

iMS-100 型と RS-11G 型 GPS ゾンデの比較観測による特性評価

古林 絵里子*・星野 俊介*

Quantitative comparison of the iMS-100 and the RS-11G GPS sondes for characterization of routine soundings

Eriko KOBAYASHI and Shunsuke HOSHINO

Abstract

At the Aerological Observatory (Tateno station) of Japan Meteorological Agency in Tsukuba, Ibaraki, Meisei model RS-11G GPS sondes were replaced by Meisei model iMS-100 GPS sondes in September 2017. We carried out observations to compare these two types of radiosondes during four seasons and identified differences in performance. The results of the comparison show that the temperature recorded by the iMS-100 was 0.2 K higher than that recorded by the RS-11G above the 200-hPa layer during daytime observations. The pressure recorded by the iMS-100 was larger than that recorded by the RS-11G and the difference was smaller than 0.5 hPa between the 1000-hPa and the 200-hPa layers. The relative humidity recorded by the iMS-100 was higher than that recorded by the RS-11G above the 300-hPa layer during both daytime and nighttime observations. These differences between the two radiosondes would have a negligible impact on daily weather forecasts, but they should be taken into consideration when observation data are used for climate monitoring.

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はなく、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、世界標準にトレサブルな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を推奨している。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(レーウィンゾンデおよびGPSゾンデを含む)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い、データ特性の違いを把握してきた(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)および古林(2015)に報告されている。

高層気象台では、2013年7月から定常観測に使用してきたRS-11G型GPSゾンデ(明星電気株式会社製, 以下,

11Gという)に代えて、2017年9月からiMS-100型GPSゾンデ(同社製, 以下, iMS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iMSと11G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、両ゾンデによる観測データ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、写真をPhoto 1に示す。iMSは11Gと同じ気温センサ(サーミスタ)および静電容量式湿度センサを使用しているが、湿度センサ専用の温度計が搭載されている点が異なる。湿度



Photo 1 Model iMS (left) and 11G (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

Table 2 Specifications of the radiosondes based on Meisei (2016a) and Meisei (2016b).

Radiosonde		iMS (iMS-100 GPS sonde)	11G (RS-11G GPS sonde)
Temperature sensor	Type	Thermistor	Thermistor
	Range	-90°C - +60°C	-90°C - +60°C
	Resolution	0.1°C	0.1°C
	Uncertainty	Daytime 0.5°C(Troposphere) 0.8°C(Stratosphere) Nighttime 0.4°C	Daytime 0.5°C (Troposphere) 0.8°C (Stratosphere) Nighttime 0.4°C
Humidity sensor	Type	Electrostatic capacity type (with a temperature sensor)	Electrostatic capacity type
	Range	0%RH - 100%RH	0%RH - 100%RH
	Resolution	0.1%RH	0.1%RH
	Uncertainty	5%RH (Troposphere)	5%RH (Lower Troposphere) 7%RH (Upper Troposphere)
Pressure sensor		Inversely calculated by using an altitude that obtained from GPS positioning	Inversely calculated by using an altitude that obtained from GPS positioning
Wind		GPS wind finding (with SBAS*)	GPS wind finding (with SBAS*)
Dimensions(DWH)		53(D)×55(W)×131(H)mm	67(D)×86(W)×155(H)mm
Weight		38g	85g

*SBAS : Satellite Based Augmentation System (静止衛星型衛星航法補強システム)

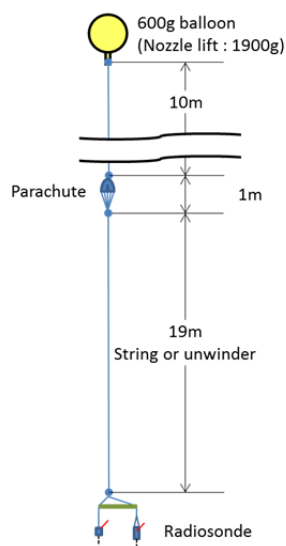


Fig. 1 Flight configuration.

センサ温度は相対湿度の測定値の補正に使用される。また、iMS は 11G に比べて筐体の大きさが小さく、重量も半分程度である。どちらのゾンデも気圧計を搭載していない



Photo 2 Preparation for the flight at 8:30 AM local time on March 22, 2017.

The iMS and 11G GPS sondes were hung on the end of a rod made of plastic cardboard.

ため、GPS 測位データから得られた高度と、ゾンデで得られた気温・相対湿度から気圧を算出しているが、両ゾンデは異なる GPS モジュールを搭載している(詳細は Kizu *et al.*(2018)を参照). また、観測データ処理プログラムはどちらも明星電気株式会社製の MGPS2 であり、11G は本ブ

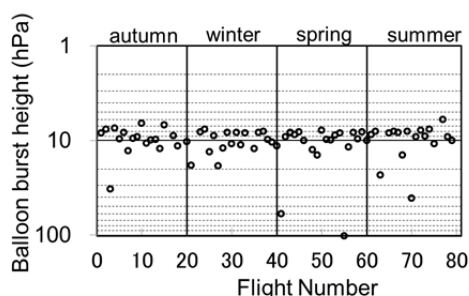


Fig. 2 Balloon burst heights of radiosonde 11G.

ログラムの Ver.2, iMS は Ver.3 を使用した. Ver.2 と Ver.3 の主な違いは, 観測点や特異点選択方法などのアルゴリズムである.

3. 比較観測の実施方法

比較観測は 2016 年 10 月 18 日から 2017 年 6 月 27 日までの期間で, 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 回実施し, 合計 80 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 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 に示す. 飛揚には重量 600g 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 1900g とした. 比較するゾンデは長さ 1.4m のプラスチックダンボール製連結棒の両端に 70cm 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. 飛揚準備の様子を Photo 2 に示す.

比較観測における 11G の気球破裂時の高度を Fig.2 に示す. 到達高度は概ね 20~7hPa であった.

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. なお, 今回の比較観測における iMS と 11G のずれは, 1 事例を除いて 7 秒以内であった. iMS に使用された MGPS2Ver.3 での放球判定では, Ver.2 まで使用されてきた上昇速度による判定に加え, 放球時の高度や風速のデータから判定する手法も併用されている. そのため, 両ゾンデの自動判定による放球時刻にも数秒の差が見られたが, 気温プロファイルにより求めた時刻差とほぼ一致している.

4. 2 比較方法

同時刻におけるデータの比較解析には, iMS と 11G の各 MGPS2 で出力された hrd ファイル(1 秒値)を使用し, 4. 1 で求めた時刻差を補正した 1 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 11G 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 11G の気圧値を P_i^O , iMS と 11G 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 iMS を, O は従来使用の 11G 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 iMS の観測値と 11G の観測値, 気圧値である). 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^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.

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

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

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

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.

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

$$\text{集計した層別の 11G 平均値 : } \overline{T^O} = \frac{\sum_{K=1}^M \overline{T_K^O}}{M} \quad (5)$$

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

集計した層別の差の標準偏差 :

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

なお、相対湿度の観測値について気象庁のルーティン観測では -40°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.

4. 3 データの選別

Fig.3 に秋季における各観測の気温差と相対湿度差の層別平均値を示す. 図中の黒線は(6), (7)によって求めた秋季観測全体の平均値とその標準偏差($\pm \sigma$)である. 気温差

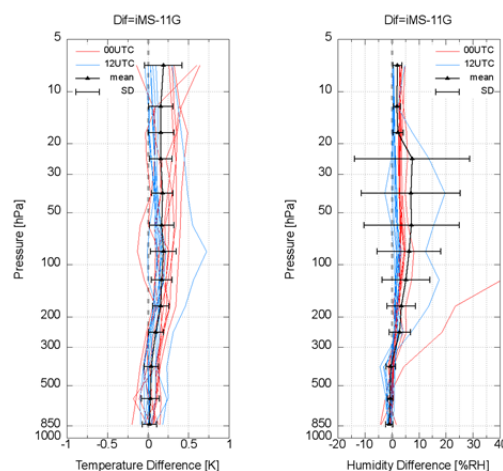


Fig. 3 Profiles of mean differences (iMS-11G) of temperature and relative humidity of each flight in autumn.

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

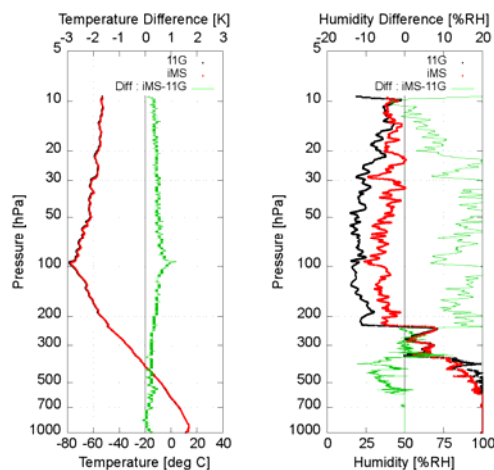


Fig. 4 Temperature, relative humidity, and iMS-11G differences of the flight at 20:30 local time on October 28, 2016.

The black and red lines show data for radiosonde 11G and iMS, respectively, and green lines show the iMS-11G differences.

は概ね $\pm 0.5\text{K}$ の範囲であるが、12UTC 観測において $100 \sim 70\text{hPa}$ で、気温差が標準偏差の 3 倍を超える事例が見られる. この観測(2016 年 10 月 28 日 20 時 30 分飛揚)の気温と相対湿度のグラフを Fig.4 に示す. 放球時には降水があった(Table 3), 両ゾンデの相対湿度は 600hPa 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 600hPa 付近から iMS と 11G の気温および相対湿度に差が生じ始め、 300hPa より上層で両ゾンデの相対湿度測定値が不安定であり、約 0.5K の気温差も見られる. このことから差の要因には気温や湿度センサへの着氷による

Table 4 Sample sizes during each season.

Accept is the number of flights that were used in the statistical comparison. Reject is the number of flights that were considered to be outliers and hence were not used in the statistical comparison.

	Daytime (00 UTC)		Nighttime (12 UTC)	
	Accept	Reject	Accept	Reject
Spring	9	1	10	0
Summer	7	3	10	0
Autumn	9	1	9	1
Winter	9	1	9	1
Total	34	6	38	2

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、飛翔中に気温や湿度センサが何らかの影響を受け、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が標準偏差の 3 倍を越える観測とした。ただし、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、統計解析の除外対象となる観測データが合計で 8 事例あった (Table 3 の ※印の観測)。統計解析に使用および除外した各季節の観測データ数は Table 4 に示すとおりである。統計解析に使用した観測データにおける層別平均気温差 (iMS-11G) の箱ひげ図、および気温差が除外基準に達したことにより除外された観測データの気温差を ×印で Fig.5 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。

4. 4 解析結果

Fig.6 に気温、相対湿度について季節別に集計した iMS の層別平均値を示す。300hPa より下層の対流圏では夏季と冬季で約 -15°C の温度差があり、対流圏界面付近での気温は $-60\sim-70^{\circ}\text{C}$ 程度である。対流圏では夏季と秋季の平均気温がほぼ同じであるのに対し、成層圏の気温は夏季に高く秋季が最も低い特徴が見られる。冬季と春季は対流圏と成層圏ともにほぼ同じ気温プロファイルである。対流圏の相対湿度は夏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小さく、季節変化は不明瞭である。

(1) 同時刻における気温観測値の比較

Fig.7 ~ Fig.9 に観測時刻別の気温差を季節別に集計した

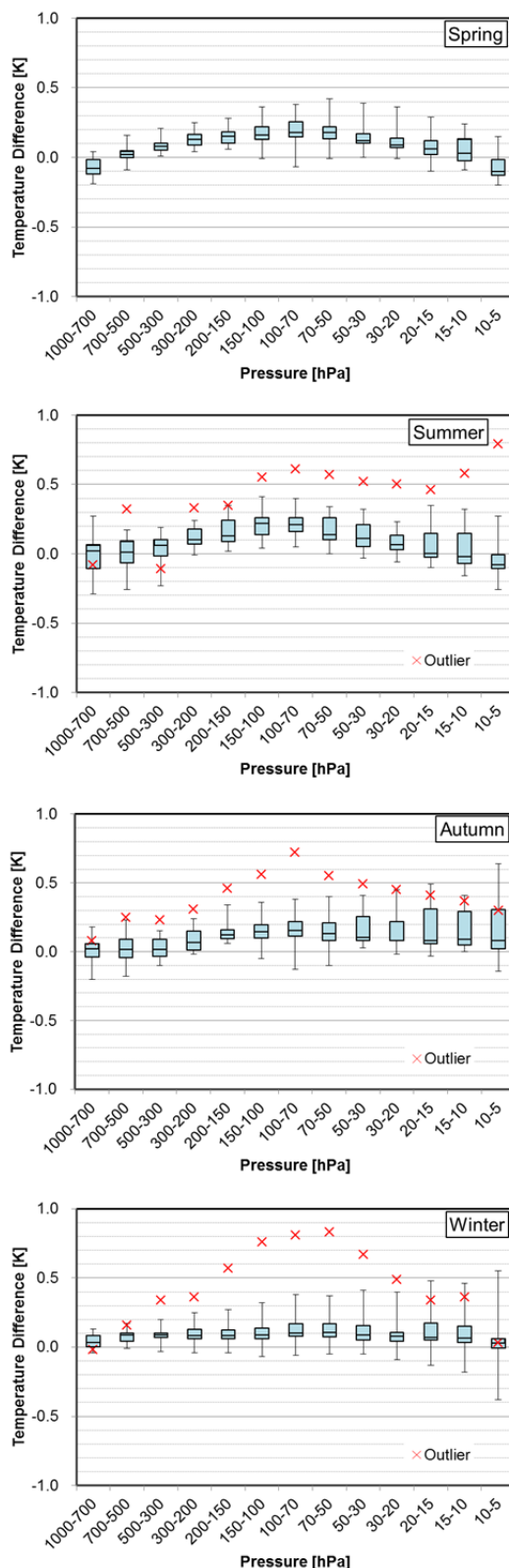


Fig. 5 Box and whisker plots of mean temperature differences (iMS-11G) at 00 UTC and 12 UTC during each season. The red crosses show outliers for temperature.

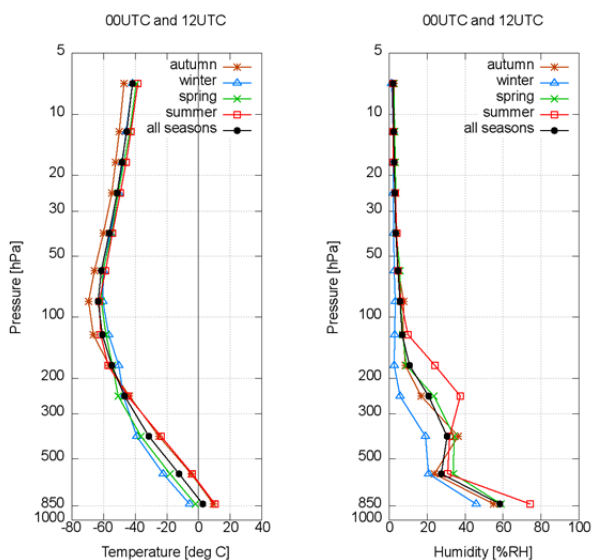


Fig. 6 Profiles of mean temperature (left) and relative humidity (right) recorded by the iMS at 00 and 12 UTC. The colored lines show each season, and the black lines show the means of all seasons.

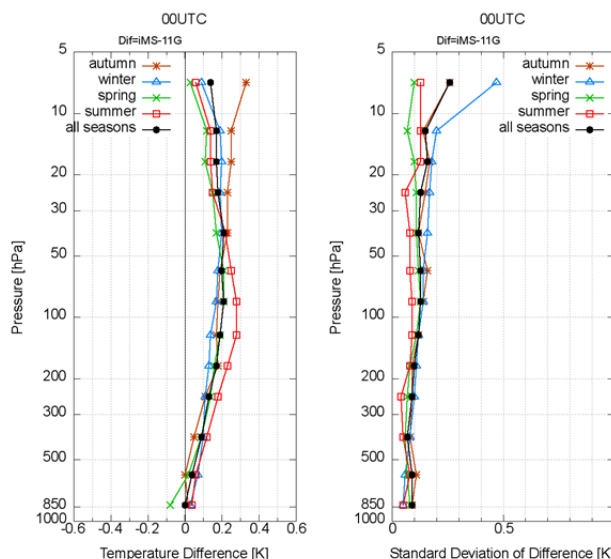


Fig. 8 Profiles of mean temperature differences (iMS-11G) and standard deviations at 00 UTC. Colors are the same as in Fig.6.

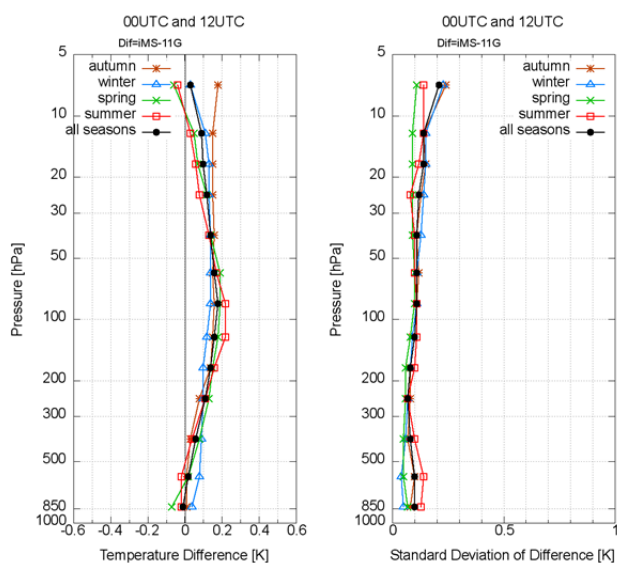


Fig. 7 Profiles of mean temperature differences (iMS-11G) and standard deviations at 00 and 12 UTC. Colors are the same as in Fig.6.

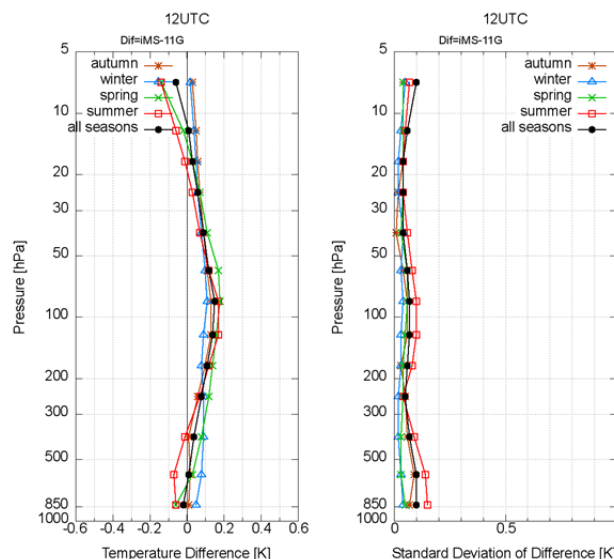


Fig. 9 Profiles of mean temperature differences (iMS-11G) and standard deviations at 12 UTC. Colors are the same as in Fig.6.

層別平均値と標準偏差を示す。00UTC および 12UTC 観測の全平均差(Fig.7 の all seasons)は±0.2K の範囲であった。00 UTC 観測での全平均差は全体的に正の気温差となっており、iMS の観測値が 11G よりも高い値を示している (Fig.8)。特に対流圏界面に近い 100hPa 付近で差が大きく、200 hPa~20hPa では約+0.2 K の差がある。12 UTC 観測での全平均差は、00UTC 観測に比べると差が小さいが(Fig.9)、200hPa~50hPa では 00UTC 観測と同様に iMS が 11G より

も高い。500hPa より下層の下部対流圏では 00UTC 観測、12UTC 観測ともに全平均差は 0.0K に近い値である。00UTC 観測における気温差の層別平均値と標準偏差の図 (Fig.8)において、夏季の 150hPa~70hPa と秋季の 20hPa より上層で気温差が+0.3K であり他の季節に比べて差が大きい。標準偏差は各季節とも 100hPa より上層で大きくなるが、冬季の 10hPa より上層の標準偏差が約 0.5K でほかの季節よりも大きい。12UTC 観測における気温差の層別平均値と標準偏差の図(Fig.9)において、層別平均値の差は、

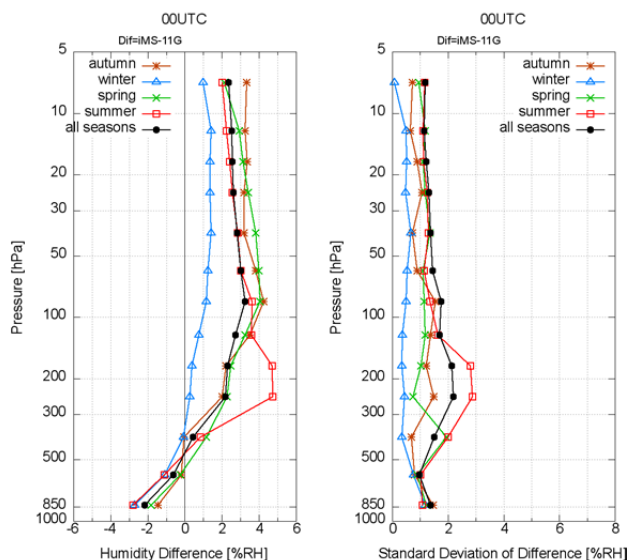


Fig. 10 Profiles of mean relative humidity differences (iMS-11G) and standard deviations at 00 UTC.

Colors are the same as in Fig.6.

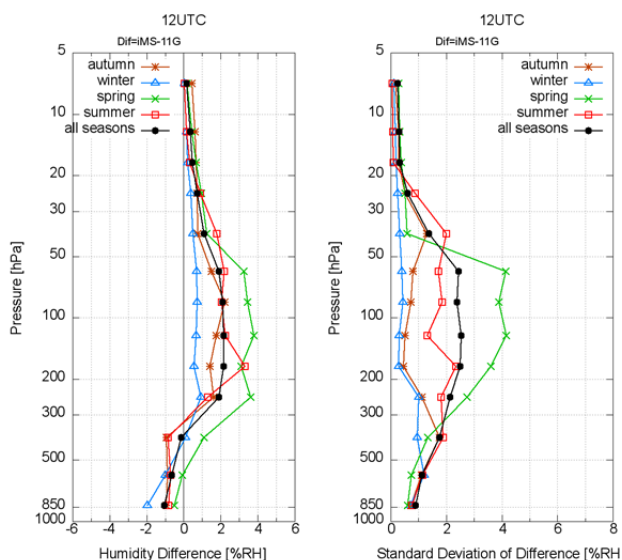


Fig. 11 Profiles of mean relative humidity differences (iMS-11G) and standard deviations at 12 UTC.

Colors are the same as in Fig.6.

全平均が±0.1Kの範囲内であり、夏季の500hPaより下層および春季と夏季の15hPaより上層ではiMSが11Gよりも0.1K程度低い特徴が見られた。また標準偏差は夏季の500hPaより下層で0.1Kを越えてほかの季節よりも大きい。

(2) 同時刻における相対湿度観測値の比較

Fig.10とFig.11に、00UTCと12UTC観測それぞれの相対湿度差の層別平均値と標準偏差を示す。00UTC観測、12UTC観測ともに各季節における相対湿度差は±5%RH

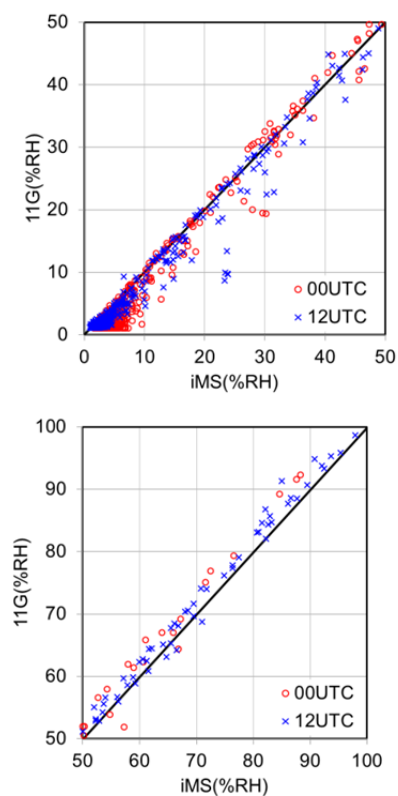


Fig. 12 Scatter diagrams of relative humidity from iMS and 11G.

以内であった。00UTC観測(Fig.10)の全平均差は500hPaより下層でiMSが小さく、300hPaより上層でiMSが平均で2~3%RH程度大きい値を示す傾向があり、標準偏差は300~200hPa付近で2%RH程度とやや大きい。12UTC観測(Fig.11)においても300~50hPaでの相対湿度差の全平均は+2%RH、この層での全季節の標準偏差は2%RHを超え、他の気圧層に比べて大きい、30hPaより上層では相対湿度差と標準偏差ともに1%RH以下で00UTC観測に比べて小さい特徴が見られた。季節別では、00UTCと12UTC観測(Fig.10, Fig.11)において、平均湿度が低い冬季は、他の季節に比べて相対湿度差、標準偏差ともに小さいが、平均湿度が高い夏季や春季は相対湿度差、標準偏差ともに大きい傾向が見られた。

iMSと11Gの相対湿度を比較した散布図をFig.12に示す。20%RHより低湿度の環境ではiMSが11Gより大きく、70%RHより高湿度の環境ではiMSが小さい傾向があり、特に低湿度環境においてiMSが大きい傾向は00UTC観測で顕著である。Fig.13は相対湿度差と気温観測値の相関関係を見たものである。Fig.13(a)の20%RH以下とFig.13(b)の20~70%RHのどちらにおいても-30℃付近を境に低温側でiMSが大きく、Fig.13(b), (c)の20%RHより高湿度では-30℃より高温側でiMSが小さい特性が見られる。

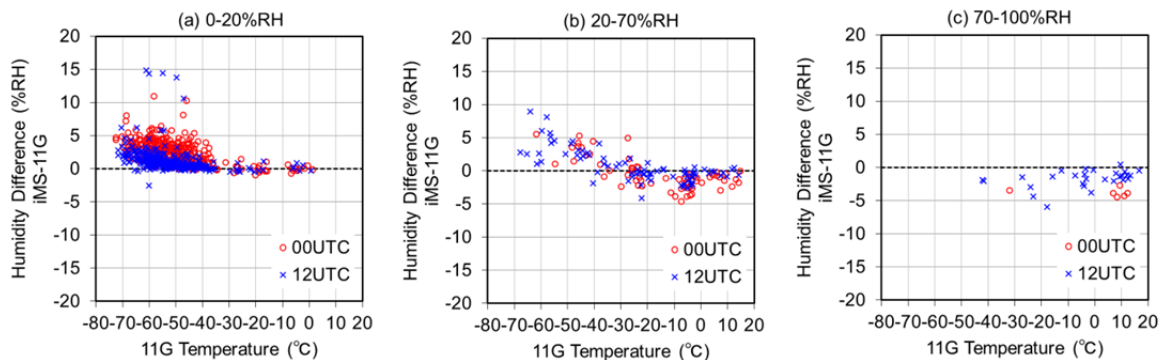


Fig. 13 Scatter diagrams of relative humidity differences (iMS-11G) and temperature from the 11G radiosonde.

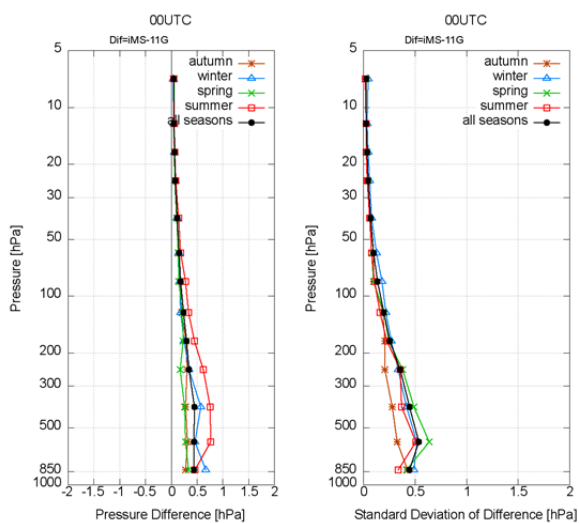


Fig. 14 Profiles of mean pressure differences (iMS-11G) and standard deviations at 00 UTC.

Colors are the same as in Fig.6.

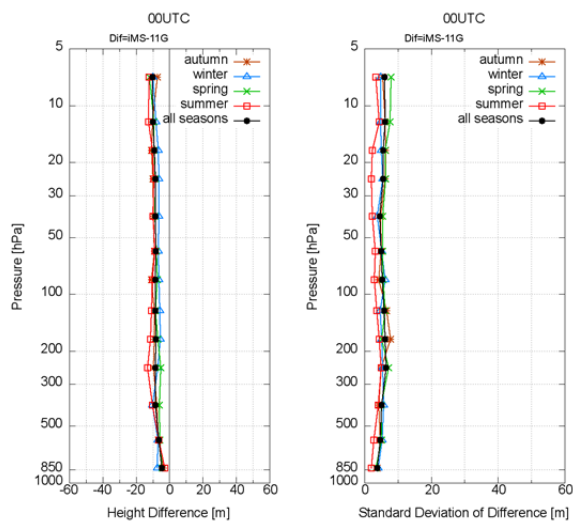


Fig. 16 Profiles of mean geopotential height differences (iMS-11G) and standard deviations at 00 UTC.

Colors are the same as in Fig.6.

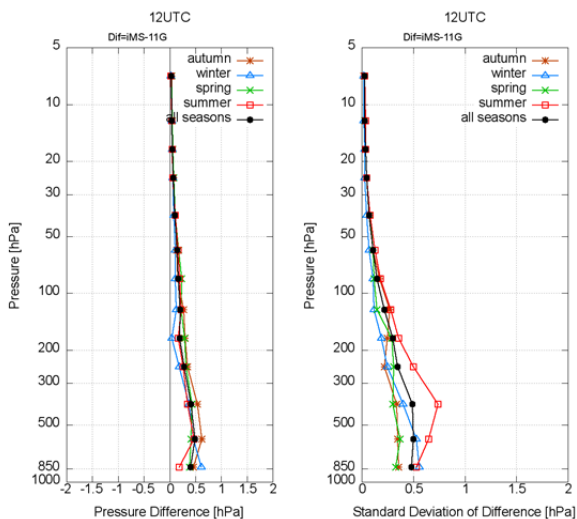


Fig. 15 Profiles of mean pressure differences (iMS-11G) and standard deviations at 12 UTC.

Colors are the same as in Fig.6.

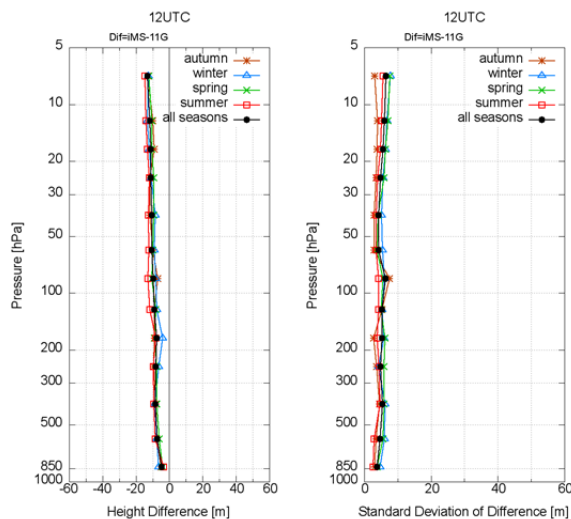


Fig. 17 Profiles of mean geopotential height differences (iMS-11G) and standard deviations at 12 UTC.

Colors are the same as in Fig.6.

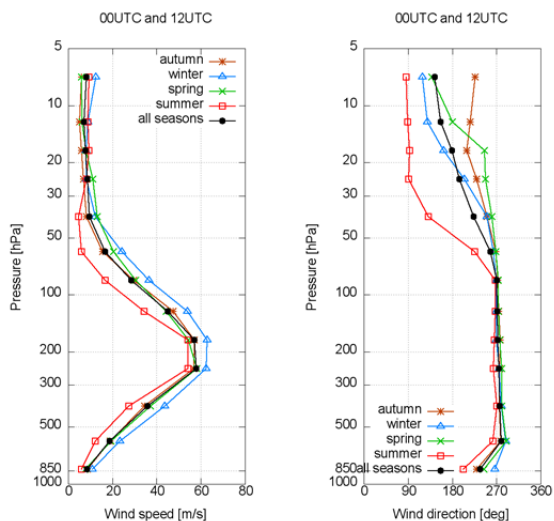


Fig. 18 Profiles of mean wind speed (left) and wind direction (right) from the iMS radiosonde at 00 and 12 UTC. Colors are the same as in Fig.6.

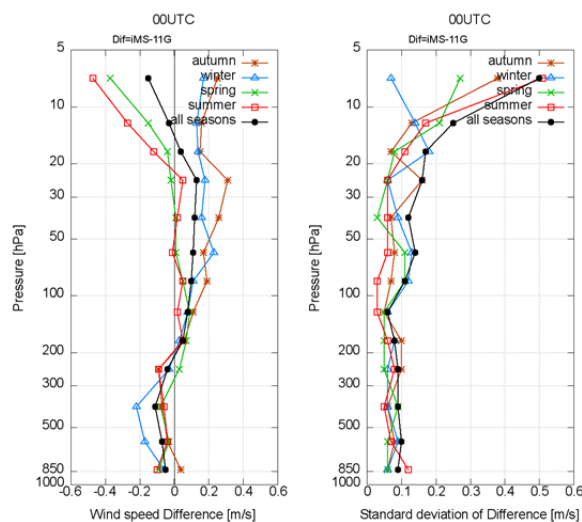


Fig. 19 Profiles of mean wind speed differences (iMS-11G) and standard deviations at 00 UTC. Colors are the same as in Fig.6.

(3) 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.14 ~ Fig.17 には、気圧とジオポテンシャル高度差の観測時刻別に集計した層別平均差と標準偏差を示す。気圧差は、00UTC 観測と 12UTC 観測で同様の結果であり、1000 ~ 200hPa の気圧層では全季節平均の最大で iMS が +0.5hPa 大きく、これより上層で差は高度と共に小さくなる。気圧値は全体的に iMS が 11G より大きい。差の大きさは観測値に対して 1%以内である。また季節別に見ると、00UTC 観測では夏季の対流圏で差が大きい(Fig.14)。標準偏差は 12UTC 観測の夏季に 500~300hPa の気圧層で 0.7hPa を超える値を示し(Fig.15)、00UTC 観測の春季や 12UTC 観測の夏季における対流圏で他の季節に比べて大きい。これは iMS の気圧値が 11G より小さい観測事例が数例あったことに起因している。

ジオポテンシャル高度差については、00UTC 観測 (Fig.16)と 12UTC 観測(Fig.17)ともに全層において iMS が 11G よりも低い高度を示し平均で-10m 程度の差があるが、差の大きさは平均で 1%以内であり十分小さい。

(4) 同時刻における風観測値の比較

Fig.18 に、風速、風向を季節毎に集計した iMS の層別平均値を、Fig.19 と Fig.20 および Fig.21 と Fig.22 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。高層風(Fig.18)は、各季節とも約 200hPa 付近に風速の最大(極大風速面)があり、風向はその上層で季節による違いが見られる。平均風速が 20ms⁻¹ より弱くなる 50hPa より上層で風速差(Fig.19, Fig.20)と風向差(Fig.21, Fig.22)

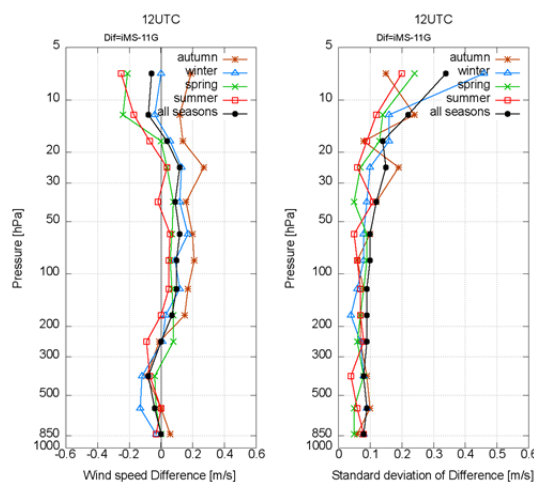


Fig. 20 Profiles of mean wind speed differences (iMS-11G) and standard deviations at 12 UTC. Colors are the same as in Fig.6.

の標準偏差がともに大きい。

風速(Fig.19, Fig.20)では極大風速面となる約 200hPa 付近を境に、それより下層の対流圏では iMS の風速が小さく、上層の 20hPa までは iMS が大きい。層別平均値の差は各季節とも ±0.4m/s の範囲である。20hPa より上層では秋季で iMS の風速が大きく春季と夏季は iMS の風速が小さい特徴があり、00UTC が 12UTC に比べて差が大きい。700~300hPa では冬季に風速差が大きい。

風向(Fig.21, Fig.22)では 50~10hPa の弱風域で ±3° の範囲で差が見られるが、700~50hPa の高度では差が小さい。00UTC の冬季(20~15hPa)や 12UTC の夏季(50~30hPa)で風向差の標準偏差が大きい。春季は 50~20hPa で標準偏

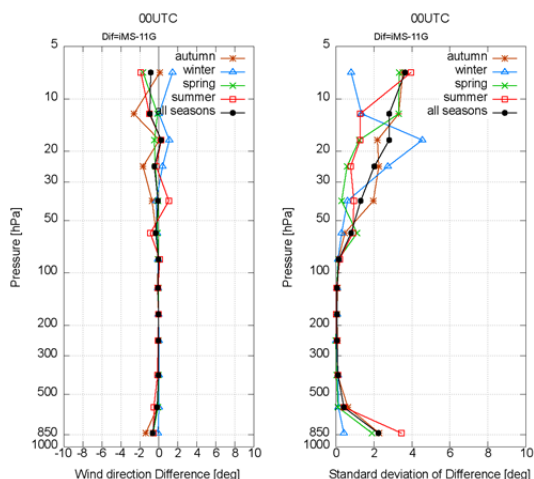


Fig. 21 Profiles of mean wind direction differences (iMS-11G) and standard deviations at 00 UTC. Colors are the same as in Fig.6.

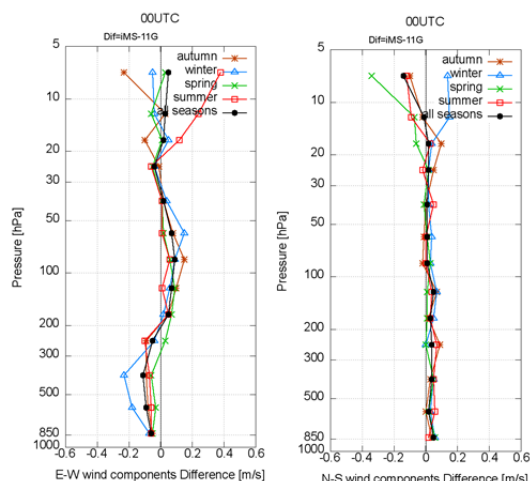


Fig. 23 Profiles of differences of mean wind component (iMS-11G) at 00 UTC. E-W component (left) and N-S component (right). Colors are the same as in Fig.6.

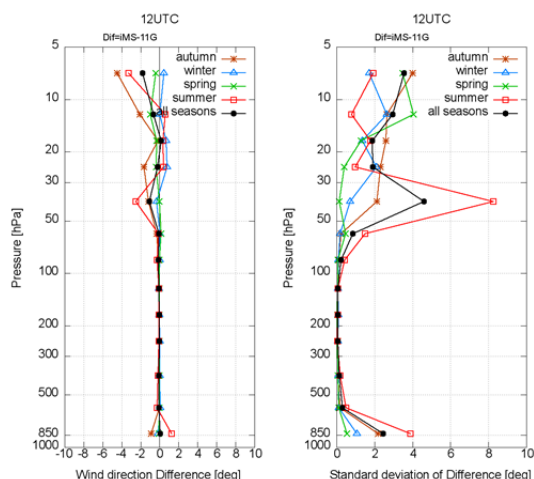


Fig. 22 Profiles of mean wind direction differences (iMS-11G) and standard deviations at 12 UTC. Colors are the same as in Fig.6.

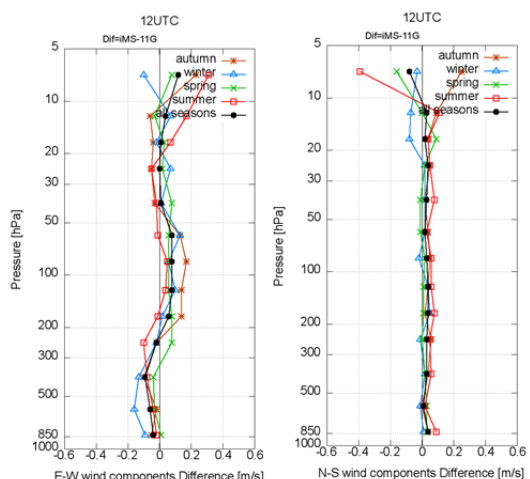


Fig. 24 Profiles of differences of mean wind component (iMS-11G) at 12 UTC. E-W component (left) and N-S component (right). Colors are the same as in Fig.6.

差が小さい。

Fig.23, Fig.24 は風の東西成分, 南北成分の差を示したもので, Fig.19 と Fig.20 の 1000hPa から 50hPa 付近までの風速差は東西成分に大きく依存していることがわかる。風の東西成分の 20hPa より上層では 00UTC, 12UTC とともに夏季に差が大きい。

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 のデータを取得していないため 5hPa の気圧面は

解析対象としていない。解析に使用したデータは, 4.3 で選別した 72 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, ルーティンの指定気圧面データは気温が最初に -40°C を下回った気圧面より上層での湿度観測値を使用しないため, 本報告でも -40°C までのデータを解析に使用する。

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 iMS と 11G 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 $L=1, 2, \dots, M$ 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 iMS の観測値から 11G の観測値を引いた値 ($\Delta T_L = T_L^N - T_L^O$)である。

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

$$\text{11G の平均値} : \overline{T^O} = \frac{\sum_{L=1}^M T_L^O}{M} \quad (9)$$

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

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 面まで取得できた。相対湿度については、夏季と秋季のデータは 300hPa 面まで取得できたが、春季は 350hPa、冬季は 400hPa 面までであった。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。

(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、200hPa より上層において iMS が 11G よりも高い傾向があり、00UTC 観測では高度が高いほど差が大きくなる。00UTC 観測、12UTC 観測どちらも差は±0.4K の範囲内である。12UTC 観測では 850~500hPa の層で冬季を除き iMS がわずかに低い。100hPa の気温差は 00UTC 観測で大きく、特に夏季に差が明瞭である。気温差の標準偏差は 200hPa より下層では 00UTC 観測、12UTC 観測ともにほぼ 0.2K より小さいが、200hPa より上層では最大で 0.5K 程度である。

(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、同時刻におけるデータ比較と同様に 500hPa より下層で iMS が小さい値を示す傾向があり、相対湿度差は±4%RH 以内である。春季と夏季は 00UTC 観測の差が 12UTC 観測に比べて大きい。全季節での差の標準偏差は 1~3%RH であり、季節毎では夏季の 500hPa より上層で大きい。

(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

Table 5 Mean differences (iMS-11G) and standard deviations (SD) of temperature at standard pressure levels during daytime (00 UTC) measurements.

Pressure level (hPa)	Temperature differences and standard deviations (SD) in daytime measurements (°C)									
	Autumn		Winter		Spring		Summer		All seasons	
	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD
10	0.33	0.31	0.35	0.55	0.14	0.08	0.22	0.36	0.25	0.34
15	0.24	0.22	0.16	0.33	0.12	0.42	0.06	0.13	0.15	0.31
20	0.19	0.18	0.41	0.23	0.27	0.22	0.27	0.22	0.29	0.23
30	0.24	0.16	0.19	0.27	0.30	0.31	0.26	0.25	0.25	0.26
40	0.27	0.21	0.21	0.17	0.18	0.15	0.34	0.18	0.24	0.19
50	0.31	0.33	0.16	0.26	0.17	0.27	0.20	0.21	0.21	0.28
70	0.21	0.29	0.12	0.23	0.16	0.24	0.36	0.12	0.20	0.25
100	0.20	0.12	0.09	0.17	0.24	0.21	0.41	0.20	0.23	0.21
125	0.20	0.24	0.10	0.13	0.14	0.18	0.24	0.26	0.17	0.21
150	0.16	0.07	0.10	0.19	0.16	0.11	0.14	0.16	0.14	0.14
175	0.11	0.07	0.08	0.09	0.17	0.08	0.20	0.14	0.14	0.11
200	0.14	0.10	0.10	0.08	0.20	0.08	0.06	0.14	0.13	0.11
250	0.07	0.08	0.10	0.11	0.09	0.07	0.06	0.09	0.08	0.09
300	0.06	0.08	0.12	0.10	0.08	0.06	0.14	0.07	0.10	0.09
350	0.00	0.11	0.06	0.13	0.07	0.07	0.04	0.07	0.04	0.10
400	0.01	0.09	0.01	0.09	0.04	0.10	0.03	0.07	0.02	0.09
500	-0.01	0.10	0.02	0.09	0.02	0.09	0.00	0.11	0.01	0.10
600	-0.02	0.11	0.06	0.05	0.00	0.05	0.01	0.08	0.01	0.08
700	0.02	0.12	0.03	0.08	-0.09	0.09	-0.04	0.10	-0.02	0.11
800	0.03	0.11	0.00	0.08	-0.11	0.07	0.04	0.05	-0.01	0.10
850	-0.03	0.12	-0.03	0.07	-0.08	0.09	-0.01	0.06	-0.04	0.09
900	0.01	0.07	-0.01	0.07	-0.10	0.09	0.01	0.08	-0.02	0.09
925	0.00	0.12	-0.06	0.08	-0.14	0.10	-0.03	0.07	-0.06	0.11
1000	0.02	0.11	-0.02	0.09	-0.12	0.15	0.10	0.19	-0.01	0.16

Table 6 Mean differences (iMS-11G) and standard deviations (SD) of temperature at standard pressure levels during nighttime (12 UTC) measurements.

Pressure level (hPa)	Temperature differences and standard deviations (SD) in nighttime measurements (°C)									
	Autumn		Winter		Spring		Summer		All seasons	
	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD
10	0.15	0.13	0.11	0.15	-0.15	0.18	0.00	0.29	0.03	0.18
15	0.08	0.04	0.17	0.18	-0.08	0.23	-0.01	0.15	0.04	0.19
20	0.08	0.09	0.07	0.13	0.16	0.27	0.02	0.21	0.08	0.17
30	0.11	0.12	0.07	0.15	0.21	0.30	0.13	0.20	0.13	0.19
40	0.07	0.08	0.17	0.41	0.12	0.26	0.11	0.21	0.12	0.26
50	0.11	0.07	0.04	0.11	0.24	0.15	0.13	0.19	0.13	0.15
70	0.17	0.09	0.17	0.17	0.21	0.13	0.15	0.17	0.17	0.14
100	0.19	0.12	0.10	0.08	0.16	0.08	0.16	0.19	0.15	0.10
125	0.01	0.18	0.08	0.06	0.14	0.07	0.15	0.19	0.10	0.13
150	0.06	0.08	0.10	0.07	0.13	0.06	0.10	0.12	0.10	0.08
175	0.03	0.09	0.07	0.07	0.13	0.09	0.08	0.12	0.08	0.09
200	0.07	0.09	0.10	0.07	0.11	0.09	0.00	0.12	0.07	0.10
250	-0.02	0.09	0.08	0.06	0.09	0.07	0.04	0.08	0.05	0.09
300	-0.06	0.10	0.07	0.05	0.07	0.05	-0.01	0.12	0.02	0.10
350	-0.04	0.08	0.09	0.11	0.07	0.06	-0.05	0.10	0.02	0.11
400	-0.06	0.11	0.08	0.11	0.02	0.04	-0.08	0.13	-0.01	0.13
500	-0.06	0.14	0.07	0.08	0.00	0.10	-0.07	0.10	-0.02	0.12
600	-0.02	0.09	0.02	0.08	-0.02	0.06	-0.14	0.13	-0.04	0.11
700	0.01	0.12	0.01	0.13	-0.02	0.04	-0.09	0.14	-0.02	0.12
800	-0.01	0.16	0.00	0.07	-0.08	0.10	-0.11	0.14	-0.05	0.13
850	-0.02	0.10	0.00	0.07	-0.12	0.10	-0.08	0.13	-0.06	0.12
900	-0.03	0.09	-0.04	0.05	-0.11	0.10	-0.02	0.25	-0.05	0.18
925	-0.04	0.10	-0.06	0.05	-0.12	0.04	-0.09	0.11	-0.08	0.09
1000	0.00	0.12	-0.01	0.09	-0.09	0.07	-0.01	0.17	-0.03	0.11

Table 7 Mean differences (iMS-11G) 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) in daytime measurements (%RH)									
	Autumn		Winter		Spring		Summer		All seasons	
	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD
300	1.33	1.70					1.29	2.05	1.24	1.83
350	0.11	1.37	0.33	0.47	0.00	1.41	2.71	4.37	0.95	2.93
400	-1.00	1.76	-0.80	0.98	0.62	2.60	0.86	4.52	-0.07	2.94
500	-0.56	1.50	-0.78	0.79	-0.56	1.77	1.43	5.58	-0.21	2.95
600	-0.33	1.49	-1.33	1.76	0.00	1.33	-1.14	0.83	-0.68	1.53
700	-0.78	2.30	-2.44	1.71	-1.00	2.05	-3.86	2.64	-1.91	2.48
800	-1.67	2.11	-3.00	2.11	-2.67	2.21	-3.00	2.14	-2.56	2.21
850	-1.89	1.37	-2.67	1.33	-2.00	1.41	-3.14	1.81	-2.38	1.55
900	-2.00	1.25	-2.56	1.07	-2.00	1.41	-1.86	1.12	-2.12	1.25
925	-1.67	1.83	-2.44	0.83	-2.22	1.23	-2.43	1.18	-2.18	1.36
1000	-2.11	1.85	-2.11	1.73	-2.89	1.66	-3.00	1.07	-2.50	1.68

Table 8 Mean differences (iMS-11G) 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) in nighttime measurements (%RH)									
	Autumn		Winter		Spring		Summer		All seasons	
	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD
300	0.62	1.11			3.50	0.50	0.67	3.20	0.95	2.48
350	-0.89	2.23			1.20	1.33	-1.10	3.18	-0.54	2.69
400	-2.33	3.30	0.00	1.20	0.75	2.44	-0.80	2.36	-0.68	2.74
500	-1.22	1.47	-1.11	1.66	-0.80	1.47	-0.90	1.64	-1.00	1.57
600	-1.00	1.25	-1.33	2.00	-0.30	1.19	-0.50	1.50	-0.76	1.56
700	-0.56	0.96	-2.33	2.71	-0.70	1.19	-1.40	1.11	-1.24	1.77
800	-2.00	0.94	-2.56	2.27	-0.60	1.11	-0.40	1.69	-1.34	1.82
850	-1.11	1.10	-2.67	2.05	-0.60	0.80	-1.00	1.55	-1.32	1.64
900	-1.78	1.13	-2.22	1.55	-0.80	0.87	-1.50	1.28	-1.55	1.33
925	-1.11	1.37	-1.89	1.10	-0.50	1.02	-1.10	1.22	-1.13	1.28
1000	1.78	3.08	1.22	1.23	2.40	1.85	1.00	1.15	1.62	2.06

Table 9 Mean differences (iMS-11G) 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) in daytime measurements (m)									
	Autumn		Winter		Spring		Summer		All seasons	
	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD
10	13.2	26.0	19.0	30.0	47.6	18.0	41.2	24.2	31.7	28.3
15	7.5	14.4	15.4	20.2	28.3	16.2	33.1	9.8	21.1	18.6
20	14.1	13.5	16.9	17.6	24.8	13.3	28.6	11.6	20.9	15.4
30	10.1	10.0	14.7	12.4	15.0	12.8	21.6	11.9	15.1	12.5
40	11.2	8.7	10.4	14.5	15.4	9.2	19.7	8.7	13.9	11.3
50	8.3	7.6	9.3	11.6	12.0	10.0	15.4	11.0	11.0	10.5
70	6.4	8.4	8.3	11.9	5.6	6.5	12.0	9.9	7.9	9.7
100	-4.1	9.0	-1.7	9.5	-1.0	6.9	7.4	8.1	-0.3	9.4
125	0.8	8.8	2.2	9.7	8.1	9.6	4.4	6.4	3.9	9.3
150	2.0	6.5	3.6	7.2	3.2	6.0	2.4	6.2	2.8	6.5
175	-0.2	6.3	2.9	8.2	1.1	7.4	6.1	5.1	2.3	7.3
200	1.0	6.4	2.4	6.8	1.2	8.1	3.7	6.3	2.0	7.1
250	-4.2	7.5	0.7	6.8	-0.9	8.6	3.0	3.9	-0.6	7.5
300	-2.9	5.0	0.1	5.0	-0.9	7.1	3.0	6.4	-0.4	6.3
350	-1.6	3.7	1.7	4.9	0.7	7.9	3.6	4.8	0.9	5.9
400	-2.0	2.0	0.3	3.7	-1.3	7.9	3.3	4.1	-0.1	5.3
500	-2.0	4.3	-0.8	3.8	-3.7	5.0	2.7	3.7	-1.2	4.8
600	-1.8	4.1	-2.1	3.4	-1.8	5.9	4.1	5.0	-0.7	5.3
700	-2.1	4.3	-3.2	4.3	-0.6	4.1	5.0	5.6	-0.5	5.4
800	-0.9	3.3	-1.4	3.0	-1.7	4.4	3.6	2.6	-0.3	4.0
850	0.3	2.2	-1.3	2.6	-2.2	2.4	2.4	3.0	-0.4	3.1
900	-0.6	2.2	-0.4	2.4	0.0	2.1	1.6	2.0	0.1	2.3
925	-0.7	3.0	-0.7	3.1	-0.4	2.6	1.6	2.3	-0.2	2.9
1000	-0.1	1.9	0.0	2.0	0.8	1.9	0.3	1.0	0.2	1.8

Table 10 Mean differences (iMS-11G) 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) in nighttime measurements (m)									
	Autumn		Winter		Spring		Summer		All seasons	
	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD
10	13.5	18.3	2.4	12.8	24.7	36.4	25.8	19.2	16.0	25.1
15	12.6	10.8	2.8	9.0	28.0	15.3	21.6	19.8	15.7	17.0
20	7.2	9.4	6.0	10.9	24.1	13.6	11.8	14.6	11.9	14.1
30	7.9	9.3	6.1	9.8	19.0	12.9	10.1	13.7	10.5	12.5
40	7.2	12.5	4.0	8.5	13.6	14.1	7.0	10.8	7.8	12.1
50	3.3	12.1	2.7	7.1	10.1	14.2	8.0	12.4	6.0	12.1
70	5.1	9.2	2.3	8.1	10.4	10.0	6.1	11.3	6.0	10.2
100	0.3	11.3	-5.1	7.7	4.9	10.2	-2.5	11.4	-0.7	10.9
125	6.0	10.3	-1.2	5.5	1.9	9.4	0.5	11.8	1.8	9.9
150	2.0	9.9	-0.7	8.8	3.0	9.2	-2.0	12.7	0.6	10.5
175	0.2	9.3	-2.1	6.4	1.6	8.9	-0.4	12.3	-0.1	9.7
200	-0.4	8.9	-2.3	7.1	1.9	8.8	-2.4	11.1	-0.8	9.3
250	-0.4	6.6	-1.2	7.6	1.3	8.1	-2.8	9.1	-0.8	8.1
300	1.2	5.5	-2.2	6.1	-0.2	8.2	-0.8	13.5	-0.5	9.1
350	2.2	6.7	-2.9	6.0	-0.1	9.2	-1.0	12.6	-0.5	9.3
400	1.0	4.8	-3.3	5.0	-0.7	7.1	-3.2	10.5	-1.6	7.5
500	0.1	5.2	-2.3	3.5	-0.2	6.6	-2.2	8.5	-1.2	6.4
600	0.2	4.5	-1.9	3.8	-0.3	6.6	-3.2	7.1	-1.3	5.9
700	0.1	4.1	-1.7	4.4	-0.5	5.1	-1.6	5.9	-0.9	5.0
800	0.9	1.1	-0.6	2.5	0.3	4.1	-1.3	5.2	-0.2	3.8
850	-0.1	2.5	1.2	2.3	0.5	3.5	-0.7	4.1	0.2	3.3
900	-1.3	2.9	-0.1	2.1	0.3	2.2	0.3	4.1	-0.2	3.0
925	-0.6	2.8	1.7	2.1	-0.4	3.4	-0.9	2.6	-0.1	2.9
1000	-0.9	1.2	0.3	1.1	0.0	1.4	0.2	2.0	-0.1	1.5

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

Pressure level (hPa)	Wind speed and wind direction differences and standard deviations (SD)							
	Wind speed				Wind direction			
	daytime (00 UTC)		nighttime (12 UTC)		daytime (00 UTC)		nighttime (12 UTC)	
	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD	Difference	SD
10	-0.05	0.69	0.08	0.69	-0.6	7.6	1.3	8.7
15	0.03	0.69	-0.03	0.71	-1.2	6.7	0.4	7.4
20	0.21	0.69	0.06	0.80	-1.3	6.1	1.8	5.1
30	0.03	0.63	0.06	0.67	0.2	6.3	1.1	6.8
40	0.15	0.60	-0.06	0.63	-0.1	4.2	-2.1	12.4
50	-0.12	0.47	0.14	0.58	-0.1	3.9	0.4	2.6
70	-0.15	0.60	-0.11	0.61	0.8	2.1	0.3	1.8
100	0.18	0.45	0.19	0.61	0.2	0.7	0.0	0.8
125	0.15	0.65	0.08	0.48	0.0	0.5	0.1	0.7
150	-0.12	0.47	0.00	0.46	-0.1	0.6	-0.1	0.5
175	-0.06	0.34	0.00	0.40	-0.1	0.5	0.0	0.5
200	-0.09	0.37	-0.05	0.51	0.0	0.4	0.2	0.7
250	-0.03	0.57	0.00	0.51	0.0	0.6	-0.2	0.5
300	-0.09	0.70	0.00	0.61	-0.1	0.8	0.1	0.6
350	-0.21	0.72	-0.05	0.51	-0.1	0.8	0.0	0.7
400	-0.06	0.64	0.05	0.46	0.0	0.7	-0.1	0.9
500	-0.09	0.45	-0.03	0.49	0.1	1.0	-0.1	0.8
600	-0.12	0.40	-0.03	0.36	-0.3	1.7	-0.2	1.2
700	0.09	0.45	0.08	0.53	-0.3	2.5	0.1	1.5
800	-0.03	0.45	0.03	0.58	-0.6	2.0	-0.1	4.2
850	-0.09	0.61	0.08	0.48	0.5	5.0	2.7	18.4
900	0.09	0.51	0.11	0.38	-1.1	11.3	-0.2	6.0
925	0.09	0.45	0.05	0.39	-3.4	8.8	0.7	5.3
1000	-0.12	0.76	-0.51	0.68	0.0	17.5	1.5	8.8

ジオポテンシャル高度差(Table 9, Table 10)については、00UTC, 12UTC 観測ともに 100hPa より上層で大きくなる。00UTC 観測の夏季は他の季節に比べて差が大きい。12UTC 観測では 100hPa より上層で春季の高度差と差の標準偏差が大きく、冬季は全体的に他の季節に比べて標準偏差が小さい。全季節では 50hPa より上層で 00UTC 観測が 12UTC 観測より差が 5m 程度大きい。この結果と Fig.16 と Fig.17 で示した同時刻における比較結果と比べると、同時刻では 00UTC 観測と 12UTC 観測でジオポテンシャル高度差に大きな差はなく、差の大きさは 10m 程度であったことから、指定気圧面における比較結果と異なる。同時刻での比較と指定気圧面での比較で結果が異なる理由は、両ゾンデの気圧観測値はジオポテンシャル高度、気温、相対湿度の観測値から静力学方程式により算出している(Kizu *et al.* : 2018)ことにある。Fig.14, Fig.15 で示した同時刻における気圧の比較では、対流圏で 0.5hPa、成層圏の 30hPa 付近で 0.1hPa 程度 iMS が 11G よりも大きい傾向があるが、気圧観測値に対する気圧差の割合は成層圏のほうが大きくなる。したがって気圧差による両ゾンデの指定気圧面高度のずれへの影響は成層圏で大きく、その差は 10m ~50m 程度である。

(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±1m/s、風向差は±4° の範囲であった。00UTC 観測では 150hPa より下層で iMS が 11G より小さい傾向があるが、12UTC 観測ではこの傾向は見られない。風速差の標準偏差は 00UTC 観測の 400~300hPa と 00UTC 観測および 12UTC 観測の 30hPa より上層で大きい。風向差については iMS と 11G のどちらかに偏った傾向は見られない。風向差の標準偏差は風速が小さい 700hPa より下層と 70hPa より上層で大きい特徴がある。

6. 考察

6. 1 気温観測値の差について

秋季観測に使用されたゾンデの気温センサについては、飛揚前に恒温槽での精度確認が行われている。2016年10月20日の観測に使用されたゾンデについて恒温槽試験で得られた気温センサの器差と、連結飛揚で得られた2つのゾンデの気温差を Fig.25 に示す。地上から気温の極小値となるまでの対流圏では、観測データから算出した気温差は日中と夜間どちらも恒温槽試験で得られた器差と同程度であるが、成層圏では日中の観測での気温差が器差に比べて大きくなっている。10月に飛揚されたゾンデについて、同様に観測時の気温差と恒温槽試験で得られた器差を比較したものを Fig.26 に示す。夜間の観測の場合にはどのゾンデも観測時の気温差はほぼ器差の範囲内であり、iMS と 11G の気温差はもともとそれぞれの気温センサが持つ

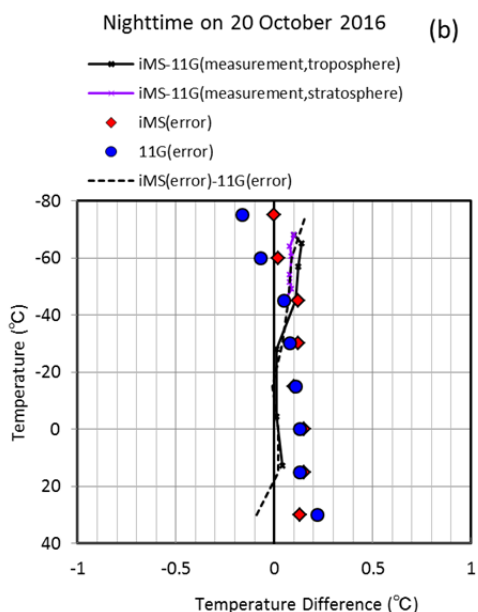
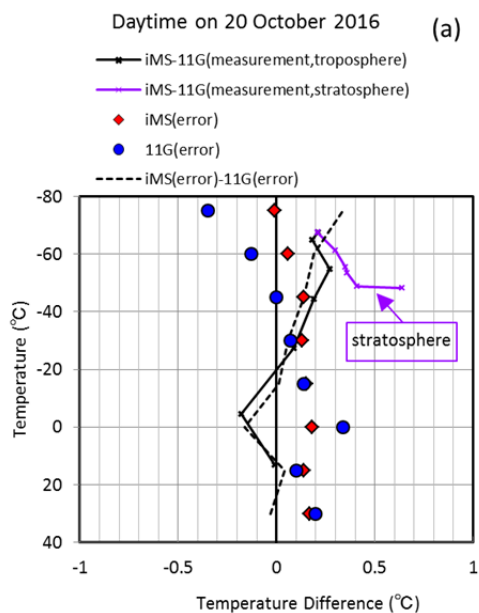


Fig. 25 Example of temperature differences (iMS-11G [measurement]) and instrumental errors (iMS[error], 11G[error]) and iMS[error]-11G[error]) determined via a thermostatic chamber test.

(a) daytime; (b) nighttime.

器差によるものと判断できる。一方、日中の観測の場合は対流圏界面よりも上層で気温差が器差よりも大きい (Fig.26 左図)ため、飛揚時に受ける日射の影響や飛揚器材による影響など、事前に得られる器差以外の原因による温度差が生じていることがわかる。成層圏の気温測定には日射が大きく影響するためどちらか又は両方のゾンデの日射補正が不十分である可能性がある。iMS と 11G は同じ

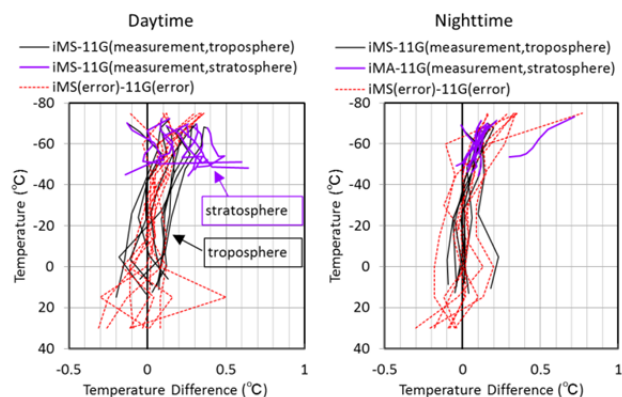


Fig. 26 Temperature differences (iMS-11G[measurement]) for autumn measurements and instrumental errors (iMS[error]-11G[error]) determined via a thermostatic chamber test.

気温センサが搭載されており、同様の補正が適用されているが、センサブームの取り付け角度が 11G は 40 度、iMS は 30 度と異なることや、ゾンデ本体の重量が 11G は iMS の約 2 倍であるため飛翔中のゾンデの姿勢や振る舞いが異なることなどにより、筐体からの熱流の影響の受け方が異なることが原因として考えられる。また、4.4 で示した 00UTC 観測の成層圏の気温について、11G は iMS に比べて 0.2K 低い傾向がある (Fig.8) が、古林(2015)によると Vaisala 社製の RS92-SGP 型 GPS ゾンデ (以下、RS92 という) との比較観測によって、11G は RS92 に比べて日中の観測で成層圏における気温が低い結果が示されており、11G の日射補正量が過剰である可能性も考えられる。なお、iMS と 11G の 1000~10hPa における全季節の層別平均気温値について有意な差があるか T 検定および Mann-Whitney の U 検定により統計的検定を行ったところ、00UTC、12UTC 観測ともに有意水準 5% で有意な差はない結果であった。

6. 2 相対湿度観測値の差について

4.4(2)に示した同時刻における相対湿度観測値の比較では 300~50hPa での差が+2~+3%RH で大きく、30hPa より上層での差は 12UTC 観測ではそれより下層に比べて小さくなる傾向がみられたが、00UTC 観測では 30hPa より上層においても差が大きく、観測時刻による違いが見られた。この原因について考察する。前述したように iMS と 11G の相対湿度観測の違いとして補正に使用される湿度センサ温度の求め方が異なっていることがあげられる。Fig.27 は本比較観測における iMS と 11G の湿度センサ温度差の層別平均値の箱ひげ図である。00UTC 観測では iMS の湿度センサ温度は 11G の推定された湿度センサ温度よ

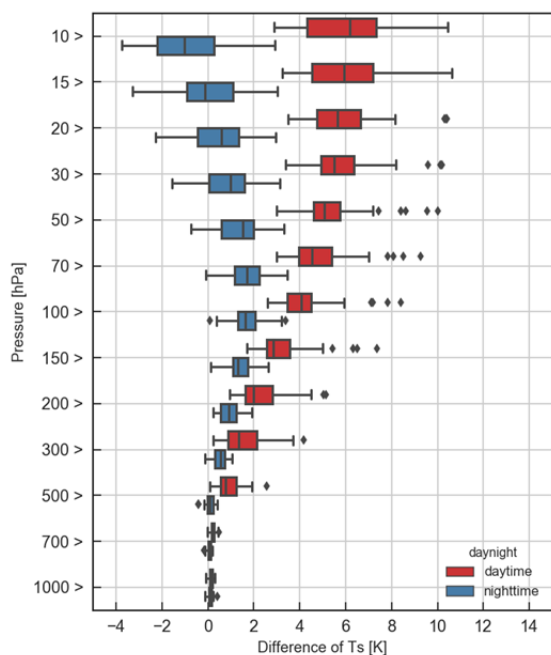


Fig. 27 Box and whisker plots of mean temperature differences of humidity sensors (iMS-11G) at 00 UTC (daytime) and 12 UTC (nighttime).

T_s indicates temperature of humidity sensor. Black diamonds indicate outliers.

りも高い値を示す傾向があり、特に成層圏で差が大きい。12UTC 観測においても湿度センサ温度差がおおよそ±2K の範囲で見られるが、00UTC 観測での温度差のほうが大きい特徴が見られることから、湿度センサ温度の求め方の違いが観測時刻による比較結果の違いの要因の一つと考えられるため、以下に事例を用いて検証を行う。

大きい湿度差が見られた観測事例として Fig.28 に 2016 年 10 月 18 日 00 UTC の気温、相対湿度の鉛直プロファイルを示す。Fig.29 に同じ日の 12UTC の気温、相対湿度の鉛直プロファイルを示す。Fig.28 の日中の観測では対流圏下層 (1000~700 hPa) の高湿度の領域において、iMS の相対湿度観測値が 11G よりも小さいが、300hPa より上層の低湿度の領域では逆に iMS が 11G よりも 5~9%RH 程度大きい観測値を示している。Fig.29 の夜間の観測では、対流圏で iMS が小さく成層圏で iMS が大きい傾向が同様に見られるが、日中に比べて成層圏の相対湿度差は小さい。これらの事例について湿度センサ温度を比較した図を Fig.30 と Fig.31 に示す。Fig.30 の 00UTC 観測の事例では、iMS の湿度センサ温度は 11G の推定された湿度センサ温度に比べて高い傾向があり、特に対流圏界面より上空で温度差が大きく、大きいところで 10K 程度の差がある。一方 Fig.31 に示した 12UTC 観測の事例では対流圏界面付近から下部

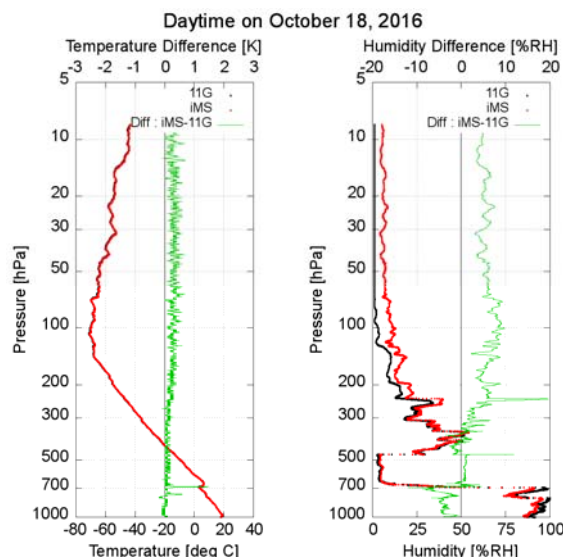


Fig. 28 Temperature, relative humidity and iMS-11G differences during the flight at 8:30 local time on October 18, 2016.

Example of observation result with large relative humidity differences.

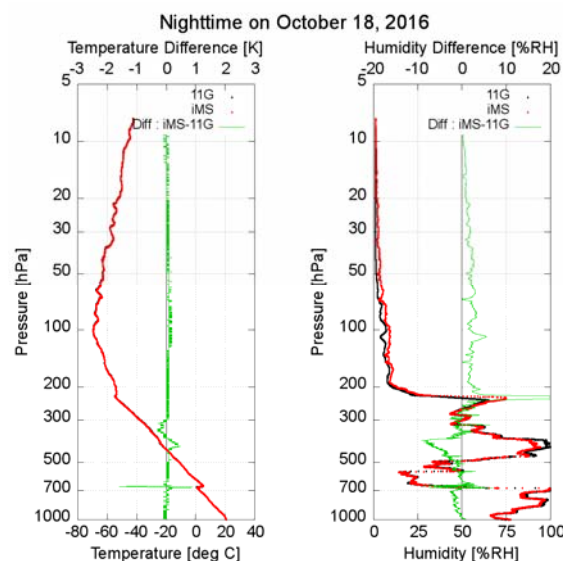


Fig. 29 Temperature, relative humidity and iMS-11G differences during the flight at 20:34 local time on October 18, 2016.

成層圏にかけて湿度センサ温度に差が見られるが差の大きさは 00UT 観測に比べて小さい。相対湿度観測値の補正方法については星野ほか(2016)や Kizu *et al.*(2018)に詳細が示されているが、補正において湿度センサ温度の誤差の影響が及ぶのは、センサ時定数の誤差によるタイムラグ補正、湿度センサの温度依存性補正(以下、TUD 補正 (Temperature-Humidity Dependence correction)という)、湿度

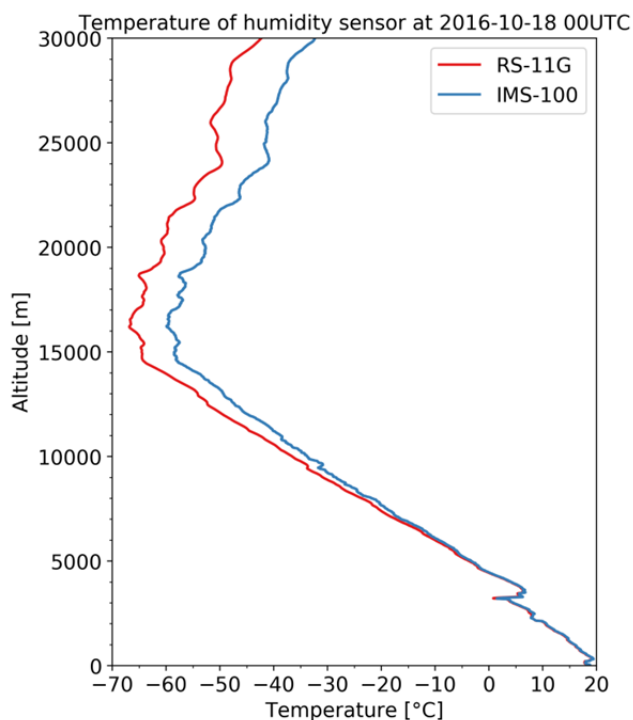


Fig. 30 Temperature of humidity sensor during the flight at 8:30 local time on October 18, 2016.

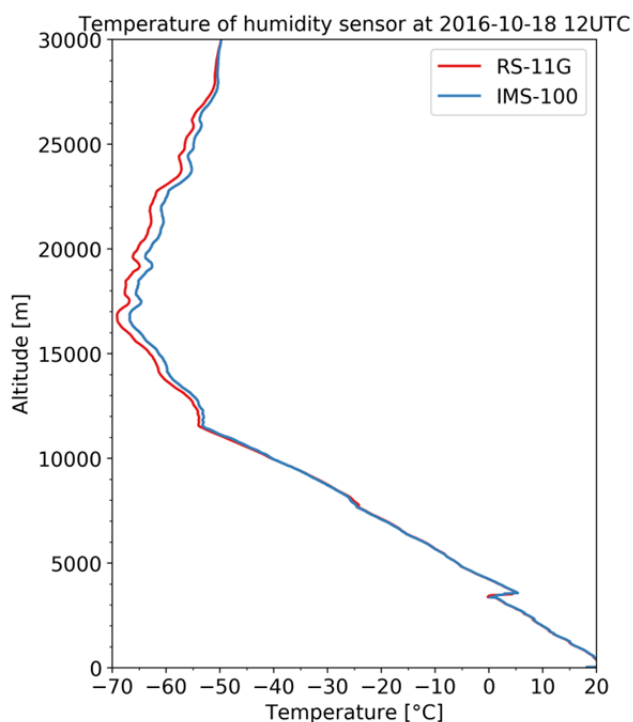


Fig. 31 Temperature of humidity sensor during the flight at 20:34 local time on October 18, 2016.

センサ温度(T_s)と気温(T_a)の差の影響の補正(以下、 T_s/T_a 補正(Sensor versus air temperature correction)という)である。このうち、時定数 τ_U は

$$\tau_U = 0.1537 \times \exp(-0.087T_s) \quad (12)$$

で求められ、湿度センサ温度の不確かさによる影響を見積もると、 -50°C 程度の環境においてセンサ温度の誤差が10Kであると仮定した場合、時定数の差は10秒程度と考えられるが、湿度が急激に変化する場合を除けば T_s/T_a 補正の影響と比較して小さいと考えられる。次にTUD補正への影響を考える。両ゾンデの湿度センサの温度依存性による誤差の補正量は次の式で見積もられる。

$$\Delta U = (K_0 + K_1T_s + K_2T_s^2 + K_3T_s^3) \times (K_4 + K_5U_1 + K_6U_1^2) \quad (13)$$

$$U_2 = U_1 - \Delta U$$

ここで ΔU は補正量、 U_1 は補正前の相対湿度値、 U_2 は補正後の相対湿度値、 K_0 から K_6 は係数である。このTUD補正について湿度センサ温度の不確かさによる相対湿度への影響を見積もったものが Fig.32 である。この図から、例えば $T_s = -50^\circ\text{C}$ 、 U_1 が4%RHより低い環境を仮定した場合、 T_s が 10°C 高くなっても($\Delta T_s = 10$)生じる相対湿度差は0.5%RH程度であることがわかる。最後に、 T_s/T_a 補正への影響を考える。 T_s/T_a 補正は、相対湿度値の補正を行う過程で最後に適用される補正であり、TUD補正までに得られた相対湿度値 U_2 から最終値 U_3 を以下の式により求める。

$$U_3 = U_2 \times \frac{e_s(T_s)}{e_s(T_a)} \quad (14)$$

ここで e_s は飽和水蒸気圧の計算式(Hyland and Wexlar)から以下のように求められる。

$$e_s(T) = 0.01 \times \exp\left(\frac{c_0}{T} + c_1 + c_2T + c_3T^2 + c_4T^3 + c_5\log(T)\right) \quad (15)$$

ただし、 $c_0 = -0.58002206 \times 10^4$, $c_1 = 0.13914993 \times 10$,
 $c_2 = -0.48640239 \times 10^{-1}$, $c_3 = 0.41764768 \times 10^{-4}$,
 $c_4 = -0.14452093 \times 10^{-7}$, $c_5 = 0.65459673 \times 10$

この T_s/T_a 補正について湿度センサ温度の不確かさによる相対湿度への影響を見積もると Fig.33 のようになる。例えば $T_s = -50^\circ\text{C}$ 、 $U_3 = 2\%RH$ の環境を仮定した場合、 T_s が1K高い場合に生じる相対湿度差は0.5%RHに満たないが、 T_s が10K高くなると約2%RHの相対湿度差が生じるため観測値として得られる相対湿度は約4%RHとなり、ほかの補正に比べて T_s/T_a 補正の影響が大きいことがわかる。Fig.30では約15,000mの対流圏界面より上層でIMSと11Gの間に最大+10K程度のセンサ温度差があるため、前述の見積もりではこの湿度センサ温度差による T_s/T_a 補正への影響は+2%RH程度となり、Fig.28の成層圏で示されている約5%RHの相対湿度差の半分程度を占めることになる。

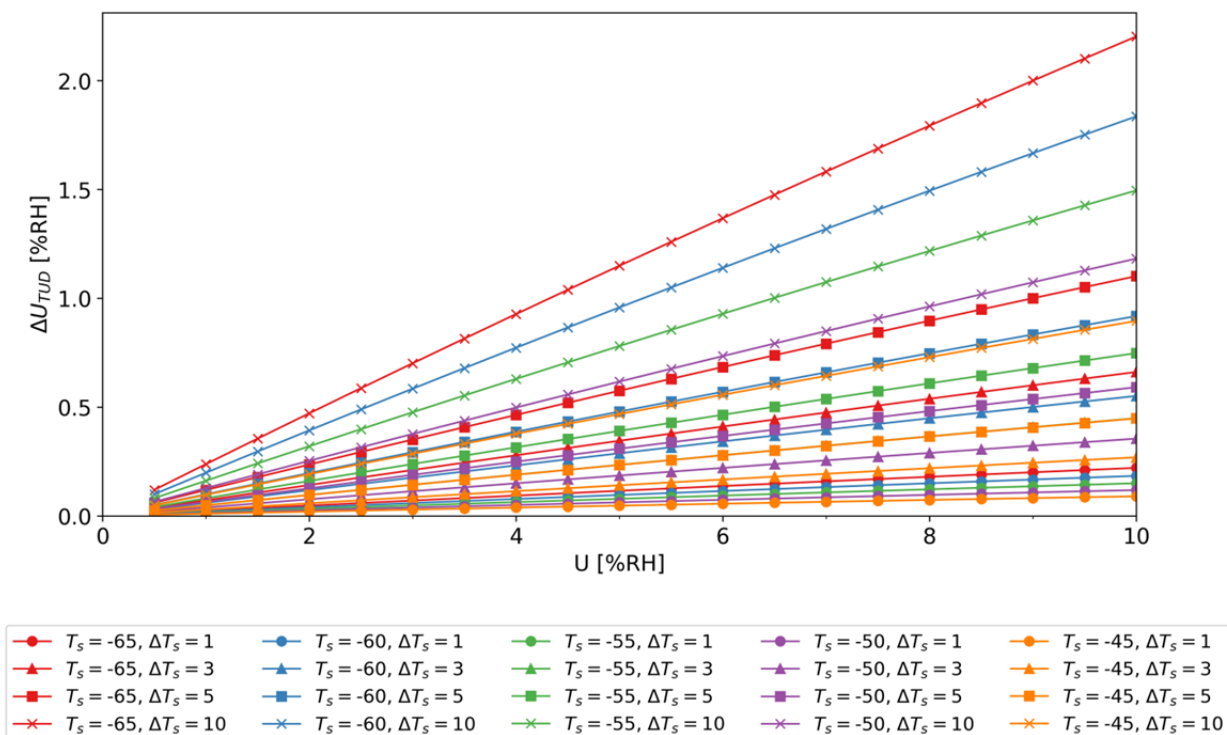


Fig. 32 Variation of relative humidity accompanied by a change of temperature of the humidity sensor in the temperature-humidity dependence (TUD) correction.

T_s and U indicate temperature of humidity sensor and relative humidity respectively.

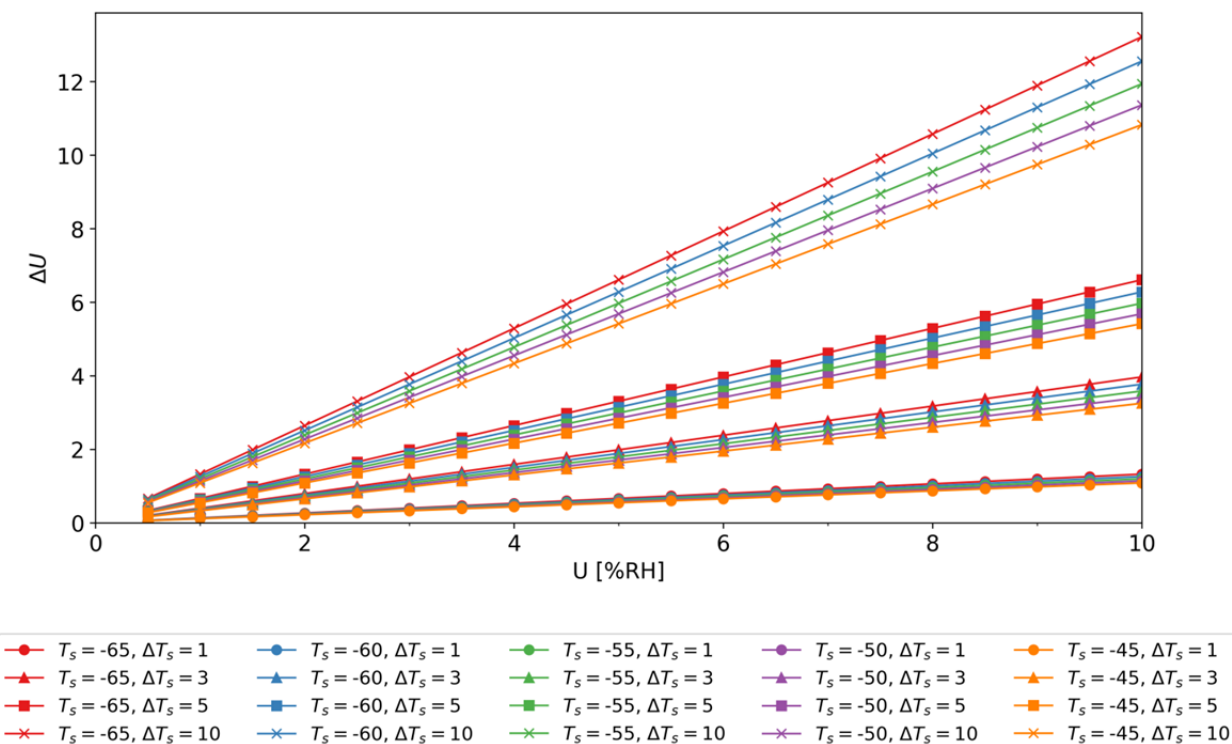


Fig. 33 Variation of relative humidity accompanied by a change of temperature of the humidity sensor in the sensor versus air temperature (T_s/T_a) correction.

T_s and U indicate temperature of humidity sensor and relative humidity respectively.

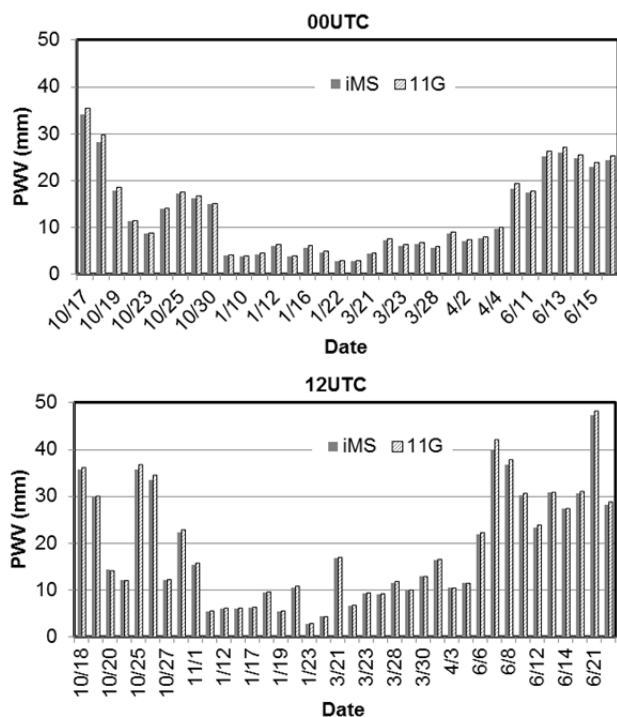


Fig. 34 Precipitable water vapor from the iMS and 11G radiosondes.

したがって、湿度センサ温度の求め方の違いなどから生じるセンサ温度差が両ゾンデの相対湿度差の要因の一つであると考えられる。このほか、湿度センサがもともと持つ器差や日射による影響、湿度センサの温度特性など様々な要素が複合して測定値に影響を与えていると考えられるが、より詳細な解析は今後の課題である。

次に水蒸気密度で両ゾンデの測定値を比較するため、iMS および 11G の比較観測データから算出した可降水量 (Precipitable Water Vapor : PWV) を Fig.34 に示した。可降水量では両者の差は最大で 2mm 程度であり、平均湿度が低い冬季は差が小さい。対流圏の 500hPa より下層で iMS の相対湿度が小さい傾向に伴い、可降水量も iMS が 11G に比べて小さい傾向があった。

全季節の層別平均相対湿度値についても気温と同様に有意な差があるか統計的検定を行ったところ、00UTC 観測では有意水準 5% で 200hPa より上層で有意な差があるが、12UTC 観測では 50~30hPa の気圧層を除くすべての気圧層で有意な差はない結果であった。

6. 3 気圧観測値の差について

気圧観測値はどちらのゾンデも GPS 測位データから得られた高度と、ゾンデで得られた気温・相対湿度の観測値から算出される。比較結果で見られた気圧差において高度差、気温差、相対湿度差がどの程度影響しているかを見るため、気圧差および高度差が平均値の分布に近い 2017 年

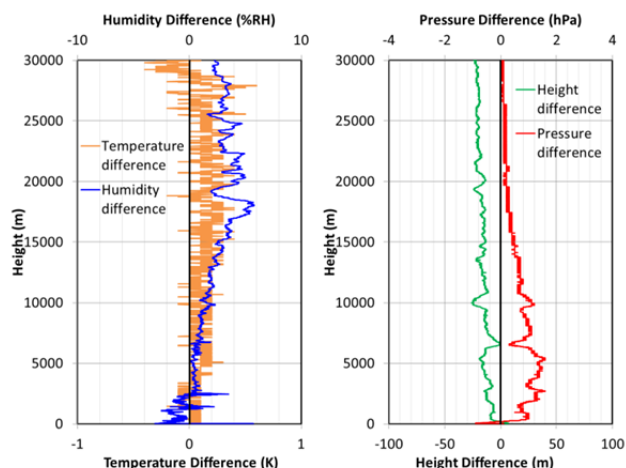


Fig. 35 Differences (iMS-11G) of temperature, relative humidity, geopotential height and pressure during the flight at 8:30 local time on March 22, 2017.

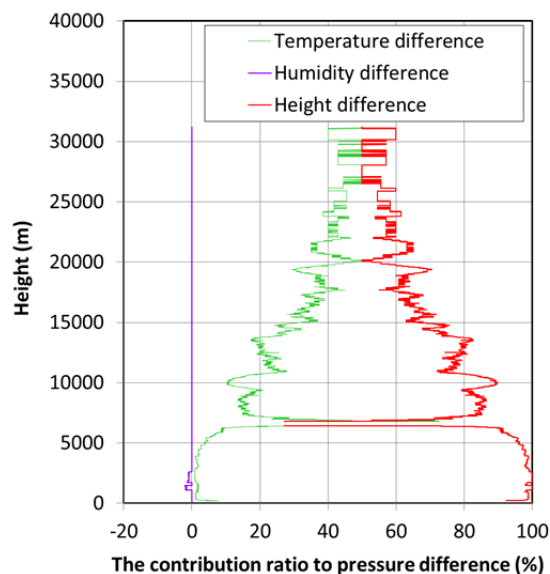


Fig. 36 Percentage contributions of temperature, relative humidity and geopotential height differences to pressure difference.

3月22日00UTCの観測データを例として気圧差におけるそれぞれの寄与率を求めた。Fig.35は観測で得られた気温、相対湿度、高度、気圧の差(iMS-11G)であり、11Gの測定値として得られた高度を縦軸とした。この観測では気温差は高度15kmより上層で+0.2~+0.3K、高度差は10kmより上層で約-20mの差があった。Fig.36はFig.35の気温差、相対湿度差、高度差から生じる気圧差をそれぞれ求め、全体の気圧差におけるそれら割合を表したものである。高度20kmまでは高度差の寄与率が大きいが高さとともにその割合は小さくなる。一方気温差の寄与率は高度とともに大

きくなり、20km より上層では気温差と高度差の影響は同程度となった。3月23日12UTC観測についても同様に各観測要素における差の気圧差への寄与率を求めたところ(図の掲載省略)、高度13kmまでは高度差の影響が大きく、それより上層は高度差と気温差の影響が同程度であった。Fig.14, Fig.15において対流圏での気圧差が大きいのは高度差の影響が大きく寄与し、Table 9, Table 10の成層圏における同一気圧面高度の差が12UTC観測より00UTC観測で大きいのは、00UTC観測の大きい気温差が要因であることがわかる。なお、高度についてはどちらのゾンデもGPS測位データから求めたジオポテンシャル高度であるため、高度差はGPSモジュールの違いなどに起因するものであると考えられる。

7. まとめ

iMS と 11G の観測データの特性の違いを検証するために、2016年10月18日から2017年6月27日にかけて、iMS と 11G 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72回分の観測データを使用して統計解析を行った。

同時刻におけるデータ比較では、iMS の気温観測値が11Gよりも高い傾向があり、00UTC観測の200hPaより上層において+0.2Kの気温差が見られた。相対湿度観測値では500hPaより下層ではiMSが小さいが300hPaより上層ではiMSが大きく、平均で3%RH程度の差が見られた。また、気圧観測値については、1000~200hPaの気圧層で全季節平均の最大でiMSが0.5hPa大きく、ジオポテンシャル高度は平均で-10m程度の差が見られたが、どちらも観測値に対して差の大きさは1%以内であった。風向と風速の差についてはそれぞれ $\pm 3^\circ$ 、 $\pm 0.4\text{ms}^{-1}$ 以内であった。Nash *et al.* (2011)で示されている複数のゾンデによる国際比較観測の結果によると、ジオポテンシャル高度差は $\pm 10\text{m}$ 程度、風の各成分の差は、 $\pm 0.4\text{ms}^{-1}$ 程度であり、本報告での観測値の差はこれと同程度であった。本報告では統計的な解析による特性把握を行い、80観測中8事例を外れ値として解析対象から除外したが、比較観測データを観測精度向上に役立てるためにはこれらの除外された観測データについても差が大きくなった原因を解析する必要があり、今後の課題である。

指定気圧面における比較では、気温差が $\pm 0.4\text{K}$ 以内、相対湿度差が $\pm 4\%RH$ 以内であり、観測測器の変更によるルーティン観測の精度への影響は小さい。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する必要があり(藤原:2011)、iMS と 11G の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。

本報告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、高層気象台では週1回iMSとGRUAN認証ゾンデであるRS92との比較観測を実施しており、観測データはGRUANへ集積され、どちらのゾンデのデータもReferenceデータとして品質管理されている。今後11Gも含め、これらの基準データを利用した特性評価を行う予定である。

謝 辞

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

引用文献

- 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.
- 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.
- 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 (2016a) : Product catalog for GPS Radiosonde iMS-100 . Meisei electric co., ltd. available on, http://www.meisei.co.jp/english/products/iMS-100_e.pdf, October 2017.
- Meisei (2016b) : Product catalog for GPS Radiosonde RS-11G . Meisei electric co., ltd. Available on http://www.meisei.co.jp/english/products/RS-11G_E.pdf, October 2017.
- Nash. J., T. Oakley, H. Vomel, and W. Li (2011) : WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems, Yangjiang,

China, 12 July – 3 August 2010. WMO/TD-No.1580, Instruments and Observing Methods Report No.107, World Meteorological Organization, 238pp.

WMO (2009) : GRUAN Implementation Plan 2009 - 2013. WMO/TD No.1506, World Meteorological Organization (WMO).

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.