

# 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) の第1回キャンペーン観測の結果

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)、加保貴奈 (湘南工科大学)、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。

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[5, 6]、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, 7]。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。

そこで、取り扱いが容易でかつ安価なSP 気球と観測装置を開発し、南極域における大気重力波による運動量輸送の水平分布を捉えるために、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[8]、第1回キャンペーン観測として2022年1月~2月に昭和基地で3回のSP 気球観測を実施した。本講演では、気球監視体制の構築や第1回キャンペーン観測の結果について報告する。

## 2. 気球監視体制

### 2.1 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、電池切れ等）を満たした場合には、直ちにカッターコマンド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 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 1）。

- 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 COMNAP Assets Tracking System (CATS: <http://comnap.mammothweb.co.nz/home/comnap-asset-tracking-system-cats/>) に登録するため、気球の緯度・経度等を記述した GeoJSON 形式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
- 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、ウェブサーバ上に表示（1 分毎に更新）
- 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

この QL システムに基づき、昭和基地に滞在する日本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 1: QL のホームページ上の表示の様子。

## 2. 2 人員配置

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、研究代表者を含む複数人が継続的に監視するようにした。

## 2. 3 放球や観測終了に関する条件

昭和基地からの SP 気球の放球については、事前に COMNAP（南極観測実施責任者評議会）の航空分科会と協議し、

- 放球に際して、米国・マクマード基地を通じて NOTAM を出す
- COMNAP Assets Tracking System (CATS) 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 100km 以内、かつ高度 15km 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。

## 3. 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。

### 3. 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 2）。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一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。



図2：作業場所・放球場所付近の地図。

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、初回はその手前の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。初回の放球候補地についてはしらせ支援も得てその後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。

### 3. 2 1機目の放球・観測

1機目（SPB03）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大きな問題はなく、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、

17:08LT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3m/s程度でも気球は風下側にかなり煽られ気球が放球スペースの先の雪面に触れる場面もあった。その後気球は無事高度18.3km付近でレベルフライトに入り観測を続けたが、1月9日7:00LT頃から下降し始め、12:45LT頃に緯度：68°42'S、経度：84°36'E付近の標高1600m前後の大陸上に降下した（図3）。（ここではLTは全て昭和基地の時刻、以下も同様）

### 3. 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（SPB02）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データの精度が不十分にな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バグ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によってリセットがかかることが問題であったため、この機能をハードウェアで実装するのをやめ、その機能をFPGA内のロジック内で実装する変更を行った。

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15:36LTに無事放球した。今回は風速2m/s以下で風に煽られることなく作業は進んだ。その後気球は無事高度

17.6km付近でレベルフライトに入り観測を続けたが、2月5日21:00LT頃から下降し始め、2月6日2:25LT頃に緯度：71° 14' S、経度：31° 50' E付近の標高1500m前後の大陸上に降下した（図3）。

### 3. 4 3機目の放球・観測

3機目（SPB01）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。15:00LT頃にはガス注入作業は終了したが風速が10m/s程度あり、その後も5m/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16:05LTにCヘリポートから無事放球した。今回は風速3m/s程度であったが、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。その後気球は無事高度18.0km付近でレベルフライトに入り観測を続けたが、2月7日13:00LT頃から下降し始め、17:00LT頃に緯度：70° 13' S、経度：43° 15' E付近の標高1800m前後の大陸上に降下した（図3）。

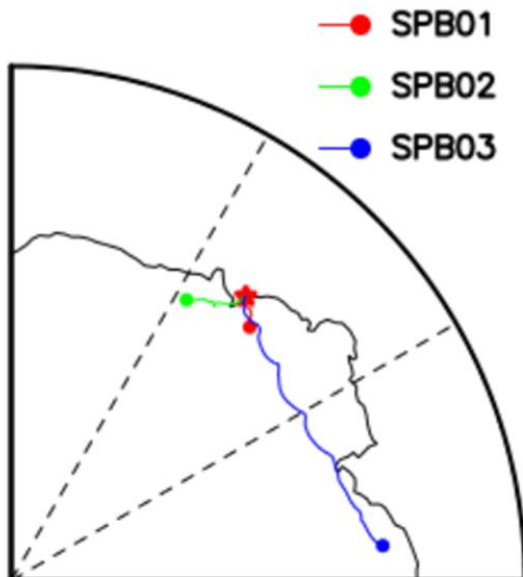


図3：3機のSPBの飛跡。赤い星は昭和基地。

## 4. まとめ

南極域における大気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。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日以内に留まり、目標とした10日間には達しなかった。今後、気球の改良を進め、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。

### 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] 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.
- [6] Rabier, F., et al. (2010), The Concordiasi Project in Antarctica, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 69-86.
- [7] 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.
- [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、JAXA-RR-20-009、19-33.