

# 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 (LODEWAVE : LOnG-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica) : 第1回キャンペーン観測の報告

富川 喜弘<sup>\*1,2,3</sup>, 斎藤 芳隆<sup>\*4</sup>, 村田 功<sup>\*5</sup>, 佐藤 薫<sup>\*6</sup>, 平沢 尚彦<sup>\*1,2,3</sup>, 高麗 正史<sup>\*6</sup>, 中篠 恭一<sup>\*7</sup>,  
秋田 大輔<sup>\*8</sup>, 松尾 卓摩<sup>\*9</sup>, 藤原 正智<sup>\*10</sup>, 加保 貴奈<sup>\*11</sup>, 吉田 理人<sup>\*2</sup>

## The first campaign results of LODEWAVE (LOnG-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica)

TOMIKAWA Yoshihiro<sup>\*1,2,3</sup>, SAITO Yoshitaka<sup>\*4</sup>, MURATA Isao<sup>\*5</sup>, SATO Kaoru<sup>\*6</sup>, HIRASAWA Naohiko<sup>\*1,2,3</sup>,  
KOHMA Masashi<sup>\*6</sup>, NAKASHINO Kyoichi<sup>\*7</sup>, AKITA Daisuke<sup>\*8</sup>, MATSUO Takuma<sup>\*9</sup>, FUJIWARA Masatomo<sup>\*10</sup>,  
KAHO Takana<sup>\*11</sup>, YOSHIDA Lihito<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

In order to obtain the horizontal distribution of momentum transport due to atmospheric gravity waves in the Antarctic region, the project observing the gravity waves using super-pressure (SP) balloons was launched, whose name is LODEWAVE (LOnG-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica). Its first campaign observation was conducted at Syowa Station in Antarctica from January to February 2022. In this campaign, three SP balloons were launched, and achieved level flight in the lower stratosphere, but the duration of level flight was limited to three days or less. On the other hand, we were able to establish the necessary infrastructure for future SP balloon observations in the Antarctic region, including a balloon monitoring system and a balloon launch method. Preliminary analysis of the observation data showed that it captured horizontal wind disturbances due to inertia gravity waves with near inertial period or inertial oscillations. Currently, the SP balloon and its onboard equipment are being improved, and the next campaign observation is scheduled from January to February 2024 by JARE65 (65<sup>th</sup> Japanese Antarctic Research Expedition), aiming for longer flights.

**Keywords:** Gravity wave, Super-pressure balloon, Antarctic, Atmospheric momentum transport

### 概要

南極域における大気重力波（以降、重力波）による運動量輸送の水平分布を捉えることを目的として、スーパープレッシャー（SP）気球による重力波観測計画（LOnG-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica : LODEWAVE）を立ち上げ、第1回のキャンペーン観測を2022年1～2月に南極昭和基地で実施した。同キャンペーンでは3機のSP気球を放球し、下部成層圏におけるレベルフライトによる観測には成功したが、レベルフライトの期間はいずれも3日以内に留まった。一方で、気球監視体制の構築や放球方法の確立など、南極域における今後のSP気球観測実施に必要な基盤を整備することができた。得られた観測データを解析した結果、近慣性周期の慣性重力波、あるいは慣性振動によるとみられる水平風速擾乱を捉えていたことが分かった。現在、SP気球と気球搭載装置の改良を進めており、より長期間のフライトを目指すSP気球観測を第65次南極地域観測隊により2024年1～2月に実施する予定である。

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

<sup>\*1</sup> 国立極地研究所 (National Institute of Polar Research)

<sup>\*2</sup> 総合研究大学院大学 先端学術院・先端学術専攻 (The Graduate Institute for Advanced Studies, SOKENDAI)

<sup>\*3</sup> 情報・システム研究機構 データサイエンス共同利用基盤施設 極域環境データサイエンスセンター

(Polar Environment Data Science Center, Joint Support-Center for Data Science Research, Research Organization of Information and Systems)

<sup>\*4</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

<sup>\*5</sup> 東北大学大学院環境科学研究科 (Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University)

<sup>\*6</sup> 東京大学大学院理学系研究科 (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

<sup>\*7</sup> 東海大学工学部 (School of Engineering, Tokai University)

<sup>\*8</sup> 東京工業大学環境・社会理工学院 (School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology)

<sup>\*9</sup> 明治大学理工学部 (School of Science and Technology, Meiji University)

<sup>\*10</sup> 北海道大学大学院地球環境科学研究院 (Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University)

<sup>\*11</sup> 湘南工科大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Shonan Institute of Technology)

## 1. はじめに

重力波は、運動量を遠方へ輸送・供給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（高度 10~100 km）中の風・温度・物質分布の決定に重要な役割を果たす[1,2]。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、全ての重力波を捉え、その運動量輸送を定量的に評価することは、最新の観測でも容易ではない。現在、重力波の全周期帯をカバーし、かつこれに伴う運動量輸送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 SP 気球による気圧・2 次元風速の観測がある。

南極昭和基地大型大気レーダー（PANSY : Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar）は、著者らを含む研究グループ（代表：佐藤薫）が設置した南極域唯一の大型大気レーダーであり、世界的に見ても 365 日 24 時間体制で稼働している大型大気レーダーは PANSY レーダーのみである。PANSY レーダーは、対流圏から下部成層圏の風速 3 成分を高時間・高鉛直分解能で観測することができ、重力波の全周期帯（南極では約 5 分~十数時間）の運動量フラックスを直接推定することができる[3]。

一方、一定の密度面を 1 か月以上の長期にわたって浮遊する SP 気球は、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、その水平分布も捉えることができる。CNES（フランス国立宇宙研究センター）を中心とする国際研究グループは、南極域において SP 気球を用いた 2 回のキャンペーン観測（2005、2010 年）を行い[4,5]、南極域全域における重力波の運動量輸送や空間分布を捉えることに成功した[6,7]。しかし、当時は PANSY レーダーは稼働していなかった。

そこで、PANSY レーダーによる拠点観測と SP 気球による面的観測を組み合わせた重力波研究を実施するため、南極域における大気重力波の SP 気球観測計画（LOng-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica : LODEWAVE）を立案した[8,9]。LODEWAVE の第 1 回キャンペーン観測は、2022 年 1~2 月に南極昭和基地（69°00'S, 39°35'E）において実施された。同期間中に 3 機の SP 気球が昭和基地から放球され、いずれも下部成層圏におけるレベルフライトによる観測に成功した。これが、日本初の SP 気球による科学観測である。本論文では、気球監視体制の構築や第 1 回キャンペーン観測の経過と初期解析結果について報告する。

## 2. 観測システムの概要

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し、その水平分布を得るため、10 日間以上浮遊可能な SP 気球を用いて、30 秒間隔で気温、水平風速、気圧を高精度で測定する。本観測の主な特徴は 2 つある。1 つは、等密度面を飛ぶという SP 気球の性質と、高時間分解能・高精度な気圧観測を組み合わせることで、全周期帯の重力波による運動量輸送を高精度で推定できることである。第 1 章で述べた通り、このような観測を実現できるのは、SP 気球観測と大型大気レーダー観測の 2 つだけである。もう 1 つの特徴は、長期間の飛揚により、幅広い水平領域において上記の観測を実施できることである。南極域の重力波による運動量輸送の様子は、大陸沿岸部、内陸部、南極半島域、海洋上といったそれぞれの領域で異なることが知られている。SP 気球による長時間飛揚観測は、これらすべての領域における観測を可能とする。一方で、後者の特徴を実現するには、SP 気球がより長期間飛揚することが望ましいが、3.2 章の航跡予測で示すように、一般的な夏極成層圏の風系では 10 日を超えて南極域（本観測では南緯 60 度以南）を飛び続けることは容易ではない。そこで、本観測では SP 気球の飛揚期間の要求仕様を 10 日以上とした[10,11]。各種物理量の観測に対する要求精度や根拠については他の論文[8,9]で詳しく述べているため、ここではその概要のみを記述する。

図 1 は本観測で使用する SP 気球と気球搭載装置の荷姿である（3 回の観測で全て同じ）。本観測で使用する SP 気球（型式：NPB02）の満膨張時の体積は 183 m<sup>3</sup>、高さは 4.8 m、幅は 8.1 m である。気球内部に充填するヘリウムガスの漏れを防ぎ、長期間の飛揚を実現するため、外側がポリエチレン気球、内側がゴム気球の二重構造となっている[12]。さらに、気球に目の細かい網をかぶせることで、昼夜の差圧の変化に耐える高い耐圧性を実現している[10,11,13]。気球搭載装置には、温度センサー、気圧センサー、GPS センサーを搭載し、30 秒間隔で気球の位置における温度、気圧、水平風

を計測する。計測されたデータはイリジウム SBD（ショートバーストデータ）を通じて 7.5 分おきに地上へと送信される[14]。気球搭載装置の大きさは 285 mm x 140 mm x 210 mm、重量は 2.7 kg である。気球の飛翔高度は、PANSY レーダーの観測可能な高度範囲で、なおかつ他の飛翔体と遭遇する可能性の低い高度 18~19 km（65~70 hPa）を想定している。これ以降、実施した 3 回の観測を実施順に LODEWAVE03、02、01 と呼称する（番号と実施順が逆になっているので注意）。

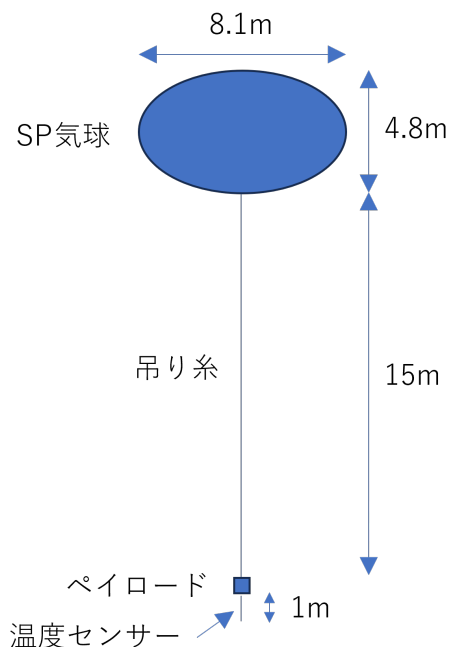


図1：本SP気球観測の荷姿。

### 3. 飛翔安全への対応

#### 3.1. 航空管制当局との調整

昭和基地からの SP 気球の放球については、南緯 60 度以南の航空管制を委託されている COMNAP (南極観測実施責任者評議会) の航空分科会と事前に協議し、

- ・放球に際して、米国・マクマード基地を通じて NOTAM (Notice to Airmen: 各国航空局が航空従事者に提供する航空安全に関する情報) を出す

- ・COMNAP Assets Tracking System (CATS: 南極域を航行する船舶と航空機の現在地と航跡が確認できるシステム) に常に気球の位置情報を登録する

- ・南緯 60 度より低緯度側に達する前に観測を終了させる

- ・有人基地の周辺 100 km 以内、かつ高度 15 km 以下を通過する場合は、1 時間前までにメール等で事前に通告する

という条件で実施することとした。COMNAP への連絡は国立極地研究所南極観測センターを通じて行った。

一方で、南緯 60 度以北の飛揚については、南極域を取り囲む 5 つの FIR (Flight Information Region) を管理する 5 か国 (オーストラリア、ニュージーランド、チリ、アルゼンチン、南アフリカ) からの許可を事前に得られなかったため、今回は断念した。

#### 3.2. クイックルック (QL) システム

SP気球搭載観測装置で測定した温度、気圧、GPS位置情報などの観測データは、イリジウムSBDにより、指定されたメールアドレスに添付ファイルとして送信される。SP気球の観測終了条件 (SP気球が南極域から外れる、電池電圧が閾値より下がる等) を満たした場合には、直ちにカッターコマンド (気球頭部に取り付けられた気球切り裂き用のカッターを起動する) を送信する必要がある。そのため、以下の機能を持つQL用のホームページ (HP) を国立極地研究所設置のウェブサーバ上に

構築した（図2）。

- ・受信メールから添付ファイルを分離・デコードし、観測データをウェブサーバ上に保存
- ・SP気球の位置情報をCATSに登録するため、気球の緯度・経度等を記述したGeoJSON形式（地理空間データ交換用のフォーマット）のファイルを作成し、10分毎にウェブサーバ上に保存
- ・SP気球の位置情報や軌跡をリアルタイムでウェブサーバ上に表示（図3）
- ・全球気象予報値（GFS: <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>）のデータを用いて、最新の気球位置から一定密度面上の10日先までの軌道を計算し[15]、ウェブサーバ上に表示（1分毎に更新）（図4）
- ・放球日決定を補助するために、0～5日後の昭和基地を起点とした10日先までの軌道も毎日計算し、ウェブサーバ上に表示

図5にこのQLシステムのデータフローを示す。このQLシステムに基づき、昭和基地に滞在する南極地域観測隊員と国内支援メンバーによる24時間監視体制を構築した。

図6に、LODEWAVE03を放球する0～5日前を初期値とする全球気象予報値（GFS）で計算された昭和基地からの軌道予測を示す。最新の予報値による軌道予測（図6a）では、気球は大陸縁辺部に沿って東進し、7～8日後には東経180度付近で南緯60度線を越えて低緯度側へと流されている。1～4日前の初期値による軌道予測（図6b-e）でもその傾向は大きくは変わらないが、南緯60度線を越える経度やタイミングは変化している。一方で、5日前の初期値による軌道予測（図6f）では、気球は昭和基地を出てすぐに南緯60度付近まで流されるが、その後は高緯度側に戻り10日後まで南緯60度より高緯度側に止まり続けている。これらの結果から、全球気象予報値に基づく気球の軌道予測は、予報の更新に伴って大きく変化する可能性があることがわかる。そのため、軌道予測は日々更新し、注視し続ける必要がある。



図2：ホームページ上のQLの冒頭の表示の例。Housekeepingデータのデフォルトと異なる部分のみ表示する仕様となっている。



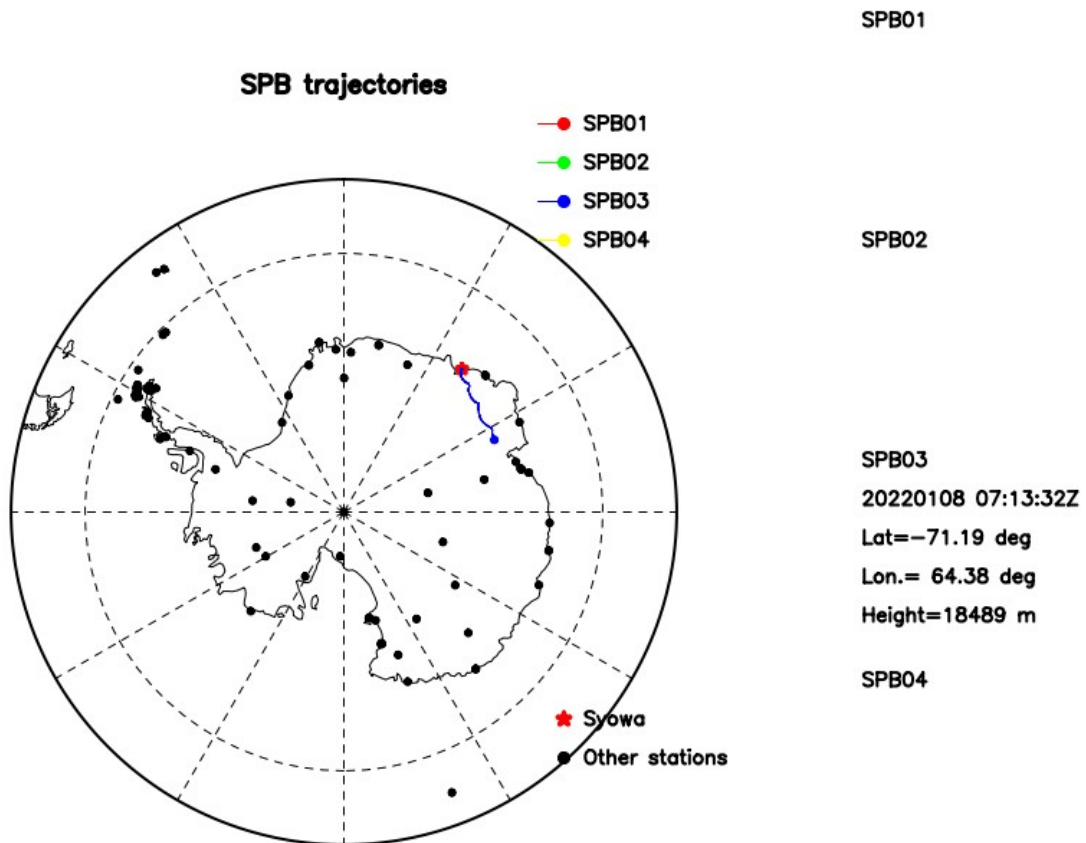


図3：気球の最新位置と飛跡の表示の例。SPB03は本論文中のLODEWAVE03に相当。黒丸は南極域の有人基地を示す。

**10day isopycnal trajectories starting at SPB positions**

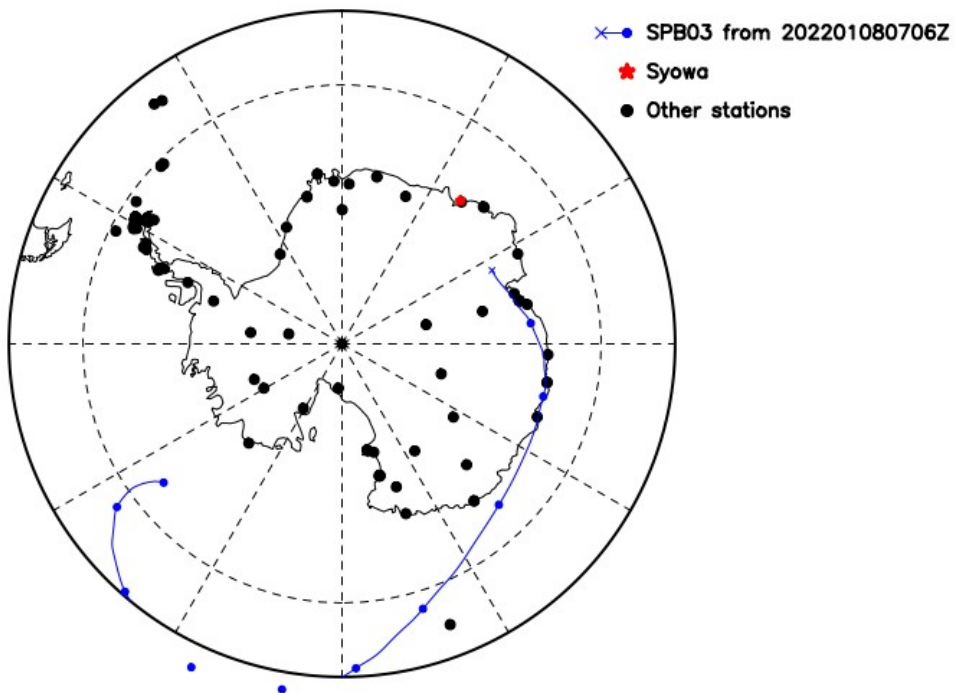


図4：気球の最新位置からの10日間の軌道予測の例。

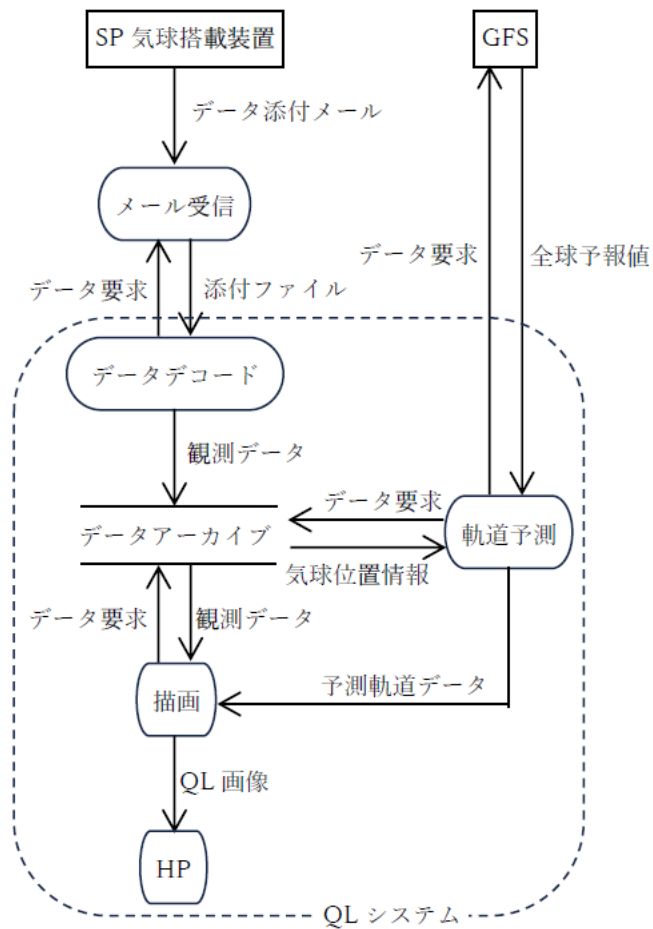


図5 : QLシステムのデータフロー。

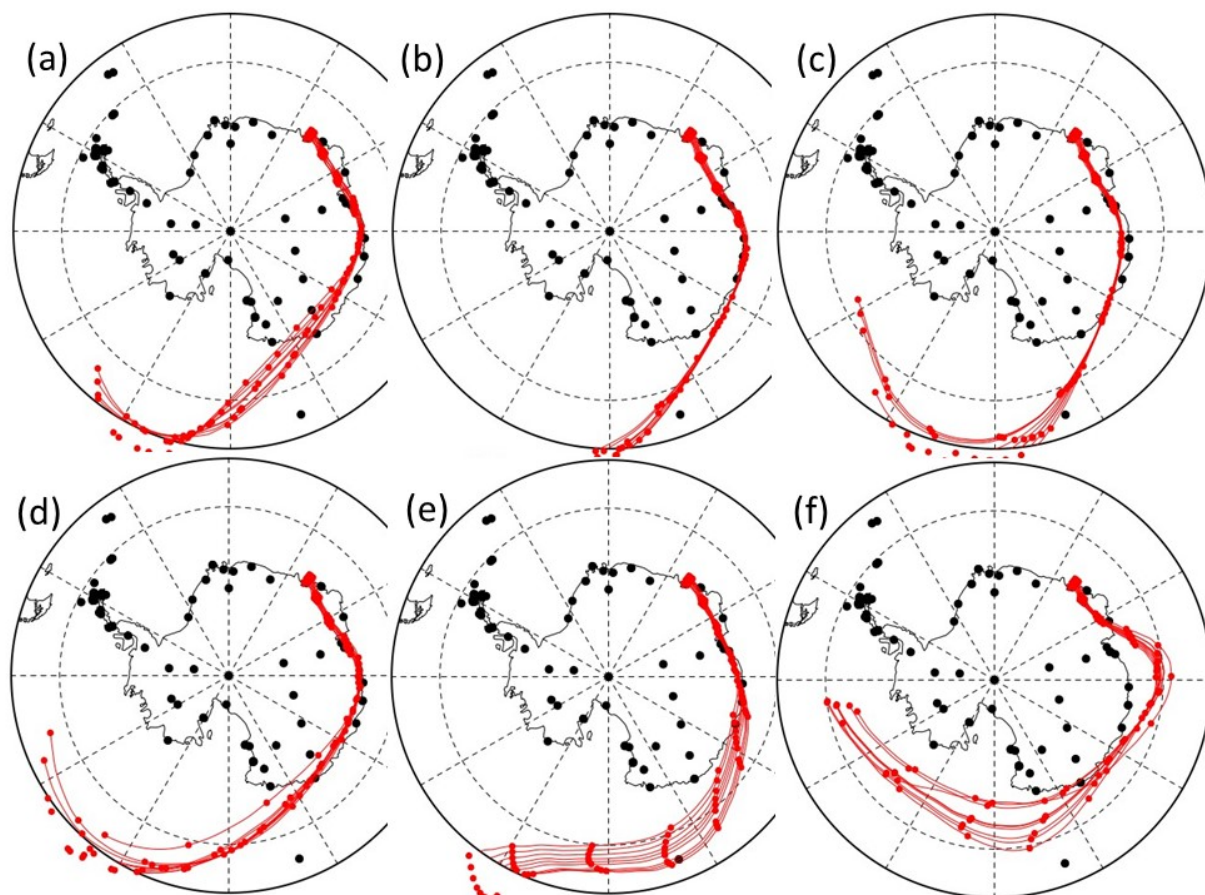


図6：昭和基地上空の65 hPaにおける9点 ( $69.0^{\circ}\text{S} \pm 0.5^{\circ}$ ,  $39.6^{\circ}\text{E} \pm 1.0^{\circ}$ ) を2022年1月6日14:00UTに出発する気球の軌道予測。それぞれ出発日の (a) 0、(b) 1、(c) 2、(d) 3、(e) 4、(f) 5日目の00:00UTを初期値とする全球気象予報値 (GFS) で計算。赤丸は1日毎の位置を示す。南極大陸を取り囲む点線は南緯60度線。

### 3.3. 人員配置

本 SP 気球観測は、2021 年 11 月に日本を出発した第 63 次南極地域観測隊により実施された。第 63 次南極地域観測隊には SP 気球観測を主に担当する隊員が 3 名参加し、SP 気球の準備・放球・地上からの気球監視等の業務にあたった。また、SP 気球の放球や気球監視の際には、その他の部門 (各種観測・設営業務) を主担当とする複数の隊員の支援を受けた。

地上からの気球監視は、1 時間に 1 回、毎時 30 分に監視員が QL を確認することで実施した。日本と昭和基地 (UTC+3) には 6 時間の時差があるため、昭和基地の深夜に相当する時間帯は日本に残っている国内支援メンバーが、それ以外の時間帯は昭和基地に滞在中の担当隊員 3 名が監視を行い、適宜、他部門の隊員の協力を得た。監視員は、事前に用意したチェックリストに基づき、気球の位置や housekeeping データ、QL 上に表示される Warning 等を記録し、関係者にメールで送信した。また、気球放球後に安定したレベルフライトに入るまでの時間、および気球が降下を開始してから地上に到達するまでの時間は、複数人が継続的に監視するようにした。

### 3.4. ADS-B の非搭載

本観測で使用する気球搭載装置は、ICAO (国際民間航空機関) の規定で ATC トランスポンダーの搭載が不要な 3 kg 未満の重量である。一方、南極で運用するすべての航空機・無人機・気球に ADS-B 搭載を義務付ける提案 (working paper) が英国から出され [16]、2019 年 7 月の ATCM (南極条約協議国会議) および 8 月の COMNAP の航空機安全に関する分科会で議論された。ATC トランスポンダーは航空管制システムの二次監視レーダー (SSR) からの 1030MHz の照会電波を受信すると 1090MHz の電波で識別符号と高度情報を返送するのに対して、ADS-B は GPS で取得した自機の位置を 1090MHz の電波で定期的を送信する。米国では 2020 年 1 月よりすべての航空機に ADS-B の搭載が義務付けられており、その他の国々で

も検討が進められている。ADS-Bには、自機の位置を送信するOut機能と他機の位置を受信するIn機能があり、南極で気球への搭載義務化が提案されているのはOut機能である。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。

上記の提案を受け、本研究グループでも気球搭載機器に小型のADS-Bを搭載する方向で開発を進めていたが、日本国内ではADS-B搭載に必要な航空機IDが発行されないことが判明した。さらに、オーストラリア南極局を通じてオーストラリアでの取得を目指したが、オーストラリアのFIRを飛揚しない機体に対しての航空機IDの発行は許可されなかった。そこで、COMNAP航空分科会と協議した結果、本SP気球観測ではADS-Bの搭載は不要とし、3.1.に示した条件の下で観測を実施することで合意した。

#### 4. 昭和基地での実施経過

第63次南極地域観測隊の本観測の担当隊員は、2021年12月21日に昭和基地に入り、3機のSP気球を放球した後、翌年2月7～8日に昭和基地を離れた。その間の作業経過は以下の通りである。

##### 4.1. 放球準備

気球へのガス注入他の準備は廃棄物保管庫で行い、放球はCヘリポート付近で行った(図7)。廃棄物保管庫とCヘリポートは冬期には使用されておらず、この付近は2mを超える積雪となるため、事前に62次越冬隊に廃棄物保管庫内の確認と周辺の除雪を依頼した。その結果、廃棄物保管庫のシャッターが凍り付いて開かなかったため、先行して昭和基地入りした63次隊の建築・宙空部門隊員により廃棄物保管庫内の除雪とシャッター周りの氷削り等によりシャッターを開閉可能としてもらった。

12月21日以降、担当隊員が昭和基地入りし本格的に準備を開始した。廃棄物保管庫内の氷削りや観測物資の運び込みは2日ほどで終了したが、Cヘリポートまでの除雪は一部氷ついた部分が残っており、ガス注入後の気球と観測装置をCヘリポートまで運ぶのは危険と判断し、1機目の放球はその手前の2カ所を放球候補地とした。2カ所設定したのは風向きによって使い分けるためである。1機目の放球候補地については南極観測船しらせの乗員の支援も得てその後5日ほどかけて除雪・整地した。

観測器の準備は主に大型大気レーダー観測制御小屋を利用して行った。この観測器ではコマンド送信およびデータ受信にイリジウムSBDを使用しているため、インターネット環境が必要となる。また、QLは極地研内のサーバで自動作成してホームページ上で確認するため、データ送受信用PCは優先帯域で接続して事前の動作確認から実際の観測データ受信まで行った。



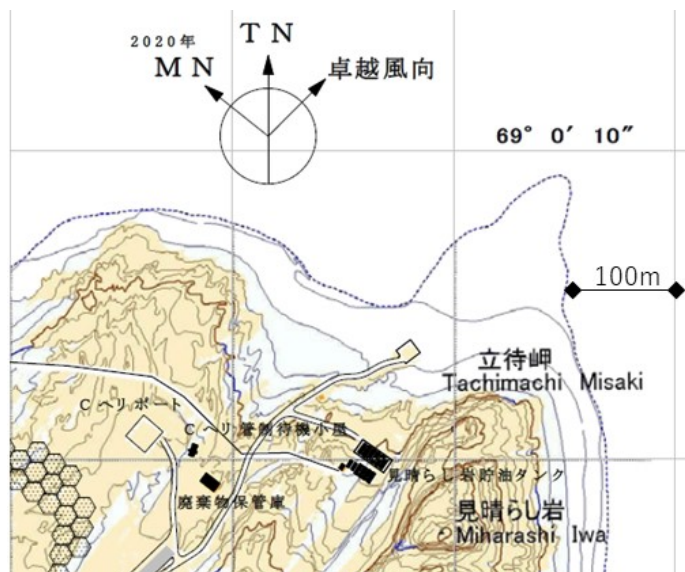


図7：作業場所・放球場所付近の地図。TN、MNはそれぞれ真北と2020年の磁北を表す。

#### 4.2.1 機目の放球・観測

1機目(LODEWAVE03)の放球は12月中を予定していたが、昭和基地入りが遅れたことや12月下旬にブリザードに見舞われたことにより1月6日となった。事前の動作チェックでは特に問題はなく、午前中に装置の最終動作チェックを行い、午後から廃棄物保管庫内で気球へのガス注入を開始し、14:08UTに放球した。放球時の風向は南寄りであったため廃棄物保管庫正面の放球候補地から放球したが、風速3 m/s程度でも気球は風下側にかかり煽られ気球が放球スペースの先の雪面(高さ約2mの雪壁の上)にわずかに触れる場面もあった。その後気球は計画通り高度18.3 km付近でレベルフライトに入り観測を続けたが、1月8日18:00UT頃から21:00UT頃にかけて高度14.2 km付近まで降下した後、1月9日00:00UT頃にかけて再び高度18.2 km付近まで上昇した。これは、降下が始まる前の1月8日04:00UT頃に内側のゴム気球が破裂し、ヘリウムガスの漏れる速度が速まった結果、夜間の日照の減少によって正の差圧を維持できなくなり、浮力を失って降下したと考えられる[17]。その後、日照の回復に伴って再び高度が上昇したと考えられるが、1月9日04:00UT頃から再び下降し始め、09:45UT頃に緯度:68°42'S、経度:84°36'E付近の標高1600 m前後の大陸上に降下した(図8、表1)。図8に見られるデータ欠損はイリジウムSBDの通信エラーによるものであり、観測期間中、5%程度の確率で発生した[14]。

#### 4.3.2 機目の放球・観測

1機目の放球時に気球が雪面に触れたことから、2機目(LODEWAVE02)の放球には広いCヘリポートを使うこととし、しらせ乗員の支援も受けて数日かけてCヘリポートまでの除雪を行った。また、1機目の観測データをチェックしたところ、緯度経度が不連続であったり、移動距離が大きいときに実際の緯度経度からずれが生じる問題があることが判明したため、メーカーと連絡を取りながら搭載プログラムの修正を行った。

上空の風向きが悪く航跡予測では放球後すぐに低緯度側に流される状況が続いたことや1月17~18日に再びブリザードに見舞われたことから2機目の放球は1月22日とし、当日午前から準備を始めた。しかし、気球にガスを注入し廃棄物保管庫からCヘリポートまで運び出した時点でデータの受信が確認されず、放球を中止した。気球は再び廃棄物保管庫に戻してそのまま保管し、メーカーと連絡を取って受信不具合の再現試験を数日間実施したが、再度発生することはなかった。

飛翔安全には影響しない問題であったことから、1月30日に放球をやり直すこととし、午後から観測器のチェックを始めたところ、途中から再びデータ受信ができなくなったため、再度放球を中止した。原因は不明だが、ウォッチドッグタイマーICによってデータ収集用のCPUにリセットがかかることが問題であったため、この機能をICではなくFPGAのロジックで実現するよう機能変更を行った。

2月4日午前から観測器のチェックを開始し、午後からガスの補充も行って12:36UTに放球した。今回は風速2 m/s以下で風に煽られることなく作業は進んだ。その後気球は高度17.6 km付近でレベルフライトに入り観測を続けたが、2月5日18:00UT頃から下降し始め、2月5日23:25UT頃に緯度:71°14'S、経度:

31°50'E 付近の標高 1500 m 前後の大陸上に降下した(図 8、表 1)。

#### 4.4.3 機目の放球・観測

3 機目 (LODEWAVE01) の観測器には 2 機目と同様の改修を行った上で、2 月 5 日午前より観測器のチェックを開始し、午後には気球へのガス注入を行った。12:00UT 頃にはガス注入作業は終了したが風速が 10 m/s 程度あり、その後も 5 m/s 以下にならなかったため放球を延期した。気球は廃棄物保管庫内でそのまま保管した。

2 月 6 日、午前より観測器のチェックを始め、午後は若干のガス補充を行い、風が弱まるのを待って 13:05UT に C ヘリポートから放球した。今回は風速 3 m/s 程度の西風であったが、やはり気球は風下側にかなり煽られ気球が放球スペースの地面に触れる場面もあった。その後気球は高度 18.0 km 付近でレベルフライトに入り観測を続けたが、2 月 7 日 10:00UT 頃から下降し始め、14:00UT 頃に緯度:70°13'S、経度:43°15'E 付近の標高 1800 m 前後の大陸上に降下した(図 8、表 1)。

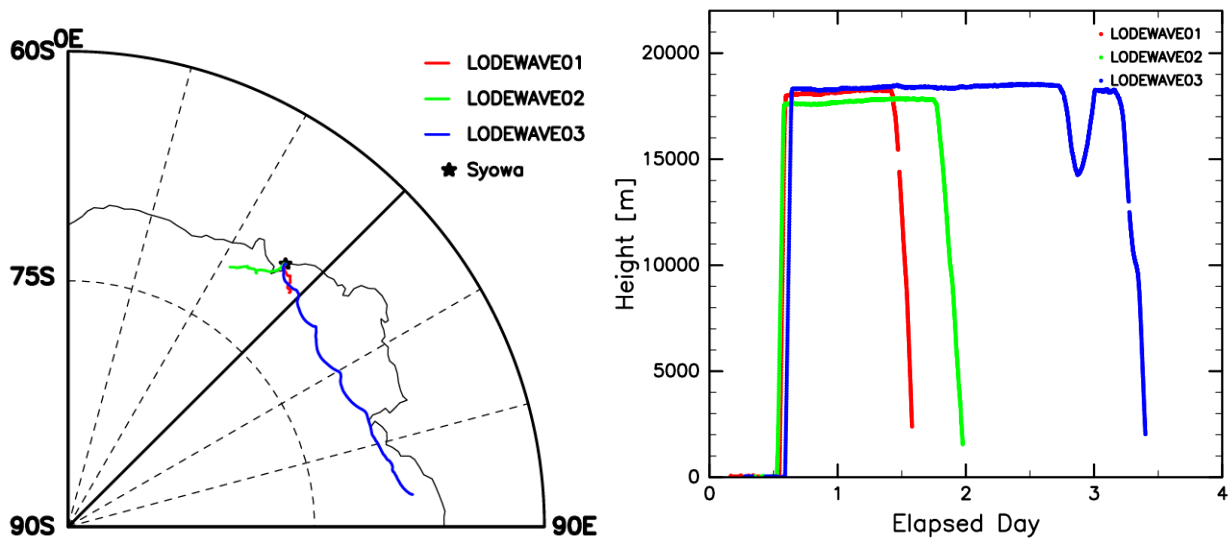


図8：3機のSP気球の飛跡(左)と高度(右)。左図の星は昭和基地。右図の横軸は放球日の00UTからの経過日数。左図は[17]より引用。

表1：3機のSP気球の飛揚期間。

機番	飛揚期間	レベルフライト期間
LODEWAVE03	67時間30分	54時間30分
LODEWAVE02	34時間50分	27時間50分
LODEWAVE01	24時間50分	19時間30分

## 5. 初期解析結果

ここでは、重力波解析に用いることができるレベルフライトの時間が最も長かった LODEWAVE03 に着目する。温度・気圧のデータ、およびそれらに基づく密度についての検証がまだ不十分のため、以下の解析では SP 気球が等密度面を飛んだと仮定して議論する。LODEWAVE03 の飛跡(図 8)を見ると、東向きに流されながら反時計回りのトロコイド状の運動をしている。これは、西風(東向きの風)に反時計回りの回転運動が重畳していることを示唆している。表 2 に、トロコイド運動の北側の端点の日時と緯度・経度を示す。このトロコイド運動は 11~14 時間で一周することがわかる。SP 気球は等密度面上をその場の風に流されて飛ぶことから、このトロコイド運動の周期は、トロコイド運動を引き起こしたと考えられる大気波動の背景風に乗った系から見た“intrinsic”な周期であるとみなすことができる。

次に、LODEWAVE03 の東西風・南北風の時系列(高度 18 km 以上のデータのみ)を図 9 に示す。

東西風・南北風のいずれもほぼ全期間を通して、振幅 4~5 m/s 程度、周期 12 時間程度の振動をしている。東西風の位相が南北風の位相よりも約 90 度先行しており、結果として反時計回りの回転運動を引き起こしていたと考えられる。図は省略するが、LODEWAVE03 のホドグラフ（水平風ベクトルの先端をつないだ図）を見ても、振幅 4~5 m/s で反時計回りのほぼ円状となっていた。一般に、慣性重力波に伴う水平風速擾乱は楕円状のホドグラフを示し、その形が円に近づくほど慣性重力波の長周期側の極限である慣性振動に近いことを表す。この SP 気球が飛揚していた南緯 70 度における慣性周期は約 12.7 時間であり[18]、上述のトロコイド運動の“intrinsic”な周期とも矛盾しない。したがって、このトロコイド状の飛跡は近慣性周期の慣性重力波、あるいはその極限である慣性振動によって引き起こされたと考えられる。

このようなトロコイド状の飛跡は過去の SP 気球観測でも観測され、近慣性周期の慣性重力波、あるいは慣性振動によるものであると考えられている[19]。昭和基地での PANSY レーダー観測では、水平風の周波数スペクトルが慣性周期付近にピークを持つことが報告されており、近慣性周期の慣性重力波、あるいは慣性振動が卓越することを示唆している[20]。一方で、数値予報モデル、あるいはモデルに観測データを同化して得られる客観解析データの風速データを用いて計算された飛跡が、しばしば実際の気球の飛跡とずれることが報告されている[21]。これは、数値予報モデルや客観解析データがこれらの大気波動を十分に再現できていないことを示唆している。実際、全球気象予報値に基づく本観測の軌道予測を示した図 6 を見ると、LODEWAVE03 が大陸縁辺部に沿って東向きに流される様子は概ね正しく予測されているものの、本観測で捉えられたトロコイド状の軌跡は予測されていない。今後、SP 気球観測のデータを蓄積していくことで、その要因を明らかにし、数値予報モデルやデータ同化システムの改善につなげていく必要がある。さらに、本論文では使用していない温度・気圧データの検証を進めるとともに、本観測では実現できなかったより長期間のレベルフライト中の観測データを用いた(慣性)重力波のイベント解析やスペクトル解析、および PANSY レーダー観測との比較も進めていく予定である。

表2：LODEWAVE03の北側の端点の日時と緯度・経度。

日時(UT)	緯度	経度
1/7 00:08:01	69°48'S	43°54'E
1/7 12:30:31	70°28'S	51°00'E
1/8 02:31:32	70°50'S	60°31'E
1/8 13:48:02	70°25'S	69°15'E

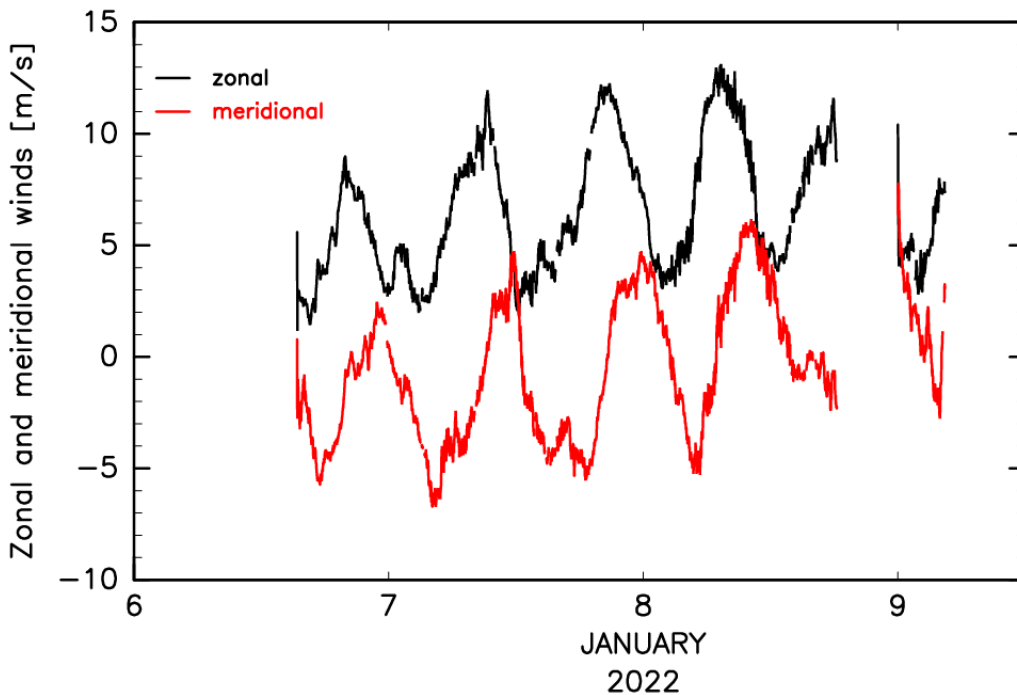


図9：LODEWAVE03の東西風(黒)、南北風(赤)の時系列(UT)。高度18 km以上のデータのみを描画。

## 6. SP気球の改良

2章で述べた通り、本観測ではSP気球の10日以上での飛揚を目指していたが、4章で示した通り、飛揚期間は24～67時間、レベルフライト期間は19～55時間と目標には届かなかった。SP気球の差圧データの解析から、SP気球が想定より早く降下したのは、内側のゴム気球が想定より早く破裂したためと考えられている[17]。そこで、第1回キャンペーン終了後、真空中でゴム気球の皮膜の紫外線劣化試験を行った。その結果、引っ張りのない皮膜は4.4日間照射しても初期強度の半分を維持したのに対し、5倍に引っ張った皮膜は0.3日で強度が初期の半分まで低下した。飛揚中にゴム気球の皮膜が約5倍に引き伸ばされることを考慮すると、数時間という極めて短い時間スケールで強度が失われることがわかった。そのため、次のキャンペーン観測では外側・内側が共にポリエチレンフィルム製のSP気球を製作し、観測に使用する予定である。

## 7. まとめ

南極域における重力波による運動量輸送の水平分布を捉えることを目的として、2022年1～2月に3機のSP気球を昭和基地から放球した。下部成層圏の高度18 km付近におけるレベルフライトによる観測は実現したが、レベルフライトの期間は19～55時間に留まり、想定していた10日間には達しなかった。一方で、気球監視体制の構築や放球方法の確立など、南極域における今後のSP気球観測実施に必要な基盤を整備することができた。トロコイド状の飛跡が観測された際の観測データを解析した結果、近慣性周期の慣性重力波、あるいは慣性振動によるとみられる水平風速擾乱がトロコイド状の飛跡を作り出していたことが分かった。本観測は、SP気球による日本初の科学観測として、近慣性周期の慣性重力波、あるいは慣性振動によるとみられる水平風速擾乱の検出に成功したことになる。現在、SP気球と気球搭載装置の改良を進めており、より長期間のフライトを目指すSP気球観測を第65次南極地域観測隊により2024年1～2月に実施する予定である。



## 謝辞

昭和基地でのSP気球観測の実施にあたり、第62・63次南極地域観測隊の多数の隊員、およびしらせ乗員のご支援を頂きました。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)、基盤研究(B)「南極域における先進的気球・レーダー観測を用いた大気重力波の三次元特性の解明」(課題番号21H01160)、南極地域観測一般研究観測プロジェクト「南極上部対流圏・下部成層圏における先進的気球観測」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] Sato, K., et al. (2014), Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY), *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 118, 2–15.
- [4] Hertzog, A., et al. (2007), Stratéole/Vorcore -Long duration, superpressure balloons to study the Antarctic lower stratosphere during the 2005 winter, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 24, 2048–2061.
- [5] Rabier, F., et al. (2010), The Concordiasi Project in Antarctica, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 69–86, <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2764.1>.
- [6] 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.
- [7] Hertzog, A., et al. (2012), On the intermittency of gravity wave momentum flux in the stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, 69, 3433–3448.
- [8] 富川喜弘、他 (2021)、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)、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-20-009, 19–33.
- [9] Tomikawa, Y., et al. (2023), LODEWAVE (Long-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica), *J. Evol. Space Activ.*, 1, 14.
- [10] 斎藤芳隆、他 (2021)、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: 大気球研究報告、JAXA-RR-20-009, 35–56.
- [11] 斎藤芳隆、他 (2023)、LODEWAVE 実験にむけたスーパープレッシャー気球の開発(II)、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-22-008, 25–35.
- [12] 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、JAXA-RR-19-002, 9–24.
- [13] 斎藤芳隆、他 (2014)、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 (BS13-04 実験)、宇宙航空研究開発機構研究開発報告、JAXA-RR-13-011, 35–60.
- [14] Kaho, T., et al. (2022), Communication Experiment of Iridium Satellite and Super Pressure Balloon over Antarctica, 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 677–679.
- [15] Tomikawa, Y., and K. Sato (2005), Design of the NIPR trajectory model, *Polar Meteorol. Glaciol.*, 19, 120–137.
- [16] United Kingdom (2019), Separation of Air Operations in Antarctica, XLII Antarctic Treaty Consultative Meeting (ATCM42), Czech Republic, 5 pp. [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiS0IyM6bWCAXAbPUHHVKXAnwQFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fdocuments.ats.aq%2FATCM42%2Fwp%2FATCM42\\_wp024\\_e.doc&usg=AOvVaw2jmd3BWNpkzwZ3OMBwBHNe&opi=89978449](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiS0IyM6bWCAXAbPUHHVKXAnwQFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fdocuments.ats.aq%2FATCM42%2Fwp%2FATCM42_wp024_e.doc&usg=AOvVaw2jmd3BWNpkzwZ3OMBwBHNe&opi=89978449)
- [17] Saito, Y., et al. (2023), Flight Performance of Super-Pressure Balloons for LODEWAVE, 34<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science, submitted.
- [18] Andrews, D. G., et al. (1987), *Middle Atmosphere Dynamics*, Academic Press, 489 pp.

- [19] Conway, J. P., et al. (2019), Using Project Loon superpressure balloon observations to investigate the inertial peak in the intrinsic wind spectrum in the midlatitude stratosphere, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124, 8594–8604.
- [20] 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.*, 123, 8993–9010.
- [21] Knudsen, B. M., et al. (2006), Accuracy of analyzed temperatures, winds and trajectories in the Southern Hemisphere tropical and midlatitude stratosphere as compared to long-duration balloon flights, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 5391–5397.