

大型ゴム気球を用いた成層圏上層の多地点・定常観測網の実現に向けて

木下武也 (JAMSTEC)・荻野慎也 (JAMSTEC)・鈴木順子 (JAMSTEC)

・城岡竜一 (JAMSTEC)・杉立卓治 (明星電気)・清水健作 (明星電気)

1. はじめに

成層圏には熱帯から極域に流れる大気大循環が存在し、主に対流圏で発生する大気波動により駆動されることがわかっている。一方、成層圏準2年振動や成層圏突然昇温等の循環場の変動が、対流圏の気候に直接影響を与えることが最近になり示されている(Hitchman et al. 2021)。そのため長期予報の精度を上げるためには、成層圏循環を正確に捉える必要がある。しかし成層圏、特に高度30km以上における風速などの観測頻度・精度は1990年代に定常的なロケットゾンデ観測が終了して以降、対流圏に比べ非常に乏しい状況である。この影響により、成層圏上層の風速場が、再解析データ間で大きくばらつくことがわかっている (Kawatani et al. 2020)。

そこで簡易に観測可能なラジオゾンデ観測の垂直方向の範囲を、高度30km以上を含む上部成層圏に広げるため、2019年11月5～6日に守谷市で大型ゴム気球を用いた試験観測を実施した。4回の試験放球を行った結果、2回は高度40km以上に到達した。高度30～40kmにおいて得られたデータ、特に温度データの精度を確認するために、衛星や再解析データと比較を行った。また高度40km付近に見られる波状構造に対し、ホドグラフ解析などを実施することで重力波の特性を調べた。最後に、大型ゴム気球を用いた観測キャンペーンについても紹介する。

2. 使用データの概要

2019年11月5～6日のつくば放球所(36°N, 140°E)にて地方時17時、20時、23時、6日02時に合計4回の試験放球を行った。当時の天候は晴れで地上はほぼ無風であった。使用したラジオゾンデは明星電気のiMS-100で1～3回目の放球では3000gバルーン(TX3000)を使用し、浮力は1600g、1000g、2000g、4回目の放球では4000gバルーン(TA4000)を使用し、浮力は2000gとした。フライト構成は、バルーンから7.5mの位置にパラシュート、そこから30mの巻き下げ機をつなぎ、最後にiMS-100を取り付けた。

3. 結果

東西風速・南北風速・温度の鉛直構造を図1に示す。4回の試験観測の到達高度はそれぞれ40.27km、37.85km、40.66km、33.34kmであった。対流圏界面は約高度10kmに位置し、ジェットを中心は圏界面高度より上に存在することがわかる。鉛直波長2～4kmの擾乱に着目すると高度20～24km、34～40km付近に波状構造が見られる。続いて上昇率を図に示す。平均的な上昇率は5～6m/sで高度40km付近に近づくにつれ小さくなることがわかる。2回目の放球では高度38km付近で上昇率が0m/sとなりその高度で停滞していた。これは、ゴム気球の張力と上昇に伴い膨張する力がバランスしてい

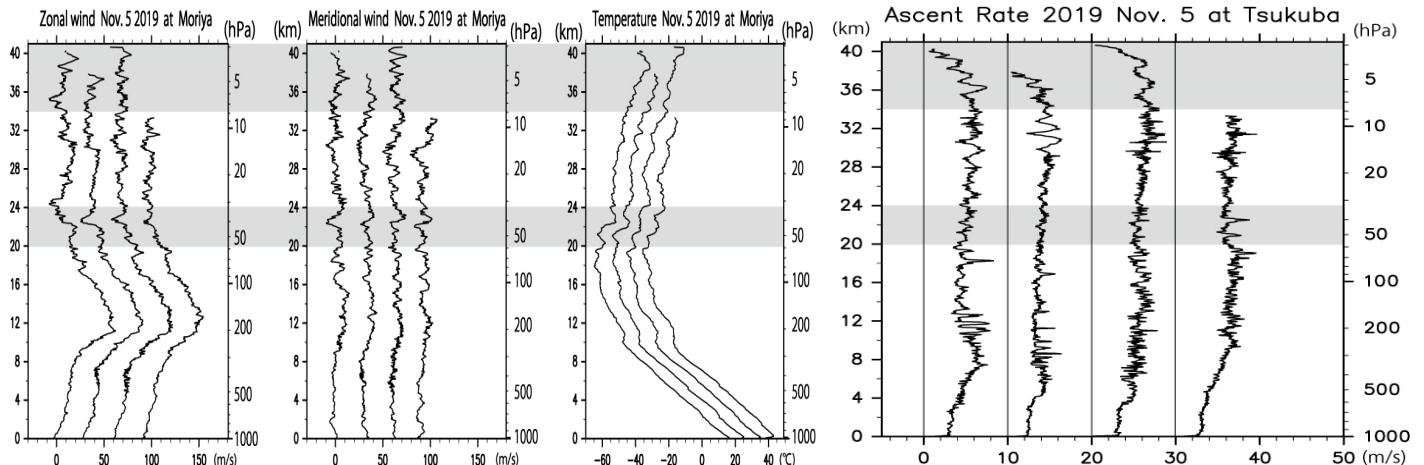


図1：2019年11月5日17時、20時、23時、6日の2時に観測した東西風速(左)、南北風速(中)、温度(右)の高度分布。風速は30m/sずつ、温度は10°Cずつずらしてプロットしている。

図2：4回の観測で得られた上昇率の高度分布。10m/sずつずらしてプロットしている。

ることが原因であると考えられる。

次に得られた観測データの精度について議論する。風速データは GPS 衛星からの位置情報を用いるため高高度においても精度は特に問題ないが、温度データは高度 30km 以上においてセンサの時定数が増え精度が落ちると考えられる。そこで、高度 30km 以上の温度のふるまいを確認するため再解析データ、衛星観測データと比較解析を行った。再解析データは観測地点に最も近い 4 点を用いて補正した値をプロットした。まず図 3 に ERA5 (緑)、MERRA-2 (青)、JRA55 (赤) とラジオゾンデ観測で得られた東西・南北風速、温度の鉛直プロットを示す。観測データは最高到達高度を記録した 11 月 5 日 23 時に放球した結果を表示し、20 秒のローパスフィルタを用いたものを細実線、400 秒のローパスフィルタを用いたものを太実線で記している。東西・南北風速を見ると、観測データと再解析データの差は小さく、南北風速については ERA5 データが観測データの背景場とほぼ一致していることがわかる。温度についても、ほぼ観測と再解析データは一致しており、その差は 3 K 未満であった。再解析データ間では ERA5 と MERRA-2 データが JRA55 よりも若干高い温度であった。続いて図 4 に COSMIC (緑)、SABER (青)、MLS (赤) によって観測された温度とラジオゾンデ観測データに対し 400 秒のローパスフィルタを用いた温度 (太実線) の鉛直プロットを示す。この図から MLS が最も観測データと近い値を取り、その差はおおよそ 2K である。COSMIC、SABER との差は 5hPa 以下で 5K 以下である。以上より試験観測で取得した温度データは高度 30km 以上においても十分な精度を持っていると考えられる。

最後に、11 月 5 日 17 時と 23 時の観測で高度 40km に見られた波状構造についてホドグラフ解析を行った。まず、この高度領域に見られる擾乱の波長は図 1 よりおおよそ 2km と考えられる。そこで鉛直波長 1~4km のバンドパスフィルタをかけた東西・南北風速、温度擾乱成分を図 5 にプロットする。この図から高度 40km 付近の擾乱がよりはっきりと見ることが出来る。ここで、重力波のホドグラフは線形理論の仮定において楕円の構造をとる。この楕円の長軸方向が重力波の伝播方向となり、長軸と短軸の比から固有周波数を推定することが出来る。楕円

1 周分の高度変化が鉛直波長に対応し、静水圧平衡を仮定した重力波の分散関係式を用いることで、水平波長を見積もることが出来る。また北半球では楕円が時計回りの時、上向き伝播となる。図 6 は 11 月 5 日 17 時と 23 時の高度 40km 付近のバンドパスフィルタを用いて抽出した風速擾乱のホドグラフ (黒線) と最小二乗法でフィッティングした楕円 (赤線) である。この楕円から推定した鉛直波長、固有周期、水平波長、水平群速度等のパラメータを表 1 に示す。ホドグラフ解析により高度 40km 付近に見られた 2 つの波は、水平波長約 130km で上向きに伝播する慣性重力波と考えられる。

4. まとめと今後の課題

本研究は、2019 年 11 月 5 日に大型ゴム気球を用いて試験的にラジオゾンデ観測を実施し、高度 40km を超える鉛直方向に高分解能な風速・温度データを取得した。試験観測の結果から 3000g バルーン (TX3000) に対し、浮力 1600~2000g が高度 40km を越えて観測することの出来る適切な量と示唆された。次に、高度 30km 以上の観測データ、特に温度データの精度が下がることが想定されたため、再解析・衛星観測データと比較した結果、それぞれのデータとそこまで違いはなく、さらにモデルや衛星観測データでは表現できない細かい擾乱も高度 30km より下層と同様捉えることが出来ていることが確認できた。続いて高度 40km 付近に見られた波状構造に対しバンドパスフィルタ、ホドグラフ解析を行った結果、上向きに伝播する慣性重力波であることが推定できた。

最後に、本観測後に実施した観測、今後予定している観測について紹介する。まず 2021 年 5 月末から 7 月初旬にかけてパラオ付近の熱帯暖水プール域を中心に海洋地球研究船「みらい」上で複数回大型ゴム気球を用いた観測を実施した。この観測から夜間の熱帯域ではゴム気球が対流圏界面の低温域を越えられずに割れるケースが多く見られた。夜間に放球する理由は日射の影響を避けるためである。この理由から、その後の「みらい」の観測では、日没前に放球することでこの問題を克服した。今後は、夜間に対流圏でゴム気球が割れる原因の特定を進めるとともに日中での観測も実施できるよう、さらなる観測を進める予定である。

参考文献

Hitchman, M. H., S. Yoden, P. H. Haynes, V. Kumar, and S. Tegtmeier, (2021), An observational history of the direct influence of the stratospheric Quasi-biennial Oscillation on the tropical and subtropical upper troposphere and lower stratosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, 239-267.

<https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-012>

Kawatani, Y., Hirooka, T., Hamilton, K., Smith, A. K., and Fujiwara, M. (2020), Representation of the equatorial stratopause semiannual oscillation in global atmospheric reanalysis, *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 9115–9133, doi:10.5194/acp-20-9115-2020

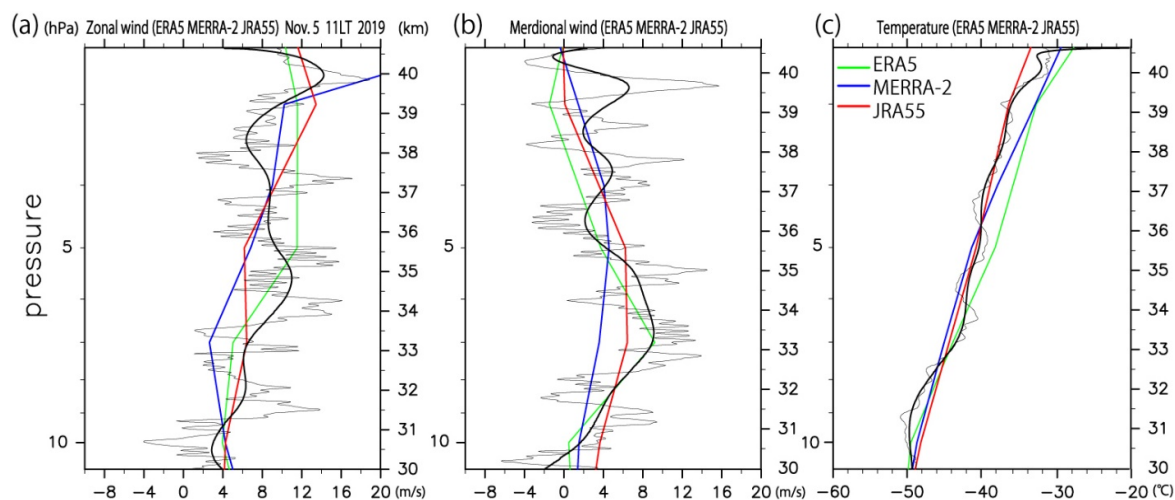


図 3 : 2019 年 11 月 5 日 23 時の東西・南北風速、温度の高度分布図。緑線は ERA5、青線は MERRA-2、赤線は JRA55 再解析データを示す。細線、太線はそれぞれラジオゾンデ観測データに対し、20 秒、400 秒のローパスフィルタをかけたもの。

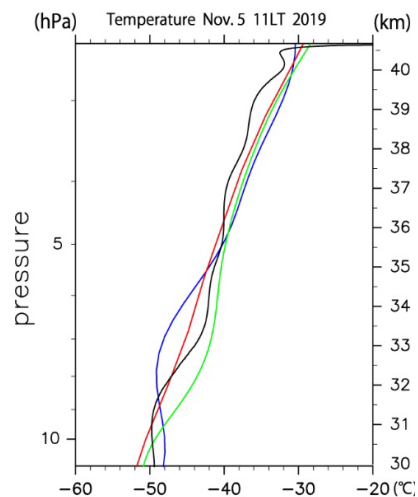


図 4 : 2019 年 11 月 5 日 23 時の温度の高度分布図。緑線は CISMIC、青線は SABER、赤線は MLS 衛星観測データを示す。太線はそれぞれラジオゾンデ観測データに対し、400 秒のローパスフィルタをかけたもの。

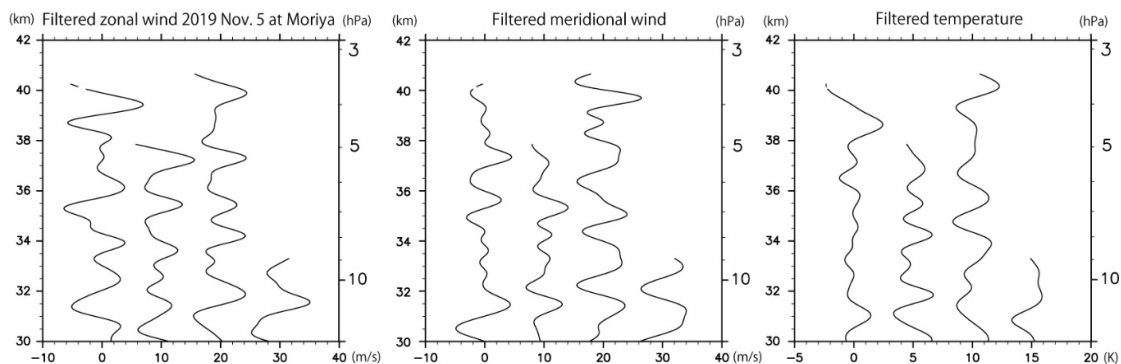


図 5：鉛直波長 1~4km のバンドパスフィルタを用いて抽出した 2019 年 11 月 5 日 17 時、20 時、23 時、6 日の 2 時の東西・南北風速、温度擾乱の高度分布図。

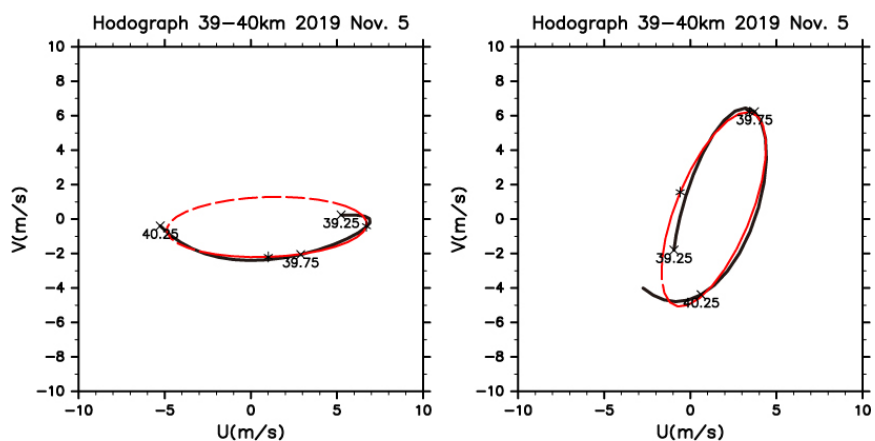


図 6：鉛直波長 1~4km のバンドパスフィルタを用いて抽出した 2019 年 11 月 5 日 17 時、23 時の東西・南北風速擾乱のホドグラフ。赤線は最小二乗法でフィッティングした楕円を表す。

2019/11/5	1700LT	2300LT
Vertical wavelength (km)	1.7	1.3
Intrinsic period (h)	6.1	7.4
Horizontal wavelength (km)	129	123
Vertical energy propagation	Upward	Upward
Error (mean square error)	0.08	0.19

表 1：ホドグラフ解析により推定した 2 つの慣性重力波の鉛直波長、固有周期、水平波長、鉛直伝播方向、フィッティングエラー。