



ISSN 2433-2216(Online)
JAXA-RR-19-002

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

2020年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

序文

原 弘久

スペクトル取得型光学オゾンゾンデ観測による成層圏オゾン，二酸化窒素高度分布導出 …… 1

村田 功，野口 克行

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 …… 9

斎藤 芳隆，中篠 恭一，秋田 大輔，松尾 卓摩

序 文

今年度の大気球研究報告では、スーパープレッシャー気球の気密性向上に関する研究と小型分光器を搭載したオゾンゾンデ観測で得られた成層圏オゾンおよび二酸化窒素の高度分布に関する成果を掲載しています。

Event Horizon Telescope によるブラックホール領域の撮像の成功というニュースの興奮の冷めやらぬうちに平成という時代が終わりを迎え、元号が令和へと引き継がれて国中が新しい時代の到来を祝う中で、2019 年度国内気球実験期間が開始となりました。近年の国内実験は、気象条件の不適合によって実施が見送られるケースが多くなり、昨年度はこのために予定していた全4実験を実施することができない状況となりました。また、今年度は実験に必要なヘリウムガスの供給見込みが難しいという新たな逆風に対応しながらの実験実施となりました。

このような条件の中で、優先度の高い課題として選定された「成層圏における微生物捕獲実験」が無事に成功しました。一方、他の4つの大気球実験はヘリウムガスを確保できずに実験実施に至らず、たいへん残念ですが来年度へと実施が見送られることとなりました。この他には、ゴム気球を使い、「極薄ペロブスカイト太陽電池の気球飛翔」の実験を実施しました。この実験では、供給の不安定なヘリウムガスの代替ガスとして、昭和 47 年以降は一度も使用してこなかった水素ガスを、安全面確保に最大限の配慮をした上で使用しての実験実施となりました。ヘリウム供給問題は来年度も続きますが、大気球グループは例年よりも早めの対応を開始して、確実な来年度の国内実験実施に向けて準備を進めています。

国外実験については、昨年度の豪州実験「気球による MeV ガンマ線天体国際共同観測(SMILE-II+)」、
「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)」で取得された観測データの解析が進み、実験目標を達成するポジティブな結果を得つつあります。実験提案者グループ、大気球グループともに、今後のさらなる展開に期待しています。前回に実験実施に至らなかった「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」は、実験チームを再編成して、今回の国外実験での成功に向けて始動することとなりました。また、計画進行中の海外実施の大気球実験 (XL-Calibur, GAPS, SUNRISE-3)は、近い将来の実験実施に向けて着実に準備を進めています。

大気球実験は、理学や工学の分野を超えて多岐にわたる研究分野に対してユニークな実験環境を提供しています。また、大気球グループは、新たな実験環境を提供するための調査や基礎研究も継続して行っています。これまでの大気球実験に関わった方々に感謝するとともに、多くの方々のアイデアで今後も大気球実験を通して関連分野がますます発展していくことを期待します。

大気球専門委員会
委員長 原 弘久

スペクトル取得型光学オゾンゾンデ観測による 成層圏オゾン、二酸化窒素高度分布導出

村田 功^{*1}, 野口 克行^{*2}

Profile retrieval of the stratospheric ozone and nitrogen dioxide with spectrometer type balloon-borne optical ozone sensor

MURATA Isao^{*1}, NOGUCHI Katsuyuki^{*2}

ABSTRACT

We have developed a balloon-borne optical ozone sensor and have observed the vertical distribution of upper stratospheric ozone since 1994 using a thin-film high-altitude balloon at Sanriku and Taiki, Japan. Recently, we developed a new sensor with small spectrometer to measure also other species such as NO₂ and the measurement was carried out at Taiki (42.50°N, 143.44°E), Japan on September 5, 2016. The solar absorption spectra between 280 and 500 nm were measured at 0.7 nm resolution every two seconds. The spectrometer was put between two cold insulators with freezing point of 5°C to keep the temperature stable. The balloon was launched before the sunrise to reach lower stratosphere (around 15 km in altitude) at sunrise and observe enough absorption of NO₂. A spherical mirror and a Teflon diffuser were set in front of the optical fiber inlet to measure the solar spectra even when the solar zenith angle (SZA) is large (SZA<90). We utilized a program originally developed for the Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) method to retrieve the O₃ and NO₂ number densities from 460 - 490 nm. Slant columns between 17.5 - 44.5 km were successfully derived as 1.08×10^{20} [molecule / cm²] for O₃ with error of 3.6% and 4.9×10^{16} [molecule / cm²] for NO₂ with error of 9.9%. Vertical profiles of O₃ and NO₂ were also derived from the difference of the slant columns with altitude after the data selection from raw spectra to eliminate noisy spectra and averaged for 3 km altitude range.

Keywords: optical ozone sensor, NO₂ stratospheric profile

概要

オゾン (O₃) のほかに二酸化窒素 (NO₂) 等も観測可能な小型回折格子型分光計を用いたスペクトル取得型光学オゾンゾンデを開発し、2016年9月5日に大樹町 (42.50°N, 143.44°E) で観測を行った。この装置では約 280-500 nm の範囲を波長分解能 0.7 nm で測定する。分光器は温度安定化のため保冷剤で 5°C前後に保ち、NO₂吸収量を確保するため日出時に下部成層圏 (高度 15 km 付近) に到達するように放球しこれに対応して水平方向からの光を取り込めるよう球面鏡を入射口の直上に設置した。O₃、NO₂ のカラム量及び高度分布の導出には差分吸光分光 (DOAS) 観測用に開発されたプログラムを応用し、460-490 nm のスペクトルから O₃ については高度 17.5-44.5 km のスラントカラム量 1.08×10^{20} [molecule / cm²] が誤差 3.6% で得られた。同じく NO₂ についてはスラントカラム量 4.9×10^{16} [molecule / cm²] が誤差 9.9% で得られた。高度分布については、質のよいスペクトルを選別した上で高度 3 km 毎に平均することで、O₃、NO₂ とともに成層圏高度分布を導出することができた。

1. はじめに

東北大学では、紫外線強度の高度変化から成層圏中・上部のオゾンを観測する光学オゾンゾンデを開発し、宇宙科学研究所によって開発された薄型高高度気球と組み合わせて三陸における夏季のオゾン高度分布観測を1994年から2007年まで行ってきた^{3),5),6),7)}。気球によるオゾン観測は電気化学式(ECC)オゾンゾンデが各国の気象機関等により用いられており高度30-35 km以下では非常に精度がよいが、この装置はECCオゾンゾンデでは観測できない上部成層圏オゾンを直接観測できる世界的にも数少ない観測器である。また、大気重力波の観測も可能とするため2002年からはGPSを搭載し風速も観測する改良型の装置で観測を行っている⁴⁾。2010年からは大樹町に観測地が移り、その後、オゾン破壊に影響する二酸化窒素なども同時観測できるよう小型分光計を用いたスペクトル取得型の観測器を開発し、2013年5月に初観測を行った。二酸化窒素が観測可能な気球観測装置はこれまで大型のものしかなく、小型の装置で観測できれば観測自由度が増す。しかし、解析をしてみると装置に改良すべき点が多くあることが分かり、装置や観測手法を改良し、2016年9月5日に再び観測を行った。本論文では、その改良点及びオゾン(O₃)、二酸化窒素(NO₂)のカラム量及び高度分布の導出結果について報告する。

2. スペクトル取得型光学オゾンゾンデ

光学オゾンゾンデは、オゾンハートレー帯吸収によって太陽光の300 nm付近の紫外線の強度が高度に対して変化することを利用してオゾン濃度の鉛直分布を得る⁷⁾。ECCオゾンゾンデのように外気を取り込む必要がないため、大気の薄くなる30 km以上での観測精度がよいことが特徴である。受光面にはテフロン製の拡散板を用いており、これにより太陽追尾をしなくても光を観測器内部に取り込むことができる。

分光方法は、従来のフィルター型では内部に入射した光をビームスプリッターによって分け、2種類のフィルターを用いてオゾンによる吸収を受ける太陽紫外線の強度と同時にオゾンの吸収を受けない波長(420 nm)の太陽光強度を測定することで、観測器の揺れによる入射光量の変化を補正する方式であった。

スペクトル取得型光学オゾンゾンデは、フィルター型光学オゾンゾンデの光学系部分を光ファイバーとアレイセンサを用いた小型回折格子型分光計(オーシャンインサイト社製FLAME-T)に置き換えたものである。この分光器は約280-500 nmの範囲を2400チャンネルに分けて測定でき、波長分解能は0.7 nmである。オゾンの吸収は300 nmを中心とした波長帯にあるが、350 nm付近には非常に弱いもののOCIOやBrOの吸収帯が、470 nm付近には弱いNO₂(およびO₃)の吸収帯があり、280-500nmを高いS/Nで測定することができればこれらの成分の成層圏カラム量などが観測可能になる。ただし、フィルター型に比べデータ量が膨大になるため送受信系とも大幅な変更となり、スペクトルの取得は2秒毎となる。表1にスペクトル取得型における主な変更点をまとめた。その他に、気温、気圧、GPS(時刻、緯度、経度、高度)、分光器温度は1秒毎に取得している。スペクトル取得型光学オゾンゾンデのサイズは340 x 170 x 250mm、重量は2.4kgである。

表1. フィルター型とスペクトル取得型の主な違い

	フィルター型	スペクトル取得型
分光データ量	12 bit 2 ch (300 nm, 420 nm)	16 bit 2400 ch (280-500 nm)
送信レート	1200 bps	57.6 kbps
データ取得間隔(オゾン)	1秒(高度にして約5 m)	2秒(同約10 m)
観測可能成分	O ₃	O ₃ 、NO ₂ 、OCIO、BrO

3. 2013 年の観測における問題点とそれに対応した改良

2013年5月のスペクトル取得型光学オゾンゾンデによる初観測の解析を行ったところ、NO₂の吸収はノイズに埋もれてほとんど検出できなかった。これは、データのチェックや予備機を用いた実験室でのテストなどから、以下が原因であることがわかった。

1. 分光器アレイセンサーのピクセル毎のゼロレベルの差および感度ムラによるランダムでないノイズ成分がかなり大きい。
2. 分光器の温度変化による波長シフトや分解能変化があり、補正が難しい。
3. そもそもNO₂の吸収量が不足している。

そこで、これに対し以下のような改良を行った。

1. 事前にピクセル毎のゼロレベルの差および感度ムラの較正用データを取得する。
2. 分光器の温度変化を抑えるため、保冷剤を用いた温度安定機構を構成する。
3. NO₂の吸収量を増やすため、光路長の長くなる日出直後の観測を行う。

1については、2013年観測時にはピクセル毎のゼロレベルや感度の差はほばないものと考えており、例えばゼロレベルは全チャンネルの平均値を用いた。しかし実際に解析してみると長時間積分してもピクセル毎のばらつきが一定以上には小さくならず、そこでようやく感度ムラ等が無視できないことが分かったものの、ピクセル毎のゼロレベルや感度ムラの測定データは取っていなかったため感度ムラ等はノイズ成分として扱うしかなかった。そこで今回は、事前に光の入っていないゼロレベルおよび白熱球を用いた波長方向に細かい構造のない感度ムラ較正用スペクトルをそれぞれ30分間（1000スペクトル程度）測定した。これらを用いてピクセル毎に較正することで、かなりS/Nを向上させることができた。

2については、一般的にはヒーターと温度コントローラを搭載して能動的に温度安定化を図るが、この方法では消費電力が増えてバッテリー容量を大きくする必要があり重くなると考え、保冷剤を用いることにした。保冷剤は、凝固点付近では相変化に伴う熱放出（または吸収）により一定温を長時間維持可能である。過去の観測では装置内の温度は放球前の室温付近から放球後に0℃付近へと下がっていくことが多かったため、凝固点がおよそ5℃、10℃の保冷剤を2種類用意し、事前のテストの結果5℃(実際の凝固点は4℃弱)のものを使用した。写真1は分光器搭載部であるが、上段の白い袋状のものが保冷剤で、100gの保冷剤2個で分光器を両側から挟み込み、全体を発泡スチロールの保温ケースに収納する形とした。

図1に2016年観測時の分光器温度（赤）と気温（黒）の放球後の時間変化を示す。放球時の気温は18℃程度であったため、観測器は前日から保冷剤をセットした状態で5℃の恒温槽に保管しておき、当日放球準備直前に取り出した。その後放球までの90分程度で分光器温度（温度センサーの精度は0.1℃程度）は10℃弱まで上昇していたので保冷剤は液体の状態であったと考えられるが、放球後に外気温の下降とともに下がり、観測を開始する高度16 kmに到達する頃には4.3℃とほぼ凝固点に達し、高度20 kmで3.8℃に達した後は最高高度の45 km付近に到達するまで凝固点付近における液体から固体への相変化によってほぼ一定温を維持し0.4℃程度の変動に収まっている。つまり、今回は観測時間帯にちょうど保冷剤の凝固点付近の温度を維持することができ、分光器の温度を1℃以内で安定化することに成功した。

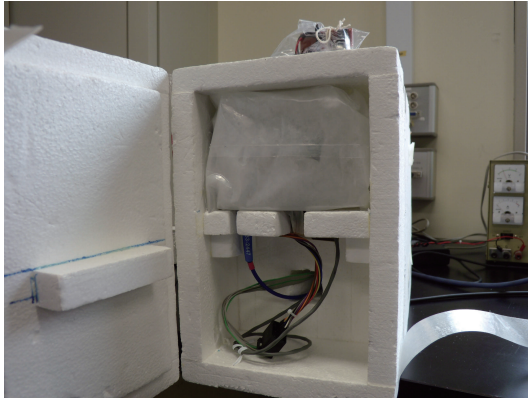


写真1. 観測装置の分光器搭載部

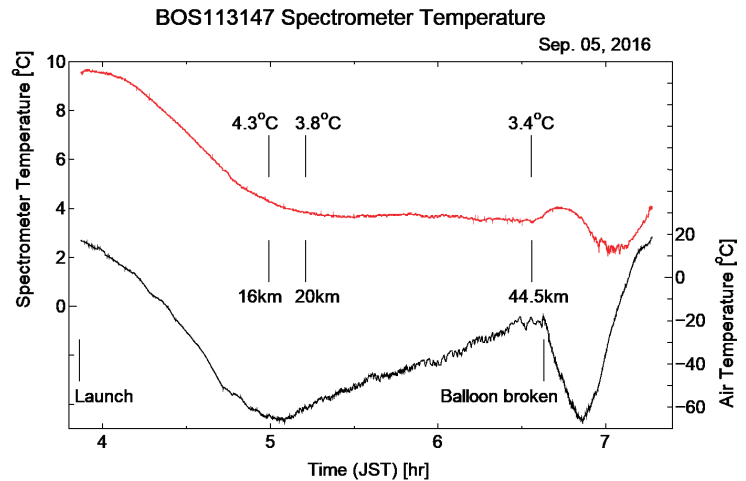


図1. 分光器温度(赤)と外気温(黒)の放球後の時間変化

この結果、分光器の波長シフトは1ピクセル以下に抑えることができた。図2に高度1 km毎に平均したスペクトルを、図3にその2136ピクセル(およそ481.86 nm)付近の拡大図を示す。これはまだ感度等の補正をする前のスペクトルであるが、このように分光器の温度安定化によって波長シフトをほぼゼロにすることができ、解析時にスペクトルの積算がやりやすくなった。

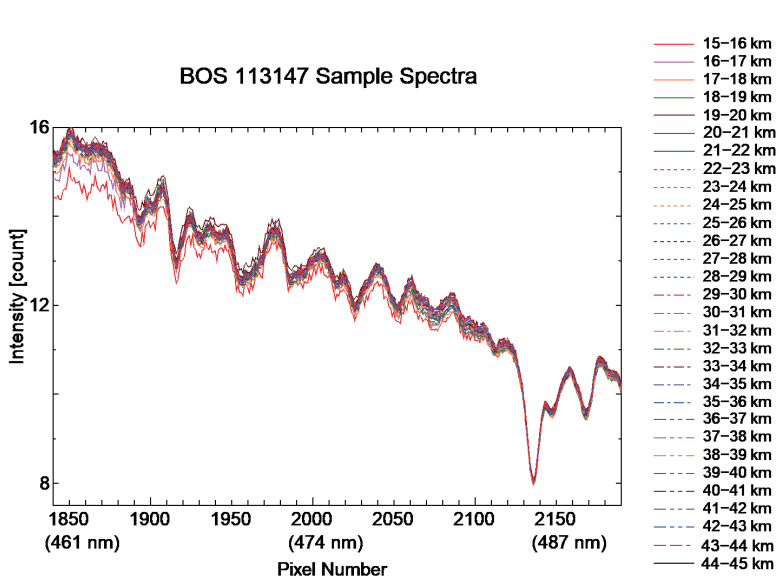


図2. 高度1km毎に平均したスペクトル

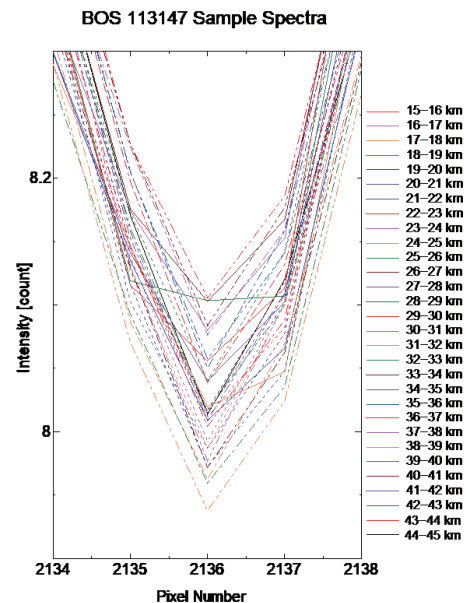


図3. 2136ピクセル(およそ481.86 nm)付近の拡大図

3については、2013年の観測では日出後に放球し、高度15-40 km付近の観測時の太陽天頂角は60-50°程度であった。これを、観測を開始する高度15 km付近で日出(太陽天頂角90°)を迎えるように放球すると、光路長を長くとれるため2013年の観測時の10倍程度の吸収を期待できることから、日出1時間程度前の放球を行うこととした。これに伴って日出直後にほぼ水平方向から入射する太陽光を観測器内に導くため、図4及び写真2に示すようにアルミニウム製の球面鏡を入射口の直上に設置した。球面鏡には結露防止用のヒータも設置した。なお、可視から紫外領域の高反射率を確保できるコーティングを施した凸面ミラーで半球状のものは市販されていないため、今回はアルミニウム球を利用し、放球直前に研磨剤で表面の酸化皮膜を取り除くことで紫外域の反射率を確保している。

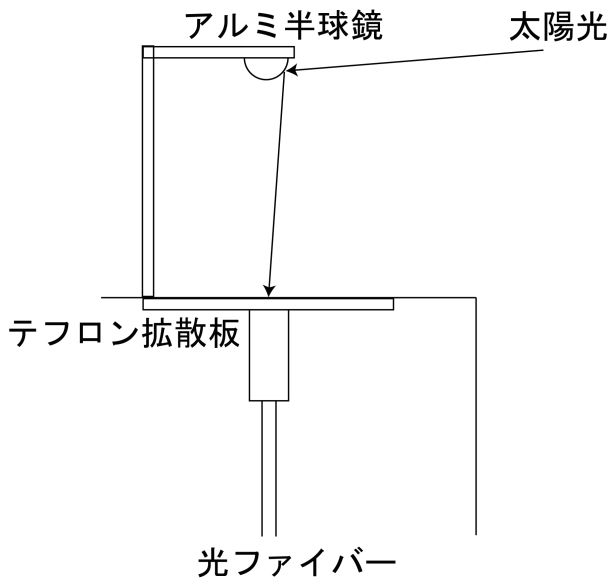


図4. 日出時観測に対応した入射光学系

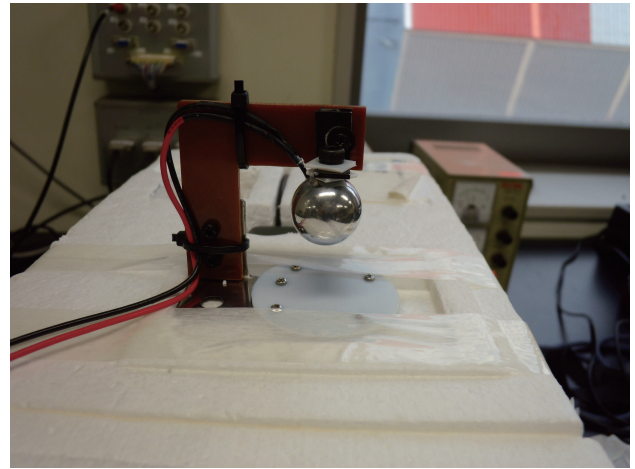


写真2. 観測装置の入射光学系部

4. オゾン、二酸化窒素のカラム量及び高度分布の導出

O_3 の高度分布を導出するには従来のフィルター型と同様に300 nm, 420 nm付近のスペクトルの強度比を用いる方法もあり別途解析中であるが、今回の観測では NO_2 にターゲットを合わせて日の出前の放球とした関係で300 nm付近の紫外線強度は高度30 km以下ではほぼゼロとなっており、より長い波長と組み合わせた解析を試みているところである。そのためここでは300 nm付近からのオゾン導出結果は示さず、 NO_2 導出を主目的とした460-490 nmのスペクトルから O_3 および NO_2 のスラントカラム量と高度分布を導出した結果について報告する。この解析では地上での差分吸光分光 (DOAS) 観測用に開発されたプログラム<NLIN_D>⁸⁾を応用しており、事前の放射輝度シミュレーションにおいては放射伝達コード<SCIATRAN>⁹⁾を利用した。

スペクトルは2秒間隔(およそ高度10m毎)で取得しているが、このままではS/Nが不十分なのでこれを高度15-45 kmの範囲で1km毎に積算する。この際、今回は温度安定化により波長シフトは1ピクセル以下であるのでゼロと見なしている。その後、ピクセル毎のゼロレベル、感度ムラ、波長の較正、分光器の波長感度特性の補正を行った。

まずは成層圏の NO_2 積分量を求めるために高度17.5 km (17.0-18.0 kmの積算) のスペクトルと高度44.5 km (44.0-45.0 kmの積算) のスペクトルとからこの間のスラントカラム量を求めた結果を図5に示す。ここでは17.5 kmと44.5 kmのスペクトルの比の対数を取っており、これに波長毎の吸収断面積でフィッティングを掛けた時の係数がスラントカラム値となる。なお、誤差はフィッティング残差の二乗平均値をスラントカラムに換算し、これと最適解のスラントカラム値との比として表している。スペクトルには明らかに NO_2 の吸収が見られ (図5右)、誤差9.9%でスラントカラム量を求めることが出来た。2013年の観測では吸収が見られずほぼノイズのみであったのに比べると、まだ若干ノイズではあるものの NO_2 の成層圏積分量が求まっており、装置の改良と日出直後の観測の効果が十分出ていることが確認できた。なお、得られたスラントカラム量 4.9×10^{16} [molecule / cm²]の精度については直接比較できるデータはないが、同じ北海道の陸別町での地上可視・紫外分光器による日出時 (太陽天頂角が90°) の観測値と比較してみると、陸別でのスラントカラム量は季節にもよるが $4-7 \times 10^{16}$ [molecule / cm²]程度である²⁾。 NO_2 は主に成層圏に分布するものの対流圏にもある程度存在するので地上からのスラントカラム量に比べて高度17.5 km以上のスラントカラム量は1-2割少なくなるであろうこと、観測時の高度17.5 kmでの太陽天頂角が88.4°と若干日出時より光路長が短く

なっており、太陽天頂角が 90° の場合に比べてスラントカラムは高度分布にもよるもののやはり1-2割少なくなることなどを考慮すると、 4.9×10^{16} [molecule / cm^2]という値は妥当と考えられる。また、 O_3 については図5左に示すように誤差3.6%でスラントカラム量 1.08×10^{20} [molecule / cm^2]が得られた。こちらも陸別と比較すると、陸別の日出時のスラントカラム量は9月では $1.2\text{-}1.4 \times 10^{20}$ [molecule / cm^2]程度²⁾であり、 O_3 も主に成層圏に分布し対流圏成分は全量の1割程度であることや上述の光路差を考慮すると妥当な値と考えられる。

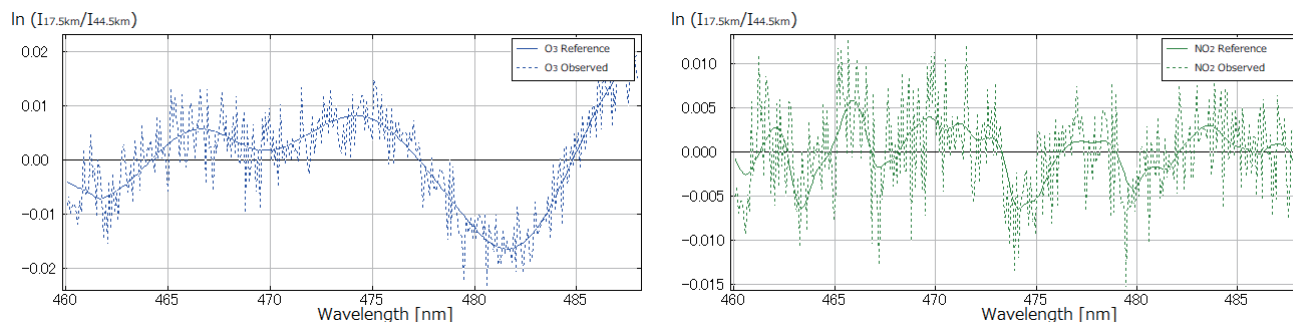
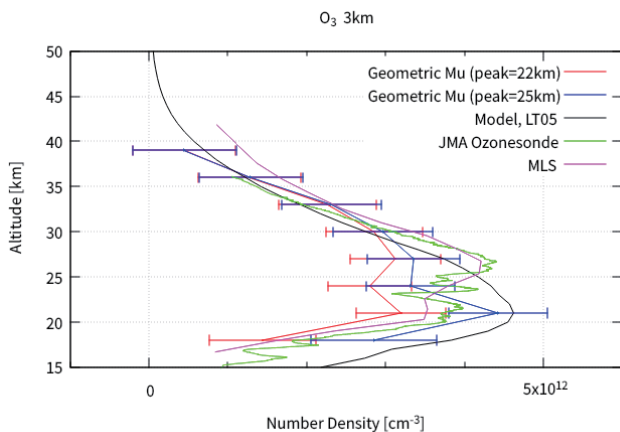
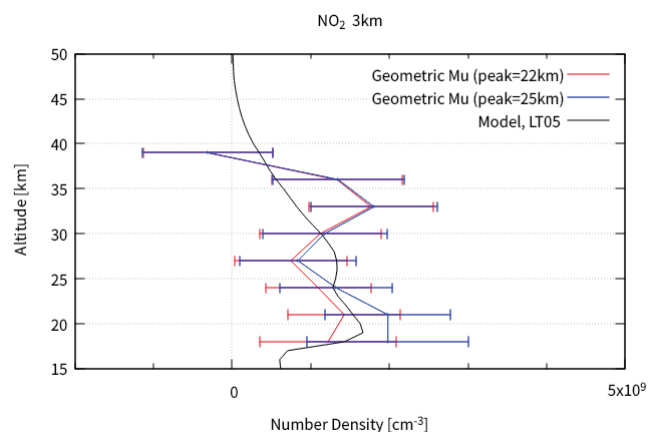


図5. 17.5 - 44.5 kmの O_3 (左), NO_2 (右)のスラントカラム量導出時のスペクトルフィッティング結果。いずれも破線が観測スペクトル、実線が最適フィッティング結果を示す。

次に高度分布の導出であるが、上記の1 km毎に積算したスペクトルから差分を取って1 km毎の NO_2 数密度の高度分布を導出して見たところ、誤差が大きすぎてそのままでは精度が出ないことがわかった。そこで、個々のスペクトルを積算する前に質のいいものだけを選ぶことにした。気球は上昇中に振り子運動など揺れがあるため、入射口に入る光量は変動する。そのため、場合によってはほぼ光が入らずノイズだけのスペクトルになることもある。ある程度光量が確保されてS/Nのよいものだけを選んで積算すれば、積算数は減るもののS/Nは向上するのではないかと考えたのである。光量の閾値を何通りか試した結果、積算範囲の最大光量の33%以上のもののみ積算することにし、さらに高度分解能も3 kmに落とす(積算高度範囲を3 kmとする)ことにした。その結果導出された O_3 及び NO_2 の高度分布を図6, 7に示す。なお、各高度でのスラントカラム量から数密度に変換する際には幾何的光路比¹⁾を用いており、その計算には高度分布を仮定する必要があるため、 O_3 , NO_2 ともにピークが22 km, 25 kmの2種類の高度分布を仮定して幾何的光路比を求めてから高度分布を導出した結果をそれぞれ赤線、青線で示している。また、各高度の数密度のエラーバーはフィッティング残差の二乗平均値をスラントカラムに換算し、これと最適解のスラントカラム値との比として表している。比較のために化学輸送モデル<Bremen 3D CTM>^{10), 11)}の観測時刻に対応した高度分布(LT05)を示し、 O_3 については気象庁による札幌のオゾンゾンデの結果¹²⁾(観測日は9月7日で2日異なる)および衛星観測Aura/MLSによる同日の最も近い位置(41.47°N, 146.84°E)の結果も示した。図6を見ると、 O_3 については25 kmをピークと仮定した幾何的光路比を用いた結果がオゾンゾンデやAura/MLSとエラーバーの範囲内でほぼ一致している。図7の NO_2 については高度27 km付近に極小が見られるなどモデル結果とは若干異なるが、全体としてはLT05のモデルとファクター程度の違いに収まっている。以上から、高度分解能は3 kmに落とさざるを得なかったものの、 O_3 , NO_2 ともに成層圏高度分布を導出することができた。

図6. 高度分解能3 kmで導出したO₃高度分布図7. 高度分解能3 kmで導出したNO₂高度分布

5. まとめ

スペクトル取得型光学オゾンゾンデを開発し、2016年9月5日に大樹町で観測を行った。分光器を保冷剤で挟むことで観測時の温度変化を1℃以内に保つことができ、日出時に下部成層圏（高度15 km 付近）に到達するよう放球することでNO₂吸収量を確保することができた。460-490 nm のスペクトルから高度17.5-44.5 kmのスラントカラム量を導出したところ、O₃については 1.08×10^{20} [molecule / cm²]が誤差3.6%で得られ、NO₂については 4.9×10^{16} [molecule / cm²]が誤差9.9%で得られた。高度分布については、質のよいスペクトルを選別した上で高度3 km 毎に平均することで、O₃, NO₂ともに成層圏高度分布を導出することができた。

謝辞

解析プログラム<NLIN_D>と放射伝達コード<SCIATRAN>は、Andreas Richter 氏, Alexei Rozanov 氏, John P. Burrows 氏 (Institute of Environmental Physics, University of Bremen) が開発したものを使用しました。また、彼らには解析にあたって有用なコメントを頂きました。

参考文献

- 1) 忠鉢繁, 宮川幸治, ドブソン分光光度計, 気象研究ノート, 194号, 1999, 207-217.
- 2) Koike, M., Y. Kondo, W. A. Matthews, P. V. Johnston, H. Nakajima, A. Kawaguchi, H. Nakane, I. Murata, A. Budimoyo, M. Kanada, and N. Toriyama, Assessment of the uncertainties in the NO₂ and O₃ measurements by visible spectrometers, J. Atmos. Chem., 32, 1, 1999, 121-145.
- 3) Murata, I., K. Sato, S. Okano, and Y. Tomikawa, Measurements of stratospheric ozone with a balloon-borne optical ozone sensor, International Journal of Remote Sensing, 30, 2009, 3961-3966.
- 4) 村田功、佐藤薫、山上隆正、岡野章一、富川喜弘, GPS搭載型光学オゾンゾンデの開発, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-08-001, 2009, 57-62.
- 5) 岡林昌宏, 田口真, 岡野章一, 福西浩, 高高度気球搭載光学センサーによる成層圏オゾンの観測, 宇宙科学研究所報告特集, 第32号, 1995, 105-111.
- 6) 岡林昌宏, 村田功, 福西浩, 高高度気球搭載光学オゾンゾンデを用いた成層圏オゾン高度分布の観測, 宇宙科学研究所報告特集, 第40号, 2000, 45-54.
- 7) Okano, S., M. Okabayashi, and H. Gernandt, Observations of ozone profiles in the upper stratosphere using a UV sensor on board a light-weight high-altitude balloon, Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue, 51, 1996, 225-231.
- 8) Richter, A., Absorptionsspektroskopische Messungen stratospha"rischer Spurengase u"ber Bremen, 53° N, PhD-Thesis, University of Bremen, June 1997 (in German).
- 9) Rozanov, V.V., A.V. Rozanov, A.A. Kokhanovsky, J.P. Burrows, Radiative transfer through terrestrial atmosphere and ocean: Software package SCIATRAN, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 133, 2014, 13-71, ISSN 0022-4073, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.07.004>.
- 10) Sinnhuber, B.M., Weber, M., Amankwah, A., Burrows, J.P. Total ozone during the unusual Antarctic winter of 2002. Geophys. Res. Lett. 30, 2003, 1580, doi:10.1029/2002GL016798.
- 11) Sinnhuber, M., Burrows, J.P., Chipperfield, M.P., Jackman, C.H., Kallenrode, M., Ku'nzi, K.F., Quack, M. A model study of the impact of magnetic field structure on atmospheric composition during solar proton events. Geophys. Res. Lett. 30, 2003, 1818, doi:10.1029/2003GL017265.
- 12) World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre: <https://woudc.org/data/explore.php>

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

斎藤 芳隆^{*1}, 中篠 恭一^{*2}, 秋田 大輔^{*3}, 松尾 卓摩^{*4}

Improvement on airtightness of the super-pressure balloon by double-layer gore

SAITO Yoshitaka^{*1}, NAKASHINO Kyoichi^{*2}, AKITA Daisuke^{*3}, MATSUO Takuma^{*4}

ABSTRACT

The super-pressure balloon is a balloon keeping its absolute pressure higher than the atmospheric pressure to keep its lift constant, without depending on the sun irradiation. In addition to withstand the differential pressure, the balloon envelope is required to be airtight. Since the airtightness is also broken by defects in the envelope, in addition to its gas permeability, the high level of the quality control of the envelope material and its manufacturing process is required. Here, we propose to use a double-layer film as the balloon envelope to make it airtight. It is considered that the airtightness will be improved by the following mechanism; the inner layer is pressed to the outer layer by the gas inside the inner layer to make small gas passage among the two layers where is the flow channel of the leaked gas through defects in the inner layer. After confirming its principle by experiments using polyethylene bags and rubber balloons, we applied the technique to a 10 m³ super-pressure balloon with a polyethylene film by inserting a rubber balloon inside the balloon. Originally, the gas leak rate of the balloon was the level of 4,000 Pa·h⁻¹, when applying the differential pressure of 1,000 Pa. After inserting the rubber balloon, its gas leak rate was suppressed to the level of 3 Pa·h⁻¹. The leak rate is slightly smaller than 7 Pa·h⁻¹, which is the leak rate expected from the permeability of the rubber. The effectiveness of the method as the application to the super-pressure balloon was confirmed.

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

doi: 10.20637/JAXA-RR-19-002/0002

^{*} 2019 年 11 月 26 日 受付 (Received November 26, 2019)

^{*1} 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)

^{*2} 東海大学工学部 (School of Engineering, Tokai University)

^{*3} 東京工業大学環境・社会理工学院 (School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology)

^{*4} 明治大学理工学部 (School of Science and Technology, Meiji University)

概要

スーパープレッシャー気球は、気球内部の圧力を常に大気圧よりも高く保つことによって、日照の有無にかかわらず浮力を一定に保つ気球である。気球の皮膜は、差圧に耐えることに加えて、気密性が要求される。気密性は皮膜のガス透過率に加え、皮膜の欠陥によっても悪化するため、皮膜の素材や製造工程の品質管理が高いレベルで必要とされている。本論文では、気球の皮膜を二層化することで気密にする方法を提案する。二層の皮膜を用いて気球では、内層が外層にガス圧力によって押しつけられるため、内層の欠陥から漏れ出したガスの流路である層間の流量が低減され、気密性が向上すると考えられる。この原理をポリエチレンの袋とゴム気球を用いた実験で実証した後、体積 10 m^3 のポリエチレン製のスーパープレッシャー気球の中にゴム気球を入れる実験を実施した。元々、この気球は $1,000 \text{ Pa}$ の差圧をかけた際のガス漏れ率は $4,000 \text{ Pa} \cdot \text{h}^{-1}$ であった。ゴム気球を入れた後、 $3 \text{ Pa} \cdot \text{h}^{-1}$ と抑制された。このガス漏れ率はゴムの透過率からの予想値、 $7 \text{ Pa} \cdot \text{h}^{-1}$ よりも少し小さい値である。この手法がスーパープレッシャー気球の気密性の向上に有効であることが確認された。

1. はじめに

スーパープレッシャー気球は、気球内部の圧力を常に大気圧よりも高く保つことによって、昼夜の浮力変動を防ぎ、長時間の飛行を可能にする気球である。NASA は直径 100 m クラスの気球を開発し、2016 年より科学観測実験への利用を開始した [1]。また、直径数 10 m クラスの気球は CNES[2] や LOON[3] によっても開発、運用が進められている。我が国においては、1990 年代より精力的な開発が進められており [4][5][6]、近年では、我々が中心となって皮膜に網をかぶせ耐圧性能を高める手法での気球の開発が進められている [7][8]。

スーパープレッシャー気球の要求性能の一つは気球皮膜の気密性である。我々の気球では $10 \mu\text{m}$ 厚のポリエチレンフィルムを利用している。このフィルムの He ガスの透過率は十分に小さいことが確認されている [9] が、気球として利用する際には、フィルム自体の欠陥や溶着部に発生した欠陥、さらに、製造時に発生した傷の影響も受けることとなり、しかもその場所の特定は極めて困難である。たとえば、BS13-04 実験で飛行した体積 10 m^3 の気球は $6,280 \text{ Pa}$ と十分な耐圧性能が確認されたが、 0.4 mm^2 相当の穴からガスが漏れていることも判明している。しかし、事前の試験では穴の特定には至っていない。この問題は、特に、表面積と体積の比が相対的に大きくなる小型気球の場合に、顕著な影響がある。

本論文は、この対策として、気球の皮膜を二層化することを提案するものである。次章に原理を、3 章でその検証実験の結果を、4 章で皮膜に網をかぶせた気球への適用結果を示し、5 章で結果をまとめる。

2. 皮膜の二層化をによる気密性の向上原理

図 1 のように、気球の皮膜を二層にし、内側の袋にガスを注入してを膨張させる場合を考える。この際、内側の皮膜 (以後、内層) にも、外側の皮膜 (以後、外層) にも欠陥があるものとする。内側に注入されたガスが気球の外に流出する場合、内層の穴、内外層の間、外層の穴を順に通過することとなるが、内層は外層に圧迫されているため、内外層間の流路が狭められ、ガスが通過しにくくなると考えられる。

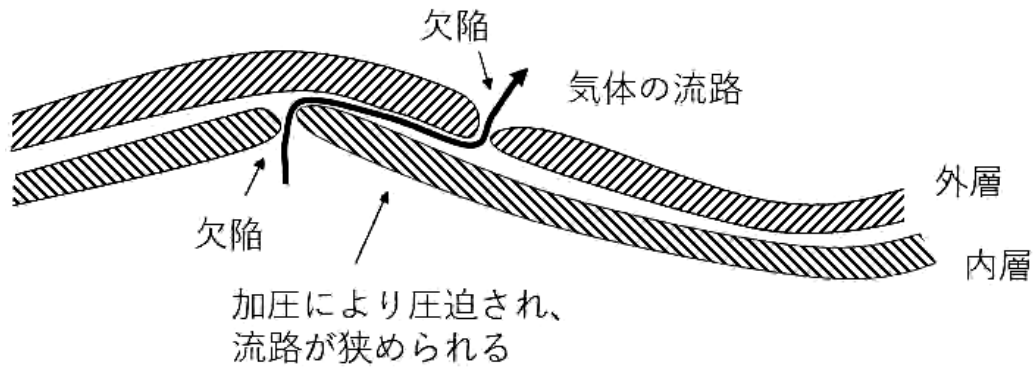


図 1: 皮膜の二層化による気密性向上の原理。

ピンホールの影響を低減させる方法としては、フィルムを成膜後、重ねて溶着する方法が知られている。しかし、最終的に製作されたフィルムを加工する段階で傷付けてしまった場合には、気密性を期待することができない。一方、本方法では、加工時に傷つけてしまったとしても、内外層で傷が重ならない限り気密性を保つことができる。

一つの実用的と思われる適用方法は、ポリエチレン気球の内側にゴム気球を入れることである。この場合、ポリエチレン皮膜の方は加工時から満膨張時と同じ大きさとなっているのに対し、ゴム気球は加圧に伴って膨張するため、加工時に同じ場所を傷つける恐れはない。さらに、ゴム気球の価格はポリエチレン気球と比較して圧倒的に低く、コストに対する影響が小さいこともメリットである。そこで我々は、皮膜に網をかぶせ耐圧性能を向上させた気球の内側にゴム気球を入れ、気密性能を向上させる可能性を検討することとした。

3. 原理実証試験

本方式の気密性の鍵は、いかに内外層間の流路が狭められるかにある。流路の太さは、境界面の凹凸や、フィルムに存在したシワの有無によって異なると考えられ、場合によっては、ほとんど気密性の向上が見られないことも考えられる。そこで、まず、市販のポリエチレン袋とゴム気球を用いた簡単な原理実証試験を実施した。

市販の幅 65 cm、長さ 80 cm、厚み 15 μm のポリエチレン袋 (半透明ごみ袋 45l 用 販売者：日本生活共同組合、製造者：蝶理株式会社) に 30 g ゴム気球 (トーテックス製 TA-30) を入れ、ガス漏れの試験を行った。ポリエチレン袋には、そのまま (No.1)、ぬい針 (ϕ 0.71) で頭部に 4 箇所穴をあけたもの (No.3)、8 箇所穴をあけたもの (No.4) を用意した。これらの袋の内側にヘリウムガスを入れたゴム気球を入れ、ゴム気球のみの状態のもの (No.2) と共に、全体重量の時間変化を測定した。実験の様子を図 2 に示す。測定は 38 時間に及び、その間の気温は 20.7~21.4 $^{\circ}\text{C}$ とほぼ一定であった。時間軸を適当にずらし、初期浮力が同一となるように示したのが図 3 である。ポリエチレン袋をかぶせたものは、穴の有無にかかわらず、同じ浮力の低下を示しており、ゴム気球だけのものよりも低下率は抑えられている。No.3 の結果は 16 時間以降ではずれており、その原因は不明だが、少なくともそれ以前は他のポリエチレン袋をかぶせた場合と同じ速度で浮力が低下していることがわかる。

ポリエチレンのフィルム自体の透過率が大きく、ピンホールの寄与が無視できる可能性も考えられるため、ポリエチレンの袋のみにヘリウムガスをつめ、その浮力の時間変化を調べた。結果を図 4 に示す。

穴の数が多いほどガス漏れ量が大きく、穴がないものと穴4つの傾きの差は、穴4つと穴8つの傾きの差と同程度であり、穴の大きさもよくコントロールできていることがわかる。この結果より、ゴム気球がないならばピンホールのガス漏れへの寄与は、フィルム自体の透過率と同程度であり、ゴム気球を内側に入れたことによってピンホール経由のガス漏れが抑制されることが確認された。

以上の実験により、ポリエチレン袋をゴム気球にかぶせるとポリエチレン袋のピンホールの有無に拘わらず、ガス漏れが抑制できることがわかった。



図 2: ゴム気球とゴム気球にポリエチレン袋をかぶせた気球の試験の様子。

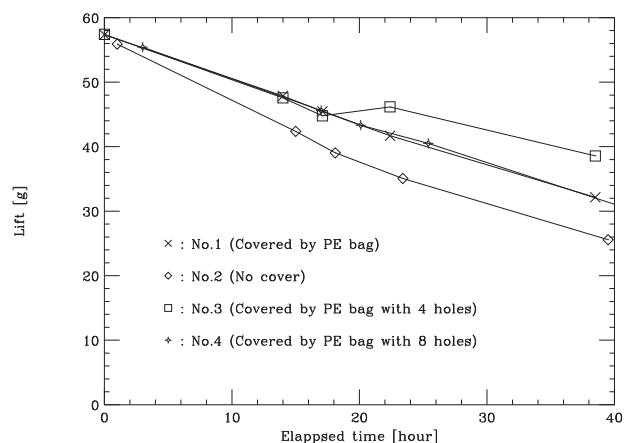


図 3: ゴム気球とゴム気球にポリエチレン袋をかぶせた場合の浮力の時間変化。

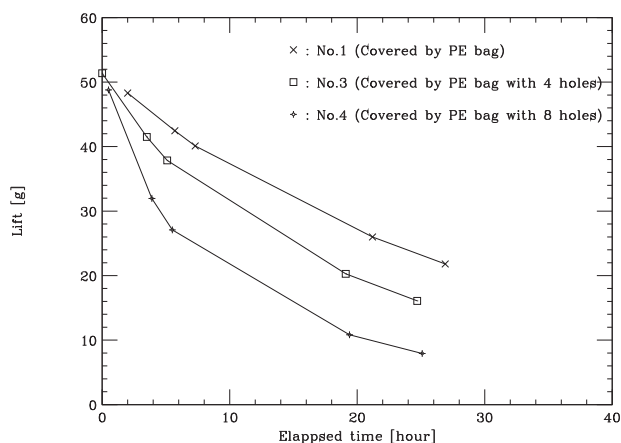


図 4: ポリエチレン袋の浮力の時間変化。

表 1: NPB001-8 気球の諸元

気球番号	NPB001-8
形状	かぼちゃ型
公称容積 (m ³)	9.3
直径 (m)	3.03
全長 (m)	3.97
高さ (m)	1.81
ゴア数	18
フィルム種類	ポリエチレン
フィルム厚 (μm)	10
耳幅 (mm)	20
網線強度 (N)	415
縦ロープ数	402
網交点間隔 (mm)	101
赤道ロープ間隔 (mm)	48
弁座直径 (mm)	530
頭部尾部ロープ強度 (N)	11,000
ガスガイド長さ (m)	10
気球重量 (kg)	9.8

4. NPB001-8 気球への適用

次に、皮膜に網をかぶせて耐圧性能を強化した直径 3 m の気球である NPB001-8 気球の中に、600 g のゴム気球 (トーテックス製、TA-600) を入れて気密性を評価することとした。

NPB001-8 気球の諸元を表 1 に示す。この気球は網をかぶせた気球の気密性を評価する目的で 2019 年 1 月に製作され、同月に気密試験を実施したところ、2,000 Pa に加圧した状態から 1,000 秒で 1,000 Pa まで減圧する程度のガス漏れ箇所があることが判明していた気球である。この気球を再利用し、二層化による効果を評価することとした。まず、ガス漏れ箇所の特定と、漏れ量を定量化する試験を実施した。

4.1 NPB001-8 気球単体でのガス漏れ試験と二層化の効果の確認

4.1.1 実験

実験は 2019 年 1 月 8、9 日、藤倉航装船引工場風洞実験室にて実施した。実験の経緯を表 2 に示す。

初日は、ポリエチレンフィルムのみの状態でのガス漏れの調査を行った。ガス注入口から圧縮空気の注入と圧力計測を兼ねたチューブを入れ、5 kPa レンジの差圧計 (DP-340) を用いて、気球内ガスと大気圧との差圧の計測を 0.5 秒間隔で実施した。加えて、温度湿度気圧ロガーである TR-73U を用いて大気圧と気温を 10 秒間隔で計測した。また、200、800、1,400、2,000 Pa で赤道長、および、子午線長を計測した。

0.9 %程度の濃度のアンモニアガスを気球に注入し、2,000 Pa まで加圧した。フェノールフタレイン溶液に浸した布を気球にあてて発色する箇所を探索することでガス漏れ箇所を調べるアンモニア試験を



図 5: ガス漏れ箇所。目視では特徴はない。

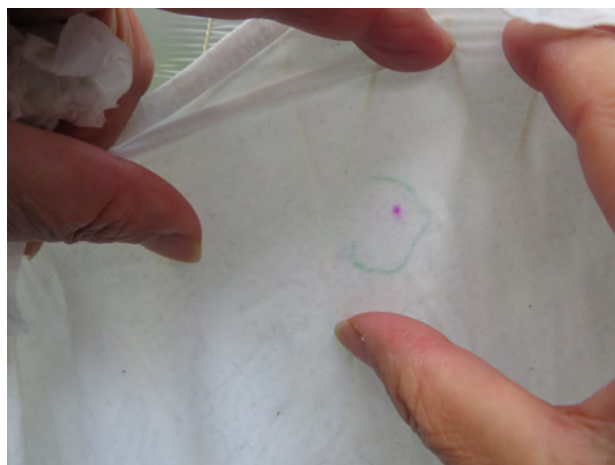


図 6: フェノールフタレイン反応による検出。

実施したところ、30箇所以上の穴からの漏れがみつかった(図5、6)。この試験の感度は補遺Aに示すように、 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa m}^3/\text{sec}$ 程度と考えられる。図5、6にあるようなフィルム表面からの点状の漏れに加え、極部からは低温テープに沿って線状の漏れが検出された。いくつかの穴については、ルーペで拡大するなど、目視での検出を試みたが、判別は不可能であった。再度、2,000 Paまで加圧し、翌朝まで計測を行った。

翌日、気球からガスを抜き、ヘリウムガスでの加圧を行った。ヘリウムガス量の節約のため、まず、ポリエチレン気球の内部に600 gのゴム気球(トーテックス製、TA-600)を入れ、空気で膨張させた。ゴム気球の体積が気球体積の半分程度に達したところで、ゴム気球の注入口を封じ、ゴム気球と気球の間にヘリウムガスを注入した。満膨張となったところでヘリウムリークディテクタ(RESTEK社製、P/N 22655)を用いて、漏れの検出を試み、前日に漏れが検出された箇所からは有意に漏れが検出されることを確認した。このセンサーのヘリウムガス感度は、 $1 \times 10^{-5} \text{ atom} \cdot \text{cc}/\text{sec}$ ($=1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$)であり、先のアンモニア試験よりも1桁感度が高い。アンモニア試験で漏れが見出されなかったパネルの下半面について重点的に調査を行ったが、新規に有意な漏れ箇所が検出されることはなかった。

気球からヘリウムガス、空気を抜き、ポリエチレン気球の内部に新しい600 gのゴム気球(トーテックス製、TA-600)を入れ、空気を注入して加圧した。このゴム気球は、膨張前に天頂からの距離をマーキングし、緯度による膨張の違いがわかるようにした。気球は順調に膨張し、1,000 Paに達したが、その時点でゴム気球がガス注入口から張出しているのが見受けられた(図7)。頭部も同様の状況にあるため、頭部と共に、図8、9のようにウレタン布とケブラーロープで張り出しを防止した後、再度加圧した。ポリエチレン気球とゴム気球の間には隙間が見られ、排出しきれなかった気体が溜っていた。最終的には2,000 Paに到達した(図10)。その後、翌朝まで計測を行った。

4.1.2 試験結果と議論

差圧の時間変化を図11に、大気圧の時間変化を図12に、気温の時間変化を図13に示す。1/8の夕方(18H)から1/9の朝(33H)にかけてのデータがポリエチレンフィルムだけの気球の場合であり、1/9午後(38H)以降のデータが内側にゴム気球を入れた場合のデータである。前者は940秒後には圧力が1,000 Pa減少している(すなわち、ガス漏れ率にして $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)のに対し、後者は下げ止まっており、二層化



図 7: 気球尾部の膨らみ。



図 8: ウレタン布による気球頭部の保護。



図 9: ウレタン布による気球尾部の保護。



図 10: 2,000 Pa に加圧したゴム気球入り気球。

表 2: 実験経緯

2019/1/8	
10:50	セットアップ開始
11:05	ガス注入開始
11:30	200、800、1,400 Pa で赤道長、子午線長計測
12:10	昼食
13:00	作業再開
13:10	2,000 Pa で赤道長、子午線長計測 ガス漏れ評価のために放置
14:50	作業再開、340 Pa まで低下 空気を放出し、アンモニアガスを充填
15:05	フェノールフタレイン反応により穴を検出
16:50	空気で 2,000 Pa まで加圧
17:00	撤収
2019/1/9	
9:10	作業開始、アンモニアガス放出
9:25	気球内にゴム風船を入れ、空気を注入
9:55	ゴム風船を封じ、気球との隙間に He ガス注入
10:10	He リークディテクタで検出検査 最大 560 Pa まで加圧
10:50	He ガスを放出
11:45	ゴム気球内に空気注入開始
12:07	1,000 Pa 到達 尾部が膨らんで飛び出したため、空気を抜く 昼食
13:05	作業再開、検出した穴を番号付、撮影
14:15	極部にウレタン布を入れ、ロープをかける
14:20	空気注入再開 フィルムとゴムの間に空気が入って飛び出す部分が散見される
14:23	270 Pa 到達
14:50	2,000 Pa 到達、撤収

表 3: 赤道長と子午線長

差圧 [Pa]	赤道長 [mm]	子午線長 [mm]
200	9,298	4,004
800	9,446	4,047
1,400	9,508	4,059
2,000	9,558	4,072

したことによって気密性が向上している。圧力が最初に下がるのは、ポリエチレンフィルムとゴムの間の気体が抜けたためと考えられる。

表 3、図 14、15 に周長と子午線長の圧力による変化を示す。NPB001-8 はフィルム長が網線長よりも 3 % 長く、大型気球用の金属リングが取り付けられた気球である。周長は設計したゴアの幅の総和と一致しており、子午線長は網線長とフィルム長の中間程度となっていたことがわかる。

アンモニア試験の感度は 1 気圧においては、 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{sec}$ の漏れに相当している。この気球の場合、940 秒で 1000 Pa 減圧する程度の漏れが発生している。体積 10 m^3 の気球内部の絶対圧の変化を 1 気圧での体積の変化として考えると、

$$10 [\text{m}^3] \times \frac{1000 [\text{Pa}]}{1.013 \times 10^5 [\text{Pa}]} = 0.1 [\text{m}^3] \quad (1)$$

の体積が 940 秒で漏れたこと相当し、 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$ の漏れ量である。これは、感度の 10^5 倍の漏れ量であり、図 5、6 に見られるような少量の穴が 30 個程度では説明がつかない量である。極部で見られた低温テープに沿った線状の漏れが主な漏れの要因であり、溶着加工をコテを使った手作業で実施していることに問題があると考えている。

4.2 長時間試験による二層化の効果の確認

2019 年 1 月 25 日に宇宙科学研究所において、前章で同様に NPB001-8 気球の内側に先の実験で用いた 600 g のゴム気球を入れ、空気で膨張させ、1,000 Pa の差圧まで加圧し、以後の差圧の時間変化を調べる実験を 2 月 14 日まで実施した。

気球尾部には、ゴム気球の口をたくしこみ、ゴム気球の口は連結コネクタを介して、ゴムチューブで差気圧計に接続した。データロガー GL500A により、3,000 Pa レンジの差圧計、熱電対 (気温)、熱電対 (尾部側の気球表面) のデータを 1 秒間隔で取得すると共に、温度湿度気圧ロガー TR-73U で気圧、気温を 1 分間隔で収集した。

結果を図 16~19 に示す。差圧は 500 時間近くにわたり正圧を保ち続けており、二層化することで大幅に気密性を向上させることができることが確認された。しかし、気球の差圧は気温、大気圧の影響を受けるため、このままでは漏れを定量的に把握することができない。

そこで、以下のようにモデル化を試みた。気球の体積を V 、気球ガス圧を P_b 、気球内ガスのモル数を n 、気体定数を R 、気球ガスの温度を T_b とすると、

$$P_b V = n R T_b \quad (2)$$

である。ここで、気球ガス圧 P_b は、大気圧 P_a と気球ガス圧の差圧 P_d の和である。

$$P_b = P_a + P_d \quad (3)$$

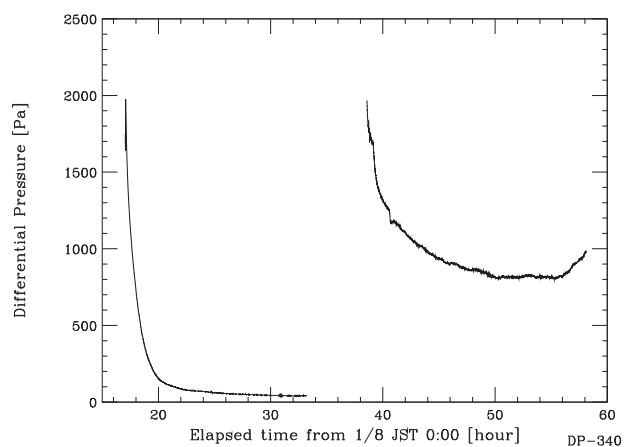


図 11: 差圧の時間変化。

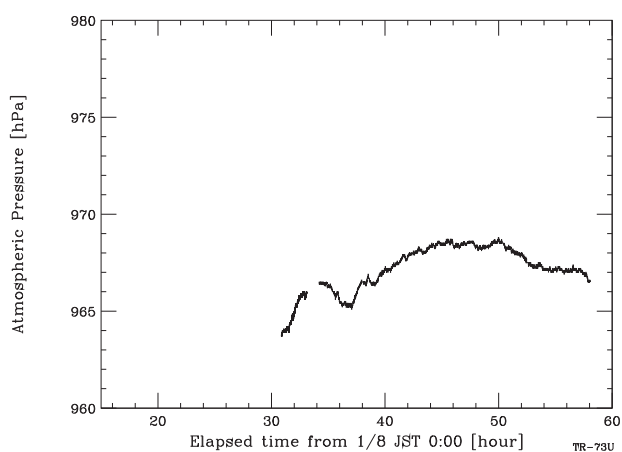


図 12: 大気圧の時間変化。

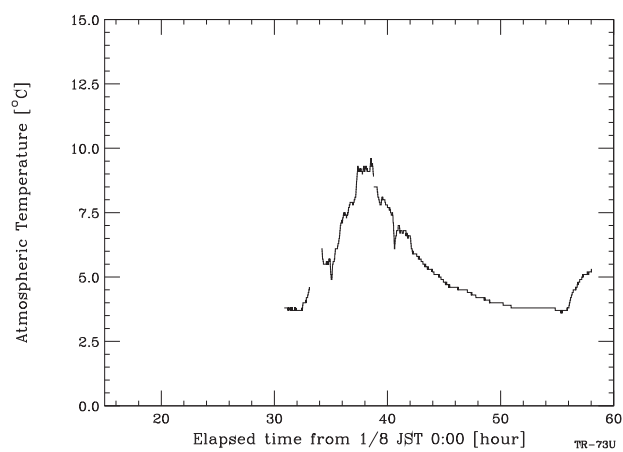


図 13: 気温の時間変化 (TR-73U)。

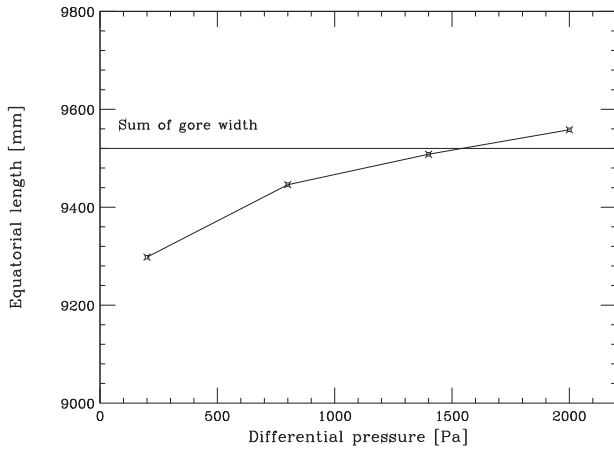


図 14: 赤道周長と差圧の関係。

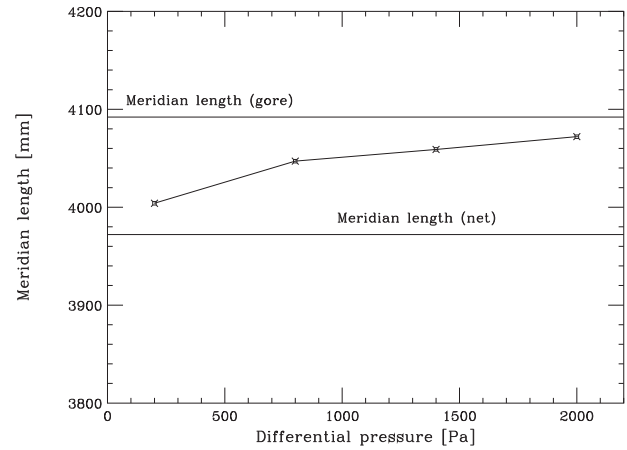


図 15: 子午線長と差圧の関係。

また、気球の体積が、差圧 P_d に比例して変化するとすると、その比例係数を a として、

$$V = V_0(1 + aP_d) \quad (4)$$

と表せる。したがって、ある時点の値を下付の 1 をつけて表すと、

$$(P_{a1} + P_{d1})V_0(1 + aP_{d1}) = n_1RT_{b1} \quad (5)$$

の関係があり、ある時刻 t でのモル数 $n(t)$ は、このときの値との比として、

$$\frac{n(t)}{n_1} = \frac{T_{b1}}{T(t)} \cdot \frac{(P_a(t) + P_d(t))(1 + aP_d(t))}{(P_{a1} + P_{d1})(1 + aP_{d1})} \quad (6)$$

と求めることができる。

さて、体積膨張係数 a は、かぼちゃ型では、体積が赤道長の 3 乗に比例していることを利用し、赤道長と差圧の関係から推定することができる。2019 年 1 月 8 日の測定結果の、200 Pa と 1400 Pa における関係から比例係数を求め、それを 3 倍することで、 $a=5.7 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ と求まる。この係数は、NPB2-2 気球での値 $6.7 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ [10] と同程度である。

このモデルを適用し、気球内ガスの温度として皮膜の表面温度を用いて、気球内ガスのモル数の時間変化を求めてみたが、うまく補正できないことがわかった。そこで、逆に気温や大気圧による変化が抑制されるように体積膨張係数 a を選んだのが図 20 である。図の黒線が $a=0$ (体積膨張なし)、赤が $a=1.2 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ 、青が $a=2 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ である。体積膨張係数は、 $1.2 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ 程度の値が尤もらしい。これは赤道長と差圧の関係で求まる値の 21 % と小さく、加圧に伴って、気球の形状がより扁平に変形していることを示唆している。

モル数の時間変化は滑らかな減少傾向の上にスパイク状の突起がのっているように見え、次第にモル数が減少していることがわかる。図中の右下がりの破線は、 $3 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ の傾きの直線である。内部の気体のモル数が $3 \times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ の割合で減少するのは、1,000 hPa の絶対圧の気体が密閉空間にあったとすると $3 \text{ Pa} \cdot \text{h}^{-1}$ でガスが漏れることに相当する。ゴム気球を入れる前の値 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ と比較すると、気密性は 3 桁の改善である。

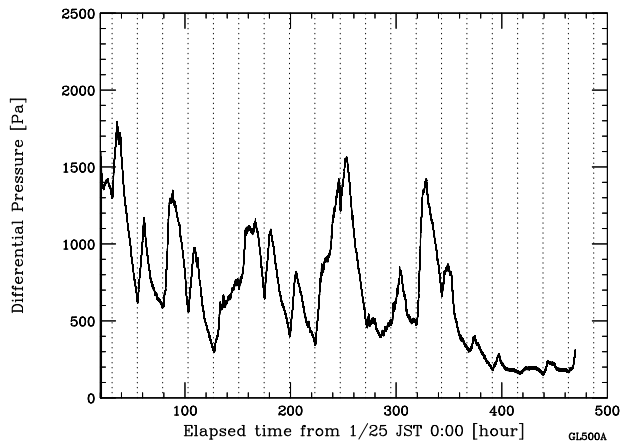


図 16: 差圧の時間変化。

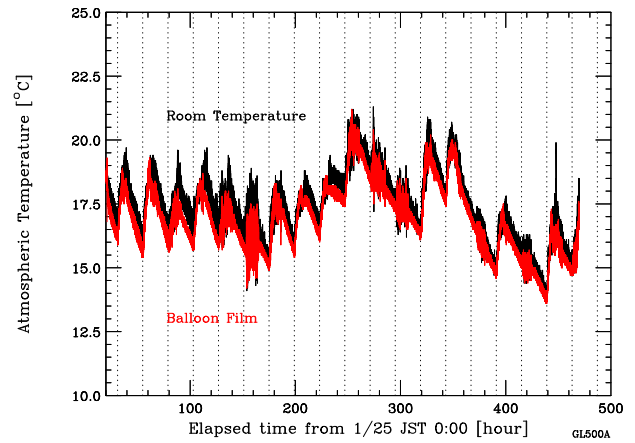


図 17: 気温の時間変化 (GL500A)。

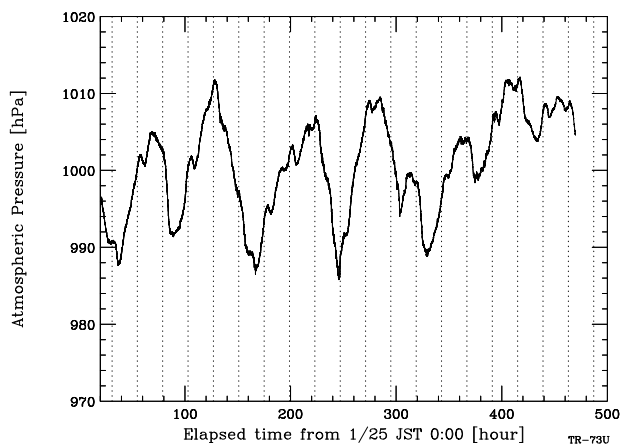


図 18: 大気圧の時間変化。

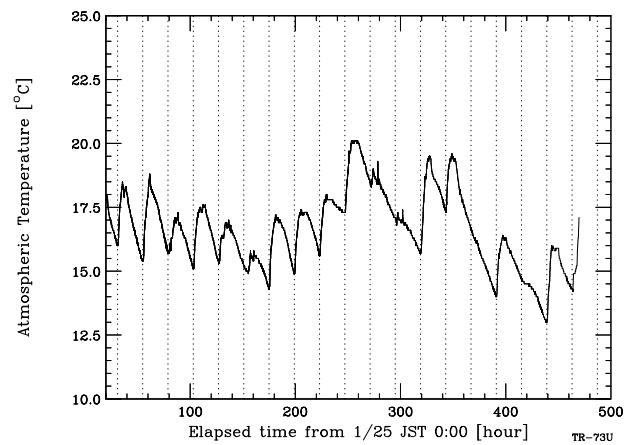


図 19: 気温の時間変化 (TR-73U)。

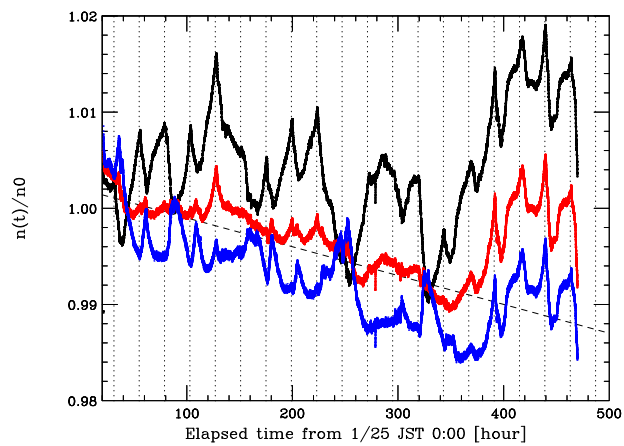


図 20: モル数の時間変化。

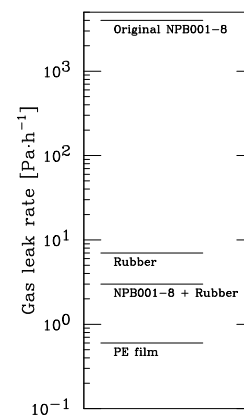


図 21: ガス漏れ量の比較。

ガス漏れ率の値は、このモデルに依存することなく求めることも可能である。データをみると、20H、85H、および、240Hのあたりでの、大気圧はいずれも996 hPa、皮膜温度も18 °Cで一致しており、大気圧や気温の影響を考慮せずに減少率を求めることができる。これは、図20において、モル数の相対比が、3通りの体積膨張係数に拘わらず、これらの時刻においては、ほぼ同一であることにも顕れている。

なお、400 H以降は、破線からのずれが大きくなっている。これは、この時期の差圧が200 Pa程度と低く、体積膨張係数が200 Paよりも大きい領域とで異っていることを反映しているものと考えられる。図14は上に凸であり、高い差圧がかかっていた場合と比較すると、200 Paあたりでの体積膨張係数は大きくなると推定されるが、破線の外挿値は、 $a=2\times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ とより大きい体積膨張係数の値の方が近く、この推定を裏付けている。

この結果とゴム皮膜のガス透過率を比較してみる。検査会社にて、常温(23 °C)におけるゴムシートの空気透過率を測定したところ、 $8.98 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ であった。膨張前のゴム気球の厚みは100 μm 、長さは1.7 mである。NPB001-8の設計子午線長(表1の全長)は3.97 mであるから、均一に伸びるとすると、長さのスケールで2.4倍、面積のスケールで5.5倍となり、ゴムの体積が保存しながら変形とすると厚みは $1/5.5$ となり、18 μm となる。また、2019年1月9日の膨張試験時には気球の頭部側が選択的に伸ばされ、膨張時には元のゴムの長さの4倍になっていた。この結果を用いると気球の頭部側のゴムの厚みは6 μm となる。ここでは、間をとって10 μm 厚みまで伸びたと考えることにする。NPB001-8気球の表面積は22 m^2 であるから、1,000 Paの差圧がかかった際の1時間あたりのガス漏れ量は、 $7 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ である。さらに、NPB001-8気球の体積が10 m^3 であり、大気圧が 10^5 Pa であることを考慮すると、ガス漏れ率は $7 \text{ Pa} \cdot \text{h}^{-1}$ と求まる。今回の調査での漏れ率はこの値より小さく、ゴムだけでなく、ポリエチレンフィルムが気密性に寄与している影響が見えている。なお、10 μm 厚のポリエチレンフィルムのガス透過率を検査会社にて測定したところ、 $8.36 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ であった。これは同じ厚みのゴムシートの値の9%である。また、今回の気球のガス漏れ率をポリエチレンフィルムのガス透過率と比較すると、5倍である。様々なケースでのガス透過率の比較を図21にまとめた。

ポリエチレンフィルムにくらべ、今回の気球のガス漏れが大きいことは、ポリエチレン気球とゴムシートとの密着度があまりよくないことを意味している。NPB001-8気球はポリエチレンフィルムの子午線長を網線長よりも3%長くとり、フィルムに余裕を持たせる設計であるため、フィルムに皺が発生し密着度が悪くなっている可能性がある。ポリエチレンフィルムの子午線長を網線長に近付けることで、密着度を改善できるものと考えられる。

図16~20の縦の点線は午前7時を示す。図20で見られるピークは、概ね午前7時に合致している。この時刻は、気温が下降から上昇へ転じるタイミングに相当する。ピークの要因として、気球のガス温度が皮膜温度よりも下がっている可能性が考えられる。

5. まとめと今後の展望

気球の皮膜を二層化することによって、気密性が向上する可能性を調査した。まず、市販のポリエチレン袋にゴム気球を入れた実験により、原理を実証した。次に体積10 m^3 でガス漏れ量の大きなNPB001-8気球の内側にゴム気球を入れることによって、1,000 hPaの気圧の元で、1,000 Paの差圧をかけた際に、 $3 \text{ Pa} \cdot \text{h}^{-1}$ のガス漏れ率まで向上させることができることが確認された。

体積100 m^3 程度の小型のスーパープレッシャー気球は、大気重力波観測実験等にニーズがあり[11]、軽量の気球の開発が期待されている。体積100 m^3 で大気圧60 hPaを飛翔する気球の重量配分は、フィルム重量が2.0 kg(20 μm 厚のポリエチレンフィルムを想定)、網重量が2.7 kg、極部構造など、その他

が2 kg 程度であるため、全重量は6.7 kg と想像される。ゴム気球として、1.2 kg のものを利用するとすると、全重量は7.9 kg となり、18 %の増加である。この重量増加のため、気球の到達高度は、気圧にして18 %高く、高度にして1.1 km 低くなるという問題が発生するが、体積を大きくすることで容易に解消できるため、ゴム気球を入れることで気密性を高める方法が適用できると考えている。今後、ポリエチレンフィルムとゴム気球の密着度を向上させた体積100 m³ クラスの小型スーパープレッシャー気球の開発を進める予定である。なお、市販のゴム気球のサイズは最大でも3 kg であり、数100 m³ 以上の気球の気密性を向上させるには、ゴム気球でなく、ポリエチレンフィルムで二層化する、といった対策が有効である。

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、東京工業大学 環境・社会理工学院の泉 芙由美さん、東海大学工学部の阿部 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翔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。

補遺 A 気球内ガスのアンモニア濃度と検出感度

気球にアンモニアガスを充填する際は、注入する空気の経路にアンモニア水溶液を配置し、アンモニア水溶液から自然に気化するアンモニアを充填している。この際のアンモニア濃度を推定した。

用いられているアンモニア水溶液は 500 ml 入りのビンに入った 28 % の水溶液である。体積にして 200 ml 程度が一回の試験で利用されている。仮に全量のアンモニアが蒸発したとした場合の濃度を求めてみる。

200 ml のアンモニア水中に含まれるアンモニアの重量は、アンモニア水の比重が 0.9 g/cm^3 であることを考慮すると、

$$200[\text{cm}^3]/0.9[\text{g/cm}^3] \times 0.28 = 62 [\text{g}] \quad (7)$$

である。アンモニアのモル数は 17 であるから、 25°C における体積は、

$$22.4 \times 10^{-3}[\text{m}^3/\text{mol}] \times \frac{273 + 25[\text{K}]}{273[\text{K}]} \times 62[\text{g}]/17[\text{g/mol}] = 0.09 [\text{m}^3] \quad (8)$$

である。気球の体積が 10 m^3 あることを考慮すると、0.9 % の濃度に相当する。JIS 2333:2002 によれば、体積分率 10 % のアンモニアガスを用いると $1 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3/\text{sec}$ の漏れを 995 秒の放置によって直径 1 mm のスポットとして検出可能とのことである。今回の試験では、濃度が 1/10 であり、時間にして 10 秒程度の積分に滞っていたため、時間が 1/100 であるため、 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa m}^3/\text{sec}$ 程度の漏れに感度があつたと推定される。

参考文献

- [1] Debora Fairbrother “Superpressure ballooon”, Proc. 2017 Scientific Ballooning Technologies Workshop, 2017
- [2] Andre Vargas, et al “The CNES 2017-2019 Balloon Program” AIAA Aviation Forum, 10.2514/6.2019-3054, 2019
- [3] Max Kamenetsky “Loon: A Balloon-Based Platform for Scientific Experiments in the Lower Stratosphere”, Proc. 2019 Scientific Ballooning Technologies Workshop, 2019
- [4] 矢島 信之、“自然型気球基本特性 — 高耐圧気球実現のための再検討と新しい設計・製作法の試み —” 宇宙科学研究所報告,39, pp.1-22, 1999
- [5] 井筒 直樹、他、“スーパープレッシャー気球の開発と試験” 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-07-009, pp.1-22, 2008
- [6] 井筒 直樹、他、“俵型スーパープレッシャー気球の開発 ” 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-10-003, pp.1-20, 2011
- [7] Saito, Y. et al. “Development of A Super-Pressure Balloon with a Diamond-Shaped Net” Adv. Space Res., 54, 8, pp.1525-1529, 2014
- [8] Akita, D. et al. “Development of a New Super-Pressure Balloon with A Net for High-Altitude and Long-duration Flights ” Trans. JSASS, Vol. 16, No.6, pp.470-475, 2018
- [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] Saito, Y. et al. “Recent Developments on the Super-Pressure Balloon with a Diamond Shaped Net — Ground Inflation Tests of Two 2,000 m^3 Balloons —” Submitted to Trans. JSASS, 2019

- [11] 富川 喜弘、他 “南極における大気重力波のスーパープレッシャー気球観測の現状報告” 平成 30 年度大気球シンポジウム集録、isas19-sbs-024、2018

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-19-002
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	2020年2月13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.

