

# 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 NPB2-3の飛翔試験(B20-03)結果と地上放球試験の提案

ISAS/JAXA	:	齋藤 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
大阪大学大学院工学研究科	:	莊司 泰弘
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
湘南工科大学	:	加保 貴奈
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

## Results of the Flight Test of the Super-Pressure Balloon NPB2-3 for Long Duration Flight (B20-03) and a Proposal of the Launching Test

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

### 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 気球グループは長時間飛翔が可能なスーパープレッシャー気球の開発を進めてきた[1][2]。また、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[3]、その後、2016年、2017年と科学観測を開始するに至った[4]。しかし、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上、成功したシステムにおいても、ガス漏れが発生するなど、重要な課題も残っている。

我々は、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、2019年には体積6,400 m<sup>3</sup>の気球の地上膨張試験で740 Paの耐圧性能を確認するに至っている[6]。しかし、地上での試験であり、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、6年間、飛翔機会を得られずにきた。本年7月に、ついに体積2,000 m<sup>3</sup>のSP気球の飛翔試験を実施することができた。水平浮遊状態での特性評価を断念し、耐圧性能の評価に特化するため体積を小さくし、気象条件への要求を下げたことも奏効したと考えられる。

### 2 実験の経緯

2020年7月14日に、地上試験で利用したNPB2-2気球と同型のNPB2-3気球の飛翔性能試験を実施した。放球作業にあたっては、事前にランチャー班の方々に入念に検討していただき、放球時に頭部尾部の金具を保持する治具も製作するなど万全の体制で放球作業を実施していただいた。放球時の様子を図1、2に、高度曲線を図3に、上昇速度を図4に示す。気球は放球直後に上昇速度が急速に低下したため、図4にBallast ONと示された横線に対応する時間にバラストの投下コマンドを送信することで、上昇速度の回復をはかった。沿岸

の定置網を越えた沖合へと移動させることができた時点で、引き裂き機構を駆動させて気球を破壊し、海上へと気球を降下させ、実験を終了した。

ここで興味深いのは4時18分の時点でバラストが尽きているにもかかわらず、以後、上昇速度5 m/secのまま、気球破壊にいたるまで上昇速度を保持していることである。これは、以後の浮力損失が小さかったことを意味する。上空に昇るにつれて、ヘリウムガスは膨張し、密度が下がるため、浮力の損失速度は低下する。しかし、気球の頭頂に穴があいた場合で考えると、浮力の損失速度は4時18分の時点で放球直後の1/2にしかない。すなわち、浮力の損失速度の低下は実効的に穴の大きさが小さくなっていったことを示唆している。なお、放球直後の浮力の損失速度から、気球頭部に穴があいた場合の面積を推定すると180 cm<sup>2</sup>となる。

回収した気球を調査したところ、鋭利な刃物で切り付けたような特徴的な傷が気球の頭部側に多数存在することが判明した(図5)。中には十字に切り裂かれた箇所も見出されており、網がぶつかったことで損傷した可能性を調査している。もし、こういった傷が原因であったとすると、気球の皮膜が上下動している放球直後の段階では、隙間が大きくなり、納まった後は隙間が小さくなると予想され、上昇に伴い穴の大きさの減少を定性的には説明できる。

この穴の周辺や穴があくには至らなかった傷について、宇部丸善ポリエチレンの協力の元、顕微鏡で拡大写真をとったのが図6、7である。これらを見ると、穴の周辺にはクリープした跡が数10 μmの幅で存在しており、穴に至らなかった傷の写真(図6)をみると、100 μm強の幅の押し付けられたような跡があることがわかる。すなわち、フィルムに狭い幅の物体が片側から押し付けられ、局所的にクリープがした後に破断したことが示唆される。別のプロセス、たとえば、ハサミによって切断した場合には、こういったクリープした跡はつかない。我々は、放球作業の一環として、気球が立ち上げられた際に、気球全体が大きく変形し、フィルムと網の間に大きな速度差が発生し、フィルムの表面に高速で網が打ち付けられた可能性を考えている。現在、より詳細な穴の調査を進めると共に、人工的に同様の穴を再現する実験を進めている。

### 3 対策案

NPB2-3気球では、皮膜が一枚であるが、これを二重にすることを考えている。これは、単純に皮膜の強度を増すと共に、ガス漏れを防止する効果を狙っている。皮膜の多重化(キャップ)は大重量を搭載する場合に用いられてきた技術であり、地上付近で気球の頭部付近にのみガスが入っている状態で頭部を保護する目的で利用されている[7]。

ガス漏れ対策として多層化を積極的に利用しはじめたのは2018年からである[8]。気密性が高まるのは内層が外層に圧迫されるため、内外層間の流路が狭められ、ガスが通過しにくくなるためである。我々は体積に対して相対的に表面積が大きな小型気球に対してこの技術を用い、ポリエチレン皮膜の内側にゴム気球をいれる気球の開発を別途進めており、2020年には体積100 m<sup>3</sup>の気球においてこの有効性が確認されている[9]。

二重の皮膜を製作する技術はすでに有しており、それがフィルム成膜時、あるいは気球製作時のフィルムのミクロな欠陥を補償できることは実証済である。むしろ、それが今回放球時に発生したマクロな穴に対して有効かどうかは必ずしも明らかではないが、地上放球試験によって発生する傷の頻度、貫通穴の一枚目と二枚目の大きさの違いなどから定量的に皮膜にかかる力を評価することも可能であり、万が一、対策が不十分であったとしてもさらなる対策の検討に必要な情報は得られるものと考えている。

### 4 放球模擬試験の提案

NPB2-3気球で発生した放球時の損傷の原因の解明と対策の有効性を確認するため、対策を施した検証用気球を用意し、地上放球試験を実施することを提案する。これは、気球を地上につなぎとめた状態で放球作業を実施し、気球が立ち上がった後に気球からガスをぬいて回収し、気球の損傷の有無を詳細に調査することで対策の有効性を確認するものである。搭載機器は、気球監視カメラ、SP気球の内圧測定用の差圧計、気球の挙動を把握するため気球尾部、皮膜、頭部に取り付けた加速度計、GPS受信機、吊り紐にかかる張力を測定するためのひずみ計であり、ゴンドラ重量は60 kgである。



図 1: NPB2-3 気球の放球 (X=0)。



図 2: NPB2-3 気球の放球 (X=2sec)。

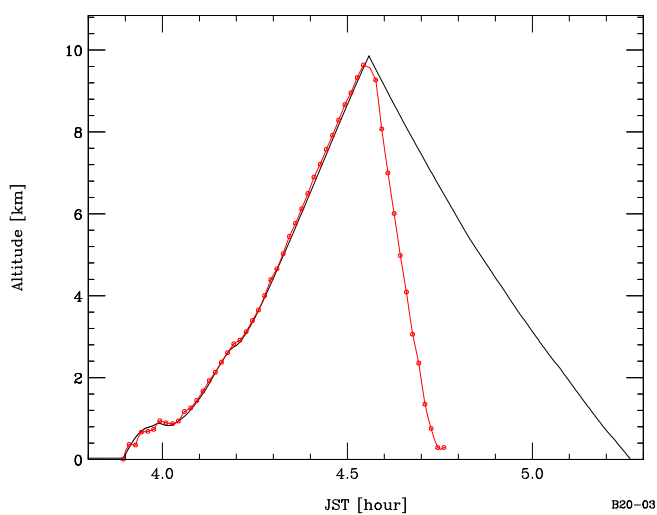


図 3: B20-03 実験の高度曲線。黒: ゴンドラ、赤: 気球

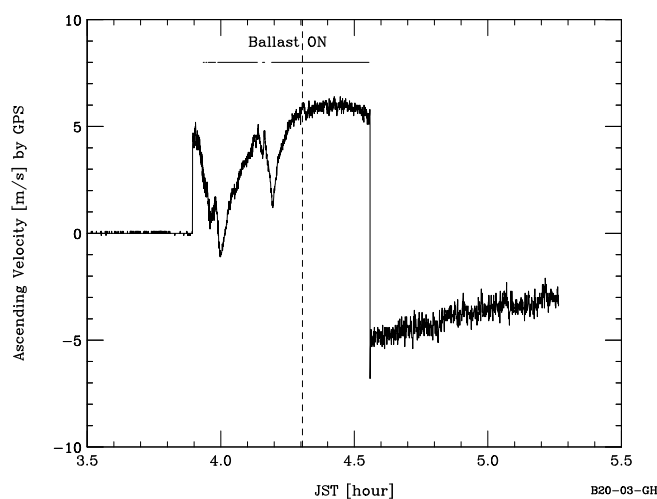


図 4: B20-03 実験のゴンドラの上昇速度。



図 5: 回収された NPB2-3 気球フィルムに見られる傷。十字の傷の長い方の長さは 5 cm 程度

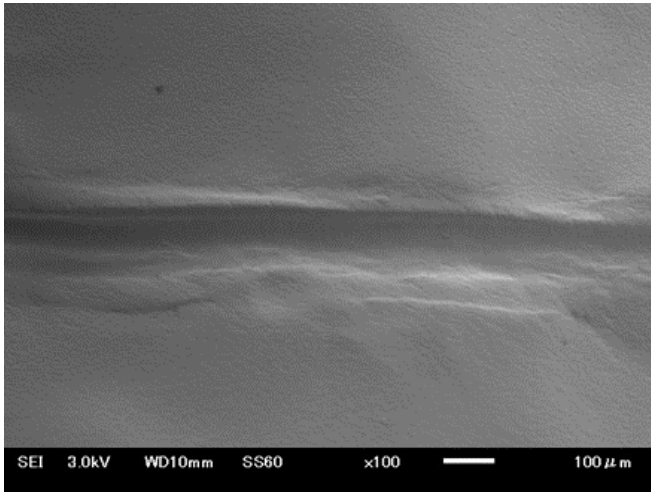


図 6: 破断に至らなかった傷。

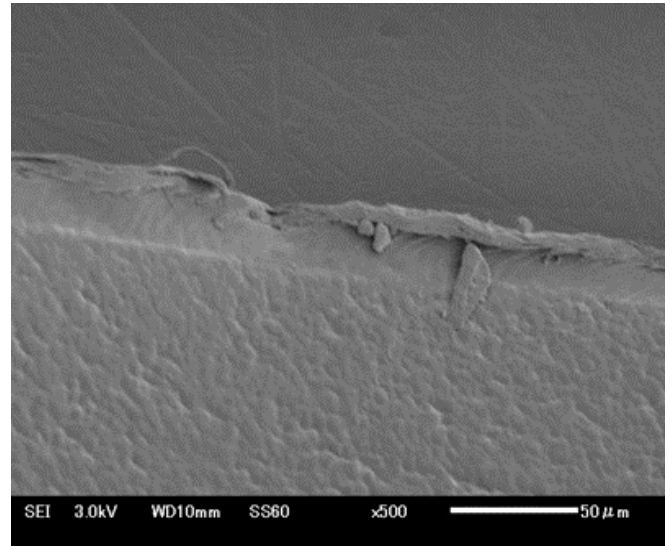


図 7: 破断した傷の下部拡大

実験手順は以下の通りである。

- 気球をつなぎとめた状態で放球作業を実施する。
- 気球がガスを抜き、地上へと下ろし、気球を回収する。
- 気球を持ち帰り、詳細に調査することで、損傷の有無を確認する。

より具体的な手順は大気球実験グループにご相談させていただく予定である。

## 謝辞

B20-03 実験の実施にあたっては、ISAS/JAXA の大気球実験班の方に大変お世話になりました。本研究の一部は、ISAS/JAXA 宇宙工学委員会戦略的基礎開発研究、科研費 (課題番号 17H01352) を受けて推進しています。

## 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] 秋田 大輔、他、“6400 m<sup>3</sup> 網気球 (NPB7-1) の地上膨張試験” 2020 年度大気球シンポジウム集録, isas20-sbs-022, 2020
- [7] 井筒 直樹、他、“多層膜構造気球の設計と試験” 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-05-012, pp.1-14, 2006
- [8] 斎藤 芳隆、他、“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
- [9] 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 投稿, 2020