

皮膜の二層化によるスーパープレッシャー気球の気密性の向上

齋藤 芳隆^{*1}, 中篠 恭一^{*2}, 秋田 大輔^{*3}, 松尾 卓摩^{*4}

Improvement on airtightness of the super-pressure balloon by double-layer gore

SAITO Yoshitaka^{*1}, NAKASHINO Kyoichi^{*2}, AKITA Daisuke^{*3}, MATSUO Takuma^{*4}

ABSTRACT

The super-pressure balloon is a balloon keeping its absolute pressure higher than the atmospheric pressure to keep its lift constant, without depending on the sun irradiation. In addition to withstand the differential pressure, the balloon envelope is required to be airtight. Since the airtightness is also broken by defects in the envelope, in addition to its gas permeability, the high level of the quality control of the envelope material and its manufacturing process is required. Here, we propose to use a double-layer film as the balloon envelope to make it airtight. It is considered that the airtightness will be improved by the following mechanism; the inner layer is pressed to the outer layer by the gas inside the inner layer to make small gas passage among the two layers where is the flow channel of the leaked gas through defects in the inner layer. After confirming its principle by experiments using polyethylene bags and rubber balloons, we applied the technique to a 10 m³ super-pressure balloon with a polyethylene film by inserting a rubber balloon inside the balloon. Originally, the gas leak rate of the balloon was the level of 4,000 Pa·h⁻¹, when applying the differential pressure of 1,000 Pa. After inserting the rubber balloon, its gas leak rate was suppressed to the level of 3 Pa·h⁻¹. The leak rate is slightly smaller than 7 Pa·h⁻¹, which is the leak rate expected from the permeability of the rubber. The effectiveness of the method as the application to the super-pressure balloon was confirmed.

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

doi: 10.20637/JAXA-RR-19-002/0002

* 2019年11月26日受付 (Received November 26, 2019)

*¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

*² 東海大学工学部 (School of Engineering, Tokai University)

*³ 東京工業大学環境・社会理工学院 (School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology)

*⁴ 明治大学理工学部 (School of Science and Technology, Meiji University)

概要

スーパープレッシャー気球は、気球内部の圧力を常に大気圧よりも高く保つことによって、日照の有無にかかわらず浮力を一定に保つ気球である。気球の皮膜は、差圧に耐えることに加えて、気密性が要求される。気密性は皮膜のガス透過率に加え、皮膜の欠陥によっても悪化するため、皮膜の素材や製造工程の品質管理が高いレベルで必要とされている。本論文では、気球の皮膜を二層化することで気密にする方法を提案する。二層の皮膜を用いて気球では、内層が外層にガス圧力によって押しつけられるため、内層の欠陥から漏れ出したガスの流路である層間の流量が低減され、気密性が向上すると考えられる。この原理をポリエチレンの袋とゴム気球を用いた実験で実証した後、体積 10 m^3 のポリエチレン製のスーパープレッシャー気球の中にゴム気球を入れる実験を実施した。元々、この気球は $1,000 \text{ Pa}$ の差圧をかけた際のガス漏れ率は $4,000 \text{ Pa}\cdot\text{h}^{-1}$ であった。ゴム気球を入れた後、 $3 \text{ Pa}\cdot\text{h}^{-1}$ と抑制された。このガス漏れ率はゴムの透過率からの予想値、 $7 \text{ Pa}\cdot\text{h}^{-1}$ よりも少し小さい値である。この手法がスーパープレッシャー気球の気密性の向上に有効であることが確認された。

1. はじめに

スーパープレッシャー気球は、気球内部の圧力を常に大気圧よりも高く保つことによって、昼夜の浮力変動を防ぎ、長時間の飛行を可能にする気球である。NASA は直径 100 m クラスの気球を開発し、2016 年より科学観測実験への利用を開始した [1]。また、直径数 10 m クラスの気球は CNES[2] や LOON[3] によっても開発、運用が進められている。我が国においては、1990 年代より精力的な開発が進められており [4][5][6]、近年では、我々が中心となって皮膜に網をかぶせ耐圧性能を高める手法での気球の開発が進められている [7][8]。

スーパープレッシャー気球の要求性能の一つは気球皮膜の気密性である。我々の気球では $10 \mu\text{m}$ 厚のポリエチレンフィルムを利用している。このフィルムの He ガスの透過率は十分に小さいことが確認されている [9] が、気球として利用する際には、フィルム自体の欠陥や溶着部に発生した欠陥、さらに、製造時に発生した傷の影響も受けることとなり、しかもその場所の特定は極めて困難である。たとえば、BS13-04 実験で飛行した体積 10 m^3 の気球は $6,280 \text{ Pa}$ と十分な耐圧性能が確認されたが、 0.4 mm^2 相当の穴からガスが漏れていることも判明している。しかし、事前の試験では穴の特定には至っていない。この問題は、特に、表面積と体積の比が相対的に大きくなる小型気球の場合に、顕著な影響がある。

本論文は、この対策として、気球の皮膜を二層化することを提案するものである。次章に原理を、3 章でその検証実験の結果を、4 章で皮膜に網をかぶせた気球への適用結果を示し、5 章で結果をまとめる。

2. 皮膜の二層化をによる気密性の向上原理

図 1 のように、気球の皮膜を二層にし、内側の袋にガスを注入してを膨張させる場合を考える。この際、内側の皮膜 (以後、内層) にも、外側の皮膜 (以後、外層) にも欠陥があるものとする。内側に注入されたガスが気球の外に流出する場合、内層の穴、内外層の間、外層の穴を順に通過することとなるが、内層は外層に圧迫されているため、内外層間の流路が狭められ、ガスが通過しにくくなると考えられる。

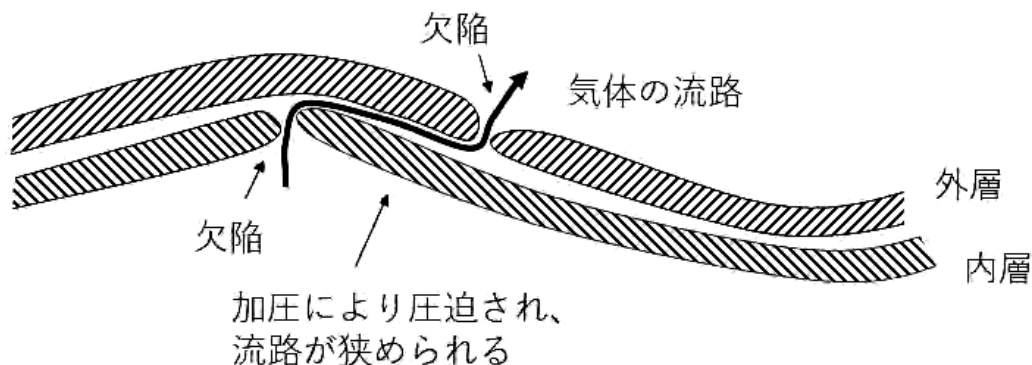


図 1: 皮膜の二層化による気密性向上の原理。

ピンホールの影響を低減させる方法としては、フィルムを成膜後、重ねて溶着する方法が知られている。しかし、最終的に製作されたフィルムを加工する段階で傷付けてしまった場合には、気密性を期待することができない。一方、本方法では、加工時に傷付けてしまったとしても、内外層で傷が重ならない限り気密性を保つことができる。

一つの実用的と思われる適用方法は、ポリエチレン気球の内側にゴム気球を入れることである。この場合、ポリエチレン皮膜の方は加工時から満膨張時と同じ大きさとなっているのに対し、ゴム気球は加圧に伴って膨張するため、加工時に同じ場所を傷つける恐れはない。さらに、ゴム気球の価格はポリエチレン気球と比較して圧倒的に低く、コストに対する影響が小さいこともメリットである。そこで我々は、皮膜に網をかぶせ耐圧性能を向上させた気球の内側にゴム気球を入れ、気密性能を向上させる可能性を検討することとした。

3. 原理実証試験

本方式の気密性の鍵は、いかに内外層間の流路が狭められるかにある。流路の太さは、境界面の凹凸や、フィルムに存在したシワの有無によって異なると考えられ、場合によっては、ほとんど気密性の向上が見られないことも考えられる。そこで、まず、市販のポリエチレン袋とゴム気球を用いた簡単な原理実証試験を実施した。

市販の幅 65 cm、長さ 80 cm、厚み 15 μm のポリエチレン袋 (半透明ごみ袋 45l 用 販売者：日本生活共同組合、製造者：蝶理株式会社) に 30 g ゴム気球 (トーテックス製 TA-30) を入れ、ガス漏れの試験を行った。ポリエチレン袋には、そのまま (No.1)、ぬい針 (ϕ 0.71) で頭部に 4 箇所穴をあけたもの (No.3)、8 箇所穴をあけたもの (No.4) を用意した。これらの袋の内側にヘリウムガスを入れたゴム気球を入れ、ゴム気球のみの状態のもの (No.2) と共に、全体重量の時間変化を測定した。実験の様子を図 2 に示す。測定は 38 時間に及び、その間の気温は 20.7~21.4 $^{\circ}\text{C}$ とほぼ一定であった。時間軸を適当にずらし、初期浮力が同一となるように示したのが図 3 である。ポリエチレン袋をかぶせたものは、穴の有無にかかわらず、同じ浮力の低下を示しており、ゴム気球だけのものよりも低下率は抑えられている。No.3 の結果は 16 時間以降ではずれており、その原因は不明だが、少なくともそれ以前は他のポリエチレン袋をかぶせた場合と同じ速度で浮力が低下していることがわかる。

ポリエチレンのフィルム自体の透過率が大きく、ピンホールの寄与が無視できる可能性も考えられるため、ポリエチレンの袋のみにヘリウムガスをつめ、その浮力の時間変化を調べた。結果を図 4 に示す。

穴の数が多いほどガス漏れ量が大きく、穴がないものと穴4つの傾きの差は、穴4つと穴8つの傾きの差と同程度であり、穴の大きさもよくコントロールできていることがわかる。この結果より、ゴム気球がないならばピンホールのガス漏れへの寄与は、フィルム自体の透過率と同程度であり、ゴム気球を内側に入れたことによってピンホール経由のガス漏れが抑制されることが確認された。

以上の実験により、ポリエチレン袋をゴム気球にかぶせるとポリエチレン袋のピンホールの有無に拘わらず、ガス漏れが抑制できることがわかった。



図 2: ゴム気球とゴム気球にポリエチレン袋をかぶせた気球の試験の様子。

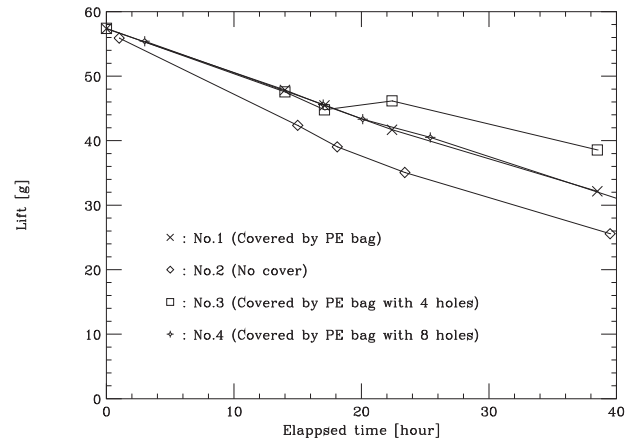


図 3: ゴム気球とゴム気球にポリエチレン袋をかぶせた場合の浮力の時間変化。

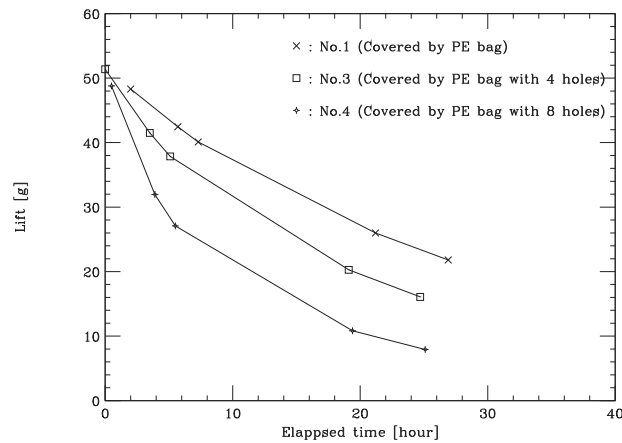


図 4: ポリエチレン袋の浮力の時間変化。

表 1: NPB001-8 気球の諸元

気球番号	NPB001-8
形状	かぼちゃ型
公称容積 (m ³)	9.3
直径 (m)	3.03
全長 (m)	3.97
高さ (m)	1.81
ゴア数	18
フィルム種類	ポリエチレン
フィルム厚 (μm)	10
耳幅 (mm)	20
網線強度 (N)	415
縦ロープ数	402
網交点間隔 (mm)	101
赤道ロープ間隔 (mm)	48
弁座直径 (mm)	530
頭部尾部ロープ強度 (N)	11,000
ガスガイド長さ (m)	10
気球重量 (kg)	9.8

4. NPB001-8 気球への適用

次に、皮膜に網をかぶせて耐圧性能を強化した直径 3 m の気球である NPB001-8 気球の中に、600 g のゴム気球 (トーテックス製、TA-600) を入れて気密性を評価することとした。

NPB001-8 気球の諸元を表 1 に示す。この気球は網をかぶせた気球の気密性を評価する目的で 2019 年 1 月に製作され、同月に気密試験を実施したところ、2,000 Pa に加圧した状態から 1,000 秒で 1,000 Pa まで減圧する程度のガス漏れ箇所があることが判明していた気球である。この気球を再利用し、二層化による効果を評価することとした。まず、ガス漏れ箇所の特定と、漏れ量を定量化する試験を実施した。

4.1 NPB001-8 気球単体でのガス漏れ試験と二層化の効果の確認

4.1.1 実験

実験は 2019 年 1 月 8、9 日、藤倉航装船引工場風洞実験室にて実施した。実験の経緯を表 2 に示す。

初日は、ポリエチレンフィルムのみでの状態でのガス漏れの調査を行った。ガス注入口から圧縮空気の注入と圧力計測を兼ねたチューブを入れ、5 kPa レンジの差圧計 (DP-340) を用いて、気球内ガスと大気圧との差圧の計測を 0.5 秒間隔で実施した。加えて、温度湿度気圧ロガーである TR-73U を用いて大気圧と気温を 10 秒間隔で計測した。また、200、800、1,400、2,000 Pa で赤道長、および、子午線長を計測した。

0.9 % 程度の濃度のアンモニアガスを気球に注入し、2,000 Pa まで加圧した。フェノールフタレイン溶液に浸した布を気球にあてて発色する箇所を探索することでガス漏れ箇所を調べるアンモニア試験を

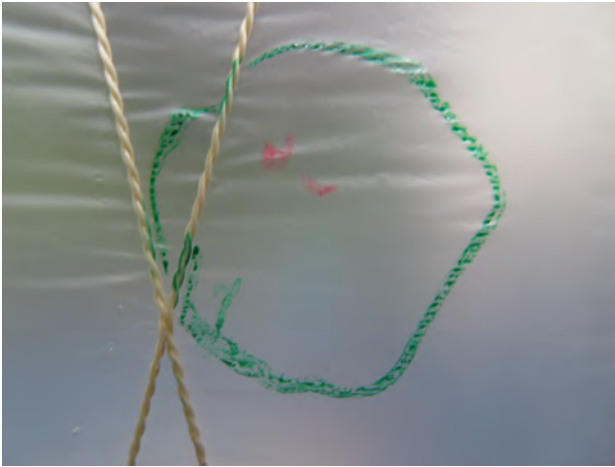


図 5: ガス漏れ箇所。目視では特徴はない。

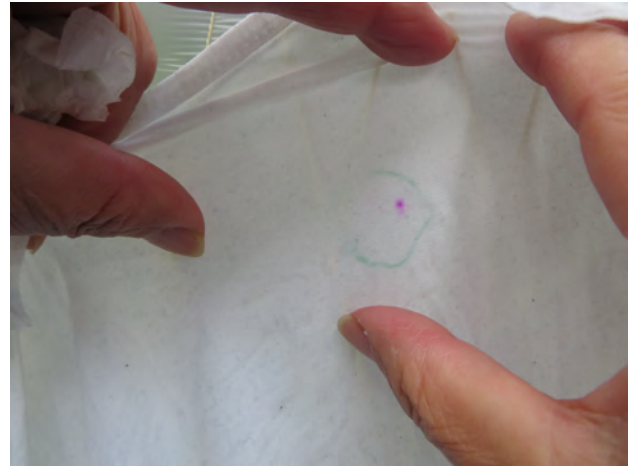


図 6: フェノールフタレイン反応による検出。

実施したところ、30箇所以上の穴からの漏れがみつかった(図5、6)。この試験の感度は補遺Aに示すように、 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa m}^3/\text{sec}$ 程度と考えられる。図5、6にあるようなフィルム表面からの点状の漏れに加え、極部からは低温テープに沿って線状の漏れが検出された。いくつかの穴については、ルーペで拡大するなど、目視での検出を試みたが、判別は不可能であった。再度、2,000 Paまで加圧し、翌朝まで計測を行った。

翌日、気球からガスを抜き、ヘリウムガスでの加圧を行った。ヘリウムガス量の節約のため、まず、ポリエチレン気球の内部に600gのゴム気球(トーテックス製、TA-600)を入れ、空気で膨張させた。ゴム気球の体積が気球体積の半分程度に達したところで、ゴム気球の注入口を封じ、ゴム気球と気球の間にヘリウムガスを注入した。満膨張となったところでヘリウムリークディテクタ(RESTEK社製、P/N 22655)を用いて、漏れの検出を試み、前日に漏れが検出された箇所からは有意に漏れが検出されることを確認した。このセンサーのヘリウムガス感度は、 $1 \times 10^{-5} \text{ atom}\cdot\text{cc}/\text{sec}$ ($=1 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$)であり、先のアンモニア試験よりも1桁感度が高い。アンモニア試験で漏れが見出されなかったパネルの下半面について重点的に調査を行ったが、新規に有意な漏れ箇所が検出されることはなかった。

気球からヘリウムガス、空気を抜き、ポリエチレン気球の内部に新しい600gのゴム気球(トーテックス製、TA-600)を入れ、空気を注入して加圧した。このゴム気球は、膨張前に天頂からの距離をマーキングし、緯度による膨張の違いがわかるようにした。気球は順調に膨張し、1,000 Paに達したが、その時点でゴム気球がガス注入口から張出しているのが見受けられた(図7)。頭部も同様の状況にあるため、頭部と共に、図8、9のようにウレタン布とケブラーロープで張り出しを防止した後、再度加圧した。ポリエチレン気球とゴム気球の間には隙間が見られ、排出しきれなかった気体が溜っていた。最終的には2,000 Paに到達した(図10)。その後、翌朝まで計測を行った。

4.1.2 試験結果と議論

差圧の時間変化を図11に、大気圧の時間変化を図12に、気温の時間変化を図13に示す。1/8の夕方(18H)から1/9の朝(33H)にかけてのデータがポリエチレンフィルムだけの気球の場合であり、1/9午後(38H)以降のデータが内側にゴム気球を入れた場合のデータである。前者は940秒後には圧力が1,000 Pa減少している(すなわち、ガス漏れ率にして $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)のに対し、後者は下げ止まっており、二層化



図 7: 気球尾部の膨らみ。



図 8: ウレタン布による気球頭部の保護。



図 9: ウレタン布による気球尾部の保護。



図 10: 2,000 Pa に加圧したゴム気球入り気球。

表 2: 実験経緯

2019/1/8	
10:50	セットアップ開始
11:05	ガス注入開始
11:30	200、800、1,400 Pa で赤道長、子午線長計測
12:10	昼食
13:00	作業再開
13:10	2,000 Pa で赤道長、子午線長計測 ガス漏れ評価のために放置
14:50	作業再開、340 Pa まで低下 空気を放出し、アンモニアガスを充填
15:05	フェノールフタレイン反応により穴を検出
16:50	空気で2,000 Pa まで加圧
17:00	撤収
2019/1/9	
9:10	作業開始、アンモニアガス放出
9:25	気球内にゴム風船を入れ、空気を注入
9:55	ゴム風船を封じ、気球との隙間に He ガス注入
10:10	He リークディテクタで検出検査 最大 560 Pa まで加圧
10:50	He ガスを放出
11:45	ゴム気球内に空気注入開始
12:07	1,000 Pa 到達 尾部が膨らんで飛び出したため、空気を抜く 昼食
13:05	作業再開、検出した穴を番号付、撮影
14:15	極部にウレタン布を入れ、ロープをかける
14:20	空気注入再開 フィルムとゴムの間に入って飛び出す部分が散見される
14:23	270 Pa 到達
14:50	2,000 Pa 到達、撤収

表 3: 赤道長と子午線長

差圧 [Pa]	赤道長 [mm]	子午線長 [mm]
200	9,298	4,004
800	9,446	4,047
1,400	9,508	4,059
2,000	9,558	4,072

したことによって気密性が向上している。圧力が最初に下がるのは、ポリエチレンフィルムとゴムの間の気体が抜けたためと考えられる。

表 3、図 14、15 に周長と子午線長の圧力による変化を示す。NPB001-8 はフィルム長が網線長よりも 3 % 長く、大型気球用の金属リングが取り付けられた気球である。周長は設計したゴアの幅の総和と一致しており、子午線長は網線長とフィルム長の間程度となっていたことがわかる。

アンモニア試験の感度は 1 気圧においては、 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{sec}$ の漏れに相当している。この気球の場合、940 秒で 1000 Pa 減圧する程度の漏れが発生している。体積 10 m^3 の気球内部の絶対圧の変化を 1 気圧での体積の変化として考えると、

$$10 [\text{m}^3] \times \frac{1000 [\text{Pa}]}{1.013 \times 10^5 [\text{Pa}]} = 0.1 [\text{m}^3] \quad (1)$$

の体積が 940 秒で漏れたこと相当し、 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$ の漏れ量である。これは、感度の 10^5 倍の漏れ量であり、図 5、6 に見られるような少量の穴が 30 個程度では説明がつかない量である。極部で見られた低温テープに沿った線状の漏れが主な漏れの要因であり、溶着加工をコテを使った手作業で実施していることに問題があると考えている。

4.2 長時間試験による二層化の効果の確認

2019 年 1 月 25 日に宇宙科学研究所において、前章で同様に NPB001-8 気球の内側に先の実験で用いた 600 g のゴム気球を入れ、空気で膨張させ、1,000 Pa の差圧まで加圧し、以後の差圧の時間変化を調べる実験を 2 月 14 日まで実施した。

気球尾部には、ゴム気球の口をたくしこみ、ゴム気球の口は連結コネクタを介して、ゴムチューブで差気圧計に接続した。データロガー GL500A により、3,000 Pa レンジの差圧計、熱電対 (気温)、熱電対 (尾部側の気球表面) のデータを 1 秒間隔で取得すると共に、温度湿度気圧ロガー TR-73U で気圧、気温を 1 分間隔で収集した。

結果を図 16~19 に示す。差圧は 500 時間近くにわたり正圧を保ち続けており、二層化することで大幅に気密性を向上させることができることが確認された。しかし、気球の差圧は気温、大気圧の影響を受けるため、このままでは漏れを定量的に把握することができない。

そこで、以下のようにモデル化を試みた。気球の体積を V 、気球ガス圧を P_b 、気球内ガスのモル数を n 、気体定数を R 、気球ガスの温度を T_b とすると、

$$P_b V = n R T_b \quad (2)$$

である。ここで、気球ガス圧 P_b は、大気圧 P_a と気球ガス圧の差圧 P_d の和である。

$$P_b = P_a + P_d \quad (3)$$

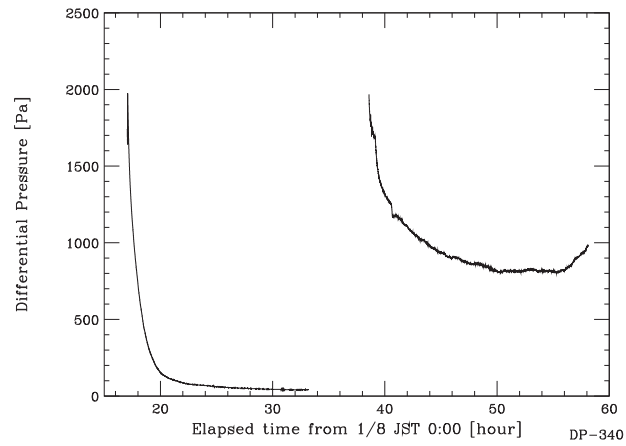


図 11: 差圧の時間変化。

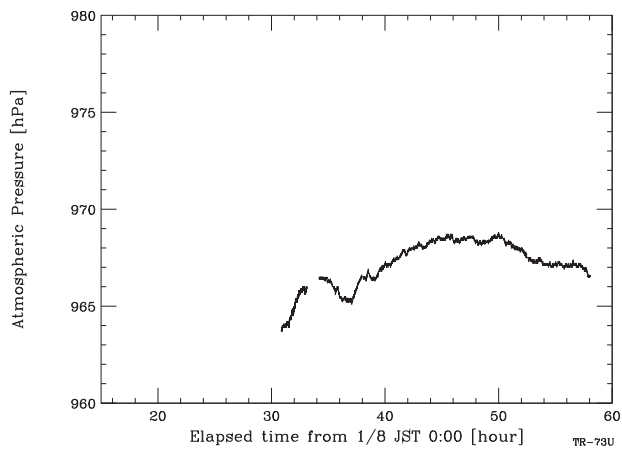


図 12: 大気圧の時間変化。

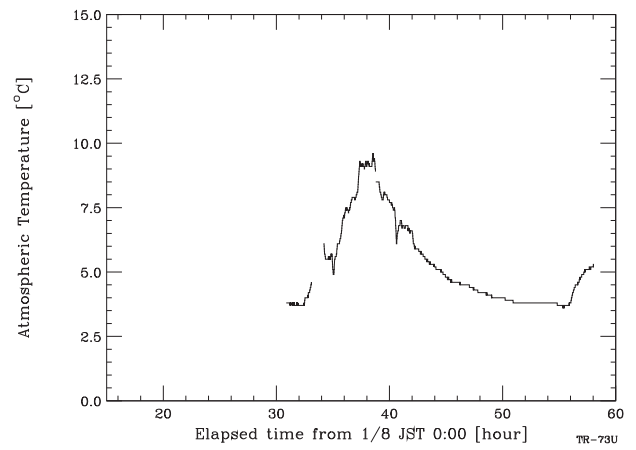


図 13: 気温の時間変化 (TR-73U)。

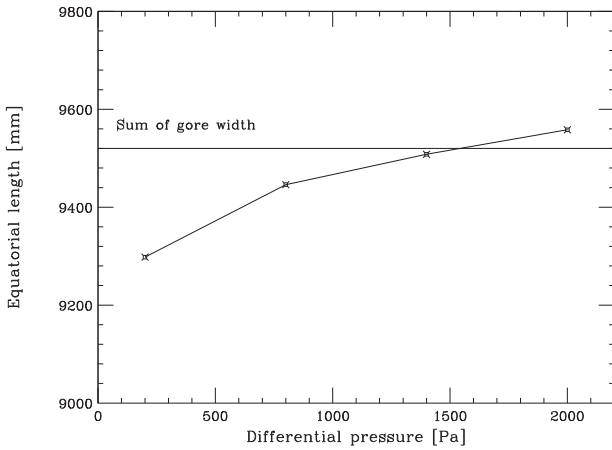


図 14: 赤道周長と差圧の関係。

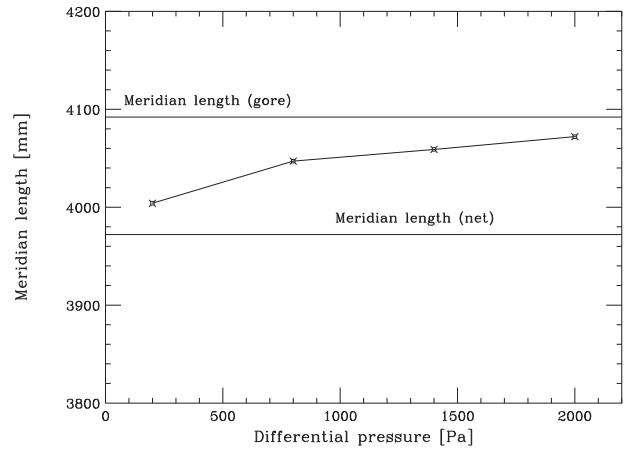


図 15: 子午線長と差圧の関係。

また、気球の体積が、差圧 P_d に比例して変化するとすると、その比例係数を a として、

$$V = V_0(1 + aP_d) \tag{4}$$

と表せる。したがって、ある時点の値を下付の 1 をつけて表すと、

$$(P_{a1} + P_{d1})V_0(1 + aP_{d1}) = n_1RT_{b1} \tag{5}$$

の関係があり、ある時刻 t でのモル数 $n(t)$ は、このときの値との比として、

$$\frac{n(t)}{n_1} = \frac{T_{b1}}{T(t)} \cdot \frac{(P_a(t) + P_d(t))(1 + aP_d(t))}{(P_{a1} + P_{d1})(1 + aP_{d1})} \tag{6}$$

と求めることができる。

さて、体積膨張係数 a は、かぼちゃ型では、体積が赤道長の 3 乗に比例していることを利用し、赤道長と差圧の関係から推定することができる。2019 年 1 月 8 日の測定結果の、200 Pa と 1400 Pa における関係から比例係数を求め、それを 3 倍することで、 $a=5.7 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ と求まる。この係数は、NPB2-2 気球での値 $6.7 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ [10] と同程度である。

このモデルを適用し、気球内ガスの温度として皮膜の表面温度を用いて、気球内ガスのモル数の時間変化を求めてみたが、うまく補正できないことがわかった。そこで、逆に気温や大気圧による変化が抑制されるように体積膨張係数 a を選んだのが図 20 である。図の黒線が $a=0$ (体積膨張なし)、赤が $a=1.2 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ 、青が $a=2 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ である。体積膨張係数は、 $1.2 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ 程度の値が尤もらしい。これは赤道長と差圧の関係で求まる値の 21 % と小さく、加圧に伴って、気球の形状がより扁平に変形していることを示唆している。

モル数の時間変化は滑らかな減少傾向の上にスパイク状の突起がのっているように見え、次第にモル数が減少していることがわかる。図中の右下がりの破線は、 $3 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ の傾きの直線である。内部の気体のモル数が $3 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ の割合で減少するのは、1,000 hPa の絶対圧の気体が密閉空間にあったとすると $3 \text{ Pa} \cdot \text{h}^{-1}$ でガスが漏れることに相当する。ゴム気球を入れる前の値 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ と比較すると、気密性は 3 桁の改善である。

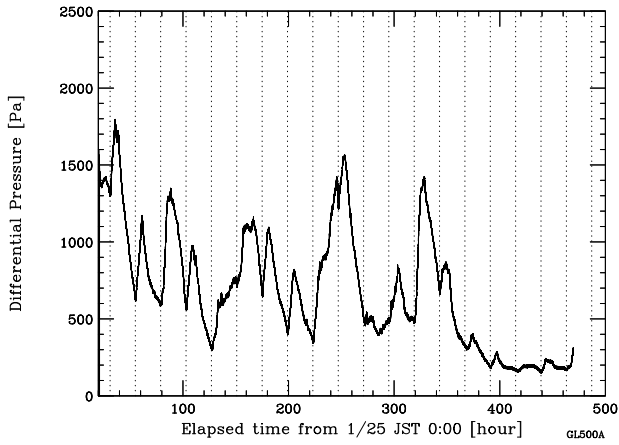


図 16: 差圧の時間変化。

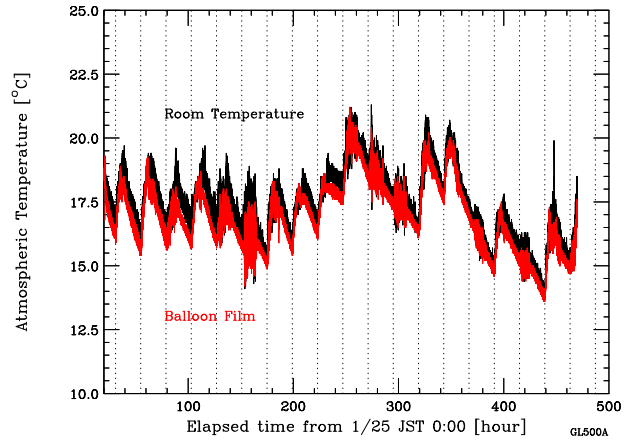


図 17: 気温の時間変化 (GL500A)。

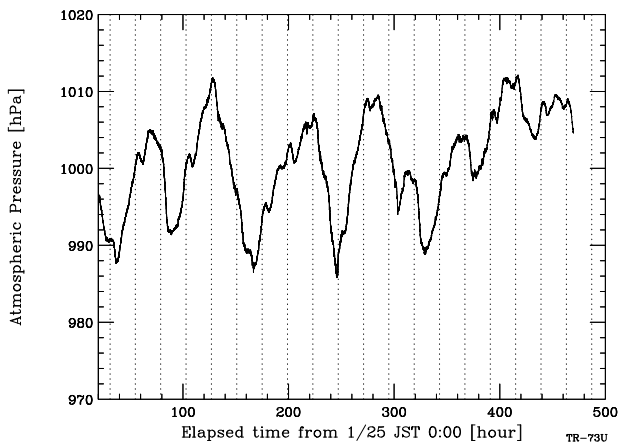


図 18: 大気圧の時間変化。

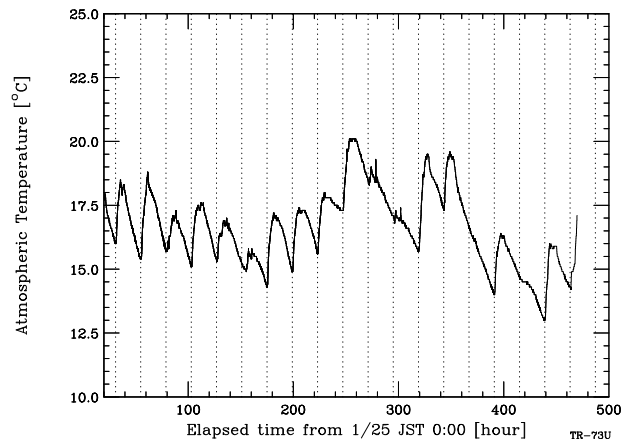


図 19: 気温の時間変化 (TR-73U)。

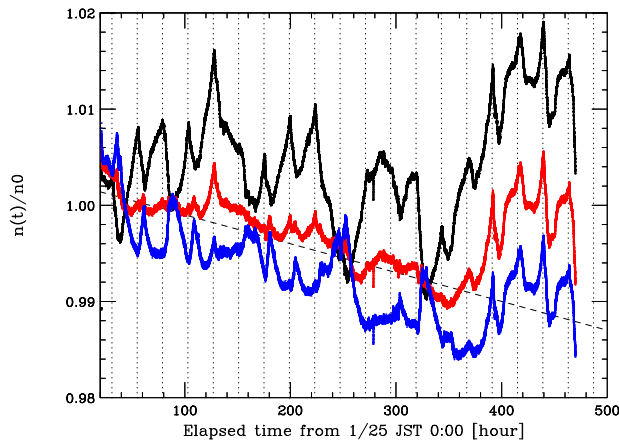


図 20: モル数の時間変化。

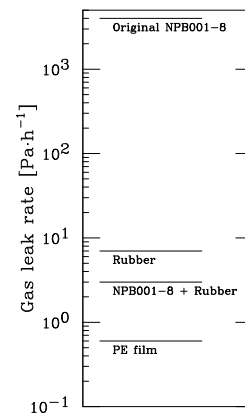


図 21: ガス漏れ量の比較。

ガス漏れ率の値は、このモデルに依存することなく求めることも可能である。データをみると、20H、85H、および、240Hのあたりでの、大気圧はいずれも996 hPa、皮膜温度も18 °Cで一致しており、大気圧や気温の影響を考慮せずに減少率を求めることができる。これは、図20において、モル数の相対比が、3通りの体積膨張係数に拘わらず、これらの時刻においては、ほぼ同一であることにも顕れている。

なお、400 H以降は、破線からのずれが大きくなっている。これは、この時期の差圧が200 Pa程度と低く、体積膨張係数が200 Paよりも大きい領域とで異っていることを反映しているものと考えられる。図14は上に凸であり、高い差圧がかかっていた場合と比較すると、200 Paあたりでの体積膨張係数は大きくなると推定されるが、破線の外挿値は、 $a=2\times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ とより大きい体積膨張係数の値の方が近く、この推定を裏付けている。

この結果とゴム皮膜のガス透過率を比較してみる。検査会社にて、常温(23 °C)におけるゴムシートの空気透過率を測定したところ、 $8.98 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ であった。膨張前のゴム気球の厚みは100 μm 、長さは1.7 mである。NPB001-8の設計子午線長(表1の全長)は3.97 mであるから、均一に伸びるとすると、長さのスケールで2.4倍、面積のスケールで5.5倍となり、ゴムの体積が保存しながら変形とすると厚みは1/5.5となり、18 μm となる。また、2019年1月9日の膨張試験時には気球の頭部側が選択的に伸ばされ、膨張時には元のゴムの長さの4倍になっていた。この結果を用いると気球の頭部側のゴムの厚みは6 μm となる。ここでは、間をとって10 μm 厚みまで伸びたと考えることにする。NPB001-8気球の表面積は22 m^2 であるから、1,000 Paの差圧がかかった際の1時間あたりのガス漏れ量は、 $7 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ である。さらに、NPB001-8気球の体積が10 m^3 であり、大気圧が 10^5 Pa であることを考慮すると、ガス漏れ率は $7 \text{ Pa} \cdot \text{h}^{-1}$ と求まる。今回の調査での漏れ率はこの値より小さく、ゴムだけでなく、ポリエチレンフィルムが気密性に寄与している影響が見えている。なお、10 μm 厚のポリエチレンフィルムのガス透過率を検査会社にて測定したところ、 $8.36 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ であった。これは同じ厚みのゴムシートの値の9%である。また、今回の気球のガス漏れ率をポリエチレンフィルムのガス透過率と比較すると、5倍である。様々なケースでのガス透過率の比較を図21にまとめた。

ポリエチレンフィルムにくらべ、今回の気球のガス漏れが大きいことは、ポリエチレン気球とゴムシートとの密着度があまりよくないことを意味している。NPB001-8気球はポリエチレンフィルムの子午線長を網線長よりも3%長くとり、フィルムに余裕を持たせる設計であるため、フィルムに皺が発生し密着度が悪くなっている可能性がある。ポリエチレンフィルムの子午線長を網線長に近付けることで、密着度を改善できるものと考えられる。

図16~20の縦の点線は午前7時を示す。図20で見られるピークは、概ね午前7時に合致している。この時刻は、気温が下降から上昇へ転じるタイミングに相当する。ピークの要因として、気球のガス温度が皮膜温度よりも下がっている可能性が考えられる。

5. まとめと今後の展望

気球の皮膜を二層化することによって、気密性が向上する可能性を調査した。まず、市販のポリエチレン袋にゴム気球を入れた実験により、原理を実証した。次に体積10 m^3 でガス漏れ量の大きなNPB001-8気球の内側にゴム気球を入れることによって、1,000 hPaの気圧の元で、1,000 Paの差圧をかけた際に、 $3 \text{ Pa} \cdot \text{h}^{-1}$ のガス漏れ率まで向上させることができることが確認された。

体積100 m^3 程度の小型のスーパープレッシャー気球は、大気重力波観測実験等にニーズがあり[11]、軽量の気球の開発が期待されている。体積100 m^3 で大気圧60 hPaを飛翔する気球の重量配分は、フィルム重量が2.0 kg(20 μm 厚のポリエチレンフィルムを想定)、網重量が2.7 kg、極部構造など、その他

が2 kg 程度であるため、全重量は6.7 kg と想像される。ゴム気球として、1.2 kg のものを利用するとすると、全重量は7.9 kg となり、18 %の増加である。この重量増加のため、気球の到達高度は、気圧にして18 %高く、高度にして1.1 km 低くなるという問題が発生するが、体積を大きくすることで容易に解消できるため、ゴム気球を入れることで気密性を高める方法が適用できると考えている。今後、ポリエチレンフィルムとゴム気球の密着度を向上させた体積100 m³ クラスの小型スーパープレッシャー気球の開発を進める予定である。なお、市販のゴム気球のサイズは最大でも3 kg であり、数100 m³ 以上の気球の気密性を向上させるには、ゴム気球でなく、ポリエチレンフィルムで二層化する、といった対策が有効である。

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、東京工業大学 環境・社会理工学院の泉 芙由美さん、東海大学工学部の阿部 亮太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。

補遺 A 気球内ガスのアンモニア濃度と検出感度

気球にアンモニアガスを充填する際は、注入する空気の経路にアンモニア水溶液を配置し、アンモニア水溶液から自然に気化するアンモニアを充填している。この際のアンモニア濃度を推定した。

用いられているアンモニア水溶液は 500 ml 入りのビンに入った 28 % の水溶液である。体積にして 200 ml 程度が一回の試験で利用されている。仮に全量のアンモニアが蒸発したとした場合の濃度を求めてみる。

200 ml のアンモニア水中に含まれるアンモニアの重量は、アンモニア水の比重が 0.9 g/cm^3 であることを考慮すると、

$$200[\text{cm}^3]/0.9[\text{g/cm}^3] \times 0.28 = 62 [\text{g}] \quad (7)$$

である。アンモニアのモル数は 17 であるから、 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ における体積は、

$$22.4 \times 10^{-3}[\text{m}^3/\text{mol}] \times \frac{273 + 25[\text{K}]}{273[\text{K}]} \times 62[\text{g}]/17[\text{g/mol}] = 0.09 [\text{m}^3] \quad (8)$$

である。気球の体積が 10 m^3 あることを考慮すると、0.9 % の濃度に相当する。JIS 2333:2002 によれば、体積分率 10 % のアンモニアガスを用いると $1 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3/\text{sec}$ の漏れを 995 秒の放置によって直径 1 mm のスポットとして検出可能とのことである。今回の試験では、濃度が 1/10 であり、時間にして 10 秒程度の積分に滞っていたため、時間が 1/100 であるため、 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa m}^3/\text{sec}$ 程度の漏れに感度があったと推定される。

参考文献

- [1] Debora Fairbrother “Superpressure balloon”, Proc. 2017 Scientific Ballooning Technologies Workshop, 2017
- [2] Andre Vargas, et al “The CNES 2017-2019 Balloon Program” AIAA Aviation Forum, 10.2514/6.2019-3054, 2019
- [3] Max Kamenetsky “Loon: A Balloon-Based Platform for Scientific Experiments in the Lower Stratosphere”, Proc. 2019 Scientific Ballooning Technologies Workshop, 2019
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] Saito, Y. et al. “Development of A Super-Pressure Balloon with a Diamond-Shaped Net” Adv. Space Res., 54, 8, pp.1525-1529, 2014
- [8] Akita, D. et al. “Development of a New Super-Pressure Balloon with A Net for High-Altitude and Long-duration Flights ” Trans. JSASS, Vol. 16, No.6, pp.470-475, 2018
- [9] 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 JAXA-RR-016-08, pp. 1-32, 2017
- [10] Saito, Y. et al. “Recent Developments on the Super-Pressure Balloon with a Diamond Shaped Net — Ground Inflation Tests of Two 2,000 m^3 Balloons —” Submitted to Trans. JSASS, 2019

- [11] 富川 喜弘、他 “南極における大気重力波のスーパープレッシャー気球観測の現状報告” 平成 30 年度大気球シンポジウム集録、isas19-sbs-024、2018