

対流圏界面観測用超小型タンデム気球の開発 II

ISAS/JAXA : 斎藤 芳隆、山田 和彦
北海道大学地球環境科学研究所 : 藤原 正智

1 はじめに

熱帯の対流圏界面領域は、対流圏大気が成層圏へ入る主たる経路にあたり、地球規模での物質循環の理解にとって極めて重要である。たとえば、対流圏の湿った大気は成層圏へ入る直前にこの領域で凝結し乾燥する脱水過程を経ており、この過程で決まる成層圏の水蒸気量が放射過程を通じて地表気温の長期変動に寄与している、可能性が検討されている。しかし、対流圏界面領域における水蒸気、雲粒子、気温の同時観測データは極めて限られており、脱水過程の定量化、モデル化にはいまだ大きな不確かさがある。我々はこの観測を容易に実現する新しい飛翔体として、体積 100 m^3 のゼロプレッシャー気球と体積 10 m^3 のスーパープレッシャー気球を組合せ、搭載重量 3 kg を吊り下げ可能な超小型タンデム気球システムの開発を進めている。この気球は対流圏界面を朝夕に横切るように高度変動しながら、数ヶ月程度にわたり飛翔することが原理的に可能であり、この気球を用いて空気の履歴を追う観測をすることで、脱水過程の理解と定量化にブレークスルーをもたらすことを目指している [1]。

このシステムを具現化するためには、高い耐圧性能 ($\sim 10,000 \text{ Pa}$) を有し、かつ、高い気密性を有する軽いスーパープレッシャー気球が必要である。このため、皮膜に網をかぶせる手法 [2] を用いたスーパープレッシャー (SP) 気球の開発を進めている。この手法での大型気球は具現化されていないが、2013 年には体積 10 m^3 の SP 気球 (NPB001-5 気球) をゴム気球に吊り下げて飛翔させ、最大差圧 $6,230 \text{ Pa}$ に耐えること、 $5,600 \text{ Pa}$ の差圧に 2 時間以上耐えることが実証されている [3]。ただし、 0.4 mm^2 の穴が開いている状態に相当する微少なガス漏れが、主に極部のフィルムの溶着部から発生しており、この解消が課題として残っている。

我々は、ガス漏れの原因を探りつつ、 $20 \mu\text{m}$ 厚のフィルムで体積 10 m^3 の気球を試作し、膨張、破壊試験を実施した。また、長時間飛翔に伴って必要となるイリジウム通信モジュールの動作確認試験を実施した。本報告ではこれらの進捗状況を報告する。

2 シリンダー気球によるガス漏れ試験

ヘリウムガスの透過量の評価としては、 $10 \mu\text{m}$ 厚のフィルムにおける直径 44 mm の円形の領域からの透過量を温度を変えつつ測定した結果がある [4]。まず、この結果から $20 \mu\text{m}$ 厚のフィルムで作られた体積 10 m^3 のスーパープレッシャー気球からのガス漏れ量を推定してみる。測定結果を外挿して、飛翔高度における気温の $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ におけるガス透過度を求めると、 $350 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$ である。フィルムの厚みが倍であるため、透過度が半分となること、気球の表面積が 22 m^2 であること、飛翔する大気圧が 100 Pa であること、かける差圧が $10,000 \text{ Pa}$ であることを考慮して 1 日のガス漏れ量を求めると、 $3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ であり、圧力にして、 6 Pa の減圧である。したがって、たとえば、100 日間飛翔しても圧力損失は 600 Pa と許容できることがわかる。

ただし、この結果は限られたサイズの面積からの透過量をもとにしたものであり、利用するフィルムの面積 22 m^2 にわたってフィルムの特性が一樣であるかは必ずしも明らかではない。また、気球はフィルムを溶着することで製作されており、溶着部からの漏れも懸念される。そこで、フィルムが 1.5 m の折径のチューブ型であることを利用して、チューブの一端を溶着したシリンダー気球を製作し、中に閉じ込めたヘリウムガスの漏れを重量の変化としてモニターすることで、上の評価の妥当性、および、溶着部からも漏れを検証する試験を行った (図 1)。

図 2 に気球重量の時間変化を示す。No.1、2 の二つの試料での測定結果の違いは小さく、再現性のよい結果が得られた。また、No.1 は試験後に溶着部にテープを貼りつけ、ガス漏れを低減した状態での試験を行ったところ、顕著なガス漏れの変化は見られず、主なガス漏れの原因はフィルムからのガス透過と推定された。

これが、上の測定結果と矛盾しないか確認する。まず、 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ におけるガス透過度は、 $44,000 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{atm}$ である。フィルムの厚みが倍であること、ヘリウムの浮力が $1.02 \text{ kg}/\text{m}^3$ であることを考慮すると、ガス漏れ



図 1: シリンダー気球によるヘリウムガス漏れ試験の様子。

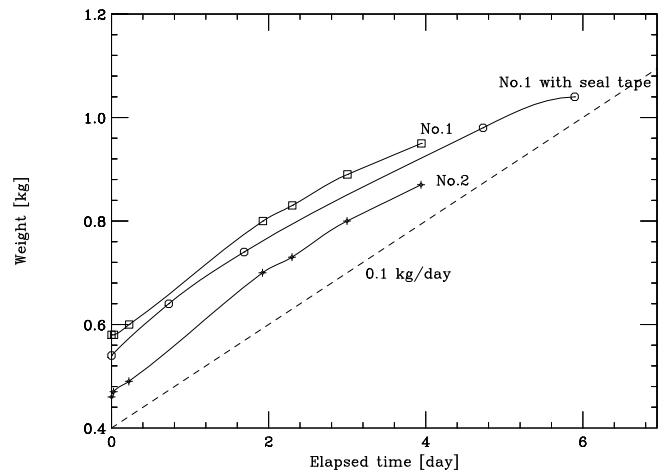


図 2: シリンダー気球によるヘリウムガス漏れ試験結果。No.1、No.2の試料による差は見られない。また、溶着部をテープで保護したNo.1からの漏れも同程度であり、フィルムからのガス透過が主な成分であることがわかる。その透過率は概ね0.1 kg/dayであった。

率は0.07 kg/dayと求まる。シリンダー気球の表面積の不定性を考慮すると、実験から得られた0.1 kg/m³と一致していると考えてよく、フィルムに局所的に大きな欠陥があるわけではないことがわかった。

3 体積10 m³のスーパープレッシャー気球の開発

タンデム気球に用いるSP気球は、2013年に飛翔試験を実施したNPB001-5気球をベースに開発を進め、以下の改修を施した体積10 m³の試験気球NPB001-6を製作した。

- 耐圧性能を高めるため、10 μm厚に変えて20 μm厚のフィルムを利用した。NPB001-5と同型の気球(NPB001-4)の耐圧性能は、常温で6,000 Pa、-30 °Cで9,370 Paであった[3]。耐圧性能はフィルム強度で決定されており、20 μm厚のフィルムを用いることで12,000 Paの耐圧性能が期待される。また、体積10 m³程度の気球ではこのフィルムの変更に伴う重量の増加は250 g程度であり、気球全体の重量3 kgに比べると限定的である。
- ゴアの子午線方向を網線長よりも3%長くとり、周方向の長さは、網線長で規定されるかぼちゃ型と同じ長さになるよう、細長いゴア形状とした。これは、フィルムに余裕を持たせることで、製作時の誤差の影響を軽減するためである。
- 極部のパッチフィルムを被せる際、本体フィルムのロードテープ部分は削除した後に、フィルム同士の溶着部をふくめた溶着を行い、隙間を排除した。
- 気球の極部は多数のフィルムが複雑に重なることとなる。重なり状況を入念に検討し、隙間が発生しない構成をとるように改造すると共に、小手で溶着した部分に低温テープを意識して被せ、漏れ留めを徹底した。
- 従来、気球頭部と尾部とでクラウンカバー、リングの設計が異っていたが、尾部のクラウンリング、頭部のクラウンカバーを用いることで、共通化した。

この気球の膨張、破壊実験を2015年11月11日、12日に藤倉航装船引工場風洞実験室にて実施した[5]。気球は図3に示すように、対称に展開した。

1,000 Paの差圧をかけた後、1時間放置してガス漏れの状況を調査した際の圧力の変化を図4に示す。1時間経過後の差圧は554 Paまで低下していた。この差圧の変化はガス漏れでなく、気温の変化や、気圧の変化、



図 3: 10,000 Pa 印加時

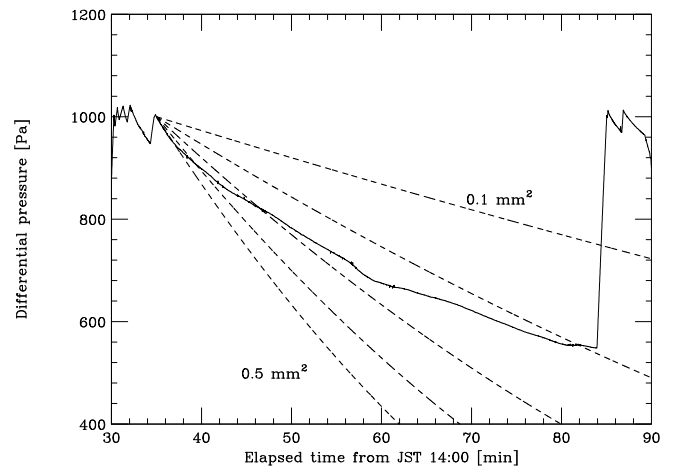


図 4: ガス漏れ試験時の差圧変化。

および、気球自体の膨張に起因している可能性もある。この時点で、気球の周長、子午線長を測定したところ、先に測定した際よりもいずれの数値も大きく、ヒステリシスが見られた。網がヒステリシスを示すことは知られている現象である [6]。再度、1,000 Pa まで加圧したところ、周長、子午線長ともにほぼ前回の値となり、ガス漏れがあることを示唆していた。このため、一度、気球から空気を抜き、アンモニアガスを注入した。

気球を再度加圧し、5,000 Pa の差圧がかかった状態でフェノールフタレイン溶液に浸した布を気球に押し当て、ガス漏れを調査したところ、気球頭部から空気が漏れていることが検出された。頭部には、フィルムの上にカバーがかかっており、その下でガス漏れが発生しているものと考えられた。後に気球頭部を調査したところ、フィルムに穴がはさみの先で引っ掛けたような小さな穴があいていることが判明した。カバーなしであれば容易に検出できる漏れだが、カバーがかかった後では、高い差圧をかけないと判明しにくくなることが判明したため、今後は、カバーをかける前にガス漏れ試験を実施することとした。

また、図中の点線は、気球に穴があきガス漏れに伴い圧力が下がる場合のシミュレーションを参考文献 [3] によって行ったものである。グラフの形状は一致せず、モデルに改良の余地があることがわかるが、このモデルから推定される穴の大きさは $0.3 \sim 0.5 \text{ mm}^2$ であり、この値は、見出された穴の大きさと同程度であった。

気球の耐圧性能を評価するため、順次圧力をあげ、10,000 Pa をかけた状態で、気球の状況を調べていたところ、気球が下部から破裂した。気球にかけられた最大差圧は 10,020 Pa であり、破壊時の差圧は 9,830 Pa であった。最大圧で約 1 分間耐えた後、破壊している。この値は予想値の 12,000 Pa の 8 割に滞っている。

破壊の原因は、網とロードテープを固定している結合系が破断し、網が急激に横に移動したことによるものと推定されている。これを防ぐには、より強い結合系を用いたり、網とロードテープの結合系の数を増やすといった対策が有効であり、今後の検討が必要である。

4 ガス漏れ量と穴の大きさの関係

破壊した NPB001-6 気球から網を取り外し、破損したフィルムにテープを貼り付けた補修した気球のガス漏れ試験を行った。また、気球に 7 mm^2 、 14 mm^2 の穴を順次あけ、ガス漏れ量の変化をみることで、穴をあける前の気球に存在している穴の等価面積を求めた。

図 4 に差圧の時間変化を示す。同じ条件下での実験を二回づつ実施しており、変化が概ね再現することを確認している。これらの結果から、穴をあける前のガス漏れ量は、 3 mm^3 の面積の穴からと同程度と推定される。

一方で、この差圧の変化を体積一定で穴があいているモデル [6] と比較してみると、図 6 にあるように、全く再現できていないことがわかる。そこで、体積が差圧によって変化するモデルを考えてみる。

漏れ出す空気の流れを、準定常な等エントロピー流れとみなすことにする。大気圧を p 、密度を ρ とし、流

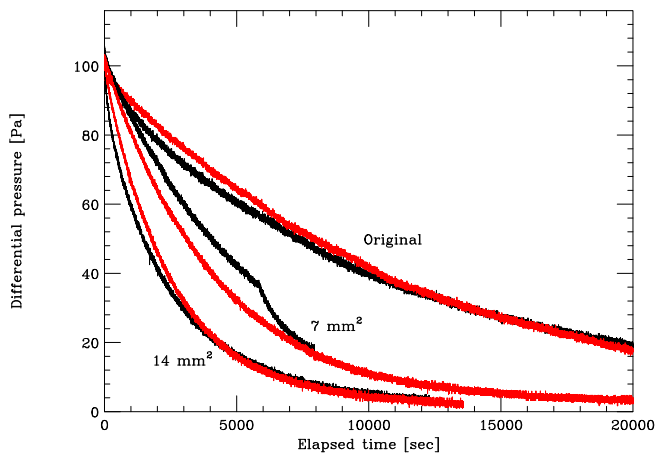


図 5: 穴をあける以前、7 mm²、14 mm² の穴をあけた状態の差圧の時間変化。各条件で赤黒 2 回の測定を行った。

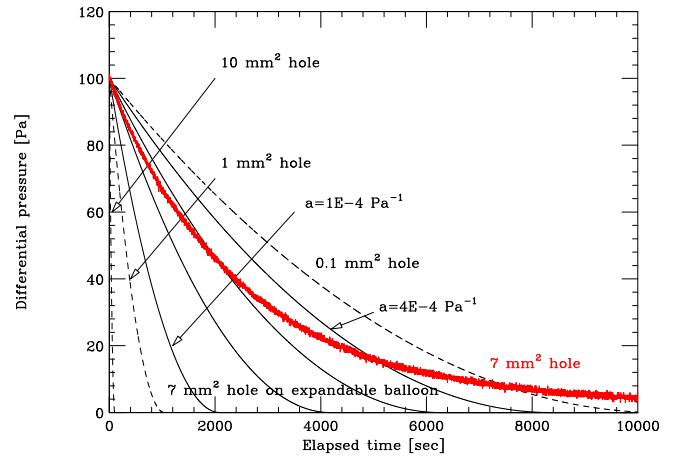


図 6: 7 mm² の穴をあけた状態の差圧の時間変化 (赤) と体積一定で穴があいているモデル (点線)、体積が差圧に比例するモデル (実線) の比較。

速 $u=0$ のよどみ点状態における空気の圧力を p_0 、密度を ρ_0 とすると、ベルヌーイの式から、

$$\frac{1}{2}u^2 + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} \quad (1)$$

である。これを速度 u について解くと、

$$u = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left(1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)} = \sqrt{\frac{2\gamma RT_0}{\gamma-1} \left(1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)} \quad (2)$$

を得る。ここで、 R は空気の気体定数 287 J/kg·K であり、 T_0 はよどみ点における空気の温度である。空気の質量流失速度 \dot{m} は、流出する穴の面積を A とすると、

$$\dot{m} = \rho u A \quad (3)$$

とかける。また、圧力 p と密度 ρ には、以下の関係がある。

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} = \frac{p_0}{RT_0} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (4)$$

これに、上の二つの式を代入すると、

$$\dot{m} = \frac{p_0 A}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)} \quad (5)$$

が得られる。微小時間 dt の間に流出する流量は $\dot{m}dt$ であり、SP 気球の体積を V とし、体積と差圧の関係が、

$$V = V_0(1 + a(p_0 - p)) \quad (6)$$

であるならば、この間に SP 気球内の気体の質量が保存することから、

$$\dot{m}dt = -Vdp_0 - \rho_0 dV = -Vdp_0 - \rho_0 V_0 a dp_0 \quad (7)$$

が成り立っている。圧力 p_0 と密度 ρ_0 の間には、

$$p_0 \rho_0^{-\gamma} = \text{CONST} \quad (8)$$

の関係があるので、微分して整理すると、

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{d\rho_0}{dt} = \frac{1}{\gamma} \frac{1}{p_0} \frac{dp_0}{dt} \quad (9)$$

である。これらを用いると、

$$\frac{dm}{dt} = -V \frac{1}{\gamma} \frac{\rho_0}{p_0} \frac{dp_0}{dt} - \rho_0 V_0 a \frac{dp_0}{dt} \quad (10)$$

$$= -\rho_0 \left(V \frac{1}{\gamma} \frac{1}{p_0} + V_0 a \right) \frac{dp_0}{dt} \quad (11)$$

$$(12)$$

となり、さらに、式 (5) を用いると、

$$\frac{dp_0}{dt} = -\frac{A\sqrt{RT_0}}{\frac{V}{\gamma p_0} + V_0 a} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right)} \quad (13)$$

となる。この式を用いて、時間積分することで、差圧の時間変化を求めることができる。ここでの議論は文献 [7] を参考にした。

このモデルを用いて差圧の時間変化を求めたのが図 6 の実線である。これらは、穴の大きさを 7 mm^2 とし、差圧と体積の関係式の比例係数 a を数 $\times 10^{-4} \text{ Pa}^{-1}$ 程度にとったものである。気球皮膜の比例係数は、以下のように推定できる。

気球の極間にはロードテープが 20 本入っており、その応力ひずみ曲線は図 7 となっている。この図から、張力 T とロードテープの長さ L の関係を、

$$L = L_0(1 + a_1 T) \quad (14)$$

とした場合の比例係数 a_1 は、図中に示した直線に相当する $1.0 \times 10^{-4} \text{ N}^{-1}$ 程度である。ここで、SP 気球のロードテープ 1 本にかかる張力と差圧 Δp との関係は、気球の半径を $R (=1.5 \text{ m})$ 、ロードテープの本数を $n (=20)$ とすると、

$$T = \frac{\pi R^2 \Delta p}{n} \quad (15)$$

さらに、気球がロードテープの伸びに応じて相似に膨張すると考えると、体積は長さの 3 乗に比例するから、

$$V = V_0(1 + a_{\text{tape}} \Delta p) \quad (16)$$

$$= V_0(1 + 3a_1 T) \quad (17)$$

$$= V_0 \left(1 + \frac{3a_1 \pi R^2}{n} \Delta p \right) \quad (18)$$

となり、 $a_{\text{tape}} = 1 \times 10^{-4} \text{ Pa}^{-1}$ と求まる。

また、 $20 \text{ }\mu\text{m}$ 厚のフィルムで作ったシリンダー気球を膨張させた際の差圧と直径の変化は、図 8 のようになる。この図から読み取れる、差圧 Δp とシリンダー気球の直径 D の関係を、

$$D = D_0(1 + a_2 T) \quad (19)$$

とした場合の比例係数 a_2 は、図中に示した直線に相当する $1.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}^{-1}$ 程度である。ここでも気球がフィルムの伸びに応じて相似に膨張すると考えると、体積は長さの 3 乗に比例するから、

$$V = V_0(1 + a_{\text{film}} \Delta p) \quad (20)$$

$$= V_0(1 + 3a_2 \Delta p) \quad (21)$$

となり、 $a_{\text{film}} = 5 \times 10^{-4} \text{ Pa}^{-1}$ と求まる。

実験的に得られた係数 a はロードテープの値とフィルムの値の間に入っており、尤もらしい値である。一方で、曲線の傾きは一致していない。体積が圧力に比例するという仮定が単純すぎる嫌いがあり、状況を理解するには、係数 a が圧力で変化するというより詳細なモデル化が必要である。

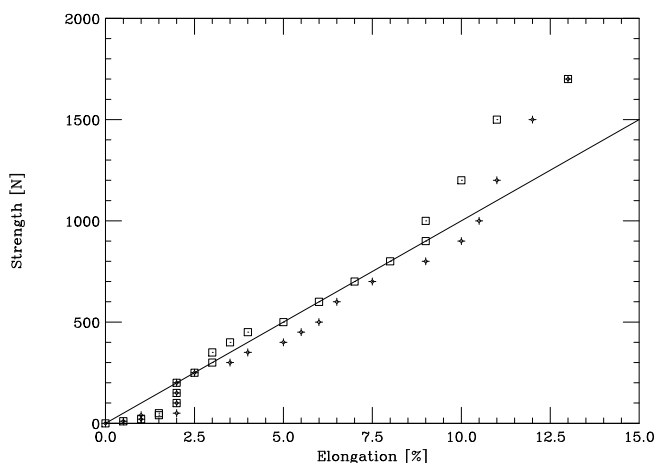


図 7: ロードテープの応力ひずみ曲線。

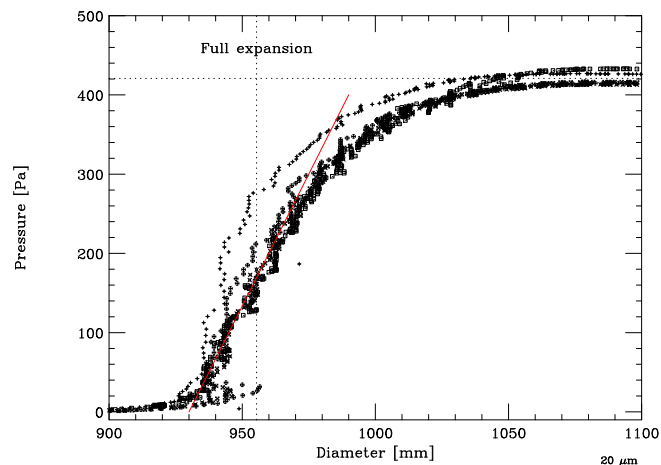


図 8: 20 μm 厚フィルムで作られたシリンダー気球加圧時の差圧と直径の関係。

5 イリジウム衛星を用いた通信システムの開発

長時間気球が飛翔する場合、電波の送受信局から気球が見えず直接波での通信が不可能となる見通し限界を越えることとなる。そのため、多数の低軌道周回衛星を用いた双方向の通信システムである、イリジウム衛星通信システムを利用することを考えている。これには、地上局の設営が不要という利点もある。我々は、EGG 衛星用に開発された 9603 型イリジウム SBD モジュールを用いた UART 入力のショートバースト通信装置 [8] を利用することを考えており、UART 入力での通信機能の確認を行った。2016 年 8 月に予定されている B16-04 実験において、本モジュールを用いて、GPS 受信機やセンサーのデータを伝送する試験を実施する予定である。

6 課題と今後の計画

体積 10 m^3 の気球の試作では、耐圧性能は概ね満足できる結果を得たが、構造が複雑な極部からのガス漏れに課題が残った。今後、極部の製作方法を改良し、ガス漏れを抑える開発を進め、地上での漏れ試験、耐圧試験による検証を行った上で、2017 年度には飛翔試験を実施することを検討している。

謝辞

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)、および、科学研究費補助金挑戦的萌芽研究「対流圏界面観測用超小型タンデム気球の開発」(課題番号 26630448) を受けて行っています。

参考文献

- [1] 斎藤 芳隆、山田 和彦、藤原 正智、第 28 回 大気圏シンポジウム集録、P-8、2014
- [2] 斎藤 芳隆、他、JAXA-RR-010-03, pp.21-40, 2011
- [3] 斎藤 芳隆、他、JAXA-RR-13-011, pp.35-60, 2014
- [4] 斎藤 芳隆、他、平成 26 年度大気球シンポジウム集録、isas14-sbs-012、2014
- [5] 斎藤 芳隆、他、平成 27 年度宇宙科学シンポジウム集録、P-212, 2016
- [6] 斎藤 芳隆、他、JAXA-RR-13-011, pp.1-33, 2014
- [7] 松尾 一泰、”圧縮性流体力学”、理工社
- [8] 永田 靖典、柳瀬 眞一郎、山田 和彦、平成 27 年度大気球シンポジウム集録、isas15-sbs-012、2015