

## ウインチを用いた準静的放球法の開発

斎藤 芳隆<sup>\*1</sup>, 飯嶋 一征<sup>\*1</sup>, 池田 忠作<sup>\*1</sup>, 生田 歩夢<sup>\*1</sup>, 古田 竜也<sup>\*1,2,3</sup>, 森 英之<sup>\*1</sup>, 水越 慧太<sup>\*1</sup>,  
水村 好貴<sup>\*1</sup>, 田村 誠<sup>\*1</sup>, 山谷 昌大<sup>\*1</sup>, 秋田 大輔<sup>\*4</sup>, 中篠 恭一<sup>\*5</sup>,  
松尾 卓摩<sup>\*6</sup>, 五十嵐 優<sup>\*7</sup>, 橋本 紘幸<sup>\*7</sup>, 松嶋 清穂<sup>\*8</sup>

### Development of Quasi-Static Balloon Launch Method Using a Winch

SAITO Yoshitaka<sup>\*1</sup>, IJIMA Issei<sup>\*1</sup>, IKEDA Chusaku<sup>\*1</sup>, IKUTA Ayumu<sup>\*1</sup>,  
FURUTA Tatsuya<sup>\*1,2,3</sup>, MORI Hideyuki<sup>\*1</sup>, MIZUKOSHI Keita<sup>\*1</sup>, MIZUMURA Yoshitaka<sup>\*1</sup>,  
TAMURA Makoto<sup>\*1</sup>, YAMATANI Masahiro<sup>\*1</sup>, AKITA Daisuke<sup>\*4</sup>, NAKASHINO Kyoichi<sup>\*5</sup>,  
MATSUO Takuma<sup>\*6</sup>, IGARASHI Yutaka<sup>\*7</sup>, HASHIMOTO Hiroyuki<sup>\*7</sup> and MATSUSHIMA Kiyoho<sup>\*8</sup>

#### ABSTRACT

In the flight performance test (Experiment B20-03) of the superpressure balloon covered by net (NPB2-3) with a volume of 2,000 m<sup>3</sup> and conducted on July 14, 2020, it was discovered that when the spooler was open, the net would rapidly strike the film, resulting in impact damage to the film and the generation of several hundred slit-like holes. As a solution to this issue, a method was developed to quasi-statically launch the balloon with smaller exerting stress on the balloon film. This involved retaining the collar position of the balloon and, after gas filling, deploying a rope attached to the retention point (the second retention point) using a winch. The second retention point consisted of a layer of load tape overlaid and welded onto the welded portion of the balloon film, forming a bundle of load tape. Following element tests to confirm that the breaking strength of this retention point was 1,800 kg, on March 25, 2022, experiments were conducted using a simulation device to hold a 700 kg load at this retention point and then move the suspension point to the rear of the balloon, all of which were successfully accomplished without issues. On September 2, 2022, a simulated balloon release test was conducted using an NPB2-4 balloon, which is identical to NPB2-3 but equipped with the second retention point. Helium gas was injected into the balloon, and it was raised on top of the launch device. As a result, the number of slit-like holes was reduced to only two, confirming the effectiveness of this method. Since these holes were considered to be a result of the shock during the head raising process, a method was devised to completely prevent hole generation. This involved hoisting the head of the balloon with a rubber balloon, injecting helium gas afterward, and gently raising the balloon. On August 22, 2023, a test was conducted using a test balloon with film applied to 10 meters from its head. It was confirmed that this method completely prevented the occurrence of slit-like holes. As a result, a method for launching a balloon covered by a net was established. It involves hoisting the head of the balloon with a rubber balloon, injecting helium gas afterward, and deploying a rope attached to the second retention point using a winch, all without causing impact damage, thus paving the way for a successful balloon launch.

**Keywords:** Scientific Balloon, Super-pressure Balloon, Membrane Structure, Launch Method

\* 2023年11月28日受付 (Received November 28, 2023)

<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> 東海大学工学研究科 (Graduate School of Engineering, Tokai University)

<sup>\*3</sup> 現所属: 株式会社 IHI (IHI Corporation)

<sup>\*4</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>\*5</sup> 東海大学工学部 (School of Engineering, Tokai University)

<sup>\*6</sup> 明治大学理工学部 (School of Science and Technology, Meiji University)

<sup>\*7</sup> 藤倉航装株式会社 (Fujikura Parachute Company Ltd.)

<sup>\*8</sup> 松嶋技術士事務所 (Matsushima Consulting)

## 概要

2020年7月14日に実施した体積2,000 m<sup>3</sup>のはっさく型気球NPB2-3の飛翔性能試験（B20-03実験）において、スーパー開放時に網が高速で皮膜を叩くことによって皮膜が衝撃破壊し、数100個におよぶスリット状の穴が発生することが判明した。この対策として、気球皮膜にかかる応力を低減させる方法として、気球のカラー部を保持し、ガスづめ後、気球尾部の第一保持点に加えて新たに追加した保持点（第二保持点）にとりつけたロープをウインチで繰り出すことによって準静的に立ち上げる方法（ウインチをもちいた準静的放球法）を開発した。第二保持点は、気球皮膜の溶着部にあるロードテープの上にロードテープを重ねて溶着し、そのロードテープを束ねたものである。この保持点の破断強度は1,800 kg以上であることが要素試験によって確認されている。2022年3月25日に模擬装置を用いて、700 kgの荷重を第二保持点で保持した後、気球尾部の第一保持点へと吊り点を移動させる実験を実施し、問題なく保持できることを確認した。2022年9月2日には、NPB2-3と同型の気球に第二保持点を装備したNPB2-4気球を用いて、気球にヘリウムガスを注入し、大型放球装置の上に立て上げる模擬放球試験を実施した。その結果、スリット状の穴が2箇所まで減少し、この方法が有効であることが確認された。この穴は頭部立て上げの衝撃に伴うものと考えられたため、完全に穴の発生を防ぐべく、ゴム気球で気球の頭部を吊り上げ、後にヘリウムガスを注入し、緩やかに気球を立て上げる方法を考案した。2023年8月22日に、NPB2-4気球の頭部側10 mに皮膜をつけた供試品を用いてこの方法での試験を実施し、スリット状の穴の発生が完全に防げることを確認した。これにより、皮膜に網をかぶせた気球の放球方法として、ゴム気球で気球頭部を吊り上げた後にヘリウムガスをつめ、第二保持点にとりつけたロープをウインチで繰り出すことによって、衝撃破壊を起こすことなく、放球する目途がついた。

重要語：科学観測用気球、スーパープレッシャー気球、膜構造物、放球法

## 1 はじめに

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手法(はっさく型)[1]を用いて、長時間飛行が可能なスーパプレッシャー気球の開発を進めてきた。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。2010年の小型気球の地上試験から開発をはじめ、以後、順次大型化させ、2019年には体積 $6,400\text{ m}^3$ の気球の地上膨張試験で $740\text{ Pa}$ の耐圧性能を確認するに至った[2]。最終的には体積 $300,000\text{ m}^3$ の気球により、 $900\text{ kg}$ のペイロードを高度 $36\text{ km}$ (大気圧 $5\text{ hPa}$ )に飛行させることを目指している。2020年7月14日には、地上試験で確認されている各開発要素の総合試験、および、飛行時の特性評価を目的とし、体積 $2,000\text{ m}^3$ のNPB2-3気球の飛行性能試験を実施した[3]。気球は放球直後から所期の上昇速度が得られず、さらに速度の低下が見られたため、バラストを投下して $5\text{ m/s}$ 以上の上昇速度を維持した後、安全な海域に到達した時点で、破壊機構を駆動し、気球を降下させた。得られた気球の映像からはガス漏れが発生したことが判明しており、また、スプーラー解放直前まではロードセルによって測定されたスプーラーにかかる上向き張力に変化がなく、放球直後の上昇速度が予測よりも小さかったことから、ガス漏れはスプーラー解放直後に発生したことが判明している。回収された気球の調査により、気球皮膜には刃物で切り付けたような直線的でかつ縁に伸びがある特異なスリット状の穴が数100個存在していることが見出された。この穴を再現する条件を検討し、網線が $10\text{ m/s}$ 強の高速で衝突した際に衝撃破壊によって発生した可能性があることがわかった[5]。

この対策として、皮膜を二層にし、膨張に伴ってずれるように製作することで、穴が発生したとしても、ガス漏れを防ぐ方法[4]や、網の上からもう一層の皮膜をかぶせ、網と皮膜を一体として移動するように改良することで、本体皮膜への損傷を低減することも検討したが、いずれも、重量が増える改良であり、はっさく型のメリットである軽量化とは方向性が逆である。この観点から、気球本体の強度を増やすのではなく、気球への応力を減らす新しい放球方法を検討し、模擬放球試験によりこの方法の有効性を確認した。

本論文では、2章で従来の放球方法の課題を示した後、3章で新しい放球法の概念を説明し、気球の保持点を模擬した要素試験、体積 $2,000\text{ m}^3$ の気球を用いた模擬放球試験、体積 $2,000\text{ m}^3$ の気球の頭部をもちいた用いた頭部立ち上げ試験の結果を示し、4章で新しい放球方法の特徴をまとめ、5章で結果をまとめる。

## 2 放球方法の検討

### 2.1 既存の方法とそれらの課題

新しい放球方法の検討に先立って、これまでに実施されてきた放球方法を放球時の気球の変形という観点から調査し、開発の方向性を探った。

現在のISAS/JAXAの放球法は、スライダー放球装置を用いたセミダイナミック放球法[6]である。図1にNPB2-3気球を放球した際の気球の写真を示す。スプーラーで跳ね上げた後、気球が大きく変形していることがわかる。はっさく型の場合、網は皮膜と溶着線部分だけで固定されており、急激に気球が変形した場合、網と皮膜とが一時的に分離し、衝突することとなる。すなわち、気球が変形したことが今回の問題の原因であり、ガス詰め後、放球されるまでの間に気球が変形しないよう、準静的に気球を立ち上げることが必要と考えられる。

アメリカ航空宇宙局(NASA)やブラジル国立宇宙研究所(INPE)、インドのタタ基礎研究所(TIFR)などで広く実施されているのが、ダイナミック放球法である(図2)。セミダイナミック放球法との大き



図 1: NPB2-3 気球 (B20-03 実験) の放球時の映像 (左はスプーラー解放時、右はその 2 秒後)。

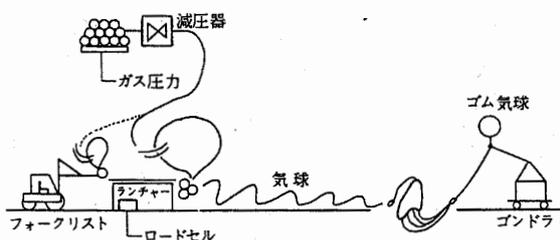


図 2: NASA によるダイナミック放球法での放球 [7]。 図 3: CNES による補助気球を用いた放球 [8]。

な違いは、ゴンドラを保持しているクレーン車が自由に水平面を移動できることで、地上風に合わせて位置を動かすことが可能な点である。しかし、放球時にスプーラーを解放し、その際に気球が大きく変形することには変わりはない。フランス国立宇宙研究センター (CNES) では、実験装置を別の気球で浮かせ、飛翔後にその気球を切り離す方法での放球が実施されている (図 3)。この方法でも本体の気球は放球時にスプーラーから解放され、大きく変形することになる。

日本での放球方法の変遷を振り返ってみる。1980 年代には、図 4 のように固いローラーで気球を押さえるスタティック放球法が利用されていた [9][10]。この方法では、このローラーで現在のカラー位置を保持し、そこを解放して一気に放球していた (スタティック放球法、図 4 上)。後に、ローラーで気球の下部を保持し、気球頭部側にはカラーを設け、ローラーによって徐々に立ち上げる方法 (気球立て上げ放球法、図 4 下) が検討されたり、気球尾部にとりつけられたロープによって、気球の上昇を制御し、荷姿に張力がかかった後に放球する方法 (新立ち上げ放球法、図 5)[11] も検討されている。スタティック放球法 (図 4 上)、および気球立て上げ放球法 (図 4 下) では気球は変形することになるが、新立ち上げ放球法 (図 5) では、プリー側 (プリーとはプリー側) の張力を適切に制御することで気球が変形しないように放球することも可能である。その後、日本の放球は、固いローラーで気球の尾部を保持する方法から、気球の尾部をランチャーに固定する方法へと進化し、さらに、セミダイナミック放球法 [12] が利用されるようになり、大樹町に移動後、現在のスライダー放球装置を用いた方式 [6] が用いられるようになった。また、狭い放球場で大きな気球を打ち上げる場合 [13] や、狭い船の上で打ち上げる場合 [14] に対応して、気球と荷

従来の放球



気球立て上げ放球

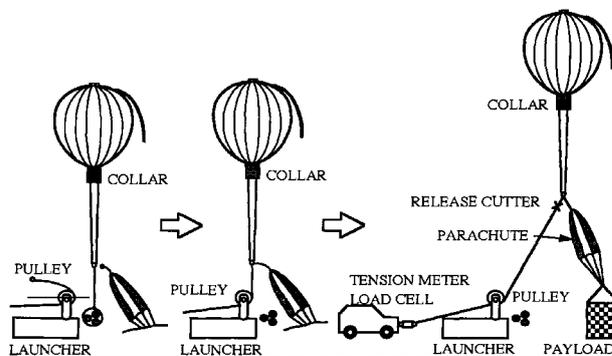
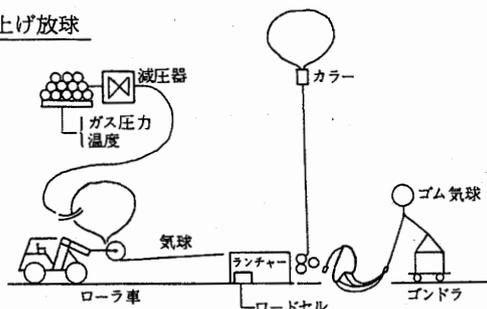


Fig. 2 Extension of the balloon train by the new launch method

図 5: 新立て上げ放球法 [11]。

図 4: 従来のスタティック放球法 (上) と気球立て上げ放球法 (下)[9]。

姿とを完全に展開するのではなく、気球の尾部につけた紐をウインチで繰り出して気球を立ち上げる方法も開発され、実際の飛翔実験へと利用されている。気球の保持方法をローラーで挟む方法から、ローラーで支える方法への変更は、気球の大型化、ペイロードの大重量化に伴ってローラーでの保持が困難になったためである。また、セミダイナミック放球法のメリットは、ローラーでの立ち上げ時間を短縮し、突風による気球破壊のリスクが低減されること、および、ローラーが気球の尾部側を圧迫するため、大浮力の気球の場合に尾部のフィルムに空気が残っていた場合に圧迫によりそれが破裂して皮膜に穴をあけるリスクが避けられることにあった。気球の変形を防ぐという点では、新立て上げ放球法が最も理想に近いが、気球をプリーアの直上に立てあげる方法が課題である。

### 3 ウィンチを用いた準静的放球法の開発

#### 3.1 方法の検討

放球時に気球が衝撃を受けるのは、スプーラー解放に伴って、張力のバランスが一時的に崩れ、気球各部が急激に移動するためである。したがって、これを防止するには、張力のバランスを保ったまま、準静的に気球の位置をガスづめ時の低い位置から、ランチャー台車の直上へと移動させることが要求される。そこで、カラー部で気球を保持し、保持した場所をロープで制御しつつ移動させ、最終的にはランチャー台車の直上に移動させる方法を検討した。図6にその手順を示す。

この方法では、従来、気球を低い位置に保持するために用いてきたスプーラーに変えて、カラー位置で気球を保持する必要がある。カラーは、加圧にともなって、位置がずれないように、圧縮空気で気球を締め付ける構造となっているが、ここで必要なのは1トンにおよぶ浮力を保持する機構である。ウイ

ンチを用いた準静的放球法を適用するには、カラー位置での気球の保持方法、および、吊り点を移動させることに伴う課題を検討する必要がある

そこで、保持部の構造を図7のようにすることを検討した。すなわち、気球皮膜の溶着部に入っているロードテープの上にもう一本、ロードテープを重ねて溶着し、その端部を束ねてリング状に加工し、それをウインチへとつながる制御紐へと結束するものである。このためには、ロードテープ間の結合強度を十分高くする必要がある。はっさく型気球では公称強度 200 ポンドのロードテープが 20 本用いられている。そこで、公称強度 200 ポンドのロードテープを重ねる長さを変えて溶着した試験片を製作し、引張試験によって溶着部の強度を評価したところ、2 m に渡り重ねづけすると、ロードテープと同程度の強度が発揮できることがわかった。この結果を踏まえ、第二保持点の製作にあたっては、余裕を見て 3 m 重ねて溶着することとし、確実に保持できるようにした。また、ロードテープ端部のリング加工についても同一仕様の供試品での試験を実施し、破断強度 1,800 kg を有することが確認されている。

## 3.2 模擬装置を用いた放球方法の確認

この方法の確認のため、気球のカラー部を模擬した供試体を製作し、浮力をつける代わりに、上下を反転させ、錘を吊すことでそれを模擬する試験を実施した。

### 3.2.1 供試体の設計

B20-03 実験においては、650 kg の総浮力がつけられ、カラー位置は頭部から 19 m の位置に設定されている。このカラー位置でフィルムが鉛直方向と成す角度は計算上 30 度となる。このフィルムの角度が再現されるよう、図8のように供試体を製作した。この供試体では気球の内側に発泡スチロールを詰め、カラー部のフィルムの開き角が実際のカラー部と同様になるようにしている。なお、カラーにはフィルムから、カラーの径を広げる方向、および、フィルムに沿って尾部方向に移動させる力が働くが、補遺 A に示すように、その大きさは気球皮膜に鉛直方向にかかる張力の 8 % に留っており、既存のカラーで十分に保持し、移動を抑制できる力である。

また、中につめた部材の強度が不十分な場合には、フィルムによる圧迫に耐えられない可能性が考えられる。日本発泡スチロール協会の圧縮強さ [15] によれば、発泡スチロールの圧縮強さは 10 N/cm<sup>2</sup> 以上であり、内側の発泡スチロールは 45 cm 角の断面があるため、圧縮強さは 20 kN と見込まれる。補遺 A のカラーにかかる力と同様の議論から、この発泡スチロールが下方向に圧縮される強度は吊り下げ重量の 7 % と想定され、吊り下げ重量が 700 kg であるならば、圧縮力は 500 N に過ぎず、発泡スチロールでも十分な強度を有している。

供試体のフィルムは、カラー部のフィルムの量が NPB2-3 気球と同じになるようにパネル幅は 850 mm とし、パネル数も 20 と同一にした。また、パネルの溶着部には、NPB2-3 気球とおなじく、200 ポンドのロードテープを入れ、それに重ねてもう一本、200 ポンドのロードテープを重ねづけした。

網やロープリングの構造は NPB2-2 気球の頭部を転用し、カラーの内側に入る網の交点部分のみをロードテープに二列直線縫いで固定した。

### 3.2.2 模擬装置を用いた確認試験

この供試体に 700 kg の錘を吊り下げ、第二保持点での吊り下げから、気球尾部の第一保持点での吊り下げへと移動させる試験を 2022 年 3 月 25 日に株式会社南クレーンモータープールにて実施した。図 9

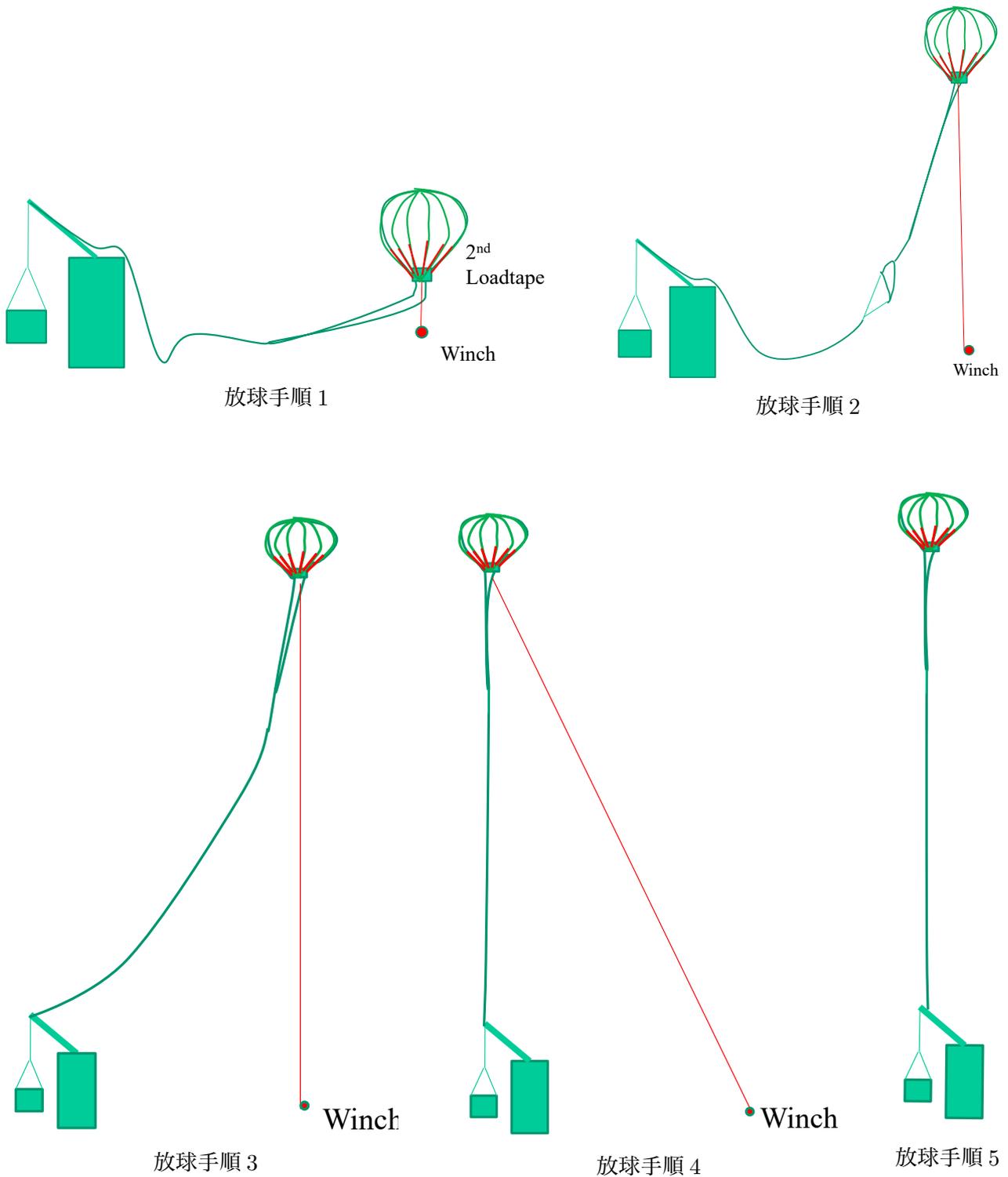


図 6: 気球を変形させないで準静的に放球する方法案。放球手順 1: 気球をカラーで圧迫し、カラー付近の保持点でロープで保持しつつガス詰めを行なう (左上図)。放球手順 2: ウインチでロープを繰り出して気球を立てあげる (右上図)。放球手順 3: 荷姿伸展完了 (左下図)、放球手順 4: さらにロープを繰り出し、放球台車直上に気球を立てあげる (中央下図)、放球手順 5: 途中保持点のロープを切り離す (右下図)。

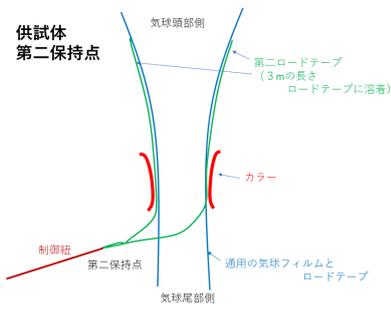


図 7: 第二保持点部構造。



図 8: 供試体。



図 9: 第二保持点から気球尾部での吊り下げに移行。



にその様子を示す。荷重の移行が吊り紐の繰り出しによって問題なく可能であること、第二保持点が十分な強度を有することが確認された。ただし、カラーの締め付け部において、気球の皮膜が損傷を受けることが見出された。これは、荷重に移行に伴って網が移動し、皮膜を傷つけたものと考えられる。そこで、カラー締め付け部の皮膜には、網との間に  $20\ \mu\text{m}$  フィルムを3枚挿入し、保護することとした。

### 3.3 NPB2-4 気球を用いた模擬放球試験

準静的放球法の有効性を確認するため、体積  $2,000\ \text{m}^3$  の気球を用いた模擬放球試験 (大型放球装置上に立ち上げるところまでを実施し、放球はしない) を、2022年9月2日に、大樹航空宇宙実験場にて実施した。

試験に用いた NPB2-4 気球の諸元を表1に示す。この気球は、B20-03 実験と同体積 ( $2,000\ \text{m}^3$ ) で概ね同じ仕様であるが、頭部から  $19\ \text{m}$  のカラー取り付け部に、ロードテープを重ね付けした第二保持点を有する点が異なっている。

この実験での結索の状況を図10に示す。実際に飛翔させるわけではなく、大型放球装置上に気球を立ち上げた後、逆行するため、気球を確実に回収する必要がある。かつ、万が一の予期せぬ故障によって気球が飛翔する事態をさける必要がある。こういった観点から、気球と大型放球装置との結索は、「荷姿」、「安全紐」、「引倒紐」の3本のロープによって、異なる気球の部位と結索することで、完全二重冗長を確保した。また、「引倒紐」は気球の頭部と結合されており、回収作業時に、気球を引き倒す方向を定める目的でも使用する。ウインチは、定格荷重3トンのトーヨーコーケン社製マイティー・プレー MAW-40H10(S) を新規に製作したアダプタを用いて豪州用跳ね上げローラー台車上に固定して用いた。なお、「弁線」は排気弁を駆動するための信号線、「引裂紐」は引っ張ることで気球頭部  $6\ \text{m}$  地点に取り付けられた引裂部を破り気球からガスを抜くための紐、「カッター制御紐」は第二保持点に取付られたカッターを駆動した際に引っ張ることで、気球と分離したカッターとの衝突を防ぐことを目的にした紐である。

ガス詰めの際に気球が風をはらまないよう、図11に示すような「ミニカラー」を開発した。気球の打ち上げの際、横風を受けて気球が変形し、風をはらむのを防ぐため、詰められたヘリウムガスが気球頭部に留まるよう、気球にはカラーを装着する。スプーラーを用いたオペレーションでは、ガス詰めの際にはスプーラー上に小さいバブルをつくり、ガス詰めをするにしたがって、適宜、スプーラーが移動し、バブルを大きくしている。この過程で、スプーラーは、スプーラーよりも気球尾部側にガスが流入するのを防ぐ役割も果たしている。しかし、ここで適用する放球方法では、スプーラーがなく、カ

表 1: NPB2-4 気球の諸元

気球番号	NPB2-4
形状	かぼちゃ型
容積 (m <sup>3</sup> )	2,000
直径 (m)	18.0
全長 (m)	23.6
高さ (m)	10.8
パネル数	20
最大パネル幅 (mm)	2,826
フィルム種類	10 $\mu$ m ポリエチレン
網線/ロープ強度 (N)	415
縦網線/ロープ数	2,400
網交点間隔 (mm)	102
赤道ロープ間隔 (mm)	47
耐圧予想値 (フィルム)(Pa)	10,200
耐圧参考値 (ロープ)(Pa)	3,900
耐圧参考値 (弁座)(Pa)	2,700
ガスガイド長さ (m)	40
気球重量 (kg)	65

ラー部のみで拘束されるため、ガス注入の初期に気球が横風を受けると、気球内部のヘリウムガスが頭部からカラー部の間で移動し、気球が大きく変形するリスクがある。そこで、これを防ぐためにミニカラーを開発した。複数のミニカラーを気球頭部とカラー部の間に巻き付け、頭部側から順次開放していくことで、ガス詰め初期にも、ガスを気球頭部側に留めることができる。このミニカラーはベルト部とベルクロ部からなり、ベルト部を気球に巻き付け、ベルクロ部をベルト部に付けることで、気球の周方向の大きさは制限される。逆にこのベルクロ部を周方向と垂直方向に紐で引っ張って剥がすことで、気球の周方向の拘束を開放すると共に、ベルト部とベルクロ部が一体となって気球から分離する。

実験実施の際には、B20-03 実験と同様に、気球には 660 kg の浮力をつけて、この準静的な放球法を適用して、気球の立上げを実施した後、気球からガスを抜いて回収し、気球の損傷状態を調査した。放球作業は以下のように実施した。放球作業の様子を図 12 に示す。

1. 気球の頭部側を箱から出して展開した。
2. 気球の尾部を大型放球装置に結合されている荷姿、安全ロープと結索した。
3. 気球の第二保持部を豪州用跳ね上げローラー台車に取り付けたウインチからのロープと結索した。
4. 気球へとカラー、および、ミニカラーを取り付けた。
5. 気球へとヘリウムガスを注入した。
6. ガスが詰められるにつれて、頭部立て上げ (図 12a、b)、ミニカラーの開放を順次実施し、総浮力 660 kg のヘリウムガスの注入を完了した (図 12c)。
7. ウインチからロープを繰り出し、大型放球装置直上に気球を立てあげた (図 12d~g)。

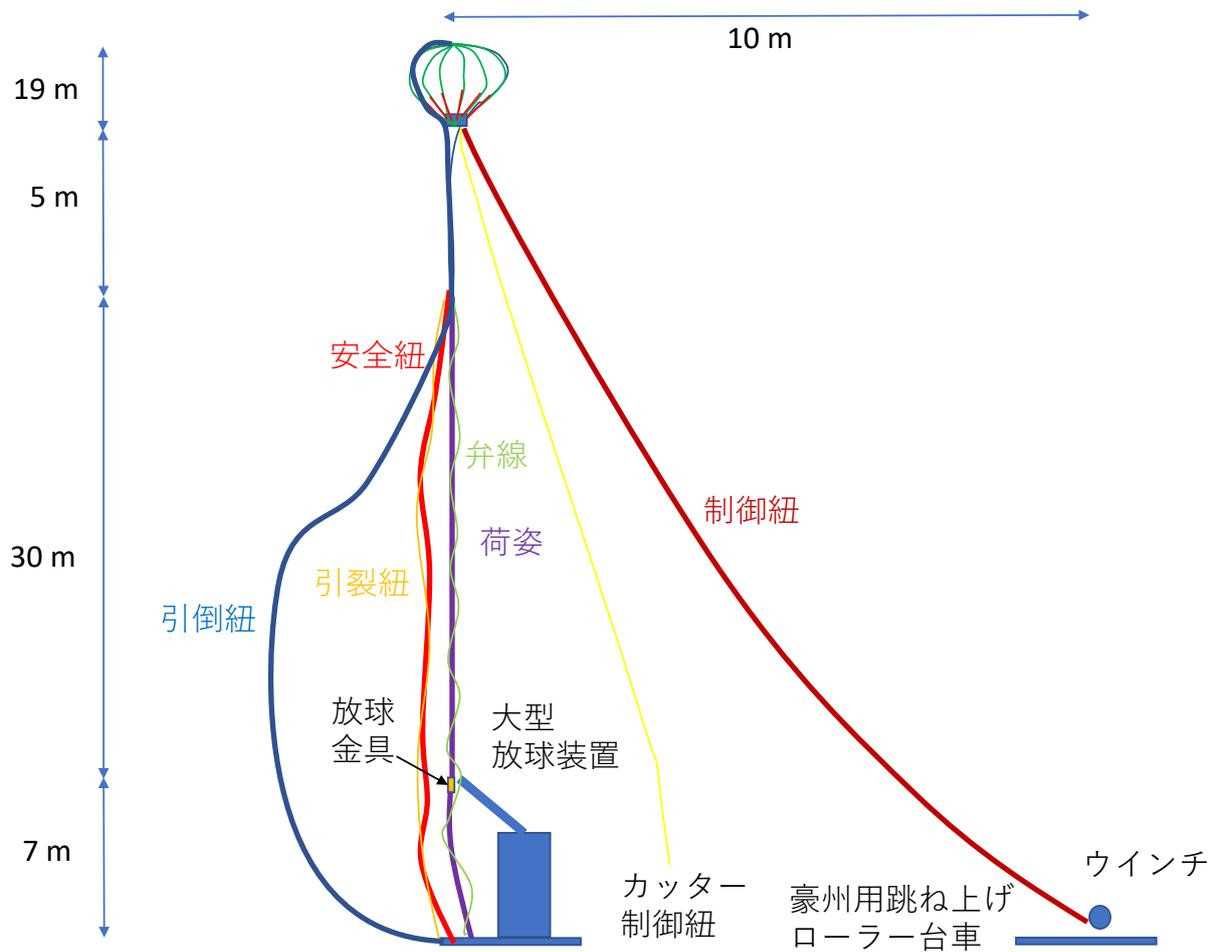


図 10: 気球はアンカーと、「荷姿」、「安全紐」、「引倒紐」の3本のロープで結合される。



図 11: ミニカラーの写真。左図にあるように、ベルト部(左)とベルクロ部(右)からなり、右図のように気球に巻き付けて利用する。右図中央にあるベルクロ部に結合された紐を引っ張ることで、ベルクロ部はベルト部から離れ、ベルト部と共に気球から分離する。ベルト部とはベルクロ部とは十分に余長のある紐で結合されている。

8. 気球の第二保持部分離カッターを駆動し、ウインチからのロープと気球を分離した (図 12g)。
9. カラーを開放した (図 12h)。
10. 排気弁、および引裂機構によってガスを放出し、気球を降下させた。
11. 降下した気球の皮膜の調査を行い、B20-03 実験と同様の切り傷の有無を調査した。

概ね問題なく作業が行われたが、以下の二点に課題が残った。

- 頭部立て上げの際、ミニカラー部で気球を人力で保持し、緩やかに立ち上げることを予定していたが、保持点のない場所で気球を保持することは困難であり、一気に立ち上がってしまった
- ミニカラーの締め付け力が弱く、ガスの注入に伴ってずり落ちてしまった。ミニカラーは、巻き付けた後、バルクロで締めているのみであり、圧縮空気による圧迫は行っていないため、カラーに比べると、締め付け力が弱い。

回収した気球の調査の結果、長さ 3 cm 程度のスリット状の穴が二箇所、存在することがわかった。B20-03 実験において、数 100 個の穴が発生していたのと比較すると劇的な改善である。図 13 にその一つの写真を示す。B20-03 実験で見られたのと同様に、縁に延された跡があり、衝撃破壊によって発生したものと考えられる。また、これらに傷は完全に破断に至っていない部分が残っており、衝突速度が小さかった可能性が示唆される。これらの穴は、いずれも同じパネル<sup>1</sup>の頭部側 3.8 m の地点に 10 cm 程度離れて存在しており、そのパネルは頭部立上げの際に天頂側に位置していた。気球の映像から、気球のガスが注入された部分の形状がウインチによる立上げの際 (図 12d~f) には左右対称な形状を保っていたのに対して、頭部立上げの際 (図 12a) には、スプーラーでの放球時 (図 1 右) ほどではないものの、変形していることが見て取れ、ウインチによる立上げの際よりも頭部立上げの際の方が皮膜に大きな応力がかかったと推定された。そこで、頭部立上げの際に網が皮膜を叩いたことで発生した可能性が高く、気球頭部の立てあげの際に、急速に立ち上がりすぎたことが問題、と考えられた。

### 3.4 NPB2-4a 気球を用いた頭部立て上げ試験

#### 3.4.1 対策の検討

気球頭部の立ち上げの際には 80 kg 程度の浮力をつめる必要がある。これは、排気弁を含む気球頭部の構造体の重量が 10 kg 程度あり、浮力が小さい状態で立て上げると、頭部が最上部に位置するのではなく、側面が最上部に位置する状態で安定してしまうため、それを避けるべく、この程度の浮力を付けてから立て上げる必要がある。一方でこの浮力をつめると気球が一気に立ち上がってしまう問題が発生する。そこで、あらかじめ気球の頭部をゴム気球で持ち上げておき、気球の頭部の浮力と重量が釣り合う状況でガス注入することを考えた。ゴム気球は気球頭部の構造体とロープカッターに通した紐で結索し、本体の気球へのガス注入が終了した後にロープカッターを駆動して切り離すことで、ウインチによる立ち上げ以降は先に実施した方法と同一の手順で放球が可能となる。なお、気球頭部は、金属製の円板とリングで皮膜を挟み込む構造となっており、ゴム気球とこの構造体を結索したとしても、本体の気球皮膜に局所的に応力がかかることはない。

また、ミニカラーがずり落ちる問題に対応しては、図 14 のように、気球皮膜の溶着部のロードテープに 30 cm のテترون製ループテープ (予め、穴があるように編まれている) を縫い付け、その穴部にロープを通し、そのロープによってロードテープの動きを拘束することで、皮膜の移動も拘束することを考

<sup>1</sup>気球を製作する際には、紡錘形に切り出した皮膜を熱溶着して製作する。その皮膜の一枚をパネルと呼ぶ。



a) 頭部の立てあげ中。



b) 頭部の立てあげ完了。



c) ガス注入完了。



d) ウインチ繰り出し開始。



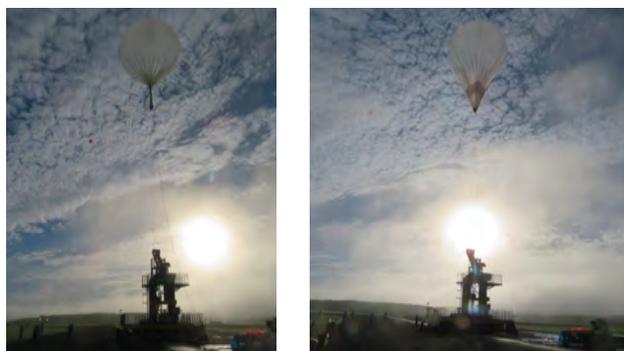
e) ウインチ繰り出し中。



f) さらに、ウインチ繰り出し。



g) ウインチ繰り出し完了、制御紐切り離し。



h) カラー開放前と後

図 12: NPB2-4 気球を用いた模擬放球試験。

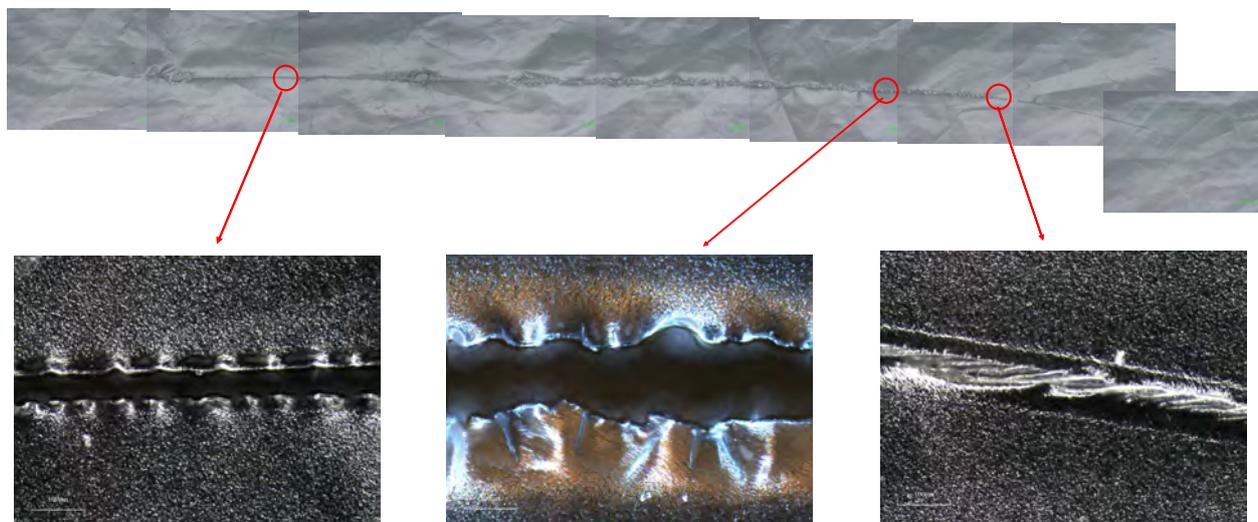


図 13: NPB2-4 気球皮膜から見出された傷。傷の全長は 3 cm 程度、下の拡大図は左下のスケールが  $100 \mu\text{m}$ 。

えた。ロードテープ一本にテトロンループテープを縫い付け、その穴に 300 ポンドの引張強度を有するケブラーロープを通した試料を用意し、ロードテープとケブラーロープの引張強度を評価したところ、750 N 以上の強度を有することが確認された。補遺 A に示すように、気球皮膜に鉛直方向にかかる張力に対して、カラーを下方向にずらす力は 7%、輪状に通した紐にかかる力は 8% が働く。したがって、このネクタイ紐は 11 トンの浮力がかかってはじめて、ずれたり、破断したりすると考えられ、得られた強度は 1 トンの浮力を想定したシステムとしては十分な強度である。

以後、この構造をネクタイと呼ぶことにする。なお、ロープの開放は、ロープカッターによって実施する。

### 3.4.2 頭部立て上げ試験

こういった方法で頭部立て上げを準静的に行えること、および、ずり落ちないカラーが実現できることを確認する試験を 2023 年 8 月 22 日に大樹航空宇宙実験場 JAXA 格納庫内で実施した。供試品に用いた NPB2-4a 気球は、2022 年 9 月 2 日に実施した模擬放球試験で利用した NPB2-4 気球から剥した網、極部金具を再利用したもので、気球頭部側 10 m の皮膜を新規に製作し、取り付けたものである。頭部から 5 m 地点、および、9 m 地点にネクタイを取り付け、5 m 地点のネクタイ紐には 300 ポンドのケブラーロープを、9 m 地点のネクタイ紐には 2500 ポンドのケブラーロープを用いた。前者は、従来のカラーと同様に、気球に充填したガスが拘束点よりも下に広がらないために利用し、後者は、気球をアンカーへと結束する目的で利用した。

1. 2 kg のゴム気球 (TA-2000) に 12 kg の浮力のヘリウムガスをつめ、気球頭部へと結索した (図 15a)。
2. 気球へとガスを注入し、頭部側から順に気球を立て上げた (図 15b~f)。
3. 頭部側 9 m のネクタイ取付部まで気球が立ち上がったところで、第一カラーを開放した (図 16a, b)。

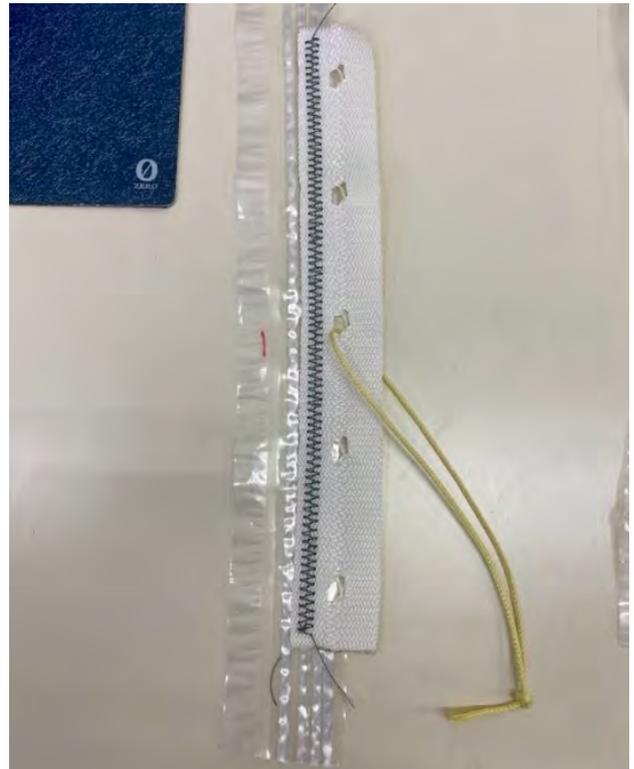
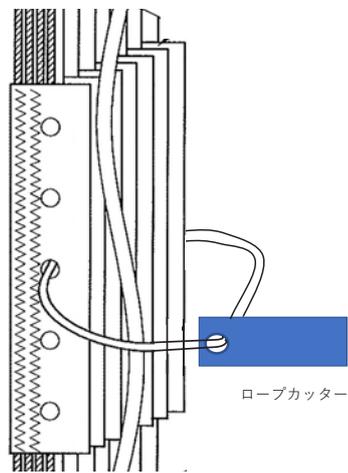


図 14: 左図：ネクタイ部の構造。予め穴ができるように編んだテフロン製ループテープを気球のロードテープに縫い付け、穴を通した紐でロードテープ同士を拘束する。右図：ネクタイ部のロードテープとテフロン製ループテープとの結合部の写真。テフロン製ループテープの穴をつらぬくようにロープを通し、ロードテープを拘束することでフィルムの広がりを防止する。開放時には、カッターを駆動する。

4. さらにガスを注入し (図 16c)、65 kg の浮力が注入された状態でガスづめを終了した (図 16d)。なお、カラー線の経験式から予想されるカラー位置 9 m のガス量は 71 kg である。
5. 排気弁を開いて気球を緩やかに降下させて回収した (図 16e、f)。
6. 気球皮膜の損傷を目視で確認した。

回収した気球を調査したところ、指で引っ張ったようなフィルムが伸ばされた傷、および、一か所の穴 (図 17、頭部から 1.5 m 地点、大きさ 1 cm 程度) は見出されたものの、スリット状の傷は存在しなかった。これらの傷は、放球、あるいは、回収後の気球の取扱い作業の過程で皮膜を手で引っ張ってしまったことによるものと考えられた。また、ネクタイと頭部からの距離が近い場所において、紐が擦ったことによるフィルムの損傷が存在しないことも確認された。、ゴム気球で頭部を吊り上げてからガスを注入し、ネクタイを用いてガスを頭部側に閉じ込め、ガス注入後、ウインチを用いて準静的に気球を立ち上げることで、皮膜の衝撃破壊は防止できることがわかった。

## 4 ウインチを用いた準静的放球法の特徴と発展の可能性

ここで開発された「ウインチを用いた準静的放球法」の手順をまとめると以下のようになる。

1. 気球製作時に、カラー取付部に「第二保持点」、頭部とカラー取付部の間に数か所の「ネクタイ」を設ける。
2. 放球にあたっては、気球尾部を荷姿に結索すると共に、第二保持点をウインチに巻き付けられた制御紐へと結索する。
3. ガス注入に先立って、気球頭部にゴム気球を取付け頭部の重量を保持する。
4. 気球にガスを注入し、ネクタイより上に十分なガスが注入された後に順次、ネクタイを開放する。
5. ガス注入完了後、気球頭部のゴム気球を切り離す。
6. ウインチで制御紐を巻き出し、気球を搭載装置の直上まで立て上げる。
7. 制御紐を第二保持点から切り離し、カラーを開放し、放球する。

この方法を、日本が活用しているセミダイナミック放球法と比較すると、以下の点に違いがある。

- 気球皮膜にかかる応力が小さい。
- 気球の全長を展開する必要がないため、狭い場所で放球できる。
- 気球への追加工が必要である。
- 気球立上げの初期に気球の浮力が小さいため、横風に弱い。
- ウインチで繰り出す分だけ数～10分程度、放球に時間がかかる。

飛翔機会を拡大するためには、横風への弱さは今後克服すべき重要な課題である。

ウインチを用いた準静的放球法は、以下の新規技術によって可能となった。

- ロードテープの上にもう一本、ロードテープを重ねて溶着し、その端部を束ねてリング状に加工し、気球の全浮力を支えられる「第二保持点」とすること。
- ロードテープにテトロンループテープを縫い付け、その穴に通したロープでロードテープを束ね、カラーと同様に気球の展開を防止する「ネクタイ」とすること。



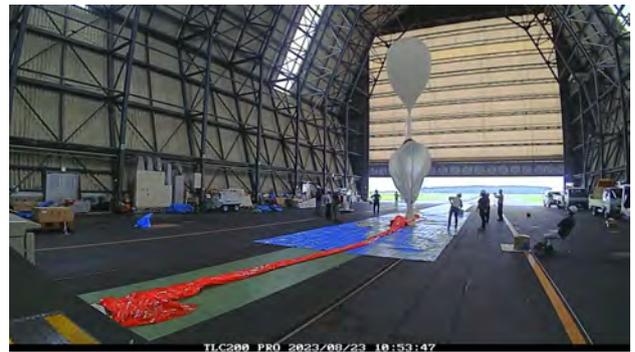
a) 気球頭部へのゴム気球のとりつけ。



b) ガス注入開始。



c) ガス注入に伴い、気球頭部が持ちあがる。



d) 気球頭部はさらに持ちあがる。



e) カラーによりガスが入る場所を制限した。



f) カラーより上には十分なガスが詰められる。

図 15: NPB2-4a 気球を用いた頭部立上げ試験 (その 1)。



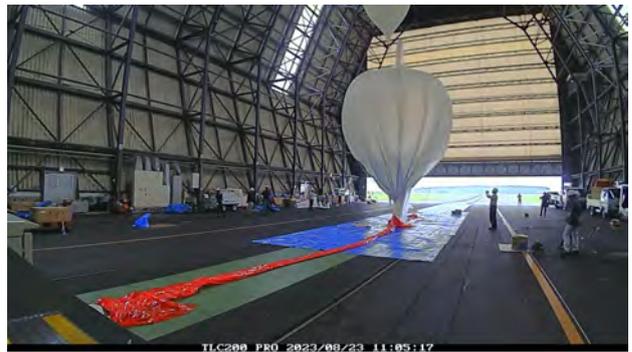
a) カラー開放準備。ロープカッターを引く。



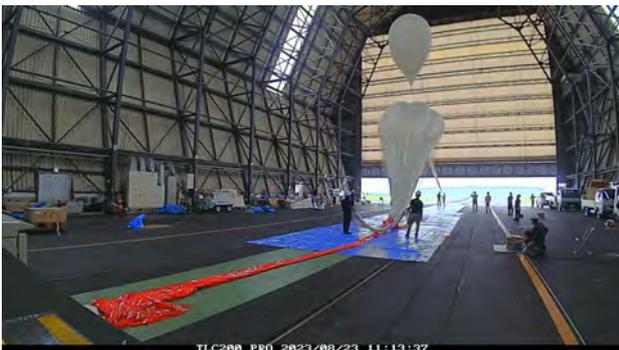
b) カラー開放直後。



c) さらにガス注入。



d) ガス注入完了。撤収開始。



e) 排気弁よりガスを放出し、気球を倒す。



f) 概ねガス抜き完了。

図 16: NPB2-4a 気球を用いた頭部立上げ試験 (その 2)。



図 17: 頭部から 1.5 m 地点の穴。

- ガス注入初期に頭部を保持するためにゴム気球での吊り上げを導入したこと。

この放球法は、皮膜に網をかぶせたスーパープレッシャー気球の放球方法として開発されたものだが、ゼロプレッシャー気球の放球法としても活用でき、これらの技術を応用することで、放球法の改良へとつなげることも可能である。たとえば、現状、ガス注入時はスプーラーで気球を保持しているが、第二保持点を設ければスプーラーなしでも放球は可能である。南極昭和基地での大型気球の放球など、スプーラーの搬入が困難となる際には、この技術が応用できる。

## 5 まとめと将来計画

2020年7月14日に実施した体積 $2,000\text{ m}^3$ のはっさく型気球 NPB2-3 の飛行性能試験 (B20-03 実験) において、スプーラー開放時に網が高速で皮膜を叩くことによって皮膜が衝撃破壊し、数 100 個におよぶスリット状の穴が発生することが判明した。この対策として、気球皮膜にかかる応力を低減させる方法として、気球のカラー部を保持し、ガスづめ後、気球尾部の第一保持点に加えて新たに追加した保持点 (第二保持点) にとりつけたロープをウインチで繰り出すことによって準静的に立ち上げる方法 (ウインチをもちいた準静的放球法) を開発した。第二保持点は、気球皮膜の溶着部にあるロードテープの上にロードテープを重ねて溶着し、そのロードテープを束ねたものである。この保持点の破断強度は $1,800\text{ kg}$ 以上であることが要素試験によって確認されている。2022年3月25日に模擬装置を用いて、 $700\text{ kg}$ の荷重を第二保持点で保持した後、気球尾部の第一保持点へと吊り点を移動させる実験 (模擬装置を用いた確認試験) を実施し、問題なく保持できることを確認した。2022年9月2日には、NPB2-3 と同型の気球に第二保持点を装備した NPB2-4 気球を用いて、気球にヘリウムガスを注入し、大型放球装置の上で立上げる、模擬放球試験 (NPB2-4 気球を用いた模擬放球試験) を実施した。その結果、スリット状の穴が2箇所まで減少し、この方法が有効であることが確認された。この二つの穴は頭部立て上げの衝撃に伴うものと考えられたため、完全に穴の発生を防ぐべく、ゴム気球で気球の頭部を吊り上げ、後にヘリウムガスを注入し、緩やかに気球を立て上げる方法を考案した。2023年8月22日に、NPB2-4 気球の頭部側 10 m に皮膜をつけた供試品 (NPB2-4a 気球) を用いてこの方法での試験 (NPB2-4a 気球を用いた頭部立て上げ試験) を実施し、スリット状の穴の発生が完全に防げることを確認した。これにより、

皮膜に網をかぶせた気球の放球方法として、ゴム気球で気球頭部を吊り上げた後にヘリウムガスをつめ、第二保持点にとりつけたロープをウインチで繰り出すことによって、衝撃破壊を起こすことなく、放球する目途がついた。開発された「ウインチを用いた準静的放球法」は、従来の方法と比較して、気球皮膜にかかる応力が小さくなること、狭い場所でも放球できることがメリットであるが、反面、気球への追加工が必要となること、横風に弱いこと、放球に必要な時間が数~10分程度増えることがデメリットであり、横風への弱さが課題として残されている。

今後、2024年には、NPB2-4と同型の気球による耐圧性能試験を日本で実施し、この放球方法の有効性の最終確認を実施する計画である。さらなる大型化には気密性能を確保する方法を確立すること [16]、座屈変形による耐圧性能への影響の評価する方法を確立すること [17]、が重要である。今後、こういった手法の確立を進めると共に、開発された気球の地上試験、および、海外での実験も視野にいった飛翔性能試験を実施し、性能が確認された気球により科学実験を実施しつつ気球の改良を進め、さらなる大型気球の開発を進める予定である。

## 謝辞

本実験の実施、機材の準備にあたっては、大気球実験グループの支援を受けた他、早稲田大学の石村康生さん、ISAS/JAXAの福家英之さん、有限会社コスモスハートのみなさま、藤倉航装株式会社の柏木颯人さん、丸由工材株式会社の津久井悟志さんに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開発研究、科学研究費補助金(課題番号17H01352)を受けて推進しています。

## 参考文献

- [1] 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 大気球研究報告 JAXA-RR-010-03, pp.21-40, 2011
- [2] 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
- [3] 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 NPB2-3 の飛翔性能試験(B20-03 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-21-003, pp.1-34, 2022
- [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 NPB2-3 の飛翔試験(B20-03) 結果と地上放球試験の提案”  
2020年度大気球シンポジウム集録、isas20-sbs-024、2020
- [5] Ikeda, Y. *et al.* “Evaluation of damage mechanism of polymer film used in super-pressure balloon during release process”  
Procs of JSMA ICM&P, We-1B-2, 2022
- [6] 福家 英之、他、“大樹航空宇宙実験場における新しい大気球実験場”  
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-08-001, pp.1-34, 2009
- [7] “NASA’s Super Pressure Balloon Takes Flight From New Zealand”  
<https://www.nasa.gov/feature/wallops/2017/nasas-super-pressure-balloon-takes-flight-from-new-zealand> (2023年11月5日アクセス)
- [8] “Second CNES Balloon Launched Successfully In Australia”  
<https://stratocat.com.ar/news20170410-e.htm> (2023年11月5日アクセス)

- [9] 秋山 弘光、他 “立て上げ放球法”  
宇宙科学研究所報告 特集:大気球研究報告 第4号, 1982
- [10] Akiyama, H. *et al.* “A new static-launch method for plastic balloons”  
Adv. Space Res., 6,3, pp.97-100, 1983
- [11] Nishimura, J., *et al.* “The Improvement of the Static Lanuch Method in Japan”  
Adv. Space Res, 13, 2, pp.63–66, 1993
- [12] 並木 道義、他 “大型放球装置を使用した大気球の放球”  
宇宙科学研究所報告 特集:大気球研究報告 41, pp.25-34, 2001
- [13] Yamagami, T., *et al.* “Launching of a 500,000 cubic meter balloon with the semi-dynamic launching method”  
Adv. Space Res., 11, 37. pp.2033-2037, 2–6
- [14] Fuke, H., *et al.* “Balloon Launch and Flight Operation from Research Vessel *Hakuho Maru* for Stratospheric Air Sampling over the Eastern Pacific Eauator”  
Journal of Astmospheric and Oceanic Technology, 7, 31, pp.1540-1548, 2014
- [15] “力学的特性” EPS 断熱建材総合サイト  
[https://www.jepsa.jp/jepsa\\_eps/tokusei/tokusei-rikigaku.html](https://www.jepsa.jp/jepsa_eps/tokusei/tokusei-rikigaku.html) (2023年11月5日アクセス)
- [16] 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
- [17] Nakashino, K. *et al.* “Super Pressure Balloon with Diamond-Shaped Net: A Numerical Study of its Structural Characteristics”,  
Proc. of 4th AIAA Spacecraft Structures Conference, AIAA 2017-1117, 2017

## A カラーにかかる力

カラーにかかる力を求めるモデルとして、図18の状態を想定する。すなわち、二本の鉛直方向に位置し、互いに平行なロープがリングに通され、リングを通過した後に開き角 $\theta$ をとって張力 $T$ で引っ張られている状態を考える。

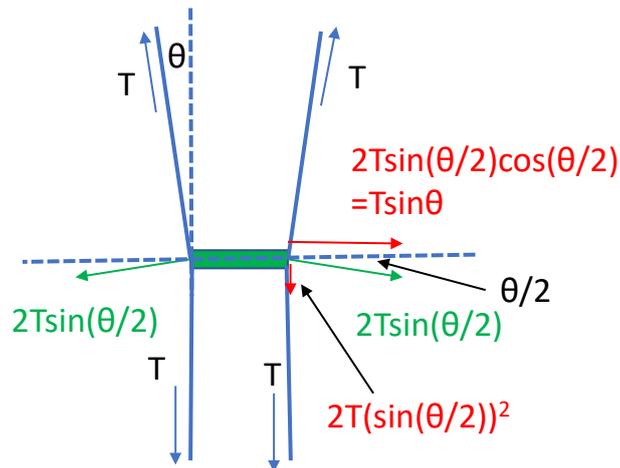


図 18: カラーにかかる力の計算モデル。

この際、リングを広げる力が働き、その大きさは $2T \sin(\theta/2)$ であり、その方向は水平より $\theta/2$ 傾いている。このため、このロープはリングを $T \sin(\theta)$ の力で広げる方向で広げ、下方方向に $2T \sin^2(\theta/2)$ の力で押し下げている。したがって、カラーは、 $T \sin(\theta)$ の力で押し広げられ、 $2T \sin^2(\theta/2)$ の下方方向の力を受けている。

$\theta=30$ 度の場合には、カラーを押し広げる力は、浮力 $2T$ の25%、カラーを下方方向にずらす力は7%に相当することとなる。3次的に考えると、リングを押し広げようとする力は、フープ力であり、上のモデルでは2本の線で模擬しているが実際には円環にわたって一様にリングを押し広げる力が存在していると考え、リングの断面には、 $\frac{T}{\pi} \sin(\theta)$ の力がかかることとなり、これは浮力 $2T$ の8%に相当する。

<sup>2</sup>ロープが2本あるために倍