

LODEWAVE

(Long-Duration balloon Experiment of gravity WAVE over Antarctica)

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. 研究目的

南半球成層圏の冬季に現れる極夜ジェットと呼ばれる西風は、極域と中低緯度域との間の物質・運動量交換を妨げる極渦を形成し、南極オゾンホール発生の要因ともなっている[1]。しかし、大気の運動や化学・放射過程を全て陽に表現する最新の化学気候モデルにおいても、冬季極域成層圏の低温問題（"cold pole"）、現実よりも1か月も遅い極渦崩壊、およびそれら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は解決されていない[2, 3]。その主な原因と考えられているのが、

- ・地形性重力波の水平伝播を考慮できない現在の重力波パラメタリゼーション[4, 5]
- ・非地形性重力波の生成に関する観測的知見の不足[6]
- ・現在の気候モデルでは表現できない南大洋の小さな島による大気重力波生成

である。

スーパープレッシャー（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、大気のラグランジュ的（i. e., 同一空気塊を追跡する）観測を可能とする。そのため、背景風から見た重力波の" intrinsic " な性質（e. g., 周波数、位相速度等）を観測することができる。約30秒間隔での気温・風速データ取得と合わせ、本観測は重力波の全周期帯（約5分～十数時間）の運動量フラックスや運動・ポテンシャルエネルギーの水平分布を得ることができる唯一の観測である[7]。

一方、本発表の著者らを含むグループ（代表：佐藤薫氏）によって南極昭和基地に南極域で初めて設置された大型大気レーダー（PANSY）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、重力波の運動量フラックスを直接推定することができる[8]。SP気球による面的観測と大型大気レーダー観測による拠点観測を組み合わせた大気重力波研究は世界初の試みとなる。これにより、SP気球観測で得られる（ほぼ）一定高度での面的情報を、レーダー観測による高度方向の情報と組み合わせることで3次元に拡張することができる。

そこで本研究では、南極域でのSP気球観測および南極昭和基地大型大気レーダー（PANSY）観測のデータを用いて、南極上空の重力波による東西・南北風運動量の鉛直フラックスの3次元分布を明らかにすることを目指す。

南極でのSP気球観測実現のため、まず令和3年度に国内試験観測として大樹航空宇宙実験場でのSP気球観測を申請する。

2. 運動量フラックスの推定

本SP気球観測での観測物理量は気温、気圧、水平風速、気球の位置座標であり、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、大気重力波のラグランジュ的観測が可能であり、その情報を用いて大気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、高度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、高度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) から運動量フラックスを推定する[9]。本 SP 気球観測では、大気重力波の全周波数帯について上記の解析を行うことができるため、すべての大気重力波による運動量フラックスを推定することができる。それを可能にするのが、等密度面上を背景風に流されて浮遊するという SP 気球の性質である。

運動量フラックスを推定する際に特に重要なのが、気圧を高精度で測定する点である。図 1 は、SP 気球が観測する重力波の気圧振幅を水平波長と水平風振幅の関数として表したものである。本観測の水平風速の推定精度は 0.35 ms^{-1} 程度であることから、その約 3 倍の 1 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 10 Pa 程度、

つまり 3 Pa 程度の測定精度が求められることがわかる。一般的な高層気象観測における気圧観測の推定精度は下部成層圏で 50 Pa 程度であることから、1桁以上高い精度が必要となる。そのため、本観測では上記の要求を満たす高精度な気圧センサーを搭載する。

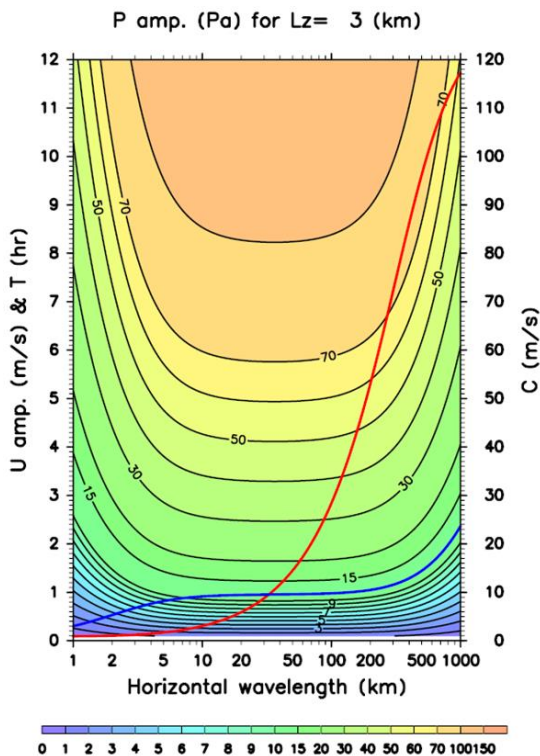


図 1：水平波長と水平風振幅の関数として描いた重力波の気圧振幅 (Pa)。赤線は重力波の intrinsic な周期 (hr)、青線は intrinsic な位相速度 (ms^{-1})。

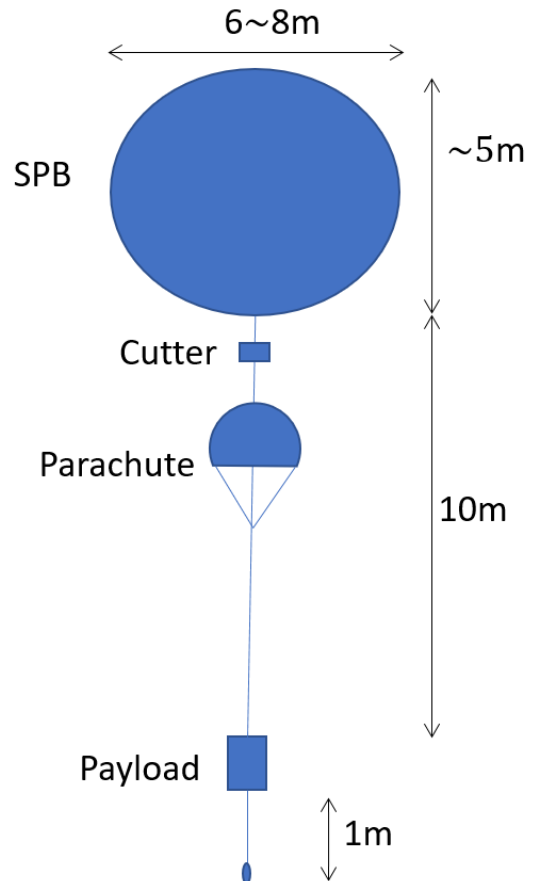


図 2：本気球観測の荷姿。

3. 実験の具体的な方法

大樹航空宇宙実験場での国内試験観測では、PI 側で調達する SP 気球に、同じく PI 側で準備する観測装置を吊り下げ、高度 19km 付近を 1 時間以上浮遊させる。データは、上昇時・浮遊時・下降時すべてについて取得する。放球時刻についての希望はない。

観測装置は温度センサー、気圧センサー、GPS センサーとし、データ送信はイリジウム SBD を使用する。電源系を含むペイロードの重量は 2kg 以内とする。SP 気球として、我々が開発している皮膜

に網をかぶせた小型 SP 気球（気球サイズは直径 6～8m）を使用する（図 2）。

南極での観測実施を令和 3 年 12 月～令和 4 年 1 月と想定しているため、大樹航空宇宙実験場での試験観測実施は令和 3 年 5～6 月を希望する。

4. 準備状況

南極昭和基地大型大気レーダー研究グループ（代表：佐藤薫氏）は、平成 23 年に南極初の大型大気レーダー（PANSY）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。

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、今年度中に試験機を製作する予定である。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 IBO モジュールを使用する[10]。小型 SP 気球については、本研究グループによって開発・試験が行われている[11]。

気球の航跡予測のため、国立極地研究所粒跡線モデル（NITRAM）[12]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 3）。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。今後、関係する各国と気球飛翔の可否について調整を行う。また、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 は、昭和基地における過去 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。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。

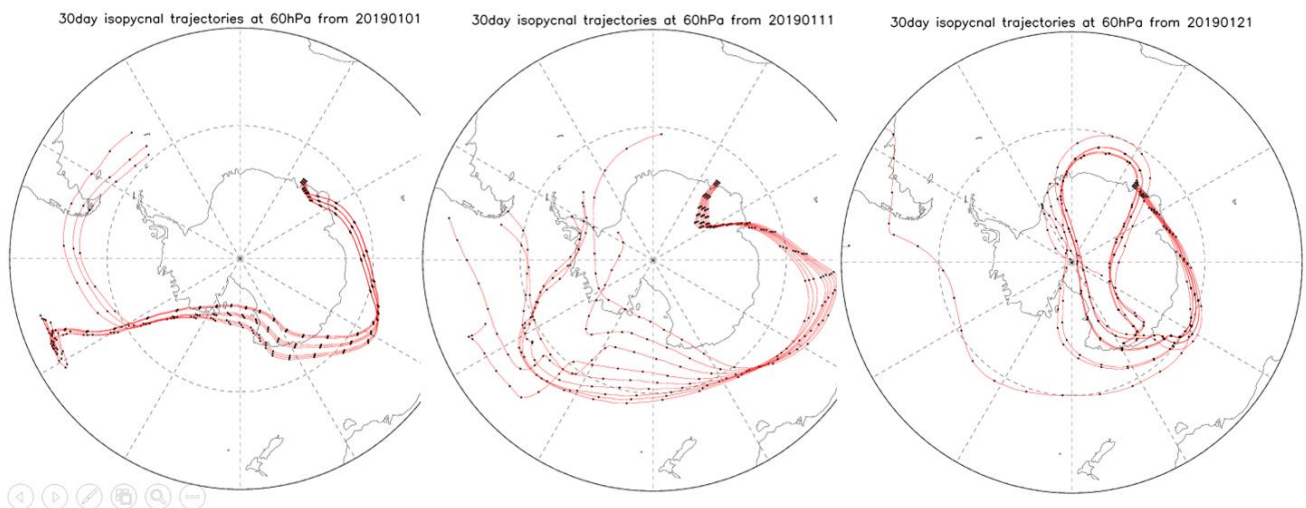


図 3：昭和基地上空の 60 hPa（高度約 19km）に配置した 9 つの空気塊（ $69.0\text{S} \pm 0.5 \text{ deg}$, $39.6\text{E} \pm 1.0 \text{ deg}$ ）の 2019 年 1 月 1 日（左）、1 月 11 日（中央）、1 月 21 日（右）から 30 日間の前方粒跡線。黒丸は 1 日毎の位置を示す。

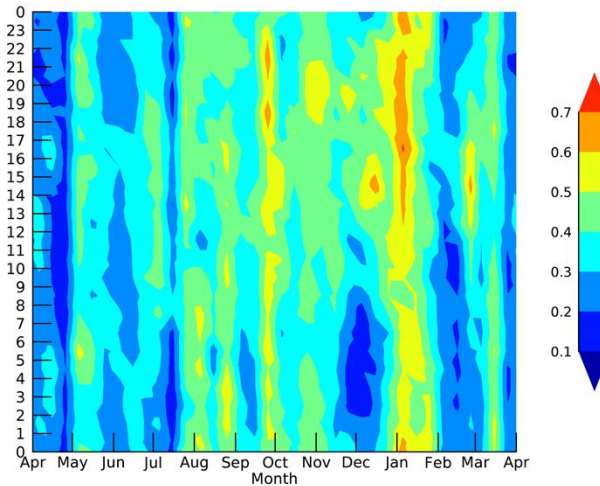


図4：昭和基地における地上風速が 3 ms^{-1} 以下となる確率の季節・現地時間断面。

5. 工程表

令和1年度の計画

- ・国内ラジオゾンデメーカーと共同で、気温・気圧測定用センサー、GPS受信機、IBOモジュールを組み合わせた観測装置を試作する。
- ・小型SP気球の気密・耐圧試験を行う。

令和2年度の計画

- ・前年度に製作した試作機を用いて、観測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スーパープレッシャー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、および南極条約で必要とされている環境影響評価を行う。

令和3年度の計画

- ・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2～3回のスーパープレッシャー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。

参考文献

- [1] Solomon, S. (1999), Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history, *Rev. Geophys.*, 37(3), 275–316.
- [2] Butchart, N., et al. (2011), Multimodel climate and variability of the stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 116, D05102.
- [3] McLandress, C., et al. (2012), Is missing orographic gravity wave drag near 60°S the cause of the stratospheric zonal winds biases in chemistry–climate models?, *J. Atmos. Sci.*, 69, 802–818.
- [4] Sato, K., et al. (2009) On the origin of mesospheric gravity waves, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L19801.
- [5] 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.
- [6] Geller, M. A., et al. (2013), A comparison between gravity wave momentum fluxes in observations and climate models, *J. Climate*, 26, 6383–6405.
- [7] Hertzog, A., et al. (2012), On the intermittency of gravity wave momentum flux in the stratosphere, *J. Atmos. Sci.*, 69, 3433–3448.
- [8] Sato, K., et al. (2014), Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY), *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 118, 2–15.
- [9] Vincent, R. A., and A. Hertzog (2014), The response of superpressure balloons to gravity wave motions, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 1043–1055.
- [10] 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.
- [11] 斎藤芳隆, 中篠恭一, 秋田大輔, 松尾卓摩 (2019), 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, 大気球シンポジウム: 令和元年度, isas19-sbs-017.
- [12] Tomikawa, Y., and K. Sato (2005), Design of the NIPR trajectory model, *Polar Meteorol. Glaciol.*, 19, 120–137.