

明星 RS-11G 型 GPS ゾンデと Vaisala RS92-SGP 型 GPS ゾンデの 相互比較試験観測による特性評価

古林 絵里子*

Quantitative comparison of the Meisei RS-11G radiosonde and the Vaisala RS92-SGP radiosonde for characterization of routine soundings

Eriko KOBAYASHI

Abstract

In Tateno (Aerological Observatory of Japan Meteorological Agency), the Vaisala RS92-SGP GPS sondes were replaced by the Meisei RS-11G GPS sondes in July 2013. We carried out comparison observations of these 2 types of radiosonde for four seasons to investigate any differences in performance. The results of comparison showed that the recorded temperature difference is 0.5 K above the 100 hPa layer and pressure difference is between 0.2 and 0.5 hPa above the 300 hPa layer in day time observations. Furthermore, humidity measurements of the RS-11G are higher than those of the RS92-SGP values in both day and night time observations. These differences between two radiosonde values have a negligible impact on the daily weather forecasts, however, they should be taken into consideration when the observation data is used for climate monitoring.

1. はじめに

高層気象台(館野)では、ラジオゾンデによる高層気象観測を定常的に実施しており、国内の高層気象観測の拠点としてラジオゾンデの測器変更時には、Table 1 に示すように新旧ラジオゾンデのデータ特性の違いを把握するための比較観測を実施してきている(高層気象台：2011，迫田ほか：1999，気象庁観測部高層課：1983)。また、館野は GRUAN (GCOS Reference Upper Air Network, GCOS 基準高層気象観測網) の基準観測所の 1 つとして登録されており、比較観測などにより機器変更に伴う観測データの特性の変化を評価している。気候データとしての一様性を確保するためのこれらの情報は GRUAN に提供することで、GRUAN の目的である「長期的な気候変動の把握のための高精度で連続性のある高層大気の観測」(WMO：2009)を遂行、維持している。

気象庁ではこれまで、技術の進歩等の理由により使用するラジオゾンデを変更してきている。高層気象台では、2009 年 12 月から Vaisala 社製の RS92-SGP 型 GPS ゾンデ(以下、「RS92」という。)によって定常観測を実施してき

たが、2013 年 7 月から明星電気株式会社製の RS-11G 型 GPS ゾンデ(以下、「11G」という。)を運用している。そこで、11G と RS92 の連結飛揚による相互比較観測を行い、両ゾンデ間における観測データの特性の違いを検証した。

2. 比較観測の実施方法とデータ取得状況

比較観測対象となる GPS ゾンデの詳細を Table 2 に、写真を Photo 1 に示す。RS92 については気象庁仕様(RS92-SGP に付属する巻下器のつり紐を 15m とし、アルカリ乾電池による駆動、工場出荷時の無線周波数指定の仕様を追加)のものを使用している。比較観測は 2013 年 10 月から 2014 年 6 月までの約 1 年間、季節毎に 00 UTC 観測(昼の観測)を 10 回、12 UTC 観測(夜の観測)を 10 回実施



Photo 1 11G (left) and RS92 (right)

*高層気象台 観測第二課

Table 1 The radiosonde intercomparisons series of Tateno

Period	Radiosonde		Information about flights
	Old model	New model	
1981	RS II- 56	RS2-80	4 seasons, at 00UTC and 12UTC. Total : 40 flights
1993~1994	RS2-80	RS2-91	4 seasons, at 00UTC and 12UTC. Total : 49 flights
2009~2010	RS2-91	RS92-SGP	4 seasons, at 00UTC and 12UTC. Total : 120 flights
2013~2014	RS92-SGP	RS-11G	4 seasons, at 00UTC and 12UTC. Total : 80 flights

Table 2 Description of the radiosondes.

Radiosonde	11G (RS-11G GPSsonde)	RS92 (RS92-SGP GPSsonde)
Temperature sensor	Thermistor	Capacitive wire (F-THERMOCAP®)
Humidity sensor	Electrostatic capacity type	Thin film capacitor, heated twin sensor (H-HUMICAP®)
Pressure sensor	Inversely calculated by using an altitude that obtained from GPS positioning	Silicon sensor (BAROCAP®)
Wind	GPS wind finding (with SBAS)	GPS wind finding (with GBAS)

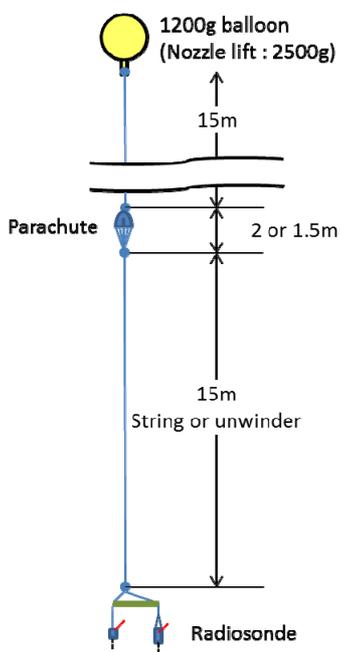


Fig. 1 Flight configuration.

し、合計 80 回のデータを取得した。

比較観測時におけるラジオゾンデの飛揚形態の模式図を Fig.1 に示す。飛揚には重量 1200 g の気球を使用し、気球の上昇速度が約 6 ms^{-1} となるように浮力錘浮力を 2500g とした。比較するラジオゾンデは長さ 2 m の竹竿の両端に取り付け、気球からラジオゾンデまでのつり紐の長さは約 30 m とした。

比較観測における気球破裂時の高度を Fig.2 に示す。到達高度は 30~36 km 程度であった。また、11G の到達高度がやや高めに示される傾向があった。

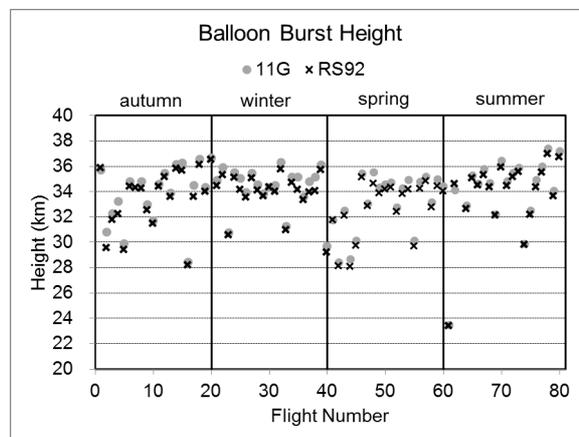


Fig. 2 Balloon burst height.

3. 同時刻におけるデータ比較

両ラジオゾンデのセンサや補正方法による観測値の違いを把握するため、高層気象台(2011)による手法と同様に、同時刻におけるデータを比較した。

3.1 時刻補正

比較を行うゾンデは、それぞれ別の観測システムでデータ処理を行っているため、同時刻におけるデータ比較では時刻補正が必要となる。本稿では、高層気象台(2011)と同じ手法で 2 つのゾンデで観測された気温のプロファイルが最も一致するように時刻補正を行った。

時刻補正では、各システムで得られた飛揚後 3 分から 30 分までの各観測における気温プロファイルから、両ゾンデの差が小さく(概ね 1 K 以内)、気温変動の大きい 5 分間のデータを選択し、各々のゾンデ間の気温観測プロファ

イルの相互相関係数を算出して、もっとも相関の高くなる時刻差を求めた。

以上の方法により求めた時刻差を使用して同時刻におけるデータを比較した。なお、今回の比較観測における 11G と RS92 のずれは、1 例を除いて ±3 秒以内であった。

3.2 比較方法

同時刻におけるデータの比較解析には、11G の 1 秒値と RS92 の 2 秒値を使用し、3.1 で求めた時刻差を補正した 2 秒毎のデータを使用する。比較方法は、高層気象台(2011)と同様に観測データを 13 の気圧層に分け、気圧層毎の平均値で比較を行った。

観測データは RS92 の気圧値を基準として、以下の 13 層に分ける。ここで、ある 1 回の観測データにおいて、両ゾンデの観測開始からの観測値番号を i とし ($is \leq i \leq ie$, is と ie はそれぞれある気圧層に含まれる最初と最後の観測値番号), i 番目の RS92 の気圧値を P_i^V , 11G と RS92 の i 番目の任意の観測要素の値をそれぞれ T_i^M , T_i^V とする (T_i^M と T_i^V , P_i^V は同時刻の観測値)。13 の気圧層に含まれる観測値は以下のように定義する。

- 第 1 層 : T_i^M, T_i^V ($1000\text{hPa} \geq P_i^V > 700\text{hPa}$)
- 第 2 層 : T_i^M, T_i^V ($700\text{hPa} \geq P_i^V > 500\text{hPa}$)
- 第 3 層 : T_i^M, T_i^V ($500\text{hPa} \geq P_i^V > 300\text{hPa}$)
- 第 4 層 : T_i^M, T_i^V ($300\text{hPa} \geq P_i^V > 200\text{hPa}$)
- 第 5 層 : T_i^M, T_i^V ($200\text{hPa} \geq P_i^V > 150\text{hPa}$)
- 第 6 層 : T_i^M, T_i^V ($150\text{hPa} \geq P_i^V > 100\text{hPa}$)

- 第 7 層 : T_i^M, T_i^V ($100\text{hPa} \geq P_i^V > 70\text{hPa}$)
- 第 8 層 : T_i^M, T_i^V ($70\text{hPa} \geq P_i^V > 50\text{hPa}$)
- 第 9 層 : T_i^M, T_i^V ($50\text{hPa} \geq P_i^V > 30\text{hPa}$)
- 第 10 層 : T_i^M, T_i^V ($30\text{hPa} \geq P_i^V > 20\text{hPa}$)
- 第 11 層 : T_i^M, T_i^V ($20\text{hPa} \geq P_i^V > 15\text{hPa}$)
- 第 12 層 : T_i^M, T_i^V ($15\text{hPa} \geq P_i^V > 10\text{hPa}$)
- 第 13 層 : T_i^M, T_i^V ($10\text{hPa} \geq P_i^V > 5\text{hPa}$)

同一の気圧層に分類された観測データについて、平均値 ($\overline{T^M}$, $\overline{T^V}$) と、差 ($\Delta T_i = T_i^M - T_i^V$) の平均値 ($\overline{\Delta T}$) を次の式(1)~(3)によって求める。

$$\overline{T^M} = \frac{\sum_{i=is}^{ie} T_i^M}{ie - is + 1} \quad (1)$$

$$\overline{T^V} = \frac{\sum_{i=is}^{ie} T_i^V}{ie - is + 1} \quad (2)$$

$$\overline{\Delta T} = \frac{\sum_{i=is}^{ie} \Delta T_i}{ie - is + 1} \quad (3)$$

次に、各気圧層の比較データを、昼夜別と全観測に区分して各観測回数分集計を行う。各集計区分の合計した観測回数を N , その順番を $K=1, 2, \dots, N$ とし、(4)~(7)によって各種統計量を求める。

$$\text{集計した層別の 11G 平均値 : } \overline{\overline{T^M}} = \frac{\sum_{K=1}^N \overline{T_K^M}}{N} \quad (4)$$

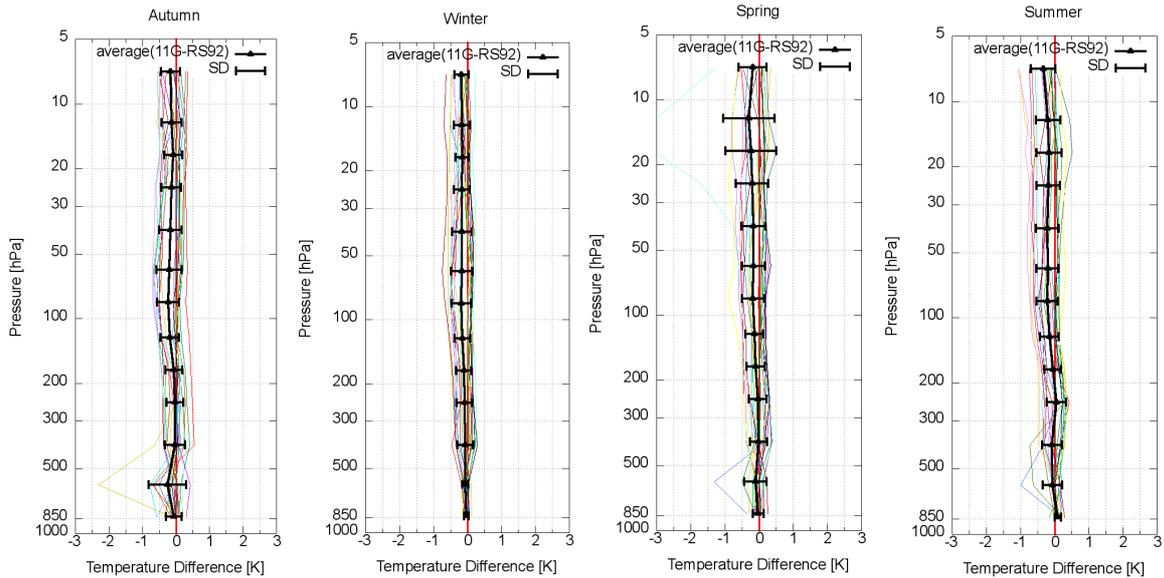


Fig. 3 Profiles of mean differences (11G-RS92) for temperature of each flight.

The colored thin lines show the each observation and the black lines show the mean of all observations.

$$\text{集計した層別の RS92 平均値: } \overline{T^V} = \frac{\sum_{K=1}^N \overline{T_K^V}}{N} \quad (5)$$

$$\text{集計した層別の差の平均値: } \overline{\Delta T} = \frac{\sum_{K=1}^N \overline{\Delta T_K}}{N} \quad (6)$$

集計した層別の差の標準偏差:

$$\sigma(\overline{\Delta T}) = \sqrt{\frac{\sum_{K=1}^N (\overline{\Delta T_K} - \overline{\overline{\Delta T}})^2}{N}} \quad (7)$$

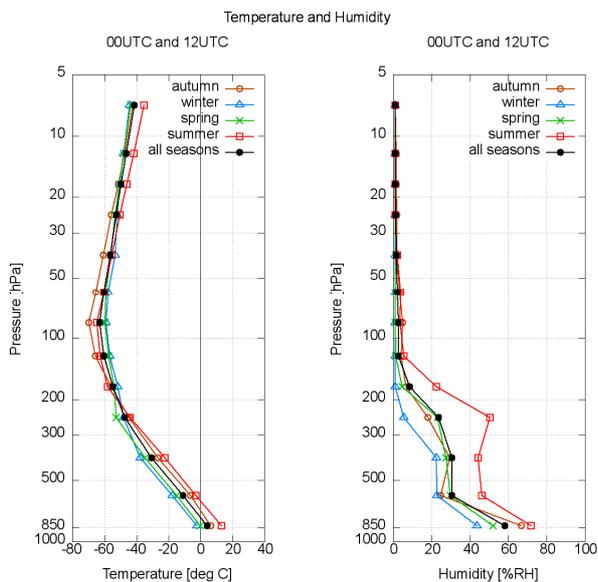


Fig. 4 Average profiles of (left) temperature and (right) humidity for 00 and 12 UTC.

The colored lines show the each season and the black line shows the mean of all seasons.

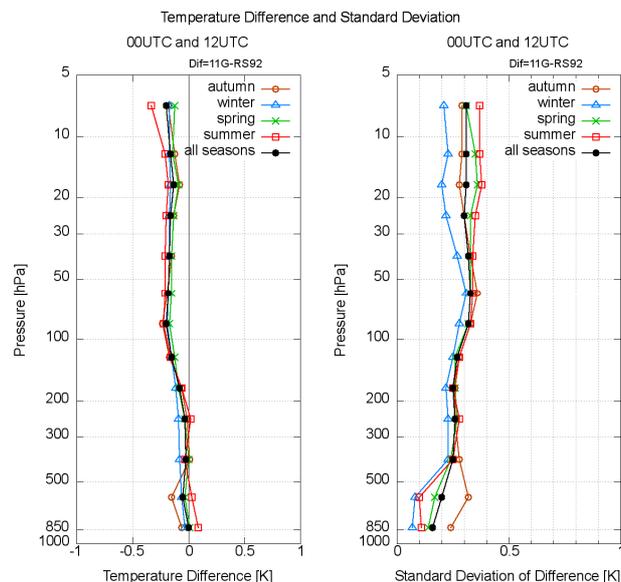


Fig. 5 Average profiles of temperature differences (11G-RS92) and standard deviations for 00 and 12 UTC.

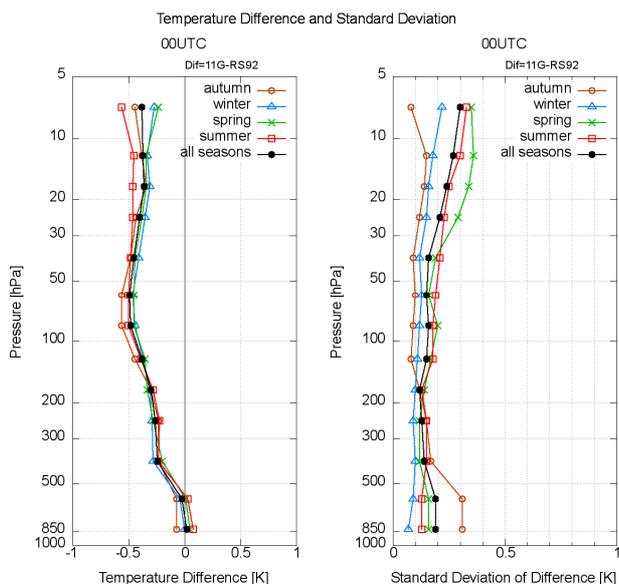


Fig. 6 Average profiles of temperature differences (11G-RS92) and standard deviations for 00 UTC.

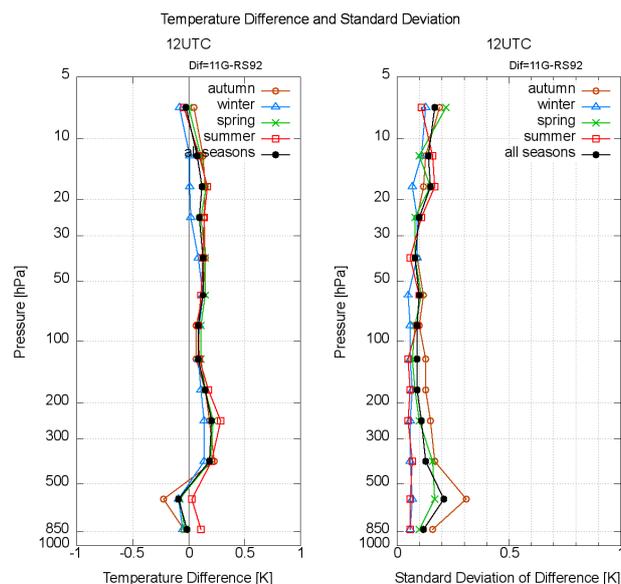


Fig. 7 Average profiles of temperature differences (11G-RS92) and standard deviations for 12 UTC.

3.3 データの選別

Fig.3 にそれぞれの観測における気温の層別の差の平均値を示す。図中の黒線は(6), (7)によって求めた各季節全ての観測の平均値とその標準偏差(1 σ)である。気温差は概ね ± 1 K の範囲であるが、冬季を除く季節において、700~500 hPa の気圧層で、気温差が標準偏差の3倍を超える極端に大きい事例があった。同様に、湿度と気圧の観測でも他の観測に比べて極端に差が大きい事例が数例認められた。これらの観測については、気温や湿度のセンサへの着氷や気圧センサの異常などにより正常な観測値が得られていないと判断し、その観測1回分は全層を統計解析から除外した。除外基準は、いずれかの層で気温、湿度、気圧の差が各季節における標準偏差の3倍を越える観測とした。なお、湿度値に関しては10~5 hPa の気圧層においても標準偏差の3倍を越える事例があったが、湿度観測値が小さいため(1% RH程度)選別対象とはしなかった。また、風観測値を基準とした選別は行っていない。この方法により選別した結果、統計解析に使用した観測データは、秋季17事例、冬季19事例、春季18事例、夏季17事例の合計71事例となった。また、各季節ともに14以上の事例で最上層(10~5 hPa の気圧層)までの観測データが取得できた。

3.4 解析結果

Fig.4 に気温、湿度について季節毎に集計した層別平均値を示す。夏季は他の季節よりも全体的に高い湿度となっている。

Fig.5~Fig.7 に、観測時刻別の気温差を季節別に集計した層別平均値と標準偏差を示す。00 UTC 観測では全体的に負偏差となっており、11G の観測値が RS92 よりも低い値を示していることがわかる(Fig.6)。特に100 hPa より上空では約-0.5 K の差がある。12 UTC 観測では、わずかに正偏差となっているが00UTC 観測に比べると差が小さい(Fig.7)。季節別に見ると、春季と夏季の00 UTC 観測では30 hPa より上空においてばらつきが大きい(Fig.6)。

Fig.8~Fig.10 に、湿度差を集計した層別平均値と標準偏差

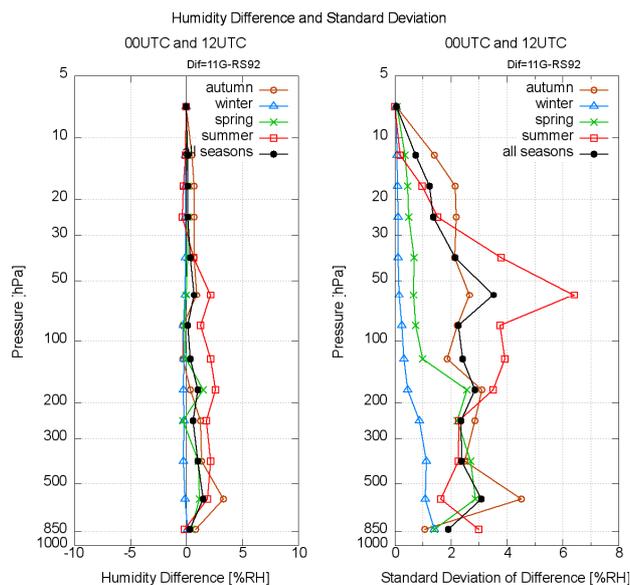


Fig. 8 Average profiles of relative humidity differences (11G-RS92) and standard deviations for 00 and 12 UTC.

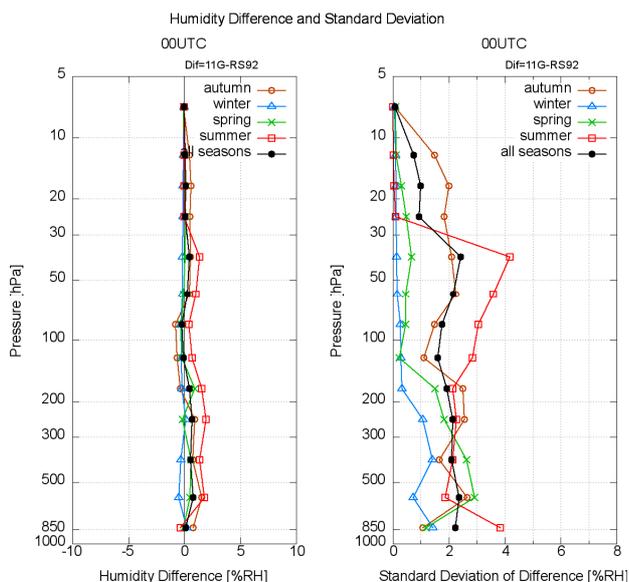


Fig. 9 Average profiles of relative humidity differences (11G-RS92) and standard deviations for 00 UTC.

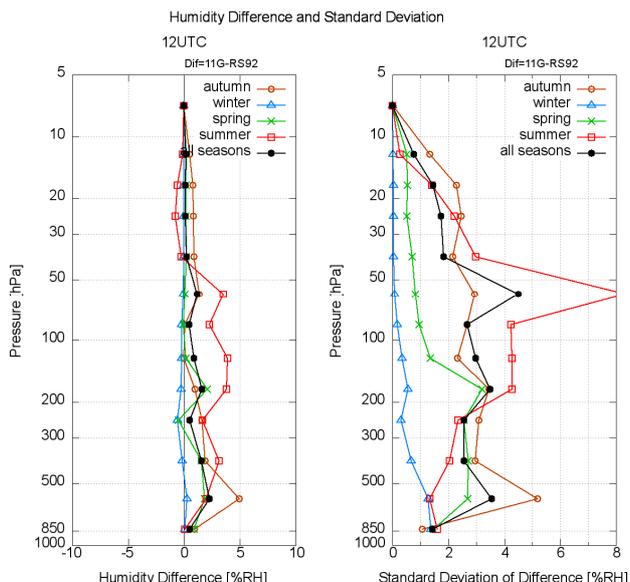


Fig. 10 Average profiles of relative humidity differences (11G-RS92) and standard deviations for 12 UTC.

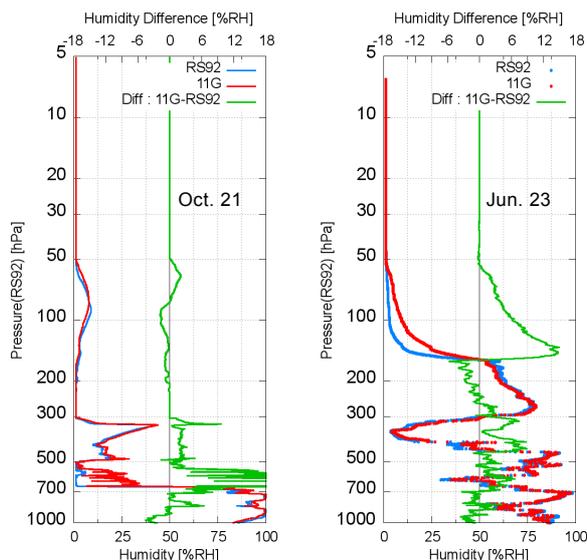


Fig. 11 Relative humidity and difference (11G-RS92) at 12 UTC on (left) Oct. 21, 2013 and (right) Jun. 23, 2014.

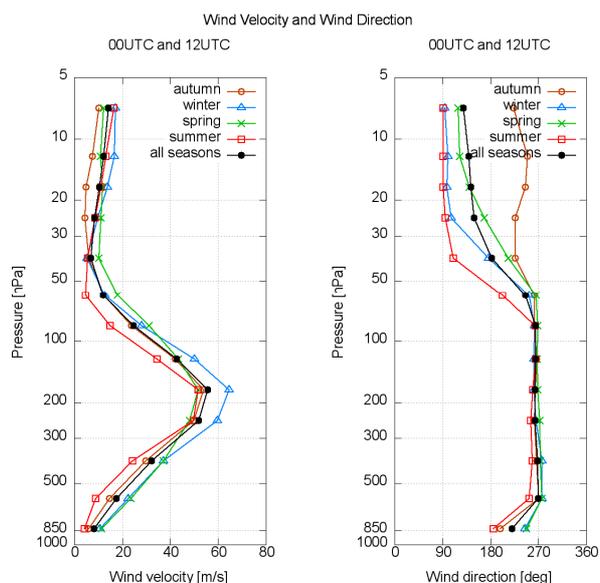


Fig. 12 Average profiles of (left) wind velocity and (right) wind direction for 00 and 12 UTC.

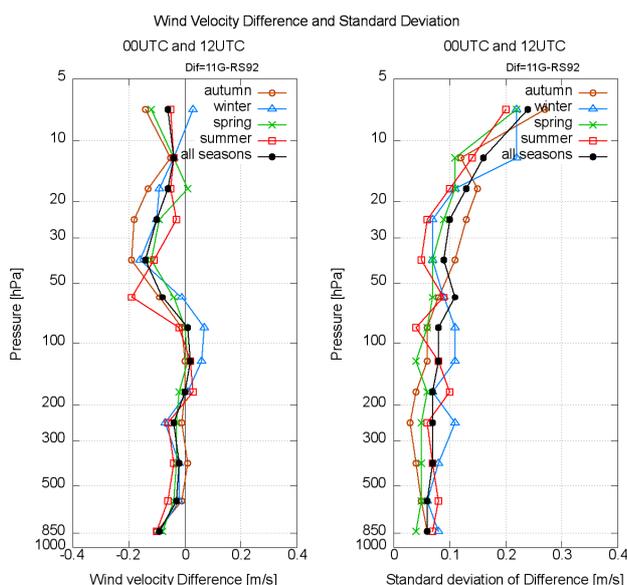


Fig. 13 Average profiles of wind velocity differences (11G-RS92) and standard deviations for 00 and 12 UTC.

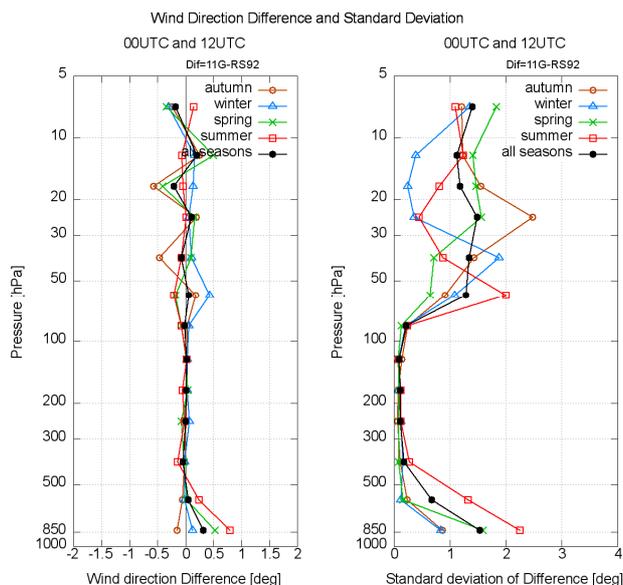


Fig. 14 Average profiles of wind direction differences (11G-RS92) and standard deviations for 00 and 12 UTC.

差を示す。00 UTC, 12 UTC の観測ともに湿度差は±5% RH 以内となっているが、差は正の側に偏っており、11Gの方が高い値を示す傾向がある。季節別では、夏季が他の季節よりも全体的に湿度差、標準偏差ともに大きい傾向が見られた。また、夏季の12 UTC観測における200~50 hPaの層と、秋季の12 UTC観測における700~500 hPaの層においてばらつきが大きくなっている(Fig.10)。大きい湿度差が見られた個々の観測事例として Fig.11 に2013年10月21日12 UTCと2014年6月23日12 UTCの湿度観測値

の鉛直プロファイルを示す。10月21日の事例では、対流圏下層の厚い雲を抜けた後の700~500 hPa付近において、11Gの湿度は変動しながらRS92に比べて緩やかに低下しており、そのため700~500 hPaの気圧層で湿度差が大きくなっている。また、6月23日の事例では、300~200 hPaに70% RH程度のやや高湿度の層があり、その上空150~100 hPa付近の湿度が急激に低下する領域において、11Gの湿度がRS92よりも緩やかに低下している。湿度差が生じる原因としては、センサの応答時間の違いや、センサ及

び 11G のセンサキャップに付着した水滴や氷から離れた水分によるセンサへの汚染の影響が考えられる。一方、RS92 の湿度センサは観測中にヒーティングによる水滴や氷の除去を行っているため (Table 2, Miloshevich *et al.* : 2009), 11G に比べて着氷や着水による観測値への影響が小さいと考えられる。

Fig.12 と Fig.15 に、風速、風向、風の東西成分、風の南北成分を季節毎に集計した層別平均値を、Fig.13~Fig.14,

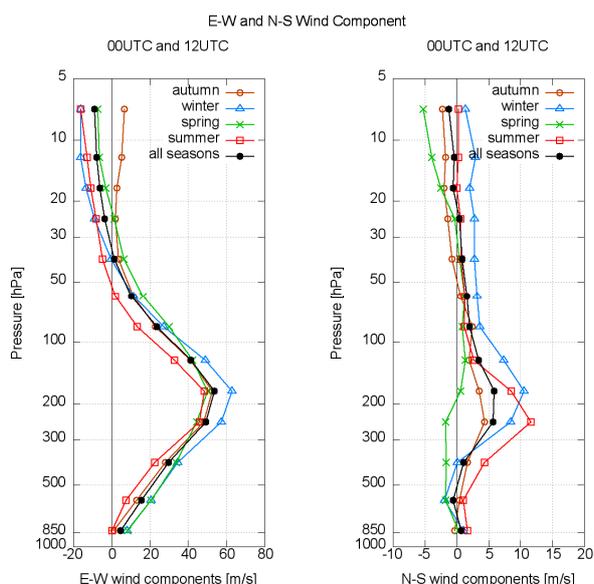


Fig. 15 Average profiles of E-W wind component (positive value westerly wind) and N-S wind component (positive value southerly wind) for 00 and 12 UTC.

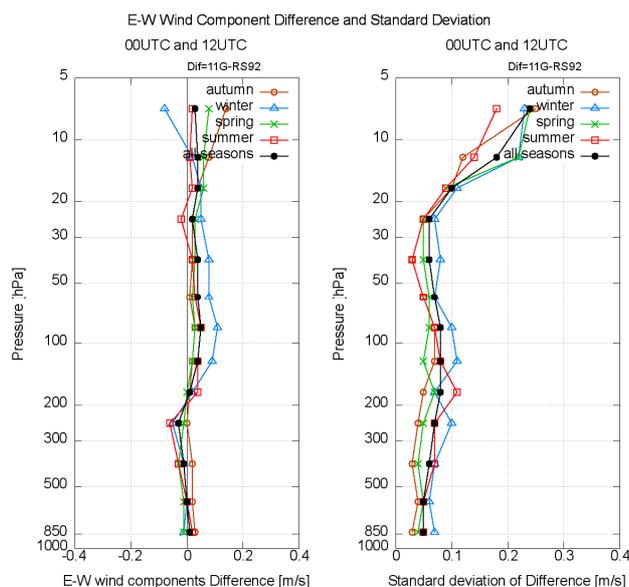


Fig. 16 Average profiles of E-W wind component differences (11G-RS92) and standard deviations for 00 and 12 UTC.

Fig.16~Fig.17 にはそれらを集計した層別平均差を示す。どの要素においても成層圏で差の標準偏差が大きくなる特徴があり、特に 20 hPa より上空で大きくなる。風速では 100 hPa より上空において 11G が RS92 よりも約 0.2 ms^{-1} 小さくなる (Fig.13)。風向では地上付近と 100 hPa より上空で $\pm 1^\circ$ 程度の差が見られる (Fig.14)。風の東西成分では、西風が高度とともに強くなる 500~200 hPa の層ではやや負偏差、一方で西風が弱くなる 200~50 hPa の層では正偏差の傾向があるが、どちらも約 0.1 ms^{-1} と小さい (Fig.16)。風の観測は両ゾンデとも GPS 周波数のドップラー偏移量から算出しているが、WMO (2008) によると、高層風観測において求められる精度は、風速で 1 ms^{-1} (地上~100 hPa) ~ 2 ms^{-1} (100~10 hPa)、風向で 5° となっており、観測システムの違いによる観測値の差は、GPS 受信機の違いやノイズ除去のためのデータ処理法の違いが主な要因であるとしている。WMO (2008) で求められている測定精度を目安とすると、11G と RS92 の風観測値の差は十分小さく、ラジオゾンデを変更したことによる高層風観測への大きな影響はないと言える。

Fig.18~Fig.21 には、気圧とジオポテンシャル高度の観測時刻別に集計した層別平均差を示す。00 UTC 観測における気圧差は、300 hPa より上空で全体的に負偏差となっており、11G が RS92 よりも $0.2\sim 0.5 \text{ hPa}$ 小さい値を示している (Fig.18)。また、秋季の 12UTC 観測では地上から 200 hPa までの気圧層で他の季節よりも気圧差が大きい (Fig.19)。気圧差の昼夜の差については、気温差の結果と類似した傾向を示していることも特徴である。ジオポテンシャル高度

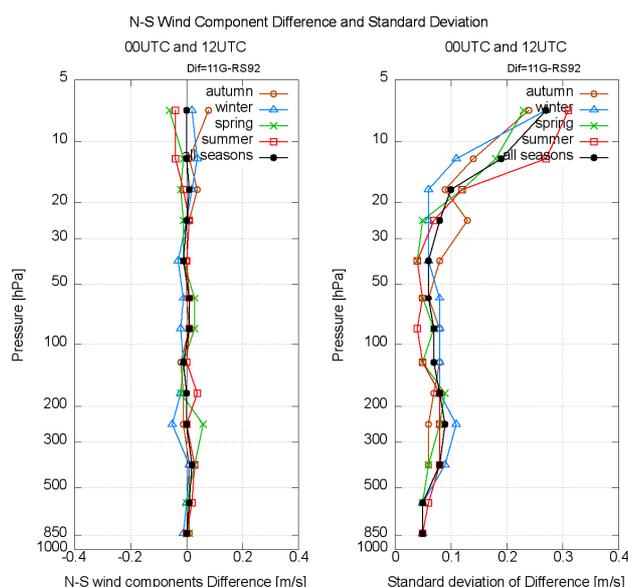


Fig. 17 Average profiles of N-S wind component differences (11G-RS92) and standard deviations for 00 and 12 UTC.

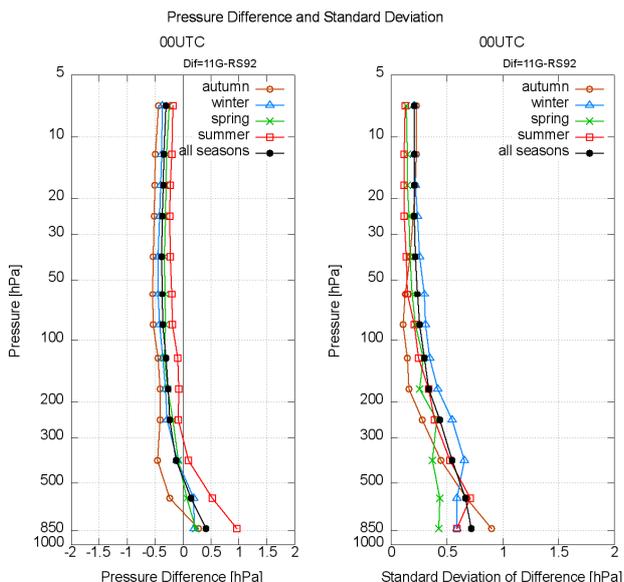


Fig. 18 Average profiles of pressure differences (11G-RS92) and standard deviations for 00 UTC.

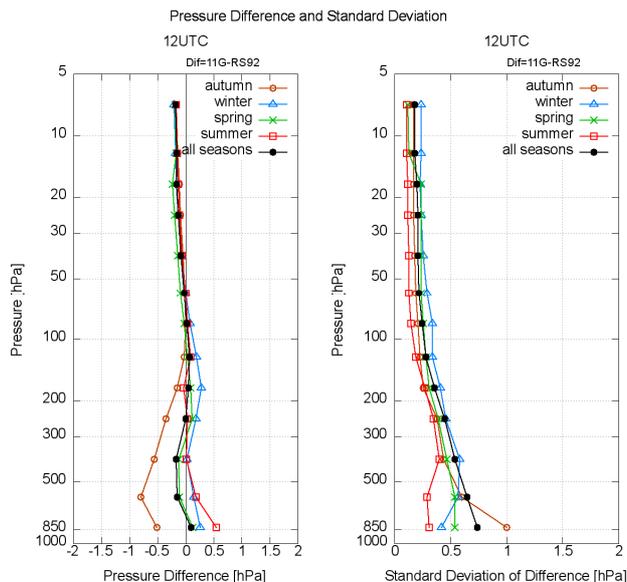


Fig. 19 Average profiles of pressure differences (11G-RS92) and standard deviations for 12 UTC.

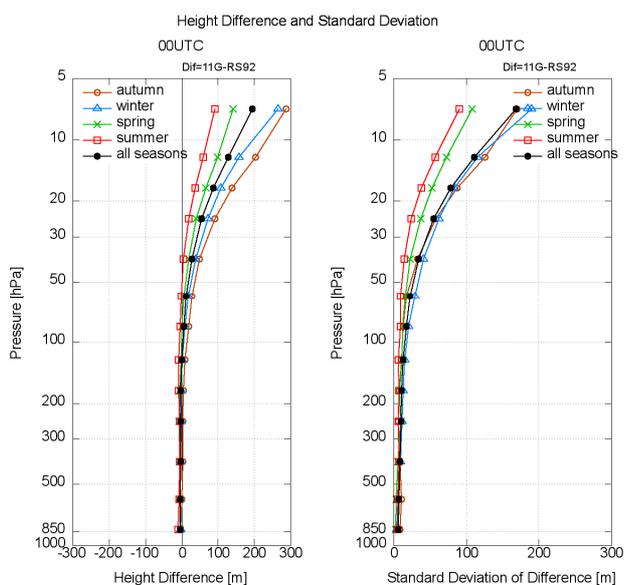


Fig. 20 Average profiles of height differences (11G-RS92) and standard deviations for 00 UTC.

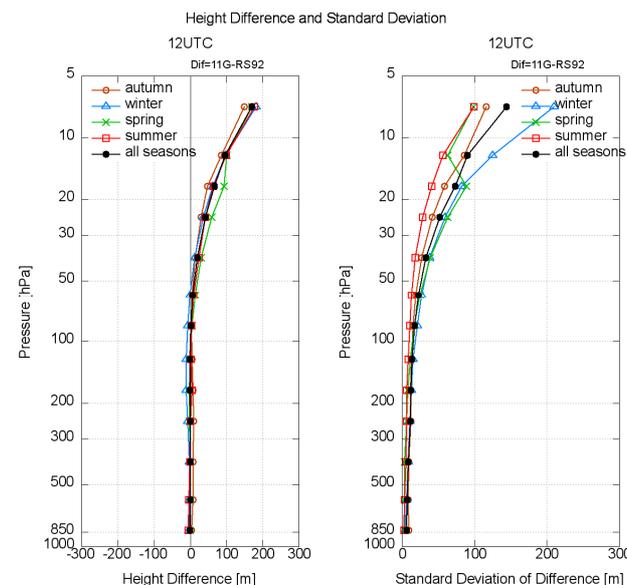


Fig. 21 Average profiles of height differences (11G-RS92) and standard deviations for 12 UTC.

差については、50 hPa より上層で差が大きくなり、00UTC 観測の 20~10 hPa の層では最大で+200 m 程度の差が見られる(Fig.20)。これは同じ場所にあっても 11G の方が高い高度を示すことになる。RS92 の気圧観測値は気圧計により観測された値であり、ジオポテンシャル高度も気圧計の観測値を使用して算出しているが、11G は気圧計を搭載しておらず、GPS の高度データと気温、湿度の観測値から気圧値を算出しているため、測定方法に大きな違いがある。そのため、00UTC 観測で見られた両者の気圧差とジオポ

テンシャル高度差には気温や気圧の測定誤差や大気の擾乱などさまざまな要因が考えられる。

4. 指定気圧面におけるデータ比較

それぞれの観測システムで算出された指定気圧面(1000, 925, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 350, 300, 250, 200, 175, 150, 125, 100, 70, 50, 40, 30, 20, 15, 10, 5 hPa) の観測データについて比較を行った。解析に使用したデータは、3.3 で選別した 71 回分の観測データである。また、指定

Table 3 Mean differences and standard deviations (SD) of temperature for all seasons at standard pressure levels for each observation time.

Pressure level (hPa)	Temperature difference and standard deviation (SD)					
	00UTC		12UTC		00&12UTC	
	Difference (°C)	SD (°C)	Difference (°C)	SD (°C)	Difference (°C)	SD (°C)
1000	-0.10	0.39	-0.04	0.13	-0.07	0.30
925	0.05	0.13	0.02	0.12	0.04	0.13
900	0.04	0.18	0.01	0.11	0.03	0.15
850	-0.03	0.33	0.01	0.16	-0.01	0.26
800	0.04	0.18	0.00	0.15	0.02	0.16
700	-0.04	0.40	-0.10	0.30	-0.07	0.36
600	0.00	0.16	-0.07	0.23	-0.03	0.20
500	-0.13	0.17	0.08	0.14	-0.02	0.19
400	-0.22	0.14	0.21	0.14	-0.01	0.26
350	-0.23	0.15	0.26	0.17	0.01	0.29
300	-0.19	0.15	0.23	0.16	0.02	0.26
250	-0.22	0.19	0.24	0.20	0.00	0.31
200	-0.22	0.17	0.21	0.14	-0.01	0.26
175	-0.27	0.18	0.15	0.18	-0.06	0.27
150	-0.32	0.16	0.13	0.19	-0.10	0.29
125	-0.35	0.28	0.07	0.11	-0.15	0.30
100	-0.44	0.27	0.08	0.18	-0.18	0.35
70	-0.61	0.53	0.13	0.22	-0.25	0.55
50	-0.63	0.44	0.13	0.31	-0.26	0.54
40	-0.47	0.42	0.08	0.24	-0.20	0.44
30	-0.46	0.36	0.06	0.22	-0.21	0.40
20	-0.47	0.54	0.09	0.26	-0.20	0.51
15	-0.65	1.04	-0.12	0.39	-0.40	0.85
10	-0.87	0.79	-0.24	0.69	-0.56	0.81
5	-1.35	1.15	-0.59	0.92	-0.76	1.03

気圧面データでの解析では気温が最初に-40°Cを下回った気圧面より上空での湿度観測値は使用しない。

4. 1 比較方法

比較方法は、高層気象台(2011)と同様に、各指定気圧面のデータを観測時刻別に区分して集計する。L番目の観測における11GとRS92の、ある指定気圧面における観測値をそれぞれ T_L^M 、 T_L^V とし、各指定気圧面の合計した観測回数をN、その順番をL=1, 2, ..., Nとすると、以下の式によって各種統計量が算出される。ただし、差は同時刻での比較と同じく11Gの観測値からRS92の観測値を引いた値($\Delta T_L = T_L^M - T_L^V$)とする。

$$11G \text{ の平均値: } \overline{T^M} = \frac{\sum_{L=1}^N T_L^M}{N} \quad (8)$$

$$RS92 \text{ の平均値: } \overline{T^V} = \frac{\sum_{L=1}^N T_L^V}{N} \quad (9)$$

$$\text{差の平均値: } \overline{\Delta T} = \frac{\sum_{L=1}^N \Delta T_L}{N} \quad (10)$$

各指定気圧面の差の標準偏差：

$$\sigma(\Delta T) = \sqrt{\frac{\sum_{L=1}^N (\Delta T_L - \overline{\Delta T})^2}{N}} \quad (11)$$

4. 2 解析結果

解析に使用した気温と風の観測データは、各季節とも15 hPa面まで16事例のサンプルを取得できた。湿度については気象庁の規定によりルーティンデータは気温-40°C以上を正規データとして扱っているため、夏季は300hPa面までのデータが16事例取得できたが、冬季は350hPa面まで4事例のみであった。Table 3~Table 7に、全季節で平均した指定気圧面における観測値の差と差の標準偏差を示す。

気温差(Table 3)については、特に高度の高い気圧面(20~5hPa)において高度が高くなるにつれて気温差が負の方へ大きくなる傾向がある。これは、同時刻の比較のFig.5~Fig.7で見られた気温差に加えて、同じ指定気圧面が得られる高度差(Table 5)が関連しており、高度と共に気温が昇温する20~5hPaの指定気圧面では、11GがRS92よりも低い高度の観測値を取得していることが原因の1つである。12UTC観測の500~150hPaの気圧層では気温差が

正偏差となっているが、これは同時刻の比較でも同様の結果となっている(Fig.7 参照).

湿度差(Table 4)については、同時刻での比較と同様に800hPa より上空で11G が高い値を示す特徴がある。サンプル数が少ない250hPa 面を除けば、湿度差は5%RH 以内

である。

ジオポテンシャル高度(Table 5)については、12UTC 観測よりも00UTC 観測における差が大きい。上空ほど負の偏差が大きくなっているのは、同時刻における気圧観測値の比較において、両ゾンデが同気圧となる高度がRS92 の方

Table 4 Mean differences and standard deviations (SD) of relative humidity for all seasons at standard pressure levels for each observation time.

Pressure level (hPa)	Relative humidity difference and standard deviation (SD)					
	00UTC		12UTC		00&12UTC	
	Difference (%RH)	SD (%RH)	Difference (%RH)	SD (%RH)	Difference (%RH)	SD (%RH)
1000	-0.54	2.81	1.38	2.68	0.41	2.91
925	-0.58	2.55	0.00	1.80	-0.30	2.24
900	-0.53	2.74	0.17	1.92	-0.18	2.40
850	-0.31	3.26	0.11	2.05	-0.10	2.74
800	0.44	3.25	0.40	2.19	0.42	2.78
700	1.31	2.88	1.40	1.85	1.35	2.43
600	0.72	3.40	2.46	4.30	1.58	3.97
500	1.00	3.38	1.06	3.40	1.03	3.39
400	0.97	3.17	1.76	2.59	1.37	2.92
350	1.36	3.35	2.00	2.64	1.68	3.03
300	2.27	2.73	2.85	2.44	2.58	2.60
250	6.67	3.40	-0.20	1.17	2.38	4.03

Table 5 Mean differences and standard deviations (SD) of height for all seasons at standard pressure levels for each observation time.

Pressure level (hPa)	Height difference and standard deviation (SD)					
	00UTC		12UTC		00&12UTC	
	Difference (m)	SD (m)	Difference (m)	SD (m)	Difference (m)	SD (m)
1000	-0.31	0.52	-0.12	0.63	-0.22	0.59
925	-0.33	1.96	-0.17	1.73	-0.25	1.85
900	-0.67	2.19	-0.29	1.85	-0.48	2.03
850	-0.19	3.03	-0.51	2.13	-0.35	2.63
800	-0.39	3.07	-0.37	2.64	-0.38	2.86
700	-0.89	4.30	-0.77	2.92	-0.83	3.68
600	-1.25	4.82	-1.69	4.29	-1.46	4.57
500	-2.17	5.68	-2.57	4.47	-2.37	5.12
400	-4.61	6.19	-1.71	4.48	-3.18	5.61
350	-5.81	6.81	-1.29	5.07	-3.58	6.43
300	-7.06	7.03	-0.29	5.54	-3.72	7.18
250	-9.42	7.37	-0.34	5.76	-4.94	8.03
200	-10.94	9.23	1.09	6.57	-5.01	10.03
175	-12.36	8.78	1.57	6.47	-5.49	10.40
150	-13.92	8.19	1.60	6.97	-6.27	10.87
125	-15.11	9.50	2.51	9.43	-6.42	12.93
100	-17.69	9.64	1.77	9.00	-8.10	13.48
70	-24.58	10.18	2.31	9.74	-11.32	16.74
50	-32.47	11.42	2.26	10.28	-15.60	20.49
40	-39.19	13.37	1.12	11.48	-19.61	23.70
30	-45.89	14.41	-1.91	12.77	-24.53	25.87
20	-57.94	15.84	-6.44	11.91	-32.93	29.34
15	-69.19	16.76	-10.94	16.58	-42.24	33.50
10	-84.69	25.83	-21.16	18.51	-53.43	38.94
5	-153.50	23.50	-41.71	57.98	-66.56	69.98

Table 6 Mean differences and standard deviations (SD) of wind velocity for all seasons at standard pressure levels for each observation time.

Pressure level (hPa)	Wind velocity difference and standard deviation (SD)					
	00UTC		12UTC		00&12UTC	
	Difference (ms ⁻¹)	SD (ms ⁻¹)	Difference (ms ⁻¹)	SD (ms ⁻¹)	Difference (ms ⁻¹)	SD (ms ⁻¹)
1000	0.11	0.78	0.18	0.86	0.14	0.82
925	-0.19	0.57	-0.17	0.70	-0.18	0.63
900	-0.17	0.69	-0.14	0.64	-0.15	0.66
850	0.03	0.50	0.00	0.83	0.01	0.68
800	0.06	0.74	0.03	0.70	0.04	0.72
700	0.00	0.71	-0.06	0.58	-0.03	0.65
600	0.00	0.75	-0.26	0.73	-0.13	0.75
500	0.06	0.78	-0.09	0.65	-0.01	0.72
400	-0.03	0.69	-0.06	0.71	-0.04	0.70
350	-0.08	0.72	-0.09	0.73	-0.08	0.73
300	-0.28	0.69	0.03	0.74	-0.13	0.73
250	0.00	0.53	-0.06	0.79	-0.03	0.67
200	0.08	0.64	-0.14	0.72	-0.03	0.69
175	0.08	0.72	-0.17	0.56	-0.04	0.66
150	0.14	0.54	-0.03	0.65	0.06	0.60
125	0.08	0.68	-0.09	0.55	0.00	0.63
100	0.08	0.86	-0.09	0.55	0.00	0.73
70	0.17	0.87	-0.06	0.75	0.06	0.82
50	0.31	1.17	-0.09	0.66	0.11	0.98
40	-0.03	1.09	0.09	0.89	0.03	1.00
30	0.00	0.91	-0.12	0.80	-0.06	0.86
20	-0.36	1.21	-0.21	0.87	-0.29	1.06
15	0.17	1.21	-0.19	1.00	0.00	1.13
10	-0.16	1.73	-0.26	1.57	-0.21	1.65
5	3.00	2.00	1.00	3.34	1.44	3.20

Table 7 Mean differences and standard deviations (SD) of wind direction for all seasons at standard pressure levels for each observation time.

Pressure level (hPa)	Wind direction difference and standard deviation (SD)					
	00UTC		12UTC		00&12UTC	
	Difference (deg)	SD (deg)	Difference (deg)	SD (deg)	Difference (deg)	SD (deg)
1000	1.69	13.50	0.59	6.83	1.14	10.76
925	-0.50	7.86	2.20	11.03	0.83	9.65
900	2.72	12.19	2.09	8.95	2.41	10.72
850	-1.75	7.50	-0.37	11.07	-1.07	9.45
800	2.89	22.12	0.34	12.77	1.63	18.17
700	0.42	2.69	-3.80	27.92	-1.66	19.81
600	0.11	2.27	-0.06	2.45	0.03	2.36
500	-0.25	1.88	-0.34	1.85	-0.30	1.86
400	0.03	0.96	-0.20	1.14	-0.08	1.06
350	0.31	1.41	0.23	1.10	0.27	1.27
300	-0.36	0.79	-0.26	1.08	-0.31	0.94
250	-0.06	0.91	-0.09	0.84	-0.07	0.88
200	0.22	0.71	0.14	0.68	0.18	0.70
175	-0.06	0.66	-0.11	0.67	-0.08	0.67
150	0.06	0.78	-0.11	0.57	-0.03	0.69
125	-0.06	1.00	-0.06	0.58	-0.06	0.82
100	0.22	1.58	0.00	0.89	0.11	1.30
70	0.58	4.12	-0.17	2.22	0.21	3.34
50	-4.11	17.05	-1.29	7.11	-2.74	13.27
40	0.92	16.64	-0.06	8.18	0.44	13.24
30	-3.83	24.56	-1.44	6.98	-2.67	18.31
20	-3.86	16.44	-1.82	9.21	-2.87	13.46
15	-2.44	17.41	-0.29	10.54	-1.45	14.68
10	-1.44	14.09	-0.94	11.14	-1.19	12.73
5	-8.50	7.50	-1.14	15.72	-2.78	14.63

が高いことが原因である。

風の観測(Table 6, Table 7)については、50hPa より上空で風向差が大きくなっている。これは100hPa より上空では風向が西から東へ大きく転向する領域であり(Fig.12), 同じ指定気圧面の値を取得する高度に差があることが原因の1つである。風速差はサンプル数の少ない5hPa面を除けば、 $\pm 1\text{ms}^{-1}$ の範囲である。

5. 考察

5. 1 気温観測値の差について

同時刻における気温の比較では、00UTC と 12UTC の観測で気温差に違いが見られた。昼夜の気温観測で大きく異なる要因として一つは日射の影響とその補正方法の違いが考えられる。今回の比較観測で使用したRS92の観測処理システム(DigiCORA)のバージョンは3.6.3であるが、この観測処理システムはVaisala社によって2010年にバージョン3.6.4へ更新され、RS92に適用される日射補正値も更新されている。更新後の日射補正値は、更新前に比べて100hPaより高い高度では0.1~0.2K程度大きくなっている(Vaisala : 2005, Vaisala : 2010)。このことから、今回の比較観測におけるRS92の日射補正値は過少評価の可能性があり、新しい日射補正値を適用すると日中の高高度の気温データは0.1~0.2K程度低温側へ修正されると思われる。ただし、今回の統計解析で得られた11GとRS92の100hPaより上空の気温差は、00UTC観測で-0.5~-0.4K, 12UTC観測で約+0.1Kであり、昼夜の差が約0.5Kであることから、RS92の日射補正値だけではなく11Gの日射補正方法

も影響していることが推測される。

もう一つは11Gの気温観測値に適用されているヒートスパイク補正の影響が考えられる。ヒートスパイクとは、熱容量の大きいゾンデ管体でバウンドした空気がゾンデセンサに接触する現象と、気球後流による影響の二つが考えられており、いずれも日中の観測では気温プロファイルにプラス成分のパルスが現れる。11Gはゾンデ管体を流線型とすることで前者の影響を小さくしているが気球後流の影響は排除できない。そこでルーティンでの気温観測値には500hPaより上層で気球後流の影響を除去するフィルターを使用している。この除去フィルターでは、日中の観測における気球からのヒートパルスを除去するために、一定時間内の低い気温を観測値として採用している(GRUAN ICM-7 : 2015)。この効果が過剰に現れたと仮定すると、今後はフィルターの適用区間等について検討する必要がある。

5. 2 気圧とジオポテンシャル高度の差について

同時刻におけるデータの比較では、00UTC観測の気圧観測値は300hPaより上空で11GがRS92よりも0.2~0.5hPa小さい値を示す傾向があった。また、ジオポテンシャル高度の比較においては、50hPaより上空で11Gが高い値を示す傾向が見られた。RS92では気圧と気温、湿度の観測値を利用してジオポテンシャル高度を算出し、一方11Gではジオポテンシャル高度と気温、湿度の観測値から気圧を算出していることから、気圧差とジオポテンシャル高度差には関連性がある。

Table 8 Errors in geopotential height (m) (WMO : 2008).

(Typical errors in standard levels, $\epsilon_z(p_s)$, and significant levels, $\epsilon_z(t_1)$, for given temperature and pressure errors, at or near specified levels. Errors are similar in northern and southern latitudes.)

	300hPa	100hPa	30hPa	10hPa
Temperature error $\epsilon_T = 0.25K$, pressure error $\epsilon_p = 0hPa$				
Standard and significant levels	9	17	26	34
Temperature error $\epsilon_T = 0K$, pressure error $\epsilon_p = -1hPa$				
25°N				
Standard level	3	12	-2	-24
Significant level	27	72	211	650
50°N summer				
Standard level	3	5	1	-20
Significant level	26	72	223	680
50°N winter				
Standard level	3	5	6	-4
Significant level	26	70	213	625

そこでまず、ジオポテンシャル高度を算出する際の誤差要因について考える。WMO(2008)によると、ラジオゾンデ観測において、ある時刻 t_1 のジオポテンシャル高度の誤差は次式で表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_z(t_1) = & \frac{R}{g} \int_{p_0}^{p_1} \left[\varepsilon_T(p) - \frac{\delta T}{\delta p} \varepsilon_p(p) \right] \frac{dp}{p} \\ & + \frac{R}{g} \int_{p_1}^{p_1 + \varepsilon_p(p_1)} \left[T_V(p) + \varepsilon_T(p) - \frac{\delta T}{\delta p} \varepsilon_p(p) \right] \frac{dp}{p} \end{aligned} \quad (12)$$

p_0 : 地上気圧

p_1 : 時刻 t_1 での真の気圧

$p_1 + \varepsilon_p(p_1)$: 時刻 t_1 にラジオゾンデで観測された気圧

$\varepsilon_T(p)$: ラジオゾンデで観測された気温の誤差

$\varepsilon_p(p)$: ラジオゾンデで観測された気圧の誤差

$T_V(p)$ は気圧 p での仮温度,

R : 気体定数,

g : 重力定数

また、Table 8 に WMO(2008) の 12 章で示されている、気温と気圧の観測値の誤差によるジオポテンシャル高度への影響を示す。この表より、例えば 0.25K の気温観測誤差の場合 300hPa 面では 9m、30hPa 面では 26m 程度の高度誤差が生じるが、-1hPa の気圧観測誤差の場合、50°N winter の significant level では、300hPa 面での高度誤差は 26m だが 30hPa 面では 213m と大きくなり、気圧が低い高高度ほど気圧誤差の影響が大きいことがわかる。今回の比較観測では、Fig.18 で示した同時刻における気圧の比較では 100hPa より上空ではほぼ一定の気圧差となったが、RS92 のジオポテンシャル高度は気圧計による気圧及び気温、湿度から求める積算高度であり、幾何学高度から求める 11G と比べると、気圧差がそのままジオポテンシャル高度に反映されるため、気圧が低くなる高高度ほど気圧差の影響が大きいと考えられる。したがって、Fig.20 で見られたように上空ほどジオポテンシャル高度差が大きくなっている。

次に、同時刻における比較で見られた気圧差に対する気温観測値の影響を考える。11G と RS92 では Fig.6 で示した気温差があり、これが気圧の算出にどの程度影響するかを評価するため、11G の気圧観測値について、観測時と同様に 11G の気温、湿度、ジオポテンシャル高度から算出した気圧と、気温のみを RS92 の観測値を使用して算出した気圧を比較した。比較には、気圧差と気温差の高度分布がともに統計で得られた結果(Fig.6, Fig.18)に近く、平均から大きく外れていない 2014 年 3 月 19 日の 00UTC 観測データを使用した。Fig.22 に比較した結果を示す。この図において赤線で示した値は気温差によって生じる気圧差を示しており、観測時と同様に 11G の気温観測値を使用し

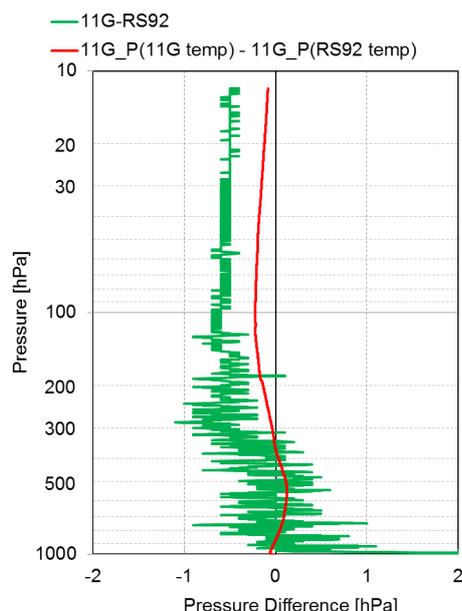


Fig. 22 Pressure difference of the flight at 00 UTC on Mar. 19, 2014.

The red line shows pressure difference due to the temperature difference, and the green line shows the pressure difference between the original data of 11G and RS92.

て 11G の気圧値を測高公式により再計算した値 (11G_P(11G temp))から、気温のみ RS92 の観測値を使用して 11G の気圧値を計算した値(11G_P(RS92 temp))を引いた値である。また緑線で示した値は、実際の観測結果から得られた 11G と RS92 の気圧差である。この結果から、気温差によって生じる気圧差(赤線)は 300hPa より上空で負の値となる傾向が元の気圧差の分布(緑線)と似ており、気温差の影響を差し引くことで気圧差が小さくなることがわかる。したがって、今回の比較観測において 300hPa より上空で見られた気圧差の要因の 1 つが気温差であると推測される。ただし、ここで見積もった気温差のみの影響による気圧差は、実際の観測値での気圧差の約半分程度であるため、11G と RS92 の気圧差の別の要因として、RS92 の気圧計の誤差も考えられる。

6. まとめ

11G と RS92 の観測データの特性の違いを検証するために、2013 年 10 月 21 日から 2014 年 6 月 30 日にかけて、11G と RS92 の同時飛揚による比較観測を行った。取得したデータのうち 71 回分の観測データを使用して統計解析を行った。

同時刻における比較では、00UTC 観測の 100hPa より上空において気温観測値で 11G が RS92 よりも約 0.5K 低い

値を示す傾向があり、湿度観測値では昼夜ともに 11G が RS92 よりも高い値を示す傾向が見られた。また、気圧観測値については、00UTC 観測の 300hPa より上空で 0.2~0.5 hPa 程度 11G が低い値を示す傾向が見られた。風向、風速については、地上付近と成層圏で差が見られたが、風向で 1°, 風速で 0.2 ms^{-1} 程度の差であり、観測に影響のある大きさではなかった。

指定気圧面における比較では、気温については 1000~100 hPa では昼夜ともに $\pm 0.5 \text{ K}$ 以内の差で、湿度については、1000~300 hPa で $\pm 5\% \text{ RH}$ 以内と、この差は WMO (2008) で示している高層気象観測に求められる観測精度の範囲内であった。

しかし、気候監視のための高層気象観測では、10 年に 0.1°C のオーダーの気温変動を検出しようとしており(藤原: 2011)、今回の比較結果で得られたゾンデによる観測値の差は無視できない大きさとなるため、気候トレンド解析などの目的で観測データを利用する際にはゾンデ変更による観測データへの影響を考慮して解析を行う必要がある。

また、本稿では気象庁のルーティン観測としてのデータ特性評価を目的として解析を行ったが、館野における RS92 の観測データは GRUAN へ集積されており、Reference データとして品質管理され、再処理された GRUAN データは NCDC (NOAA National Climatic Data Center) から利用可能である (GRUAN: 2013)。今後は 11G についても GRUAN データとして提供される予定であることから、これらの基準データを利用した特性評価も行いたい。

謝 辞

本稿を草するに際し、気象庁観測部観測課の皆様、および観測第一課、二課の皆様には多大なご協力を賜った。これらの方々に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 気象庁観測部高層課 (1983): RS2-80 型と RSII-56 型レーウィンゾンデの比較観測について. 測候時報, **50**, 373 - 384.
- 高層気象台 (2011): 明星電気 RS2-91 型レーウィンゾンデとヴァイサラ RS92-SGP 型 GPS ゾンデの相互比較試験観測と検証結果. 測候時報, **78.6**, 221 - 257.
- 迫田優一・永沼啓治・萩原裕一・井上長俊・三田昭吉(1999): RS-91 型レーウィンゾンデ. 気象研究ノート, **194**, 3 - 24.
- 藤原正智 (2011): 気候監視のための新しい高層気象観測ネットワーク GRUAN. 天気, **58**, 679 - 695.
- GRUAN (2013): The GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN) GUIDE. GCOS-171, Version 1.1.0.3, WIGOS Technical Report No. 2013 - 03, World Meteorological Organization (WMO).
- GRUAN ICM-7 (2015): The Meisei sonde data product -Progress and plans-. Presentation of GRUAN ICM-7, February 23rd - 27th, 2015.
- Miloshevich, L. M., H. Vömel, D. N. Whiteman, and T. Leblanc (2009): Accuracy assessment and correction of Vaisala RS92 radiosonde water vapor measurements. *J. Geophys. Res.*, **114**, D11305, doi:10.1029/2008JD011565.
- Vaisala (2005): available on <http://www.vaisala.com/en/products/soundingsystemsandradiosondes/soundingdatacontinuity/RS92DataContinuity/Pages/solarradiationcorrectiontable.aspx>.
- Vaisala (2010): available on <http://www.vaisala.com/en/products/soundingsystemsandradiosondes/soundingdatacontinuity/RS92DataContinuity/Pages/revisedsolarradiationcorrectiontableRSN2010.aspx>.
- WMO (2008): Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, 2008 edition. WMO-No.8, World Meteorological Organization (WMO).
- WMO (2009): GRUAN Implementation Plan 2009 - 2013. WMO/TD No.1506, World Meteorological Organization (WMO).