

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

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]。また、同観測に先立ち、国内試験観測として令和 3 年度の大樹航空宇宙実験場での SP 気球観測を申請している。

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[11]。それぞれの物理量に必要な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。

3. スーパープレッシャー (SP) 気球

本計画では、体積 180 m^3 、耐圧性能 1200 Pa 以上、10 日以上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 $1,200 \text{ Pa}$ の差圧がかかるため、その倍の $2,400 \text{ Pa}$ 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。

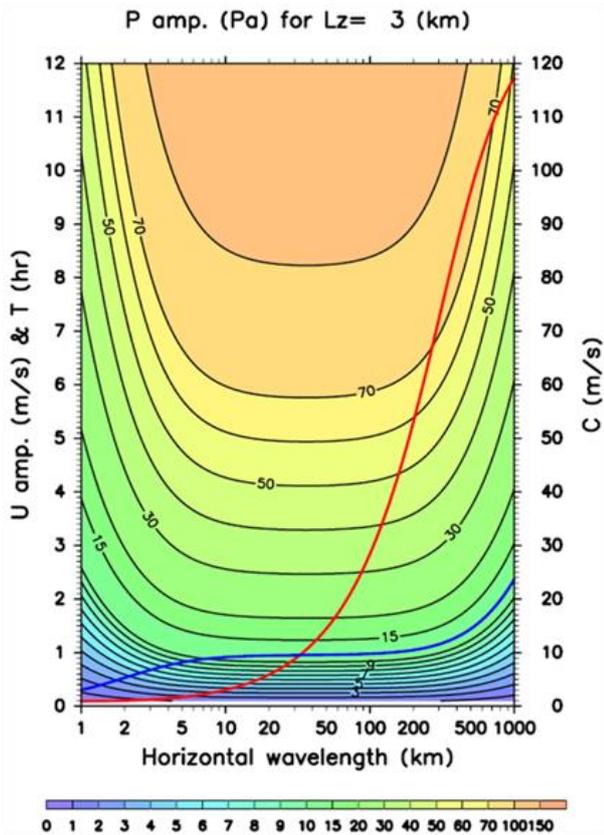


図 1：水平波長と水平風振幅の関数として描いた重力波の気圧振幅 (Pa)。鉛直波長 3km を仮定している。赤線は重力波の intrinsic な周期 (hr)、青線は intrinsic な位相速度 (ms^{-1})。

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[12]、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[13]、本計画で使用される小型 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 m^3 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 (280 時間)) が得られている[14]。今後、高度 19 km での飛揚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。

4. 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的设计を行った。環境温度として、 $-90 \sim 40^\circ\text{C}$ 、大気圧として 10 ~ 1100 hPa を想定している。

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。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) [15] をもとに新たに開発したものを利用する。

気圧計として MEMS 小型気圧センサー (Murata 製 XPA2326-0311A-R)、温度計として温度センサー (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)、GPS 受信機・アンテナとして一体型のチップ (Position 製 GSU-121B) を利用することを予定している。いずれもラジオゾンデ用に使用され、実績のあるもので、要求仕様を満たすことを確認している。

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、パイロットへの搭載を予定している。ただし、国内気球実験では搭載しない。

5. まとめ

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19km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。それに先立って、2021年度前半に国内試験と習熟訓練を兼ねた国内気球実験を計画し、申請中である。

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 (2020)、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、投稿中。
- [11] Vincent, R. A., and A. Hertzog (2014), The response of superpressure balloons to gravity wave motions, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 1043-1055.
- [12] 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、RR-13-011, 35-60.
- [13] 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.
- [14] 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。
- [15] 永田靖典, 柳瀬眞一郎, 山田和彦 (2015), 小型飛行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.