

LODEWAVE 実験にむけたスーパープレッシャー気球の開発 (I)

斎藤 芳隆^{*1}, 泉 芙由美^{*1,*2}, 秋田 大輔^{*2}, 中篠 恭一^{*3}
 松尾 卓摩^{*4}, 富川 喜弘^{*5,*6}, 橋本 紘幸^{*7}, 松嶋 清穂^{*8}

Development of a super-pressure balloon for the LODEWAVE (Long-Duration Experiment of gravity WAVE over Antarctica) (I)

SAITO Yoshitaka^{*1}, IZUMI Fuyumi^{*1,*2}, AKITA Daisuke^{*2},
 NAKASHINO Kyoichi^{*3}, MATSUO Takuma^{*4}, TOMIKAWA Yoshihiro^{*5,*6},
 HASHIMOTO Hiroyuki^{*7} and MATSUSHIMA Kiyoho^{*8}

ABSTRACT

Development of super-pressure balloons for the LODEWAVE is started. A 94 m³ super-pressure balloon NPB01-4 was developed for the first trial production and tested its capability in the pressure resistance and the gas permeability. This balloon is based on the technologies covering the polyethylene balloon with high-tensile net for the pressure resistance and setting a rubber balloon inside the polyethylene balloon for the gas permeability. For the ground inflation test, the balloon withstood the differential pressure of 3,400 Pa and kept positive differential pressure for 289 hours. These capability shows that the balloon can fly at the atmospheric pressure of 85 hPa for 289 hours with a payload of 3 kg. These results gave us the clear prospect for the development of the super-pressure balloon for the LODEWAVE. Following technical subjects to be solved were also found : 1. Development of slightly larger balloon to fly at the altitude of 60 hPa to meet the requirement from the mission, 2. Stable deployment, 3. Durability beyond 289 hours. In addition, for the flight operation, developments of the technique to measure the inner pressure, the launching procedure, and the termination device are necessary. We are going to solve these problems for the LODEWAVE.

Keywords: Scientific Balloon, Gravity Wave, LODEWAVE, Super-pressure Balloon, Membrane Structure

* 2020年12月1日受付 (Received December 1, 2020)

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

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

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

*5 国立極地研究所 (National Institute of Polar Research)

*6 総合研究大学院大学複合科学研究科 (School of Multidisciplinary Sciences, The Graduate University for Advanced Studies)

*7 藤倉航装株式会社 (Fujikura Parachute Company Ltd.)

*8 松嶋技術士事務所 (Matsushima Consulting)

概要

南極域での大気重力波観測実験 LODEWAVE に向け、スーパープレッシャー気球の開発を進めている。体積 94 m^3 のスーパープレッシャー気球、NPB01-4 を試作し、その気密性能と耐圧性能を評価した。この気球はポリエチレン皮膜に高張力繊維の網をかぶせることで耐圧性能を向上させ、内部にゴム気球を入れて皮膜を二重にすることで気密性能を強化した気球である。耐圧性能は $3,400 \text{ Pa}$ 、気密性能は 289 時間にわたり正圧を保持する能力があることがわかった。これは、 3 kg のペイロードを搭載して、 85 hPa の気圧高度を 289 時間に渡って飛翔可能であることを示しており、開発の目処がたった。LODEWAVE で利用できる気球とするには、要求される 60 hPa の気圧高度を飛翔させるためにもうひとまわりの気球の巨大化、気球の展開の確実性、289 時間を越える耐久性、といった改良を加える必要があることも判明した。また、気球圧力の計測方法、気球の放球方法、気球の破壊方法の確立といった飛翔運用時に必要な技術の開発も必要である。今後、これらの開発を実施し、LODEWAVE で利用できる気球の開発を進める。

重要語：科学観測用気球、大気重力波、LODEWAVE、スーパープレッシャー気球、膜構造物

1 はじめに

南極域に小型のスーパープレッシャー気球を飛翔させ、大気重力波の空間分布を測定する実験計画 (LODEWAVE : LONg-Duration Experiment of gravity WAVE over Antarctica) が進められている [1]。大気重力波は、大気中の運動量輸送を担い、子午面循環の駆動を通じて温度・物質分布の決定に重要な役割を果たすことが知られている。地球シミュレータによる高解像度気候モデルでの大規模計算の結果からは、従来の気候モデルでは表現できない小規模な大気重力波の地球気候への影響と不確実性は、南極域において最大となることが判明しており [2]、南極域での大気重力波観測が、モデルによる現在気候の再現、将来気候の予測、短期的な数値予報のいずれにおいても重要である。しかし、大気重力波の空間スケールは数 km から数千 km、時間スケールは数分から数十時間と幅広く、あらゆる波長・周期帯の大気重力波を捉え、それらが遠隔に輸送する運動量やエネルギーを観測できる装置は南極域には存在しなかった。2011 年には南極昭和基地に大型大気レーダー PANSY (Program of the Antarctic Syowa MSTIS radar) が設置され [3][4]、全周波数帯の大気重力波の鉛直運動量フラックスを直接推定することができるようになったものの、観測結果は南極昭和基地上空の一点に限られている。

そこで、南極上空にスーパープレッシャー気球を飛翔させ、大気重力波の運動量輸送の水平分布を明らかにし、PANSY レーダーとの同時観測による三次元的な挙動の理解を目指す LODEWAVE を計画している。この実験では、南極の夏季にスーパープレッシャー気球を高度 19 km (大気圧 60 hPa) に飛翔させ、 3 kg 程度の小型気球の範疇に入るペイロードによって気球の高度、気圧、および気温の時間変化を精密計測することで大気重力波の観測を実施する。

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、長時間の飛翔を可能にする気球である。小型スーパープレッシャー気球による気象観測は CNES の得意とするところであり、たとえば、2010 年には Concordiasi キャンペーンが実施されている [5]。しかし、これらの観測で使用されたペイロードは 20 kg 以上、スーパープレッシャー気球は直径 10 m 前後あり、スーパープレッシャー気球の取り扱いに習熟した CNES 大気球グループのメンバーが

数名参加しなければ観測を実施することができなかつた。また、1回のキャンペーン実施に数百万ユーロの予算を必要とするため、定常的な観測の実施は不可能であった。もし、小型、軽量のシステムが開発できれば定常的な観測が可能となり、数値予報も大きく改善されるはずである。

我が国においてスーパープレッシャー気球の開発は、1990年代より精力的に進められており [6][7][8]、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きた [9][10][11]。我々が開発を進めてきた気球は体積あたりの重量が小さく、軽い気球が製作できるのが特徴であり、同一高度の飛翔を小型の気球で実現することができる。さらに、2020年にはポリエチレン気球の内側にゴム気球を入れ二層化することによって気密性が高まることを見出された [12]。そこで、これらの知見を元に、LODEWAVEでの使用を念頭におき、体積 94 m^3 の小型、軽量の NPB01-4 気球を製作した。

本論文は、この NPB01-4 気球の特性評価結果を示すものである。次章に気球の設計、3章にゴム気球をポリエチレン気球の内側にいれて膨張させた試験、4章に耐圧試験、5章に気密試験、6章に破壊試験の結果を示し、7章で結果をまとめる。

2 NPB01-4 気球の設計

NPB01-4 気球の諸元を表 1 に示す。共に示した NPB001-8 気球は、ゴム気球を内側に入れて気密性を評価した初めての気球である [12]。ゴム気球を入れる前の状態では、この気球に空気を注入して $1,000 \text{ Pa}$ の差圧をかけた際のガス漏れ率は $4,000 \text{ Pa}\cdot\text{h}^{-1}$ であったのに対し、ゴム気球を入れたことでガス漏れ率は $3 \text{ Pa}\cdot\text{h}^{-1}$ に抑制され、400 時間以上にわたり正圧が保たれることがわかり、ゴム気球を内側に入れるという方式で気密性が高められることが示された。しかし、LODEWAVE 用にはより大型化し、高い高度の飛翔を可能にする必要がある。これまで、より大きな体積の気球としては、体積 106 m^3 の NPB01-2 気球を製作している。極部の設計に課題があったものの、 $1,800 \text{ Pa}$ の耐圧性能を $10 \mu\text{m}$ 厚のフィルムで達成している。

LODEWAVE 実験では 60 hPa の気圧高度に 3 kg のペイロードを飛翔させる必要がある。気球内ガスの昼間の圧力は夜間よりも 10% 大きくなると予想され、夜間には大気圧よりも 10% 高い圧力を有するように設計すると、耐圧性能として $1,200 \text{ Pa}$ の使用耐圧が必要とされ、2 倍のマージンをみて $2,400 \text{ Pa}$ の耐圧性能が必要となる。

これらの状況を鑑み、LODEWAVE に向けた気球の試作として NPB01-4 気球を製作した。NPB01-4 気球には以下の特徴がある。

- 気球頭部尾部の網端部はケブラーロープのリングに結合させ、金属のリングを用いないことで軽量化を行った。
- パネル数を 8 と最小にすることで、溶着線を最小化し、気球の製作コストを下げた。
- 強度や気密性の観点から $20 \mu\text{m}$ 厚のフィルムを用いることとした。これにより、気球重量は 1 kg 程度増加する。結果として、気球重量は 7.8 kg となり、 3 kg のペイロードを搭載すると 85 hPa の気圧高度を飛翔するに留まることとなった。 60 hPa を飛翔するには、この試験気球と比較して、体積にして 1.5 倍程度の大型化が必要である。
- 網線長とフィルム長を等しく設計した。これは、フィルムの余剰を少なくし、ポリエチレンフィルムとゴム気球の密着度を高めることを目的としたものである。大型気球、たとえば、NPB2-1 気球では、子午線方向のフィルムの長さを網線の長さよりも 3% 長くすることで、フィルムへの応力集

表 1: NPB001-8、NPB01-2、NPB01-4 気球の諸元

気球番号	NPB001-8	NPB01-2	NPB01-4
形状	かぼちゃ型	かぼちゃ型	かぼちゃ型
公称容積 (m ³)	9.3	106	94
直径 (m)	3.03	6.76	6.5
全長 (m)	3.97	8.86	8.5
高さ (m)	1.81	4.05	3.8
パネル数	18	12	8
最大パネル幅 (mm)	524	1768	2551
フィルム種類	ポリエチレン	ポリエチレン	ポリエチレン
フィルム厚 (μm)	10	10	20
ゴム気球重量 (g)	600	—	1,200
網線強度 (N)	415	415	415
縦ロープ数	402	603	804
網交点間隔 (mm)	101	101	103
赤道ロープ間隔 (mm)	48	71	48
弁座直径 (mm)	530	530	300
頭部尾部ロープ強度 (N)	11,000	11,000	11,000
気球重量 (kg)	9.8	19	7.8

中を避ける設計としている [13]。この気球では余剰がないことで耐圧性能が下がるものの、要求仕様は達成できると予想されるためこれを許容した。

- ポリエチレン気球の内部にゴム気球を入れ、気密性の向上を図った。ゴム気球は、次章での実験結果より、トーテックス社製 TA-1200(重量 1.2 kg) を利用した。

3 ゴム気球のサイズと膨張方法の検討

気球を試作する上で不明だったのが、内側にいれるゴム気球のサイズである。ゴム気球のサイズが小さければ、重量の観点からは優れるが、膨張に伴う破損のリスクが高まる。NPB001-8 気球内にはトーテックス社製ゴム気球 TA-600(重量 600 g) を入れたが、膨張させた際、ゴム気球の膨張が不均一であり、口管と逆側の膨張率が大きいことが見出されている。これはゴム気球とポリエチレン気球が滑らず、膨張の初期からポリエチレンに接触していた口管側の膨張が抑制されたためと考えられた。TA-600 は直径 7 m に達するまで膨張することが知られており、NPB001-8 気球が直径 3 m に過ぎないため、多少の不均一性は許容できるが、直径 6 m となる NPB01 サイズではゴム気球の不均一な伸びによりゴム気球がポリエチレン気球のサイズに達する前に破裂する可能性も考えられる。

そこで、NPB01-4 気球の製作に先立って、ポリエチレン気球内でゴム気球を膨張させた際の挙動を調査するため、NPB01-4 気球のポリエチレン皮膜のみを利用し、その中でゴム気球を膨張させる試験を実施した。この気球は、ポリエチレンフィルムが溶着されたものの、両極が未処理で、網もかぶっていない状態である。ゴム気球としては、TA-600 に換えて、TA-1200(重量 1.2 kg) を用いた。TA-1200 の子

午線長の初期値は 2.2 m であり、満膨張になった際はポリエチレン気球のサイズである 8.5 m まで伸ばされることとなり、その膨張率は 3.9 倍である。一般にゴム気球は 5 倍程度に伸びた場合に破裂するため、ゴム気球が均等に膨張するならば問題はないが、偏りの程度によってはより重く、より大きい体積まで膨張できるゴム気球を利用する必要がある。

3.1 ポリエチレン皮膜内でのゴム気球の膨張試験 (空気なし)

膨張試験は、2019 年 6 月 17 日に宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所先端宇宙科学実験棟気球組立室にて実施した。NPB01-4 気球の皮膜の片側の極を縛ってクレーンで吊り下げ、逆側の極から TA-1200 ゴム気球を挿入した (図 1)。ゴム気球にはあらかじめ子午線方向に 10 cm ごとにマークをつけ、口管の逆側から口管に向かって 0 番から 22 番まで番号づけを行った。口管が下になるため、上から順に番号が振られたことになる。気球の極部は開いていたが、頭部側はロードテープで縛ることで穴を小さくし、尾部側はゴム気球の口管をポリエチレン気球と一緒にたこ糸で縛ってポリエチレンフィルムとゴム気球の間に空気が入ることを防いだ。なお、ゴム気球に空気を注入する前に、ポリエチレン気球内の空気をできるかぎり排気した。

ゴム気球に空気をブロウワで注入し、子午線長の残りが 1 m 程度となるまで膨張させ (図 2)、赤道以下のゴム気球のマークの間隔を測定した (計測 17-1)。この時点で、ポリエチレン気球の赤道部に最も近いゴム気球のマークは 9 番であった。ゴム気球のマークの中心値は 11 番であり、ゴム気球の上側 (口管から遠い側) の膨張率が大きいことが示唆される結果である。後に図 5 として示すように、ゴム気球のマークの間隔は口管に近いほど小さく、上ほど伸びが大きくなっており、測定できた最上部の 10-11 番の間においては 360 mm に達していた。

ポリエチレン気球の子午線長の設計値は 8.5 m であり、ゴム気球の 0 番から 9 番までが上半分を担うとすると、ゴム気球の伸びは平均的には 4.7 倍に達しており、上の方ほど伸びが大きいことを考慮すると、頭頂部では破裂の目安である 5 倍を越える可能性があった。そこで、気球の膨張をこの時点で停止させ、その状態でしばらく放置した。

一時間程度後、気球は小さくなっており、ゴム気球のマーク間隔を測定した (計測 17-2) ところ、それぞれの間隔は一時間前よりも小さくなっており、ガスが抜けたことが裏付けられた。気球に再度空気を注入し、一時間前と同程度の伸びになるまで膨張させ、再度、マーク間隔を測定した (計測 17-3)。計測の結果、伸びの不均一性が最初に膨張させた際よりも改善されることがわかった。ゴム気球をポリエチレン気球から取出し、マーク間隔の計測を行った (計測 17-4)。

取り出した TA-1200 ゴム気球 (ゴム気球 No.1) の開放空間での膨張試験を実施した。膨張の途中で 4 回 (計測 17-5、17-6、17-7、17-8) の計測を実施した。ポリエチレン気球内に入れた際と同様に口管の逆側の伸びが大きく、不均等な膨張が再現された。

3.2 ポリエチレン皮膜内でのゴム気球の膨張試験 (空気あり)

翌 2019 年 6 月 18 日に同じ場所でポリエチレンフィルムとゴム気球の間に空気を入れた場合の膨張試験を実施した。これは、間に空気を入れることでフィルムとゴム気球の摩擦を減らすことを狙ったものである。体積 1 m^3 の空気をつめることを目標とし、ゴム気球とポリエチレン気球の間にブロウワで 22 秒間 (ブロウワの流量は $2.7 \text{ m}^3/\text{min}$)、空気を注入した (図 3)。前日と同様にゴム気球を挿入し、ブロウワでゴム気球に空気を注入した。ゴム気球は前日利用したゴム気球と異なる新品を用い、前日の試験と同様にあらかじめ子午線方向に 10 cm ごとにマークをつけ、口管の逆側から口管に向かって 0 番から 22



図 1: クレーンで吊り下げた NPB01-4 の皮膜。

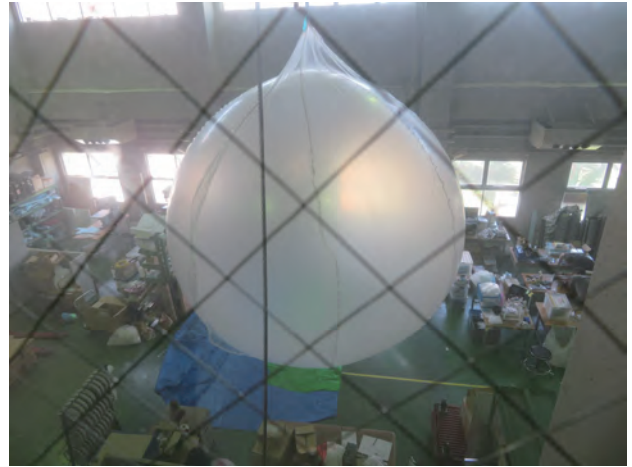


図 2: 最大膨張状態の気球 (間の空気なし)。



図 3: 間に空気を注入した NPB01-4 の皮膜。



図 4: 最大膨張状態の気球 (間に空気あり)。

番まで番号づけを行った。膨張の様子を前日と比較するとゴム気球とポリエチレンフィルムの間に空気の層があるため、より滑らかにゴムとポリエチレンが滑っているように見受けられた。前日と同程度の伸びとなった時点で、ゴム気球のマーク間隔を測定した(計測 18-1)。膨張したゴム気球が吊り下げ点に概ね達することを確認し(図 4)、膨張を停止した。ここでゴム気球のマーク間隔を測定(計測 18-2)すると共に、ゴム気球の内圧を測定したところ、大気圧との差圧は 61 Pa であった。ゴム気球から空気を抜き、ゴム気球をポリエチレン気球から取出し、マーク間隔の計測を行った(計測 18-3)。

この試験で用いた TA-1200 ゴム気球(ゴム気球 No.2)の開放空間での膨張試験も実施した。ゴム気球を膨張させ、途中で合計 2 回(計測 18-4、18-5)の計測を実施した。計測 18-5 の時点でのゴム気球の内圧を測定したところ、大気圧との差圧は 48 Pa であった。また、膨張させた状態での計測終了後、ゴム気球から空気をぬいた後にも計測した(計測 18-6)。

3.3 結果の評価

図5、6にポリエチレンフィルムの中でゴム気球を膨張させた際のマーク間隔の子午線方向の依存性を示す。測定実施状況を表2にまとめた。子午線方向の距離は、ゴム気球の口管と逆側、吊り下げた際の頭頂からの距離となっている。図5が空気なし、図6が空気ありの結果である。それぞれの図中の水平な点線は、子午線長(計測17-3の場合は、NPB01-4気球皮膜の子午線長よりも1m短い7.5m、計測18-2の場合は8.5mとした)を22で割ることで求めた平均的なマーク間隔を示している。以下が読み取れる。

- 図5の空気なし、図6の空気ありの両方において頭部側に向って伸びが大きくなる。
- 計測された尾部側の伸びは平均的な伸びを下回っており、その分だけ頭部側が大きく伸びていることが予想される。
- 図5の空気なしにおいて、計測17-3の頭部側の3点の値を直線でフィッティングした線(図中の破線)は頭頂において500mmを越えており、頭頂部の伸びは破裂する目安の5倍を越える恐れがある。ただし、計測17-3は途中で空気を抜いている。
- 図6の空気ありにおいて、計測18-2の頭部3点の値を直線でフィッティングした線(図中の破線)は頭頂において500mm以下であり、頭頂部の伸びは破裂する目安以下に収まっている。
- 計測17-1と計測17-3を比較すると、一度しばませて再度膨らませた方が均一性が高くなっていることがわかる。
- TA-1200ゴム気球を入れ、ゴム気球とポリエチレン皮膜との間に空気を入れることで、ゴム気球はポリエチレン皮膜で定まる最大体積まで膨張可能であり、NPB01-4気球の中に入れるゴム気球はTA-1200が適当である。

破裂を防ぐためには、ポリエチレン皮膜とゴム気球の間に空気を入れるのが有効である。しかし、空気を入れたことにより、フィルムとゴム気球の密着性を悪くなるため、気密性能の劣化が懸念される。この評価は5章で実施する。

図7、8に膨張試験に用いたゴム気球を単独で膨張させた際のマーク間隔の子午線方向の依存性を示す。これらを見ると二つのゴム気球で依存性が大きく異なることがわかる。ゴムにはマリンス効果[14]とよばれる膜効果があり、一度伸ばされたところが伸びやすいことが知られている。両者の違いはこの効果を見ているものと考えられる。図9にこれらの結果を重ねて示す。膨張後の自然長をよくみると、大きく膨張させた箇所ほど大きくなっており、またNo.2の方がより均一であることがわかる。これは、No.2の空気を入れた実験の方がゴム気球のポリエチレン皮膜内での膨張が均一だったことを反映しているものと考えられる。

4 耐圧性能の評価

ポリエチレン気球内でのゴム気球の実験結果を受け、TA-1200ゴム気球をポリエチレン気球の内側にいれ、NPB01-4気球を製作した。この気球が正常に展開すること、2,400Paの耐圧性能を有することを確認する目的で耐圧試験を実施した。

4.1 耐圧試験その1

実験は2019年8月27日、藤倉航装船引工場風洞棟の横の駐車場(屋外)にて実施した。ここに隣接する風洞棟の屋上には、クレーンがあり、モノを吊り下げることができる。しかし、建物の壁からの張り

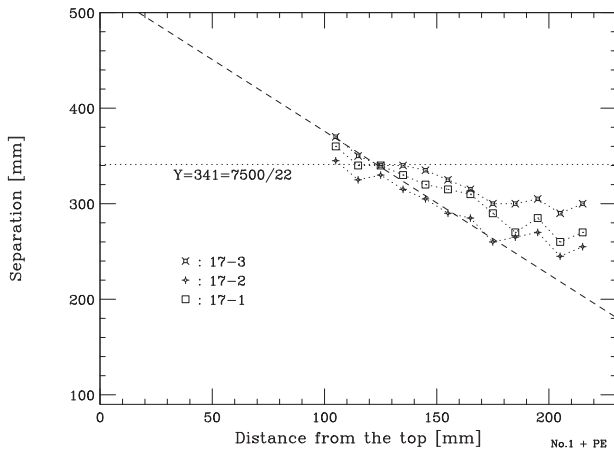


図 5: ポリ気球内のゴム気球 2(空気なし) の膨張

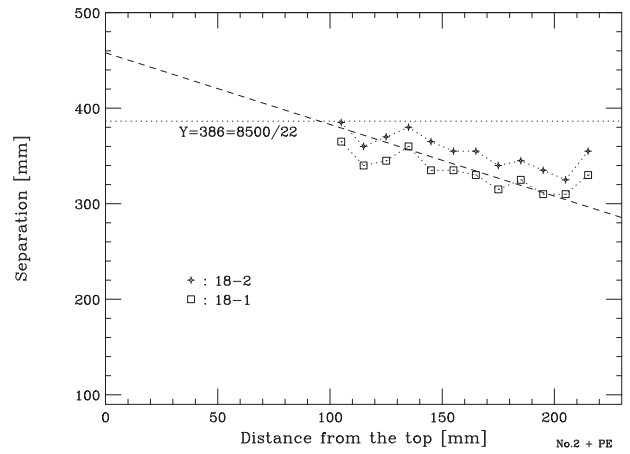


図 6: ポリ気球内でのゴム気球 2(空気あり) の膨張

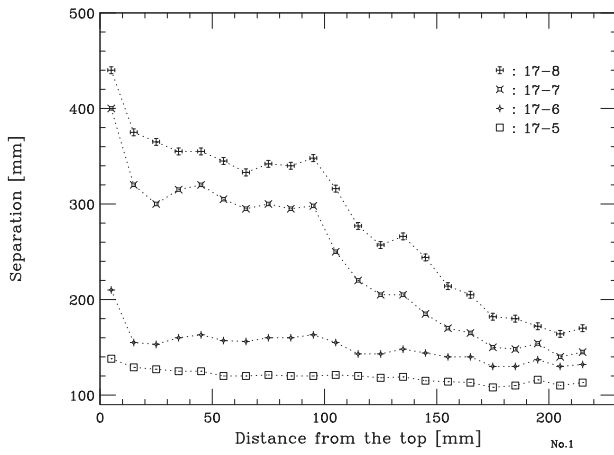


図 7: 開放空間でのゴム気球 No.1 の膨張

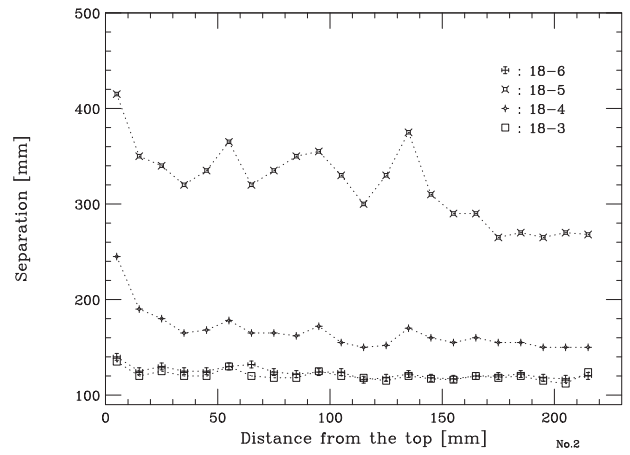


図 8: 開放空間でのゴム気球 No.2 の膨張

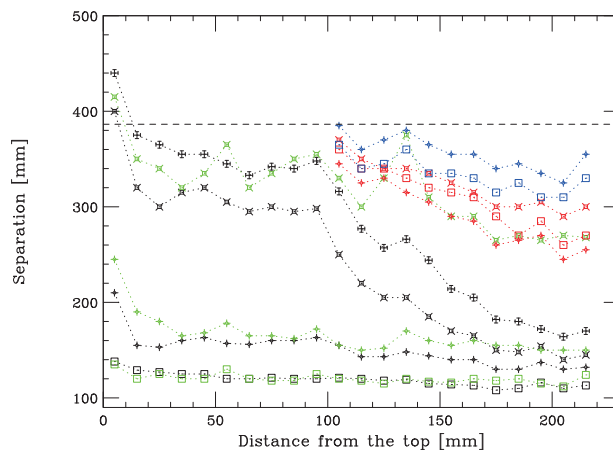


図 9: 様々な条件でのゴム気球の膨張。赤:図 5、青:図 6、黒:図 7、緑:図 8

表 2: ポリエチレン皮膜内でのゴム気球の膨張試験

項目	実施順	使用ゴム気球	測定状況
計測 17-1	1	No.1	子午線長 1 m を残して NPB01-4 気球皮膜内で膨張した状態、事前空気づめなし
計測 17-2	2	No.1	計測 17-1 の 1 時間後、空気が抜けている
計測 17-3	3	No.1	NPB01-4 気球皮膜内で再膨張、子午線長 1 m を残して膨張した状態、事前空気づめなし
計測 17-4	4	No.1	ガスを抜いた状態
計測 17-5	5	No.1	開放空間で空気を注入した状態
計測 17-6	6	No.1	開放空間で空気を注入した状態、計測 17-5 よりガス量大
計測 17-7	7	No.1	開放空間で空気を注入した状態、計測 17-6 よりガス量大
計測 17-8	8	No.1	開放空間で空気を注入した状態、計測 17-7 よりガス量大
計測 18-1	9	No.2	子午線長 1 m を残して NPB01-4 気球皮膜内で膨張した状態、事前空気づめあり
計測 18-2	10	No.2	NPB01-4 気球皮膜内でほぼ満膨張の状態、事前空気づめあり
計測 18-3	11	No.2	ガスを抜いた状態
計測 18-4	12	No.2	開放空間で空気を注入した状態
計測 18-5	13	No.2	開放空間で空気を注入した状態、計測 18-4 よりガス量大
計測 18-6	14	No.2	ガスを抜いた状態

出しは3 m程度しかなく、気球の半径が3 m程度であるため、気球の尾部を斜め横に引っ張ることで建物との接触を防いだ。このため、気球は斜めに吊り下げられる。

まず、尾部側からポリエチレン気球とゴム気球の間に1 m³程度空気を注入した。次に頭部側のガス注入口に圧縮空気注入用のチューブを挿入し、気球をクレーンから吊り下げ、圧縮空気を注入した(図10)。ゴム気球はポリエチレン気球に張り付くことなく展開し、空気を入れる有効性が確認された。

図11は70 Paの差圧が印加されたNPB01-4気球の側面から写真である。網にはそれなりの張力がかかっている状態となったが、網が不均一に展開していた。図12は頭部の、図13は尾部の写真である。網の一部はパネルの境界を乗り越えてしまっており、さらに加圧しても正常に展開するのは困難であるように思われた。そこで、気球から空気を抜いて実験を終了した。

この気球のパネル数は8であり、最大パネル幅は2,551 mmと広く、総網線数が804本であるから、パネル1枚には100本の網線(目の数では50個)が存在している。先に試験し、正常に展開したNPB01-2気球においては、表1にあるようにパネル数12、総網線数が603本であったから、パネル1枚には50本の網線が存在していた。網とフィルムとの結合はパネルの縁で行っているため、今回実施したNPB01-4気球の網とフィルムの固定は100本の網線に一回であったのに対し、NPB01-2気球においては50本の網線に一回と倍の頻度で行われていたことになる。NPB01-4気球の展開の不良は、固定間隔が広過ぎたことによるものと考えられる。さらにパネル数が少ないことにより、網を固定しているロードテープ部が外側に大きく出っ張り、そこに網がひっかかる、という問題も発生した。パネル数が少ないと、パネルの中央の長さにくらべ、パネルの端の溶着部の長さがより長くなる。結果として、溶着部が長くなるため、フィルムとロードテープが子午線方向に余り、出っ張ったものと考えられる。

さらに、網の偏りを助長させたのは、気球を斜めに引張ながら展開させたことであつた。展開には課題があるが、気球を鉛直に吊り下げ、膨張させることで、耐圧性能の評価は可能と考えられた。

4.2 耐圧試験その2

鉛直に吊り下げ、展開を補助することで耐圧特性を評価する実験を2019年10月3日、小野町町民体育館にて実施した。天井に十字にロープを張り、その交点に設けた滑車を介して気球を吊り下げ、ウインチにて上下できるようなセットアップを組んだ。差圧計(COSMO製DP-340 5 kPaレンジ)による気球の内外差圧、および、熱電対による気温の測定を行った。また、空気注入時から、水平3方向、および、天井からビデオカメラでの撮影を行った。

耐圧試験その1と同様に気球尾部側からゴム気球とポリエチレン気球の間に1 m³程度の空気を注入した(図14)後、頭部側から空気を注入し、直径2 m程度まで膨張したところで、気球を尾部側から吊り下げた(図15)。気球へのガス注入は、下に位置する気球の頭部側から継続して実施した。

最初、気球を横倒しにした状態で空気を注入したため、ポリエチレン皮膜と網が偏って配置していた。これは、耐圧試験その1で見い出された展開の不具合につながる課題である。今回は、手でポリエチレン皮膜を引張り、適正な位置に配置しなおすことでこれに対応した。

気球は図16のように満膨張となった。ロードテープの周辺では網の目からのフィルムの張り出しが大きく(図17)、逆に、パネルの中央付近では網の目からのフィルムの張り出しがあまり見られない(図18)。パネル形状が近似形であり、ロードテープのあるところで子午線方向のポリエチレンフィルムの余剰が大きいためと考えられる。そもそも、この気球は、パネル数が8と少ないため、ロードテープのある皮膜の継ぎ目の子午線長とパネル中央の子午線長との長さの違いが大きい。フィルムが張り出している部分には、ゴム気球とポリエチレン皮膜の間に空気が入っており、密着することで気密性を保つという点からはこの張り出し部は不利である。



図 10: 気球頭部から空気を注入



図 11: 70 Pa 印加時の気球の網の偏り (側面)



図 12: 70 Pa 印加時の気球の網の偏り (頭部)



図 13: 70 Pa 印加時の気球の網の偏り (尾部)

表 3: 赤道長と子午線長

時刻	圧力 [Pa]	赤道長 [mm]	子午線長 [mm]
13:35	310	19,574	8,364
13:44	360	19,637	8,364
13:46	520	19,760	8,386
13:54	710	19,863	8,396
14:01	870	19,932	8,413
14:10	1,070	20,008	8,434
15:46	740	19,936	8,410
15:48	1,070	20,018	8,438

表 4: 1,070 Pa 印加時のパネル幅

パネル番号	幅 [mm]	パネル番号	幅 [mm]	パネル番号	幅 [mm]	パネル番号	幅 [mm]
1	2,496	2	2,480	3	2,476	4	2,510
5	2,454	6	2,521	7	2,491	8	2,559

さらに加圧し、310、360、520、710、870、1,070 Pa と順に加圧し、各圧力で赤道長、子午線長を測定した。1,070 Pa の計測後、1 時間、加圧状態で放置した。この間、差圧は 1,070 Pa から 740 Pa へと減圧したが、気球の損傷は見られなかった。再度、1,070 Pa まで加圧して赤道長、子午線長、および、各パネル間隔を計測した。その後、加圧し、2,400 Pa を越えたところで減圧した。この時点では、パネル中央にもフィルムの張出しが見えており、パネル形状が近似形であることの影響が軽減されているように見える。その後、気球を吊り上げ、アンカーの荷重をかけて内部の圧力を高めつつ、ブロウワを逆回転させて空気を抜いた。

差圧の時間変化を図 19 に、赤道長、子午線長、および、パネル幅の計測結果を表 3、4 に示す。パネル幅の揺らぎは 2.4 % に滞っていた。赤道長、子午線長については、6 章で破壊試験の結果と共に述べる。

以上の試験により、2,400 Pa 以上の耐圧性能を有することが確認された。ただし、気球が確実に展開するように改良する必要がある。

5 気密試験

気球の気密性を評価する方法の一つは、空気で加圧し、圧力の時間変化を長時間に渡ってモニターすることであるが、10 m³ 程度の空間を長期に占有するのが課題である。今回は、南極への輸送物資の積み込みが完了した直後で空間のできた国立極地研究所の観測倉庫を利用した。

実験は 2019 年 12 月 11 日より実施した。この倉庫は中二階に 6 m × 7.2 m の格子状の梁が存在しており、その梁までの高さは 4 m であった。気球は満膨張になった際にはこの梁の下におさまるが、展開時にはより高くから吊り下げる必要がある。そこで、2 階の天井から格子状の梁を避けるように吊り下



図 14: 気球尾部から空気を注入。



図 15: 気球の吊り下げ。



図 16: 満膨張となった気球。



図 17: ロードテープ付近のフィルムの余剰。



図 18: パネル中央部。フィルムの余剰なし。

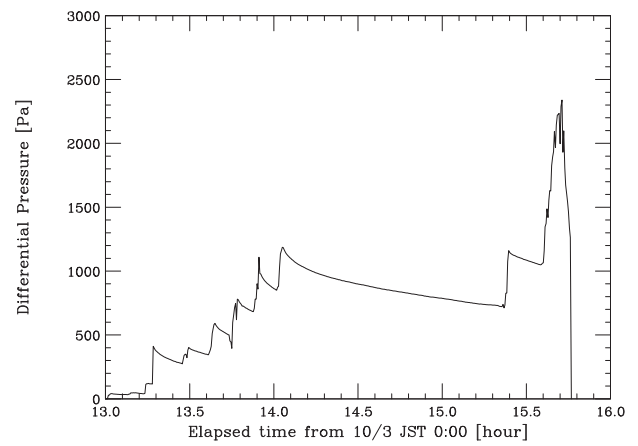


図 19: 差圧の時間変化

げ点を用意し(図20)、そこで満膨張させることとした。その場所は部屋の中央に位置するため、別途、長期間保管用の吊り下げ点を梁に用意した(図21)。

これまでと同様に、尾部から1 m³程度、空気を注入し、さらに、気球を尾部側から手で吊り上げ、頭部側から空気を注入した(図22)。大気圧との差圧が1,200 Paに達した時点で空気の注入を停止し、ガス注入口を圧力センサー(Setra 239、600 Paレンジ、および、3,000 Paレンジ)に接続し、気圧計出力、熱電対出力と共に1秒ごとにデータロガーGL500Aで記録した(図23)。また、おんどとり(TR-73U)を用いて、気圧、気温を20秒ごとに記録した。気球はタイムラプスカメラで1分ごとに撮影した(図24)。以後、12月20日に空気を追加で注入し、加圧する作業を行った他は、気球をそのままの状態では放置した。

12月24日の朝、内側のゴム気球が破裂していることに気付いた。タイムラプスカメラの映像(図25)から、12月23日16時21分頃に破裂していることが判明した。気球は差圧力ゼロの状態となっていたが、以後も形状を保っており、ポリエチレンフィルム部分の大きな損傷は見られなかった。翌日の12月25日に気球から空気をぬいて撤収した。

図26~28に得られた差圧、気圧、気温の時間変化を示す。図の点線は日付が変わったことを示している。差圧計測結果の233時間における不連続点は、加圧したことによるものである。この際、630 Paだった大気圧との差圧を960 Paまで増加している。12月11日15時の計測開始から12月23日16時に気球が破裂するまでの289時間、気球の差圧はすべて正圧であった。

時間変化はNPB001-8の際よりも大きかった。図26と図28をみると14~15時で気温が最大値をとり、また差圧も急激に上昇していることがわかる。図24は、14時の写真である。これをみると、ちょうど窓からの直射日光が気球に照射される時間に相当していたことがわかる。

図29に12月23日の差圧の時間変化を示す。点線は図25の撮影時刻に相当しており、この時刻の前後で差圧の値が不連続に40 Pa低下していることわかる。補遺Aに示すように、この差はゴム気球が半径3 mになった場合の差圧に相当している。

この気密性能をポリエチレン皮膜からのヘリウムガスの透過率で制限される気密性を文献[13]に倣って比較してみる。10 μm厚ポリエチレンフィルムのヘリウムガス透過率は、飛翔高度の気温である-60 °Cにおいて、350 cm³/m²·day·atm[13]であり、NPB01-4気球では倍の厚みである。20 μm厚ポリエチレンフィルムを利用しているので、ヘリウムガス透過率は、180 cm³/m²·day·atmである。この気球の体積は94 m³、表面積は104 m²であり1,200 Paの大気圧との差圧をもって飛翔する場合を考える。この場合、ヘリウムガスの絶対圧は7,200 Paであることを考慮すると、1日で放出されるガス量は、

$$350 \times 10^{-6} \times 104 \times 7200 / 101300 \times 1013 / 72 \times (273.15 - 60) / 273.15 = 2.8 \times 10^{-2} [\text{m}^3] \quad (1)$$

である。圧力に換算すると、

$$6000 \times 2.8 \times 10^{-2} / 94 = 1.8 [\text{Pa}] \quad (2)$$

となる。100日間飛翔しても圧力損失は180 Paに留まっている。したがって、気密性はヘリウムガスの透過ではなく、物理的な欠陥で律速されていることがわかる。

以上より、289時間にわたり正圧を保つ程度の気密性は有していること、その際にはゴム気球が破損しているため、より長期間の気密性を保つにはゴム気球の強度を改善する必要があることがわかった。今後、ゴムの耐候性やクリープ特性を常温常圧だけでなく、低温低気圧環境で評価し、ゴム気球の最適化を進める。



図 20: 膨張用吊り点

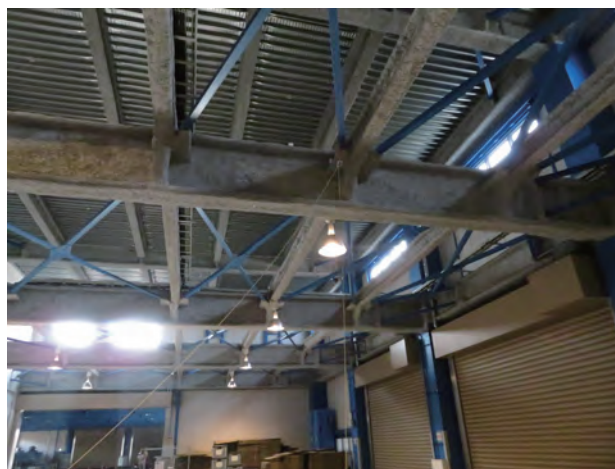


図 21: 保管用吊り点



図 22: 気球への空気注入



図 23: 満膨張になった気球



図 24: 保管状態の気球 (12/12 13:59 撮影)



図 25: ゴム気球破裂後の気球。ゴム気球が下にある。

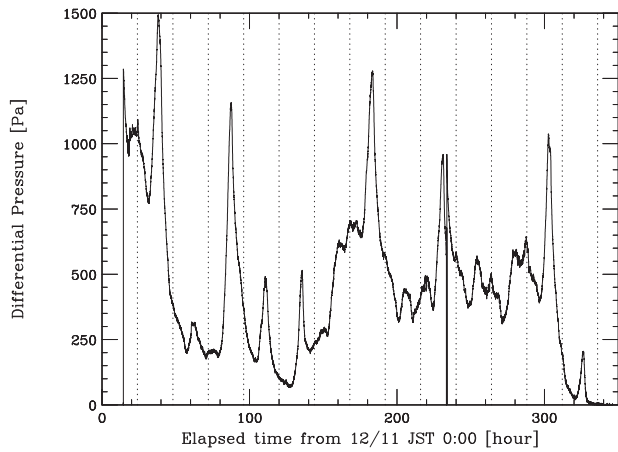


図 26: 差圧の時間変化

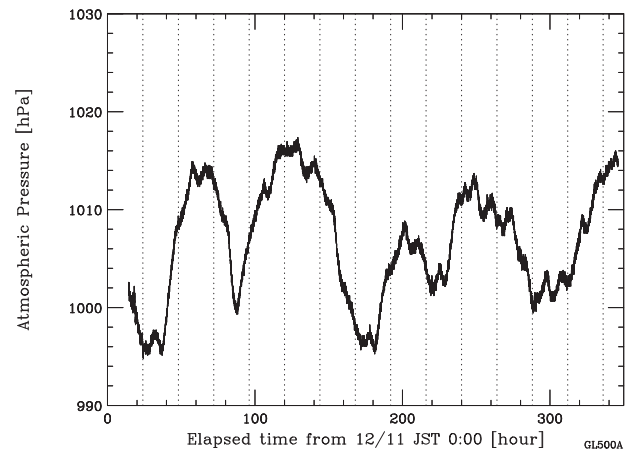


図 27: 気圧の時間変化

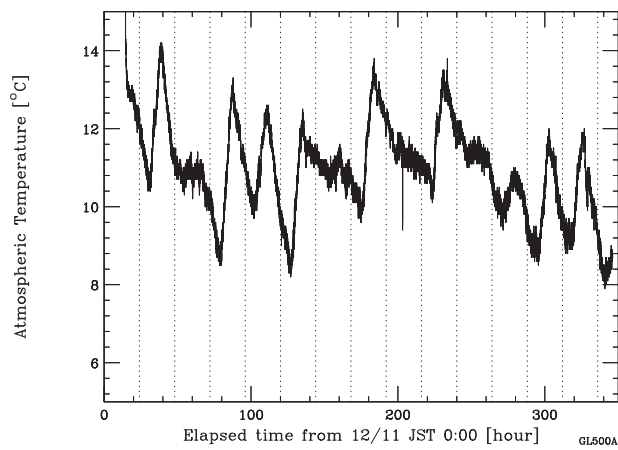


図 28: 気温の時間変化

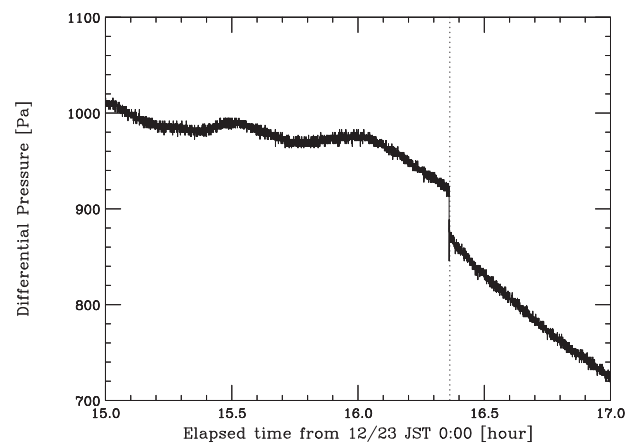


図 29: ゴム気球破壊時の差圧の時間変化

6 破壊圧の測定

先の耐圧試験では、2,400 Paの耐圧性能を有することが確認されているが、その破壊圧や破壊のモードが不明であり、使用圧の安全率が2以上としかわからない嫌いがあった。また、いずれの試験においても気球に注入したのは空気であり、浮力を有するガスを入れた場合の挙動は不明である。そこで、ヘリウムガスでの膨張と破壊圧を調べる実験を実施した。また、ポリエチレン皮膜部分のガス漏れを評価したこともなかったため、ゴム気球とポリエチレン気球の間にアンモニアガスをつめ、アンモニア試験も実施することとした。

実験は2020年3月19日、小野町町民体育館にて実施した。先の気密試験において内部のゴム気球が破裂したため、ゴム気球を新品に交換している。天井に十字にロープを張り、その交点に設けた滑車を介して気球を吊り下げ、ウインチにて上下できるようなセットアップを組んだ。データは、差圧計(COSMO製 DP-340 5 kPa レンジ)、および、熱電対による気温の測定を行った。ヘリウムガス注入時から、水平3方向、および、天井からビデオカメラでの撮影を行った。

気球の尾部側からアンモニアガスを含む空気をゴム気球とポリエチレン皮膜の間に1 m³程度注入した。当初の予定では、ヘリウムガスをゴム気球につめた後に立てあげておくことを考えていたが、圧力計測用のチューブを気球頭部に取り付けため、頭部側が重くなったため、立てあげは不可能と判断し、気球を頭部から吊り下げた状態でヘリウムガスを注入した。その後、ブロウワで空気を注入した(図30)。

気球は問題なく満膨張に達した。ポリエチレン気球の場合、ヘリウムガスをつめた場合は、気球の上部が先行して膨張することとなるが、この気球の場合、内側に入っているゴム気球で拘束されるため、球形を保ったまま体積が増えていく膨張が見られ、空気の場合と大きな違いは見られなかった。さらに加圧し、180、370、580、890、950、1,160 Paの各差圧で赤道長、子午線長を計測した。結果を表5に示す。1,160 Paの計測後、気球頭部、尾部の極付近のガス漏れ検査をアンモニア試験で実施し、顕著な漏れが見られないことを確認した。以後、加圧状態で一時間程度放置した(図31)。

再開時に差圧は1,160 Paから1,060 Paへと減圧していた。気球の赤道長、子午線長を計測した後、再度、1,160 Paまで加圧して赤道長、子午線長を計測した。その後、ブロウワにより加圧した。この際、圧力計測ポートがガスガイドの途中に位置し、かつ、気球までの流路が細かったため、送風時と停止時とで200 Pa程度の圧力差(送風時の方が高圧)が発生していた。そこで、気球の上下を反転させ、頭部を下に位置させ、気球頭部に直接小型ブロウワで送風するセットアップへと変更した。再度、加圧したところ、ここでも計測ポートが送風部にあったため、送風時と停止時とで90 Pa程度の圧力差(送風時の方が低圧)が発生していた。気球は3,400 Pa(送風時)で破裂した(図34)。

図32は、破壊した気球の尾部である。尾部側のロープリングが千切れたことで破損した(図33)。ロープリングは2500ポンド(=11,100 N)のケブラーロープを利用している。ロープの強度から推測される耐圧性能は4,100 Paであり、得られた耐圧性能3,400 Paはこれの83%にあたる。ゴム気球には損傷がなく、また、気球フィルムの破損も極の部分に限定されていた。

図35に子午線長と差圧、図36に赤道の周長から求めた赤道半径と差圧の関係を示す。これらの図には、2019年10月3日の耐圧試験で得られた値もあわせて示している。図中の破線は、網、およびフィルムの子午線長から求めたそれぞれの値を示している。実際には、網の目が開くため、図中の破線よりも小さな値となっており、これは網の目が開くことによるものと推測される。図37に赤道長と子午線長の関係を示す。両者の比はかぼちゃ型の場合、2.622であることが知られており、得られた値をみると、かぼちゃ型よりも子午線長が1%程度長い形状となっていたことがわかる。破壊試験時の方がより細長くなっていた傾向が見て取れる。



図 30: ブロウワによる空気注入。

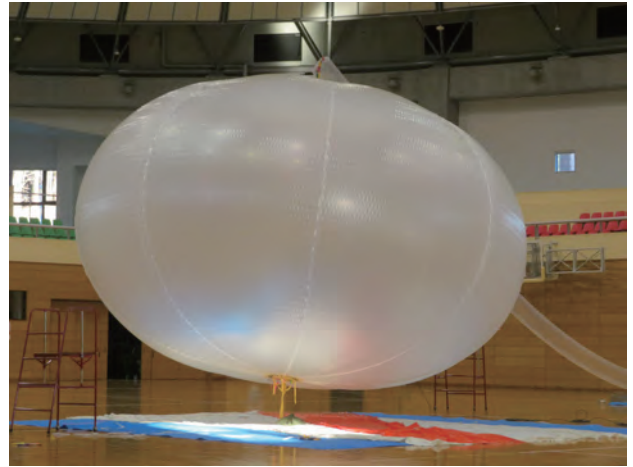


図 31: 1,200 Pa 印加時の気球。



図 32: 破壊した気球の頭部。



図 33: 破損した尾部側ロープリング。

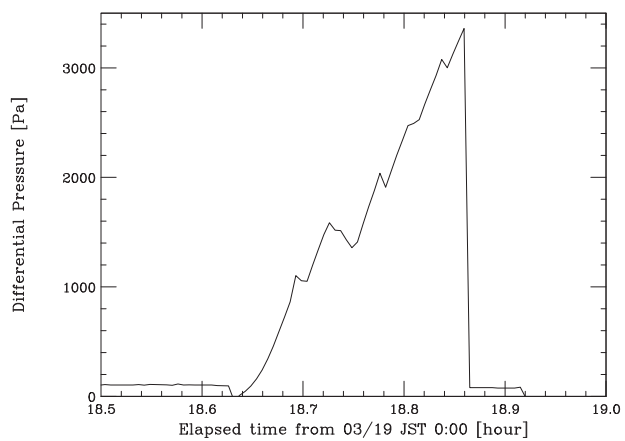


図 34: 差圧の時間変化。

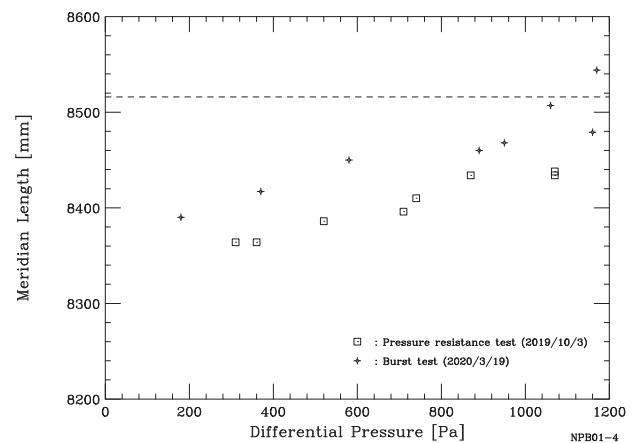


図 35: 差圧と子午線長の関係。

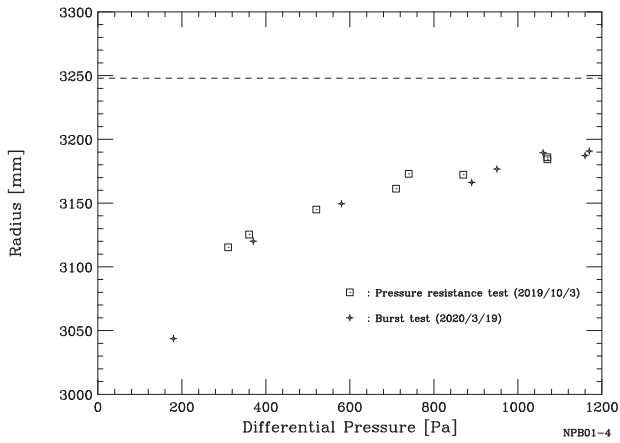


図 36: 差圧と赤道半径の関係。

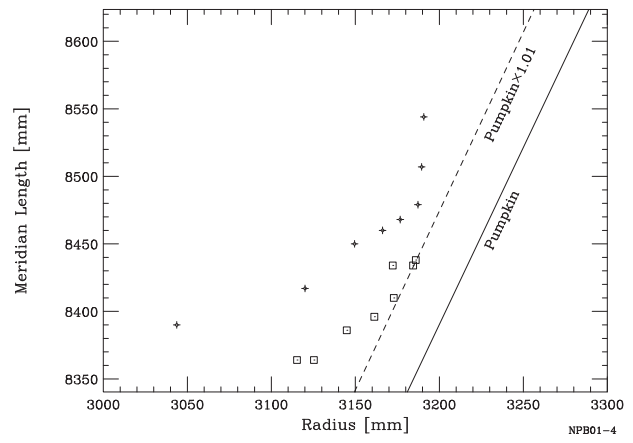


図 37: 赤道半径と子午線長の関係。

表 5: 赤道長と子午線長

時刻	圧力 [Pa]	赤道長 [mm]	子午線長 [mm]
15:04	180	19,124	8,390
15:16	370	19,604	8,417
15:24	580	19,789	8,450
15:34	890	19,894	8,460
15:38	950	19,960	8,468
15:45	1,160	20,026	8,479
17:00	1,060	20,040	8,507
17:20	1,170	20,048	8,544

7 まとめと今後の開発

LODEWAVE用のスーパープレッシャー気球を開発するため、体積 94 m^3 のスーパープレッシャー気球NPB01-4を試作し、その性能を評価した。この気球はポリエチレン皮膜に高張力繊維の網をかぶせることで耐圧性能を向上させ、内部にゴム気球を入れて皮膜を二重にすることで気密性能を強化した気球である。耐圧性能は $3,400\text{ Pa}$ 、気密性能は289時間にわたり正圧を保持する能力があることがわかった。これは、 3 kg のペイロードを搭載して、 85 hPa の気圧高度を289時間に渡って飛翔可能であることを示す。今後、LODEWAVEで利用できる気球とするには、要求される 60 hPa の気圧高度を飛翔させるためにもうひとまわり大きな気球とする、気球の展開の確実性を改善する、289時間を越えて性能を維持できるようにする、といった改良を加える必要があることも判明した。また、気球圧力の計測方法、気球の破壊方法、気球の放球方法の確立といった飛翔試験時に必要な技術の開発も必要である。これらの開発を実施し、LODEWAVEで利用できる気球の開発を進める。

謝辞

気球の耐圧試験、破壊試験にあたっては、藤倉航装株式会社の方々、気密試験にあたっては、国立極地研究所南極観測センターの高村友海さん、樋口 和生さん、柏木 隆宏さん、総合研究大学院大学の吉田理人さん、東京大学大学院理学系研究科の高麗 正史さんにお世話になりました。また、ゴム気球の特性に関しては、トーテックス株式会社の長船孝平さんに教えていただきました。本研究は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所宇宙工学委員会戦略的基礎開発研究「長時間飛翔用スーパープレッシャー気球の開発と実証」、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)、科学研究費補助金基盤研究(B)「先進的気球観測による南極域における大気重力波の確率的振る舞いの解明」(課題番号18H01276)を受けて行っています。

A ゴム気球の半径と内圧の関係

A.1 ゴム気球の周長と内圧の測定

2019年1月にNPB001-8気球の内側に入れて膨張させたTotex社製TA-600ゴム気球を再利用し、順次、空気を注入して膨張させて、赤道周長と子午線長をロープで計測し、その時点での差圧を測定した。ゴム気球の伸びは一樣ではなく、子午線長を測定するべく定めた口管と逆側の頂点は移動し、また、赤道も測定に伴って移動しており、測定値の誤差は5 cm程度はあったと考えられる。

また、2019年6月18日に実施したNPB01-4気球のポリエチレン皮膜の中にTA-1200を入れる実験において、子午線長が7,048 mmの際の差圧が48 Paであることが測定されている。

A.2 ゴム気球の半径と内圧の理論計算

文献[15]、[16]の議論により、ゴム気球の半径と内圧との関係を求める。半径 R 、厚さ h のゴム気球がネオ・フック弾性(体積の変化しない変形をする性質)を有すると仮定し、ゴム膜の伸長に伴う内部エネルギーの増加が圧力差 ΔP による仕事と等しいとすると、

$$\Delta P = \frac{2Gh}{R} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda^7} \right) \quad (3)$$

が導かれる。ここで、 λ は半径の倍率、 G はずれ弾性率である。TA-600の厚みは概ね120 μm であり、TA-600の測定結果にあうようにパラメーターを定めると、 $R=0.58$ m、 $G=0.4 \times 10^6$ Paと求まった。ゴムのずれ弾性率は、理科年表によれば、 $0.5 \sim 1.5 \times 10^6$ Paであり、得られた値は少し小さい。また、気球半径は、重量とゴムの厚みから球形を仮定して求めることもできる。口管の重量を60 g、密度を0.92 g/cm³とすると、 $R=0.58$ mとなり尤もらしい。データから R の値は単独で制限がつくが、 G と h は積でしか制限がつかない。すなわち、データからは $R=0.58$ mとなり、尤もらしい h として120 μm を選ぶと G の値は少し小さめの値になる、ということである。

これらの結果と共に、 R の値を気球重量の比の平方根でスケールさせて他のゴム気球の予測値と共に示したのが図38である。式3の第2項は気球が大きくなると無視でき、差圧はゴム気球の最初の大きさに依存せず、最初のゴムの厚みと弾性率、および、直径のみの関数となる。したがって、TA-1200の測定結果とも比較することができ、結果をよく再現できていることがわかる。

参考文献

- [1] 富川 喜弘、他 “南極域における大気重力波のスーパープレッシャー気球観測計画 (LODEWAVE : LOng-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica) ” 宇宙航空研究開発機構 研究開発報告 大気球研究報告, 2020, 投稿中
- [2] Geller, M. A., et al. “ A comparison between gravity wave momentum fluxes in observations and climate models” J. Climate, 26, pp.6383-6405, 2013
- [3] Sato, K., et al “Program of the Antarctic Syowa MSTIS radar (PANSY)” J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 118, pp.2-15, 2014
- [4] Sato, K., M. Kohma, M., Tsutsumi, Y and Sato, T. “Frequency spectra and vertical profiles of wind fluctuations in the summer Antarctic mesosphere revealed by MST radar observations” J. Geophys. Res. Atmos., 122, pp.3-19, 2017

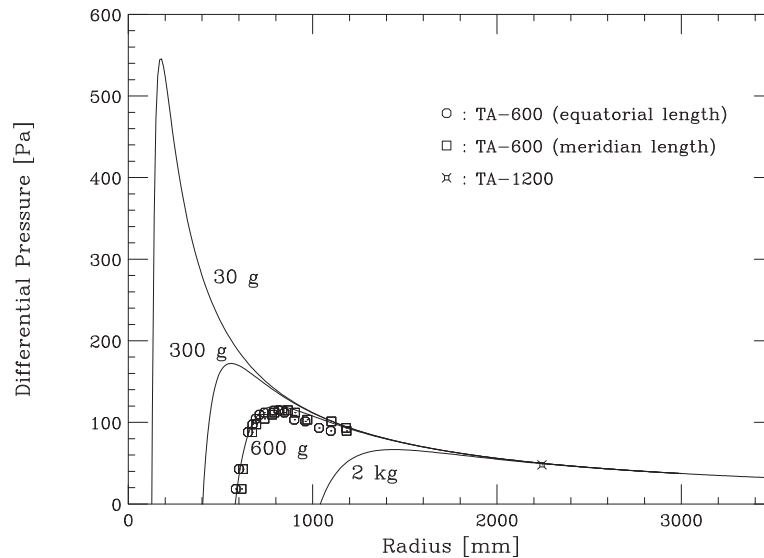


図 38: ゴム気球の半径と内圧の関係。

- [5] Rabier, F., et al. “The Concordiasi project in Antarctica” Bulletin of the American Meteorological Society, 91, 1, pp.69-86, 2010
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] Saito, Y. et al. “Development of A Super-Pressure Balloon with a Diamond-Shaped Net” Adv. Space Res., 54, 8, pp.1525-1529, 2014
- [10] 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
- [11] Saito, Y. et al. “Recent Developments on the Super-Pressure Balloon with a Diamond Shaped Net — Ground Inflation Tests of Two 2,000 m³ Balloons —” Trans. JSASS, accepted, 2020
- [12] 斎藤 芳隆、秋田 大輔、中篠 恭一、松尾 卓摩、“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” 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-19-002, pp.9-24, 2020
- [13] 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 大気球研究報告 JAXA-RR-016-08, pp. 1-32, 2017
- [14] Mullins, L. “Effect of Stretching on the Properties of Rubber” Rubber Chem. Technol., 21, 2, pp.281-300, 1948
- [15] Ryogo Kubo, “Large Elastic Deformation of Rubber”, J. Phys. Soc. Jpn, 3, pp.312-317, 1948
- [16] 山口 哲生、“高分子弾性体 (2)”、ソフトマター工学・第 3 回 2019 年 5 月 7 日 <http://www.mech.kyushu-u.ac.jp/~design/lecture.html>