

## LODEWAVE 実験に向けたスーパープレッシャー気球の開発 (I)

ISAS/JAXA	: 齋藤 芳隆
東京工業大学院環境・社会理工学院	: 泉 芙由美、秋田 大輔
東海大学工学部	: 中篠 恭一
明治大学理工学部	: 松尾 卓摩
国立極地研究所	: 富川 喜弘
松嶋技術士事務所	: 松嶋 清穂
藤倉航装 (株)	: 橋本 紘幸

## Development of the super-pressure balloon for LODEWAVE (I)

Saito Yoshitaka, Izumi Fuyumi, Akita Daisuke, Nakashino Kyoichi, Matsuo Takuma, Tomikawa Yoshihiro, Matsushima Kiyoho and Hashimoto Hiroyuki

## 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]。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仕様耐圧は 1200 Pa 以上、気密性能は 10 日以上である。皮膜に網をかぶせたポリエチレン気球 [2] の内側にゴム気球を入れることで気密性が高められることが知られており [3]、この技術を用いて LODEWAVE 用気球の開発を進めた。

## 2 NPB01-4 気球の設計

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。このためには、体積 100 m<sup>3</sup> クラスの気球が必要となり、皮膜の二層化の検証実験のために製作した体積 10 m<sup>3</sup> の気球よりも体積にして 10 倍の気球が必要とされる。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 Pa の使用耐圧が必要とされ、2 倍のマージンをみて 2,400 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。

- 気球の直径を 6.5 m とし、体積を 94 m<sup>3</sup> で設計した。
- 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 μm 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中を避ける設計としている [4]。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、事前の実験結果より、トーテックス社製 TA-1200(重量 1.2 kg) を利用することとした。

## 3 性能試験

### 3.1 耐圧性能の評価

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。

気球尾部側からゴム気球とポリエチレン気球の間に1 m<sup>3</sup>程度の空気を注入した後、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。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。この気球はパネル数が8と小さくしたために、網が偏ってしまうことが判明しており、この実験は、手でポリエチレン皮膜を引張り、適正な位置に配置し直して膨張させた。

気球は図1のように満膨張となった。さらに1,070 Paまで加圧し、1時間、その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。その後、加圧し、2,400 Paを越えたところで減圧し、2,400 Paの耐圧性能を確認した。図2に差圧の時間変化を示した。

### 3.2 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。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。これまでと同様に、尾部から1 m<sup>3</sup>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。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3)。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。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に放置した。12月24日の朝、内側のゴム気球が破裂した。気球は差圧力ゼロの状態となっていたが、以後も形状を保持しており、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4に得られた差圧の時間変化を示す。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。

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。

### 3.3 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。

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  $1 \text{ m}^3$  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ために、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。

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、 $1,160 \text{ Pa}$  に達した後 (図 5)、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。

再開時に差圧は  $1,160 \text{ Pa}$  から  $1,060 \text{ Pa}$  へと減圧していた。その後、ブロウワにより加圧し、最終的に気球は  $3,400 \text{ Pa}$  (送風時) で破裂した。試験時の差圧の時間変化を図 6 に示す。気球は尾部側のロープリングが千切れたことで破損した。この際にロープリングを構成するケブラーロープにかかった張力は、その破断強度の 83 % であった。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。

## 4 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  $94 \text{ m}^3$  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、 $3 \text{ kg}$  のペイロードを搭載して、 $85 \text{ hPa}$  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  $60 \text{ hPa}$  の気圧高度を飛翔させるためにもうひとつ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。

## 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] Saito, Y. et al. “Development of A Super-Pressure Balloon with a Diamond-Shaped Net” Adv. Space Res., 54, 8, pp.1525-1529, 2014
- [3] 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
- [4] 斎藤 芳隆、他、“皮膜に網をかぶせた長時間飛翔用スーパープレッシャー気球の開発 (大重量搭載用大型気球の開発)” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 大気球研究報告 JAXA-RR-016-08, pp. 1-32, 2017



図 1: 耐圧試験時に満膨張となった気球。

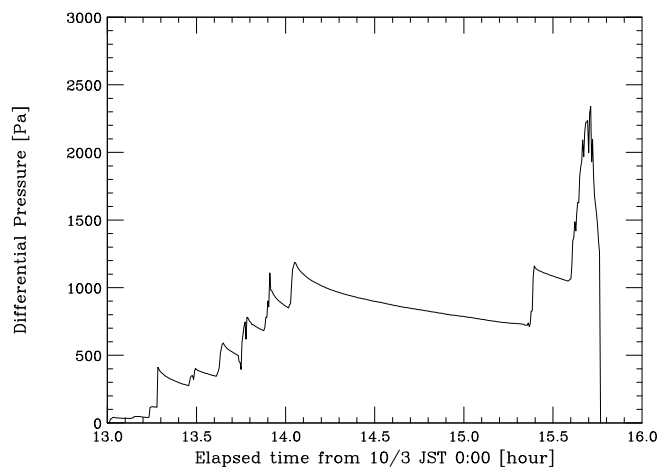


図 2: 耐圧試験時の差圧の時間変化



図 3: 気密試験時に満膨張になった気球

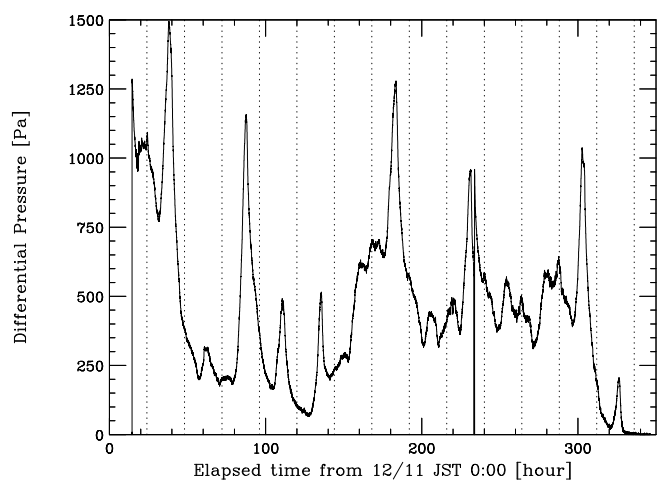


図 4: 気密試験時の差圧の時間変化

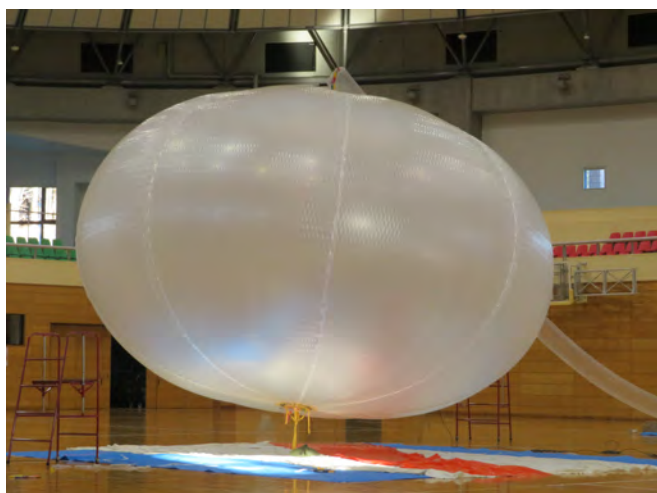


図 5: 破壊試験時に 1,200 Pa を印加した時の気球。

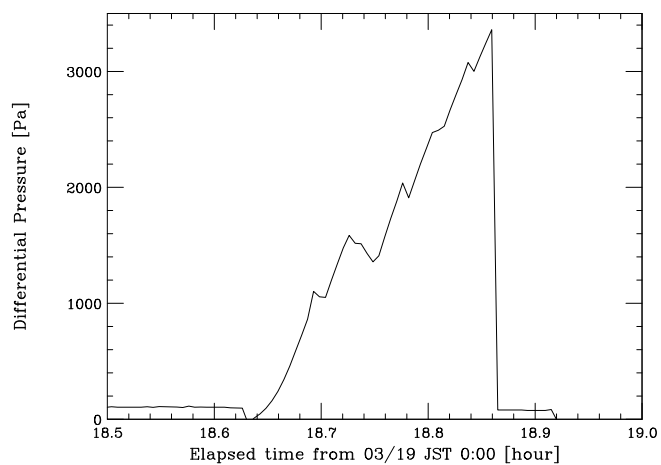


図 6: 破壊試験時の差圧の時間変化。