

RS-11G 型 GPS ゾンデを用いた改良型飛揚前点検手法の検討

古林 絵里子*・脇野 定則*・宮林 直人*・矢代 和也*・萩谷 聡*

Study on improvement of ground check method for RS-11G GPS sonde

Eriko KOBAYASHI, Sadanori WAKINO, Naoto MIYABAYASHI, Kazuya YASHIRO
and Satoshi HAGIYA

要旨

現在、高層気象台では RS-11G 型 GPS ゾンデ(明星電気株式会社製)を現業観測に使用しており、飛揚前には室内の気温・湿度 1 点での基準器との比較点検を実施している。ラジオゾンデによる湿度観測精度をより向上させるため、低湿度および高湿度雰囲気での湿度センサ飛揚前点検手法の検討および試験を行った。はじめに、低湿度と高湿度雰囲気を安定して作成する手法を検討するため、モレキュラーシーブ、飽和塩、水道水を使用して、密閉された点検容器内に作成した気温・湿度雰囲気において、10 分程度で容易に点検可能であることを確認した。次にこの結果から、モレキュラーシーブと蒸留水を使用した低湿度および高湿度雰囲気での点検を実施するための改良型飛揚前点検装置を作成し、RS-11G 型 GPS ゾンデの点検試験を実施した。ラジオゾンデと基準器の測定値を比較した結果、個々のラジオゾンデによって結果は異なるが、全体では気温差は $-0.1\sim+0.4^{\circ}\text{C}$ 、湿度差は $-3.5\sim+0.8\%RH$ となり、湿度雰囲気による違いも見られたことから、今般開発した装置による広範囲な湿度雰囲気での点検が、湿度観測精度の向上に有効であることがわかった。

1. はじめに

ラジオゾンデによる高層気象観測は、世界各地で行われており、天気予報のための数値予報モデルへの同化などに利用されている。ラジオゾンデは気球へ取り付けて上空へ飛ばすことによって直接上空の大気を観測するため、観測終了後の回収が困難であり、回収できた場合でも、落下時の衝撃等の影響を受けるためセンサの再利用は難しい。そのため毎回違うセンサを使用することになり、品質の良い観測データを取得するためには、飛揚前の精度確認やその特性把握が重要となる。

現在高層気象台で現業観測に使用されている RS-11G 型 GPS ゾンデ(以下、「11G」という。)は、八丈島などで使用されている RS-06G 型 GPS ゾンデの後継機である。

RS-06G は現在までに幅広く利用されてきており、湿度センサについては温度依存による湿潤バイアス(Sugidachi and Fujiwara : 2013)や夜間の観測における対流圏中層での湿潤バイアス(Nash *et al.* : 2011)が指摘されるなど、その特性も明らかになってきているが、11G のセンサについては、まだ調査事例が少ない。また、館野は GRUAN (GCOS

Reference Upper Air Network) の一拠点となっており (GCOS : 2009, 2010), ラジオゾンデ観測の高精度化の面からも、ラジオゾンデセンサの特性把握は重要である (GCOS : 2007)。そこで、ラジオゾンデの湿度センサの評価を行い、湿度観測の精度を向上させるため、飛揚前点検の改良を検討した。

現在は、室内の気温・湿度による 1 点での飛揚前点検を実施している。しかし、湿度センサは気温や湿度雰囲気に依存する特性を持つことが考えられるため、より正確にラジオゾンデの精度を確認するためには、広範囲な湿度雰囲気での点検が必要である。本調査では、低湿度・高湿度雰囲気における点検手法の検討・試験を行った。

2. 点検容器内の気温・湿度雰囲気の確認試験

目的とする湿度雰囲気(0%RH および 100%RH 付近)を作成するため、以下に示す材料を使用して、密閉された点検容器内の気温・湿度変化の調査を行った。

- (a)モレキュラーシーブ
- (b)塩化ナトリウム飽和塩
- (c)硫酸カリウム飽和塩
- (d)常温水(20℃以下の水道水)

*高層気象台 観測第二課

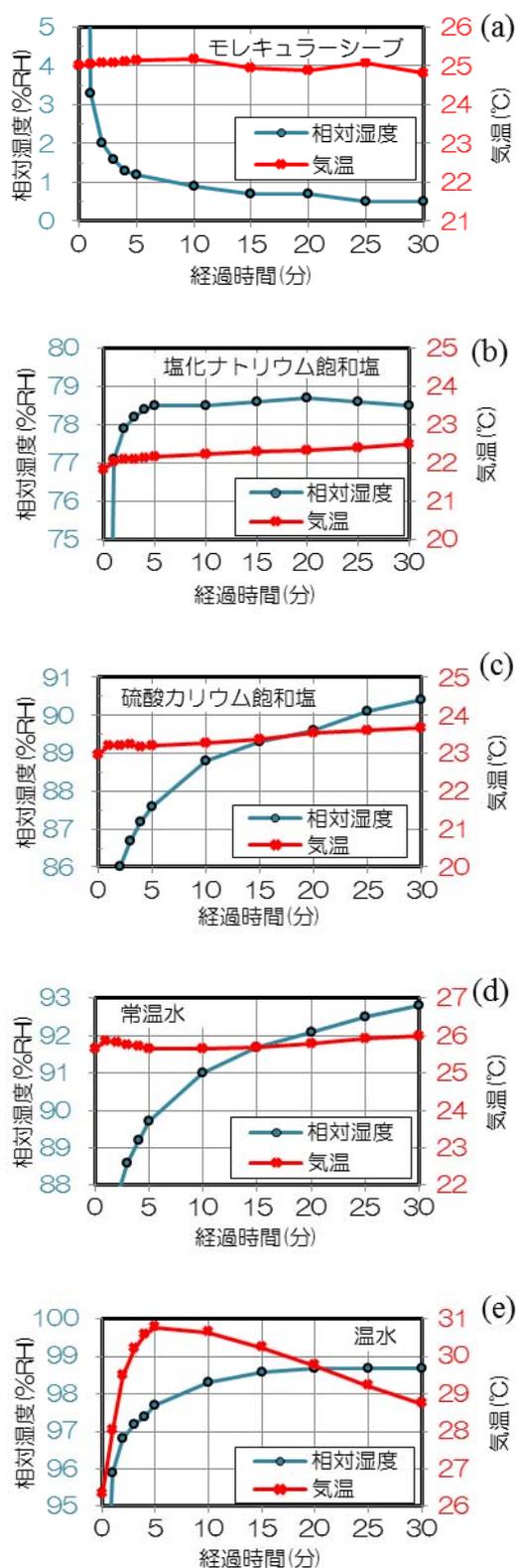


図1 各材料を入れた点検容器内における密閉直後から30分経過までの気温と湿度の変化。
 (a)モレキュラーシープ, (b)塩化ナトリウム飽和塩, (c)硫酸カリウム飽和塩, (d)常温水, (e)温水. 図中の気温線は溶液の水温線ではない.

(e)温水(測定開始時 35~40°Cの水道水)
 これらの材料のうち, (a)は低湿度雰囲気での点検, (b)~(e)は高湿度雰囲気での点検を目的として使用した. (b)の塩化ナトリウム飽和塩と(c)の硫酸カリウム飽和塩は公称湿度でそれぞれ 20°Cに対して 75%RH, 98%RH である (Greenspan : 1976). 塩化ナトリウム飽和塩は硫酸カリウム飽和塩に比べて湿度が低い, 室内湿度より高湿度な雰囲気を作成可能であり, 飽和塩の中では取扱が容易であるという利点がある. (e)の温水は, 加熱した水に冷水を加えて水温調節したものであり, 測定中は加熱等の水温調節は行わない.

2.1 調査方法

点検容器(150mm×100mm×98mm のプラスチック容器)に(a)~(e)の材料を入れて密閉し, 容器内の気温・湿度の変化を密閉開始から 30 分間計測した. また, 計測中は容器内部の空気を小型ファンにより攪拌した. 気温・湿度の測定に使用した測定器は Sensirion 社製の SHT11 (バンドキャップ式温度センサ, 静電容量式湿度センサ)である.

2.2 調査結果

図 1 に, 各材料での点検容器内の気温, 湿度の測定結果を示す. (a)のモレキュラーシープについては, 密閉後 5~10 分で低湿度に到達し, 湿度の変動が小さくなる. (b)の塩化ナトリウム飽和塩については, 5 分程度の比較的短時間で 78%RH 程度の安定した湿度雰囲気を作成できている. (c)の硫酸カリウム飽和塩については, 公称湿度では 98%RH であるが, 10 分後では 90%RH に達していない. 30 分以降も密閉状態のまま計測を続けたところ, 98%RH 近くに達するまでには 2 時間近くを要した. (d)の常温水を使用した場合, 10 分程度で湿度の変動は小さくなるがその後も上昇を続けている. 10 分間での到達湿度は 90%RH を少し超える程度である. (e)の温水を使用した場合は, 密閉直後から急激に湿度が上昇し, 5 分後には 97%RH を超える高湿度である. ただし, 試験開始時の水温と室温に差があるため, 常温水に比べると水温の変化による影響が大きく, 点検容器内の気温の変動が大きいことがわかる.

以上, 低湿度雰囲気の点検(以下, 0%RH 点検という.)については, モレキュラーシープを使用することで, 0.0%RH に近い雰囲気です所要時間 5~10 分程度で点検可能であるが, モレキュラーシープの劣化などにより点検容器内の湿度が変化するため, 基準器による同時測定が有効である. 一方, 高湿度雰囲気の点検(以下, 100%RH 点検という.)では, 塩化ナトリウム飽和塩(図 1(b))を使用

表 1 GPS ゾンデ及び基準器の仕様

	RS-11G 型 GPS ゾンデ(11G)		温湿度センサ HC2-S(HC2)	
	温度	湿度	温度	湿度
センサ	サーミスタ	静電容量式湿度センサ	PT100 Ω 1/3 class B	Hygromer®IN-1
計測範囲	-90℃～+40℃	0%RH～100%RH	-50℃～+100℃	0%RH～100%RH
計測精度	±0.5℃	±7.0%RH	±0.1℃(@23℃)	±0.8%RH(@23℃)
応答時間	0.5 秒以下 (1000hPa, 6m/s)	0.5 秒以下 (1000hPa, 6m/s, 25℃)	15 秒以下 (1m/s)	15 秒以下 (1m/s, 23℃)
備考	湿度センサにキャップあり		防塵用のポリエチレンフィルタ装備	

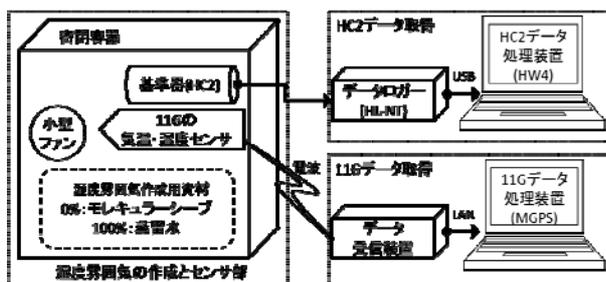


図 2 改良型飛揚前点検装置の概念図。

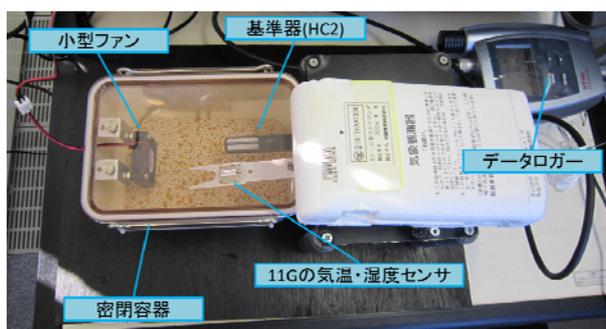


写真 1 改良型飛揚前点検装置の概観。

した場合は、5分程度で75～80%RHに安定したが、硫酸カリウム飽和塩(図1(c))を使用した場合、目的とする高湿度(98%RH)で容器内の雰囲気安定までの所要時間が30分以上必要であった。常温水を使用した場合(図1(d))も硫酸カリウム飽和塩(図1(c))と同様に短時間で湿度が安定できていないが、これは水温が室温よりも低い20℃以下の水道水を使用したことが原因であると考えられる。しかし、室温より高い温水(35℃, 図1(e))を使用した場合は気温の変動が大きすぎたことから、十分室温に馴染ませた常温水を使用することにより、安定した、より高湿度な雰囲気を短時間で作ることが可能であり、さらに蒸留水を使用することにより、センサの汚染を防げることが予想された。

これらのことから、飛揚前点検では、低湿度側ではモレキュラーシープを使用した0%RH点検、高湿度側では

常温の蒸留水を使用した100%RH点検が現実的であることがわかった。

3. 改良型飛揚前点検装置の作成と概要

今回作成した改良型飛揚前点検装置の概念図を図2に、概観を写真1に示す。点検容器には、150mm×100mm×98mmのプラスチック容器を使用する。規定の湿度雰囲気での点検を可能にするため、容器を密閉した状態で点検できるように加工を行った。また、容器内の空気を循環させるため、内部には小型ファンを設置した。点検の基準器には Rotronic 社製の温湿度センサ HC2-S(以下、HC2という。)を使用する。なお、この基準器は、国の校正機関の標準器でトレースされた標準器による検査を行っている。0%RH点検の時には、容器内にモレキュラーシープ(170g)を投入し、100%RH点検の時には、蒸留水(300cc)を投入する。100%RH点検ではできるだけ高い湿度雰囲気で実施することが望ましいが、水温については、気温の大きな変動を避けるためと、過度の高湿度から湿度センサを保護するため、室内に数時間置くことにより室温程度の20～30℃に調節し、試験中も加熱等の水温調節は行わない。

点検用のデータ取得には、HC2については Rotronic 社製のデータロガーHL-NT及びデータ収録用ソフトウェアHW4を使用し、パソコンで5秒間隔のデータ取得を行う。一方11Gのセンサによるデータ取得については、11Gの観測処理システムMGPSを使用して1秒間隔のデータ取得を行う。点検容器内が安定した状態での比較点検が望ましいことから、容器密閉開始から約10分間データ取得を行うこととした。各センサの出力データの小数点以下の有効桁数は、11Gが1桁、HC2が2桁である。なお、点検に使用する11GおよびHC2の温度、湿度センサの詳細を表1に示す(神栄テクノロジー株式会社:2013, Meisei)。

4. 点検試験の方法及び結果

3. で示した改良型飛揚前点検装置を使用して、2013年11月21日から12月9日の期間において、11Gの点検

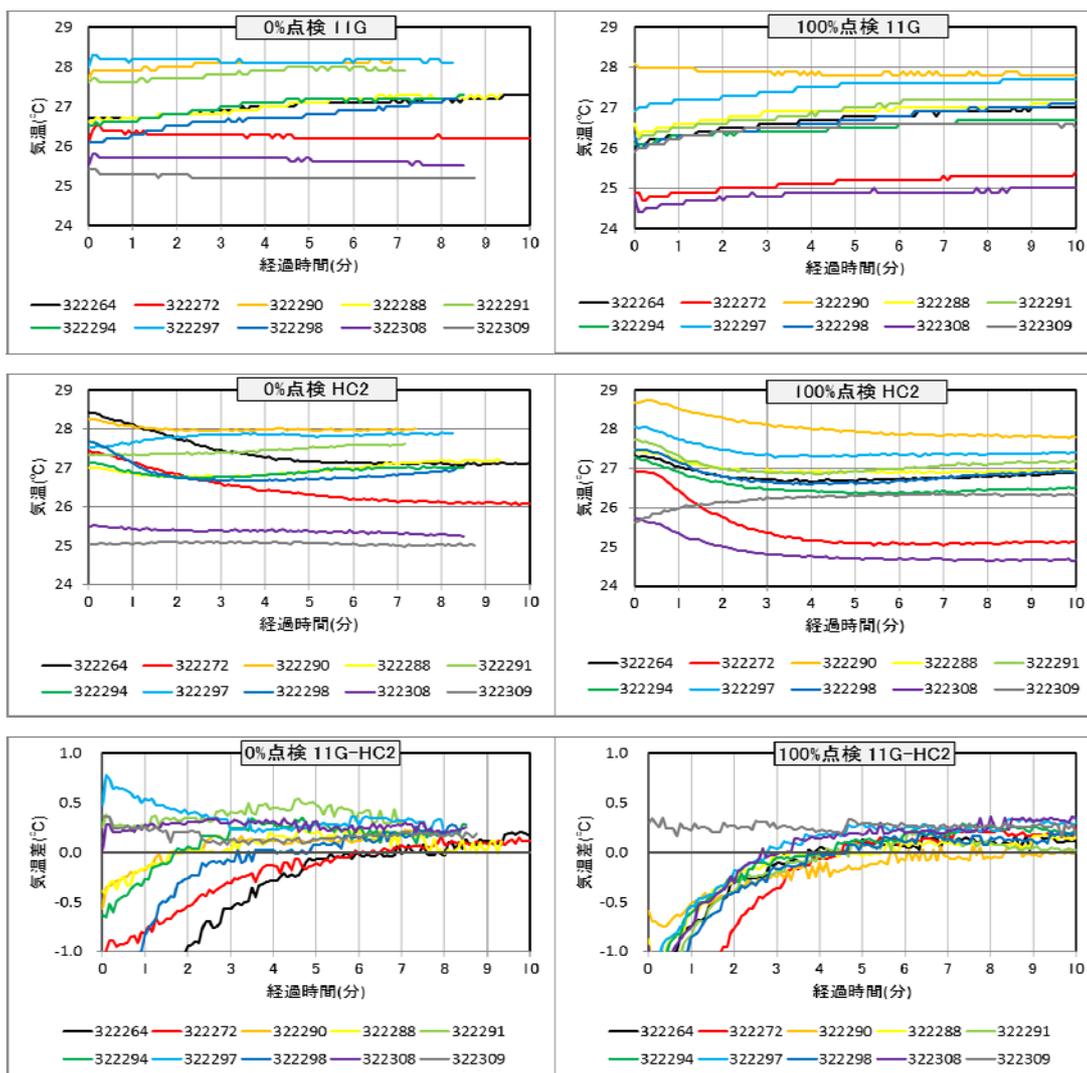


図 3 0%RH(左), 100%RH(右)点検試験における 11G(上), HC2(中)の気温測定値とそれらの差(下)の変化。
凡例の番号は、それぞれの試験における 11G のゾンデ番号。

試験を 10 回実施した。100%RH 点検に使用した水の水温は試験開始前で約 23.5~26.5°C の範囲で、点検室内の気温と同程度とした。点検時の 11G および HC2 の気温測定値と気温差(11G-HC2)の変化を図 3 に、湿度測定値と湿度差(11G-HC2)の変化を図 4 に示す。横軸は、容器を密閉し、ファンの駆動を開始してからの経過時間である。

気温測定値については、点検容器内雰囲気の確認試験の段階では 100%RH 点検で測定開始から 5 分目以降も変動が大きかったが(図 1(e)), 点検試験では水温を室温程度にした事で、5 分で測定値を安定させることができた。湿度測定値については、0%RH 点検では 5 分以上経過すると、すべての点検において HC2 が安定して 0.0%RH を示しているとともに、11G の測定値の変化量も ± 0.1%RH/5sec 程度となっていることから、安定したデータが取得できている。100%RH 点検では、5 分目以降も緩や

かに湿度が上昇を続ける事例が多いが、その変化は小さく、HC2 の測定値で ± 0.1%RH/5sec 程度であることから、比較点検の実施には十分安定した環境であると考えられる。6 分目以降の湿度は 95~99%RH 程度となり、蒸留水の水温が室温程度でも十分な高湿度雰囲気を作成できていることがわかる。

次に、個別のセンサの精度を確認する。図 3, 図 4 の開始から 5 分間のデータでは、11G と HC2 の周囲の気温・湿度変化に対するセンサの応答速度には差が見られる。表 1 の仕様によると、応答速度はそれぞれ 11G が 0.5 秒、HC2 が 15 秒で大きな差がある。そこで、すべての気温差・湿度差のグラフにおいて、差の変動が小さくなる 5 分以降は点検容器内の気温・湿度とも安定したと判断し、5 分以降の 5 秒間隔のデータを比較点検に使用した。比較するデータは、本稿では室内の気温・湿度 1 点による点

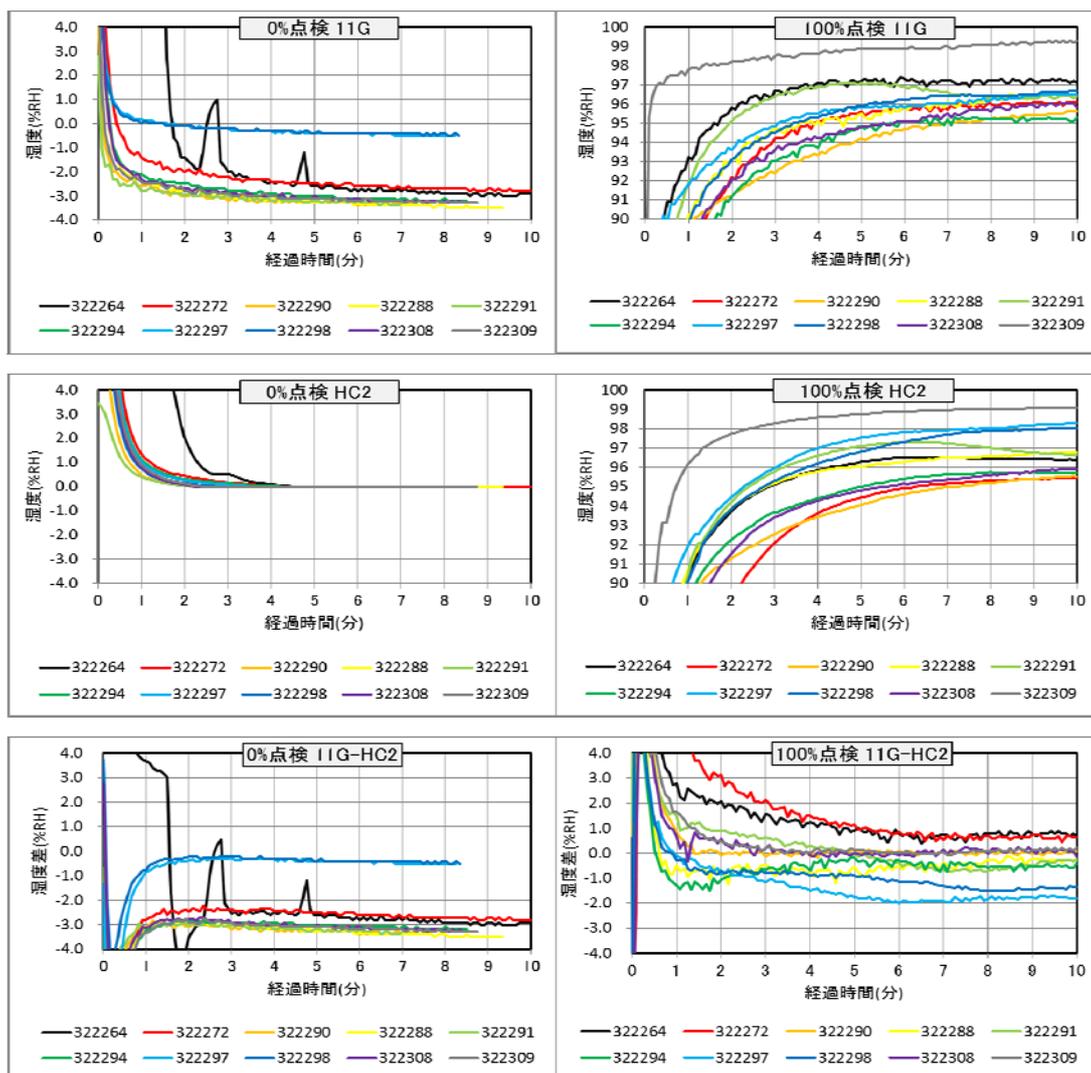


図4 図3に同じ。ただし、湿度測定値とそれらの差。

検手法に合わせるため、平均値ではなく測定値をそのまま使用し、変動の小さい時刻におけるそれぞれのセンサ測定値を代表値として比較を行った。

変動の小さい時刻の代表値は次の手順で選択した。はじめに、湿度差の5～10分目の毎正分を中心とした前後30秒の1分平均値を求める。次にそれぞれの平均値の前1分平均値からの差を求め、その変化量が一番小さい時刻(正分)の測定値を代表値とした(湿度の変化量が同じ時刻が複数ある場合は、さらに気温差の平均値でも変化量が最小の正分値を代表値とした)。表2に、比較時における11GおよびHC2の気温・湿度測定値とそれらの差を示す。

気温差については、 $-0.1 \sim +0.4^{\circ}\text{C}$ の範囲であり、11Gの測定値が高い傾向があった。湿度差は、0%RH点検では $-3.5 \sim -0.4\%RH$ で11Gの測定値が低い傾向があり、100%RH点検では $-1.9 \sim +0.8\%RH$ となった。今回の試験で使用した11Gについては、気温・湿度ともに現業の飛揚前点検にお

けるセンサの合格基準($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, $\pm 7\%RH$)の範囲内であったが、0%RH点検における湿度センサの差が大きい特徴が見られた。

上で述べたように、広範囲な湿度雰囲気での点検を行うことによって、センサの詳細な情報を事前に得ることができた。観測時にはこれらの誤差を補正することによって、11Gでの高精度な湿度測定が可能となる。

5. まとめ

ラジオゾンデによる湿度観測精度を向上させるため、低湿度と高湿度雰囲気での湿度センサ飛揚前点検手法の検討および試験を行った。密閉された点検容器内の気温・湿度の変化を調査した結果、モレキュラーシーブと蒸留水を使用することによって容易に且つ比較的短時間で、0%RH及び100%RH付近の湿度雰囲気における比較点検を実施できることがわかった。

表2 点検試験時の各センサにおける気温・湿度測定値とその差

点検日	ゾンデ番号	気温						湿度					
		0%RH点検 (°C)			100%RH点検 (°C)			0%RH点検 (%RH)			100%RH点検 (%RH)		
		11G	HC2	11G-HC2	11G	HC2	11G-HC2	11G	HC2	11G-HC2	11G	HC2	11G-HC2
11/21	322264	27.2	27.1	0.1	27.0	26.8	0.2	-2.9	0.0	-2.9	97.2	96.4	0.8
11/25	322272	26.2	26.1	0.1	25.3	25.1	0.2	-2.7	0.0	-2.7	96.1	95.4	0.7
11/29	322290	28.2	28.0	0.2	27.8	27.9	-0.1	-3.4	0.0	-3.4	95.2	95.2	0.0
12/2	322288	27.2	27.2	0.0	27.0	26.9	0.1	-3.5	0.0	-3.5	96.1	96.5	-0.4
12/3	322291	28.0	27.6	0.4	27.2	27.1	0.1	-3.2	0.0	-3.2	96.3	97.0	-0.7
12/3	322294	27.2	27.0	0.2	26.7	26.5	0.3	-3.1	0.0	-3.1	95.2	95.8	-0.6
12/5	322297	28.1	27.8	0.3	27.6	27.4	0.2	-0.4	0.0	-0.4	96.0	97.9	-1.9
12/5	322298	27.0	26.8	0.2	27.0	26.9	0.1	-0.4	0.0	-0.4	96.5	97.9	-1.4
12/9	322308	25.6	25.3	0.3	24.9	24.7	0.2	-3.2	0.0	-3.2	94.8	94.8	0.0
12/9	322309	25.2	25.0	0.2	26.6	26.3	0.3	-3.3	0.0	-3.3	98.9	98.8	0.1

0%RH点検については5分以上密閉させることにより、0.0%RHを基準として点検可能であることを確認した。モレキュラーシーブを使用した0%RH点検はVaisala社製のRS92-SGP型GPSゾンデ(以下、RS92という。)の飛揚前点検でも実施されてきたが、RS92の点検では基準となる湿度計での比較測定を行っていないため、モレキュラーシーブの状態によっては正確に点検できていない可能性が指摘されている(Miloshevich *et al.*: 2009)。今回の手法では同時に基準器でも測定することにより、モレキュラーシーブの劣化の状態も把握できるため、従来の手法よりも正確に点検を実施できる。

100%RH点検については、常温水(室温程度の蒸留水)を使用することによって95%RH程度の雰囲気での点検可能であることを確認した。

飛揚前にラジオゾンデセンサの精密な点検を実施しておくことによって、その点検データを、観測データの補正值や特性調査に利用することや、センサの異常を事前に把握できる可能性が大きくなり、飛揚時に得られた観測データの精度向上に役立てることができる。

今回の点検試験でのラジオゾンデのデータ取得は、飛揚中と同じ状態の無線を利用し、観測処理プログラムを使用した方法で行ったが、今後現業に導入するためには、点検用のデータ処理プログラムなどを見直して、より簡便なデータ取得方法にすることが必要である。今後は、作成した点検装置で得られた低・高湿度点検データと、現在行っている室内気温・湿度雰囲気での湿度点検データを測定値の校正データとして利用して、高精度なラジオゾンデ湿度観測値を取得するための方法を検討する予定である。なお、今回と同様の手法を用いることにより、他のラジオゾンデについても精密な飛揚前点検が可能であることから、現在週1回使用されているRS92についても、この飛揚前点検の導入を検討している。

謝 辞

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

引用文献

- Greenspan, L. (1976): Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions. *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, **81A**, No.1 89 - 96.
- GCOS (Global Climate Observing System) (2007): GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN): Justification, requirements, siting and instrumentation options. GCOS-112, WMO/TD-No.1379.
- GCOS (Global Climate Observing System) (2009): GRUAN Implementation Plan 2009-2013. GCOS-134, WMO/TD-No.1506.
- GCOS (Global Climate Observing System) (2010): Report of the Second GCOS Reference Upper Air Network Implementation and Coordination Meeting (GRUAN ICM-2). GCOS-140, WMO/TD-No.1526.
- Meisei: GPS Radiosonde RS-11G. Meisei, [Available online at http://www.meisei.co.jp/english/products/RS-11G_E.pdf, accessed January 9, 2014].
- Miloshevich, L. M., H. Vömel, D. N. Whiteman and T. Leblanc (2009): Accuracy assessment and correction of Vaisala RS92 radiosonde water vapor measurements. *J. Geophys. Res.*, **114**, D11305.
- Nash, J., T. Oakley, H. Vömel, and LI Wei (2011): WMO Intercomparison of high quality radiosonde observing systems Yangjiang, China, 12 July-3 August 2010. WMO/TD-No.1580.
- 神栄テクノロジー株式会社 (2013): 温湿度センサプローブ ハイグロクリップ2シリーズカタログ. 神栄テクノロジー株式会社, [Available online at http://www.rotronic.jp/pdf/br_hc2.pdf, accessed January 9, 2014].
- Sugidachi, T., M. Fujiwara (2013): Correction of the Stepwise Change Observed at 0°C in Meisei RS2-91, RS-01G, and RS-06G Radiosonde Relative Humidity Profiles. *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 91, No. 3, pp. 323 - 336.