \quad (10)$$

と求まる。

さらに、2013 年 2 月 7 日に実施した低温試験の際に、赤道部の網目の間隔を調査しており、その際に得られた最大間隔は 56 mm であった。この値を用いると、曲率半径は 41 mm となる。したがって、気球の耐圧性能 ΔP は、

$$\Delta p = 43 \times 10^6 \cdot 10 \times 10^{-6} / (41 \times 10^{-3}) = 11,000 \text{ [Pa]} \quad (11)$$

と求まる。この結果は、実測値 9,370 Pa と 20 % の精度で一致しており、文献 [16] の手法により、破壊圧が推定できることが確認された。

3. NPB001-5 気球の地上試験

3.1 NPB001-5 気球の特徴

NPB001-4 気球での経験を踏まえ、飛翔試験用に NPB001-5 気球を開発した。NPB001-4 気球とほぼ同じ設計だが、以下が異なる。

- 気球頭部には、ガスリーク用のポートがあり、ガス注入口は存在しない。ガスの注入は気球尾部のガス計測ポートから行う。
- ガス計測ポートなど、こてによる溶着箇所は、溶着部の耳を手で引っ張って強度が十分あることを確認し、さらに耳を切断した上に低温テープを貼り付けて保護した。

3.2 地上での膨張実験

飛翔試験に先立って、地上で、気球の気密性を確認するとともに、ゴンドラの吊り下げ方法を確認する実験を 2013 年 4 月 30 日、藤倉航装船引工場風洞実験室にて実施した。当日の気温は 13 °C だった。気球の膨張の様子を 1 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 20 kPa レンジのものを用い、その電圧値を 1 秒ごとにデータロガーで記録した。

気球の頭部ポートは折り返してビニールテープで固定して封じた。また、尾部の圧力計測ポートには、ガス注入用と圧力計測用を兼ねたポリチューブを入れ、ビニールテープを巻き付けて固定した。気球頭部と尾部は 4 点づりとし、尾部は 4 本のロープを 1.3 m 伸ばし、そのままゴンドラを吊り下げることを想定した。

気球は空気を詰めて膨張させ、800 Pa まで圧力をかけて放置した (図 25)。図 26、27 に圧力の時間変化を示す。最初に圧力をかけたのは 12 時 40 分で、一時間経過した後に、300 Pa まで圧力が低下したため、ガス漏れ箇所の探索を石鹸

水を用いて行った。この結果、圧力計測ポートからの微小な漏れが見つかった。ビニールテープの巻きつけでは不十分であった。このため、金属継手にシリコンチューブを結合させ、金属継手ごと圧力計測ポートに入れ、金属継手を糸で縛る方法に変更し、再度圧力をかけて放置した。この部分のガス漏れは収まったが、依然として圧力が下るため、頭部ポートからの漏れを疑った。頭部ポート端部の処理方法を折り返してビニールテープで固定する方法から、端部に低温テープを貼り付ける方法に変更し、石鹼水を用いて漏れないことを確認した。再度、800 Pa まで印加し、放置した。しかし、依然として、圧力の減少が見られた。別途、抜本的な調査を行うこととし、気密試験を終了した。

その後、4本の吊り紐の下にゴンドラを模擬した3 kgの錘を吊り下げ、ガス計測チューブや、紐の捻れの様子を観察した(図28)。捻れは生じにくく、生じたとしても自然に解消されることを確認した。

最後に、圧力計測ポート、頭部ポートを解放し、ガスを放出して実験を終了とした。

2013年5月14日に藤倉航装株式会社船引工場において、再度NPB001-5気球の膨張試験を行った。事前に、アンモニア試験、および、石鹼水を用いた徹底的な試験を行ったが、かすかなガス漏れが見つかったのみであった。今回は、気球内部にアンモニア水を入れ、皮膜にフェノールフタレイン溶液で湿らせた布をあてて発色する場所を調査した。気球全面にわたって調べたところ、うっすらと発色する場所が一箇所みつき、そこは低温テープで補強した。しかし、図29に示すように、依然として、差圧の減少が観測された。当日の気温は18~22℃であった(図30)



図25 満膨張になったNPB001-5気球

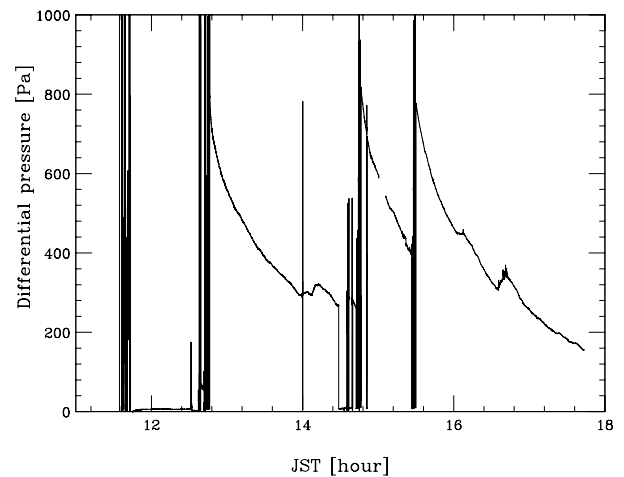


図26 NPB001-5気球の内圧の時間変化

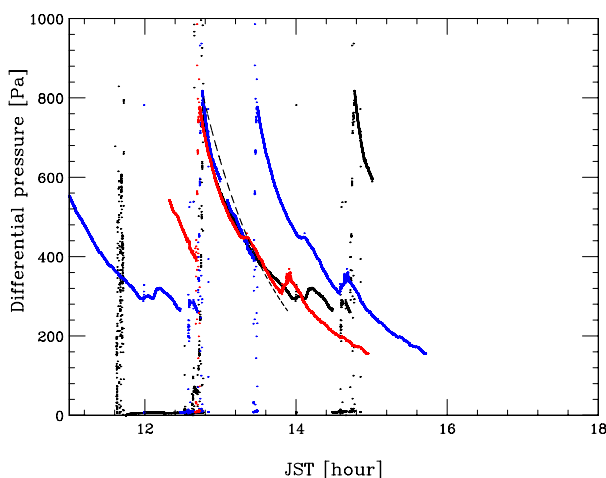


図27 NPB001-5気球の内圧の時間変化(ピークを重ねた)



図28 ゴンドラの吊り下げ方法の確認

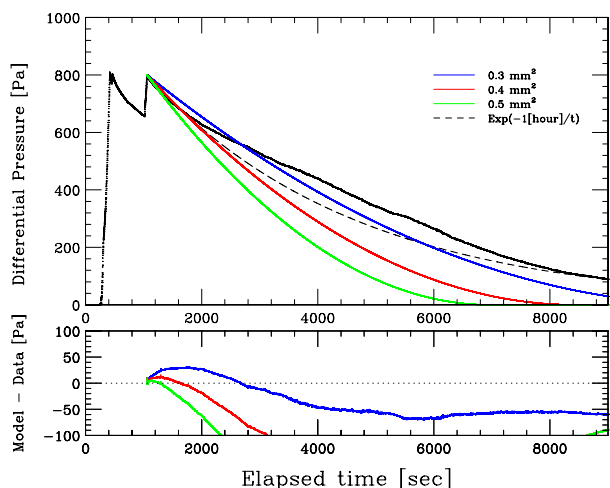


図 29 二回目の NPB001-5 気球の気密試験における差圧の時間変化(黒実線)。青線、赤線、緑線はそれぞれ、0.3、0.4、0.5 mm² の穴があった場合の圧力変化。

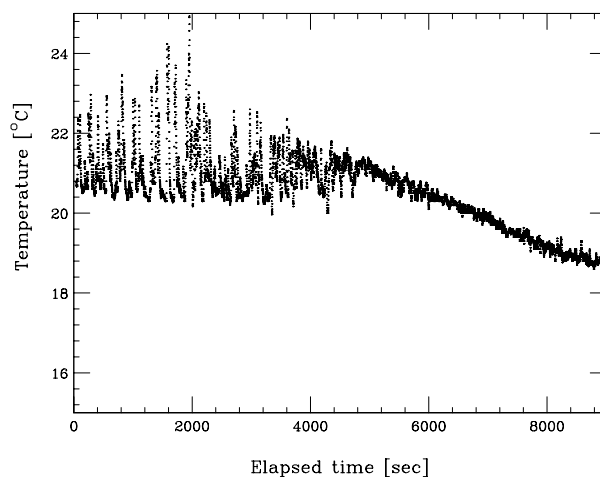


図 30 NPB001-5 気球膨張試験時の気温の時間変化

3.2.1 圧力の変化

図 27 は内圧の時間変化の図をピークをあわせて重ねたものである。三回の試験でよい再現性を示している。この間に、ガス計測ポートからの微少なガスもれが石鹼水での検査によって見出され、その対策が次の試験の前になされているが、圧力の時間変化にはほとんど差が見られていない。これは、圧力減少を説明できるほどの大きさの穴からの漏れがあれば、石鹼水によって容易に検出できることを意味する。このため、二回目の試験の前に、アンモニア試験、および、石鹼水を用いた徹底的な試験を行ったが、かすかなガス漏れがみつかったのみであった。したがって、一つの大きな穴があることが原因とは考えにくい。漏れを穴からのものと考え、文献 [18] と同じ方法で物理的な穴からの漏れをシミュレーションし、その面積を求めると 0.4 mm² 程度である。

また、一回目の NPB001-5 気球の漏れ試験時の気温は 13 °C であり、NPB001-4 気球からの常温漏れ試験の際の気温は 9 °C であった。二回目の NPB001-5 気球の試験での気温は 20 °C 程度と前回よりも 7 °C 高く、一方で、漏れの程度は、前回と同様であった。したがって、漏れの速度は気温に依存しておらず、NPB001-5 気球の方が NPB001-4 気球よりも漏れが大きい気球であることがわかる。気温によらず漏れが同程度であることは、膜面からの透過よりも物理的な穴による可能性を示唆する。

穴以外に考えられる圧力変動の要因としては、構造がクリープし、体積が増加した可能性がある。ここでの圧力変化は 500 Pa であり、これは、体積にして、0.5 % の増加、長さにして 0.13 % の伸びで説明がつく。網は数 % クリープすることが知られており、これにくらべ桁以上小さいクリープで説明がつくことから、この可能性も考えられる。一方、同じ構造をとる NPB001-4 気球においては、この現象が見られず、初期に見られた圧力の減少速度は、より小さかった。したがって、クリープ現象によるものではない。

以上の検討から、最も有力な可能性は小さな穴が異なる場所に多数あいている可能性である。

図 27 中の破線は、時定数 1 時間の減衰曲線である。概ね 1 時間程度の時定数をもつことがわかるが、単純な減衰曲線ではなく、最初の圧力減少は早く、後に遅くなっている。また、図 29 においては、実測された圧力変化と、シミュレーションした結果と比較しているが、やはり、最初の圧力減少は早く、後に遅くなる傾向が見られた。

この漏れの飛行実験における影響を評価した。まず、今回の実験における圧力の減少は、最初 800 Pa だった差圧が 30 分かけて 400 Pa に減少する程度であった。これが小さな穴からの漏れだと考えて穴の大きさの上限値を求め、その上空での影響を考える。

気球の体積は 9.6 m³ であるから、漏れ出た 400 Pa の差圧分のガスの体積 V は、

$$V = 9.6 \times 400 / 101300 = 3.8 \times 10^{-2} [\text{m}^3] \quad (12)$$

である。内部のガスは、空気であり、その密度 1.2 kg/m³ を用いると、ベルヌーイの定理より、ガスの流速 v は、

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 600}{1.2}} = 32 \text{ [m/sec]} \quad (13)$$

である。従って、穴の大きさ A の上限値は、

$$A = \frac{3.8 \times 10^{-2} / (30 \cdot 60)}{32} = 6.6 \times 10^{-7} \text{ [m}^2\text{]} = 0.66 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (14)$$

と求まる。飛翔試験で想定している高度 18.5 km、気圧 70 hPa、気温 -60°C において、5,000 Pa の圧力がかかった際のガス流速 v' は、

$$v' = \sqrt{\frac{2 \cdot 5000}{0.18 \frac{70}{1013} \frac{273}{213}}} = 790 \text{ [m/sec]} \quad (15)$$

である。この穴から 1 時間で漏れるガス量 V' は、

$$V' = 790 \cdot 6.6 \times 10^{-7} \cdot 1 \cdot 3600 = 1.9 \text{ [m}^3\text{]} \quad (16)$$

である。一方、SP 気球に蓄えられるガス量 V'' は、5,000 Pa の差圧を 70 hPa の大気圧に解放した際の体積として求められ、

$$V'' = 9.6 \times 5000 / 7000 = 6.8 \text{ [m}^3\text{]} \quad (17)$$

である。 V'' のガスが漏れると、圧力の変化 ΔP は、

$$\Delta P = (5000 + 7000) \times 1.9 / 6.8 = 3300 \text{ [Pa]} \quad (18)$$

であり、これは、初期圧力の 6 割に相当する。したがって、この漏れにより、SP 気球が加圧されている時間は 1 時間程度に制限されることとなる。

4. NPB001-5 気球の飛翔性能試験 (BS13-04 実験)

4.1 実験の目的

B12-02 実験 [18] において問題となった局所的な強度不足は、原理的には気球の構造の改良により解消されたと考えられる。しかし、実験的には -30°C まで検証されたに過ぎず、より低温となる成層圏においても問題ないことは必ずしも明らかではない。このため、気温が $-60 \sim -50^\circ\text{C}$ と、成層圏で最も低くなる高度 20 km 程度に NPB001-5 気球を飛翔させる試験を計画した。この高度に体積 10 m^3 の気球を到達させるため、飛翔試験は、BS11-02 実験 [17] と同様にゴム気球との超小型タンデム気球として実施した。この試験の目的は以下の通りである。

- 成層圏の低温環境における耐圧性能を確認すること。
- SP 気球の圧力の変化の測定から昼夜の SP 気球のガス温度変化を定量化すること。
- 映像により、飛翔時の SP 気球の形状を把握すること。
- 日昇後の上昇速度を定量化すること。

実験に用いた気球 NPB001-5 には微小なガス漏れがあることは知られているが、上記の目的を達成する支障とはならないため、この気球を用いて試験を実施した。

表 8 画像送信機 TVTX-16-1WA の仕様

| | |
|-------------|-------------|
| 搬送周波数帯 | 1.6 GHz |
| 送信電力 | 1 W |
| 帯域幅 | 6 MHz 以下 |
| 変調入力レベル | 1 Vpp |
| 変調入力インピーダンス | 75 Ω |
| 電源電圧 | 6.5 V |
| 消費電流 | 500 mA |
| 質量 | 200 g |

4.2 搭載機器

搭載機器は、薄膜高高度気球用のゴンドラ [21] をベースに、気球用の測定装置を追加したものである。主な基本搭載機器は、テレメーター/コマンドボード、送信機 (三協製 TM-1680)、コマンド受信機 (三協製 SCR300)、電池である。テレメーター/コマンドボードには、電源の ON/OFF が可能となるよう、External Device の接続をすべてラッチし、デフォルトの接続を Open にする改造を施している。また、コマンド受信機とテレメーター/コマンドボードの電源は共通化する、バッテリー用電池は必要最小限とすることで総重量を削減した。加えて、差圧計 (Honeywell 社製、ASCX05DN と ASCX01DN)、気球観測用 ITV カメラ (Moswell 社製、MS-55-MY104)2 台、画像用送信機 (Cosmowave 社製、TVTX-16-1WA)1 台、皮膜温度計測用温度センサー (Analog devices 社製、AD590J) を搭載した。

差圧計は、5 PSI (=34,000 Pa) と 1 PSI (=6,800 Pa) の二種類のレンジのセンサーを搭載した。いずれも温度補償範囲は 0 ~ 70 °C である。センサーの出力が供給電圧に比例するため、二つのセンサー出力に加えて供給電圧もモニターした。差圧計と気球と結合には、低温特性に優れたシリコンチューブ (アズワン社製 6-586-13、内径 4 mm、外径 7 mm、-60 ~ 200 °C) を用いた。二つの差圧計のための分岐部は、ゴンドラ内に設け、ポリプロピレン製の Y 字ジョイントコネクターを用いた。気球から分岐部までの距離は 2 m、分岐部から差圧計までの距離は 10 cm 程度である。

画像用送信機 (Cosmowave 社製、TVTX-16-1WA) は、宇宙研の大気球実験室で新規に開発した装置をベースに、より軽量化した送信機である。表 8 に特性を示す。従来の装置 [22] に比べ、送信電力が倍、消費電力が半分、重量が半分と軽量化されている。二つの ITV カメラの映像は、1.5 秒毎に切り替えてこの画像送信機によって伝送した。

また、SP 気球下部のポリエチレン皮膜には、温度センサーを張り付けた。このセンサーは -55 ~ 150 °C の温度範囲を ± 5 °C の精度で計測できる。

4.3 飛翔実験

飛翔時の荷姿を図 31 に示す。SP 気球につめるガス量は、ガスポンベの重量をガスをつめる前後で測定し、その差として求めることとした。ガス量は 230 g であり、計測精度は 10 g であるため、4 % の精度での計測が可能である。

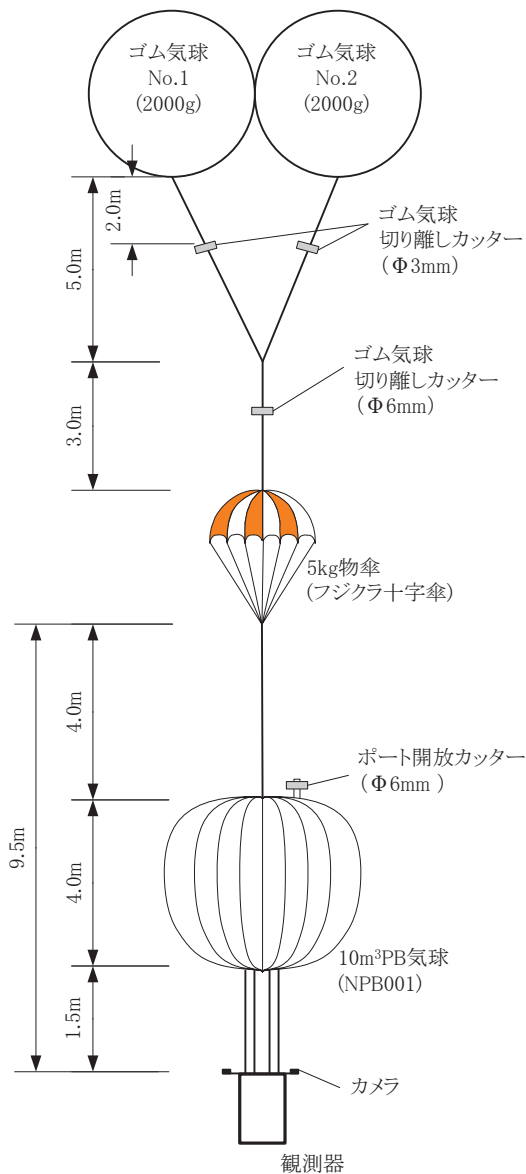
飛翔実験は 2013 年 5 月 25 日に実施された。放球時の様子を図 32 ~ 35 に示し、実験の経緯を表 9 にまとめた。高度 16.3 km にて SP 気球に圧力がかかり始め、高度 22.7 km で牽引用ゴム気球の切り離しを行なった。以後、気球は水平浮遊を行い、上空日昇の時点でも高度 22.8 km であった。その後、気球は上昇を開始し、高度 24.7 km に達した 5 時 1 分に飛翔用ゴム気球が破裂した。そこで、SP 気球の圧力を解放し、5 時 6 分に飛翔用ゴム気球を切り離し降下させ、実験を終了させた。図 36、37 に飛翔航跡、高度曲線を示した。

4.4 実験結果

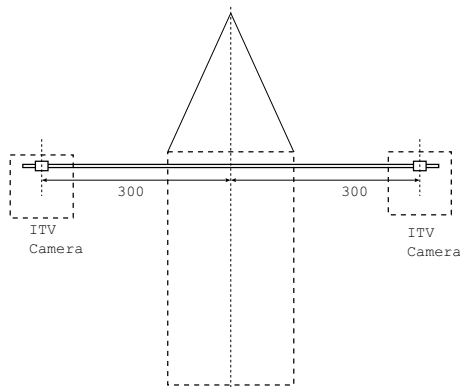
図 37 に示すように、GPS が高度 10 km で停止しており、以後の議論において、気球の飛翔高度には測距の値を用いた。放球後高度 10 km までの平均上昇速度は 6.3 m/sec と少し早めであり、高度 16.3 km で SP 気球の加圧が始まった後は 4.1 m/sec まで低下した。これは、SP 気球からの浮力が負になったこと、SP 気球が横に張り出して空気による抵抗が大きくなったことに対応していると考えられる。また、日昇後の再上昇速度は 0.4 m/sec と緩やかであることがわかった。

図 38 にゴンドラの内部温度、SP 気球皮膜の温度、2013 年 5 月 25 日 12 時 UT に放球された釧路の気象ゾンデで得られた気温 [23] の時間変化を示す。ゴンドラの内部温度は全実験時間にわたり、30 °C 程度であり、気圧計の温度補償範囲内であった。また、夜間 (3 時半以前) の SP 気球皮膜の温度と気温とは温度センサーの精度 (± 5 °C) で一致しており、日昇後は、SP 気球皮膜温度の上昇が観測されている。図 39 に気球内圧と大気圧との差圧の時間変化を示す。2 時 39 分から差圧の増加がはじまり、最大差圧に達した時点で牽引用ゴム気球を切り離し、上昇を停止させた。2 時間にわたり、5,600 Pa 以上の耐圧性能を発揮し続けていることがわかる。切り離し前後の時間帯を拡大し、気圧の変化と比較したのが図 40 である。二つの差圧センサーの値は 100 Pa の精度で一致しており、以後の差圧には、ばらつき誤差の小さい 1 PSI センサーの値を用いることとする。最大差圧は 6,280 Pa に達しており、それは牽引用ゴム気球切り離しのタイミングよりも 20 秒遅い。気圧の変化にも同程度の遅れがあり、浮力は失ったものの、しばらくは慣性によって上昇していたものと考えられる。

切り離した後、図 37 にあるように高度は一定であったが、差圧は徐々に低下しており、ガスが漏れていたと考えられる。差圧と大気圧との関係を図 41 に示す。図中の直線は、大気圧 104 hPa において、差圧が 0 Pa となる傾き -1 の直線である。また、図中の点線は、大気圧 80 hPa から 100 hPa の間のデータを用いて気球差圧 ΔP_b と大気圧 P_a の関係を直線でフィッ



| | 重量 [kg] | 浮力 [kg] |
|--------------|---------|---------|
| 浮遊ゴム気球 | 2.00 | 8.24 |
| 牽引ゴム気球 | 2.00 | 5.99 |
| SP 気球 | 2.51 | 1.44 |
| 荷姿 | 0.84 | |
| 観測器 | 3.00 | |
| 総重量 | 10.35 | |
| 自由浮力 (51.3%) | | 5.31 |
| 総浮力 | | 15.66 |



二つの ITV カメラはゴンドラ中央から 30 cm ずつ離れている。

図 31 飛行時の荷姿と重量構成

表 9 BS13-04 実験の経緯

| | |
|------|------------------------|
| 0:30 | 噛みあわせ開始 |
| 0:43 | 噛みあわせ完了 |
| 1:51 | 放球 |
| 2:20 | 高度 10 km 通過、GPS 停止 |
| 2:39 | SP 気球が加圧開始。高度 16.3 km |
| 2:53 | 高度 20 km 通過 |
| 3:04 | 牽引用ゴム気球切り離し、高度 22.7 km |
| 3:33 | 上空日昇、高度 22.8 km |
| 4:02 | 地上夜明け、高度 23.2 km |
| 5:01 | 飛行用ゴム気球破裂、高度 24.7 km |
| 5:02 | SP 気球圧力解放 |
| 5:06 | 飛行用ゴム気球切り離し |
| 5:23 | 着水 |



図 32 展開された SP 気球と観測装置



図 33 SP 気球とゴム気球の結合

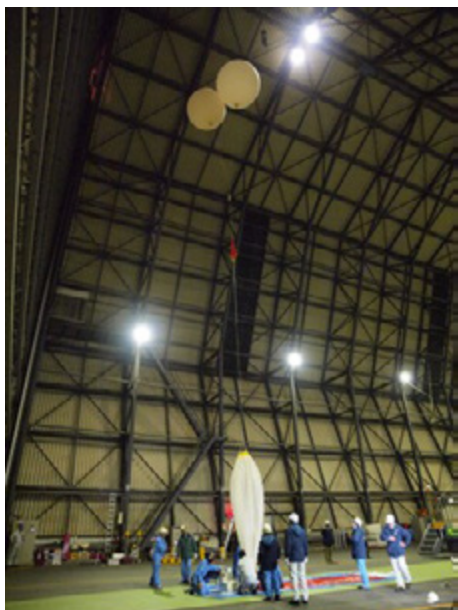


図 34 気球の立て上げ



図 35 放球された気球

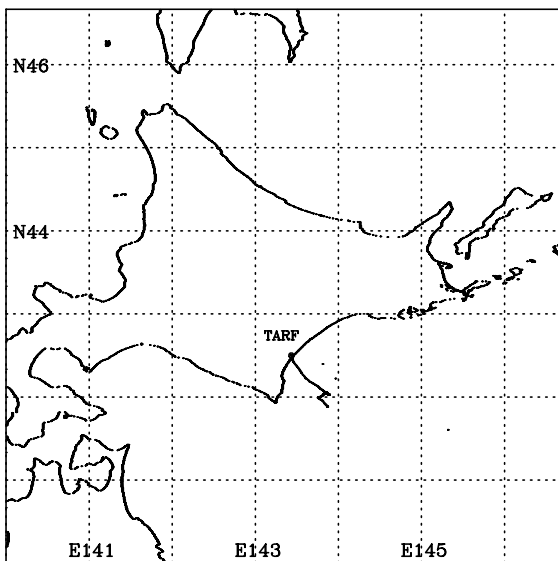


図 36 BS13-04 実験の測距による飛翔航跡

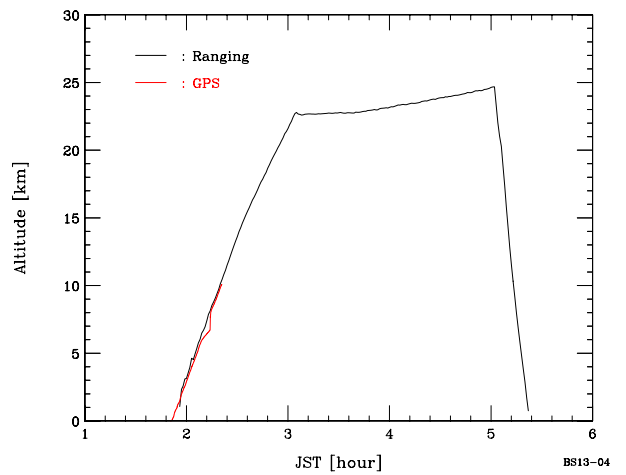


図 37 BS13-04 実験の GPS、測距による高度曲線

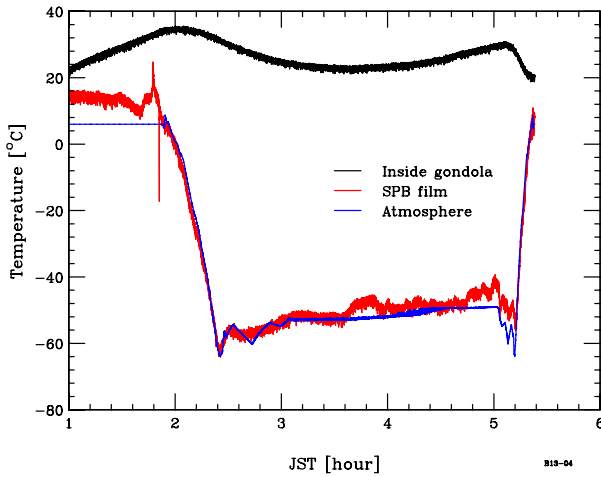


図 38 ゴンドラ内温度、気球フィルム温度、大気温度の時間変化

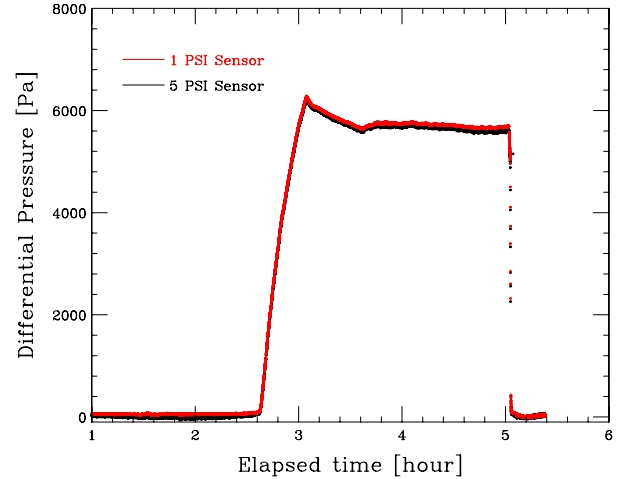


図 39 気球内圧と大気圧との差圧の時間変化

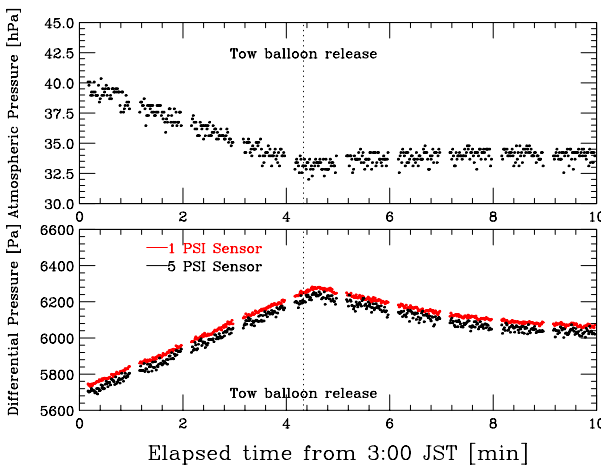


図 40 気球内圧と大気圧との差圧の時間変化の拡大図

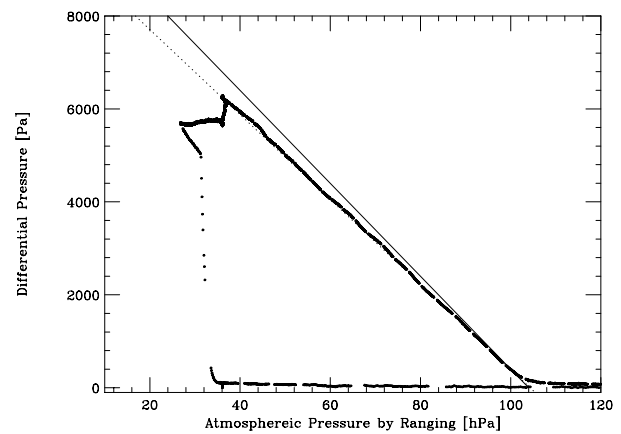


図 41 測距高度から推定した大気圧との差圧の関係。直線は (104 hPa, 0 Pa) を通る傾き -1 の直線。

テイニングして求めたものであり、

$$\Delta P_b = 95.35 - 0.9139P_a \quad (19)$$

である。図から、気球が加圧されはじめた大気圧は 104 hPa であることがわかる。この大気圧に到達した時刻は 2 時 39 分であり、この時刻での気球皮膜温度は -55°C であった。一方、地上において、気球に詰められたガス量は浮力にして 1.44 kg であり、気球の体積は 9.56 m^3 である。このガスによって気球が満膨張となる大気圧は、気温 -55°C において 109 hPa である。測定値 104 hPa との違いは 5% であり、ガス量の測定誤差 4% でほぼ説明がつく。また、気球内のガス温度は断熱膨張により皮膜表面よりも下がるのが期待されるが、その効果は 5% 以下であることがわかった。

SP 気球は満膨張に達した後、それ以上の高度では体積は変化しない。したがって、以後、ガス圧は変化せず、大気圧のみが減圧するため、両者の差圧は増加し、大気圧と差圧との関係は逆比例となる。しかし、図 41 においては、直線の傾きの値は -0.9139 、その誤差は 1×10^{-4} であり、大気圧の減少に伴い気球差圧が増加した場合の値 -1 にくらべて有意に小さい。これは、差圧が生じる以前から気球に穴があいていたためであると考えられる。もし、差圧が発生したことにより、穴があいたならば、大気圧と差圧の関係が途中で変化するはずである。

この穴の大きさは、SP 気球の体積が一定、かつ、内部のガス温度が一定であるという条件のもとで穴の大きさを仮定し、その際の圧力変化と実際の圧力変化を比較することで求めることができる [18]。図 42 は、面積 $0.3 \sim 0.5\text{ mm}^2$ の穴があいた体積 9.56 m^3 、ガス温度 -56°C (大気温度) の SP 気球が 2 時 38 分に満膨張に達したとして以後の大気圧とガス圧との差圧を求めたものである。面積 0.4 mm^2 の穴の場合に測定値を最もよく再現するが、3 時 36 分に観測値に折れ曲り

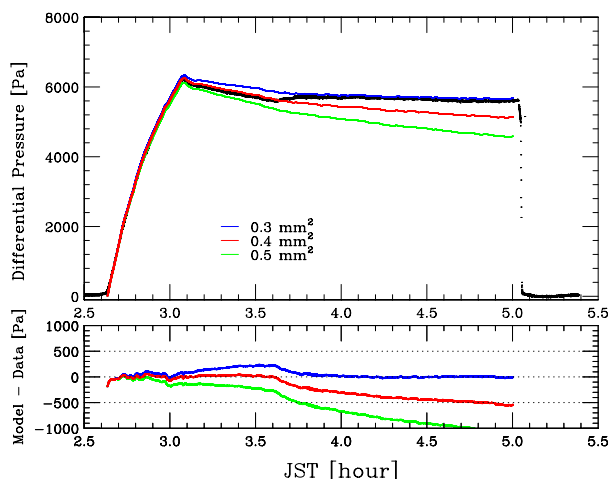


図 42 気球の差圧の時間変化(上)、および、モデルと実測値との差(下)

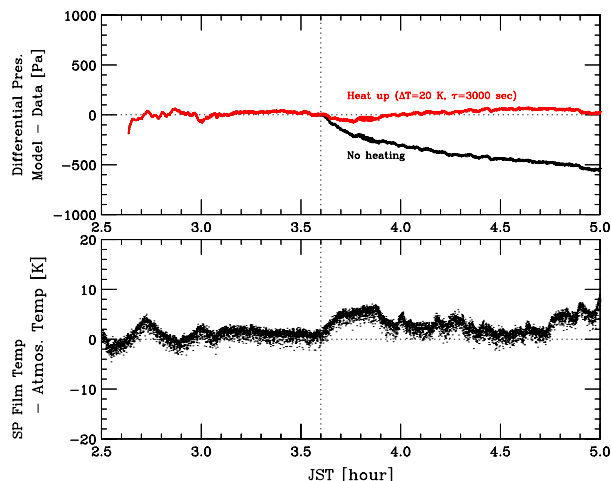


図 43 気球の差圧の時間変化(上)、および、気球皮膜の温度の時間変化

があり、観測値よりもシミュレーションでの値の方が小さい。この気球は地上試験の際にも漏れがあることが判明しており、その穴の面積は、 0.4 mm^2 であった。したがって、この漏れは当初から存在していた穴によるものであり、上空で穴が拡大していないことがわかる。また、地上試験時の気温は $13 \text{ }^\circ\text{C}$ であり、上空では、 $-56 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度と、 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ の温度差がある。膜面からの透過であれば、温度依存性が見られると予想され、それが見られないことから、物理的な穴によるものと考えられる。

シミュレーションと実測値のずれが見られるのは 3 時 36 分以降である。日昇時刻は 3 時 33 分であり、太陽光の照射によって気球が温められ、ガス温度が上昇することでガス圧力が上昇したことによる影響だと考えられる。図 43 に差圧のシミュレーションと観測値の差の時間変化と、SP 気球皮膜温度と大気温度との差の時間変化を示す。図中の縦の点線は、3 時 36 分に対応している。皮膜温度とガス温度の上昇は、1 分の精度で一致しており、いずれも、日昇時刻よりも 3 分遅い。撮影された映像を見ると、日昇時からしばらくは気球が色付いて見えており、夕焼け、朝焼け時に見られるように大気での吸収を受けた光が到来していることがわかる。温度上昇の遅れは、太陽光の照射開始時は大気による減光が大きいためと推測される。

図 43 中の赤線は、3,000 秒の時定数でガス温度が $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 上昇した場合の圧力変化であり、ガス温度にはこの程度の変化が発生していたものと推測される。このモデルでは、上空日昇時から常に同じ量の放射によって温められたことを想定しているが、実際には、雲の影響や地上からの照り返しの影響もあり、それがモデルとデータとの残差に現れているのだと考えられる。一般に、昼夜のガス温度変化は気温の $7 \sim 10 \%$ であることが知られており、得られた結果はそれと矛盾しない。また、BS11-02 で皮膜温度変化から得られた推定は、0.7 時間 (=2,520 秒) の時定数で、温度上昇 $28 \text{ }^\circ\text{C}$ であり、その結果とも同程度であった。

一方、皮膜の温度変化は最大でも $10 \text{ }^\circ\text{C}$ に過ぎなかった。皮膜にセンサーを貼り付ける際に、フィルムに直接貼り付けるのではなく、 $40 \text{ }\mu\text{m}$ 厚のテープを貼り付けて皮膜を強化した上でセンサーを $40 \text{ }\mu\text{m}$ 厚のテープで貼り付けている。このため、センサーの場所では、内部温度よりも外気温に近い値となり、温度変化が小さくみえた可能性が考えられる。また、温度が増減を繰り返すのは、皮膜の温度は太陽光が直接あたる場合と気球を通してあたる場合とで差が発生しているためと考えられる。

搭載された ITV カメラで得られた画像の例を図 44 に示す。気球が正常に展開していることがわかる。この ITV カメラは飛行前に較正データが取得されており、解析にあたってはそのデータを利用した。図 45 に、地上での較正用画像の上に格子点を復元した図を示す。レンズ収差を含めて補正されていることが確認できる。

図 46 は、気球が所期のかぼちゃ形状(直径 3 m)に膨張したと仮定し、ロードテープの位置に点列を並べた 3 次元モデルをカメラフレーム上に投影し、気球の撮像データと重ね合わせたものである。モデルを 3 次元空間に配置する際には、カメラとの相対位置に関して、並進自由度 3、回転自由度 3 が残る。そこで、まず、気球最底部の点の 3 次元座標を求め、ここを起点として並進自由度をまず固定し、次に 3 次元モデルと気球撮像データを重ね合わせた図を見ながら、目測に

より回転自由度を固定している。画像とモデルとを比較すると気球の縁の部分でモデルの方がはみ出しており、実測された気球の方が小さいことがわかる。

そこで、気球の形状はかぼちゃ型のままで、直径を縮め、画像とフィッティングを行うことで気球の直径を求めた。この結果、図 47 に示すように、直径が 2.88 m の場合により一致を得ることができた。これは気球の大きさが 4 % 小さくなっていることに相当する。網の目が広がるため子午線長が短くなると予想され、計測された 4 % の短縮は尤もである。

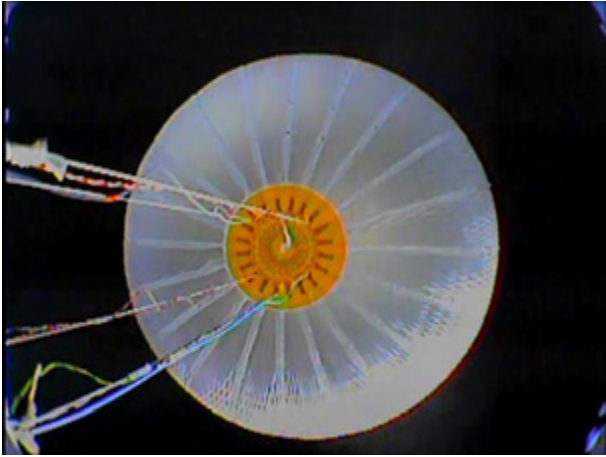


図 44 ITV カメラで得られた気球映像

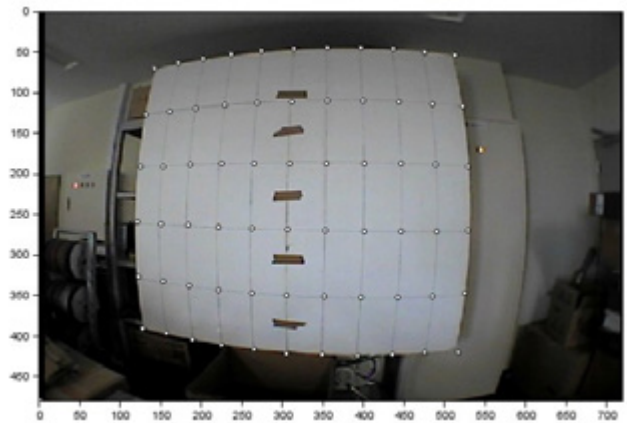


図 45 地上での較正画像の上に、復元した格子点を重ねた画像

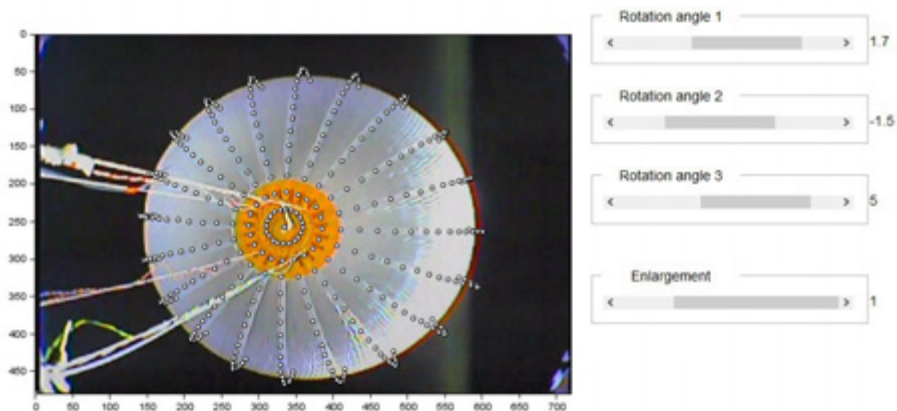


図 46 上空で得られた気球画像に、直径 3 m のかぼちゃ型気球のロードテープ位置を重ねた図

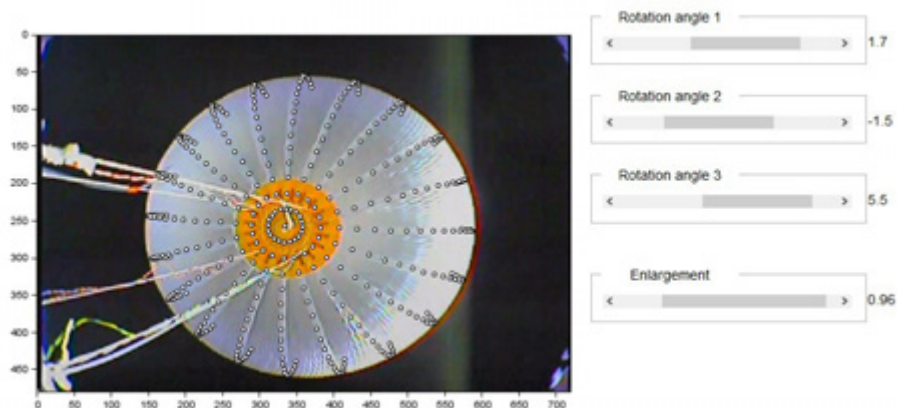


図 47 上空で得られた気球画像に、直径 2.88 m の気球のロードテープ位置を重ねた図

5. まとめと今後の計画

気球に高張力繊維の網をかぶせる手法により、軽いSP気球の開発を進めている。2012年に実施したB12-02実験において発生した飛翔環境下での耐圧性能の劣化への対策として、フィルム長と網線長を一致させた直径3mの気球を開発し、地上での常温膨張試験、 -30°C での低温膨張、破壊試験を通じて改良が有効であることを確認した。常温膨張試験では、設計どおりの形状に展開しており、耐圧性能が3,000 Pa以上であることが確認された。低温膨張、破壊試験では、 -30°C での耐圧性能は9,730 Paであり、文献[16]の手法による推定と20%の精度で一致する値が得られ、低温時の耐圧性能が理解できていることが確認された。2013年5月25日に、同型のSP気球と2kgのゴム気球を連結させた超小型タンデム気球システムの飛翔試験として日昇をまたいで飛翔させる実験を実施し、 $-60\sim-50^{\circ}\text{C}$ の低温環境下で耐圧性能6,280 Pa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、地上でも観測された 0.4 mm^2 の小さな穴からのガス漏れが発生していることを確認した。また、日昇後の上昇速度は 0.4 m/sec と緩やかであり、気球内ガスの温度上昇の時定数3,000秒で、 20°C の上昇が発生することが判明した。この試験を通じて、改良を加えた気球が成層圏での飛翔にあたって、微少なガス漏れを除き問題がないことが確認された。

今後、ガス漏れ対策を進めると共に、単独の気球で飛翔させるために必要となる、気球からの観測装置の吊り下げ機構の開発、網と放球時のスプーラーとの干渉の対策を行った後、平成26年度には、体積 $5,000\text{ m}^3$ のSP気球の飛翔試験を実施する予定である。以後、順次大型化を進め、将来は、PIに提供できるシステムとして完成度を高め、科学実験への適用を行なう。

謝辞

気球の膨張試験にあたっては、藤倉航装株式会社の方々、東海大学工学部の草野悠太さん、森川和也さん、ISAS/JAXAの田村誠さん、にお世話になりました。気球の低温膨張試験は、大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立極地研究所の低温実験室を利用させていただき、実験にあたっては、森本真司さん、藤田秀二さん、石田依子さん、長元裕子さん、門倉昭さん、および、気水圏事務室にお世話になりました。また、NPB001-5気球の飛翔試験(BS13-04)の実施にあたっては、JAXA/ISAS/大気球実験室を中心とする大気球実験班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] Smalley, Justin H., “Determination of the shape of a free balloon”, AFCRL 65-72, 1964
- [2] Smalley, J.H. “Development of the e-balloon”, Proceedings of the 6th AFCRL Scientific Balloon Symposium, AFCRL-70-0543, pp.167-176, 1970
- [3] Rougeron, M. “Up to date CNES balloon study”, Proceedings of the 10th AFGL Scientific Balloon Symposium, AFGL-TR-79-0053, pp.39-55, 1978
- [4] Cathey, H.M. “Development of the NASA long duration balloon vehicle” Adv. Space Res., 26, 9, pp.1345-1348, 2000
- [5] Cathey, H.M., Smith, M. and Stephens, R. “Design and testing of the ULDB vehicle” Adv. Space Res., 30, 5, pp.1215-1220, 2002
- [6] Cathey, H.M. “Evolution of NASA Ultra Long Duration Balloon”, AIAA Balloon Systems Conference, AIAA 2007-2615, 2007
- [7] Cathey, H.M. and Pierce, D.L. “Duration Flight of the NASA Super Pressure Balloon”, AIAA Balloon Systems Conference 2009, AIAA 2009-2808, 2009
- [8] Pierce, D.L., Fairbrother, D.A and Cathey, H.M., “The 2011 NASA \sim 422,400 m^3 Super Pressure Balloon Test Flight”, AIAA ATIO Conference 2011, AIAA 2011-6828, 2011
- [9] Cathey, H.M. and Fairbrother, D.A. “The 2012 NASA \sim 532,200 m^3 Super Pressure Balloon Test Flight”, AIAA BAL Conference 2013, AIAA 2013-1269, 2013

- [10] 矢島信之 “自然型気球基本特性-高耐圧気球実現のための再検討と新しい設計・製作法の試み-” 宇宙科学研究所報告, 39, pp.1-22, 1999
- [11] 井筒直樹、矢島信之、太田茂雄、本田秀之、黒河治久、松島清穂 “3次元ゴアデザインによるスーパープレッシャー気球の開発” 宇宙科学研究所報告, 40, pp.27-44, 2000
- [12] 井筒直樹、他、“スーパープレッシャー気球の開発と試験” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告JAXA-RR-07-009, pp.1-22, 2008
- [13] Izutsu, N. et al. “Optimum design for improvement of performances in scientific balloons”, Proceedings of the 26th ISTS, 2006-m-14p, 2006
- [14] Fuke, H. et al. “Progress of the super-pressure balloon developments in Japan”, Adv. Space Res., 48, 6, pp.1136-1146, 2011
- [15] 井筒直樹、他、“俵型スーパープレッシャー気球の開発” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告大気球研究報告 JAXA-RR-10-003, pp.1-20, 2011
- [16] 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” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告JAXA-RR-010-03, pp. 21-40, 2011
- [17] 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I” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告JAXA-RR-11-008, pp.1-16, 2012
- [18] 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.1-34, 2014
- [19] <http://polaris.nipr.ac.jp/~coldlab/NC2/>
- [20] Satio, Y. et al. “A challenge to the highest balloon altitude” Advances in Space Research, Volume 49, Issue 4, pp. 613-620, 2012
- [21] 河田二郎、他、“新しい気球管制冗長系テレメータコマンドシステムの開発” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-09-007, pp. 1-18, 2010
- [22] 斎藤芳隆、他、“超薄型高高度気球の開発(BT1-3)” 宇宙科学研究所報告特集第40号, pp.1-18, 2000
- [23] <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>