

# 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実験計画

ISAS/JAXA	: 斎藤 芳隆、山田 和彦
東海大学工学部	: 中篠 恭一
東京工業大学院環境・社会理工学院	: 秋田 大輔
明治大学理工学部	: 松尾 卓摩
早稲田大学創造理工学部	: 石村 康生
長岡技術科学大学工学部	: 山田 昇
松嶋技術士事務所	: 松嶋 清穂
藤倉航装(株)	: 橋本 紘幸
ナカダ産業(株)	: 島津 繁之

## Experiment plan of the super-pressure balloon with a diamond shaped net for longduration flight

Yoshitaka Saito, Kazuhiko Yamada, Kyoichi Nakashino, Daisuke Akita, Takuma Matsuo,  
Kosei Ishimura, Noboru Yamada, Kiyoho Matsushima, Hiroyuki Hashimoto and Shigeyuki Shimadu

### 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を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開発を進めていた [1][2]。この状況は、アメリカ、フランスといった気球実験先進国においても同様である。スーパープレッシャー気球(SP気球)の概念自体は最初の水素気球を飛翔させた1783年のシャルルの実験まで遡るが、大型のSP気球はようやく実用化がはじまったところである。最も開発が進んでいるアメリカでは、2015年3月に体積532,200 m<sup>3</sup>の気球をニュージーランドワナカ飛行場から放球し、日没が繰り返される条件下で32日間の飛翔に成功した [3]。その後、2016年、2017年と科学観測を開始するに至った [4]。南極の周回では限られた天体が観測できるのみであったのに対し、ニュージーランドからの周回は銀河中心を始めとして観測天体の幅が大きく広がったため、天文ユーザーに歓迎されている。現状の気球は飛翔高度が33 kmと天文観測や宇宙線観測を実施するには不十分である。より高い高度を飛翔させる気球の開発が課題であり、NASAはより大型の気球を開発することでこれを実現させようとしている。ただし、成功したシステムにおいても、ガス漏れの対策、通常のゼロプレッシャー気球(ZP気球)と比較すると倍程度と重い気球重量の軽量化などの重要な課題も残っている。

### 2 これまでの開発状況と飛翔実験の意義

提案者らは、SP気球開発の過程で、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 [5]。この方法を用いると、目の細かい網を使うことでフィルムへの要求強度が下がるため、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。この手法を用いた長時間飛翔気球の開発を2010年より開始し(図1)、小型気球の地上試験からはじめ、順次大型化させていった [6][7][8][9]。現在では、体積2,000 m<sup>3</sup>の気球を製作し、常温で1,000 Paに1時間耐えることを確認するに至っている(図2)[10]。この性能は40 kgのペーロードを搭載して、高度22 kmの上空を長時間飛翔させることが可能であることを意味し、我が国で初めてとなる長時間飛翔可能なSP気球の具現化に成功したものであった。ただし、常温での耐圧性能に基づく話であって、支障がなく放球できるか、大重量の吊り下げに支障がないか、低温で十分な耐圧性能が発揮されているか、といった課題は個々には実証されているものの、気球としての実証試験は未実施である。我々は2014年度から飛翔試験を提案し続けてきたが、主に気象条件が整わず、飛翔機会を得られずにいる。

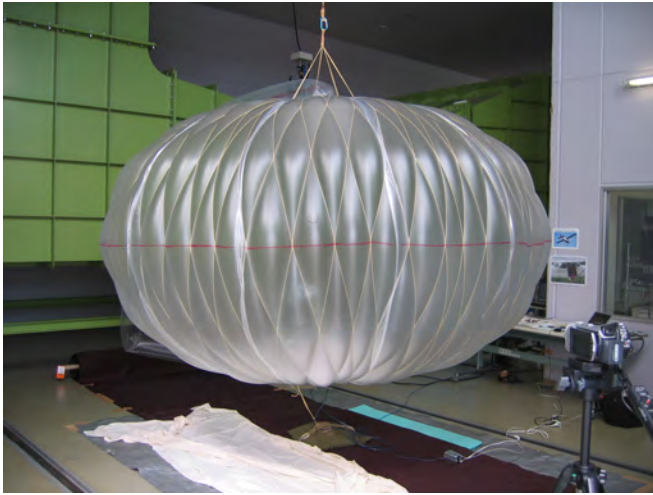


図 1: 直径 3 m の気球による原理実証。



図 2: 体積 2,000 m<sup>3</sup> の気球 (NPB2-2) の正常展開。

本提案はこの実証試験の実施を提案するものである。まず、国内で体積 2,000 m<sup>3</sup> の SP 気球の飛翔試験を実施し、個々の要素ごとに実証された技術を統合した気球が SP 気球として成立していることを確認する。次に豪州にて、体積 7,000 m<sup>3</sup> の SP 気球の飛翔試験を実施し、飛翔時の温度変動、高度変動等の SP 気球の特性を評価する実験を実施する。

これらの実験は本研究における最終目標である 900 kg の観測装置を高度 37 km に飛翔させる体積 300,000 m<sup>3</sup> の SP 気球の開発の一環として行なうものであるのと共に、それぞれ大きさの気球で長時間飛翔実験を希望する PI が科学実験へ利用することも可能にするものである。

### 3 実験提案

#### 3.1 実験提案の再検討

我々は、単独で飛翔実験が可能な最小体積の気球として、2014 年から体積 5,000 m<sup>3</sup>、体積 7,000 m<sup>3</sup> の気球の飛翔実験に挑戦してきたが、主に気象条件が整わず、6 年間に渡り飛翔機会が得られずにいる。実験実施にあたっての制約条件を検討し、より現実的な実験計画を以下のように検討した。

2019 年の気球実験実施にあたって、大気球実験グループから示された主な実験実施条件は以下のとおりであった。

1. 偏西風の速度が 18 m/sec 以上であること。偏西風が遅いと予測精度が悪いことによるものである。
2. 予想着水点が沖合 37 km 以内である場合に実験を実施する。沖合 37 km 以内が沿岸船の航海可能範囲であり、沿岸船での回収を想定するためである。
3. 万が一、沖合 37 km 以遠に降下する際には、総重量を 100 kg 以下とできること。これは、用意できる沖合 37 km 以遠を航行可能な船の回収可能重量が 100 kg であるためである。
4. 降下中にパラストが投下できるとは考えないこと。

これを踏まえ、我々は、すべての実験期間にわたり、降下地点が 37 km 以内である場合 (ケース 1、図 3) に加え、上昇中に一時的に沖合 37 km を越えるものの、加圧開始時には沿岸に戻っているケース (ケース 2、図 4) での飛翔を提案した。しかし、大気球実験グループからは、ケース 2 の場合の実施は不可、との回答を得た。すなわち、本気球には最初から穴が存在している可能性が否めず、沖合 37 km 以遠に降下するリスクがあるため許容できない、という主張である。

となると、ケース 1 の条件で実験実施をする必要がある。しかし、これは、ある程度早い偏西風を要求する実施条件 1 と競合し、実施の気象条件が限られることとなる。気球の上昇速度を最速値である 6.5 m/sec に設定すると<sup>1</sup>、加圧がはじまる高度 17 km に達するまでに 44 分で到達することとなる。また、高度 19 km から、

<sup>1</sup>これより速度をあげると、フィルムが破損する恐れがある。

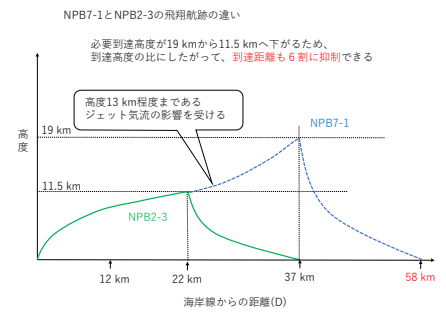
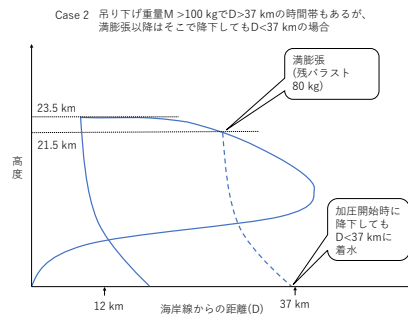
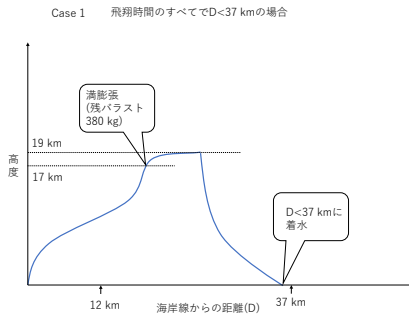


図 3: 飛行時間のすべてで海岸線からの距離 (D) が 37 km 以下。

図 4: 一時的に  $D > 37$  km の時間はあるが、加圧時には沿岸にいる。

図 5: 体積  $2,000 \text{ m}^3$  と  $7,000 \text{ m}^3$  の気球の航跡の違い。

地上換算速度  $7 \text{ m/sec}$  で降下する際にかかる時間は 26 分である。したがって、常時  $18 \text{ m/sec}$  の西風があったとすると、高度  $17 \text{ km}$  に達する際、すでに、沖合  $47 \text{ km}$  に到達することとなり、降下の際には、さらに  $29 \text{ km}$  東に移動することとなるため、実験が成立しない。実験が成立するためには、西風が狭い高度領域だけにある場合、あるいは、風向が北西であって、東方向への速度成分が小さくなる場合に限られる。この飛行プロファイルは加圧が完了したところで実験を終了させるものであるが、さらに、水平浮遊の時間を確保しようとすると、気球はより東に移動することとなり、困難さは増すこととなる。こういった極めて限定的な気象条件が要求されていたことが、NPB7-1 気球の飛行実験の機会が得られなかった大きな要因である。我々は、NPB5-1 気球については 1ヶ月、NPB7-1 気球については延べ 1.5 ヶ月に渡り、フライトレディーの状態で気象条件が整うタイミングを待ち続けてきたが、一度もチャンスはなかった。同じ実験を来年度以降に挑戦しても、飛行機会は極めて限定的であり、その機会を広げるには実験実施の方針を再検討する必要がある。

そもそも、2019 年の実験に向けて、PI チームが掲げてきた NPB7-1 気球の飛行実験の目標は以下のとおりである。最低限獲得される成果は、

- 打上げから回収までの一連の運用が可能であることを確認すること、
- 飛行環境下での気球の展開の様子を画像で取得できること、
- 使用時の差圧である  $300 \text{ Pa}$  以上の耐圧性能を確認できること、

であり、典型的に期待される成果は、

- 必要耐圧性能である  $500 \text{ Pa}$  以上の耐圧性能を確認できること、
- 水平浮遊する時間があれば、高度達成目標である、
- 水平浮遊時の温度や高度の変化の測定、
- 気密性の評価、

が可能、というものである。我々は、この実験の成功を踏まえて、我が国では実施できない長時間飛行が要求される、昼夜で高度変化しないという気球の特性を確認する実験を、豪州等、海外の実験によって実施することを考えてきた。しかし、我が国では長時間でなくとも、水平浮遊が必要となる実験を実施することが困難であるのが現状である。すなわち、水平浮遊を必要とする時点で、SP 気球の実験は海外で実施するのが適当であるから、この実験の高度達成目標までを達成するには豪州実験での実施が適当である。一方で、一連の運用が可能であることは飛行安全にかかわることであり、その前に確認しておきたい。そこで、事前に加圧までできれば達成できる、典型的に期待される成果までにしぼった実験を国内で実施することを考えた。

加圧までの実験の実施可能性を増やすには、気球の体積を小さくし、満膨張高度を下げ、沿岸からの飛行距離を短縮するのが得策である。地上で試験したのと同じ設計の体積  $2,000 \text{ m}^3$  の気球を飛行させると、図 5 のように、最高到達高度が  $19 \text{ km}$  から  $11.5 \text{ km}$  へと下がり、気球が東に移動する距離を 6 割程度と大きく抑制することができる。加えて、環境条件の違いのみを抽出して評価することもできる。

そこで、まず、来年度に体積  $2,000 \text{ m}^3$  の気球の国内での飛行試験を実施して一連の運用が可能であることを確認した後、豪州において、水平浮遊時の特性を評価する実験として体積  $7,000 \text{ m}^3$  の気球の飛行試験を実施することを提案する。具体的な目標、実験手順は以下のとおりである。

### 3.2 体積 2,000 m<sup>3</sup> の気球の国内での飛翔試験の提案

大型の単独で飛翔する気球にむけた開発項目の実証のため、体積 2,000 m<sup>3</sup> の気球の飛翔試験を大樹町で実施する。この気球は、地上試験で耐圧性能が確認されている気球と同一設計の気球である。上昇中に加圧して破壊する実験の実施を念頭におくことで、実験実施の可能性が十分に高くなっている。搭載機器は、基本搭載機器に加え、大気圧計、SP 気球の内圧測定用の差圧計、地球赤外線放射を観測する放射計、および、SP 気球の展開の様子を撮影する ITV カメラとその録画機、伝送する画像送信機であり、ゴンドラ重量は HK 機器を含め 70 kg である。ただし、加圧試験、および、飛翔航跡の制御のため、400 kg のパラストを搭載する。

実験手順は以下の通りである。

- 400 kg のパラストを搭載した状態で放球する。これにより、気球頭部が大浮力に耐えること、尾部が大重量の吊り下げに耐えること、が確認される。
- 高度 11 km にて気球が満膨張に達し、気球の内外差圧がかかりはじめる。
- 差圧が 500 Pa に到達した後、破壊機構を作動させ、実験を終了させる。
- 気球を回収し、損傷箇所に特異な場所がないか確認する。

### 3.3 体積 7,000 m<sup>3</sup> の気球の豪州での飛翔試験の提案

大型の単独で飛翔する気球にむけた水平浮遊時の特性評価のため、体積 7,000 m<sup>3</sup> の気球の飛翔試験を豪州で実施する。この気球の体積は、事前に同一設計の気球の地上試験を実施し、耐圧性能を測定することを念頭において選定している。搭載機器は、基本搭載機器に加え、大気圧計、SP 気球の内圧測定用の差圧計、地球赤外線放射を観測する放射計、および、SP 気球の展開の様子を撮影する ITV カメラとその録画機であり、ゴンドラ重量は HK 機器を含め 70 kg である。ただし、加圧試験、および、飛翔航跡の制御のため、100 kg のパラストを搭載する。気球の設計方針は体積 2,000 m<sup>3</sup> の気球と同一であり、しかも、搭載重量は 1/3 であるため、気球頭部の耐浮力、尾部の耐大重量の吊り下げに対する安全率はその分高くなっている。

実験手順は以下の通りである。

- 高度 25 km にて気球が満膨張に達し、気球の内外差圧がかかりはじめる。
- 差圧が 300 Pa となるよう、排気弁で調節し、水平浮遊させ、気球の挙動を測定する。
- 最後に気球を破壊し、実験を終了させる。

## 参考文献

- [1] 井筒 直樹、他、“スーパープレッシャー気球の開発と試験”、JAXA RR-07-009, pp.1-22, 2008
- [2] 井筒 直樹、他、“俵型スーパープレッシャー気球の開発”、JAXA RR-10-003, pp.1-20, 2011
- [3] Cathey, H.M. Fairbrother, D.A., Tuttle, J.W. Said, A., and Farley, R.E. “Qualification of the NASA Super Pressure Balloon”, AIAA BAL Conference 2015, AIAA 2015-2909, 2015
- [4] Fairbrother, Debora “Superpressure balloon”, Proc. 2017 Scientific Ballooning Technologies Workshop, 2017
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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.1-33, 2014
- [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 JAXA-RR-13-011, pp.35-60, 2014
- [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] 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—新しい網と皮膜の結合方法の開発—” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-17-007, pp.1-13, 2018