

## LODEWAVE実験にむけたスーパープレッシャー気球の開発(II)

斎藤 芳隆<sup>\*1</sup>, 富川 喜弘<sup>\*2,3</sup>, 村田 功<sup>\*4</sup>, 秋田 大輔<sup>\*5</sup>, 中篠 恭一<sup>\*6</sup>, 松尾 卓摩<sup>\*7</sup>, 橋本 紘幸<sup>\*8</sup>,  
松嶋 清穂<sup>\*9</sup>

**Development of a super-pressure balloon for the LODEWAVE  
(LONg-Duration Experiment of gravity WAVE over Antarctica) (II)**

SAITO Yoshitaka <sup>\*1</sup>, TOMIKAWA Yoshihiro <sup>\*2,3</sup>, MURATA Isao <sup>\*4</sup>, AKITA Daisuke <sup>\*5</sup>,  
NAKASHINO Kyoichi <sup>\*6</sup>, MATSUO Takuma <sup>\*7</sup>, HASHIMOTO Hiroyuki <sup>\*8</sup>  
and MATSUSHIMA Kiyoho <sup>\*9</sup>

**ABSTRACT**

A prototype super-pressure balloon for the LODEWAVE was developed. Based on the technologies developed for the 94 m<sup>3</sup> super-pressure balloon NPB01-4, which was developed in 2020 and satisfied the requirements of the pressure resistance and airtightness except for the flight altitude, a 182 m<sup>3</sup> balloon with twice the volume was developed to fly at the pressure altitude of 60 hPa and tested its capabilities. The balloon has the structure covering the polyethylene envelope with a net of high tensile fibers for the high pressure resistance and the double-layer envelope of the polyethylene film balloon and the rubber balloon for the airtightness. In addition, it also equips devices for the flight experiment, including the pressure gauge to measure the gas pressure inside the balloon, the gas input port, and the exhaust port at its top. Through the ground tests, the pressure resistance of more than 3,190 Pa, and the airtightness to hold the positive differential pressure more than 254 hours were confirmed to satisfy the requirements of the LODEWAVE to fly at the pressure altitude of 60 hPa more than 254 hours with 3 kg payload.

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

---

\* 2022年11月30日受付 (Received November 30, 2022)

\*<sup>1</sup> 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)

\*<sup>2</sup> 情報・システム研究機構 国立極地研究所 (National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems)

\*<sup>3</sup> 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)

\*<sup>4</sup> 東北大学大学院環境科学研究科 (Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University)

\*<sup>5</sup> 東京工業大学 環境・社会理工学院 (School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology)

\*<sup>6</sup> 東海大学 工学部 (School of Engineering, Tokai University)

\*<sup>7</sup> 明治大学 理工学部 (School of Science and Technology, Meiji University)

\*<sup>8</sup> 藤倉航装株式会社 (Fujikura Parachute Company Ltd.)

\*<sup>9</sup> 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。2020 年に開発され、耐圧性能、気密性能の要求仕様を満足した体積  $94 \text{ m}^3$  の NPB01-4 気球の体積を倍増させ、要求飛翔高度であった  $60 \text{ hPa}$  での飛翔を可能にした体積  $182 \text{ m}^3$  のスーパープレッシャー気球 NPB02-1 気球を開発し、その性能の評価を行った。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り、気球の頭部には、気球内部気圧計測用の気圧計、ガス注入口、排気口が整備され、飛翔試験に利用できる構造を構築したものである。地上試験により、耐圧性能は  $3,190 \text{ Pa}$  以上、気密性能は 254 時間にわたり正圧を保持する能力が確認された。これは、 $3 \text{ kg}$  のペイロードを搭載して、 $60 \text{ hPa}$  の気圧高度を 254 時間に渡って飛翔可能であることを示しており、LODEWAVE で利用できる性能を有することが確認された。

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

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 (LOng-Duration Experiment of gravity WAVE over Antarctica)[1] を 2022 年 1 月に実施することを計画している [2]。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  $19 \text{ km}$  (大気圧  $60 \text{ hPa}$ ) に飛翔させ、 $3 \text{ kg}$  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位置、気圧、および気温の時間変化を精密に計測することで大気重力波を観測する。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おり [3]、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。

この観測には、大気重力波以外の要因による高度変動が抑制されたスーパープレッシャー気球が必要であり、耐圧性能としては飛翔高度の気圧の 20% にあたる  $1,200 \text{ Pa}$  以上、気密性能としてミッション期間に相当する 10 日以上、が要求される。我々は、耐圧性能向上のために皮膜に網をかぶせ [4]、気密性能向上のためにポリエチレン気球の内側にゴム気球を入れた気球 [5] の可能性を評価し、2020 年には体積  $94 \text{ m}^3$  の NPB01-4 気球が  $3,400 \text{ Pa}$  の耐圧性能を有し、289 時間にわたって正圧を保てる気密性能を有することを確認するに至った [6]。しかし、この気球に  $3 \text{ kg}$  のペイロードを搭載した場合の飛翔高度は  $85 \text{ hPa}$  に留まり、LODEWAVE のためには、より大きい気球が必要である。また、気球圧力の計測方法、実験終了時の気球からの排気方法、放球方法の確立といった飛翔時に必要な技術の開発も必要であった。

我々は、圧力計測方法、排気口の構造、放球方法を個別に検討し、その成果を結集し、体積  $182 \text{ m}^3$  の NPB02-1 気球を製作した。本報告では、それらの要素技術、および、NPB02-1 気球による総合試験の結果について報告する。

## 2. NPB02-1 気球の試験

### 2.1. NPB02-1 気球の構造

NPB02-1 気球、および、NPB01-4 気球の諸元を表 1 に示す。NPB02-1 気球は、NPB01-4 気球の構造を概ね踏襲した気球である。耐圧性能の設計にあたっては、フィルムの耐圧性能、網線の強度、網の端部を固定するロープリングの強度が十分かを検討する必要がある。フィルムの耐圧性能は、気球の耐圧性能がフィルムの引張破断強度に比例し、赤道部の交点間隔に反比例すると考えて、NPB001-2 気球の耐圧性能からスケールさせて推定した。網線数は、網線への要求強度を、満膨張時の赤道での断面積と使用差圧の積を網線数で除することで求め、安全率 5 以上を確保できるように設定した。ただし、耐圧性能を推定する場合には、網端部の加工に伴う強度劣化の最悪ケースを想定し、0.4 を乗じた値を予想値とした。また、ロープリングは、網線端部からかかる張力によるフープ力として必要強度を推定し、安全率 5 以上を確保できるようロープの太さ、本数を設定した。NPB01-4 気球と比較すると以下の改良が施されている。

- 体積を 182 m<sup>3</sup> に増やした。これは、飛翔高度を向上させるためで、気球の重量は 12.33 kg であるから、気球にヘリウムガスを充填し、ペイロード 3 kg を搭載した際の飛翔高度での大気圧は 60 hPa と予想される。
- 気球のパネル数を 20 とし、網と皮膜との周長方向の固定間隔を 100 本の網線に 1 回から、50 本の網線に 1 回に増やした。これにより、気球膨張時の網の横方向の移動を抑制し、より確実に気球が軸対象形状に膨張するように配慮した。
- 内部のゴム気球をトーテックス製 TA-1200(重量 1.2 kg) から TA-2000(重量 2.0 kg) と変更した。表面積は 1.55 倍になったのに対し、ゴムの重量は 1.67 倍となっており、膨張時のゴム皮膜の厚みは NPB01-4 気球よりも若干分厚くなっている。NPB01-4 気球の気密試験においては、289 時間経過後にゴム気球が破裂し、気密性が失われた。ゴムを分厚くしたことで、このリスクの低減を狙った。
- NPB01-4、NPB02-1 気球のいずれも軽量化のため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ているが、そのリングの数を 2 本から 5 本へと増やし、一つのリングに要求される強度を低減させ、安全率を 3.4 から 5.5 へと向上させた。NPB01-4 気球の破壊試験における損傷箇所は、最も低い安全率で設計していたこのリングであったが、この改良により、NPB02-1 気球における仕様上の耐圧性能は、網の強度で決定され、6,600 Pa となった。
- 気球の頭部にガス注入、放出、気球内ガス圧計測が可能となるように加工した、直径 100 mm のアルミニウム製パイプを取り付けた。
- 気球尾部(最下部)にスリット状の長さ 3 cm の穴をあけた。これは、上空でポリエチレン皮膜とゴム気球の間に溜ったガスを抜くためである。

気球は順次改良を加え、最終的には図 1 の構造とした。すなわち、20 μm 厚のポリエチレン皮膜の気球の内側に 2,000 g のゴム気球を入れることで気密性を向上させ、外側にベクトラン製の網をかぶせることで耐圧性能を確保している。気球の頭部側には、ゴム気球のガス注入口を配置させ、その注入口にはアルミニウム製のパイプを嵌め込まれている。パイプの内側には気圧計(村田製作所製 ZPA2326-0311A-R)が配置され、パイプの側面には、その信号読み出しポートとデータ伝送基板、および、ガス注入口が配置され、パイプのゴム気球と逆側の口は排気口となっている。排気口には、ポリエチレンチューブが取り付けられ、その端部を溶着し、ねじった後にロープカッターの穴に通されている。通常、この口は閉じられているが、カッターを駆動することで口が開き、排気される。したがって、このカッターを駆動

表 1: NPB02-1 気球、NPB01-4 気球の諸元

気球番号	NPB02-1	NPB01-4
公称容積 (m <sup>3</sup> )	182	94
直径 (m)	8.1	6.5
全長 (m)	10.6	8.5
高さ (m)	4.9	3.8
パネル数	20	8
最大パネル幅 (mm)	1,272	2,551
フィルム厚 (μm)	20	20
ゴム気球重量 (g)	2,000	1,200
網線強度 (N)	415	415
縦ロープ数	1005	804
網交点間隔 (mm)	103	103
赤道ロープ間隔 (mm)	51	48
ロープリング直径 (mm)	300	300
耐圧性能 (Pa)	3,200	3,400
	(予想値)	(実測値)
気球重量 (kg)	12.33	7.76

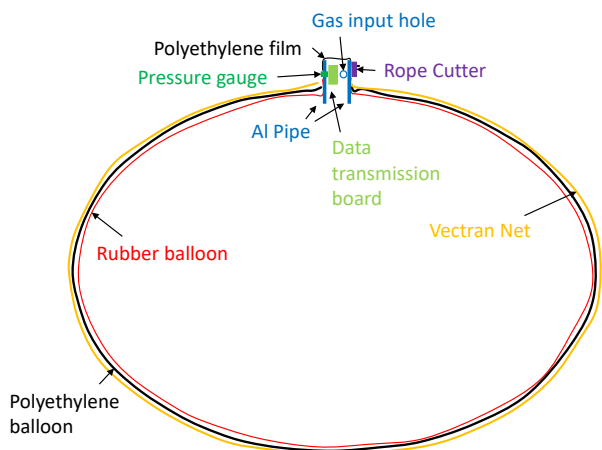
することで、気球実験を終了させることができる。なお、こういったパイプの端部をポリエチレンフィルムで覆い、カッターで開放する排気の方法は、BS11-02 実験 [7]、BS13-04 実験 [8] で使用され、飛翔環境下でも適切に排気できることが確認されている方式である。

## 2.2. NPB02-1 気球の気密試験

LODEWAVE においては、10 日にわたる飛翔が必要であり、その間、気球内のガス圧力は大気圧よりも高い状態を保持する必要がある。この性能を検証するための NPB02-1 気球の気密試験を実施した。実験は 2021 年 4 月 29 日より、藤倉航装株式会社技術センターにて実施した。気球を尾部側からクレーンで吊り下げつつ、空気を詰めて膨張させた。データは、差圧計 (Setra 230、600 Pa レンジと 3,000 Pa レンジ)、および、おんどとり TR-73U による気圧と気温の測定を行った。また、水平 3 方向からビデオカメラで、一方向からタイムラプスカメラでの撮影を行った。

気球は正常に展開し、1,200 Pa の差圧に耐えることが確認された (図 2)。また、最高圧に達した後、一時間程度放置したところ、差圧は 1,000 Pa で落ち着いており、大きなガス漏れは発生していないことが確認された。気球をその状態のまま 5 月 10 日まで保管し、ガス漏れの調査を行った。図 3、4、5 は、その際の差圧、大気圧、気温の時間変化である。差圧は変動を繰り返しながらも 4 月 29 日 19 時より、5 月 10 日 9 時に至るまで 254 時間を越えて正圧を保っていたことがわかる。気温が毎日 7 時くらいにスパイク状に上昇しているのは、温度センサーに直射日光があたっていたためである。

気球体積が圧力に比例すると仮定し、測定された気球の内圧、気温、大気圧から、内部の空気量の変化を以下のように求めた [5]。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



(a) NPB02-1 気球の構造



(b) He ガスによる膨張試験時の NPB02-1 気球



(c) 排気口 (駆動前)、(d) 排気中の排気口、(e) 気圧計測ポートと伝送基板、(f) 気圧計 (上)、(g) 伝送基板 (下)

図 1: 左上図に NPB02-1 気球の構造を示す。ポリエチレン製の皮膜の内側に、ゴム気球が入っており、外側はベクトラン繊維の網で覆われた構造となっている。頭部側に位置したゴム気球の口管にはアルミパイプがはめられており、パイプの側面にガス注入口、内側に気圧計、気球と逆側にポリエチレンフィルムで塞がれたガス放出口が位置する。ガス放出口を塞ぐポリエチレンフィルムの端部はロープカッターに通されており、ロープカッターを駆動することでフィルムが破れ、気球内部のガスが放出される。右上図は、ヘリウムガスによる膨張試験時の写真である。下段は、左から順に排気口 (ロープカッター作動前)、排気口 (ロープカッター作動後)、気圧計読み出しポートと保温材で囲んだ伝送基板、気圧計 (上図、パイプ内側に取付)、および、伝送基板 (下図、左図の保温材の内部に配置) の写真である。

を  $R$ 、気球ガスの温度を  $T_b$  とすると、

$$P_b V = n R T_b \quad (1)$$

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。

$$P_b = P_a + P_d \quad (2)$$

また、気球の体積の変化量が、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、

$$V = V_0(1 + a P_d) \quad (3)$$

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、

$$(P_{a1} + P_{d1})V_0(1 + a P_{d1}) = n_1 R T_{b1} \quad (4)$$

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、

$$\frac{n(t)}{n_1} = \frac{T_{b1}}{T(t)} \cdot \frac{(P_a(t) + P_d(t))(1 + a P_d(t))}{(P_{a1} + P_{d1})(1 + a P_{d1})} \quad (5)$$

と求めることができる。

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  $a$  を選び、気球内の空気のモル数の時間変化を示したのが図 6 である。ここでは、データのばらつきを抑制するため、1 分間平均の値を用い、4 月 29 日 18 時 27 分のモル数を基準値 ( $n_1$ ) としている。図の黒線が  $a=0$ (体積膨張なし)、緑が  $a=1.4 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ 、青が  $a=1.6 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ 、赤が  $a=1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ 、桃色が  $a=2 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ 、水色が  $a=3 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$  である。気温や大気圧による変化が抑制され、差圧の時間変化のばらつきが小さくなる  $a$  の値としては、 $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$  程度が適当である。体積膨張係数  $a$  の選び方によって、気温や大気圧による変化の抑制具合は異なるが、いずれの場合でも時間の変化に伴って内部ガスのモル数は、図中に示した右下がりの破線程度に減少している。この破線での減少は、リーク率にすると  $8 \times 10^{-1} \text{ h}^{-1}$  の傾きの直線である。このリーク率は、斎藤、他、2020[5] におけるゴム気球とポリエチレン気球の二層皮膜のガス漏れ率  $3 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$  と比較すると、2.7 倍と急であり、1,000 hPa の絶対圧の気体が密閉空間にあったとすると  $8 \text{ Pa} \cdot \text{h}^{-1}$  でガスが漏れることに相当する。

また、1,000 hPa の絶対圧の気体から 2 % のガスが漏れ出すと 2,000 Pa の圧力変化があることが想定される。一見すると 1,200 Pa の差圧しかかけていないために奇妙に見える。しかし、得られた体積変化量と差圧の比例係数、および、1,200 Pa の差圧を式 (3) に代入して得られる体積は、2.2 % 大きくなっており、差圧の変化が体積の変化によっても吸収されている、すなわち、ガスの漏れによって 2.2 % 大きくなっていった体積が 2% 小さくなった、と考えれば尤もな現象である。

先の報告 [5] によれば、株式会社 DJK による常温 (23 °C) におけるゴムシートの空気の透過率は  $8.98 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$  であった。膨張前のゴム気球の厚みは 100  $\mu\text{m}$  程度、長さは 260 cm である。NPB02-1 の子午線長は 10.6 m であるから、均一に伸びるとすると、長さのスケールで 4.1 倍、面積のスケールで 17 倍となり、体積が保存するとすると厚みは 1/17 となり、6  $\mu\text{m}$  となる。この値は NPB001-8 気球での値の 1/3 である。NPB02-1 気球の表面積は 162  $\text{m}^2$  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、 $8.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  である。さらに、NPB02-1 気球の体積が 182  $\text{m}^3$  であり、大気圧が  $10^5 \text{ Pa}$  であることを考慮すると、ガス漏れ率は  $4.8 \text{ Pa} \cdot \text{h}^{-1}$  と求まる。実測された漏れ率はこの値の 1.6 倍に達しており、ゴム気球およびポリエチレン皮膜の同一箇所欠陥が偶然に存在した可能性や、極部の加工方法に課題がある可能性がある。

したがって、この気球のガス漏れ率はゴム皮膜の透過率よりも悪いものの、10 日間は正圧を保つという最低限の気密性能を有することは確認された。LODWAVE 用気球では、頭部の気密構造を製作する際に、接着剤などの目止め剤を用いて気密性の改善を試みている。

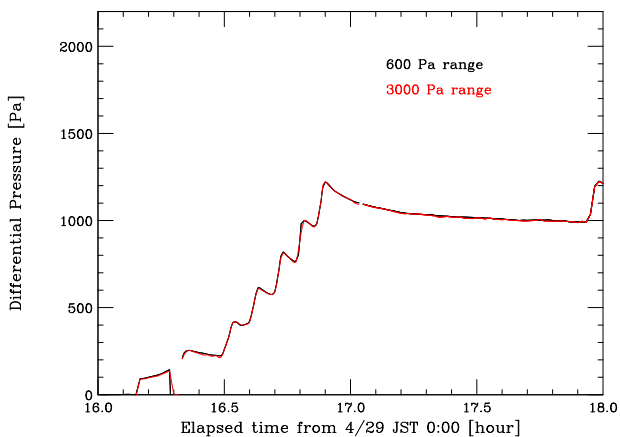


図 2: 気密試験開始時の差圧の時間変化。

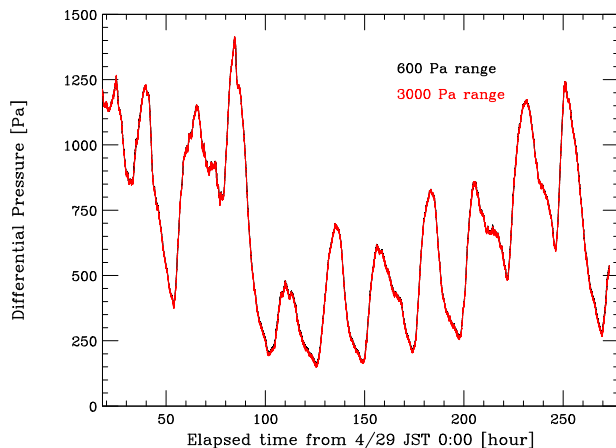


図 3: 気密試験時の差圧の時間変化。

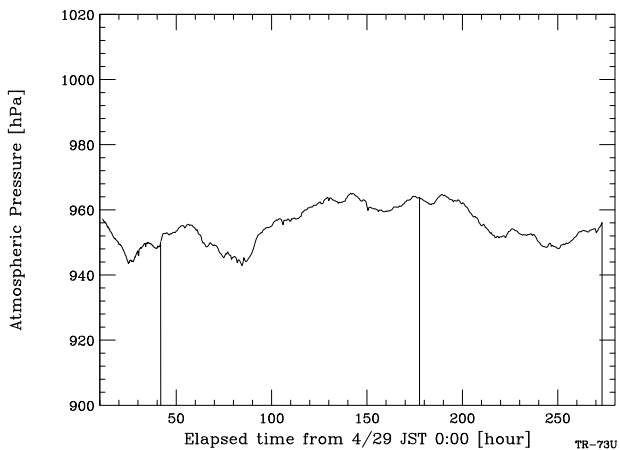


図 4: 気密試験時の大気圧の時間変化。

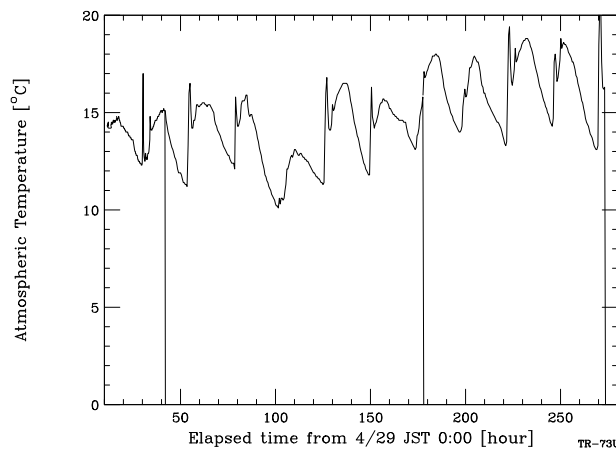


図 5: 気密試験時の気温の時間変化。

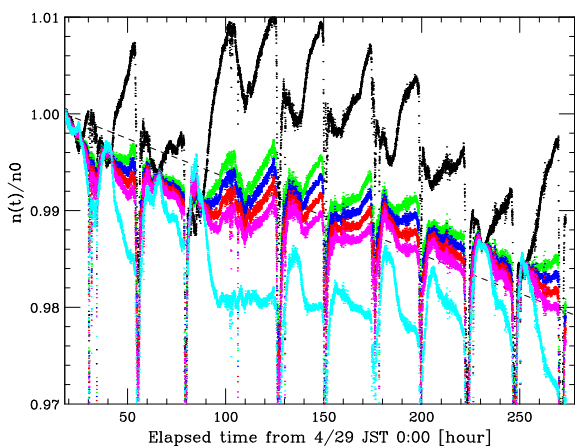


図 6: 気球内空気量の時間変化。

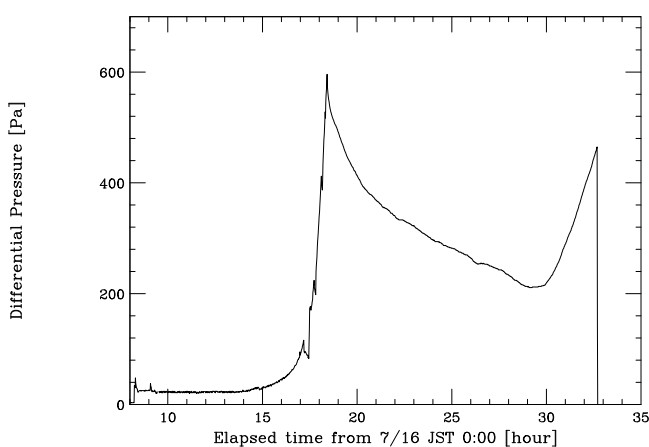


図 7: ヘリウムガスによる膨張試験時の差圧の時間変化。

### 2.3. NPB02-1 気球のヘリウムガスによる膨張試験

ゴム気球の展開はポリエチレン気球の内側で行われ、両者の摩擦が大きいとゴム気球の膨張が不均一になり、破裂しやすくなる嫌いがある。内部にヘリウムガスが入って膨張する場合と空気が入って膨張する場合とは、ゴム気球とポリエチレン気球の間にかかる圧力は異なっており、それに伴って摩擦も異なると考えられる。そこで、NPB02-1 気球がヘリウムガスでも正常に膨張することを確認する試験を実施した。実験は2021年7月15~17日に、藤倉航装株式会社技術センターにて実施した。最初、ゴム気球とポリエチレン気球の間にヘリウムガス(7 m<sup>3</sup>のボンベの圧力にして2.5 MPa)を注入し、その後、気球を上部側からクレーンで吊り下げつつ、ヘリウムガスを7 m<sup>3</sup>ボンベの残量すべて(ボンベの圧力にして7.5 MPa程度)を注入し、後に空気を詰めて膨張させた。ガス注入ポートが小さいのに対し、空気の注入にあたっては、十分な差圧の出ない圧縮空気供給装置を用いたため、注入に時間がかかったものの、最終的には満膨張に達し(図1(b))、ヘリウムガスでも問題なく膨張することが確認された。ただし、空気による気球の膨張は、実際に発生するヘリウムガスの膨張は完全に模擬できず(定性的には気球上部の摩擦は飛行試験時よりも小さく、下部は大きくなる)、また、ゴム気球とポリエチレン気球の間のヘリウムガスの膨張も模擬できていない(定性的には摩擦は大きくなる)、という意味で完全な試験とはなっておらず、最終的な検証は飛行試験に持ち越すこととした。

その後、大気圧と気球内圧力との差圧が600 Paになるまで加圧し、一晩、その状態で保管した。翌朝、差圧は450 Paまで下がったことを確認した後、カッターを駆動して排気口を開き、内部のガスを放出した(図7)。これにより、実験終了後に気球から排気する機構が正常に動作することも確認された。図1(d)はこの際の排気口の写真である。

### 2.4. 放球方法の開発と訓練

LODEWAVEの気球は南極昭和基地で6~7人程度の限られた人員により放球する必要がある。そこで、少ない人数、かつ、不慣れな人員でも確実に放球できる方法を検討した。まず、雪面での作業性の悪さや風の影響を回避するため、ガス充填はCヘリポート近くの廃棄物保管庫(間口5 m、開口時シャッター高3.5 m)にて実施することとした。気球は地上での膨張時に直径3.5 m弱となることが想定されるため、気球をコンパクトに畳んだ状態でガス詰めを行い、屋外へと移動させる必要がある。そこで、気球の尾部側は屋内では展開せず、あらかじめ風呂敷袋につつんでおき、気球には保護袋をかぶせて膨張させ、シャッターを通過した後に保護袋を外し、気球の尾部側を伸展させた後に放球することとした。

また、浮力の計測は、気球にガスを詰めた後、全システムの重量を計測することで評価することとした。このため、気球、荷姿、ゴンドラをすべて載せることができる2 m角程度の平らな台(放球台)を用意し、その下に台秤を設置し、全システムを台の上に載せ、気球保護袋と共に台秤で重量を計測できるようにした。ガス詰め後は、台秤を外し、放球台を含む全システムをブルーシートの上に載せ、ブルーシートを引っ張って移動させると共に、保護袋を下へと引っ張ることで、気球の上部とシャッターとの衝突を回避することとした。

こういった方法での作業が可能であることを確認すると共に、一連の作業手順を確認する放球手順の確認試験を2021年2月16日に国立極地研究所極地観測棟1階観測倉庫にて実施した。この試験は補修したNPB01-4気球を用いて7名で行った。図8にガス注入後の浮力計測時、図9にガス注入後の移動の様子を示す。この作業の際には、放球台を軽い発泡ロールで製作し、一台の台秤にて重量計測を行っていたが、計測時に不安定であったことから、台秤は2台用いることとし、放球台を木製の板に変更し剛性を増すことでより安定に重量計測が行われるように改良した。気球は、図9のように、ブルーシートを引っ張って倉庫外部に出したが当日は風が強かったため、



立て上げ作業を実施することなく、倉庫内へと引き返し、実験終了とした。

さらに、2021年9月10日には、同じくNPB01-4気球を用い、国立極地研究所極地観測棟1階観測倉庫にて、実際に南極で放球を実施するメンバーと共に8名で、南極でのLODEWAVEと同じ放球用機材を用いた訓練を実施し、より細かいレベルでの手順の確認、チェック項目の洗い出し、必要機材のリストアップや改良点の洗い出しを行った。この際も風が強かったため、訓練は屋外への移動までとし、立て上げ作業は実施できなかった。

これらの練習を踏まえて作業手順や機材の更新を行い、2021年10月19日に小野町町民体育館にて実際に南極で放球を実施するメンバー5名が集まり、NPB02-1気球による放球訓練を実施した。南極でのLODEWAVEと同じ放球用機材と人員によって手順の確認を行いつつ、完全立て上げ放球法によって放球までの作業を実施した。この際には、放球手順の訓練だけでなく、搭載機器や荷姿も持込み、それらの確認や搭載機器と荷姿の結線、結索作業の訓練も実施した。気球は図10のように問題なく放球され、南極での試験実施の手ごたえを得た。

## 2.5. NPB2-1 気球の耐圧性能試験

2021年10月19日の放球練習に続けて、NPB02-1気球の耐圧性能試験を実施した。放球された気球を降ろし、ガス注入口からゴム気球部へとブロワで空気を注入することで加圧した。データは、差圧計(COSMO製DP-340 5 kPaレンジ)、および、おんどとりTR-73Uによる気圧と気温の測定を行った。図11に差圧の時間変化を示す。ブロワの送風能力不足のため、最大差圧は3,190 Paに留まった。LODEWAVEにおける使用差圧は1,200 Paの想定であり、差圧3,190 Paは使用差圧1,200 Paの2.7倍に相当しており、十分な耐圧性能である。

## 3. まとめ

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)が進められている。この実験では、3 kgのペイロードを60 hPaの気圧高度に10日以上飛翔させる必要があり、そこから要求されるスーパープレッシャー気球の使用耐圧は1,200 Pa、気密性能は10日以上である。LODEWAVEでの使用を念頭におき、皮膜に網をかぶせることで耐圧性を、ポリエチレン気球の内側にゴム気球を入れることで気密性を高めた体積182 m<sup>3</sup>の気球を開発し、地上試験の結果、3,190 Pa以上の耐圧性能と、10日間以上正圧を保てる気密性能が実証された。LODEWAVEはNPB02-1気球と同型の気球を用いて、2022年1、2月に南極昭和基地にて実施されており、この結果は別途報告する。

## 謝辞

気球の気密試験、膨張試験、放球訓練、耐圧試験にあたっては、藤倉航装株式会社の方々、東海大学の古田竜也さん、総合研究大学院大学の吉田理人さん、愛知学院大学の山本一成さん、ISAS/JAXAの水村好貴さん、第63次南極地域観測隊員で国立極地研究所の遠藤哲歩さん、田村芳隆さん、九州大学の堤雅貴さん、京都大学の山科佐紀さん、にお手伝いいただきました。放球方法の開発にあたっては、ISAS/JAXAの飯嶋一征さん、池田忠作さんにご助言をいただきました。気球頭部の構造は、JAXA/ISAS/先端工作技術グループの久保栄さん、加賀亨さん、八幡直樹さんに製作していただきました。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開発研究費「長時間飛翔用スーパープレッシャー気球の開発



図 8: 2021 年 2 月 16 日の放球訓練 (浮力測定時)。



図 9: 2021 年 2 月 16 日の放球訓練 (気球移動時)。



図 10: 2021 年 10 月 19 日の放球訓練 (放球時)。

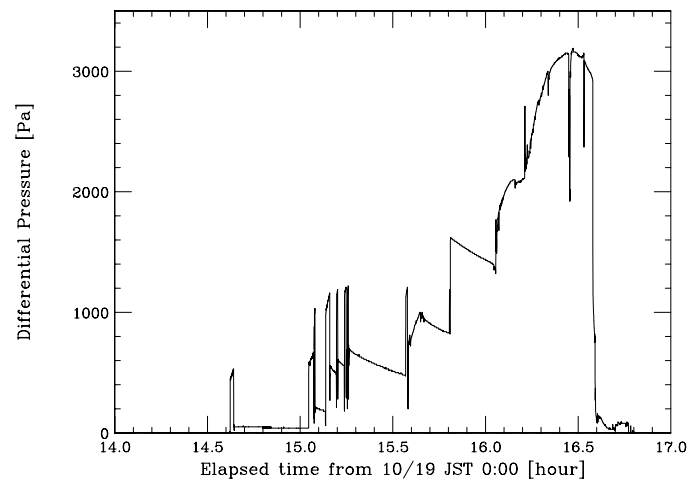


図 11: 耐圧試験時の差圧の時間変化。

と実証」、南極地域観測一般研究観測プロジェクト「南極上部対流圏・下部成層圏における先進的気球観測」、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)、基盤研究(B)「南極域における先進的気球・レーダー観測を用いた大気重力波の三次元特性の解明」(課題番号21H01160)の助成を受けて行いました。

### 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 JAXA-RR-20-009, pp19-33, 2021
- [2] 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計画 (LODEWAVE) の現状 2” 2021 年度大気球シンポジウム集録、isas21-sbs-033、2021
- [3] Fritts, D. C., and Alexander, M. J. “Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere”, Rev. Geophys., 41, 1003, 2003
- [4] Saito, Y. et al. “Development of A Super-Pressure Balloon with a Diamond-Shaped Net” Adv. Space Res., 54, 8, pp.1525-1529, 2014
- [5] 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
- [6] 斎藤 芳隆、他、“LODEWAVE 実験にむけたスーパープレッシャー気球の開発 (I)” 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-20-009, pp.35-56, 2021
- [7] 斎藤 芳隆、飯嶋 一征、松坂 幸彦、松嶋 清穂、田中 茂樹、梶原 幸治、島津 繁之、“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 大気球研究報告 JAXA RR-11-008, pp.1-16, 2012
- [8] 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 (BS13-04 実験)” 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-13-011, pp.35-60, 2014