

# RS41-SG 型と iMS-100 型 GPS ゾンデの比較観測による特性評価

古林 絵里子\*

## Quantitative comparison of the RS41-SG and the iMS-100 GPS sondes for characterization of routine soundings

KOBAYASHI Eriko

### 要旨

高層気象台では2020年6月から定常観測に使用するラジオゾンデを明星電気社製 iMS-100 型から Vaisala 社製 RS41-SG 型に変更した。新旧 GPS ゾンデの特性の違いを評価するため、2020年7月から2022年4月にかけて比較観測を実施した。比較データを解析した結果、気温では日中の観測で $-0.2\sim+0.1\text{K}$ 、夜間の観測で $-0.1\sim+0.3\text{K}$ の差が見られ、相対湿度ではおおむね $\pm 5\%RH$ の差が見られた。比較解析結果における気温や風向・風速の観測値の差は2017年に実施された RS-11G 型 GPS ゾンデと iMS-100 型 GPS ゾンデの比較結果と同程度の大きさであった。また、今回の比較観測における定常観測データと GRUAN データプロダクトの比較では、GRUAN データプロダクトで導入されている処理方法を適用することにより、相対湿度やジオポテンシャル高度で観測精度の向上を図れることがわかった。

### 1. はじめに

高層気象台(館野)は、国内のラジオゾンデによる高層気象観測網の一観測地点としてだけでなく、WMO が推進する全球気候観測システム(GCOS)における基準高層観測網(GCOS Reference Upper Air Network, 以下、GRUAN という)にも観測地点として参加しており、国際単位系標準にトレーサビリティがある高層気象観測を定常的に実施している。GRUAN の目的は「長期にわたり高層大気の高精度で品質の様な気候データを提供すること」であり(WMO : 2009, 藤原 : 2011), ラジオゾンデなどの測器を変更する際には新旧測器の比較観測を行い観測値に系統的な差がないか確認することが求められている。気象庁では、これまでも技術の進歩等の理由により使用するラジオゾンデの機種を変更する際には、高層気象台において新旧ラジオゾンデの連結飛揚による比較観測を行うことでデータ特性の違いを把握し、機種が変更することによる観測値への影響について評価してきた(Table 1)。その結果は、気象庁観測部高層課(1983), 迫田ほか(1999), 高層気象台(2011), 古林(2015)および古林・星野(2018)に報告されている。

高層気象台では、2017年9月から定常観測に使用して

きた iMS-100 型 GPS ゾンデ(明星電気社製, 以下, iMS という)に替えて、2020年6月から RS41-SG 型 GPS ゾンデ(Vaisala 社製, 以下, RS41 という)を使用することとなった。本報告では、その切り替えに伴い実施した RS41 と iMS の連結飛揚による相互比較観測(以下、比較観測という)の概要と、両ゾンデによる定常観測データ及び GRUAN データプロダクトの特性の違いを解析した結果について報告する。なお、以下ラジオゾンデ、レーウィンゾンデと GPS ゾンデを特に区別する必要がある場合を除き、単にゾンデという。

### 2. 比較対象のゾンデ

比較観測の対象となるゾンデの詳細を Table 2 に、写真



Photo 1 Model RS41 (left) and iMS (right) GPS sondes.

\*高層気象台 観測第一課

Table 1 The radiosonde intercomparisons series at Tateno.

| Period    | Sonde     |           | Information about flights                            |
|-----------|-----------|-----------|--|
|           | Old model | New model |  |
| 1981      | RS II- 56 | RS2-80    | 4 seasons, at 00 UTC and 12 UTC. Total : 41 flights  |
| 1993~1994 | RS2-80    | RS2-91    | 4 seasons, at 00 UTC and 12 UTC. Total : 59 flights  |
| 2009~2010 | RS2-91    | RS92-SGP  | 4 seasons, at 00 UTC and 12 UTC. Total : 115 flights |
| 2013~2014 | RS92-SGP  | RS-11G    | 4 seasons, at 00 UTC and 12 UTC. Total : 80 flights  |
| 2016~2017 | RS-11G    | iMS-100   | 4 seasons, at 00 UTC and 12 UTC. Total : 80 flights  |
| 2020~2022 | iMS-100   | RS41-SG   | 4 seasons, at 00 UTC and 12 UTC. Total : 73 flights  |

Table 2 Specifications of the radiosondes based on Meisei (2016) and Vaisala (2020).

| Radiosonde         |             | RS41<br>(RS41-SG GPS sonde)                        | iMS<br>(iMS-100 GPS sonde)   |
|--------------------|-------------|--|--|
| Temperature sensor | Type        | Platinum Resistor                                  | Thermistor   |
|                    | Range       | -95°C to +60°C                                     | -90°C to +60°C   |
|                    | Resolution  | 0.01°C   | 0.1°C  |
|                    | Uncertainty | 0.3°C (< 16km)<br>0.4°C (> 16km)                   | Daytime 0.5°C(Troposphere)<br>0.8°C(Stratosphere)<br>Nighttime 0.4°C |
| Humidity sensor    | Type        | Thin-film capacitor<br>(with a temperature sensor) | Electrostatic capacity type<br>(with a temperature sensor)           |
|                    | Range       | 0 to 100%RH  | 0 to 100%RH  |
|                    | Resolution  | 0.1%RH   | 0.1%RH   |
|                    | Uncertainty | 4%RH   | 5%RH (Troposphere)   |
| Pressure sensor    |             | Calculated from GPS                                | Calculated from GPS  |
| Wind               |             | GPS wind finding (with GBAS**)                     | GPS wind finding (with SBAS*)  |
| Dimensions(DWH)    |             | 46(D)×63(W)×155(H) mm                              | 53(D)×55(W)×131(H) mm  |
| Weight             |             | 80g  | 40g  |

\*SBAS : Satellite Based Augmentation System

\*\*GBAS : Ground Based Augmentation System

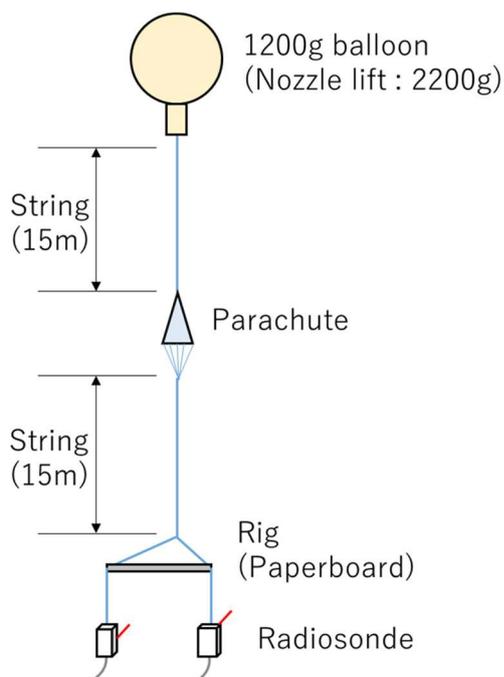


Fig. 1 Flight configuration.



Photo 2 The balloon launching scene.

を Photo 1 に示す。RS41 の気温センサは白金抵抗体、iMS はサーミスタを使用している。湿度センサはどちらも専用の温度計が搭載されているが、iMS は保護キャップ付き、RS41 はヒータ機能付きという違いがある。湿度センサ温度は相対湿度の測定値の補正に使用される。風向・風速と高度の算出にはどちらも GPS 受信機を利用し、気圧計は使用していない。筐体の大きさは同程度であるが重量は iMS が RS41 の半分程度である。また、観測データ処理プログラムは、RS41 は Vaisala 社製、DigiCORA Sounding System MW41 の Ver.2、iMS は明星電気株式会社製、MGPS2 の Ver.3 を使用した。RS41 は Vaisala 社製の旧機種である RS92-SGP 型(高層気象台の定常観測では 2009 年 12 月～2013 年 6 月に使用、以下、RS92 という)と比べると、気温や相対湿度に時定数遅れ補正が導入された(DigiCORA Sounding System MW31 の Ver.3.64 以降で導入された、Vaisala : 2022)ことや、相対湿度の飛揚前点検でセンサを加熱することにより強制的に 0%RH の環境を作り出し、誤差を補正するといった改善がなされている(Vaisala : 2014, Vaisala : 2017)。

### 3. 比較観測の実施方法

比較観測は 2020 年 7 月 3 日から 2022 年 4 月 29 日までの期間で、00 UTC 観測(昼の観測)と 12 UTC 観測(夜の観測)を週 1 回実施し、合計 73 回のデータを取得した。比較観測時の地上気象観測データを Table 3, Table 4 に示す。

比較観測におけるゾンデの飛揚形態の模式図を Fig.1 に、放球の様子を photo 2 に示す。飛揚には重量 1200g の気球を使用した。比較するゾンデは、長さ 1m の紙製連結棒にアルミテープを巻いたものの両端に 50cm のひもで吊り下げ、気球からゾンデの連結棒までのつり紐の長さは約 30m とした。比較観測における到達高度は概ね 33～38km であり、RS41 のシステムが出力する値が 200m 程度高めであった(Fig.2)。到達高度は各システムにおける観測終了判定のアルゴリズムにも依存しており、RS41 の観測終了時刻は iMS に比べて数十秒遅い傾向があった。

### 4. 同時刻におけるデータ比較

観測データの比較方法として、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。同時刻における比較では両ゾンデが同じ空気塊を測定する条件でのゾンデの違いによる観測値の特性を把握することができる。

#### 4. 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

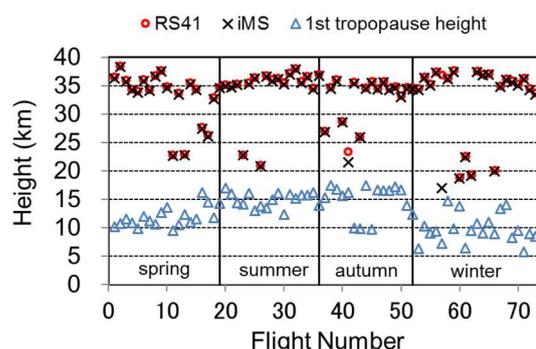


Fig. 2 Balloon burst heights and 1st tropopause heights.

タ処理を行っており、解析に使用したデータは各システムで作成された放球時からの経過時間に対する観測値が 1 秒毎に記録されたものである。放球時刻は各システムにおいて自動で判定するために両ゾンデ間で異なる場合もあり、同時刻におけるデータ比較では時刻補正が必要となる。本報告では、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により両ゾンデによるデータの時刻同期を行ったものを解析用のデータとして使用した。

#### 4. 2 比較方法

同時刻におけるデータの比較解析には、RS41 と iMS の各観測データ処理プログラムで出力された 1 秒値データ(hrd ファイル)を使用し、4. 1 で求めた時刻差を補正して使用する。比較方法は、高層気象台(2011)と同様に、観測データを、iMS の気圧値を基準として、13 の気圧層に分け、気圧層毎の平均値で比較を行った。

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 iMS の気圧値を  $P_i^o$ 、RS41 と iMS の  $i$  番目の任意の観測要素の値をそれぞれ  $T_i^N$ ,  $T_i^o$  とする(ここで、上付き文字の N は新たに導入された RS41 を、O は従来使用の iMS を表す添え字で、 $T_i^N$  と  $T_i^o$ ,  $P_i^o$  はそれぞれ同時刻における RS41 の観測値と iMS の観測値、気圧値である)。13 の気圧層とそれに含まれる観測値は以下のように定義する。

Table 3 Surface observations and cloud cover data in Spring and Summer.

The \* mark in flight No. indicates outliers which were rejected in the statistical analysis. Temp (temperature), Humi (relative humidity) and Pres (pressure) indicate the factors that were the reason for rejection.

| Season | Flight No. | Date      | Time (LST) | Pressure (hPa) | Temperature (°C) | Humidity (%RH) | Wind               |             | Cloud NN <sub>h</sub> CLhC <sub>M</sub> CH | Weather ww | Note       |
|--------|------------|-----------|------------|----------------|------------------|----------------|--------------------|-------------|--|------------|------------|
|        |            |           |            |                |                  |                | Direction (degree) | Speed (m/s) |  |            |            |
| Spring | 1          | 2021/3/5  | 20:30      | 1018.1         | 10.8             | 100            | 10                 | 0.8         | 827/7/                                     | 61         |            |
|        | 2          | 2021/3/12 | 8:30       | 1023.2         | 9.4              | 75             | 300                | 1.2         | 842/2/                                     | 03         |            |
|        | 3          | 2021/3/19 | 20:30      | 1018.7         | 9.1              | 73             | 50                 | 2.4         | 640932                                     | 02         |            |
|        | 4          | 2021/3/26 | 8:30       | 1011.3         | 12.2             | 69             | 310                | 0.9         | 000900                                     | 02         |            |
|        | *5         | 2021/4/9  | 8:30       | 1016.6         | 10.8             | 47             | 110                | 1.3         | 111/00                                     | 01         | Pres       |
|        | 6          | 2021/4/16 | 20:30      | 1024.0         | 13.8             | 70             | 140                | 1.5         | 762/7/                                     | 80         |            |
|        | 7          | 2021/4/23 | 8:30       | 1020.9         | 12.1             | 54             | 30                 | 1.2         | 000900                                     | 02         |            |
|        | 8          | 2021/4/30 | 20:30      | 1000.8         | 16.9             | 77             | 60                 | 2.9         | 642/70                                     | 80         |            |
|        | 9          | 2021/5/7  | 8:30       | 1012.8         | 19.4             | 54             | 110                | 2.5         | 830937                                     | 02         |            |
|        | 10         | 2021/5/14 | 20:30      | 1012.4         | 19.5             | 78             | 80                 | 2.6         | 712/32                                     | 02         |            |
|        | 11         | 2022/3/4  | 20:30      | 1012.5         | 5.2              | 72             | 50                 | 1.2         | 715/72                                     | 02         |            |
|        | 12         | 2022/3/11 | 8:30       | 1018.9         | 9.3              | 71             | 80                 | 0.9         | 100901                                     | 02         |            |
|        | *13        | 2022/3/18 | 20:30      | 1002.3         | 4.2              | 99             | 10                 | 1.0         | 887///                                     | 63         | Temp, Humi |
|        | 14         | 2022/3/25 | 8:30       | 1024.9         | 8.6              | 71             | 350                | 0.7         | 000900                                     | 02         |            |
|        | 15         | 2022/4/1  | 20:30      | 1022.3         | 3.8              | 58             | 300                | 0.4         | 712/72                                     | 02         |            |
|        | 16         | 2022/4/8  | 8:30       | 1013.0         | 15.8             | 39             | 280                | 4.3         | 000900                                     | 02         |            |
|        | *17        | 2022/4/15 | 20:30      | 1005.7         | 8.1              | 98             | 50                 | 2.4         | 882///                                     | 80         | Pres,Temp  |
|        | 18         | 2022/4/22 | 8:30       | 1006.2         | 18.7             | 80             | 260                | 2.5         | 000900                                     | 01         |            |
|        | *19        | 2022/4/29 | 20:30      | 1000.9         | 6.9              | 95             | 330                | 8.5         | 882///                                     | 80         | Humi       |
| Summer | 20         | 2020/7/3  | 8:30       | 1011.7         | 25.3             | 71             | 80                 | 1.5         | 642/02                                     | 02         |            |
|        | *21        | 2021/5/18 | 8:30       | 1006.5         | 19.0             | 95             | 70                 | 3.1         | 882///                                     | 80         | Temp       |
|        | *22        | 2021/5/21 | 8:30       | 1002.8         | 23.0             | 92             | 190                | 5.4         | 882///                                     | 25         | Humi       |
|        | 23         | 2021/5/21 | 20:30      | 999.6          | 21.0             | 93             | 210                | 4.2         | 888///                                     | 80         |            |
|        | 24         | 2021/5/25 | 20:30      | 997.6          | 20.0             | 80             | 50                 | 1.8         | 320932                                     | 02         |            |
|        | 25         | 2021/5/26 | 8:30       | 1005.5         | 21.0             | 39             | 280                | 2.0         | 710932                                     | 02         |            |
|        | 26         | 2021/5/28 | 20:30      | 1001.2         | 20.8             | 65             | 170                | 3.4         | 730/72                                     | 02         |            |
|        | 27         | 2021/6/3  | 8:30       | 1015.4         | 22.9             | 67             | 170                | 2.5         | 442/02                                     | 02         |            |
|        | *28        | 2021/6/4  | 8:30       | 1002.8         | 20.5             | 94             | 160                | 4.7         | 882///                                     | 80         | Pres,Humi  |
|        | *29        | 2021/6/4  | 20:30      | 994.5          | 21.5             | 100            | 20                 | 3.0         | 887///                                     | 61         | Temp       |
|        | 30         | 2021/6/8  | 20:30      | 1011.5         | 18.7             | 94             | 50                 | 2.0         | 652/70                                     | 25         |            |
|        | 31         | 2021/6/21 | 8:30       | 1003.1         | 21.2             | 77             | 80                 | 2.5         | 775///                                     | 02         |            |
|        | 32         | 2021/6/21 | 20:30      | 1003.9         | 21.4             | 81             | 170                | 2.1         | 660930                                     | 02         |            |
|        | 33         | 2021/6/22 | 8:30       | 1006.5         | 22.6             | 77             | 90                 | 1.1         | 712/32                                     | 02         |            |
|        | 34         | 2021/6/22 | 20:30      | 1007.5         | 20.4             | 92             | 110                | 1.4         | 738/30                                     | 02         |            |
|        | *35        | 2021/6/30 | 8:30       | 1010.5         | 20.3             | 86             | 50                 | 1.9         | 872/7/                                     | 25         | Temp       |
|        | *36        | 2021/8/13 | 8:30       | 1010.2         | 20.5             | 98             | 290                | 2.6         | 882///                                     | 25         | Humi       |

## RS41-SG 型と iMS-100 型 GPS ゾンデの比較観測による特性評価

Table 4 Surface observations and cloud cover data in Autumn and Winter.

The \* mark in flight No. indicates outliers which were rejected in the statistical analysis. Temp (temperature), Humi (relative humidity) and Pres (pressure) indicate the factors that were the reason for rejection.

| Season | Flight No. | Date       | Time (LST) | Pressure (hPa) | Temperature (°C) | Humidity (%RH) | Wind               |             | Cloud NN <sub>h</sub> C <sub>l</sub> hC <sub>M</sub> C <sub>H</sub> | Weather ww | Note      |
|--------|------------|------------|------------|----------------|------------------|----------------|--------------------|-------------|---|------------|-----------|
|        |            |            |            |                |                  |                | Direction (degree) | Speed (m/s) |   |            |           |
| Autumn | 37         | 2020/9/18  | 20:30      | 1005.3         | 27.4             | 86             | 170                | 2.9         | 625/32  | 02         |           |
|        | 38         | 2020/10/2  | 20:30      | 1015.8         | 16.4             | 96             | 110                | 0.5         | 110930  | 02         |           |
|        | *39        | 2020/10/9  | 8:30       | 1023.9         | 16.1             | 85             | 30                 | 2.4         | 878///  | 60         | Temp,Humi |
|        | 40         | 2020/10/16 | 20:30      | 1017.7         | 14.8             | 78             | 20                 | 1.5         | 835/7/  | 02         |           |
|        | *41        | 2020/10/23 | 8:30       | 1001.8         | 17.5             | 97             | 100                | 1.0         | 878/7/  | 21         | Pres      |
|        | 42         | 2020/10/30 | 20:30      | 1018.8         | 7.1              | 97             | 330                | 0.8         | 111/00  | 01         |           |
|        | 43         | 2020/11/13 | 20:33      | 1020.2         | 9.9              | 100            | 0                  | 0.0         | 115/30  | 12         |           |
|        | 44         | 2020/11/20 | 8:30       | 1006.1         | 21.1             | 82             | 180                | 4.7         | 778///  | 25         |           |
|        | 45         | 2020/11/27 | 20:30      | 1013.9         | 9.0              | 87             | 20                 | 1.4         | 778///  | 02         |           |
|        | 46         | 2021/9/10  | 8:30       | 1011.1         | 23.7             | 87             | 300                | 1.1         | 755/32  | 02         |           |
|        | 47         | 2021/9/17  | 20:30      | 1012.1         | 22.3             | 85             | 130                | 2.1         | 770/7/  | 02         |           |
|        | 48         | 2021/9/24  | 8:30       | 1015.4         | 23.5             | 72             | 340                | 1.0         | 115/30  | 02         |           |
|        | 49         | 2021/10/8  | 8:30       | 1018.8         | 22.9             | 81             | 280                | 2.1         | 542/02  | 10         |           |
|        | 50         | 2021/10/15 | 20:33      | 1013.5         | 17.7             | 96             | 130                | 1.3         | 322/02  | 02         |           |
|        | *51        | 2021/10/22 | 8:30       | 1015.3         | 9.9              | 95             | 360                | 1.9         | 867/7/  | 61         | Humi      |
| 52     | 2021/11/19 | 8:30       | 1015.1     | 9.2            | 87               | 290            | 1.7                | 700932      | 02  |            |           |
| Winter | 53         | 2020/12/4  | 8:30       | 1019.8         | 5.6              | 82             | 230                | 0.7         | 115/00  | 02         |           |
|        | 54         | 2020/12/11 | 20:30      | 1012.9         | 9.6              | 86             | 40                 | 0.8         | 775///  | 02         |           |
|        | 55         | 2020/12/18 | 8:30       | 1018.3         | 1.5              | 61             | 260                | 1.0         | 000900  | 02         |           |
|        | 56         | 2020/12/25 | 20:30      | 1009.2         | 4.0              | 66             | 350                | 1.4         | 658/30  | 02         |           |
|        | 57         | 2021/1/1   | 8:30       | 1010.0         | -0.3             | 60             | 300                | 1.1         | 111/00  | 02         |           |
|        | 58         | 2021/1/8   | 20:30      | 1005.3         | -3.0             | 66             | 280                | 1.2         | 111/30  | 02         |           |
|        | *59        | 2021/1/15  | 8:30       | 1022.2         | 6.0              | 65             | 20                 | 2.5         | 885///  | 02         | Temp      |
|        | 60         | 2021/1/22  | 20:30      | 1015.4         | 6.1              | 66             | 50                 | 1.4         | 550/30  | 02         |           |
|        | 61         | 2021/1/29  | 8:30       | 998.0          | 4.4              | 89             | 320                | 2.3         | 115/00  | 02         |           |
|        | 62         | 2021/2/5   | 20:30      | 1014.8         | 4.5              | 75             | 100                | 1.4         | 750972  | 02         |           |
|        | 63         | 2021/2/12  | 8:30       | 1025.0         | 2.1              | 68             | 260                | 0.4         | 710937  | 02         |           |
|        | 64         | 2021/2/19  | 20:30      | 1010.1         | 4.6              | 76             | 150                | 2.1         | 000900  | 02         |           |
|        | 65         | 2021/2/26  | 8:30       | 1018.1         | 5.1              | 71             | 250                | 1.0         | 88097/  | 02         |           |
|        | 66         | 2021/12/3  | 8:30       | 1012.7         | 5.3              | 77             | 300                | 2.2         | 115/00  | 02         |           |
|        | *67        | 2021/12/17 | 8:30       | 997.8          | 6.5              | 100            | 310                | 0.8         | 882///  | 81         | Humi      |
|        | 68         | 2021/12/24 | 20:30      | 1010.6         | 5.7              | 100            | 300                | 1.1         | 615/32  | 10         |           |
|        | 69         | 2021/12/31 | 8:30       | 1007.9         | 2.1              | 68             | 40                 | 0.4         | 211/32  | 02         |           |
|        | 70         | 2022/1/7   | 20:30      | 1019.4         | -1.1             | 67             | 280                | 1.4         | 000900  | 02         |           |
|        | 71         | 2022/1/14  | 8:30       | 1004.8         | 1.9              | 51             | 260                | 4.6         | 000900  | 02         |           |
|        | 72         | 2022/1/21  | 20:30      | 1020.2         | -1.8             | 59             | 280                | 1.7         | 000900  | 02         |           |
|        | 73         | 2022/1/28  | 8:30       | 1013.3         | 3.3              | 58             | 110                | 1.1         | 555/02  | 02         |           |

- 第 1 層 :  $T_i^N, T_i^O$  ( $1000\text{hPa} \geq P_i^O > 700\text{hPa}$ )
- 第 2 層 :  $T_i^N, T_i^O$  ( $700\text{hPa} \geq P_i^O > 500\text{hPa}$ )
- 第 3 層 :  $T_i^N, T_i^O$  ( $500\text{hPa} \geq P_i^O > 300\text{hPa}$ )
- 第 4 層 :  $T_i^N, T_i^O$  ( $300\text{hPa} \geq P_i^O > 200\text{hPa}$ )
- 第 5 層 :  $T_i^N, T_i^O$  ( $200\text{hPa} \geq P_i^O > 150\text{hPa}$ )
- 第 6 層 :  $T_i^N, T_i^O$  ( $150\text{hPa} \geq P_i^O > 100\text{hPa}$ )
- 第 7 層 :  $T_i^N, T_i^O$  ( $100\text{hPa} \geq P_i^O > 70\text{hPa}$ )
- 第 8 層 :  $T_i^N, T_i^O$  ( $70\text{hPa} \geq P_i^O > 50\text{hPa}$ )
- 第 9 層 :  $T_i^N, T_i^O$  ( $50\text{hPa} \geq P_i^O > 30\text{hPa}$ )
- 第 10 層 :  $T_i^N, T_i^O$  ( $30\text{hPa} \geq P_i^O > 20\text{hPa}$ )
- 第 11 層 :  $T_i^N, T_i^O$  ( $20\text{hPa} \geq P_i^O > 15\text{hPa}$ )
- 第 12 層 :  $T_i^N, T_i^O$  ( $15\text{hPa} \geq P_i^O > 10\text{hPa}$ )
- 第 13 層 :  $T_i^N, T_i^O$  ( $10\text{hPa} \geq P_i^O > 5\text{hPa}$ )

同一の気圧層に分類された観測データについて、平均値

( $\overline{T^N}, \overline{T^O}$ )と、差( $\Delta T_i = T_i^N - T_i^O$ )の平均値( $\overline{\Delta T}$ )を次の式(1)~(3)によって求める。差は RS41 から iMS を引いた値とする。

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

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

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

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 M、その順番を  $K=1, 2, \dots, M$  として、(4)~(7)によって各種統計量を求める。

$$\text{集計した層別の RS41 平均値 : } \overline{T^N} = \frac{\sum_{K=1}^M \overline{T_K^N}}{M} \quad (4)$$

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

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

集計した層別の差の標準偏差 :

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

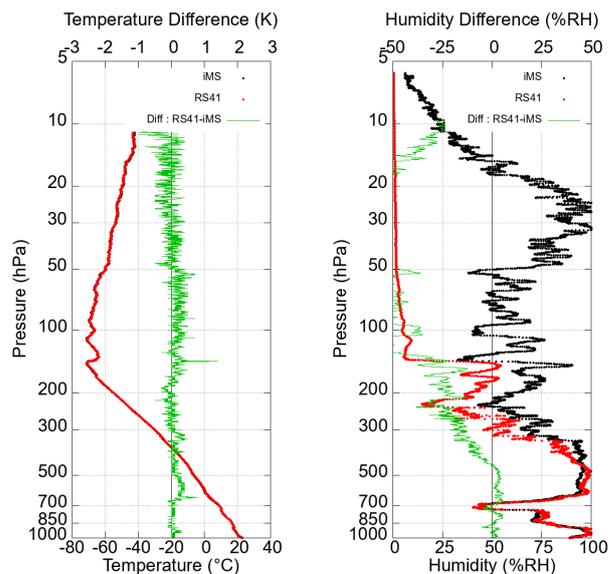


Fig. 3 Temperature, relative humidity, and RS41-iMS differences of the flight at 08:30 local time on May 21, 2021.

The black and red lines show data for radiosonde iMS and RS41, respectively, and green lines show the RS41-iMS differences.

なお、相対湿度の観測値について気象庁の定常観測では  $-40^\circ\text{C}$  より気温が低いデータは使用していないが、高層気象台が参加している GRUAN では上部対流圏や下部成層圏の水蒸気観測も重要視されているため、同時刻におけるデータ比較では他の観測要素と同様に気球到達高度までの観測値を比較対象とした。また、季節の区分については 3 カ月毎に区切ってデータを取得することが望ましいが、夏季の期間にあたる 6~8 月は観測終了後のゾンデの落下位置が陸上となる可能性が高く、安全面から連結比較観測が実施できない期間が多い。過去の比較観測においても同じ理由から 5 月の比較観測データを夏季として解析を行っていることから(高層気象台: 2011)、今回の比較観測でも 5 月後半を夏季に含め、春を 3~5 月前半、夏を 5 月後半~8 月、秋を 9~11 月、冬を 12~2 月とした。

#### 4. 3 データの選別

2021 年 5 月 21 日 08 時 30 分飛揚の気温と相対湿度のグラフを Fig.3 に示す。放球前には降水があり(Table 3)、両ゾンデの相対湿度は 350hPa 付近まで雲中を通過したことを示している。雲の層を抜けたと考えられる 350hPa 付近から RS41 と iMS の相対湿度の差が大きくなり、明らかに iMS の相対湿度が過大となっている。このことから差の要因にはセンサへの着氷による影響が推測される。同様に、他の季節の観測でも気温や相対湿度の差が極端に大きい事例があった。これらの観測については、飛揚中にセンサ

が何らかの影響を受けた可能性があり、測定値の信頼性が低いと判断し、その観測の全気圧層の観測値を統計解析から除外した。データの選別を行う際の除外基準は、季節毎にいずれかの層で気温、相対湿度、気圧のいずれかの差の層別平均値(式(3))の大きさが全体の標準偏差(式(7))の3倍を越える観測を目安とした。この方法により選別した結果、統計解析の除外対象となる観測データが合計で 15 事例あり、特に相対湿度での除外事例が多く見られた(Table 3, Table 4 の\*印の観測)。以上のことから、統計解析に使用した各季節の観測データ数は 58 であった。

#### 4. 4 解析結果

Fig.4 に気温、相対湿度について季節別に集計した RS41 の層別平均値を示す。200hPa より下層の対流圏では季節による気温の変動が明瞭であり、夏季と冬季で約 15°C の温度差がある。対流圏界面付近での気温は-60~-70°C 程度であり、成層圏の気温は夏季に高い特徴が見られた。相対湿度は、150hPa より下層では夏季と秋季に高湿で冬季に低湿の季節による特徴が見られるが、成層圏の相対湿度は対流圏に比べて非常に低く、季節による違いは見られない。

##### 4. 4. 1 同時刻における気温と相対湿度の観測値の比較

Fig.5, Fig.6 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。日中(00UTC)の観測では、

夏は気温差が $\pm 0.2\text{K}$  の範囲であるが、冬は 30hPa より上層で気温差が大きく 10~5hPa では RS41 が 0.4K 低い。秋は 30hPa より下層で RS41 の気温が iMS より高い特徴が見られた。全平均での差は-0.2~+0.1K の範囲であった。標準偏差は 200hPa より上層で大きくなる。季節的な特徴として、冬は他の季節より小さく、夏は圏界面付近で大きく、春と秋は高度とともに大きくなる。日中の観測の場合、高度とともに日射補正量が大きくなるため、その不確かさにより上空での標準偏差が大きくなっていると思われる。夜

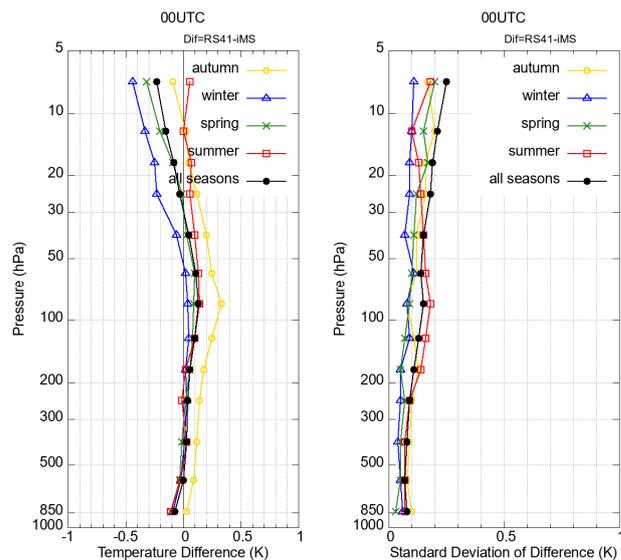


Fig. 5 Profiles of mean temperature differences (RS41-iMS) and standard deviations at 00 UTC.

Colors are the same as in Fig.4.

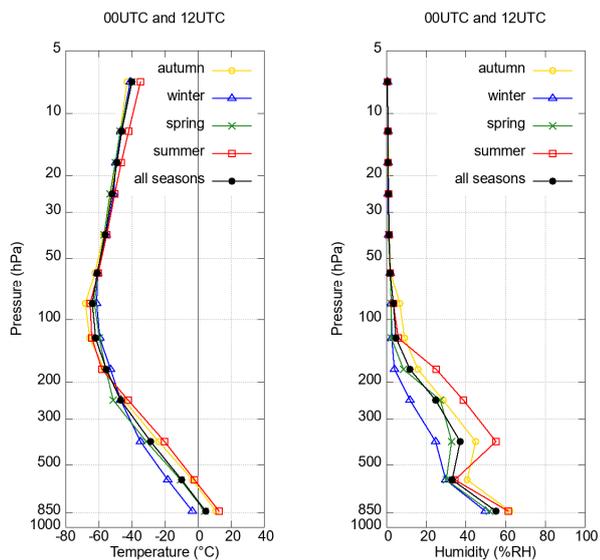


Fig. 4 Profiles of mean temperature (left) and relative humidity (right) recorded by the RS41 at 00 and 12 UTC.

The colored lines show each season, and the black lines show the means of all seasons.

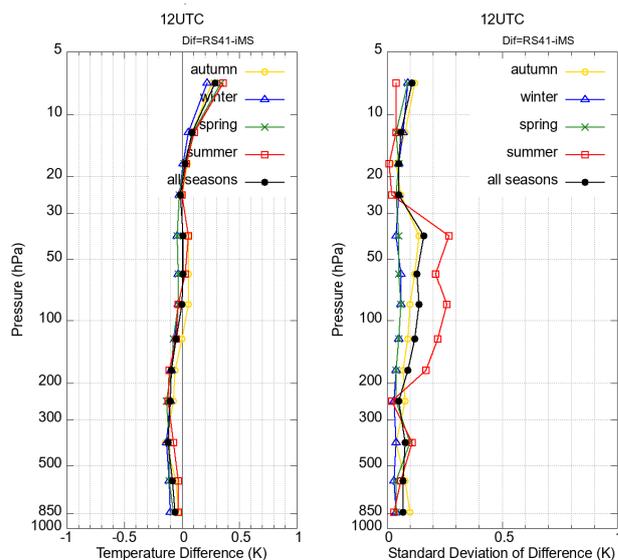


Fig. 6 Profiles of mean temperature differences (RS41-iMS) and standard deviations at 12 UTC.

Colors are the same as in Fig.4.

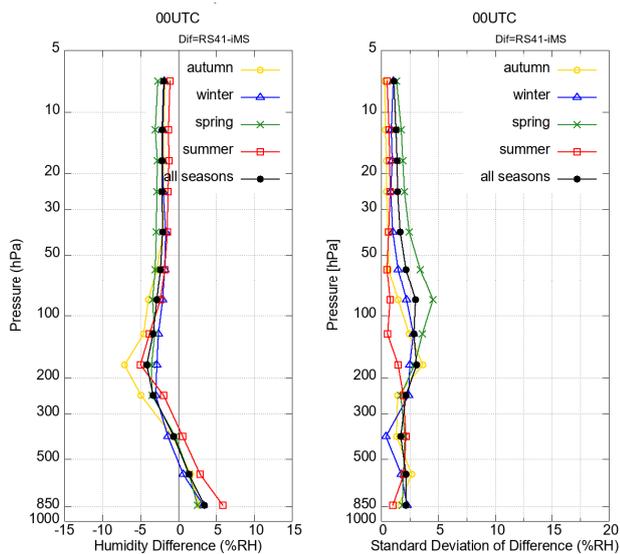


Fig. 7 Profiles of mean relative humidity differences (RS41-iMS) and standard deviations at 00 UTC.

Colors are the same as in Fig.4.

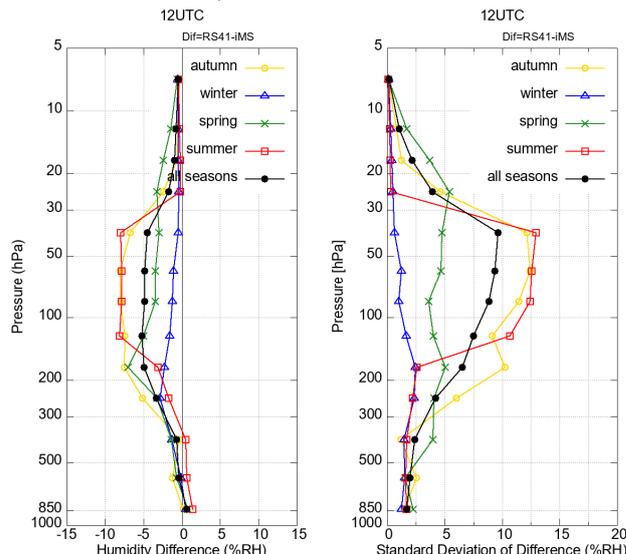


Fig. 8 Profiles of mean relative humidity differences (RS41-iMS) and standard deviations at 12 UTC.

Colors are the same as in Fig.4.

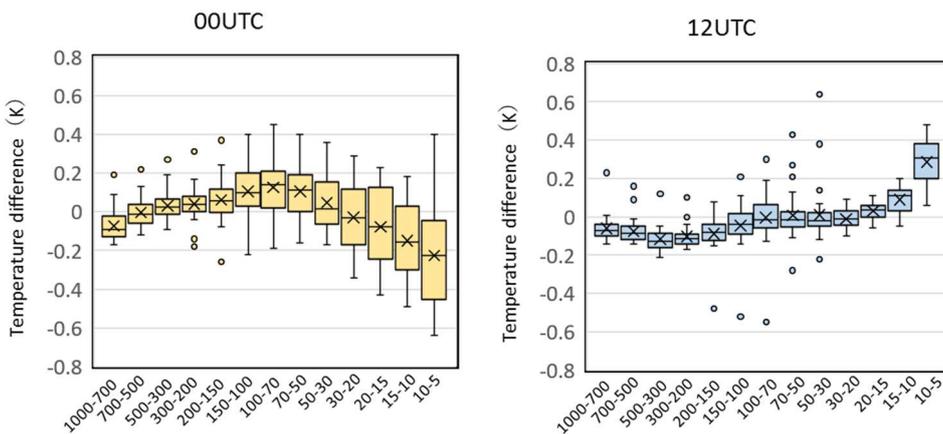


Fig. 9 Box and whisker plots of mean temperature differences (RS41-iMS) at 00 UTC and 12 UTC.

The potential outliers are shown by circles.

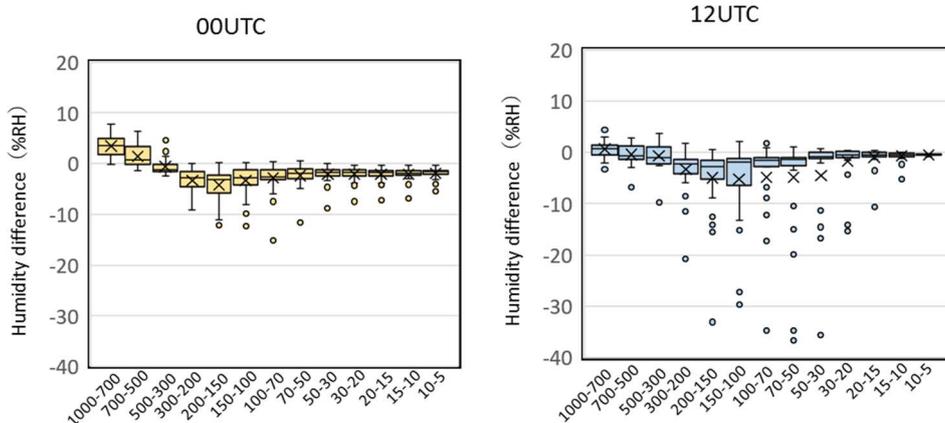


Fig. 10 Box and whisker plots of mean humidity differences (RS41-iMS) at 00 UTC and 12 UTC.

The potential outliers are shown by circles.

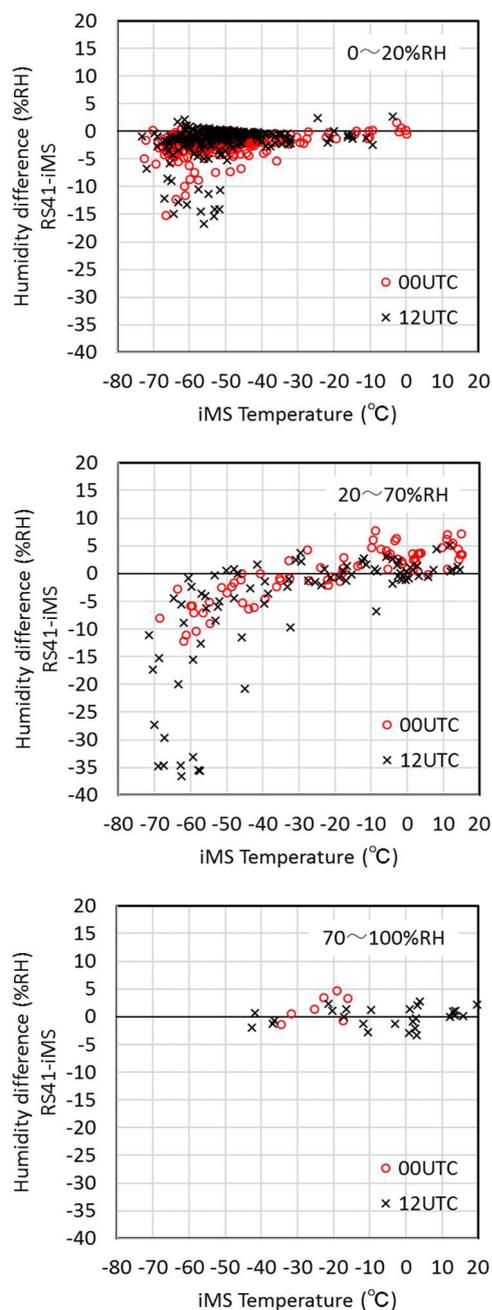


Fig. 11 Scatter diagrams of relative humidity differences (RS41-iMS) and temperature from iMS.

間(12UTC)の観測では、気温差は日中に比べて季節に依存した特徴は明瞭ではなく、1000~10hPaではおおよそ $\pm 0.1\text{K}$ の範囲内で10~5hPaのみRS41がiMSより約0.3K高い特徴があった。標準偏差では夏の200hPa~30hPaで他の季節に比べて顕著に大きくなっているが、この高度において気温差が他の観測に比べて大きい事例が2例あったためである。30hPaより上層では日中に比べて標準偏差は小さい。

Fig.7, Fig.8に観測時刻別の相対湿度差を季節別に集計

した層別平均値と標準偏差を示す。日中の相対湿度はどの季節も同様の特徴が見られ、500hPaより下層ではRS41の相対湿度がiMSより高く、300hPaより上層ではiMSの相対湿度が高い。秋の200hPa付近と夏の1000~700hPaを除けば、差は概ね $\pm 5\%RH$ の範囲であった。標準偏差は $5\%RH$ の範囲であり、春に100hPa付近で大きい特徴がある。夜間は冬が他の季節に比べて相対湿度差が小さく、夏と秋は200~30hPaの高度で $5\%RH$ 以上の差が見られた。全体的にはRS41の相対湿度がiMSに比べて低い特徴がある。また、夏と秋に相対湿度差が他の観測に比べて大きい事例があったため標準偏差も日中に比べて大きくなっている。

統計解析に使用した観測データにおける気温と相対湿度の層別平均差(RS41-iMS)の箱ひげ図をそれぞれFig.9, Fig.10に示す。箱ひげ図(box and whisker plot)はデータのばらつきをわかりやすく表現するための統計図であり、四分位を用いてデータの散らばりを表現する。ボックスは第一四分位数( $Q_{1/4}$ )、中央値、第三四分位数( $Q_{3/4}$ )を示し、閉区間を $[Q_{1/4}-1.5IQR, Q_{3/4}+1.5IQR, IQR=Q_{3/4}-Q_{1/4}]$ とした場合に閉区間の外にあるものを○で示す。ひげは閉区間の最大値、最小値、×は全データの平均値を示す。気温差は、日中が夜間に比べて全体的にばらつきが大きいだが、夜間については200~30hPaにおいて差が顕著に大きい事例が多く見られる。夜間における閉区間外のデータ(グラフでは○で表示)のうち、200~70hPaにおける約-0.5Kや50~30hPaにおける+0.6Kの値はFig.6の気温差の標準偏差を大きくした観測値である。相対湿度差は、夜間のばらつきが大きく、300~30hPaではiMSが $20\%RH$ 以上RS41より大きい事例が見られ、閉区間の外にある観測値のほとんどはiMSがRS41より高湿のデータである。

RS41とiMSの相対湿度差と気温の相関関係を相対湿度階級別に示した散布図をFig.11に示す。70~100%RHの高湿環境では相対湿度差が $\pm 5\%RH$ 以内で特徴的な傾向は見られない。20~70%RH(Fig.11中央)の環境では、 $-40^{\circ}\text{C}$ より低温側でRS41がiMSに比べて低い値となる傾向が見られ、 $-10^{\circ}\text{C}$ より高温側では日中にRS41が高い傾向が見られた。0~20%RHの低湿度の環境では全体的にRS41が低い傾向である。低温環境でのRS41の低湿傾向については、Edwards *et al.* (2014)においても $-60^{\circ}\text{C}$ 以下の環境でRS41は同じVaisala社製のRS92に比べて低い値を示す傾向があることが示されている。

#### 4. 4. 2 同時刻における気圧とジオポテンシャル高度観測値の比較

Fig.12~15には、気圧とジオポテンシャル高度の観測時

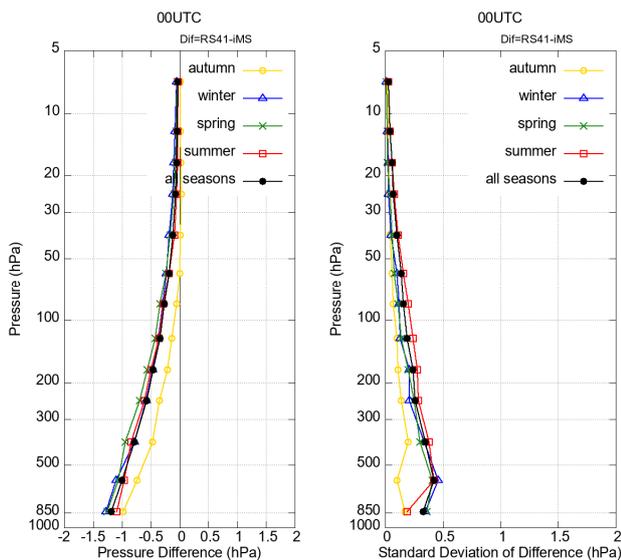


Fig. 12 Profiles of mean pressure differences (RS41-iMS) and standard deviations at 00 UTC.

Colors are the same as in Fig.4.

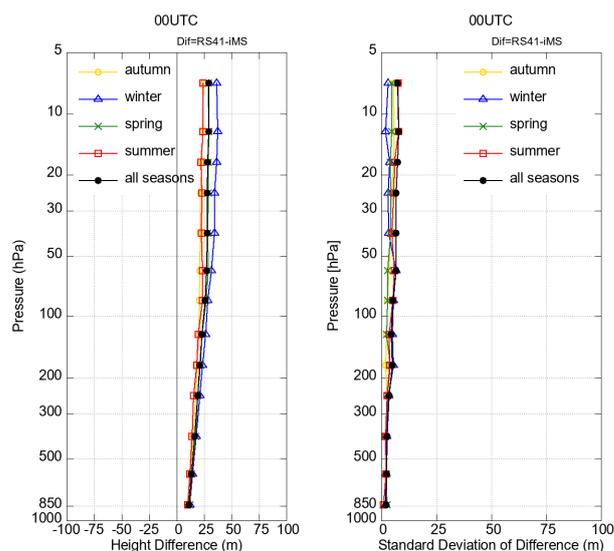


Fig. 14 Profiles of mean geopotential height differences (RS41-iMS) and standard deviations at 00 UTC.

Colors are the same as in Fig.4.

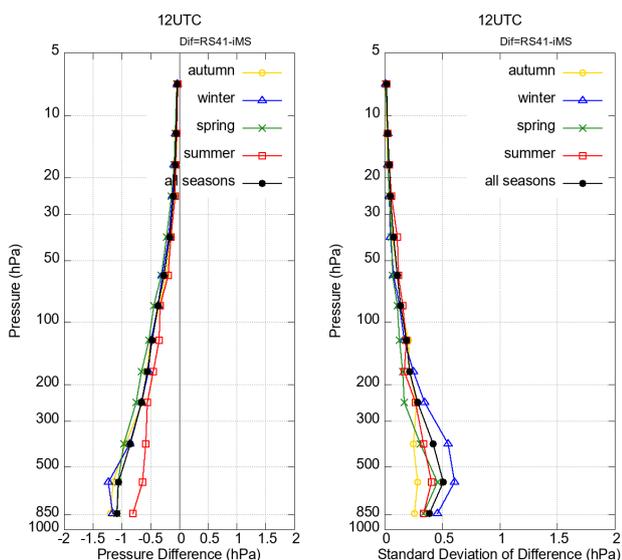


Fig. 13 Profiles of mean pressure differences (RS41-iMS) and standard deviations at 12 UTC.

Colors are the same as in Fig.4.

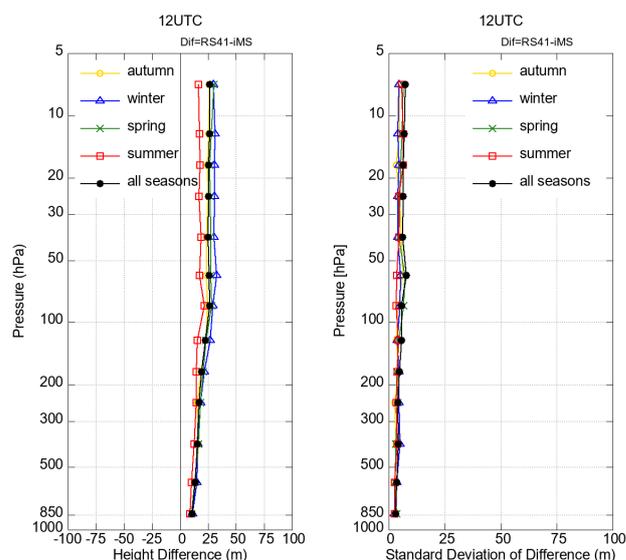


Fig. 15 Profiles of mean geopotential height differences (RS41-iMS) and standard deviations at 12 UTC.

Colors are the same as in Fig.4.

刻別に集計した層別平均差と標準偏差を示す。Fig.12, Fig.13 の気圧差は日中、夜間ともに同じ特性が見られ、1000~500hPa の層で気圧差が約-1hPa であり RS41 が iMS に比べて低い。標準偏差は 700~500hPa の層で大きく 0.5hPa 程度であるが、秋は小さい。Fig.14, Fig.15 のジオポテンシャル高度差では気圧差に対応して日中、夜間ともに RS41 の高度が iMS より高く、100hPa より上空で 25m 程度の差が見られる。冬の高度差は他の季節に比べてやや

大きい。差の大きさは観測値に対して 1%以内であり十分小さい。標準偏差は日中、夜間ともに季節による違いは見られなかった。

#### 4. 4. 3 同時刻における風観測値の比較

Fig.16 に、風速、風向を季節毎に集計した RS41 の層別平均値を、Fig.17, Fig.18 にはそれぞれ風速差、風向差を集計した層別平均値と標準偏差を示す。風速、風向について

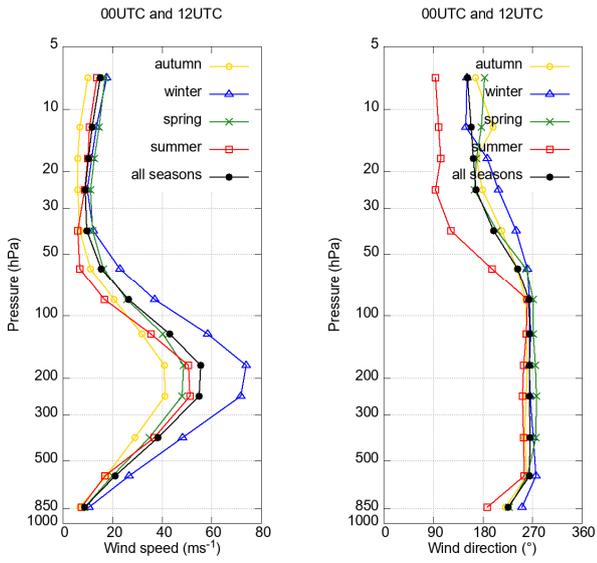


Fig. 16 Profiles of mean wind speed (left) and wind direction (right) from the RS41 radiosonde at 00 and 12 UTC. Colors are the same as in Fig.4.

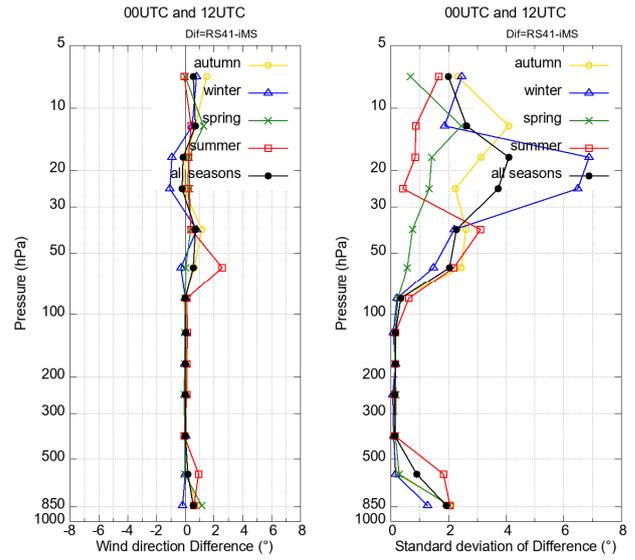


Fig. 18 Profiles of difference of mean wind direction (RS41-iMS) and standard deviations at 00 and 12 UTC. Colors are the same as in Fig.4.

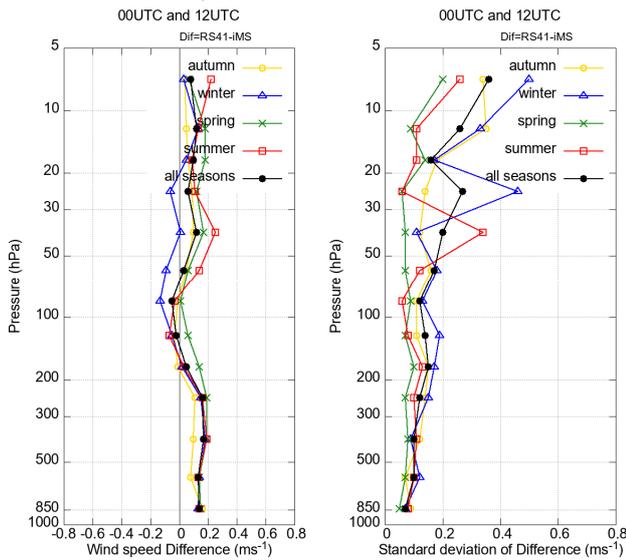


Fig. 17 Profiles of difference of mean wind speed (RS41-iMS) and standard deviations at 00 and 12 UTC. Colors are the same as in Fig.4.

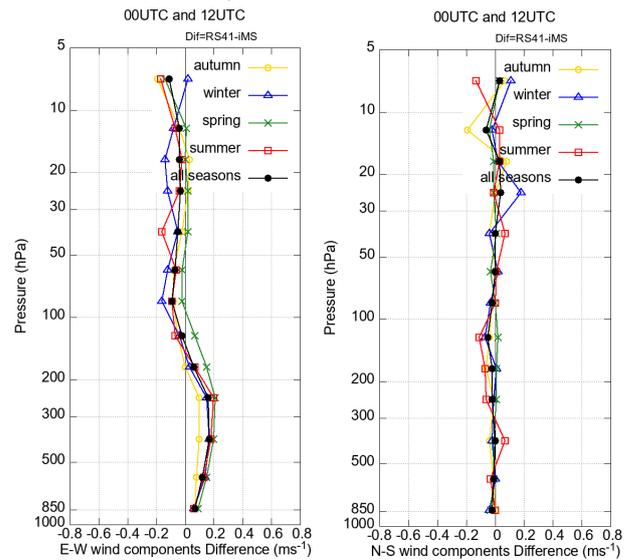


Fig. 19 Profiles of differences of mean wind component (RS41-iMS) at 00 UTC and 12UTC. E-W component (left) and N-S component (right). Colors are the same as in Fig.4.

ては観測時刻に依存した特徴が見られないためここでは日中と夜間の観測値を合わせた平均値を示した。Fig.16の風速の層別平均値では、200hPa付近で各季節とも強風層にあり、特に冬季に強く70m/sを超える。1000~700hPaと50hPaより上層では風速は弱く、どの季節も平均風速は20m/sを超えない。風向の層別平均値では、700~70hPaにおいて全季節西風であるが、30hPaより上層では季節による違いが見られ夏季に東風、冬季は南西~南東風、春季

と秋季は南風の特徴が見られた。風速差(Fig.17)は冬の100~20hPa、夏の150~100hPaでRS41の風速がiMSより小さいが、その他の気圧層ではRS41の風速がiMSよりやや大きい特徴が見られた。全平均の風速差は±0.2m/sの範囲である。標準偏差は風速が弱まる50hPaより上層で大きい。春は他の季節に比べて小さい傾向がある。風向差(Fig.18)は700~100hPaでは概ね±1°の範囲で十分小さく、

それより上層でも±3°の範囲であった。標準偏差は風速の弱い 1000~700hPa と 70hPa より上層で大きい特徴があった。Fig.19 に風の東西成分、南北成分の差を季節毎に集計した層別平均値を示す。東西成分の差は 50hPa より下層では Fig.17 の風速差と同様の特徴が見られる。冬季は 100hPa より上層で他の季節に比べて差が大きい傾向があるが、±0.2m/s の範囲である。南北成分は東西成分に比べて差が小さく、全平均で±0.1m/s 以内である。

### 5. 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 hPa)の観測データについて比較を行った。ここで、本報告での比較観測では 5hPa の気圧面データはサンプル数が少ないため解析対象としなかった。解析に使用したデータは、4.4 の同時刻における比較で使用した 58 回分の観測データである。また、相対湿度については気象庁の規定により、定常観測の指定気圧面データは気温が最初に-40℃を下回った気圧面より上層での相対湿度観測値を使用しないため、本報告でも地上から-40℃までのデータを解析に使用した。

#### 5.1 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した。L 番目の観測

における RS41 と iMS の各指定気圧面の観測値をそれぞれ  $T_L^N$ ,  $T_L^O$  とし、各指定気圧面の合計した観測回数を M, その順番を L=1, 2, ..., M とし、以下の式によって各種統計量を算出した。ただし、差は同時刻におけるデータ比較と同じく RS41 の観測値から iMS の観測値を引いた値 ( $\Delta T_L = T_L^N - T_L^O$ ) である。

$$\text{RS41 の平均値} : \overline{T^N} = \frac{\sum_{L=1}^M T_L^N}{M} \quad (8)$$

$$\text{iMS の平均値} : \overline{T^O} = \frac{\sum_{L=1}^M T_L^O}{M} \quad (9)$$

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

各指定気圧面の差の標準偏差：

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

#### 5.2 解析結果

解析に使用した気温の観測データは、各季節とも 10 hPa 面まで取得している。相対湿度については、春季の 00UTC は 350hPa 面まで、その他の季節は 300hPa 面までデータを

Table 5 Mean differences (RS41-iMS) and standard deviations (SD) of temperature at standard pressure levels during daytime (00 UTC) measurements.

| Pressure level (hPa) | Temperature differences and standard deviations (SD) during daytime measurements (K) |      |            |      |            |      |            |      |             |      |
|----------------------|--|------|------------|------|------------|------|------------|------|-------------|------|
|                      | Autumn   |      | Winter     |      | Spring     |      | Summer     |      | All seasons |      |
|                      | Difference   | SD   | Difference | SD   | Difference | SD   | Difference | SD   | Difference  | SD   |
| 10                   | 0.10   | 0.44 | -0.34      | 0.21 | -0.31      | 0.29 | 0.06       | 0.20 | -0.16       | 0.36 |
| 15                   | 0.26   | 0.20 | -0.27      | 0.25 | -0.27      | 0.16 | -0.06      | 0.16 | -0.12       | 0.29 |
| 20                   | 0.10   | 0.17 | -0.24      | 0.22 | -0.10      | 0.20 | 0.02       | 0.23 | -0.08       | 0.24 |
| 30                   | 0.20   | 0.19 | -0.21      | 0.15 | -0.08      | 0.18 | 0.08       | 0.17 | -0.03       | 0.23 |
| 40                   | 0.34   | 0.22 | -0.11      | 0.26 | -0.04      | 0.21 | 0.14       | 0.23 | 0.05        | 0.29 |
| 50                   | 0.18   | 0.15 | -0.11      | 0.33 | -0.05      | 0.16 | 0.14       | 0.19 | 0.01        | 0.26 |
| 70                   | 0.36   | 0.24 | -0.04      | 0.49 | 0.09       | 0.16 | 0.14       | 0.17 | 0.10        | 0.35 |
| 100                  | 0.32   | 0.10 | 0.07       | 0.22 | -0.01      | 0.18 | 0.20       | 0.21 | 0.11        | 0.23 |
| 125                  | 0.36   | 0.14 | 0.12       | 0.24 | 0.04       | 0.19 | 0.10       | 0.26 | 0.14        | 0.24 |
| 150                  | 0.26   | 0.14 | 0.08       | 0.18 | 0.15       | 0.15 | 0.12       | 0.17 | 0.14        | 0.17 |
| 175                  | 0.14   | 0.16 | 0.05       | 0.08 | 0.15       | 0.12 | -0.12      | 0.37 | 0.06        | 0.21 |
| 200                  | 0.14   | 0.21 | 0.05       | 0.11 | 0.11       | 0.15 | 0.14       | 0.19 | 0.10        | 0.16 |
| 250                  | 0.18   | 0.12 | 0.10       | 0.13 | 0.20       | 0.11 | 0.12       | 0.15 | 0.15        | 0.13 |
| 300                  | 0.22   | 0.12 | 0.03       | 0.14 | 0.07       | 0.08 | 0.12       | 0.07 | 0.09        | 0.13 |
| 350                  | 0.18   | 0.07 | 0.09       | 0.10 | 0.18       | 0.11 | 0.20       | 0.13 | 0.15        | 0.11 |
| 400                  | 0.18   | 0.10 | 0.04       | 0.11 | 0.09       | 0.12 | 0.10       | 0.06 | 0.09        | 0.11 |
| 500                  | 0.20   | 0.06 | 0.07       | 0.12 | 0.11       | 0.06 | 0.10       | 0.20 | 0.11        | 0.13 |
| 600                  | 0.20   | 0.11 | 0.05       | 0.10 | 0.05       | 0.21 | -0.02      | 0.04 | 0.06        | 0.15 |
| 700                  | 0.10   | 0.09 | 0.01       | 0.09 | 0.02       | 0.07 | -0.06      | 0.17 | 0.02        | 0.12 |
| 800                  | 0.12   | 0.13 | 0.04       | 0.07 | 0.00       | 0.07 | 0.02       | 0.10 | 0.04        | 0.10 |
| 850                  | 0.04   | 0.10 | -0.02      | 0.09 | -0.09      | 0.08 | -0.02      | 0.04 | -0.03       | 0.09 |
| 900                  | 0.02   | 0.12 | -0.03      | 0.06 | -0.04      | 0.07 | -0.04      | 0.05 | -0.02       | 0.08 |
| 925                  | -0.02  | 0.10 | -0.03      | 0.10 | -0.10      | 0.07 | -0.08      | 0.07 | -0.06       | 0.09 |
| 1000                 | -0.04  | 0.14 | -0.14      | 0.16 | -0.04      | 0.07 | -0.02      | 0.13 | -0.07       | 0.14 |

Table 6 Mean differences (RS41-iMS) and standard deviations (SD) of temperature at standard pressure levels during nighttime (12 UTC) measurements.

| Pressure level (hPa) | Temperature differences and standard deviations (SD) during nighttime measurements (K) |      |            |      |            |      |            |      |             |      |
|----------------------|--|------|------------|------|------------|------|------------|------|-------------|------|
|                      | Autumn   |      | Winter     |      | Spring     |      | Summer     |      | All seasons |      |
|                      | Difference   | SD   | Difference | SD   | Difference | SD   | Difference | SD   | Difference  | SD   |
| 10                   | 0.18   | 0.13 | 0.17       | 0.07 | 0.20       | 0.16 | 0.22       | 0.18 | 0.19        | 0.12 |
| 15                   | 0.07   | 0.07 | 0.01       | 0.10 | -0.07      | 0.20 | 0.07       | 0.14 | 0.02        | 0.13 |
| 20                   | 0.01   | 0.11 | 0.01       | 0.06 | -0.08      | 0.11 | 0.00       | 0.17 | -0.01       | 0.10 |
| 30                   | 0.01   | 0.11 | -0.07      | 0.14 | -0.07      | 0.11 | 0.03       | 0.13 | -0.03       | 0.12 |
| 40                   | 0.01   | 0.18 | -0.13      | 0.17 | 0.01       | 0.11 | 0.12       | 0.24 | 0.00        | 0.20 |
| 50                   | 0.00   | 0.11 | -0.01      | 0.10 | -0.06      | 0.12 | 0.02       | 0.23 | -0.01       | 0.15 |
| 70                   | 0.06   | 0.19 | 0.06       | 0.13 | -0.01      | 0.20 | 0.00       | 0.33 | 0.03        | 0.24 |
| 100                  | 0.17   | 0.17 | 0.04       | 0.13 | 0.03       | 0.10 | 0.03       | 0.27 | 0.07        | 0.19 |
| 125                  | 0.06   | 0.19 | -0.14      | 0.22 | -0.06      | 0.12 | -0.08      | 0.29 | -0.06       | 0.22 |
| 150                  | 0.04   | 0.14 | 0.00       | 0.14 | -0.01      | 0.11 | -0.02      | 0.24 | 0.00        | 0.17 |
| 175                  | 0.04   | 0.14 | -0.03      | 0.08 | -0.07      | 0.07 | 0.02       | 0.28 | -0.01       | 0.13 |
| 200                  | 0.03   | 0.14 | -0.08      | 0.06 | -0.24      | 0.64 | -0.02      | 0.17 | -0.08       | 0.34 |
| 250                  | 0.05   | 0.17 | -0.04      | 0.14 | -0.01      | 0.08 | 0.02       | 0.13 | 0.00        | 0.13 |
| 300                  | -0.03  | 0.12 | -0.02      | 0.08 | -0.04      | 0.07 | 0.00       | 0.12 | -0.02       | 0.10 |
| 350                  | 0.00   | 0.09 | -0.01      | 0.07 | -0.03      | 0.07 | 0.00       | 0.19 | -0.01       | 0.11 |
| 400                  | 0.04   | 0.14 | 0.00       | 0.07 | -0.01      | 0.08 | 0.07       | 0.07 | 0.02        | 0.10 |
| 500                  | 0.00   | 0.10 | -0.03      | 0.07 | 0.19       | 0.42 | 0.05       | 0.21 | 0.04        | 0.25 |
| 600                  | 0.04   | 0.05 | -0.08      | 0.06 | -0.04      | 0.13 | 0.05       | 0.10 | -0.01       | 0.11 |
| 700                  | 0.06   | 0.21 | -0.02      | 0.09 | -0.01      | 0.12 | 0.05       | 0.15 | 0.02        | 0.15 |
| 800                  | 0.00   | 0.07 | -0.06      | 0.13 | -0.06      | 0.05 | 0.07       | 0.09 | -0.02       | 0.10 |
| 850                  | 0.04   | 0.05 | 0.02       | 0.08 | 0.00       | 0.05 | -0.02      | 0.06 | 0.01        | 0.07 |
| 900                  | 0.00   | 0.12 | -0.03      | 0.07 | -0.04      | 0.12 | -0.02      | 0.11 | -0.02       | 0.11 |
| 925                  | 0.01   | 0.06 | -0.04      | 0.07 | -0.04      | 0.09 | -0.03      | 0.07 | -0.03       | 0.07 |
| 1000                 | -0.07  | 0.15 | -0.12      | 0.11 | -0.09      | 0.06 | -0.08      | 0.13 | -0.09       | 0.12 |

Table 7 Mean differences (RS41-iMS) and standard deviations (SD) of relative humidity at standard pressure levels during daytime (00 UTC) measurements.

| Pressure level (hPa) | Relative humidity differences and standard deviations (SD) during daytime measurements (%RH) |      |            |      |            |      |            |      |             |      |
|----------------------|--|------|------------|------|------------|------|------------|------|-------------|------|
|                      | Autumn   |      | Winter     |      | Spring     |      | Summer     |      | All seasons |      |
|                      | Difference   | SD   | Difference | SD   | Difference | SD   | Difference | SD   | Difference  | SD   |
| 300                  | -3.25  | 0.83 | -2.00      | 1.00 |            |      | -1.40      | 1.85 | -2.17       | 1.57 |
| 350                  | -1.40  | 1.85 | -2.00      | 1.07 | -1.60      | 1.62 | 0.00       | 2.61 | -1.32       | 1.96 |
| 400                  | -0.60  | 2.06 | -2.00      | 1.33 | -0.50      | 2.18 | 0.40       | 2.33 | -0.85       | 2.14 |
| 500                  | 3.40   | 2.42 | 0.22       | 2.62 | 1.75       | 2.95 | 1.60       | 3.88 | 1.52        | 3.15 |
| 600                  | 1.40   | 3.38 | 0.44       | 2.87 | 1.00       | 2.12 | 2.20       | 2.99 | 1.11        | 2.87 |
| 700                  | 1.00   | 2.10 | 2.56       | 4.14 | 1.00       | 3.67 | 4.00       | 3.58 | 2.07        | 3.77 |
| 800                  | 4.60   | 3.38 | 4.44       | 1.77 | 0.88       | 2.42 | 5.40       | 4.22 | 3.59        | 3.38 |
| 850                  | 3.80   | 3.06 | 4.22       | 2.86 | 2.50       | 1.94 | 6.00       | 1.41 | 3.96        | 2.71 |
| 900                  | 3.80   | 2.64 | 3.44       | 2.63 | 4.38       | 2.55 | 7.00       | 2.28 | 4.44        | 2.85 |
| 925                  | 3.20   | 2.79 | 3.44       | 2.22 | 5.62       | 2.69 | 6.60       | 0.49 | 4.63        | 2.67 |
| 1000                 | 6.60   | 2.06 | 0.11       | 4.77 | 7.25       | 5.31 | 8.60       | 1.85 | 5.00        | 5.45 |

Table 8 Mean differences (RS41-iMS) and standard deviations (SD) of relative humidity at standard pressure levels during nighttime (12 UTC) measurements.

| Pressure level (hPa) | Relative humidity differences and standard deviations (SD) during nighttime measurements (%RH) |      |            |      |            |      |            |      |             |      |
|----------------------|--|------|------------|------|------------|------|------------|------|-------------|------|
|                      | Autumn   |      | Winter     |      | Spring     |      | Summer     |      | All seasons |      |
|                      | Difference   | SD   | Difference | SD   | Difference | SD   | Difference | SD   | Difference  | SD   |
| 300                  | -1.20  | 2.93 | -2.00      | 0.00 | -0.50      | 3.50 | -2.50      | 1.66 | -1.62       | 2.56 |
| 350                  | -0.75  | 1.71 | -1.20      | 1.17 | -1.60      | 5.57 | -0.75      | 1.30 | -1.05       | 2.98 |
| 400                  | 1.75   | 6.30 | -0.75      | 2.90 | -3.00      | 3.34 | 0.00       | 1.00 | -0.48       | 4.52 |
| 500                  | 0.00   | 1.66 | -0.78      | 1.93 | -0.86      | 2.42 | 0.75       | 2.17 | -0.36       | 2.11 |
| 600                  | -1.38  | 2.69 | -0.89      | 1.91 | -1.00      | 1.31 | -1.25      | 3.03 | -1.11       | 2.24 |
| 700                  | -0.62  | 3.28 | 1.00       | 2.26 | -0.71      | 3.49 | 0.75       | 1.30 | 0.07        | 2.94 |
| 800                  | 0.00   | 2.92 | 0.22       | 2.62 | 0.71       | 3.10 | 0.00       | 1.87 | 0.25        | 2.76 |
| 850                  | 0.88   | 2.15 | 1.00       | 2.54 | 2.14       | 2.42 | 0.25       | 1.79 | 1.14        | 2.39 |
| 900                  | 1.00   | 2.24 | 1.56       | 1.95 | 1.71       | 2.71 | 1.25       | 1.09 | 1.39        | 2.18 |
| 925                  | 1.25   | 1.79 | 1.78       | 1.62 | 2.14       | 2.59 | 2.25       | 0.83 | 1.79        | 1.92 |
| 1000                 | -2.88  | 3.89 | -8.44      | 5.08 | 0.43       | 2.92 | -3.25      | 3.56 | -3.89       | 5.31 |

取得した。Table 5～Table 10 には、季節毎に集計した各指定気圧面における気温・相対湿度・ジオポテンシャル高度の観測値の差と差の標準偏差を示す。風向と風速については季節に依存した明瞭な特徴はみられなかったため、全季節で集計した観測値の差と差の標準偏差を Table 11 に示す。

**5. 2. 1 指定気圧面における気温観測値の比較**

気温差(Table 5, Table 6)については、日中(00UTC)は秋に RS41 が iMS より高く、冬は 70hPa より上空で RS41 が iMS より低い傾向があり、同時刻における比較結果と同様の特徴が見られた。全平均では±0.2K の範囲であった。夜間(12UTC)の観測では 10hPa を除いて日中に比べて差が小さく、全平均では±0.1K の範囲であった。気温差の標準偏差は 200hPa より上層では大きく、最大で 0.6K(12UTC, Spring, 200hPa)である。

**5. 2. 2 指定気圧面における相対湿度観測値の比較**

相対湿度差(Table 7, Table 8)については、日中は夏の 800hPa より下層で差が 5%RH 以上で大きい、全平均では±5%RH の範囲である。各季節とも 500hPa より上層で RS41 が iMS より低い傾向は同時刻における比較結果と同じである。夜間は 1000hPa を除いて日中に比べて差が小さいが、標準偏差は 500hPa より上層で大きい。1000hPa の相対湿度差は日中と夜間で特徴が異なり、日中は冬を除き RS41 が iMS より 5%RH を超える高湿で、夜間は逆に RS41

が低湿であった。同時刻における観測値の比較では確認できなかった特徴である。

**5. 2. 3 指定気圧面におけるジオポテンシャル高度観測値の比較**

ジオポテンシャル高度差(Table 9, Table 10)については、日中の観測では RS41 が iMS より高度が高く、特に秋に差が大きい。10hPa を除けば、差は全平均で±30m の範囲、標準偏差は 20m 以下であり、測器変更による影響の大きさは WMO の CIMO Guide (WMO (2018)) で高層気象観測に要求されている精度(Optimum uncertainty requirement で高度 16km より上層では 40m)の範囲内である。同時刻における比較結果(Fig.14, Fig.15)と比べると、30hPa より下層では指定気圧面における差の方が小さい。気圧の値はそれぞれのゾンデにおいて観測されたジオポテンシャル高度、気温、相対湿度の値から静力学方程式により算出しているため(Kizu *et al.* : 2018)、これらの要素の値に差が生じることによって指定気圧面データを取得する高度にもゾンデ間でずれが生じることになる。

**5. 2. 4 指定気圧面における風観測値の比較**

指定気圧面における風速と風向の観測値の差(Table 11)については、風速差は夜間の 1000hPa を除けば±0.5m/s の範囲である。風向差は日中の 10hPa と夜間の 1000hPa を除けば±3°の範囲である。風向差の標準偏差は風速が小さ

Table 9 Mean differences (RS41-iMS) and standard deviations (SD) of geopotential heights at standard pressure levels during daytime (00 UTC) measurements.

| Pressure level (hPa) | Geopotential height differences and standard deviations (SD) during daytime measurements (m) |      |            |      |            |      |            |      |             |      |
|----------------------|--|------|------------|------|------------|------|------------|------|-------------|------|
|                      | Autumn   |      | Winter     |      | Spring     |      | Summer     |      | All seasons |      |
|                      | Difference   | SD   | Difference | SD   | Difference | SD   | Difference | SD   | Difference  | SD   |
| 10                   | 60.6   | 12.8 | 25.1       | 13.4 | 27.3       | 13.9 | 39.4       | 20.5 | 36.1        | 20.4 |
| 15                   | 48.2   | 13.2 | 18.9       | 10.8 | 16.4       | 11.4 | 29.2       | 18.4 | 26.4        | 18.0 |
| 20                   | 41.4   | 10.9 | 14.9       | 9.8  | 15.4       | 10.8 | 23.4       | 17.2 | 22.0        | 15.8 |
| 30                   | 34.6   | 7.8  | 13.4       | 9.3  | 10.6       | 11.7 | 17.4       | 17.8 | 17.6        | 14.9 |
| 40                   | 28.6   | 7.2  | 10.6       | 8.3  | 8.4        | 10.0 | 11.6       | 12.6 | 13.6        | 12.2 |
| 50                   | 22.6   | 3.9  | 9.8        | 7.5  | 8.0        | 8.0  | 9.6        | 11.7 | 11.7        | 9.8  |
| 70                   | 22.2   | 3.6  | 8.0        | 8.3  | 4.0        | 7.8  | 5.2        | 11.0 | 8.9         | 10.4 |
| 100                  | 15.0   | 4.3  | 7.4        | 6.8  | 2.4        | 8.1  | 4.2        | 10.1 | 6.7         | 8.8  |
| 125                  | 12.6   | 2.6  | 8.0        | 7.0  | 2.8        | 7.8  | 2.2        | 8.7  | 6.2         | 8.0  |
| 150                  | 12.8   | 3.8  | 7.3        | 5.6  | 1.1        | 6.3  | -0.2       | 8.2  | 5.1         | 7.8  |
| 175                  | 10.6   | 3.1  | 6.5        | 5.3  | 1.8        | 6.7  | 1.0        | 6.5  | 4.9         | 6.7  |
| 200                  | 11.2   | 2.1  | 6.1        | 4.8  | 0.6        | 4.9  | 0.2        | 7.0  | 4.4         | 6.4  |
| 250                  | 8.8  | 2.2  | 5.5        | 4.7  | 1.9        | 5.1  | -0.4       | 7.1  | 4.0         | 5.9  |
| 300                  | 7.0  | 3.7  | 6.4        | 5.1  | 1.8        | 5.8  | -2.0       | 7.7  | 3.7         | 6.6  |
| 350                  | 8.2  | 2.7  | 3.7        | 4.7  | 1.0        | 4.9  | -2.2       | 7.2  | 2.7         | 6.0  |
| 400                  | 6.2  | 2.5  | 3.8        | 4.9  | 0.6        | 5.0  | -1.4       | 8.7  | 2.4         | 6.1  |
| 500                  | 2.8  | 2.5  | 2.1        | 4.8  | -1.1       | 4.1  | -1.4       | 7.1  | 0.7         | 5.1  |
| 600                  | 1.6  | 2.2  | 0.7        | 5.0  | -0.5       | 4.2  | -1.2       | 7.4  | 0.2         | 5.0  |
| 700                  | 1.0  | 3.0  | 0.0        | 4.5  | 0.0        | 3.7  | 1.4        | 4.7  | 0.4         | 4.1  |
| 800                  | 0.2  | 1.2  | -0.5       | 3.6  | 0.1        | 3.1  | -1.4       | 3.1  | -0.4        | 3.1  |
| 850                  | -0.2   | 2.3  | 0.1        | 3.1  | 0.6        | 2.4  | -1.8       | 2.8  | -0.1        | 2.9  |
| 900                  | 0.4  | 1.9  | -0.5       | 2.2  | 0.0        | 1.4  | -0.6       | 1.6  | -0.2        | 1.9  |
| 925                  | 0.2  | 1.6  | -0.3       | 1.7  | -0.1       | 1.6  | -0.4       | 1.0  | -0.2        | 1.6  |
| 1000                 | 0.2  | 0.4  | 0.1        | 0.3  | 0.1        | 0.6  | 0.0        | 0.6  | 0.1         | 0.5  |

Table 10 Mean differences (RS41-iMS) and standard deviations (SD) of geopotential heights at standard pressure levels during nighttime (12 UTC) measurements.

| Pressure level (hPa) | Geopotential height differences and standard deviations (SD) during nighttime measurements (m) |      |            |      |            |      |            |      |             |      |
|----------------------|--|------|------------|------|------------|------|------------|------|-------------|------|
|                      | Autumn   |      | Winter     |      | Spring     |      | Summer     |      | All seasons |      |
|                      | Difference   | SD   | Difference | SD   | Difference | SD   | Difference | SD   | Difference  | SD   |
| 10                   | 38.8   | 12.7 | 29.1       | 12.6 | 18.8       | 13.0 | 27.3       | 15.8 | 28.2        | 15.1 |
| 15                   | 25.2   | 10.9 | 17.7       | 7.4  | 7.2        | 12.9 | 16.0       | 15.5 | 16.6        | 13.3 |
| 20                   | 18.3   | 10.5 | 11.9       | 7.6  | 5.0        | 12.1 | 11.3       | 12.3 | 11.9        | 11.6 |
| 30                   | 12.5   | 10.0 | 6.9        | 5.2  | 1.2        | 10.6 | 6.3        | 12.3 | 7.2         | 10.4 |
| 40                   | 7.3  | 13.0 | 5.1        | 4.1  | -1.6       | 9.7  | 7.8        | 10.6 | 4.5         | 10.6 |
| 50                   | 4.4  | 11.7 | 3.6        | 5.8  | -2.6       | 8.1  | 1.8        | 14.3 | 1.9         | 10.7 |
| 70                   | 1.3  | 12.2 | 5.0        | 7.5  | -4.3       | 5.3  | -1.2       | 10.5 | 0.6         | 9.9  |
| 100                  | -2.0   | 8.7  | 3.0        | 5.0  | -4.4       | 5.6  | -2.0       | 10.0 | -1.1        | 8.0  |
| 125                  | -1.5   | 10.3 | 2.0        | 5.8  | -3.0       | 6.9  | -2.2       | 8.0  | -0.9        | 8.2  |
| 150                  | -2.0   | 10.2 | 2.2        | 6.1  | -2.1       | 5.6  | -1.2       | 6.4  | -0.6        | 7.6  |
| 175                  | -1.3   | 10.0 | 0.6        | 6.2  | -3.4       | 5.5  | -1.5       | 5.9  | -1.3        | 7.4  |
| 200                  | -1.0   | 9.6  | 0.3        | 6.5  | -3.3       | 5.9  | -1.0       | 6.2  | -1.1        | 7.4  |
| 250                  | -1.4   | 8.3  | 1.4        | 7.4  | -1.3       | 5.2  | -1.7       | 5.8  | -0.6        | 7.0  |
| 300                  | -1.5   | 8.3  | 1.3        | 6.7  | 0.1        | 5.7  | 1.8        | 6.4  | 0.4         | 7.0  |
| 350                  | -1.0   | 6.4  | -0.1       | 6.7  | -1.4       | 6.3  | 3.2        | 6.3  | 0.0         | 6.7  |
| 400                  | -1.0   | 6.3  | 0.8        | 6.5  | -1.6       | 4.9  | 1.7        | 6.2  | -0.1        | 6.2  |
| 500                  | -0.1   | 5.9  | -0.7       | 6.6  | -0.4       | 4.8  | 2.0        | 5.0  | 0.1         | 5.8  |
| 600                  | -0.6   | 5.7  | 0.1        | 5.0  | -0.7       | 5.5  | 0.8        | 4.2  | -0.1        | 5.2  |
| 700                  | -1.0   | 5.2  | -0.6       | 5.7  | 0.7        | 3.1  | 1.0        | 2.7  | -0.1        | 4.6  |
| 800                  | 0.0  | 3.4  | 0.4        | 3.5  | -0.4       | 3.4  | 0.3        | 2.0  | 0.1         | 3.2  |
| 850                  | 0.1  | 2.0  | 0.6        | 2.8  | -0.4       | 2.3  | 1.7        | 2.0  | 0.4         | 2.4  |
| 900                  | 0.5  | 2.0  | -0.1       | 1.5  | -0.6       | 1.5  | 1.3        | 0.9  | 0.2         | 1.7  |
| 925                  | -0.4   | 1.2  | -0.2       | 1.6  | -0.3       | 1.0  | 0.7        | 0.8  | -0.1        | 1.3  |
| 1000                 | -0.6   | 0.7  | -0.1       | 0.3  | 0.0        | 0.9  | 0.0        | 0.8  | -0.2        | 0.8  |

Table 11 Mean differences (RS41-iMS) and standard deviations (SD) of wind speeds and wind directions at standard pressure levels in all seasons.

| Pressure level (hPa) | Wind speed and wind direction differences and standard deviations (SD) |      |                    |      |                    |       |                    |       |
|----------------------|--|------|--------------------|------|--------------------|-------|--------------------|-------|
|                      | Wind speed (ms <sup>-1</sup> )   |      |                    |      | Wind direction (°) |       |                    |       |
|                      | Daytime (00 UTC)   |      | Nighttime (12 UTC) |      | Daytime (00 UTC)   |       | Nighttime (12 UTC) |       |
|                      | Difference   | SD   | Difference         | SD   | Difference         | SD    | Difference         | SD    |
| 10                   | 0.21   | 1.53 | 0.14               | 0.76 | 8.46               | 31.49 | -1.32              | 4.73  |
| 15                   | 0.29   | 0.89 | 0.00               | 0.72 | -1.79              | 6.01  | -2.87              | 10.22 |
| 20                   | -0.08  | 0.84 | 0.17               | 0.69 | -1.52              | 18.33 | -1.04              | 9.11  |
| 30                   | 0.00   | 0.63 | -0.12              | 0.65 | 0.44               | 6.16  | 2.72               | 8.70  |
| 40                   | -0.04  | 0.98 | 0.19               | 0.67 | 0.04               | 7.35  | -2.93              | 10.06 |
| 50                   | 0.12   | 0.75 | 0.14               | 0.87 | 0.12               | 5.73  | -0.70              | 5.56  |
| 70                   | -0.11  | 0.57 | -0.07              | 0.68 | -0.48              | 4.13  | 1.33               | 6.45  |
| 100                  | 0.11   | 0.68 | 0.03               | 0.75 | -0.26              | 1.24  | -0.30              | 1.59  |
| 125                  | 0.26   | 0.64 | 0.10               | 0.65 | 0.04               | 0.58  | 0.13               | 1.31  |
| 150                  | 0.11   | 0.74 | 0.43               | 0.99 | 0.33               | 1.12  | 0.03               | 0.75  |
| 175                  | 0.11   | 0.56 | 0.07               | 0.51 | 0.18               | 0.66  | -0.10              | 0.70  |
| 200                  | 0.25   | 0.63 | -0.10              | 0.60 | 0.00               | 0.65  | 0.00               | 0.86  |
| 250                  | 0.04   | 0.78 | 0.20               | 0.65 | 0.11               | 0.62  | 0.13               | 0.76  |
| 300                  | 0.18   | 0.80 | -0.03              | 0.55 | 0.14               | 0.69  | -0.10              | 0.94  |
| 350                  | 0.14   | 0.52 | 0.00               | 0.58 | -0.04              | 0.87  | 0.07               | 0.89  |
| 400                  | 0.07   | 0.65 | -0.03              | 0.55 | 0.36               | 0.72  | -0.07              | 1.00  |
| 500                  | -0.07  | 0.80 | 0.03               | 0.60 | 0.46               | 1.32  | 0.33               | 1.07  |
| 600                  | -0.11  | 0.62 | 0.07               | 0.63 | 0.07               | 1.85  | 0.10               | 2.10  |
| 700                  | 0.04   | 0.68 | 0.07               | 0.51 | 0.32               | 3.45  | -0.07              | 2.82  |
| 800                  | -0.11  | 0.41 | 0.13               | 0.43 | 0.32               | 4.01  | -0.27              | 3.76  |
| 850                  | 0.07   | 0.59 | -0.03              | 0.55 | 0.89               | 4.35  | -0.17              | 8.14  |
| 900                  | 0.07   | 0.59 | 0.00               | 0.73 | -1.78              | 6.52  | -0.67              | 6.59  |
| 925                  | 0.11   | 0.56 | -0.07              | 0.63 | 0.43               | 2.76  | 0.37               | 6.20  |
| 1000                 | 0.48   | 0.88 | 0.79               | 0.72 | 2.24               | 12.93 | -3.14              | 8.75  |

い 700hPa より下層と 70hPa より上層で大きく、同時刻における比較と同じ特徴がある。

## 6. GRUAN データプロダクトとの比較

同時刻における比較結果について、RS41 と iMS の

GRUAN データプロダクト(以下、GDP という)を使用して同様に解析した結果と本調査での解析結果の比較を行った。GDP ではゾンデの製造元が提供するデータ処理プログラムとは独立した処理を行っており、その手法はテクニカルドキュメント等で公開されている(von Rohden *et al.* :

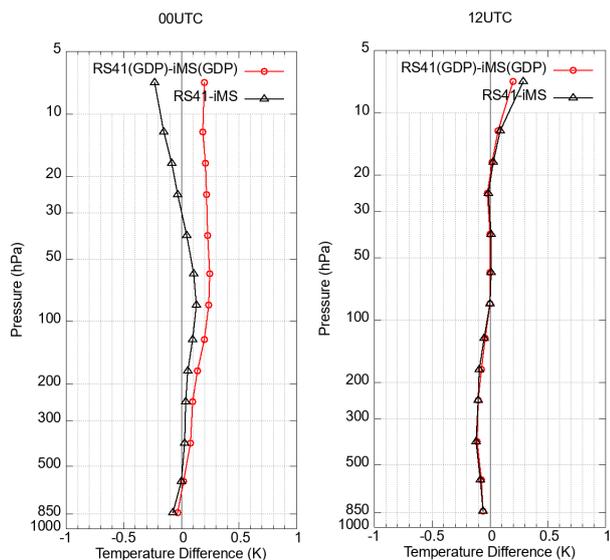


Fig. 20 Profiles of mean temperature differences from routine data (RS41-iMS) and GDP (RS41(GDP)-iMS(GDP)) at 00 UTC and 12UTC.  
Red : RS41(GDP)-iMS(GDP), black : RS41-iMS.

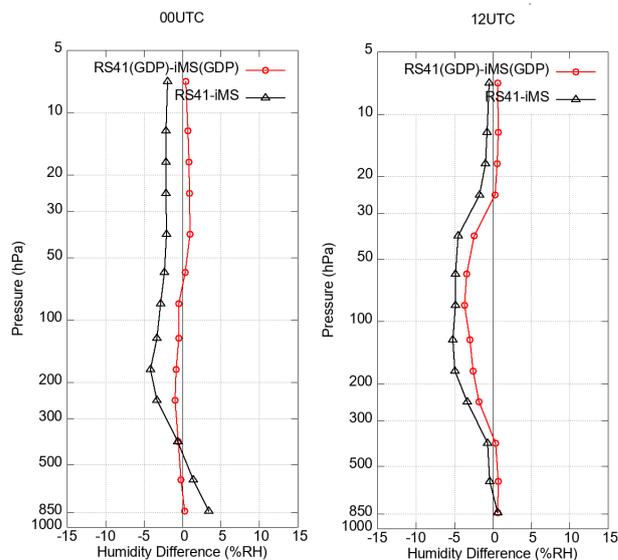


Fig. 22 Profiles of mean humidity differences from routine data (RS41-iMS) and GDP (RS41(GDP)-iMS(GDP)) at 00 UTC and 12UTC.  
Colors are the same as in Fig.20.

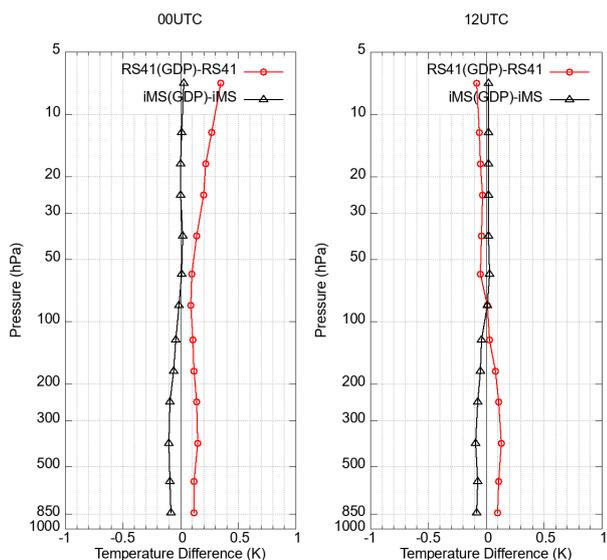


Fig. 21 Profiles of mean temperature GDP-routine data differences (RS41(GDP)-RS41 and iMS(GDP)-iMS) at 00 UTC and 12UTC.  
Red : RS41(GDP)-RS41, black : iMS(GDP)-iMS.

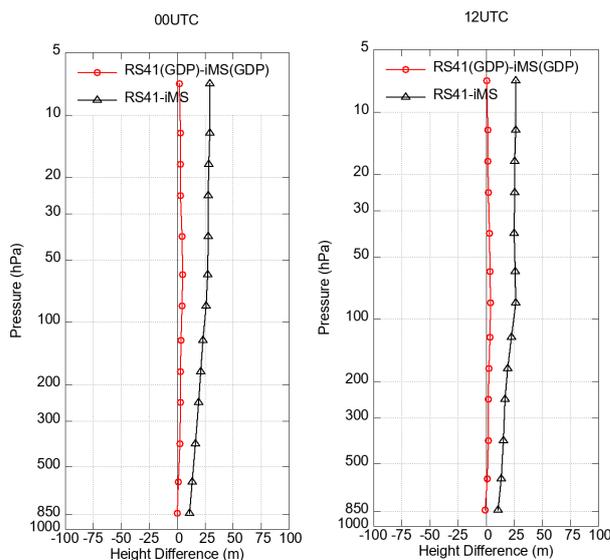


Fig. 23 Profiles of mean geopotential height differences from routine data (RS41-iMS) and GDP (RS41(GDP)-iMS(GDP)) at 00 UTC and 12UTC.  
Colors are the same as in Fig.20.

2022, 星野ほか : 2016, Kizu *et al.* : 2018, Hoshino *et al.* : 2021).

全季節平均した気温差について GDP 同士と定常観測データ同士(Fig.5, Fig.6)を比較した結果を Fig.20 に、各ゾンドの GDP と定常観測データを比較した結果を Fig.21 に示す。Fig.20 の夜間は GDP、定常観測のどちらも 100hPa よ

り下層で RS41 が iMS に比べて 0.1K 低く同じ特徴が見られるが、日中は 500hPa より上層で RS41(GDP)が iMS(GDP) に比べて高い傾向が続き、定常観測データでの比較結果と違いが見られる。Fig.21 の日中においては iMS は 100hPa より上層で GDP と定常観測データの差が小さいのに対し、RS41(GDP)は RS41 に比べて全体的に高く、10~5hPa では

0.3K 程度の差が見られる。von Rohden *et al.*(2022)によると RS41 の GDP(RS41(GDP))は Vaisala プロダクトの RS41(Vaisala の観測処理システムで出力される観測値で、気象庁の RS41-SG の定常観測データ(本稿の RS41)も同じ Vaisala プロダクトで作成されている)と比べると日中は圏界面より上空で高度とともに気温差が大きくなり、GDPの方が高度 35km で 0.35K 高いことが示されている。したがって、Fig.20 で見られる日中の気温差の違いは RS41 の GDP と定常観測データの気温補正方法の違いが要因の一つであると考えられる。ただし、iMS の GDP の気温が低い可能性もあるため、今後 iMS の GDP データにおける気温の日射補正量についても検証が必要である。

相対湿度差について同様に GDP と定常観測データ(Fig.7, Fig.8)を比較した結果を Fig.22 に示す。全体的に GDP 同士の相対湿度差が小さい傾向がある。これは、iMS の GDP においてタイムラグ補正の改善やヒステリシス補正を導入したことにより精度が改善した結果と考えられる(Hoshino *et al.* : 2021)。

ジオポテンシャル高度差について GDP と定常観測データ(Fig.14, Fig.15)を比較した結果を Fig.23 に示す。定常観測データに比べて GDP 同士では良く一致している。iMS の GDP では従来よりも細かいグリッドのジオイドモデルを採用したことが改善の要因である(Hoshino *et al.* : 2021)。

## 7. 相対湿度の比較結果についての考察

4.4 の解析結果から、夜間の平均相対湿度差は日中よりも差が大きく、夏と秋の 100~50hPa では-8%RH の差が見られた(Fig.8)。また、統計解析から除外された観測データも多くが相対湿度差が大きい事例(Table 3, Table 4)であったことから、ここでは相対湿度の観測データについて考察を行う。

Fig.24 に夜間の観測における相対湿度の比較結果の例を示す。この事例では相対湿度が急激に低下する 150hPa 付近において RS41 が iMS に比べて反応が早い特性が見られた。これは RS41 には除氷機能が付いているため iMS よりも雲中の水滴や氷の影響を受けにくいために、雲を通過した後のふるまいに差が生じたと考えられる。

Fig.25 は相対湿度差が極端に大きいため統計解析から除外した日中の観測 6 事例について相対湿度とその差を示したものである。どの事例においても 300hPa より下層で 100%RH 近い高湿度の領域をラジオゾンデが通過しており、300hPa 付近までは RS41 と iMS の差が小さいが、200~100hPa の高度においては RS41 が高度とともに相対湿度が低下しているのに対し、iMS は相対湿度の低下が見られず、それより上空で大きな相対湿度差を生じている。

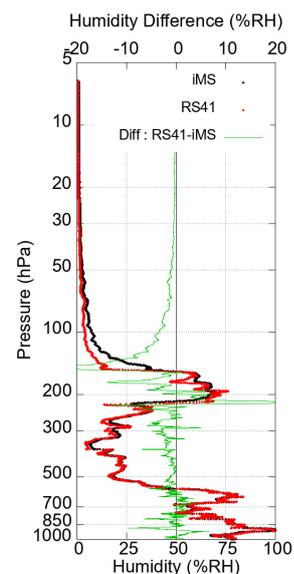


Fig. 24 Relative humidity and RS41-iMS difference of the flight at 20:30 local time on May 14, 2021.

The black and red lines show data for radiosonde iMS and RS41, respectively, and green line shows the RS41-iMS difference.

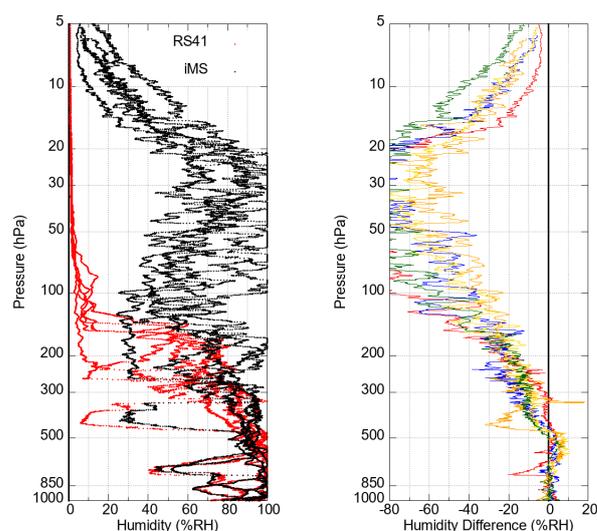


Fig. 25 Relative humidity and RS41-iMS differences from the excluded six cases at 8:30 local time.

Red : RS41, black : iMS, colored lines : RS41-iMS.

Fig.26 は、Fig.25 の統計解析から除外した観測のうち 2021/6/4 の日中の観測について、RS41 と iMS の GDP による気温、湿度センサ温度、相対湿度、露点温度を比較したものである。GDP においても Fig.25 の定常観測データでの比較と同様に大きな相対湿度差が見られた。Fig.26 の湿度センサ温度を見ると、圏界面より上層において iMS の方が RS41 に比べて周囲の温度との温度差が大きい(湿

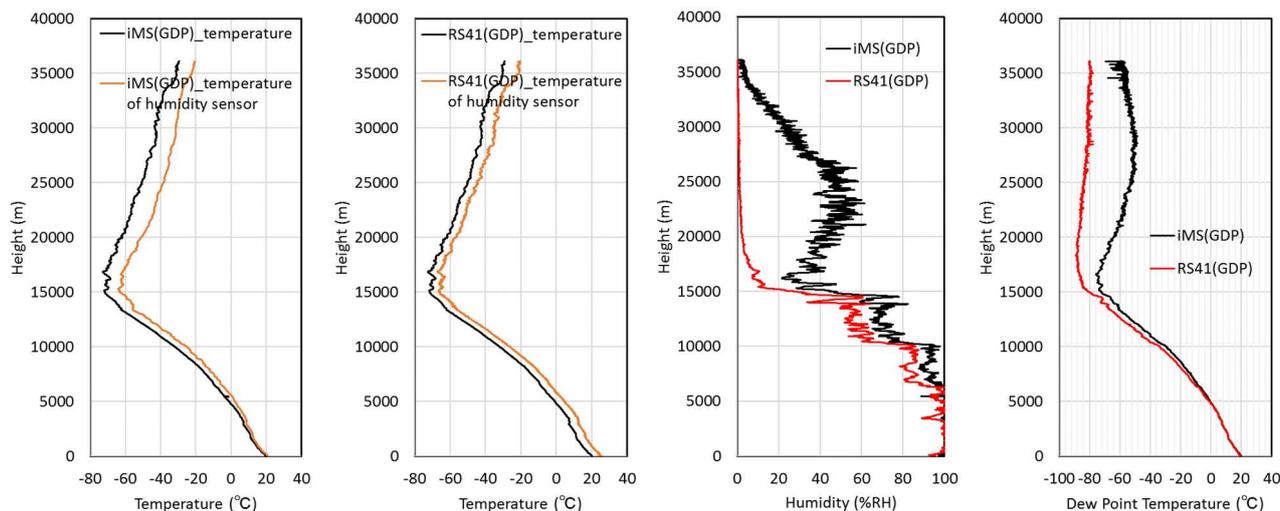


Fig. 26 Temperature, temperature of the humidity sensor, relative humidity and dew point temperature from iMS(GDP) and RS41(GDP) of the flight at 08:30 local time on June 4, 2021.

度センサ温度が高い)ことがわかる。湿度センサ温度が高い(低い)場合、相対湿度観測値においては乾燥(湿潤)バイアスの原因となるため iMS の GDP では  $T_s/T_a$  補正(Sensor versus air temperature correction) が適用されており、次の式で補正が行われる(Hoshino *et al.* : 2021)。

$$U_{fin} = U \times \frac{e(T_s)}{e(T_a)} \quad \text{式(12)}$$

ここで、 $U_{fin}$ は補正後の相対湿度(最終的に得られる相対湿度)、 $U$ は  $T_s/T_a$  補正前の相対湿度、 $T_s$ は湿度センサ温度、 $T_a$ は周囲の空気の温度、 $e(T)$ は飽和水蒸気圧を示す。したがって、何らかの影響で湿度センサ温度が高すぎる場合、補正値が過剰となり、相対湿度が高めに算出される原因となる。湿度センサの測定値に影響を与えるものとして、観測中の着氷、日射の影響や湿度センサ用の温度計の誤差などが考えられる。今回の比較観測で相対湿度差が大きいため統計解析から除外した事例は夜間も生じており、飛揚時に降水現象がある観測で見られることから、着氷の影響である可能性が高いと思われる。

## 8. まとめ

RS41 と iMS の観測データの特性の違いを評価するため、2020年7月から2022年4月にかけてRS41 と iMS の連結比較観測を行い、統計的な比較解析を行った。

同時刻におけるデータの比較では、気温差は日中の観測で $-0.2 \sim +0.1\text{K}$ 、夜間の観測で $-0.1 \sim +0.3\text{K}$ の差が見られ、相対湿度差はおおむね $\pm 5\%RH$ の範囲で、500hPaより下層ではRS41がiMSに比べて高く、500hPaより上層ではRS41が低い特徴が見られた。気圧差は1000~500hPaで1hPa程度の差、風向・風速はそれぞれ $\pm 3^\circ$ 、 $\pm 0.2\text{m/s}$ の差であっ

た。指定気圧面における比較においても同時刻における比較と同様の特徴が見られ、差の大きさも同程度であった。これらの観測値の差は、2017年に実施されたRS11G型GPSゾンデとiMS-100型GPSゾンデの比較結果(古林・星野：2018)と同程度の大きさである。

また、定常観測データとGDPの比較結果から、GDPで導入されている処理方法により、相対湿度やジオポテンシャル高度の観測精度向上が期待できる結果であった。処理方法が公開されているGDPを活用することで、より詳細な解析を行うことができる。

WMO(2018)で高層気象観測に求められている精度は気温が $0.5\text{K} \sim 1\text{K}$ 、相対湿度が対流圏で $5\%RH$ であり、観測器変更による観測値の差は定常観測に必要な精度の範囲内である。ただし、気候監視のために高層気象観測データを使用する場合は、10年に $0.1\text{K}$ のオーダーの気温変動を検出する必要があるため、 $0.2 \sim 0.3\text{K}$ の系統的な差がある場合はそれを考慮して解析を行う必要がある。また、2022年にはWMOによる高層気象観測機器の国際比較が行われる予定であり、今回比較対象としたRS41とiMSもキャンペーンに参加することになっているため、国際比較による評価に基づき、今回の比較結果を再検証することも必要である。

## 謝 辞

本報告を草するに際し、気象庁大気海洋部観測整備計画課の皆様、および観測第一課の皆様には多大なご協力を賜った。これらの方々には厚くお礼申し上げます。

## 引用文献

- Edwards D., G. Anderson, T. Oakley, P. Gault (2014) : Met Office Intercomparison of Vaisala RS92 and RS41 Radiosondes. Met Office. [https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Met\\_Office\\_Intercomparison\\_of\\_Vaisala\\_RS41\\_and\\_RS92\\_Radiosondes.pdf](https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Met_Office_Intercomparison_of_Vaisala_RS41_and_RS92_Radiosondes.pdf) (2022.6.22 閲覧)
- 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.
- 星野俊介・木津暢彦・古林絵里子(2016) : 明星電気製 RS-11G および iMS-100 ゾンデの GRUAN データプロダクト(GDP)の作成. 高層気象台彙報, **74**, 1-16.
- Hoshino S., M. Iwabuchi, T. Sugidachi, K. Shimizu, E. Kobayashi and M. Fujiwara (2021) : Technical characteristics and GRUAN data processing for the Meisei RS-11G and iMS-100 radiosondes. Tech. rep., GRUAN Lead Centre, Lindenberg, GRUAN-TD-5, version 2.0, 2021 (in review).
- 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.
- Kizu N., T. Sugidachi, E. Kobayashi, S. Hoshino, K. Shimizu, R. Maeda and M. Fujiwara (2018) : Technical characteristics and GRUAN data processing for the Meisei RS-11G and iMS-100 radiosondes. GRUAN-TD-5, Rev 1.0, GRUAN Lead Centre, DWD, 152pp.
- 古林絵里子(2015) : 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. 高層気象台彙報, **73**, 11 - 24.
- 古林絵里子・星野俊介(2018) : iMS-100 型と RS-11G 型 GPS ゾンデの比較観測による特性評価. 高層気象台彙報, **75**, 17-38.
- 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.
- Meisei (2016) : Product catalog for GPS Radiosonde iMS-100. Meisei electric co., ltd. available on, [http://www.meisei.co.jp/english/products/iMS-100\\_e.pdf](http://www.meisei.co.jp/english/products/iMS-100_e.pdf), October 2017.
- 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.
- Vaisala (2014) : Comparison of Vaisala Radiosondes RS41 and RS92. Vaisala White Paper, B211317EN-B.
- Vaisala (2017) : Vaisala Radiosonde RS41 Measurement Performance. Vaisala White Paper, B211356EN-B.
- Vaisala (2020) : Vaisala Radiosonde RS41-SG. Vaisala, available on, <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/WEA-MET-RS41-Datasheet-B211321EN.pdf>, 2020.
- Vaisala (2022) : Vaisala Radiosonde RS92 technical changes. Vaisala, available on, [https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Vaisala%20Radiosonde%20RS92%20technical%20changes\\_0.pdf](https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Vaisala%20Radiosonde%20RS92%20technical%20changes_0.pdf), (2022.6.30 閲覧).
- von Rohden, C., M. Sommer, T. Naebert, V. Motuz, and R. J. Dirksen (2022) : Laboratory characterisation of the radiation temperature error of radiosondes and its application to the GRUAN data processing for the Vaisala RS41. Atmos. Meas. Tech., **15**, 383-405, <https://doi.org/10.5194/amt-15-383-2022>.
- WMO (2018) : Guide to Instruments and Methods of Observation. WMO-No.8, World Meteorological Organization (WMO).
- WMO (2009) : GRUAN Implementation Plan 2009 - 2013. WMO/TD No.1506, World Meteorological Organization (WMO).