

南極域における大気重力波のスーパープレッシャー気球観測計画 (LODEWAVE : LOnG-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica)

富川 喜弘^{*1,2}, 佐藤 薫^{*3}, 斎藤 芳隆^{*4}, 村田 功^{*5}, 平沢 尚彦^{*1,2}, 高麗 正史^{*3}, 中篠 恭一^{*6}, 秋田 大輔^{*7},
松尾 卓摩^{*8}, 藤原 正智^{*9}, 吉田 理人^{*2}

LODEWAVE (LOnG-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica)

TOMIKAWA Yoshihiro^{*1,2}, SATO Kaoru^{*3}, SAITO Yoshitaka^{*4}, MURATA Isao^{*5}, HIRASAWA Naohiko^{*1,2},
KOHMA Masashi^{*3}, NAKASHINO Kyoichi^{*6}, AKITA Daisuke^{*7}, MATSUO Takuma^{*8},
FUJIWARA Masatomo^{*9}, YOSHIDA Lihito^{*2}

ABSTRACT

Atmospheric gravity waves transport momentum in the atmosphere and play an important role in determining temperature and material distribution through driving the meridional circulation in the middle atmosphere. However, they have wide spatial and temporal scales, which make it difficult to capture the whole feature of gravity waves with any of the latest observations and models. The first Mesosphere-Stratosphere-Troposphere (MST)/ Incoherent Scatter (IS) radar in the Antarctic, PANSY, which was installed at Syowa Station in 2011, can directly estimate the momentum flux of gravity waves in all frequency bands by observing 3-dimensional winds with high precision and high resolution. On the other hand, the super pressure (SP) balloon observation can also estimate momentum transport due to gravity waves in all frequency bands, and its horizontal distribution is also clarified. In order to carry out this SP balloon observation in the Antarctic where the observational constraint on the momentum transport due to gravity waves is especially insufficient, we proposed the LOnG-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica (LODEWAVE). By combining it with the PANSY observation and the state-of-the-art meteorological reanalysis data, the 3-dimensional picture of momentum transport due to gravity waves is acquired, which contributes to the improvement of the future prediction by the climate model.

We have performed a test production of SP balloon and onboard instruments during FY 2019. The further development and test of the SP balloon and onboard instruments will be carried out in FY 2020. In the first half of FY 2021, a domestic balloon experiment will be carried out at Taiki Aerospace Research Field in Hokkaido. In the latter half of FY 2021, a maximum of 3 SP balloon observations will be carried out at Syowa Station in the Antarctic. By developing the SP balloon and onboard instruments which are light and small enough to ease the restrictions of the Civil Aeronautics Act, we aim to establish a regular observation system in the Antarctic.

Keywords: Gravity wave, Super pressure balloon, Antarctic, momentum flux

* 2020 年 12 月 1 日受付 (Received December 1, 2020)

^{*1} 国立極地研究所 (National Institute of Polar Research)

^{*2} 総合研究大学院大学 複合科学研究科 (School of Multidisciplinary Sciences, The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI)

^{*3} 東京大学大学院理学系研究科 (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

^{*4} 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)

^{*5} 東北大学大学院環境科学研究科 (Graduate school of Environmental Studies, Tohoku University)

^{*6} 東海大学工学部 (School of Engineering, Tokai University)

^{*7} 東京工業大学環境・社会理工学院 (School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology)

^{*8} 明治大学理工学部 (School of Science and Technology, Meiji University)

^{*9} 北海道大学大学院地球環境科学研究院 (Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University)

概要

大気重力波は、大気中の運動量輸送を担い、中層大気の子午面循環の駆動を通じて成層圏・中間圏の温度・物質分布の決定に重要な役割を果たす。しかし、重力波の持つ幅広い時空間スケールのすべてを観測で捉える、あるいはモデルで表現することは現在の最新技術をもってしても困難である。特に、重力波に伴う水平運動量の鉛直フラックス（以下、運動量フラックスと略す）は、振幅の小さな鉛直風の情報が必要であり、観測による直接推定は限られる。2011 年に南極昭和基地に設置された大型大気レーダー（PANSY レーダー）は、高精度・高分解能な 3 次元風速の観測により、ほぼ全周波数帯の大気重力波の運動量フラックスの鉛直プロファイルを直接推定することができる。また、上空を長期間浮遊するスーパープレッシャー（SP）気球観測では、2 次元風速と気圧の観測により、重力波の運動量輸送を全周波数帯域で定量的に捉えることが可能で、その水平分布もとらえることができる。この SP 気球観測を、大気重力波の観測情報が特に不足している南極域で行い、PANSY レーダー観測および最新の気象再解析データと組み合わせることにより、大気重力波による運動量輸送の 3 次元的描像を取得し、将来予測に使用される気候モデルの改良に資することを目的として、南極域における大気重力波のスーパープレッシャー気球観測計画（LODEWAVE）を立案した。

本計画では、これまでに SP 気球と搭載機器の開発を進め、2019 年度中に SP 気球の試作と試験、搭載機器の試作を行った。2020 年度中に SP 気球と搭載測器のさらなる開発・試験を行い、2021 年度前半に北海道・大樹航空宇宙実験場での国内気球実験、2021 年度後半に南極昭和基地での試験を兼ねた最大 3 回の SP 気球観測を計画している。また、本計画で使用する SP 気球と搭載測器は、航空法の制約が緩和される軽量・小型なものとし、将来の南極域での定常的な観測体制構築を目指す。

1. はじめに

大気重力波は浮力を復元力とする大気波動で、運動量を遠隔輸送することで全球規模の子午面循環を駆動し、特に中層大気中の風・温度・物質分布の決定に重要な役割を果たす。しかし、その空間スケールは数 km から数千 km、時間スケールは数分から数十時間と幅広く、重力波の励起・伝播・消散という一連の過程の全容を捉え、子午面循環の駆動に果たす役割を定量的に評価・再現することは最新の観測・モデルのいずれでも容易ではない[1,2]。近年、捉えられる波数帯域は限られるものの、重力波の振幅の全球分布が衛星観測により得られるようになり、重力波の振幅が特に大きいホットスポット（南米アンデス山脈から南極半島にかけての領域など）が存在することも明らかになった[3,4]。重力波の鉛直波長は背景水平風により大きく変化する。したがって、水平分解能はよくても鉛直分解能の良くない衛星によるナディア観測では、背景風の強さを反映するような見かけの重力波分布が捉えられる危険性がありその解釈が難しい。リム観測では鉛直分解能は高いが水平分解能はよくないため、大きな運動量フラックスを持ちうる小水平スケールの重力波を捉えることができない。したがって、重力波の作用を定量的に調べるためには、水平鉛直とも分解能の高い観測が不可欠である。さらに、重力波の間欠性を調べることも重要である。重力波は発生源や伝播経路上の背景風の変動等により均一でない間欠性を持つことがわかってきた。時間あるいは空間平均として同じ運動量フラックスであっても、大振幅のものはより低高度で、小振幅のものはより高高度で砕波・消散するため、間欠性が高いと重力波のもたらす子午面循環の駆動力はより低高度で、低いとより高高度で働くようになる[5]。したがって、重力波の振幅や運動量フラックスの平均的描像だけでなく、その時空間的非一様性を捉える必要がある。

近年、モデルに観測データを同化して現実的な気象場を得るためのデータ同化手法が大きく進歩し、そうして得られる全球の気象場が様々な気象・気候研究に利用されている。それらは気象再解析データと呼ばれ、使用される数値予報モデルの高解像度化に伴って、長周期・長波長の重力波についてもある程度、現実的に表現できるようになってきた。それらの重力波による運動量フラックスの水平分布は観測とも整合的であることが報告されているが、定量的には大きなずれがあるのが現状である[6,7]。一方、モデルの解像度よりも小さなスケールの重力波による運動量輸送の効果は、理論的・経験的に仮定された重力波源をモデル内に与え、重力波の鉛直伝播のみを考慮する重

力波パラメタリゼーションと呼ばれるパラメータ化により取り入れられている。しかし、パラメータに拘束を課す観測データが特に不足している南極域では、モデル間に大きな差異がある[8]。また、高解像度モデルを用いた研究により、モデル内で陽に表現された重力波は水平にも長距離伝播することが指摘されており[9]、鉛直伝播のみという多くの重力波パラメタリゼーションで用いられている仮定が冬季極域成層圏の低温問題やそれに起因するオゾン破壊量の予測の不確実性といった諸問題の一因と考えられている[10,11]。気象再解析データでは、観測データを同化することでそのずれを軽減することができるが、気候モデルの将来予測では水平伝播を含む重力波の効果を正しくモデルに取り入れられないかぎり、上述の問題を解消することはできないと考えられている。

このように、中層大気中の気象場の形成に対する重力波の役割を定量的に理解し、モデル中の重力波効果の表現を改善することは、モデルによる将来予測の精度向上のための重要課題となっている。そのためには、重力波の幅広い波長帯・周期帯をすべてカバーし、かつ重力波による運動量フラックスの時空間的非一様性を捉えられる観測を実施することが求められる。重力波の全周期帯をカバーし、かつこれに伴う運動量フラックスを推定できる手法としては、大型大気レーダーによる3次元風速の観測と、上空を長期間周遊するスーパープレッシャー（SP）気球による気圧・2次元風速の観測がある。

1980～90年代にかけて、主に中緯度域に設置された大型大気レーダーの観測により、重力波による運動量輸送が中間圏や下部成層圏の風速決定や子午面循環の駆動に重要な役割を果たすことが明らかとなった[12,13]。また、著者らを含むグループ（代表：佐藤薫）は、南極域に初めてかつ唯一の大型大気レーダーであるPANSY（Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar）レーダーを設置し、南極の対流圏、成層圏、中間圏の重力波の本格観測を行っている[14]。南極各国基地でのラジオゾンデ観測データの解析により、昭和基地上空の重力波の特性は南極域における重力波として代表性が高いことが確認されている[15]。このPANSYレーダー長期連続観測データに基づき、南極対流圏・下部成層圏における重力波の周波数スペクトルや間欠性の高度依存性や季節依存性を初めて明らかにした[16]。

SP気球は、一定の密度面を1か月以上の長期にわたって浮遊するため、全周期帯の重力波による運動量輸送を観測するだけでなく、その水平分布を捉えることができる（ただし、スナップショットではないことに注意）。南極域ではこれまでに2回（2005年、2010年）、フランスを中心とする国際共同研究グループにより複数のSP気球を用いたキャンペーン観測が実施され[17,18]、下部成層圏における重力波の空間分布を明らかにしただけでなく、運動量フラックスが場所により大きな間欠性を持つことが示された[5,19]。しかし、これらの観測は技術的・予算的に継続的な実施が困難であった。また当時は、同じ高度をオイラー的に捉える大型大気レーダー観測は始まっていなかった。

PANSYレーダーでは昭和基地上空の重力波特性の時間・高度断面が得られるのに対し、SP気球観測では1つの高度における重力波特性の水平断面が得られる。これらはそのままでは独立のデータにすぎない。一方で、最新の気象再解析データでは長周期・長波長の重力波であればその運動量フラックスやスペクトルを定性的には表現することができる。気象再解析データに対してPANSYレーダーおよびSP気球観測データで拘束を課し、重力波スペクトルの形状を理論的に仮定することで、南極対流圏・下部成層圏における重力波による運動量輸送の3次元分布を推定することが本研究の目的である。また、解像できる周波数、波数は限られるが重力波解像大気大循環モデルを併用して上記仮定の妥当性の検証も可能である。上記の目的を達成するため、南極域における大気重力波のスーパープレッシャー気球観測計画（Long-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica : LODEWAVE）を立案した。

2. SP 気球観測の要求精度

本 SP 気球観測では、南極域下部成層圏において重力波の全周期帯（約 5 分～十数時間）の運動量フラックスや水平風速擾乱の振幅を導出するため、30 秒間隔で気温、水平風速、気圧を測定する。これらは基本的に高層気象観測で取得される物理量と（相対湿度が無いことを除き）同一である。一方で、本観測が高層気象観測と大きく異なる点は、気球が等密度面上を背景風に流されて浮遊す

るため、空気塊の流れに沿った重力波観測が可能であり、その情報を用いて重力波による運動量フラックスを推定できる点である。実際の解析では、水平風速、気圧の時系列データにウェーブレット変換を適用し、得られた各周波数成分について水平風速、気圧の擾乱成分の複素振幅、および背景風に乗った系から見た周波数 (i.e., intrinsic frequency) から重力波の分散関係を用いて運動量フラックスを推定する[20]。それぞれの物理量に必要とされる測定精度は以下のとおりである。

2.1. 水平風速

協同観測を行う PANSY レーダーは、視線方向風速で 0.1 ms^{-1} 、水平風速で 0.5 ms^{-1} の測定精度を持つ[14]。そのため、PANSY レーダーで捉えられる重力波に伴う水平風擾乱を SP 気球観測でも捉えるためには同等以上の測定精度を持つ必要がある。SP 気球観測では、気球がその場の風に移流されると仮定し、GPS で得られる気球の 30 秒ごとの位置情報の差分から水平風速を導出する。GPS の水平方向の位置精度を σ_h (m) とすると、水平風速の推定精度 σ_w (ms^{-1}) は $\sigma_w = \sqrt{2}\sigma_h/30$ で与えられる。したがって、求められる水平位置精度は約 10 m となる。

2.2. 気温

重力波の運動量フラックスを推定する際に気温のデータを用いるのは、重力波成分をローパスフィルターにより除去した背景密度を推定する場合のみのため、要求精度は高くない。一方、重力波のポテンシャルエネルギーを推定する場合、水平風速擾乱から推定される運動エネルギーと同等の精度を得るためには 0.3 K 程度の精度が必要となる。また、南極下部成層圏では夏季でも -70°C 、冬季には -90°C 付近まで気温が低下することがあるため、 $-90\sim 40^\circ\text{C}$ の範囲を測定できる必要がある。

2.3. 気圧

図 1 は、SP 気球が観測する重力波の気圧擾乱の振幅を水平波長と水平風擾乱の振幅の関数として表したものである。本観測における水平風速の要求精度は 0.5 ms^{-1} であることから、その約 3 倍の 1.5 ms^{-1} の水平風振幅を仮定すると、それに対応する気圧振幅は 15 Pa 程度、つまり 5 Pa 程度の測定精度があれば、PANSY レーダーで検出可能な重力波による運動量フラックスを SP 気球観測でも求められることがわかる。

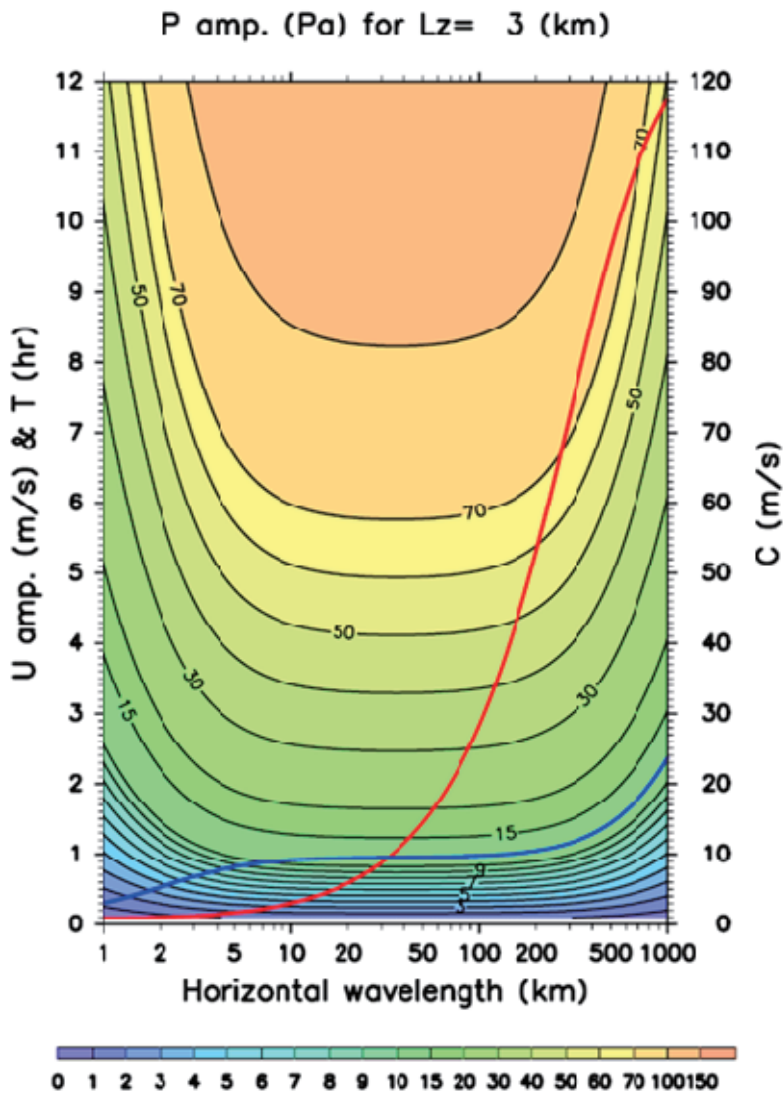


図1：水平波長と水平風振幅の関数として描いた重力波の気圧振幅（Pa）。鉛直波長3 kmを仮定している。赤線は重力波のintrinsicな周期（hr）、青線はintrinsicな位相速度（ ms^{-1} ）。

3. 気球の飛翔高度と観測の実施時期・場所

PANSYレーダーを用いた研究により、南半球夏季の昭和基地上空の成層圏では、地形、対流圏内の気象擾乱、対流圏界面近傍のジェット気流等によって励起され上方へと伝播する重力波が卓越することが報告されている[21]。そのため、夏季の南極成層圏・中間圏へと運動量を輸送する重力波の特徴は成層圏内の1高度での観測である程度捉えられると期待される。一方、本計画を企画・実施するにあたっては、PANSYレーダーとSP気球観測の協同が大前提となっている。PANSYレーダーによる対流圏・成層圏における大気重力波の観測は高度約20 kmまでのため、高度20 km以下でSP気球観測の結果と組み合わせる必要がある。また、航空安全の観点から、高度18 km（60,000 ft）以上では航空法上の制約が少ない。2005/2010年に実施されたVorcore/Concordiasiキャンペーンにおいても、後者の理由により高度19 kmでの観測を実施していることから、結果の比較のためにも高度19 kmでの観測が望ましい。さらに、南極昭和基地では、夏期間の地上気象条件がよく、なおかつ作業人員も十分確保することができる。以上の理由により、本計画ではSP気球観測を南半球の夏期間（12-1月）に高度19 kmで実施する。

重力波の運動量フラックスの水平分布を取得するためには、南極域を広くカバーできるよう、で

きるだけ多くのSP気球観測を実施することが望ましい。しかし、本計画では予算および放球実施期間の制約があるため、2021年12月～2022年1月の間に最大3回のSP気球観測を実施することを計画している。

4. スーパープレッシャー (SP) 気球

本計画では、体積180 m³、耐圧性能1,200 Pa以上、10 日以上の気密性を有する気球で高度19 kmに3 kgのペイロードを10日以上にわたり浮遊させる。周辺の空気塊と共に等密度面を飛翔するため、空気塊の運動に沿ったその場観測が可能である。本計画を実現するために必要とされるSP気球の仕様は以下のとおりである。

- 1) 使用時に1,200 Paの差圧がかかるため、その倍の2,400 Paの耐圧性能を有すること。
- 2) 10日(=240時間)以上にわたる気密性能を有すること。
- 3) 3 kgのペイロードを搭載して高度19 kmに到達できる重量/体積比を有すること。
- 4) 要求時に速やかに気球を破壊して実験を終了できること。
- 5) 10日にわたる紫外線照射環境で材料強度の劣化が十分に小さいこと。

このような仕様を満たす小型SP気球の開発は、主にフランス、米国、日本で行われている。日本におけるSP気球の開発は、宇宙科学研究所により1990年代後半から進められてきた。その結果、ポリエチレン皮膜の気球にベクトラン製の網をかぶせることで耐圧性能の向上が[22]、ポリエチレン皮膜の気球の中にゴム気球を入れた二重膜構造とすることで気密性能の向上が実現し[23]、本計画で使用する小型SP気球の製作が可能となった。これらの技術を適用して試作した体積100 m³の気球では3 kgのペイロードを高度17 kmに飛翔させられる性能(耐圧性能(3,500 Pa)、気密性能(289 時間))が得られている[24]。今後、高度19 kmでの飛翔を実現するために気球をひとまわり大きくするとともに、放球方法や破壊方法の確立を進め、LODEWAVEに使用するSP気球を製作する。

5. 気球搭載用機器

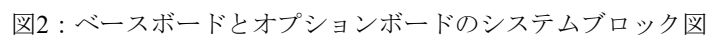
本計画で使用する気球搭載用機器は、SP気球に吊り下げられ、その場の三次元的な位置情報、気圧、気温を30秒ごとに収集し、7.5分に一回、イリジウム衛星経由でデータを転送する。また、地上オペレーターからのコマンドをイリジウム衛星経由で受け付け、気球破壊、ヒーターのON/OFF等を実施する。搭載用機器の総重量は3 kg以下とし、ICAO（国際民間航空機関）のルールで軽気球として扱えるシステムとすることで航空管制による制限を緩和する方針でシステムの設計を行った。環境温度として、-90～40℃、大気圧として10～1100 hPaを想定している。以下にその概要を示す。

5.1. データ収集系・処理系

システムはCPUを搭載したデータ収集、処理ボード（以後、オプションボードと呼ぶ）と通信を行うベースボードから構成されている（図2）。前者は、新規に開発したボードで、GPS受信機からの信号をRS232Cシリアル通信で、気圧センサーの出力はSPIシリアル通信で、気温センサー（サーミスタ）は抵抗-周波数変換した後の周波数をカウンタで30秒ごとに計測する。CPUは7.5分に一回、テレメトリパケットを生成し、ベースボードへとRS232Cシリアル通信で伝送する。ベースボードは宇宙科学研究所大気球実験グループ(以降、大気球実験グループ)が開発した、イリジウム衛星との通信ボード（エンベデッドテクノロジー社製SBD-BASE-2011）[25] のハードウェアを利用し、ファームウェアを新たに開発したものを利用する。このボードは、SBD9602Nチップを用いてイリジウムショートバースト通信を可能にするものである。このボードではパケットを受け取ると、イリジウム衛星経由でデータを伝送し、地上系ではショートメールとして受け取ることができる。逆に、該当するアドレスにメールを送信することで、コマンドを送信することも可能である。通信ボードで受け取ったメールはCPUボードへと送られ、CPUボードではコマンドを解釈し、ヒーターのON/OFF制御、気球破壊等を実施する。なお、気球破壊用回路は、大気球実験グループが開発した回路を踏襲した2系統の独立したシステムが搭載されており、一方は上記コマンド、もう一方はコマンドでリセット可能なタイマーカッターとなっている。全システムの消費電力は0.9 Wであり、電力は一次電池で

☐ は、構成外

☐ は、支給品を示す。



5.2. センサー系

5.2.1. 気圧計

2.3節で示した通り、本観測における気圧観測では飛翔する高度19 km (気圧60 hPa) の環境下で5 Paの絶対精度が必要であり、明星電気株式会社がゾンデ用に使用しているMEMS小型気圧センサー (Murata製XPA2326-0311A-R) を利用することを検討している。これはMEMS技術を利用したオンボードチップである。動作環境である60 hPaにおける性能を評価したところ、オーバーサンプリングし、かつ、3センサーの平均操作をすることで4 Pa程度の精度が達成できることは確認されている。一方で、個々のセンサーの較正が必要であること、較正が必要なレベルの温度依存性があること、といった問題があることも判明している。必要な較正を行うことで上記センサーで要求精度は達成できるが、同様の精度のMEMS小型気圧センサーは他社からも販売されており、よりよいセンサーの調査も進める。

5.2.2. 温度計

2.2節で示した通り、観測目的を達成するための要求仕様は、-90～40℃の範囲を絶対精度0.3 Kで測定することである。この精度は、市販のラジオゾンデの温度センサーでオーバーサンプリングし、30秒平均することで達成可能な精度である。そのため、明星電気株式会社がゾンデ用に利用し、実績のある温度センサー (ガラスチップサーミスタ)、および、読み出し回路 (抵抗-周波数変換回路) を利用する。なお、ゴンドラからの熱の流入をさけるため、センサーはゴンドラの1 m下に吊り下げる。

5.2.3. GPS 受信機/アンテナ

2.1節で示した通り、観測目的を達成するための要求仕様は、水平位置精度で10 mである。明星電気株式会社がゾンデ用に利用し、実績のあるGPS受信機、アンテナ一体型のチップ (Position製GSU-121B) は水平位置精度が7.5 mであることから、これを利用する。

5.3. 送受信系

大気球実験グループが開発した、イリジウム衛星との通信ボード (エンベデッドテクノロジー社製SBD-BASE-2011) のハードウェアを利用し、ファームウェアを新たに開発したものを利用する。データ計測は30秒に一回実施する。イリジウムショートバーストデータは340 byteを一回の送信で伝送することが可能であり、現状の検討では7.5分ごとに伝送されるデータは255 byteに留まっている。また、コマンドは7.5分ごとのデータ送信の際に受け取る仕様とし、気球破壊の許可、実行等、10項目を予定している。

5.4. トランスポンダー

本計画で使用するペイロードは3 kg以下でICAOのルールでは軽気球として扱われるため、ATCトランスポンダーの搭載は必要ない。しかし、2019年7月に開催されたATCM (南極条約協議国会議) において、南極で運用するすべての航空機・無人機・気球にADS-B out system (指定波長の電波の送信により、自身の位置情報を周辺の航空機に知らせる機能のみを持つ機器で、数百g以下程度) の搭載を義務付ける提案 (working paper) が英国から出され、同年8月のCOMNAP (南極観測実施責任者評議会) の航空機安全に関する分科会で議論された。基本的に南極はICAO圏外のため法的な効力を持つルールはないが、各国が協議しながらICAOに準拠し、かつ航空機の運用を認可した国の法規に沿って運用するとともに、南極の状況にカスタマイズしたATCM・COMNAPで合意されたルールにも従っている。それらのルールに従わなくてもペナルティは無いが、航空安全を疎かにしているとみなされる恐れがある。そのため、本計画でもADS-Bを搭載するための検討を開始し、ペイロードへの搭載を予定している。

現在、日本国内ではADS-B搭載に必要な航空機IDが航空機以外には発行されていないため、国内では動作確認試験を実施することができない。そこで、ADS-Bを搭載したペイロードの送受信のみの地上試験を豪州で実施する予定である。豪州において航空機IDは、豪州南極局の共同研究者から申請することで取得可能である。

5.5. 機械設計

装置は-90℃の低温環境にさらされる。ゴンドラ内部を-40℃以上に保つよう、保温性能を確保する設計とした。その結果、35 mm厚の発泡スチロールで構造体を形成することとした。図3に全体配置を示す。12本のバッテリー（ElectroChem社製BCX85）の上にボード類が載る構成となっており、大きさは275 mm x 140 mm x 235 mm、現状の質量は2890 gであるが、ADS-B送受信機の搭載に伴い100 g弱程度増加する見込みである。

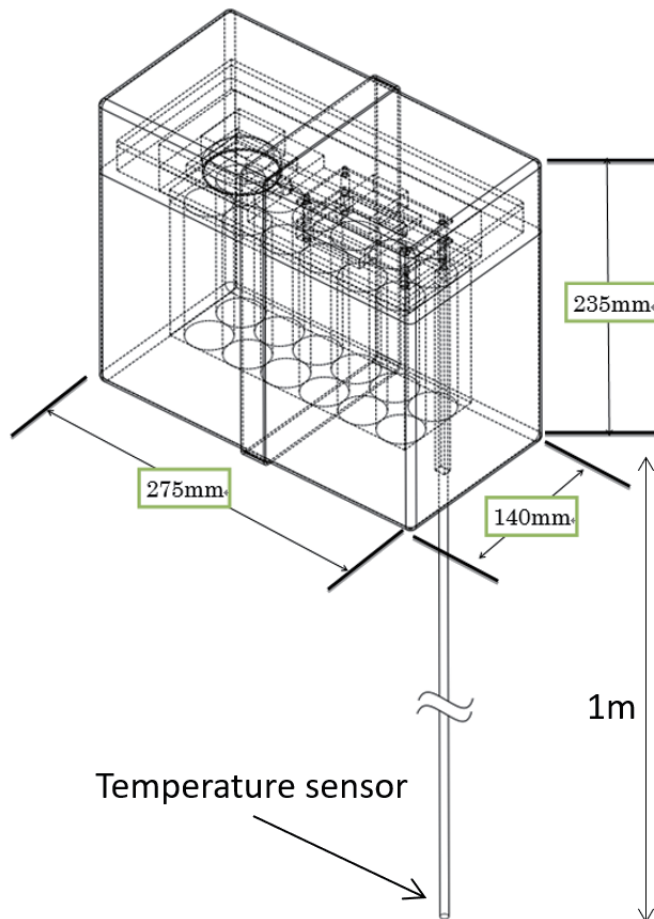


図3：気球搭載用機器の概観。内部の12本の円柱がバッテリー。筐体は上部の蓋と下部の本体部で構成される。

5.6. 熱設計

構造体の表面素材について、表1のように熱光学特性の観点でトレードオフの検討を行った。筐体（蓋）はGPSおよびイリジウム電波受信のためアルミニウム蒸着フィルムが使用できないことから耐候性塗装（白色）のままとしている。また、輻射放熱抑制のためバッテリー収納部内壁にアルミニウム蒸着フィルムを取付ける。

表1：構造体表面の検討（熱解析ツールによる解析結果）

項目	フィルムなし (耐候性白色塗装)	内外壁両面アルミニウム蒸着 ポリイミドフィルム	外壁片面アルミニウム蒸着 ポリイミドフィルム
太陽光吸収率 (α)	0.2	0.11	0.35
赤外放射率 (ϵ_H)	0.8	0.05	0.65
α/ϵ_H	0.25	2.2	0.54
評価	ϵ_H が大きく、太陽光入射有無に関わらず放熱過多である。	ϵ_H が小さいため輻射放熱を抑制できる。太陽光入射時は $\alpha > \epsilon_H$ であるため高温になる。 <u>⇒極夜時の外装フィルムに適する。</u>	白色塗装と比較し、 ϵ_H が小さいため放熱を抑えられる。また、 $\alpha < \epsilon_H$ であるため、太陽光入射時の温度上昇を抑えることが可能。 <u>⇒極夜時以外の外装フィルムに適する。</u>

実験期間に相当する12～1月期は白夜に相当するため、外壁片面アルミニウム蒸着した場合について、ゴンドラ内部の温度が -40°C 以上となるようにヒーターをON/OFFするという想定の下、電力消費について検討した。ゴンドラからの放熱は対流によるものと放射によるものとが存在するが、60 hPa の環境下においては放射によるものが卓越していることがわかった。解析の結果、白夜時にはヒーターは不要であり、SP気球の設計性能を十分に上回る52日間の運用が可能であることが判明した。今後、製作した実機の試験を実施し、様々なモードでの消費電力を測定すると共に、真空恒温槽での熱試験を実施し、構造体の内外での温度差が設計どおりとなるか、といった確認試験を実施する。

6. 準備状況と今後の計画

6.1. PANSY レーダー

PANSYレーダー研究グループ（代表：佐藤薫）は、平成23年に南極初の大型大気レーダーとなるPANSYレーダーを昭和基地に設置し、数年の調整期間を経て、平成27年よりフルシステムによる3次元風速の高鉛直・時間分解能観測を開始した。現在も、通年フルシステム観測を継続中である。

6.2. 南極昭和基地での SP 気球観測

南極昭和基地でのSP気球観測は南極地域観測第IX期中期計画後半（第61～63次：令和1～3年度）の一般研究観測課題として採択され、第63次夏隊（令和3年12月～令和4年1月）での実施を保証されている。

観測装置については、高層気象観測に使用するラジオゾンデを製作している国内メーカーに開発を依頼しており、2019年度末に試験機を製作している。データ送信とコマンド受信に使用する通信機については、他の大気球観測でも使用されているイリジウム衛星との通信ボードを使用する。小

型SP気球については、2019年度に試作した体積100 m³の気球をもとにさらに開発を進め、LODEWAVEで使用する180 m³の気球を製作する。

6.3. 気球の航跡予測

気球の航跡予測のため、国立極地研究所粒跡線モデル（NITRAM）[26]を改良した等密度面粒跡線プログラムを作成し、気象再解析データを用いた航跡計算を実施した（図4）。夏季ではあるが、南極上空の下部成層圏は基本的に西風であり、空気塊は南極上空を東向きに周回する。しかし、冬季の極渦のような安定した強い西風ではないため、空気塊はしばしば南極大陸を離れ、南米上空等に飛来することがわかる。PANSYレーダーとの直接比較のためのデータは、放球直後に昭和基地近傍の南極大陸縁辺域を飛揚する期間に取得できるため、仮に気球が昭和基地近傍に戻ってこなくても問題はない。ただし、気球飛翔の可否については関係する各国と調整を行う必要がある。また今後、様々な条件での航跡計算を行い放球に適した条件を明らかにするとともに、気象データを自動で取得し、気球の位置情報を元に航跡予測を随時更新するシステムを構築する。

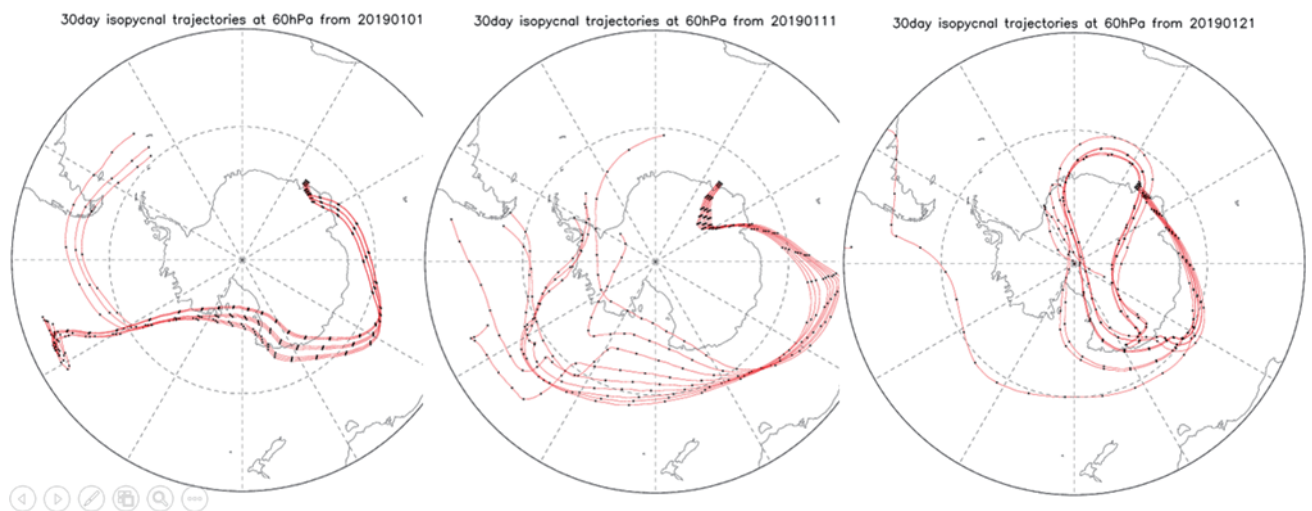


図4：昭和基地上空の60 hPa（高度約19km）に配置した9つの空気塊（69.0S±0.5 deg, 39.6E±1.0 deg）の2019年1月1日（左）、1月11日（中央）、1月21日（右）から30日間的前方粒跡線。黒丸は1日毎の位置を示す。

6.4. 放球時の気象条件

図5は、昭和基地における3年間（2016年4月～2019年3月）の地上風速データを用いて作成した、地上風速が3 ms⁻¹以下となる確率の季節・現地時刻断面である。昭和基地では、1月の現地時間で午後には5割以上の確率で風速3 ms⁻¹以下となっており、SP気球の放球に適した状態であることがわかる。

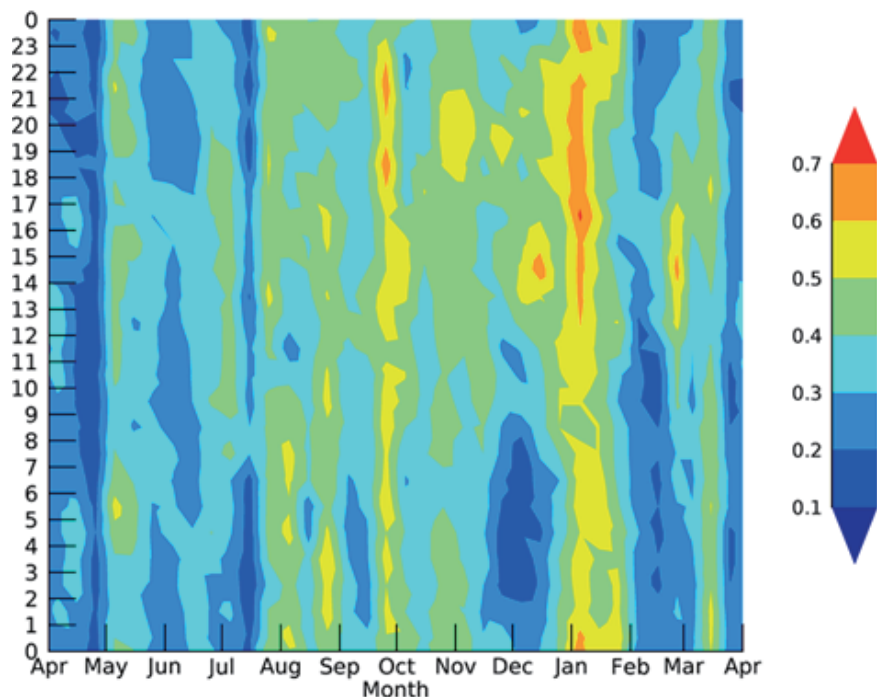


図5：昭和基地における地上風速が 3 ms^{-1} 以下となる確率の季節・現地時間断面。

6.5. 今後の計画

令和2年度の計画

- ・前年度に製作した試作機を用いて、SP気球搭載装置の地上試験およびデータ送受信に関する通信試験を行う。
- ・小型SP気球の放球手順を確立し、国内で習熟訓練を行う。
- ・日本国内および南極でのSP気球観測実施に必要な航空法上の手続きとフライトコントロールの方法に関する議論を行う。

令和3年度の計画

- ・豪州において、ADS-B搭載に必要な航空機IDを取得し、ADS-Bの送受信に関する地上試験を実施する。
- ・北海道大樹町の大樹航空宇宙実験場において、センサーおよび通信系の受信試験と放球手順の習熟のための国内試験観測を1回実施する。
- ・試験観測において不具合が発生した場合には、同年の昭和基地での観測が可能かどうか検討し、十分な試験期間を確保できない場合には次年度へ延期する。その場合は再度の国内試験を申請する。
- ・11月に日本を出発する第63次南極観測隊に夏隊員・同行者3名を派遣し、63次の他部門の隊員とも協力して、12月～1月の夏期間中に最大3回のSP気球観測を実施する。気球は最大2か月程度浮遊すると期待されることから、63次越冬隊と協力しつつ主に日本国内からフライト状況の監視とデータ取得を行う。

令和4年度以降の計画

本研究の科学目的を達成するため、以下の解析を行う。

- ・SP気球で得られる風速・気温・気圧データから、重力波の振幅や運動量フラックスを導出する解析システムを構築する。同解析システムにより、重力波波束の抽出や運動量フラックスの推定を行う。
- ・SP気球観測期間中のPANSYレーダーの3次元風速データを用いて、重力波の振幅や運動量フラックスの推定、振幅の確率密度分布等の導出を行う。SP気球が昭和基地近傍を飛揚している際の結果と比較し、整合性を確認する。
- ・SP気球観測期間中の気象再解析データ（欧州中期予報センターが提供するERA5）を取得し、PANSYレーダー観測と比較するための昭和基地上空のデータ、およびSP気球観測と比較するための

気球飛跡上のデータを抽出し、重力波の振幅や運動量フラックスの比較を行う。

- ・PANSYレーダー、SP気球観測、ERA5それぞれのデータを用いて風速および運動量フラックスの周波数スペクトルを求め、重力波の周波数帯におけるスペクトル形状（べき乗側の傾き等）の違いを定量的に明らかにする。

- ・ERA5で得られる各地点・高度における風速および運動量フラックスの周波数スペクトルに対して、上記の結果をもとにスペクトルの形状の補正、および低周波数（長周期）域における絶対値の補正を行い、運動量フラックスの3次元分布を求める（図6）。

- ・上記で得られた運動量フラックスの3次元分布から重力波による加減速を求め、ERA5中の加減速（陽に表現される重力波、重力波パラメタリゼーション、データ同化のインクリメントのすべてを加えたもの）と比較する。さらに、重力波解像大気大循環モデルとも比較する。

- ・振幅の大きい重力波イベントについてレイトレーシング解析を行い、重力波の波源を特定する。

- ・得られた重力波による加減速とERA5中の重力波による加減速の差が大きいときに着目し、その差を引き起こす波源との関係を調べる。その結果をもとに、それぞれの波源について、モデル中の重力波の効果をどのように改善する必要があるかを明らかにする。

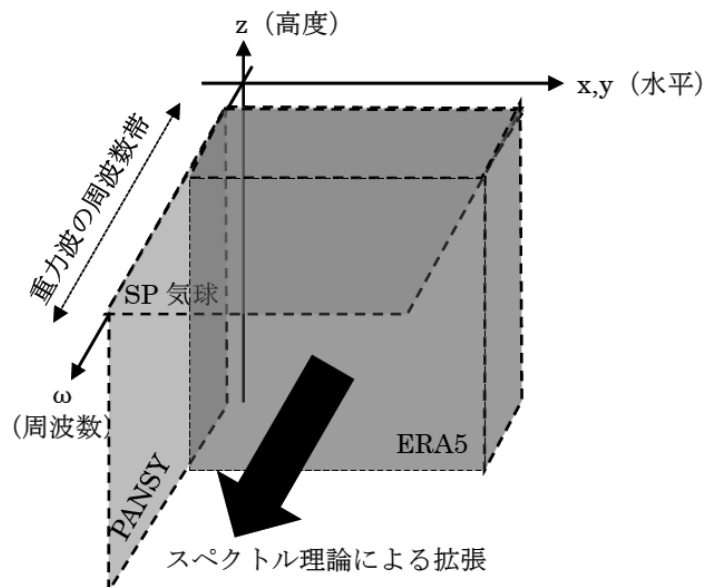


図6：重力波効果の3次元構造推定のイメージ。陰影はそれぞれのデータがカバーする領域・周波数帯。

7. まとめ

現在の気候モデルにおいて、大気重力波による運動量輸送を正しく表現できないことが将来予測における主要な不確実性の1つとなっている。特に、重力波は周期・水平波長帯が幅広く、その全体を観測できる手法は限られている。そこで、重力波の活動度が他の地域に比べて高い南極域において、全周期帯の重力波による運動量輸送の水平分布を得ることができるSP気球観測計画（LODEWAVE）を立案した。南半球の夏期間にあたる2021年度後半に南極昭和基地で最大3回のSP気球観測を実施し、高度19 kmの下部成層圏における重力波による運動量輸送の水平分布を明らかにする。さらに、最新の気象再解析データで得られる長周期の重力波による運動量フラックスに対して、SP気球観測で得られる重力波による運動量輸送の水平分布とPANSYレーダー観測で得られる鉛直分布を用いて拘束を課し、南極域における重力波による運動量輸送の3次元分布を推定する。それにより、モデル中の重力波効果の表現の定性的・定量的問題点を明らかにする。

さらに本計画では、観測装置の軽量化によりSP気球を小型化し、かつ取り扱いの容易な気球を開発することで、非専門家による観測を可能にし、将来の定常的な観測体制構築の第一歩とすることも目指している。定常的なSP気球観測により、南極域上空の様々な場所での気温や風速といった気

象データを準リアルタイムでかつ連続的に提供することができれば、南極域の数値予報も大きく改善されると期待される。

謝辞

粒跡線の計算には欧州中期予報センター(ECMWF)により提供されたERA-Interim気象再解析データを使用しました。昭和基地の地上気象観測データは気象庁HP (<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>) より取得しました。本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)一般「先進的気球観測による南極域における大気重力波の確率的振る舞いの解明」(課題番号18H01276)を受けて行っています。

参考文献

- [1] Fritts, D. C., and M. J. Alexander (2003), Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere, *Rev. Geophys.*, 41, 1003, doi:10.1029/2001RG000106, 1.
- [2] Alexander, M. J., et al. (2010), Recent developments in gravity-wave effects in climate models and the global distribution of gravity-wave momentum flux from observations and models, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 136, 1103-1124. doi:10.1002/qj.637.
- [3] Wright, C. J., et al., (2017), Exploring gravity wave characteristics in 3-D using a novel S-transform technique: AIRS/Aqua measurements over the Southern Andes and Drake Passage, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 8553-8575.
- [4] Ern, M., et al. (2018), GRACILE: a comprehensive climatology of atmospheric gravity wave parameters based on satellite limb soundings, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 857-892, <https://doi.org/10.5194/essd-10-857-2018>.
- [5] Hertzog, A., et al. (2012), On the intermittency of gravity wave momentum flux in the stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, 69, 3433-3448.
- [6] Holt, L., et al. (2017), An evaluation of gravity waves and gravity wave sources in the Southern Hemisphere in a 7 km global circulation model, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 143, 2481-2495.
- [7] Jewtoukoff, V., et al. (2015), Gravity waves in the Southern Hemisphere derived from balloon observations and ECMWF analyses, *J. Atmos. Sci.*, 72, 3449-3468.
- [8] Geller, M. A., et al. (2013), A comparison between gravity wave momentum fluxes in observations and climate models, *J. Climate*, 26, 6383-6405.
- [9] Sato, K., et al. (2012), Gravity wave characteristics in the Southern Hemisphere revealed by a high-resolution middle-atmosphere general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, 69, 1378-1396.
- [10] Butchart, N., et al. (2011), Multimodel climate and variability of the stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 116, D05102.
- [11] McLandress, C., et al. (2012), Is missing orographic gravity wave drag near 60°S the case of the stratospheric zonal winds biases in chemistry-climate models?, *J. Atmos. Sci.*, 69, 802-818.
- [12] Tsuda, T., et al. (1990), Seasonal variation of momentum flux in the mesosphere observed with the MU radar, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 725-728.
- [13] Sato, K. (1994), A statistical study of the structure, saturation and sources of inertio-gravity waves in the lower stratosphere observed with the MU radar, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 56, 755-774.
- [14] Sato, K., et al. (2014), Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY), *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 118, 2-15.
- [15] Yoshiki, M., and K. Sato (2000), A statistical study of gravity waves in the polar regions based on operational radiosonde data, *J. Geophys. Res.* 105, 17995-18011.
- [16] Minamihara, Y., K. Sato, and M. Tsutsumi (2020), Intermittency of gravity waves in the Antarctic troposphere and lower stratosphere revealed by the PANSY radar observation, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2020JD032543. doi:10.1029/2020JD032543.
- [17] Hertzog, A., et al. (2007), Stratéole/Vorcore -Longduration, superpressure balloons to study the Antarctic lower stratosphere during the 2005 winter, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 24, 2048-2061.
- [18] Rabier, F., et al. (2010), The Concordiasi Project in Antarctica, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 69-86, <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2764.1>.
- [19] Hertzog, A., et al. (2008), Estimation of gravity wave momentum flux and phase speeds from quasi-Lagrangian stratospheric balloon flights. Part II: Results from the Vorcore campaign in Antarctica, *J.*

Atmos. Sci., 65, 3056-3070.

[20] Vincent, R. A., and A. Hertzog (2014), The response of superpressure balloons to gravity wave motions, Atmos. Meas. Tech., 7, 1043–1055.

[21] Minamihara, Y., et al. (2018), Statistical characteristics of gravity waves with near - inertial frequencies in the Antarctic troposphere and lower stratosphere observed by the PANSY radar, J. Geophys. Res. Atmos., 123, 8993-9010, <https://doi.org/10.1029/2017JD028128>.

[22] 斎藤芳隆、他（2014）、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 (BS13-04 実験)、宇宙航空研究開発機構研究開発報告、RR-13-011, 35-60.

[23] 斎藤芳隆、他（2020）、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、RR-19-002, 9-24.

[24] 斎藤芳隆、他（2020）、LODEWAVE 実験にむけたスーパープレッシャー気球の開発(I)、宇宙航空研究開発機構研究開発報告、投稿中.

[25] 永田靖典, 柳瀬眞一郎, 山田和彦（2015）, 小型飛翔体実験におけるイリジウム衛星通信の活用とデータ配信システムの開発, 大気球シンポジウム: 平成 27 年度, isas15-sbs-012.

[26] Tomikawa, Y., and K. Sato (2005), Design of the NIPR trajectory model, Polar Meteorol. Glaciol., 19, 120-137.