



ISSN 2433-2216(Online)
JAXA-RR-17-007

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

大気球研究報告

2018年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

序文	田村忠久
皮膜に網をかぶせた長時間飛行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 — ...	1
	斎藤芳隆、後藤健、中篠恭一、秋田大輔、松尾卓摩 松嶋清穂、橋本紘幸、田中茂樹、島津繁之
B16-02 大気球実験報告：成層圏における微生物捕獲実験 Biopause	15
	大野宗祐、石橋高、三宅範宗、河口優子、梯友哉 奥平修、山田学、山田和彦、高橋裕介、原田大樹 山岸明彦、瀬川高弘、野中聡、石川裕子、所源亮 山内一也、小林正規、福家英之、吉田哲也、松井孝典

序 文

大気球実験は、着実に成果を出しながらも改良を繰り返すことで進化しつつ実績を積み重ねることが重要な研究にとって貴重な手段である。これまで、工学の実証試験、成層圏環境でのサンプル採集や計測、宇宙線や天文の観測実験といった多岐にわたる研究領域に飛翔機会を提供している。

2017年度には、「成層圏における微生物捕獲実験」と「新型ロードテープ気球飛翔試験」が実施された。前者については、予定通りパラシュート降下による試料採集が行われた。惜しくも海上着水時に採集装置に海水が浸水して試料分析には至らなかったため、その原因究明と今後の改善が望まれる。後者については、新規開発の国産ロードテープの飛翔性能を確認する所期の目的を達成している。また、ピギーバック実験として「ピギーバック分散配置 9 軸姿勢ロガー群による飛翔中の気球各部の挙動測定《ピギー》」も行われた。その他、「気球 VLBI 実験」は放球準備まで進んだが地上風不適合のために放球を中止し、「皮膚に網をかぶせたスーパープレッシャー気球の性能評価」は気球飛翔に適さない高層風の状態により実施が見送られた。この 2 実験については、残念ながら今回は気象条件に左右されることとなったが、次の機会を目指して万全の準備を整えてほしいと願う。

オーストラリアでの海外気球実験については、「気球による MeV ガンマ線天体国際共同観測 (SMILE-II+)」、「FITE: 気球搭載遠赤外線干渉計による晩期型星の高解像撮像」、「エマルジョンガンマ線望遠鏡による宇宙ガンマ線の観測計画(GRAINE 計画)」の 3 実験が 2018 年の 2 月から 5 月の実験実施に向けて準備を進めている。

今後の実験計画としては、さらなる改良や新たなチャレンジに向けた提案の他、将来の火星探査のための実証試験などで工学の需要も増している。海外機関での気球実験の実現に向けた計画としては、GAPS や Sunrise-3 が進行中である。科学観測に関しては、軸足が海外実験に移っており、気球観測で科学成果を挙げることを目指す実験だけでなく、将来の宇宙実験を見据えているような計画では、実証実験でさえも海外での実施が必要なものもある。このような状況や長期間観測のニーズなどに応えるべく気球グループでも気球技術の開発が行われており、その進展にも大きな期待が寄せられている。今後、気球実験が目指すべき方向性についても、しっかりとした議論が必要となっているように思われる。

大気球専門委員会
委員長 田村 忠久

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 —

斎藤芳隆^{*1}, 後藤健^{*1}, 中篠恭一^{*2}, 秋田大輔^{*3}, 松尾卓摩^{*4},
松嶋清穂^{*5}, 橋本紘幸^{*5}, 田中茂樹^{*5}, 島津繁之^{*6}

Development of a super-pressure balloon with a net for long duration flight — Development of a new method to attach the net with the balloon film —

By

Yoshitaka SAITO^{*1}, Ken GOTO^{*1}, Kyoichi NAKASHINO^{*2}, Daisuke AKITA^{*3}, Takuma MATSUO^{*4},
Kiyoho MATSUSHIMA^{*5}, Hiroyuki HASHIMOTO^{*5}, Shigeki TANAKA^{*5}, and Shigeyuki SHIMADU^{*6}

ABSTRACT

We have been engaged in the development of a light super-pressure balloon for long duration flight using a method covering the balloon with diamond-shaped nets of high-tensile fibers. A 2,000 m³ balloon developed in 2016 burst from a deformed film, where the net was tied, with a differential pressure of 1,040 Pa, which is twice as large as required differential pressure. To avoid the deformation of a film, a simple sewing method to increase the number of the tied points without increasing the production man-hours was investigated to find a new sewing method, a two-line strait stitch. The stitch also has a merit to avoid a risk to damage the net with a sewing needle, comparing with the conventional double zigzag stitch. The sewing method was first adopted to a 10 m³ balloon, whose net was sewed with its film at all cross-points along the heat seal lines of films, to confirm its burst pressure higher than 10,000 Pa through a ground inflation test. Then, the sewing method was adopted to a 2,000 m³ balloon to confirm its burst pressure of 1,020 Pa, which is comparable to the previous burst test of the 2,000 m³ balloon. In future, we are going to develop a 7,000 m³ balloon using the sewing method for flight test to demonstrate its capability for long duration flight.

Keywords: Scientific Balloon, Super-pressure Balloon, Membrane Structure

概要

我々は気球に高張力繊維の菱形の目の網をかぶせる手法をもちいて長時間飛翔が可能な軽いスーパープレッシャー気球の開発を進めている。2016年に開発した体積2,000 m³のNPB2-1気球は、地上試験により、1,040 Paの耐圧性能（要求耐圧性能の倍）が確認されているが、網の固定点が引っ張られたことによって変形した皮膜から破壊したことが判明している。そこで、生産工数を増やすことなく固定点を増やせる縫い付け方法を検討し、二列直線縫いが適当であることを見出した。この方法は、従来のダブルジグザクステッチと比較すると、網を縫い針で傷付ける危険が小さいこともメリットである。まず、体積10 m³の気球にこの方法を適用し、皮膜の溶着線上のすべての網の交点を固定したところ、10,000 Pa以上の耐圧性能を示すことが地上膨張試験によって確認された。次に、体積2,000 m³の気球を製作し、1,020 Paと先に試験した体積2,000 m³の気球と同様の耐圧性能を示すことが確認された。今後、この固定方法を用いて、体積7,000 m³の気球を製作し、飛翔試験を通じて、長時間飛翔が可能であることを実証する試験を実施する予定である。

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

doi: 10.20637/JAXA-RR-17-007/0001

* 平成29年11月21日受付 (Received November 21, 2017)

^{*1} 宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency)

^{*2} 東海大学 (Tokai University)

^{*3} 東京工業大学 (Tokyo Institute of Technology)

^{*4} 明治大学 (Meiji University)

^{*5} 藤倉航装株式会社 (The Fujikura Parachute CO., Ltd)

^{*6} ナカダ産業株式会社 (Nakada Industrial CO., Ltd)

1. はじめに

科学実験用大気球では気球内部のガス圧力を周辺大気圧と等圧に保つゼロプレッシャー気球の利用が盛んである。近年は、それに加えて、体積を一定に保ったスーパープレッシャー気球の利用も広がっている。これは、スーパープレッシャー気球が、昼夜の浮力変化が小さく、長時間にわたる飛翔が可能な気球だからである。中でも NASA は、Lobed-pumpkin 型の気球を開発し、2015 年から 2017 年にかけてニュージーランドの気球基地から等緯度に地球を周回させる体積 53 万 m^3 のスーパープレッシャー気球による 3 回の実験を実施している [1]。最高高度 34 km の飛翔を 2016 年には 46 日間、2017 年には 12 日間成功しているが、飛翔高度、および、飛翔時間の点に課題が残っている。ゼロプレッシャー気球にくらべ、気球重量が大きいことが、34 km に到達高度が滞っている原因であり、より高い高度が必要となる X 線観測、宇宙線観測のミッションには利用しにくい状況である [2]。また、スーパープレッシャー気球では気球内部のガス圧力を常に周辺大気圧よりも高く保つ必要があるが、ガス漏れによりそれが達成できなくなることが飛翔時間を制限する要因となっている。

我々は、皮膜に網をかぶせるという新しい構造の気球を提案し、その開発を行っている [3]。Lobed-pumpkin 型は、両極間に高張力繊維からなるロープを張り、そのロープ間に Lobe 状にフィルムを張り出させることでフィルムの局所曲率半径を小さくし、加圧時のフィルムへの要求応力を小さくしている。これに対し、網をかぶせる気球は、両極間に高張力繊維からなる網を張り、その目の間にフィルムを張り出させることで、局所曲率半径を小さくしている。局所曲率半径の大きさは、前者がロープ間隔で決まるのに対し、後者は網目の大きさで決まる。後者の方が容易に局所曲率を小さくできるため、薄く軽いフィルムで同じ耐圧性能を持たせやすく、結果として軽い気球を製作できる。

我々は、この手法を用いて我が国でも要望の高い気球による長時間飛翔ミッションを自らが開発したスーパープレッシャー気球で実現させるべく、この型の気球の開発を進めており、搭載重量 1 トン、飛翔高度 37 km を体積 30 万 m^3 のスーパープレッシャー気球で実現することを目標としている。2010 年より開発を開始し、2016 年には、体積 2,000 m^3 、重量 53 kg の NPB2-1 気球の破壊圧が 1,040 Pa であることを検証するに至っている (図 1 は 1,000 Pa 印加時)[4]。この破壊圧は、40 kg のペイロードを搭載し、高度 22 km を飛翔する際の要求値の倍であり、スーパープレッシャー気球として要求される体積/重量比を確保した我が国ではじめての気球となった。また、我々が最終目標としている体積 30 万 m^3 の気球の要求仕様と比較すると、網線の安全率 2.1 倍、フィルムの安全率 10 倍が達成されており、その観点でも、十分に要求値を達成している。

この気球の破壊は、肩のあたりの溶着線に近いフィルムからの破損であった (図 2)。網とフィルムを固定している溶着線が蛇行していることから、まず、網が偏った状態で展開し、その後、加圧に伴って網がフィルムを引っ張り、フィルムが大きく変形したことが破壊に至った原因と考えられる。この破壊モードは、網線の破断や、赤道部の網目間隔が広がったところのフィルムの破損といった、想定していた破壊モードとは異っており、網の偏りという想定していない事象が大型化に伴って耐圧性能に与える影響が不明である。また、網の偏りを含む数値シミュレーションを実施するには、網とフィルムの接触判定が必要となるが、判定すべき要素数が膨大となるため、現実的な計算時間で網の偏りの影響を評価することは極めて困難である。したがって、偏りが小さくなる製作方法を開発し、その手法により耐圧性能が改善するか、あるいは、少なくとも悪化しないことを確認した上で大型化を進める必要がある。

網の偏りの問題は、網がフィルムを引っ張る箇所を増やすべく、網とフィルムとの固定間隔を増やすことで改善が見込まれる。一方、この固定数を現在と同じ方法で増やすと、気球の製作工程数が増えてしまうため、より簡単な方法を開発する必要がある。

本報告では、この新しい固定方法の開発について報告する。2 章において、新しい固定方法の検討と

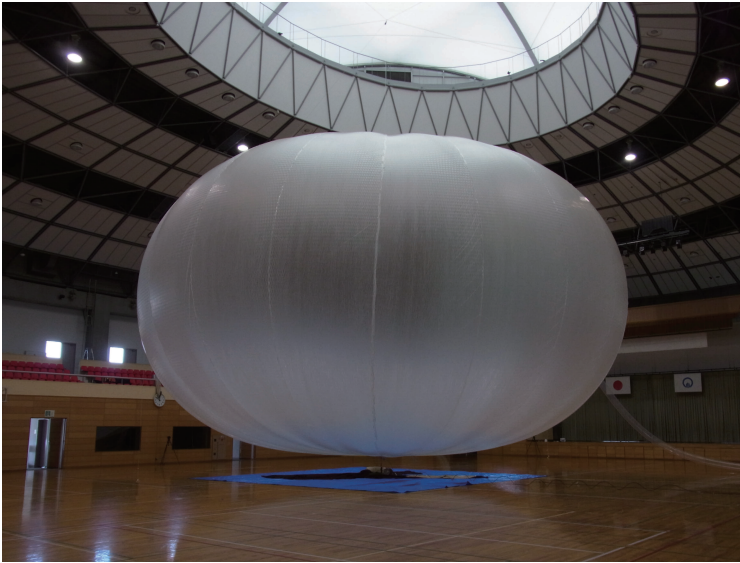


図 1 1000 Pa 印加時の NPB2-1 気球

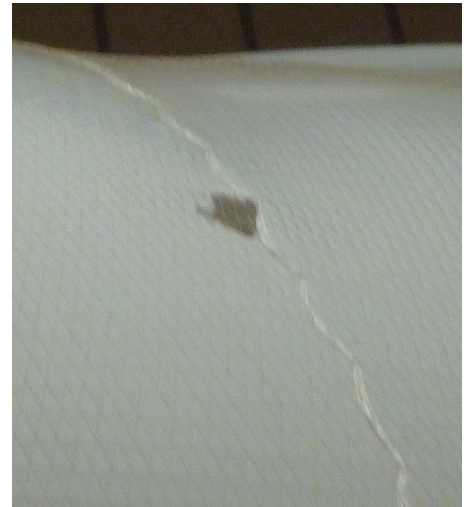


図 2 NPB2-1 気球の破壊箇所

要素試験を説明した後、3章において、それを適用した体積 10 m^3 の気球による試験、4章において、体積 $2,000 \text{ m}^3$ の新規気球による試験の結果を順に報告する。5章で全体をまとめ、将来計画を述べる。

2. 新しい網の固定方法の検討

フィルムの変形を防ぐためには、網とフィルムとの固定間隔を狭める必要がある。本気球で用いている網は、1670 dTex のベクトラン糸で編んだ 100 mm 目の無結節網であり、気球皮膜には $10 \mu\text{m}$ 厚のポリエチレンフィルムを利用している。フィルム同士は、ロードテープ、および、溶着保護テープと共にフィンシールで熱溶着されている。NPB2-1 気球では、その耳に、網の目一つ目おきに、ダブル千鳥のジグザグステッチで縫い付けて固定していた。単純には、すべての目で固定すれば、倍のピッチで固定できるが、気球制作工数に対する網をフィルムに固定する工数の割合が大きく、コストへの影響は深刻である。そこで、新しい網の固定方法を検討することとした。

網の固定にあたって必要な仕様は以下のとおりである。

- 固定部に結び目などの突起物がなく、気球放球時にスプーラーに気球がかけられた際に、皮膜に損傷を与えないこと。
- ロードテープ内の繊維と固定し、網が引っ張られた際に、固定糸でなく、繊維の方が破断する固定強度を有すること。
- 網の固定作業の工数が現状よりも増えないこと。
- 固定に伴って、網の強度を劣化させないこと。

検討を重ねるうち、二列ミシンを利用するのが有望であることに気付いた。従来は、通常用いられる一列ミシンを利用することのみを検討しており、その中では、しっかりと縫い合わせることに利用されるダブル千鳥のジグザグステッチを採用した。二列ミシンでは、二本の針で同時に縫うため、従来は交点そのものを固定する必要があったのに対し、網の交点を跨いだ両側で固定できるのがメリットである。

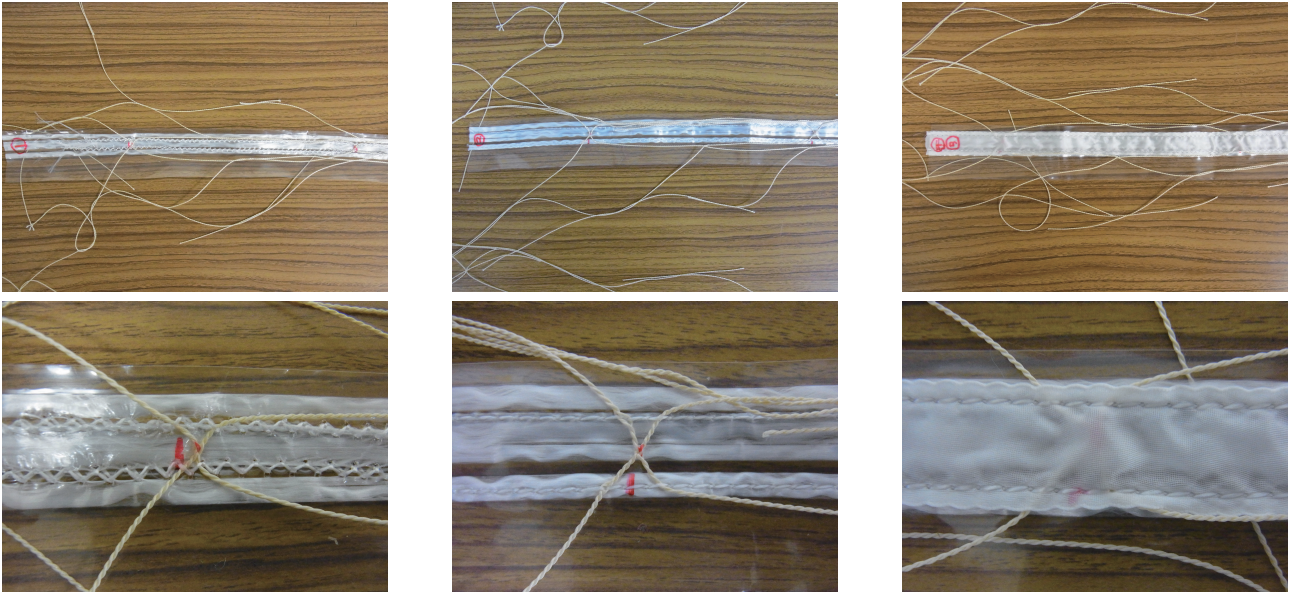


図3 網とフィルムの固定サンプル。いずれも二列ミシンを用いたもので、左列が千鳥縫い (A)、中央が直線縫い (B)、右列が間にナイロンテープ入りの直線縫い (C) である。

A:千鳥縫い、B:直線縫い、C:間にナイロンテープ入り、3つの方法で試作をしたのが図3である。いずれも、ロードテープの繊維に対して、繊維よりも強度の大きい糸で縫い付けられおり、強度の条件も満している。5箇所の加工の時間を比較したところ、Aが9分13秒、Bが4分33秒、Cが5分8秒であった。AにくらべBの作業時間が短くなるのは、ステッチが単純であるため単位長さを縫う時間が短いことに起因している。また、ナイロンテープを入れたのは、ナイロンテープの弾力により、網の左右ずれを防止しようとしたためだったが、この効果はあまり見られなかった。そこで、作業時間に優れるBを採用することとした。

当初、二箇所固定する目的で、二列ミシンで縫う方法を試したのだが、試作品を見て、交点の位置を限定できることに気付いた。従来の千鳥縫いは、網が子午線方向に引っ張られると交点が移動する嫌いがあった。また、ミシンの針が網線を貫かないように制御することも容易である。実際に、網線に対して縫い目の位置を制御することが可能か調べたのが、図4の試作品である。図4左のように、1目に網線1本が通るように縫うことによって、交点の位置を周囲の縫い目の内側に限定することができる。この縫い方では、網の目が縦に細長くなった場合、ロードテープに縦方向に皺が入ることになるが、実害はないと考えられる。しかし、膜面の全体形状など、この変更に伴う影響は必ずしも明らかではないため、実際の気球を製作し、膨張試験を通じて挙動を確認することとした。

3. 体積 10 m^3 気球による網の固定方法の確認

3.1 NPB001-6C 気球

NPB001-6 気球は、2015年11月に膨張破壊試験を実施した気球であり、その際には $10,020 \text{ Pa}$ の耐圧性能を発揮している [4]。所期の耐圧性能は $12,000 \text{ Pa}$ であり、破壊点も所期の赤道部でなく、尾部に近いロードテープ付近のフィルム、および、網であった。NPB2-1ほど顕著ではないが、網の偏りの影響による耐圧性能の劣化があった可能性もある。この気球から網を剥し、皮膜部分の補修した後、網を二列直

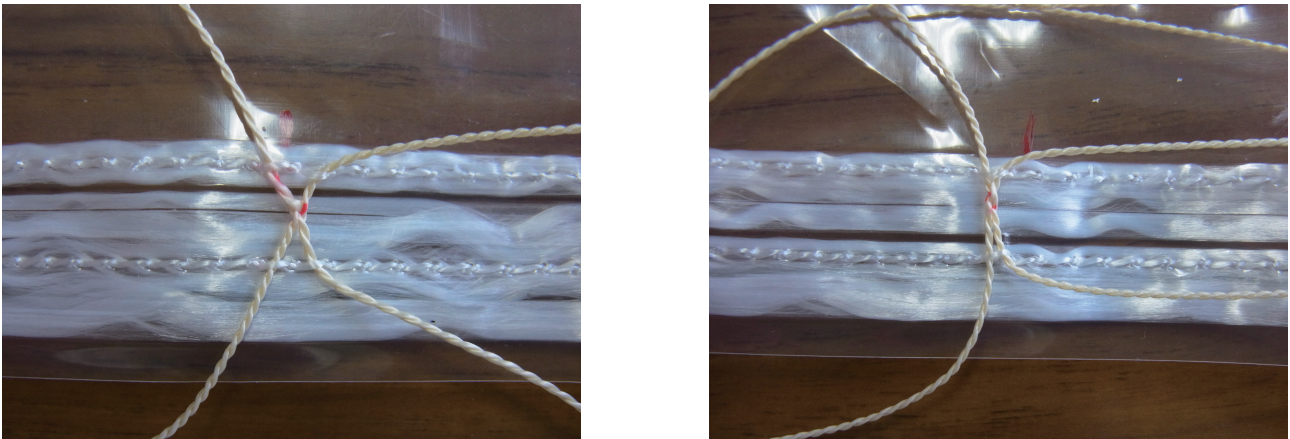


図 4 網とフィルムの二列直線縫い固定サンプル。左が一目に網線が一本ずつ入っているの対し、右は一目に網線が二本入っている。左の固定方法の場合、網の位置は交点周囲の4つの縫い目の内側に限定される。

線縫いで固定しなおし、耐圧性能を確認する試験を実施することとした。以後、この気球を NPB001-6C と称する。この気球はフィルムへの応力を下げるため、皮膜の子午線方向の長さが網線長よりも 3 % 長くとしている。気球が耐えたならば、網をかぶせた状態での気密試験を実施することを考え、10,000 Pa までの加圧にとどめ、破壊強度の測定は見合せた。

3.2 耐圧試験

耐圧試験は 2016 年 12 月 15 日に藤倉航装船引工場風洞実験室にて実施した。気球の膨張の様子を水平 1 方向、および、上からの合計 2 方向からビデオカメラで撮影した。気球の内圧を気球尾部に取り付けた圧力ポートと差圧計をつないで計測した。差圧計は 2 kPa、あるいは 20 kPa レンジのものを用品、その電圧値を 0.5 秒ごとにデータロガーで記録した。

気球へのガス注入は頭部から行い、差圧の計測は気球下部の圧力計測ポートを用いて行った。気球を天井から吊り下げ、空気で膨張させた。気球は順調に展開した。200、400、600、800、1000 Pa において、巻尺を用いて周長と子午線長を計測した。結果を表 1 に示す。その後、5,000 Pa まで加圧し、その状態でガス注入口を閉じた。この時点でガス漏れ音に気づき、調査したところ、頭部側のクラウンカバーをロードテープに糸で固定している辺りでガス漏れが発生していることがわかった。低温テープを貼り付ける応急処置を行い、加圧を可能にした。

1 時間後、加圧を再開し、10,000 Pa に達したところで、そのまま 1 時間放置した (図 5)。加圧の過程では、破裂音が何回も鳴った。後に気球を点検したところ、網線が破断している箇所があり、網の破断音であった可能性がある。また、赤道部のフィルムには、不可逆なフィルムの伸びが見られ、破壊限界は近いと見られた。1 時間後、差圧は 5,000 Pa 程度まで下っていたが、気球は加圧状態を保っており、破壊が進行することはなかった。気球頭部側のガス注入口を切開し、そこからガスを抜いて撤収した。

表 1 赤道長と子午線長

差圧 [Pa]	赤道長 [mm]	子午線長 [mm]
200	9321	3962
400	9377	3964
600	9412	3968
800	9438	3972
1000	9462	3975

3.3 結果の評価

差圧の時間変化を図6に示す。周長と子午線長の圧力による変化を図7、8に示す。比較した気球の直径は同じだが、フィルムの厚さや、網の長さが異っている。気球NPB001-2C気球はフィルム長よりも網線長が2.7%長い気球、NPB001-4気球はフィルム長と網線長を揃えた気球である。NPB001-6、NPB001-6Cはフィルム長が網線長よりも3%長い。

NPB001-6Cの値は、NPB001-6の計測値と異っていて、周長は0.4%、子午線長は1.8%長い。NPB001-6Cは10,000 Paまで加圧した気球であり、加圧時に網に不可逆な伸びが発生したことを反映しているものと考えられる。使用している網は90 Nの力が加わった場合、1%の不可逆な伸びが発生することが知られている[5]。10,000 Paの差圧がかかることによって179 Nの力がかかることになるため、1.8%の伸びは考えられる伸びである。しかし、周長の違いはこれよりも小さく、相似な形状で大きくなったわけではない。NPB001-6C気球では、フィルムに子午線方向に余裕があり、1,000 Paの差圧が印加された時点では横皺が入った状態である。すなわち、周方向のフィルムには余裕がなく、フィルムが伸ばされている一方で、子午線方向には余裕がある状態となる。周方向の差が小さいのは、圧力が小さい状態で周長を決めているのはフィルムであり、フィルムが不可逆な変化を受けていないことを反映しているため、と考えられる。

以上により、網の固定方法を変更したことに伴う気球展開の異常はなく、10,000 Paの耐圧性能が確認された。2,000 m³の気球をこの方法で製作し、耐圧性能への影響を評価することとした。

4. 体積 2,000 m³ 気球による網の固定方法の確認

4.1 気球の諸元

NPB001-6C気球で新しい網の固定方法に問題ないことが確認されたことを踏まえ、より大きな気球での影響を評価するため、体積2,000 m³の気球NPB2-2を製作し、地上膨張、破壊試験を実施した。これまでに、地上試験、あるいは、飛翔試験によって耐圧性能を評価した気球の諸元を表2に示す。体積2,000 m³の気球は、試験した中で3番目に体積が大きい気球であり、網線にかかる張力も最大級の気球である。それぞれの気球の試験については、参考文献[4]を参照されたい。2016年に試験したNPB2-1気球との違いは以下の通りである。

- フィルムと網との固定は、二列直線縫いを用い、すべての網の交点固定されている。NPB2-1気球においては、ダブル千鳥縫いで、交点1つおきで固定されていた。

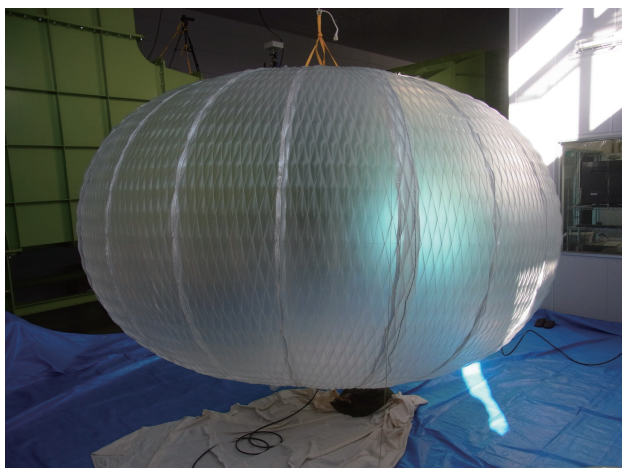


図5 NPB001-6C 気球、10,000 Pa 印加時

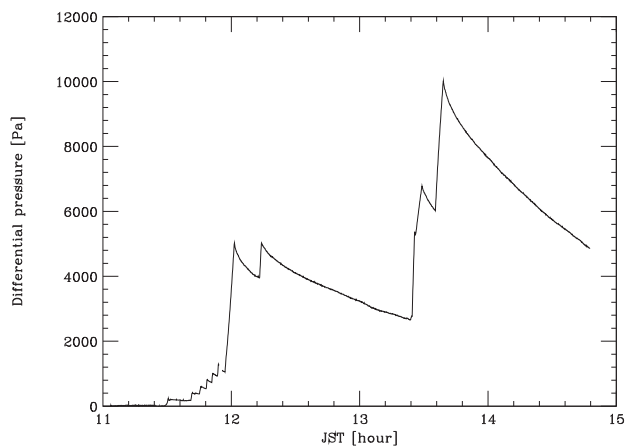


図6 差圧の時間変化

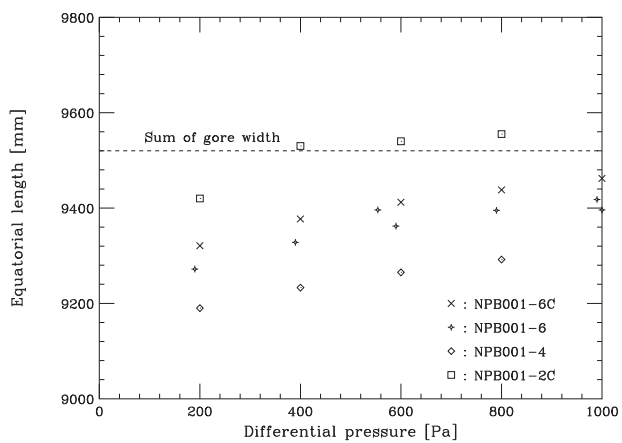


図7 周長と差圧の関係

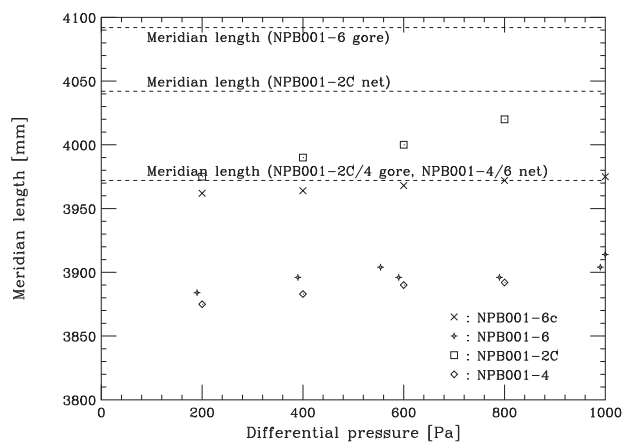


図8 子午線長と差圧の関係

- 搭載機器の吊り下げ金具 [5] とは別に網端部を取り付ける金属リングを配置した (図 9)。吊り下げ金具には、中心と円周部分とを結ぶ3つのスポークがある。そのスポークがある部分に網端部が取り付けられず、網を円周方向に均等に配置することが困難であったが、新規に網取付リングを導入することで問題が解消された。このリングと吊り下げ金具とは、網が通過できる隙間を確保しながら、多数のボルトで結合されている。

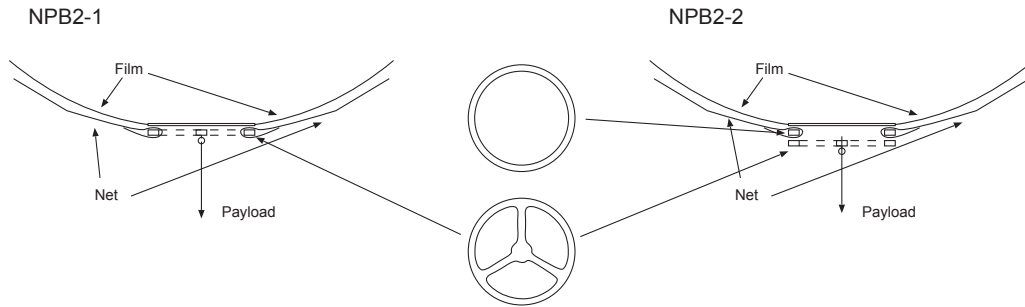


図 9 気球尾部の吊り下げ部の構造の改良

4.2 NPB2-2 気球の地上膨張試験

耐圧試験は 2017 年 6 月 2、3 日に田村市総合体育館メインアリーナにて実施した。NPB2-1 気球で利用した小野町市民体育館と比較すると天井が低く (12.5 m)、展開時の高さ 10.8 m よりは高いが、気球の全長 23.6 m と比較すると非常に短く、完全に吊り下げた状態で展開開始できないのが難点である。

天井のキャットウォーク脇を吊り下げ点とし、天井を支えるトラス構造のパイプから滑車を吊り下げた (図 10)。この滑車にウインチ (2 階の観客席に設置) につながったロープを通し、そのロープで気球を吊り下げた。床はビニールシートで養生した。気球尾部の圧力計測ポートにチューブを継ぎ、600 Pa、2,000 Pa、3,000 Pa の三つの差圧計 (Setra239) で差圧を計測し、大気圧 (Setra 270) と共にデータロガーで 1 秒ごとに記録した。加えて、温度、湿度、および大気圧を別のロガー (おんどとり TR-73U) で 10 秒ごとに記録した。ビデオカメラは水平 3 方向、および、天井からの見下ろし、の合計 4 方向からの撮影を行った。データロガーの設定を表 3 にまとめた。

気球頭部弁座の M8 のアイナット 4 つにロープを通し、気球を吊り下げ、弁座が水平になるように調整した。ガス注入チューブと弁座の縁との干渉は段ボールで保護した。まず、ガスボンベからヘリウムガスを注入した。ボンベ 3 本分のヘリウムガスを注入した後、ブロウワ (Ryobi 製ブロウバキューム RESV-1500、出力 1100 W) を用いて、空気を注入した。

天井が低く、気球全体を吊り下げることができなかったが、気球の尾部を絞りながら、順次膨張させることで展開させた。気球は正常に展開し、200 Pa (図 11)、400 Pa において、子午線長、および、赤道上的方位角が 90 度づつ離れた 4 点からたらしめたロープの足の間の距離を測定した。400 Pa の計測後、ガス注入口を閉じ、1 時間弱そのまま放置し十分な耐圧性能を有することを確認した。320 Pa まで減圧していたため、再度 400 Pa まで加圧し、一晚、その状態とした。気球の溶着線の偏りは図 12 のように発生していたが、すべての交点を固定した効果により網目一つ分のずれに滞っており、網目二つ分のずれが発生していた図 2 よりも低減されたことが確認された。

表 2 耐圧試験を実施した網をかぶせた気球の諸元

気球番号	NPB5-1	NPB3-1	NPB2-1	NPB2-2	NPB1-1	NPB01-2	NPB001-5
公称容積 (m ³)	5,000	3,000	2,000	2,000	593	106	9.5
直径 (m)	24.4	20.6	18.0	18.0	12.0	6.76	3.03
全長 (m)	32.0	27.0	23.6	23.6	15.7	8.9	3.97
高さ (m)	14.6	12.3	10.8	10.8	7.2	4.1	1.80
ゴア数	32	30	20	20	16	12	20
最大ゴア幅 (mm)	2394	2156	2360	2360	2354	1768	516
フィルム厚 (μm)	10	10	10	10	10	10	10
網線強度 (N)	360	415	415	415	415	415	415
縦ロープ数	3216	3015	2412	2412	1608	603	402
網交点間隔 (mm)	100	101	102	102	101	101	101
赤道ロープ間隔 (mm)	48	43	47	47	47	71	48
弁座直径 (mm)	700/530	530	700/530	700/530	530	530	300
耐圧予想値 (Pa)	2,500	3,600	3,900	3,900	5,100	3,400	6,000
実測耐圧値 (Pa)	425/348	>814	1,040	1,020	>800	1,800	>6,800
破壊時網線張力 (N)	62/51	>90	110	108	>56	107	>120
試験環境	地上	上空	地上	地上	地上	地上	上空
気球重量 (kg)	86	66	54	54	16	19	3

表 3 データロガー計測項目

ch	項目	センサー	レンジ
1	差圧	Setra 239 (3,000 Pa レンジ) S/N 708750	0-10 V
2	差圧	Setra 239 (2,000 Pa レンジ) S/N 5009776	0-10 V
3	差圧	Setra 239 (600 Pa レンジ) S/N 6202439	0-10 V
4	気圧	Setra 270	0-10 V

翌朝、差圧は 80 Pa まで低下していたが、気球は健全な状態のままであった。400 Pa、600 Pa、800 Pa と順次加圧し、子午線長、および、赤道上的方位角が 90 度づつ離れた 4 点からたらしめたロープの足の間の距離を測定した。子午線長、および、マーキング間距離計測結果を表 4 に示した。その後、1,000 Pa に向けて加圧し、1,000 Pa に到達した直後に気球は破壊した (図 13、14、15)。

速やかに引き裂き紐を引き、引き裂き機構の動作確認を行い、引き裂き開始強度の測定を行った。急速に気球が萎んだため、引き裂きパネルを引きちぎるには至らなかった。気球から空気を抜き、実験を終了した。フィルムは大きく破れ、破れていないフィルムにも横方向に伸ばされた跡が残っていた。

表 4 子午線長、マーキング間距離計測結果

差圧 (Pa)	日時	子午線長 (mm)	A-B 間 (mm)	B-C 間 (mm)	C-D 間 (mm)	A-D 間 (mm)	A-C 間 (mm)	B-D 間 (mm)
200	6/2 13:50	21,954	10,560	12,770	10,265	15,895	17,665	17,530
400	6/2 14:05	22,066	10,555	12,830	10,420	16,095	17,790	17,850
400	6/2 15:00	22,082	10,725	12,850	10,440	16,110	17,840	17,705
80	6/3 9:00	21,986	10,625	12,815	10,310	15,935	17,720	17,705
400	6/3 9:30	22,120	10,670	12,910	10,345	16,090	17,850	17,895
600	6/3 9:38	22,156	10,710	12,835	10,430	16,145	17,850	17,870
800	6/3 9:42	22,220	10,730	12,870	10,460	16,230	17,930	17,920

4.3 データ解析

得られた差圧の時間変化を図 16 に示す。3 つの気圧計は互いに無矛盾な結果を示している。耐圧性能は 1,020 Pa であった。この値は NPB2-1 気球の破壊圧 1,040 Pa と同程度であった。網の固定点を増やすことで、耐圧性能の改善を目指したが、改善はされなかった。とはいえ、破壊圧 1,000 Pa は、要求耐圧の倍に相当しており、この破壊圧を再度達成できたことは、十分な製作精度が達成できていることを示している。

また、NPB2-1 気球における破壊は、図 2 の穴があいただけであったが、NPB2-2 気球においては、大きな変形を伴う破壊であった。直前まで気球は正常な形状を保っており (図 13)、破壊と共に変形が進行している。なお、穴の発生と変形開始の時間順序は不明である。変形の要因は、展開にあたって天井高が低く、気球を倒しながら展開させたことで網の偏りが生じた可能性も考えられる。また、この変形は、論文 [6] で報告されている Buckling mode とも似ており、今後、数値解析による検証が期待される。

図 18 は気圧の時間変化を示したものである。Setra 270 気圧計と、TR-73U 気圧計の計測値は 1 hPa 程度の差があるが、これは機器の精度 (TR-73U 気圧計：1.5 hPa) の範囲内で無矛盾である。実験期間中の変化は 8 hPa であった。図 19 は気圧の時間変化を示したものである。実験期間中の気温の変化は 3 °C であった。

6/2 の 15:00 の差圧が 400 Pa であり、翌 6/3 9:30 の差圧は 80 Pa であった。気球の体積が変化せず、気球内ガスと外気が等温であったとすると、8 hPa の気圧の増加に伴い、差圧は 800 Pa 低下し、2 °C の気温の変化に対して、差圧は 700 Pa 増加することとなる。実際には、網線が張力が継続的にかかることでクリープし、体積が増加する効果がある。表 4 にあるように、400 Pa 印加時の子午線長は、6/2 15:00 にくらべ 6/3 9:30 の方が 0.17 % 長くなっている。体積が長さの 3 乗に比例するならば、体積は 0.5 % 増



図 10 気球の吊り下げ



図 11 満膨張の気球 (200 Pa)

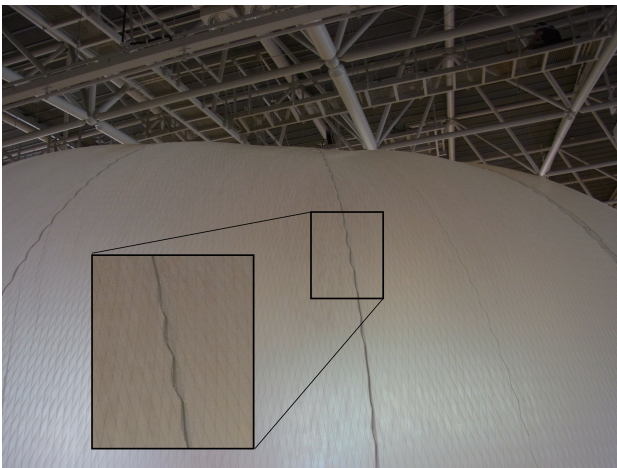


図 12 溶着線の偏り。左下黒四角内は中央黒四角内の拡大図。



図 13 破壊直前の気球 (1,000 Pa)



図 14 気球の破壊時 (その 1)



図 15 気球の破壊時 (その 2)

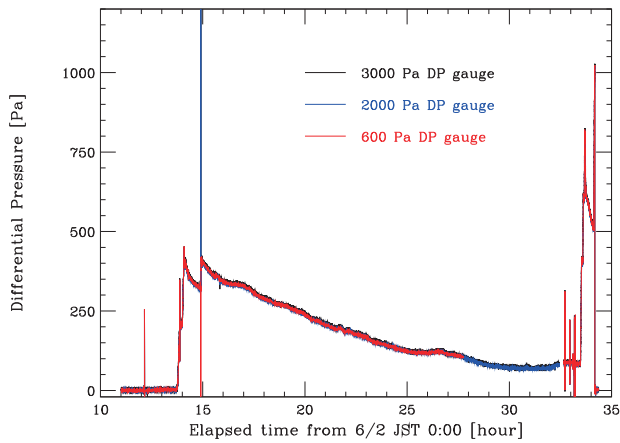


図 16 差圧の時間変化

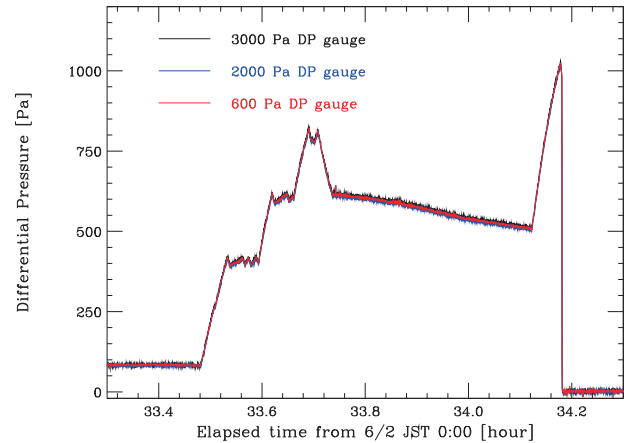


図 17 差圧の時間変化 (破壊試験時)

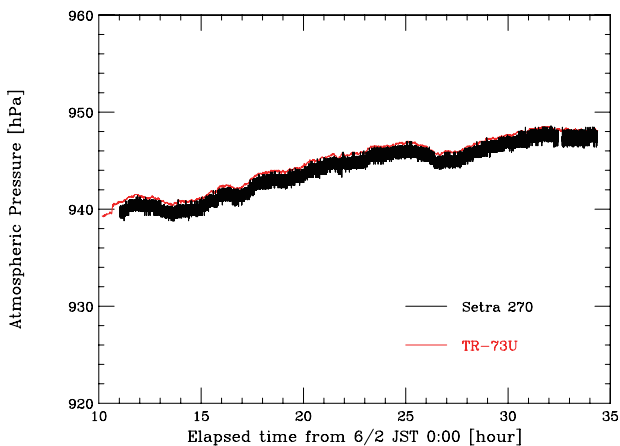


図 18 大気圧の時間変化

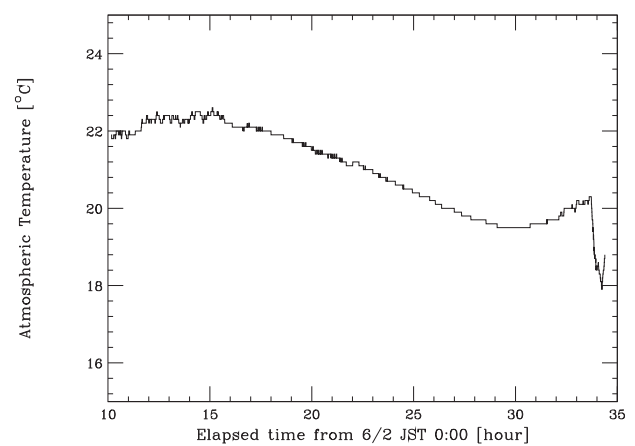


図 19 気温の時間変化

加し、それに伴って差圧は 500 Pa 減少することとなる。また、差圧の変化に伴い、気球の体積が変化する効果により、気圧の増加に伴う差圧の変化が抑制される影響や、気球内ガスが外気温に対して遅れて追従する効果もある。これらの気圧、気温の変化や、気球体積の変化に起因する差圧の変動量は数 100 Pa 程度と推定され、観測された 320 Pa の変動がガス漏れにも起因するのかは定かではない。

5. まとめと今後の計画

2016 年に試験した体積 $2,000 \text{ m}^3$ の NPB2-1 気球は、網のフィルムへの固定箇所に近いフィルムが変形したことに伴うものであった。この対策として、網とフィルムの固定間隔を短くすることを検討し、新たに二列直線縫いで固定する方法を開発し、体積 10 m^3 の気球で問題ないことを確認した後、体積 $2,000 \text{ m}^3$ の気球の地上膨張、破壊試験を実施した。その結果、破壊圧が 1,020 Pa であり、NPB2-1 気球

の破壊圧 1,040 Pa と同程度に滞ることが判明した。直接の耐圧性能の向上には継がらなかったが、新しいステッチは、網を縫い針で傷つけるリスクが小さいため、網の安全率の向上には有効であったと考えている。また、1,000 Pa の破壊圧の気球が再度製作できたことは、フィルムの溶着といった気球製作の全体の精度が十分高く、40 kg のペイロードを搭載して高度 22 km の上空を長時間飛行させることが可能、というこの気球の性能を再現性よく引き出すことが可能であることを意味する。気球の破壊時に変形した形状をみると、耐圧性能には、気球の変形の寄与が考えられ、今後、数値計算による検証を実施したい。今後、この網の固定方法を用いて、体積 7,000 m³ の気球を製作し、飛行試験を実施し、地上試験で検証された技術が成層圏の環境においても問題ないことを確認する試験を実施する予定である。

謝辞

気球の膨張試験にあたっては、藤倉航装株式会社の方々、ISAS/JAXA の竹内 伸介さん、東海大学工学部の加藤 健太さん、阿部 亮太さん、にお世話になりました。本研究は、科学研究費補助金基盤研究(A)「皮膜に網をかぶせた長時間飛行用スーパープレッシャー気球の開発」(課題番号 24246138)を受けて行っています。

参考文献

- [1] Debora Fairbrother “Superpressure balloon”, Proc. 2017 Scientific Ballooning Technologies Workshop, 2017
- [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、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
- [4] 斎藤 芳隆、他、”皮膜に網をかぶせた長時間飛行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
- [5] 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-13-001, pp.1-34, 2014
- [6] Nakashino, K. et al. “Super Pressure Balloon with Diamond-Shaped Net: A Numerical Study of its Structural Characteristics” Proc. of AIAA SciTech Forum, AIAA 2017-1117, 2017

B16-02 大気球実験報告：成層圏における微生物捕獲実験 Biopause

大野宗祐^{*1}, 石橋高^{*1}, 三宅範宗^{*1}, 河口優子^{*2}, 梯友哉^{*3}, 奥平修^{*1}, 山田学^{*1}, 山田和彦^{*3},
高橋裕介^{*4}, 原田大樹^{*4}, 山岸明彦^{*2}, 瀬川高弘^{*5}, 野中聡^{*3}, 石川裕子^{*6}, 所源亮^{*7},
山内一也^{*8}, 小林正規^{*1}, 福家英之^{*3}, 吉田哲也^{*3}, 松井孝典^{*1}

A report on the B16-02 balloon experiment: Biopause—bioaerosol sampling at the stratosphere

By

Sohsuke OHNO^{*1}, Ko ISHIBASHI^{*1}, Norimune MIYAKE^{*1}, Yuko KAWAGUCHI^{*2}, Yuya KAKEHASHI^{*3}, Osamu OKUDAIRA^{*1}, Manabu YAMADA^{*1}, Kazuhiko YAMADA^{*3}, Yusuke TAKAHASHI^{*4}, Daiki HARADA^{*4}, Akihiko YAMAGISHI^{*2}, Takahiro SEGAWA^{*5}, Satoshi NONAKA^{*3}, Yuko ISHIKAWA^{*6}, Gensuke TOKORO^{*7}, Kazuya YAMANOUCI^{*8}, Masanori KOBAYASHI^{*1}, Hideyuki FUKU^{*3}, Tetsuya YOSHIDA^{*3}, Takafumi MATSUI^{*1}

ABSTRACT

The location of “biopause”, the upper boundary of the biosphere, and the biological flux across the biopause on Earth are the key to understand the universality and distribution as well as the origin and evolution of life in the universe. The most direct information to elucidate the biopause is the distribution and dynamicity of life in the middle atmosphere. We carried out a scientific project named “Biopause” using JAXA’s scientific balloons in order to grasp the dynamics of biological flux in the stratosphere, i.e. the lower middle atmosphere, comprehensively. Our first balloon experiment was conducted on June 8, 2016 and collected aerosol particles in the stratosphere using a newly developed descending inertial impactor. We estimated the number density of the stratospheric microbes including the unculturable ones for the first time in the world. In this paper, we summarize the balloon experiment and the initial results of the sample analysis.

Keywords: biopause, stratospheric aerosol, balloon experiment, extremophile, bioaerosol

概要

地球生命圏の上端 biopause、あるいは地球／地球外間の生命の流入／脱出の有無を確認することは、生命の普遍性や起源、進化、分布を理解する上で非常に重要である。地球／地球外間の生命の流入／脱出の有無を確認する最も直接的な鍵は地球中層大気での生物分布にある。我々は中層大気中での微生物の動態を包括的に理解するため、JAXA（宇宙航空研究開発機構）の大気球を用いた成層圏微生物採取実験（Biopause プロジェクト）を行っている。2016 年度に行った第一回目の大気球実験では、新規開発した降下式インパクト型試料採取装置を用いた、成層圏微粒子の採取に成功した。また、培養できないものも含めた成層圏微生物数密度の上限値を世界で初めて観測することに成功した。本稿では、第一回目の大気球実験の概要と初期分析の結果を報告する。

doi: 10.20637/JAXA-RR-17-007/0002

* 平成 29 年 11 月 21 日受付 (Received November 21, 2017)

*1 千葉工業大学惑星探査研究センター (Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology)

*2 東京薬科大学 (Tokyo University of Pharmacy and Life Sciences)

*3 宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency)

*4 北海道大学 (Hokkaido University)

*5 山梨大学 (University of Yamanashi)

*6 リンカーン大学 (University of Lincoln)

*7 ISPA (Institute for the Study of Panspermia and Astroeconomics)

*8 東京大学 (University of Tokyo)

1. はじめに

地球大気の最下部である対流圏（高度約 10 km まで）には生物が普遍的に存在することが知られている。一方で、熱圏より上（高度約 80 km 以上）の領域では大気密度が低く、微生物が浮遊・滞留することは非常に困難である。これまでに生命の存在が報告された最も高い高度も中層大気（成層圏・中間圏）の領域であり、地球生物圏の上端は中層大気中のどこかに存在すると考えられる。そのため、地球生物圏に明確な境界面が存在するかどうか、存在する場合にはそれを決定するメカニズムは何か、さらには地球生物圏が宇宙に向かって閉じているのか開いているのかを理解する上で、中層大気中の生物の分布と動態が重要な鍵となる。これまでに、大気球あるいはロケットを用いた成層圏での微生物サンプリング実験が行われてきており、成層圏にも生命が存在しているということが報告されている（例えば Yang et al.¹⁾）。また、JAXA 大気球を用いた実験も過去に行われており、平成 16 年、17 年に大気球を用いた微生物採取実験で成層圏での微生物の採取に成功した (Yang et al.²⁾）。

ここで問題となるのは、どのような状態で微生物が成層圏に存在しているかがよくわかっていないことである。生物の地球からの流出/地球への流入のフラックスを見積もるためには、中層大気中の微生物の形態・サイズ分布と高度分布を測定し、難培養性微生物を含めた動態を理解する必要がある。

ところが、多くの先行研究では、採取した微生物をまず培養するという分析手順のみが採用されている³⁾。そのため、採取された微生物の状態を観察することが困難であった。培養法では、一個体が単独で浮遊しているのか凝集体でも塵に付着しているのかの区別は難しい。また、難培養性微生物や死んだ微生物も検出できない。一方高度分布に関しても、これまでに報告されている中層大気中の微生物の高度分布は、ロケット⁴⁾、気球^{2,3)}、飛行機実験^{5,6)}などの異なる手法、異なる場所、異なる時期に得られたデータをコンパイルしたものである。同じ手法で系統的に同じ場所における異なる高度の微生物分布を調べた例は存在しない。そのため、それぞれ異なる採取手法や分析手法に起因する採取効率、検出感度、誤差の違い、水平方向の数密度の違い、季節変動などの影響を受けてしまい、鉛直方向の輸送メカニズムや中層大気での滞留時間等を定量的に評価することが出来ない。また、気球実験では、放球前に地上で気球に付着した微生物によるコンタミネーションの可能性があると指摘もある。

そこで我々は、中層大気中の微生物の形態と高度分布を観測することを目的として、大気球による中層大気中の微生物採取を、コンタミネーションを避ける手法で行い、採取した試料を多角的に分析するプロジェクト「Biopause」を開始した。Biopause プロジェクトの採取試料分析では、先行研究で行われてきた培養法だけでなく、蛍光顕微鏡観察や遺伝子解析を併せて行う。2016 年 6 月に行った我々の第 1 回目の大気球実験では、降下式インパクト型微生物採取装置を用いた試料採取の実証を行うとともに、蛍光顕微鏡と SEM（走査型電子顕微鏡）観察による分析手法を確立した。また、成層圏の難培養性微生物数密度に関する世界初の観測結果を得た。本稿では、その大気球実験の概要と初期分析結果について報告する。

2. 降下式インパクト型試料採取装置

本気球実験では、気球で成層圏まで上昇した後、気球からゴンドラを切り離し、パラシュートで降下している最中に、成層圏中に浮遊する微生物を採取する。降下中に試料を採取することにより、気球をはじめとする実験装置外壁に付着していた微生物（放球前に地上で付着したもの）によるコンタミネーションを防ぐことができる。パラシュートでコントロールされる試料採取中の降下速度が、実験装置外壁に付着していた地上の微生物が離脱した場合の落下速度よりも大きい為、実験装置外壁に付着していた地上の微生物が回り込んで試料採取装置内に入ってくる可能性を非常に小さくすることができる。

降下式インパクト型試料採取装置では、装置の降下により大気を受動的に装置内に取り込み、微生物をインパクションプレート上に採取する。採取機構部の入口と出口にはゲートバルブを設置し、指定したタイミングにより開閉を行い、目的とする高度で試料採取を行う。気球実験用のインパクト型採取装置の概念図を図 1 に示す。円筒状の筒の内部にノズルとインパクションプレートを設置する。インパクションプレートの材質はガラス（蛍光顕微鏡観察用）とモリブデン（SEM 観察用）を用いた。装置下部から取り込まれた大気はノズルを通過後、インパクションプレートを避けるように流れるが、含まれる微粒子はインパクションプレートに衝突し付着する。採取可能な粒子の粒径と採取効率はスロート形状、プレートの大きさ・位置など複数の要

因に依る。本研究では、先行研究 (Marple and Willeke⁷⁾) を参考に、スロート径 (図1の w)、スロート最狭部長さ (図1の r)、プレートとの距離 (図1の s) がそれぞれ等しいという条件の下で最適化を行った。

微生物を効率良く採取するためには、装置内部を大気が効率良く通り抜けることが必要条件となる。そこで、装置内全体の流れ場を知るために、図1のような模型を用いた風洞実験と流体計算を行い、比較を行った。我々は風洞実験を、JAXAの惑星環境風洞で行った。大気の流れを知るために、装置の出入り口やノズルのスロート部の静圧を測定したところ、流体計算の結果は風洞実験の結果と良く一致しており、流体計算が風洞実験における流れ場を良く再現していると言える。さらに、流体計算の結果を用いて、微粒子が大気と一緒に採取装置内に取り込まれた場合に試料採取板上に捕集される確率を、粒子計算により見積もった。微生物の大きさは約 $1\ \mu\text{m}$ よりも大きいことが知られており、サイズ $1\ \mu\text{m}$ 以上の微生物の採取ができるよう設計する必要がある。 $1\ \mu\text{m}$ の微粒子は、スロート最狭部の直径を $8\ \text{mm}$ より大きくすると装置内を素通りして採取できない微生物の割合が増えてしまうが、スロート最狭部の直径を $8\ \text{mm}$ より小さくすると装置内を通り抜ける大気量が減少してしまう。そのため本実験では、 $1\ \mu\text{m}$ 粒子の採取確率が約 50% となるスロート最狭部直径、インパクションプレートとの距離が全て $8\ \text{mm}$ となるよう装置を設計し、試験を行った。スロート最狭部の直径が $8\ \text{mm}$ の場合、単独で浮遊している最小サイズの微生物の大きさに相当する直径 $1\ \mu\text{m}$ の粒子が、約 50% の確率で捕集されることが示された。これは、設計通りの値である。最終的には、装置内の流量を稼ぐために、多数のノズルを並列したものとなった。隣り合うノズルどうしの干渉を防ぐためノズル間の距離をノズル最狭部直径の3倍以上取るように配置した結果、多数のノズルを並べた実機を用いた風洞実験と単独ノズルを仮定した数値計算とで、粒子の捕集効率は大きく変わらなかった。インパクションプレートの形状を図2に、ノズル形状を図3に示す。

製作した試料採取装置実機を用いて、風洞を用いた微粒子試料採取の実証試験を行った。JAXA 惑星環境風洞に試料採取装置を設置し、採取装置実機の上流側に蛍光ビーズ (サイズ $1\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$) の放出機構を設置し、成層圏内でのパラシュートによる降下状態に相当する $0.05\ \text{kPa}$ 、 $30\ \text{m/s}$ における、微粒子捕集の実証実験を行った。図4に風洞試験の写真を示す。実験的制約のため捕集確率についての詳細なパラメタスタディは行っていないが、風洞実験において採取装置実機を用いた蛍光ビーズ採取には成功し、数値計算の結果から予測される流量・採取効率と誤差の範囲で一致した。また、微生物のサイズは $1\sim$ 数 μm 程度と小さいため、分子間力で付着すると非常にはがれにくく、実際に叩く等の衝撃を与えた際もほとんど剥離しなかったことから、捕獲した微生物の捕獲後の落下は限定的であると考えられる。ただし、実際に捕獲された微生物 (後述) の形状は必ずしも球状ではなく、微粒子の採取効率へ与える粒子形状の影響の定量的な見積りは今後の課題である。

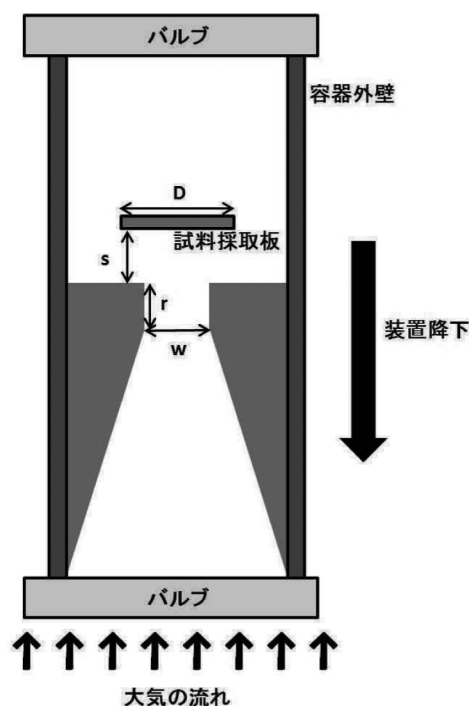


図1 インパクター型採取装置の概念図。実機では多数のノズルを並列に設置することとした。

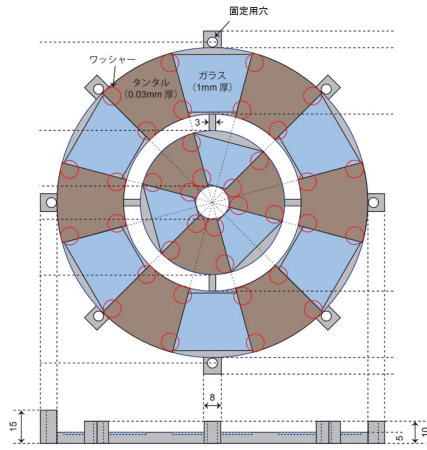


図2 インパクションプレートの図面

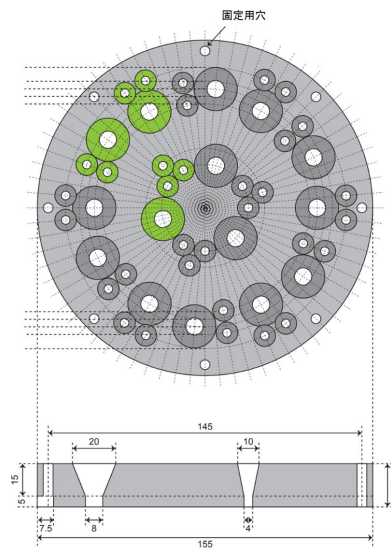


図3 ノズル部の図面

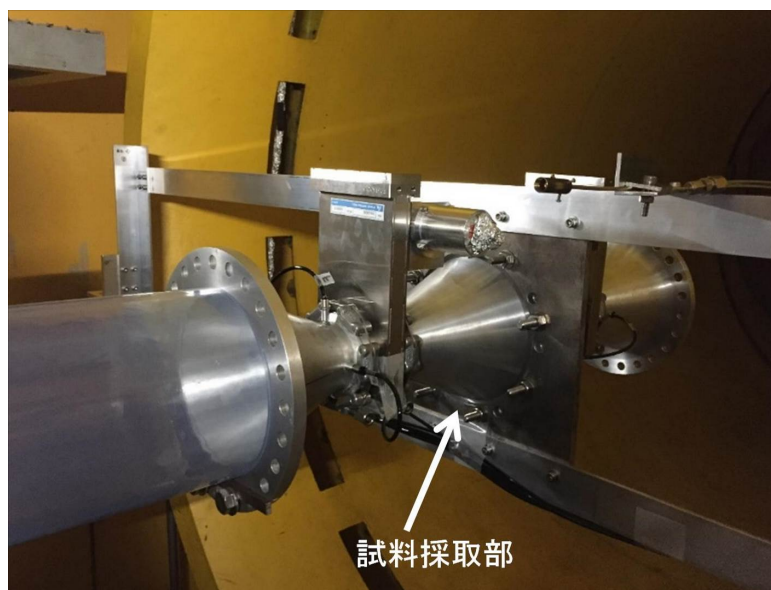


図4 風洞試験の際、風洞内に設置された試料採取部

3. B16-02 大気球実験

2016年度(6月、大樹航空宇宙実験場)のB16-02大気球実験に向け、実験装置一式の準備を行った。気球に吊るすゴンドラに、インパクター型採取装置を試料採取用(S1)とコントロール用(S2;採取用と同じ準備や分析を行うが、成層圏で採取を行わず、準備や分析の段階でのコンタミネーションの有無を判別する)の2セットの他、流量測定装置(S3)、制御部、バッテリー、ゲートバルブ開閉用高圧ガスタンク、JAXA大気球実験システム側の装置一式を搭載した。試料採取装置は、内部に塵等が残らないようエタノールや洗剤等を用い繰り返し洗浄した後、全体を乾熱滅菌し、コンタミネーション軽減の為、試料採取部の先端をゴンドラの下部に突き出た形に設置した。そのため、放球直前まで使う為の専用支持台を別途製作し、ゴンドラの下に設置した。ゴンドラの写真を図5に示す。試料採取部の先端ノズル部への地上微生物の付着はコンタミネーションの原因になり得るので、放球直前に取り外せる蓋を別途製作し、ノズル部に取り付けた状態で洗浄・滅菌を行った。ゲートバルブは、事前に単独の低温・真空環境下での動作試験を行ったところ、0℃以下では動きが緩慢になり、-50℃では作動しなくなったため、試料採取用試料採取装置(S1)については温調により、5℃以上に保つことにした。

5月下旬より大樹航空宇宙実験場にて最終準備を行い、実験装置一式を搭載した大気球は6月8日早朝に大樹航空宇宙実験場から放球された。放球の様子を図6に示す。実験装置を搭載した大気球は、予定通り高度28.5kmまで上昇した。次に、気球の飛翔運用の為、また、上昇時に周囲大気にまき散らされた地上微生物による汚染を避ける為、約30分の水平飛行を行った。その後、気球を切り離し、パラシュートによる降下中に試料採取を行った。試料採取装置の入口・出口のゲートバルブは予定通り動作し、高度27kmから高度13kmの間で試料採取を行った。採取開始時にゲートバルブを開く際は直接コマンド送信により操作し、採取終了時にゲートバルブを閉じる際は搭載した圧力計によるトリガーで動作させた。その後実験装置一式は回収船によって回収され、密閉されたまま大樹航空宇宙実験場へと輸送された。大気球の飛翔プロファイルを図7に示す。

装置一式の回収後、搭載した制御部内に記録されたセンサー出力値やコマンド情報のログファイルの解析を行った。大気球の通信システムを通じリアルタイムで確認していたカメラ映像通り、試料採取部上下のゲートバルブが確かに開閉していたことが確認できた。試料採取部や制御部内等の温度履歴から、ヒーターと保温材の能力が、成層圏環境においてもゲートバルブが動作温度を保つために十分であり、想定していた通りの温調が行われていたことも確認できた。また、圧力計の履歴から、試料採取部の入口・出口ゲートバルブの動力用ガスタンクやガス配管に漏れが無かったことを確認した。装置は、想定通りに動作したことが確認された。



図5 採取装置一式を搭載したゴンドラ



図 6 平成 28 年度 B16-02 大気球実験の放球の様子

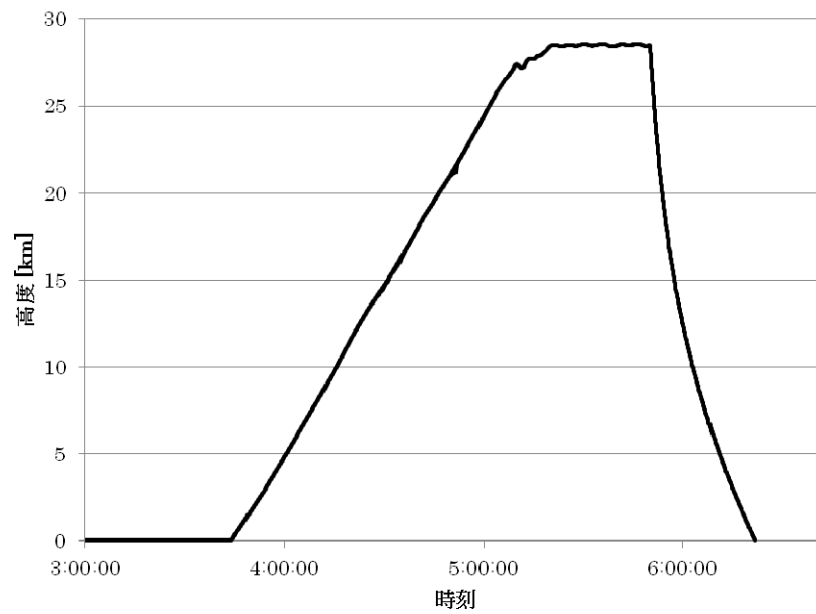


図 7 B16-02 大気球実験の高度プロファイル

4. 採取試料の初期分析

搭載した試料採取装置は、S1 と S2 の 2 組であるが、回収後 S2 内部への浸水が確認された。内部に侵入した水の塩分を塩分計で確認したところ海水の塩分濃度と一致したため、侵入したのは海水であったと考えられる。これは、ゴンドラスペース等の制約のため S2 の保温・温調を行わなかったため、容器を密閉するための O リングの弾性が失われ、上空で容器内圧が低下し、着水後に O リング部分から浸水したためであると考えられる。一方、保温・温調を行った S1 への浸水は確認されなかったため、成層圏で採取された試料は予定通り回収することに成功した。回収されたゴンドラから取り外された試料採取部は、外部を洗浄／殺菌した後、大樹航空宇宙実験場格納庫内の専用作業スペース内部に設置されたクリーンベンチ内にて解体した。その後、蛍光顕微鏡観察用試料は蛍光色素を添加した後カバーガラスで覆い、密閉した。また、SEM 観察用試料は、取り出したクリーンベンチ内にて表面を金蒸着し、密閉容器に保存した。密閉した試料は千葉工大惑星探査研究センターに持ち帰り、それぞれ蛍光顕微鏡と SEM を用いて観察した。

蛍光顕微鏡で観察した結果、放球直前にゴンドラ側面の複数個所に塗布した蛍光ビーズはまったく確認されなかった。これは、ゴンドラに付着した地上微生物の混入は非常に少なかった可能性が高いことを示唆する。また、微生物を含む可能性が高いエアロゾル粒子が合計で 21 個検出された。蛍光色素が小さな石などの微粒子などとも非特異的に結合し光っている可能性も絶対にあり得ないわけではないため、違う色素を用いた染色等のクロスチェックを行える手法を確立していくことが今後の課題である。図 8 に採取部内で確認された粒子の蛍光顕微鏡写真の一例を示す。

21 個という採取微生物数は、今回の試料採取装置の大気通過量と微生物採取効率を用いて換算すると、標準大気 (1 気圧、15°C) 換算で 7×10^1 個 / m^3 の微生物数密度に相当する。気球実験の際に採取部内を通過した空気量は、事前の風洞実験の結果を基に、「採取部入り口の開口部面積を底面積とする高度が 13 km から 27 km の空気柱」の 1/10 の量であるとして見積った。求めた 7×10^1 個 / m^3 という微生物数密度は、難培養性微生物を含めた成層圏微生物数密度の上限値であると考えられることができる。浸水のためコントロール試料が失われてしまったので、本実験で検出された 21 個が全て成層圏由来であると断定はできない。しかしながら、万が一 21 個のうちいくつかは地上微生物の混入であった場合でも、検出されたうち成層圏由来の粒子の数が 21 個を超えないことは確かである。そのため、地上微生物の混入量に依らず、本実験で採取された成層圏大気中の平均微生物数密度は、 7×10^1 個 / m^3 を超えない。

一方、SEM 観察の結果、エアロゾルをインパクター型採取装置で採取した場合に特有の「サテライト構造」を持つ微粒子を多数発見した。図 9 に採取された成層圏エアロゾルの SEM 写真の一例を示す。加速されてインパクションプレートに衝突した柔らかい微粒子だけがこのサテライト構造を持ち、放球前や回収後など成層圏での試料採取時以外にインパクションプレートに付着した粒子はこの構造を示さない⁸⁾。すなわち、サテライト構造を持つ粒子の存在は、大気球実験で確かに成層圏微粒子を捕集できた証拠である。現在までに採取板のごく一部しか観察できていないが、46 個のサテライト構造を持つ粒子を発見した。これにより、本実験装置で成層圏において微粒子の採取が行えることが実証された。

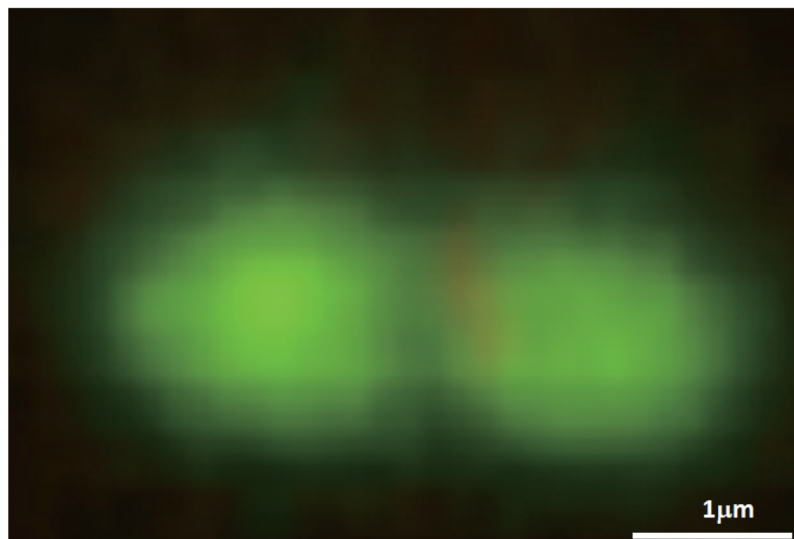


図 8 蛍光顕微鏡画像の一例

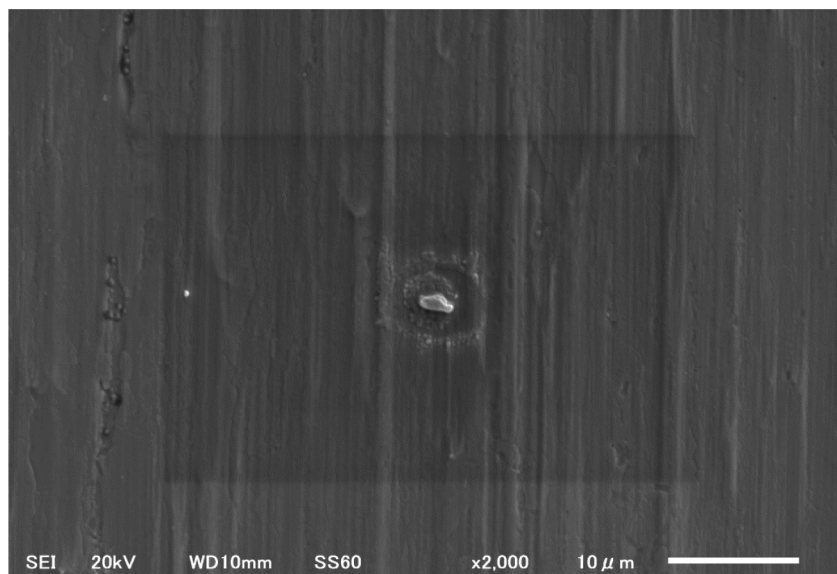


図9 SEM画像の一例

5. B16-02 実験の初期成果のまとめと今後の展望

2016年度に行った大気球実験の結果、新規開発した降下式インパクター型試料採取装置で、成層圏微粒子を採取することに成功した。前述のように、サテライト構造を持つエアロゾル粒子の確認により、確かに成層圏にて微生物試料の採取に成功したことが示された。また、採取装置を搭載したゴンドラの側面に塗布した蛍光ビーズの混入が無かったことから、試料採取中の地上微生物の混入を防止するという降下式インパクター型試料採取装置の最大の長所が実証された。気球実験用の降下式インパクター型の微粒子採取装置による実験は前例がなく、技術実証として重要であるとともに、今後成層圏微生物採取実験を継続していく上での基盤となるものである。

また、本実験の結果より、難培養性微生物も含めた成層圏微生物数密度の上限値を推定した（「4. 採取試料の初期分析」の第三段落参照）。難培養性微生物は自然界の微生物の大半を占めるだけでなく、成層圏微生物の寿命や動態などを理解する上で不可欠な情報を有しており、生物圏界面 *biopause* の検出と理解というプロジェクトの大目標達成へ向けて中核となる観測対象である。これまでの成層圏微生物の観測は培養法に依存しており対象が培養できる微生物のみに限定されていたため、本研究が成層圏の難培養性微生物に関する世界初の観測結果である。

それを踏まえ今後の実験では、まず成層圏微生物の高度分布の観測を行う予定である。同時同地点異高度における成層圏微生物の形状と難培養微生物を含む数密度を観測できれば、成層圏の微生物エアロゾル粒子のサイズと鉛直分布を把握することが可能になり、成層圏生物圏の全体像と成層圏に微生物が存在する理由の理解へ向け、重要なステップとなる。また、2016年度実験で行った蛍光顕微鏡による微生物検出という手法と、先行研究で行われてきた培養法との両方で分析を行いそれぞれの検出効率を求めることで、先行研究で報告されている微生物数密度との比較も可能となる。

謝辞

本大気球実験は、大学共同利用実験として JAXA の提供する大気球による飛翔機会を利用して行われました。装置の開発にあたり、日本学術振興会、自然科学研究機構の助成を頂きました。試料採取装置は、ステラ精密株式会社、株式会社ジェック東理社、株式会社フジ・テクノロジー、千葉工業大学工作センターのご協力のもと作製されました。JAXA の皆様をはじめ実験に協力して下さった皆様、装置製作、試料分析にご協力頂いた皆様に感謝いたします。

参考文献

- (1) Yang, Y., Yokobori, S., and Yamagishi, A., Assessing Panspermia Hypothesis by Microorganisms Collected from The High Altitude Atmosphere, *Biological Sciences in Space*, Vol.23 No.3, (2009) 151-163.
- (2) Yang, Y., Itoh, T., Yokobori, S., Shimada, H., Itahashi, S., Satoh, K., Ohba, H., Narumi, I. and Yamagishi, A. *Deinococcus aetherius* sp. nov., isolated from the stratosphere, *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, (2009) DOI 10.1099/ijss.0.010876-0.
- (3) Wainwright, M., Wickramasinghe, N.C., Narlikar, J.V. and Rajaratnam, P. Microorganisms cultured from stratospheric air samples obtained at 41 km, *FEMS Microbiol. Lett.*, 218, (2003) 161-165.
- (4) Imshenetsky, A.A., Lysenko, S.V., Kazakov, G.A. and Ramkova, N.V. On micro-organisms of the stratosphere, *Life Sci. Space Res.*, 14, (1976) 359-362.
- (5) Yang, Y., Itahashi, S., Yokobori, S. and Yamagishi, A. UV-resistant bacteria isolated from upper troposphere and lower stratosphere, *Biol. Sci. Space*, 22, (2008) 18-25.
- (6) Griffin, D.W. Terrestrial microorganisms at an altitude of 20,000 m in Earth's atmosphere, *Aerobiologia*, 20, (2005) 135-140.
- (7) Marple, V.A., and Willeke, K., Impactor Design, *Atmospheric Environment*, 10, (1976) 891-896.
- (8) Yamato, M. and Ono A., Chemical and Physical Properties of Stratospheric Aerosol Particles in the Vicinity of Tropopause Folding, *Meteorological Society of Japan*, Vol. 67, No. 1 (1989) 147-165.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-17-007

JAXA Research and Development Report

大気球研究報告

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 平成30年2月20日

電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

