

## 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計画 (LODEWAVE) の現況 2

富川喜弘（国立極地研究所・総合研究大学院大学）、佐藤薫（東京大学）、斎藤芳隆（宇宙航空開発研究機構宇宙科学研究所）、村田功（東北大学）、平沢尚彦（国立極地研究所・総合研究大学院大学）、高麗正史（東京大学）、中篠恭一（東海大学）、秋田大輔（東京工業大学）、松尾卓摩（明治大学）、藤原正智（北海道大学）、吉田理人（総合研究大学院大学）

### 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ったが[3]、重力波の鉛直波長は背景水平風により大きく変化するため、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ち、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[4]。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。

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するには、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必要がある。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。

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[5]。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[6]。

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。南極域ではこれまでに 2 回（2005、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[7, 8]、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[4, 9]。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、高解像度化により長周期・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。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[10]。2021 年 11 月に日本を出発する第 63 次南極観測隊夏隊では、2021 年 12 月～2022 年 1 月に昭和基地で 3 回の SP 気球観測を実施する予定である。本講演では、この 1 年間の主な進展について報告する。

## 2. SP 気球の試験および訓練

LODEWAVE で使用する SP 気球は、耐圧性能 2400Pa と 10 日間の気密性能を満たすことが求められる。2020 年末の時点では、体積 100 m<sup>3</sup> の SP 気球が上記仕様を満たすことは確認されていたが[11]、実際の観測で使用する体積 180 m<sup>3</sup> の SP 気球については未確認であった。そこで、2021 年に表 1 に示すような気密・耐圧試験を実施し、上記仕様を満たすことを確認した。また、同じく表 1 および写真 1 に示すガス充填・放球作業の訓練を実施し、放球手順の確立を進めた。

表 1：2021 年に実施した SP 気球の試験・訓練の一覧。

日時	場所	内容
2021. 02. 16	極地研観測倉庫	ガス充填訓練
2021. 03. 22-24	大樹航空宇宙実験場格納庫	気密・耐圧試験
2021. 04. 29-05. 10	藤倉航装技術センター	気密・耐圧試験
2021. 07. 15-17	藤倉航装技術センター	膨張試験
2021. 09. 10	極地研観測倉庫	ガス充填訓練
2021. 10. 18-19	小野町体育館	ガス充填・放球作業訓練、耐圧試験



写真 1：2021 年 10 月 19 日に実施した SP 気球の放球作業訓練の様子。

## 3. ADS-B の非搭載

本計画で使用するペイロードは 3 kg 以下で ICAO（国際民間航空機関）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、南極で視界外飛行を行うすべての航空機・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 の搭載について検討し、ADS-B を搭載可能な観測装置を開発した。

一方、ADS-B の搭載にあたっては、機体固有の識別 ID を取得する必要があるが、日本では気球を含む無人機に対しては発行されていない。そのため、豪州南極局を通じて豪州での ID 取得を目指したが、豪州の管轄空域からの放球でないものに対して ID の発行は難しいとの回答があり、ID 取得を断念した。その後、COMNAP と対応について協議し、NOTAM を発出することで ADS-B の搭載については不要とすることを合意した。また、観測にあたっては、COMNAP Assets Tracking System (CATS : 南極域の航空機・船舶の位置情報をリアルタイムで表示するシステム) への位置情報の登録と、気球下降時に有人基地から 100 km 圏内を通過すると考えられる場合に基地に対して事前に e-mail の通報を行うこととした。

#### 4. 気球監視体制

SP 気球搭載観測装置で測定された気温・気圧・GPS 位置情報などのデータは、イリジウムショートバーストデータのサービスを通じて指定されたメールアドレスへ添付ファイルとして送信される。また、SP 気球が南極域外へ出た場合やバッテリーが消耗してきた場合には即座にカッターコマンドを送信して気球を落下させることになるため、24 時間体制で SP 気球の位置情報やハウスキーピングデータを監視する必要がある。そこで、以下のような機能を有したクイックルック (QL) サイトを、保有する Web サーバ上に構築する予定である。

- ・受信データの添付ファイルをメールから抜き出し、Web サーバ上に保存
- ・データファイルをデコード
- ・CATS へ SP 気球の位置情報を登録するため、気球の緯度・経度等を記載した GeoJSON 形式のファイルを定期的に作成し、CATS に URL を連絡
- ・飛揚中の SP 気球の位置情報と軌跡をリアルタイムで Web 上に表示
- ・Global Forecast System (GFS : [https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical\\_forecast\\_systems/gfs.php](https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php)) の 10 日分の全球予報データを定期的に取得し、デコード
- ・GFS データを用いて、SP 気球の最新の位置から 5 日先までの等密度面粒跡線を計算[12]
- ・上記の粒跡線を Web 上に表示

上記 QL サイトを元に、昭和基地に滞在する観測隊員および国内サポートメンバーによる 24 時間の監視体制を構築し、気球の監視を行う予定である。

#### 5. 将来計画

大気重力波の SP 気球観測は、第 X 期南極観測 6 か年計画 (令和 4~9 年度) において、重点研究観測「過去と現在の南極から探る将来の地球環境システム」の課題 3-1「大型大気レーダーを中心とした観測展開から探る大気大循環変動」の一部として実施される。具体的には、南極昭和基地大型大気レーダーのフルシステム観測が第 68 次越冬期間中 (2027 年 11 月頃) に終了となる見込みであることから、それまでに 2 回の越冬 SP 気球観測を実施する。第 65 次または第 66 次には、これまでに他国においても実施されていない晩秋から極夜 (3 月~8 月) にかけての時期を中心に、高度 19 km における SP 気球観測を最大 10 回以上実施する計画である。さらに、第 67 次または第 68 次には、高度 19 km の下部成層圏に加え、対流圏界面を挟む高度領域 (高度 7~14 km) での観測も検討している。今後、低高度での観測に向けた SP 気球および観測装置の改良や、南極周辺の FIR (Flight Information Region) を管轄する各国航空局との協議を進めていく予定である。

#### 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] 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>.
- [4] Hertzog, A., et al. (2012), On the intermittency of gravity wave momentum flux in the stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, 69, 3433-3448.
- [5] Sato, K., et al. (2014), Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY), *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 118, 2-15.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] Rabier, F., et al. (2010), The Concordiasi Project in Antarctica, Bull. Amer. Meteor. Soc., 91, 69-86.
- [9] 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.
- [10] 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、JAXA-RR-20-009、19-33.
- [11] 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、JAXA-RR-20-009、35-56.
- [12] Tomikawa, Y., and K. Sato (2005), Design of the NIPR trajectory model, Polar Meteorol. Glaciol., 19, 120-137.