

Cryogenic Frost point Hygrometer (CFH) と GPS ゾンデの比較観測の実施

古林 絵里子*

Operation of Comparison of Cryogenic Frost point Hygrometer (CFH) and GPS sondes

Eriko KOBAYASHI

要旨

高層気象台(Tateno)は 2009 年 9 月から全球気候監視システム基準高層気象観測網(GRUAN)の観測サイトとして活動をしており, 毎日 2 回 GPS ゾンデによる観測を実施しているほか, 2015 年からは GRUAN で要求されている高性能基準ゾンデによる観測として, 鏡面冷却式露点霜点計(CFH)を使用した GPS ゾンデとの比較観測を年 2 回実施している. CFH の観測データは同時に飛揚する GPS ゾンデのデータから作成した GRUAN データプロダクトの相対湿度の精度評価に使用されており, 2016 年~2018 年に実施された比較観測データを解析した結果, RS-11G 型 GPS ゾンデと iMS-100 型 GPS ゾンデの相対湿度について, 高度 2000m より下層では CFH に比べて 1~5%RH 低く, 5000m 付近では逆に 1~2%RH 程度高い特性が見られた. また, RS92-SGP 型 GPS ゾンデについては他のゾンデに比べて CFH との差が小さい結果となった. GRUAN の目的は長期的な高精度の気候データの提供であるため, 本研究で得られた各 GPS ゾンデの特性を GRUAN データプロダクトの精度向上に役立てることが重要であり, そのためには引き続き高性能基準ゾンデと GPS ゾンデとの比較観測による GRUAN データプロダクトの評価・検証を行う必要がある.

1. はじめに

高層気象台は, 2009 年 9 月に全球気候監視システム(GCOS : Global Climate Observing System)基準高層気象観測網(Reference Upper Air Network, 以下, GRUAN)で観測サイトの一員として活動を開始し(登録サイト名:Tateno), 2018年4月18日にGRUANサイト認証を受けた. GRUANでは気候監視を目的として高層観測の基準となるべく高精度な観測を実施するとともに, 観測に関するメタデータの提供や高性能な基準ゾンデによる定期的な観測ができる観測網を目指している(能登ほか:2012). 高層気象台では毎日 2 回 GPS ゾンデを飛揚し, 週 1 回 GRUAN の認証を受けた GPS ゾンデとの比較観測を行い, これらの観測のメタ情報を含む観測データを GRUAN リードセンターに提供しているほか, 毎日の観測で使用する GPS ゾンデの機種変更の際の 1 年にわたる新旧 GPS ゾンデ比較観測(古林:2015), リモートセンシング機器による観測(岩淵:2012), 2015 年からは高性能基準ゾンデによる観測を行ってきた. 本報告では, GRUAN データプロダクトにお

ける相対湿度の精度評価や特性調査のために 2015 年から高層気象台で実施されている, 水蒸気観測用の高性能基準ゾンデ Cryogenic Frost point Hygrometer (以下, CFH)と GPS ゾンデによる比較観測の概要を報告する. なお, 本報告で使用する高度はすべてジオポテンシャル高度を示すものとする.

2. 比較観測に使用する観測機器

2.1 CFH

CFH はコロラド大学で開発・改良された鏡面冷却式露点霜点計である(Vömel *et al.* : 2007, 杉立・藤原:2014). ゴム気球で飛揚し, 露点又は霜点を高精度で観測することにより地表から成層圏における水蒸気量を測定できる. CFHの外観を写真 1 に, CFHの観測準備の様子を写真2, 写真 3 に示す. CFH は鏡面冷却式の測定原理を利用しており, 冷媒(CHF3)により鏡面を冷却し鏡面に露又は霜を生成させる. 露又は霜の量は鏡面に反射させた光の反射強度でモニターし, 一定の厚さを保つようにコントロールされ, その時の鏡面温度をセンサを通過する大気の露点又は霜点温度として測定する(Vömel *et al.* : 2007).

*高層気象台 観測第一課



写真1 CFHの外観

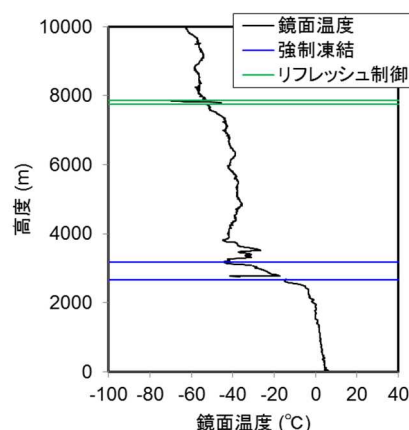


図1 2018年4月20日14:50飛揚のCFHの観測における鏡面温度の変化



写真2 CFHによる観測準備作業の様子

左：CFH センサ本体の組み立て，右：ダクトの取り付け。



写真3 CFHに使用する冷媒の準備の様子

CFH による観測準備作業としては、鏡面の反射強度の調整、インターフェースボードの組み立てと本体への格納(写真2の左)、CFH データの取得・送信に使用するベースゾンデの飛揚前点検(高層気象台で使用しているRS-11G型GPSゾンデの場合は気温、相対湿度、GPS信号受信状態を点検)、ダクトの取り付け(写真2の右)などの作業がある。冷媒は、観測の4~5時間前からドライアイスで冷却し(写真3の左)、観測直前にCFHに注入する(写真3の右)。

鏡面冷却式露点霜点計では、鏡面上の凝結物が露の場

合は露点温度、霜の場合は霜点温度を示す。したがって、鏡面温度を正確に測定するためには鏡面上の凝結物の相を判断する必要がある。CFHの観測における鏡面温度の変化の例として図1に2018年4月20日14:50飛揚の観測における鏡面温度を示す。CFHでは露点から霜点への切り替えを明確にするため、鏡面温度が -15°C 付近で強制的に -38°C まで冷却し、鏡面上の水滴を氷に変化させている(図1の強制凍結, Vömel *et al.*: 2007, Vömel *et al.*: 2016, 杉立・藤原: 2014)。また、通常大気中で見られる氷は六方晶系の結晶構造を持つが、 -73°C (200K)以下の低温では立方晶系の結晶構造をもつ氷が存在することがある。立方晶系の氷の水蒸気分圧は六方晶系の氷に比べて3%から11%高いため、霜点温度を低めに測定してしまうおそれがある。そのため、CFHでは鏡面温度が -53°C (220K)になった時に鏡面上の霜を蒸発させ(図1のリフレッシュ制御)、新たに六方晶系の霜を作り、それより上空ではその霜を維持させている(Vömel *et al.*: 2007, 杉立・藤原: 2014)。データ解析ではこれらの強制凍結区間及びリフレッシュ制御区間のCFHのデータは使用しない。

高層気象台で実施しているCFH観測では、データ受信用のベースゾンデとして明星電気社製のRS-11G型GPSゾンデを使用しているため、同社製の観測処理プログラムMGPS_RによりCFHのデータ処理を行う。高層気象台では2017年11月まではMGPS_RのVer.3.7を、それ以降はVer.3.10を使用しており、Ver.3.10ではベースゾンデの日射補正式が改良されている。MGPS_RではCFHにより得られた露点霜点温度から相対湿度を算出するため、次に示すHyland and Wexlerの関係式(Hyland and Wexler: 1983, Meisei 簡易GPSゾンデ受信システム取扱説明書)を用いて飽和水蒸気圧を算出している。

表 1 各 GPS ゾンデの仕様(Kizu *et al.* : 2018, Dirksen *et al.* : 2014)

	RS-11G 型 GPS ゾンデ	iMS-100 型 GPS ゾンデ	RS92-SGP 型 GPS ゾンデ
気温	サーミスタ温度計	サーミスタ温度計	静電容量式ワイヤ温度計
相対湿度	静電容量式湿度計 (防雨キャップ付)	静電容量式湿度計 (防雨キャップ, 温度計付)	薄膜静電容量式加熱 2 センサ湿度計
気圧	GPS 測位による高度と気温・相対湿度から算出	GPS 測位による高度と気温・相対湿度から算出	シリコンセンサ気圧計
風向・風速	GPS 信号から算出	GPS 信号から算出	GPS 信号から算出

表 2 CFH による観測実施日と地上気象観測データ

雲, 現在天気は国際気象通報式による表記. 雲は左から全雲量 $N(8 \text{ 分比})$, 下層雲量 N_b , 下層雲の型 C_L , 雲底高度 h , 中層雲の型 C_M , 上層雲の型 C_H を, 現在天気は ww を示す(気象庁: 1990).

	飛揚日時	地上気象観測データ							到達高度		上昇速度 (m/s)	浮力 (g)	比較 ゾンデ
		気圧 (hPa)	気温 (°C)	相対湿度 (%RH)	風向 (°)	風速 (m/s)	雲	現在 天気	気圧 (hPa)	高度 (m)			
1	2015/11/17 14:30	1013.1	19.7	80	360	1.2	88097/	02	5.2	35133	5.6	2800	11G
2	2016/4/18 15:07	1004.0	18.4	57	80	3.2	817/2/	61	34.8	22841	4.3	2800	11G
3	2016/11/10 14:50	1021.3	10.1	47	90	2.0	828/32	02	4.8	35612	5.7	2800	11G
4	2017/9/29 14:35	1009.6	24.2	51	180	2.1	111/00	02	6.8	33874	5.4	2800	11G, iMS
5	2018/1/16 14:30	1016.2	12.4	61	110	2.4	710935	02	5.6	34890	5.4	2800	11G, iMS
6	2018/4/20 14:50	1013.6	23.3	34	100	3.6	111/00	02	9.3	31532	5.7	3400	11G, iMS, RS92

露点温度から飽和水蒸気圧を算出する場合:

$$\ln(e_{liq}) = -5800.2206/T + 1.3914993 - 0.48640239 \times 10^{-1} \cdot T + 0.41764768 \times 10^{-4} \cdot T^2 - 0.14452093 \times 10^{-7} \cdot T^3 + 6.5459673 \cdot \ln(T) \quad (1)$$

e_{liq} : 水の周りの飽和水蒸気圧(Pa)

T: 温度(K)

霜点温度から飽和水蒸気圧を算出する場合:

$$\ln(e_{ice}) = -5674.5359/T + 6.3925247 - 0.96778430 \times 10^{-2} \cdot T + 0.62215701 \times 10^{-6} \cdot T^2 + 0.20747825 \times 10^{-8} \cdot T^3 - 0.94840240 \times 10^{-12} \cdot T^4 + 4.1635019 \cdot \ln(T) \quad (2)$$

e_{ice} : 氷の周りの飽和水蒸気圧(Pa)

T: 温度(K)

なお, Vömel *et al.*(2007)によると, CFH による露点霜点温度の測定の不確かさは 0.51°C , 水蒸気観測の不確かさについては熱帯域下部対流圏で 4%以内, 中部成層圏では 10%以内である.

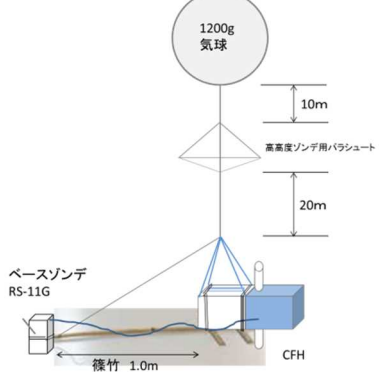
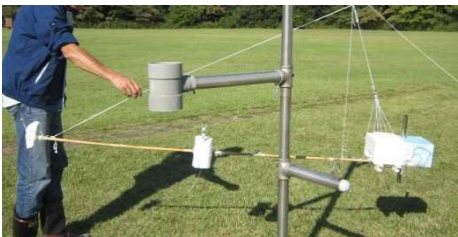
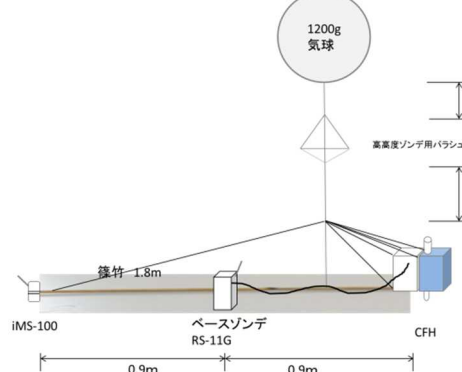
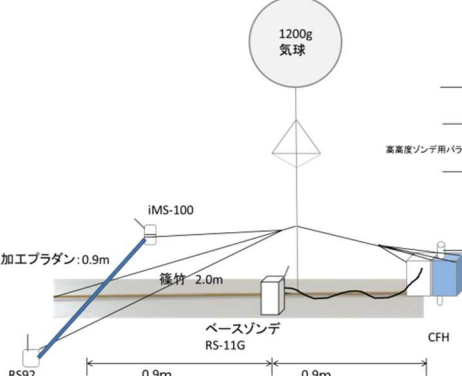
2.2 GPS ゾンデ

GPS ゾンデは, 明星電気社製 RS-11G 型 GPS ゾンデ(以下, 11G)と iMS-100 型 GPS ゾンデ(以下, iMS), 及び Vaisala 社製 RS92-SGP 型 GPS ゾンデ(以下, RS92)である. これらの GPS ゾンデはこれまで, 高層気象台において毎日の観測に使用されてきたものである. 各ゾンデの仕様を表 1

に示す. 湿度センサの温度は, 日射の影響やセンサ自身の熱容量のため必ずしも気温と一致するとは限らないことから, 相対湿度の観測精度向上のためには湿度センサの温度を正しく見積もる必要がある. 表 1 の GPS ゾンデの中では iMS のみ湿度センサ専用の温度計が搭載されており, その測定値は相対湿度の補正量の見積もりに使用されている. また, RS92 の湿度センサは 2 センサであり, 観測中に交互に加熱することにより汚染除去を行いながら測定を行う特徴がある.

11G と iMS から受信した信号の処理にはそれぞれ明星電気社製の MGPS_R 及び MGPS2 を使用し, RS92 は Vaisala 社製の DigiCORA III で処理を行うが, 本報告では比較用のデータとして GRUAN データプロダクト(以下, GDP)を作成して使用する. GDP は, データのトレーサビリティが確保されている, 不確かさの情報やデータの再処理に必要なメタデータが付加されている, 処理方法が論文などで公開されているなどの基準を満たすものである(星野ほか: 2016). 公開されたデータは National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) の National Climate Data Center (NCDC) から取得可能である. それぞれの GDP については, 11G 及び iMS は Kizu *et al.*(2018), RS92 は Dirksen *et al.*(2014)に詳細が示されているが, 相対湿度のデータ処理の概要は次の通りである.

表 3 飛揚準備の様子と飛揚形態

飛揚準備	飛揚形態
飛揚日：2015/11/17 	
飛揚日：2018/1/16 	
飛揚日：2018/4/20 	

11G と iMS の GDP における相対湿度の算出ではセンサのタイムラグ補正，雨や雲によりセンサ等に着水・着氷した場合の影響の除去，センサの温度依存性の補正，センサ温度と気温の差による影響の補正が行われている．相対湿度の各補正に使用される湿度センサ温度の見積もりについては，11G は気温観測用の温度センサで測定された値から推定し，iMS は湿度センサ専用温度計の測定値を使用するという違いがある(Kizu *et al.* : 2018)．また，比較観測に使用される iMS の湿度センサについては，飛揚前に低湿度と高湿度における点検を実施しており，その点検データは湿度センサの校正曲線の補正に利用されている(星野ほか：2016)．なお，低湿度と高湿度における点検

により湿度センサの特性に影響が出る可能性も考えられるが，低湿度と高湿度における点検の前後で実施した中間湿度(約 20%RH～70%RH の環境)における点検結果から判断すると，測定値の変動幅はおおよそ $\pm 1.5\%RH$ の範囲であり，メーカーが保証している 11G と iMS の計測精度 5%RH よりも小さい．また，高湿度における点検後の湿度センサは飛揚直前まで低湿環境で保管していることから，点検によるセンサ特性への影響は小さいと考えられる．

RS92 の GDP における相対湿度の算出ではセンサのタイムラグ補正，センサの温度依存性の補正，日射による影響の補正が行われている(Dirksen *et al.* : 2014)．

3. 比較観測の実施方法

高層気象台における CFH による観測は 2015 年から年 2 回程度実施されている。これまでの観測実施日と地上気象データを表 2 に示す。気球の到達高度は 22km~35km であるが、2015 年 11 月と 2016 年 4 月の観測では厚い中層雲を通過したことによるセンサへの汚染の影響などにより、成層圏では CFH の安定したデータが取得できなかった。2017 年 9 月と 2018 年 4 月は快晴での飛揚となった。2016 年 11 月までは CFH とベースゾンデである 11G のみの飛揚であったが、2017 年 9 月からは現在毎日の観測で使用されている iMS を連結飛揚し、2018 年 4 月の観測では GRUAN 認証ゾンデである RS92 も連結飛揚している。2015 年 11 月(11G と CFH)、2018 年 1 月(11G、iMS と CFH)、2018 年 4 月(11G、iMS、RS92 と CFH)の飛揚準備の様子と

飛揚形態模式図を表 3 に示す。観測では 1200g 気球を使用しており、気球と観測器材の間は 30m のつり紐で連結している。連結棒については竹、又はプラスチックダンボールにアルミテープを巻いたものを使用し、データ受信時に CFH 本体からのノイズの影響を避けるため CFH とベースゾンデの間は約 1m の間隔をとっている。

4. 比較結果

各比較観測で得られた GDP による相対湿度データについて CFH を基準として評価を行った。本稿では CFH の安定した観測データが圏界面より高い高度まで得られた 2016 年 11 月以降の観測結果について示す。

図 2~図 5 は 2016 年 11 月~2018 年 4 月に行われた比較観測の気温と相対湿度の結果である。図中の CFH の相対

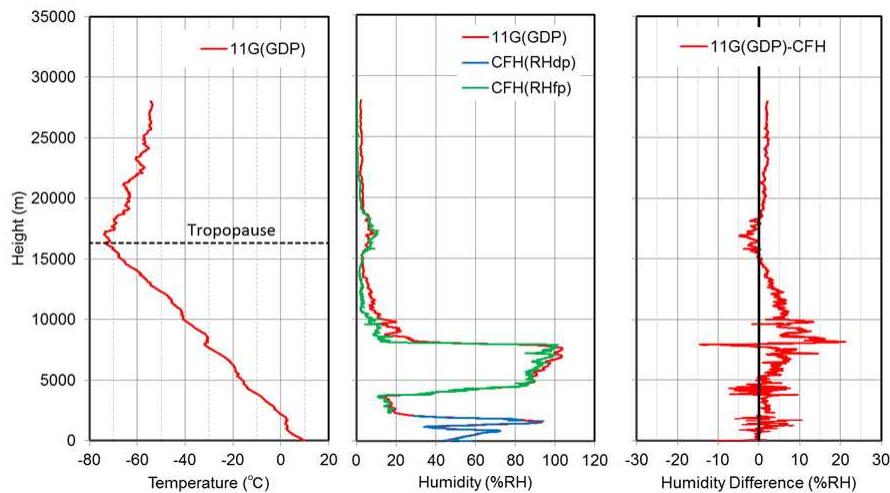


図 2 2016 年 11 月 10 日 14:50 飛揚の CFH、11G による比較観測。

左：気温，中央：相対湿度，右：相対湿度差(ゾンデ-CFH)。中央の青線と緑線はそれぞれ露点・霜点温度から求めた CFH の相対湿度。

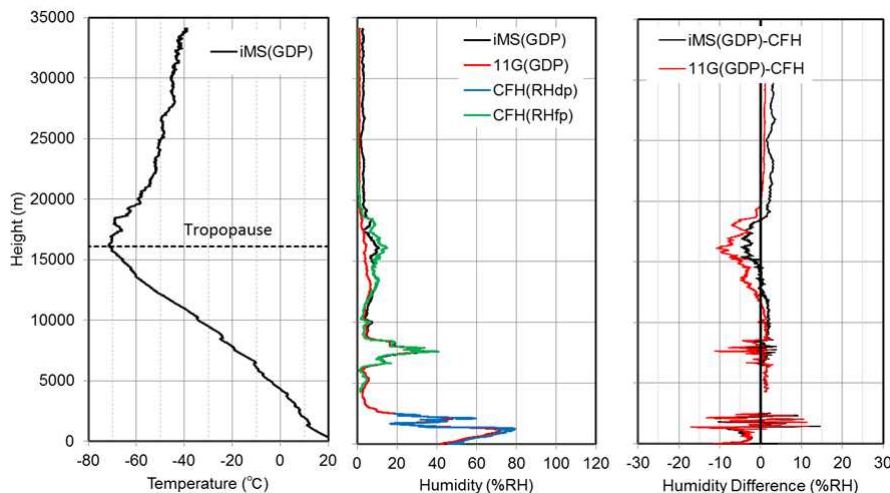


図 3 図 2 に同じ。ただし 2017 年 9 月 29 日 14:35 飛揚の CFH、11G、iMS による比較観測結果。

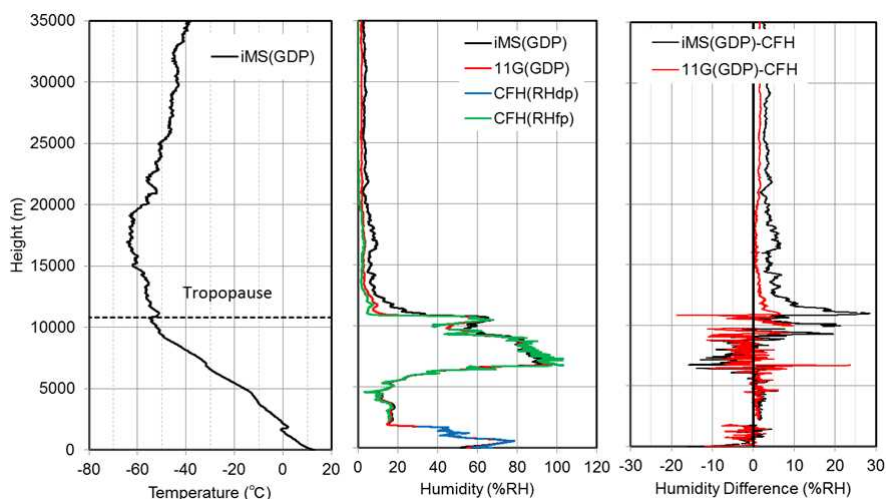


図 4 図 2 に同じ。ただし 2018 年 1 月 16 日 14:30 飛揚の CFH, 11G, iMS による比較観測結果。

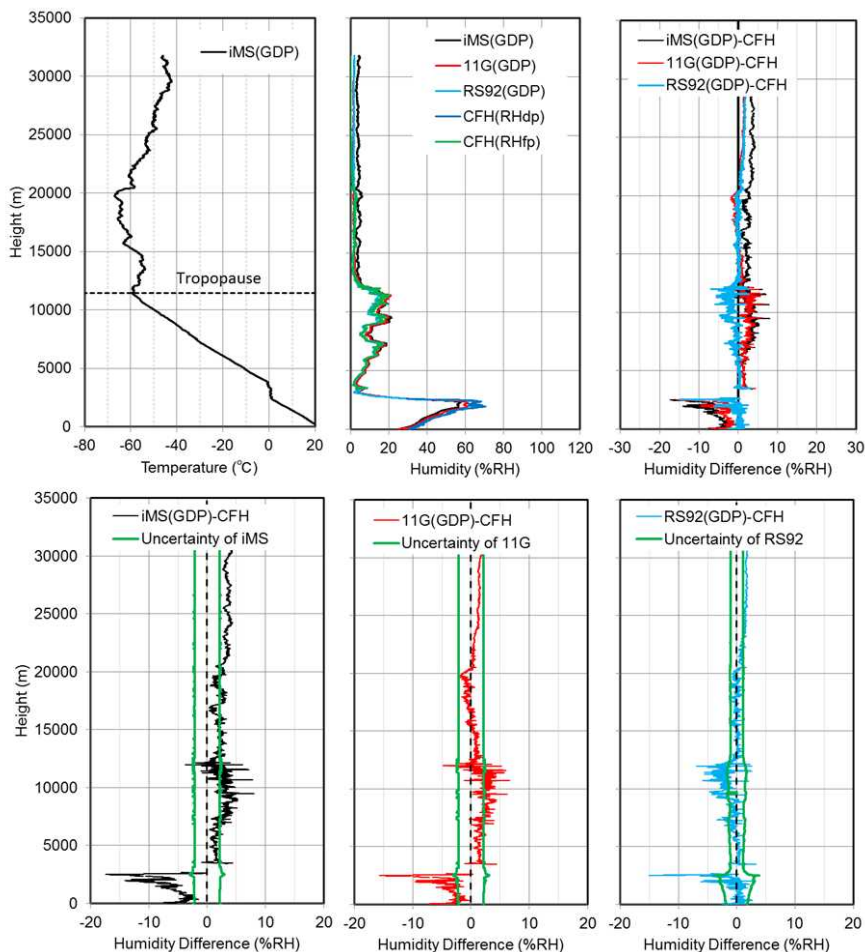


図 5 2018 年 4 月 20 日 14:50 飛揚の CFH, 11G, iMS, RS92 による比較観測結果。

左上：気温，中央上：相対湿度，右上：相対湿度差(ゾンデ-CFH)，下：各ゾンデの相対湿度差と相対湿度の不確かさで左から iMS, 11G, RS92。

湿度は、青線が露点温度(RHdp)、緑線が霜点温度(RHfp)を表している。2017 年 9 月(図 3), 2018 年 1 月(図 4), 2018 年 4 月(図 5)の観測では 2000m より下層において iMS と

11G とともに CFH より低湿で、差は-1~-5%RH であり、5000m 付近では逆に CFH に比べて 1~2%RH 高湿となっている。iMS と 11G の相対湿度算出において必要な湿度

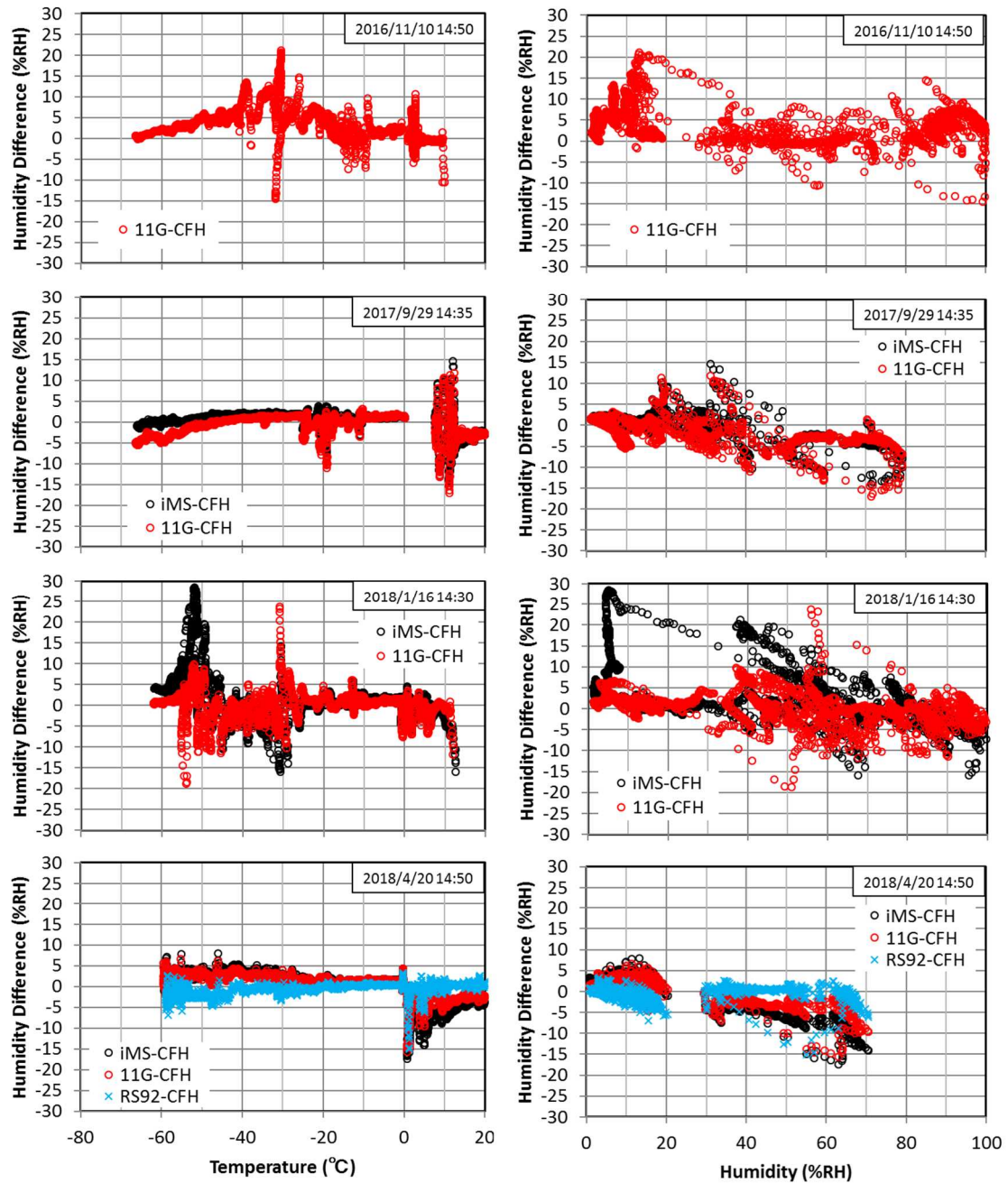


図 6 各比較観測における相対湿度差(ゾンデ-CFH, %)と気温(左), 相対湿度(右)の関係

上から 2016/11/10, 2017/9/29, 2018/1/16, 2018/4/20 の観測結果. 赤: 11G-CFH, 黒: iMS-CFH, 水色: RS92-CFH.

センサ温度は, 600hPa から上層においては iMS では湿度センサ専用の温度計の測定値を使用し, 11G では気温測定値から推定した値を使用しているが, 600hPa より下層においては, iMS と 11G どちらも気温測定値をそのまま使用しているため(Kizu *et al.*: 2018), 実際の湿度センサ温度とずれがあり, これが CFH との相対湿度差の原因となっていると考えられる. このため, 600hPa より下層においても, iMS では湿度センサ温度の測定値を, 11G では推定

値を使用することで, より正確な相対湿度を求められると期待され, 下層で見られた乾燥バイアスが改善される可能性がある. ただし湿度センサ温度を下層から使用する効果については別途検証が必要である. また 5000m 付近の湿潤バイアスについては, それより下層で比較的高湿度の層を通過したことによりヒステリシスの影響を受けている可能性がある. 2016 年 11 月の観測(図 2)の 8000m 付近及び 2018 年 1 月の 10000m 付近では相対湿度が高湿

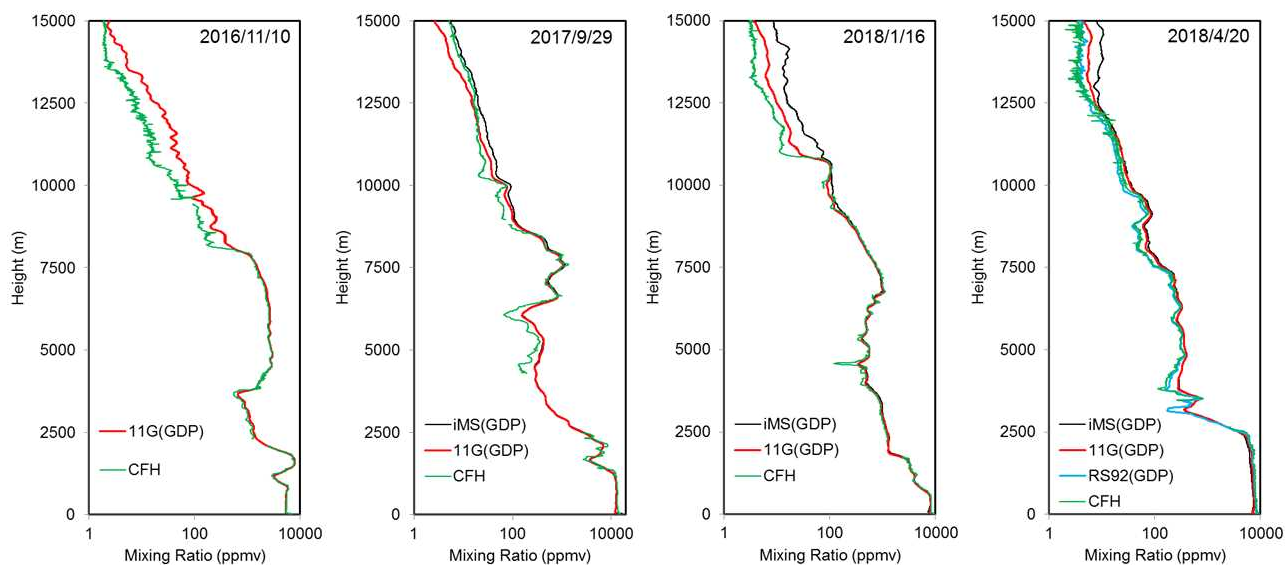


図 7 各比較観測における体積混合比

左から 2016/11/10, 2017/9/29, 2018/1/16, 2018/4/20 の観測結果. 赤: 11G, 黒: iMS, 水色: RS92, 緑: CFH.

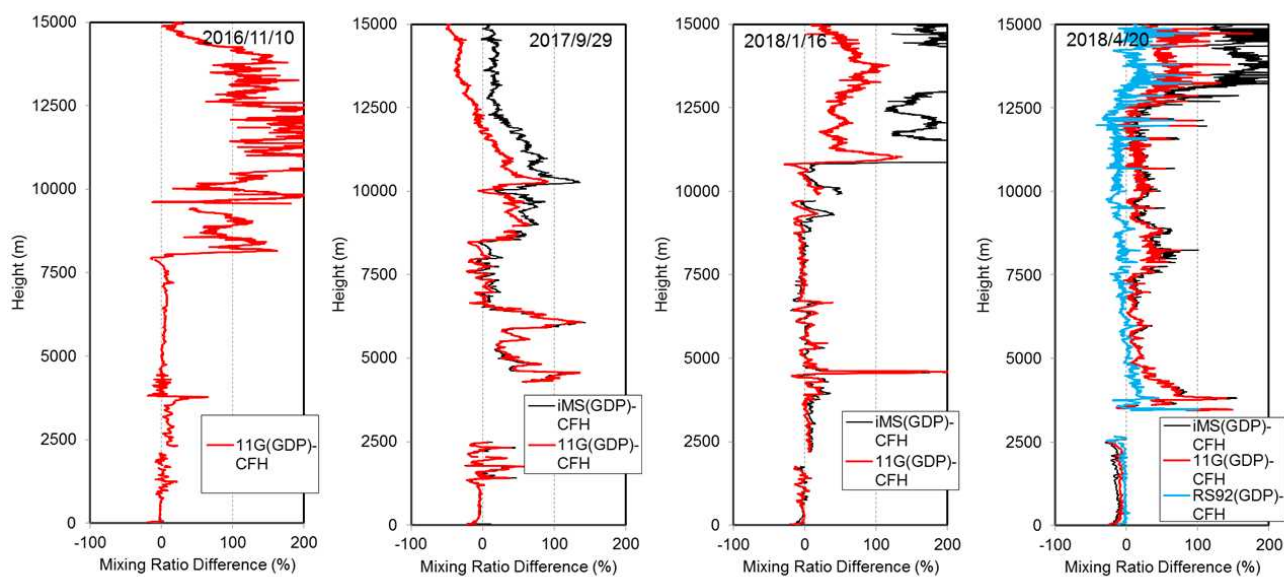


図 8 各比較観測における体積混合比の差(各 GPS ゾンデ-CFH)

横軸は CFH による混合比の値に対する混合比の差の割合. 左から 2016/11/10, 2017/9/29, 2018/1/16, 2018/4/20 の観測結果.

赤: 11G-CFH, 黒: iMS-CFH, 水色: RS92-CFH.

度から低湿度へ急変しているが, iMS, 11G とともにそれより上空で CFH に比べて 10~20%RH 高湿の値を示している. このような相対湿度の急変域ではゾンデの湿度センサが持つヒステリシス特性やタイムラグの影響などが考えられる. iMS と 11G の GDP ではセンサのタイムラグの補正において補正量の過大評価を避けるため低湿度から高湿度へ変化する場合の応答時間を補正值のパラメータ

として使用しているため(Kizu *et al.*: 2018), より応答時間が長くなる高湿度から低湿度へ変化する場合は補正量が過小評価となり湿潤バイアスが残る可能性がある. 2016 年 11 月と 2017 年 9 月の観測では圏界面付近において iMS, 11G とともに CFH に比べて最大で 5~10%RH 程度低湿となっているが, これらの観測における圏界面付近の気温は -70℃ を下回っており他の 2 観測よりも低温であることが

ら、湿度センサの時定数がより大きくなり、実際の湿度変化を捉え切れていないことが考えられる。また、iMSと11Gの湿度センサは、 -60°C より低温で乾燥バイアスとなる温度依存性があり、低温ほどその乾燥バイアスが大きくなる特性がメーカーの実施した特性試験によりわかっているが(Kizu *et al.* : 2018), この温度依存性に伴う補正量の見積もりが不十分である可能性が考えられる。2018年1月のiMSと11G, 2018年4月のiMSの観測では圏界面より上空で湿潤バイアスであり、CFHとの差は平均でiMSが3%RH, 11Gが1%RHでiMSの方が差が大きい。

RS92を連結したものは2018年4月の観測のみであるが(図5), iMSと11Gに比べてCFHとの差が小さく、2000mより下層での平均差は+1%RH程度であり、5000m～圏界面では-1%RH程度である。

2018年4月の観測については各ゾンデの相対湿度の不確かさも示した。iMSと11Gの相対湿度観測における不確かさは、校正時の誤差による不確かさ、タイムラグ補正に伴う不確かさ、汚染除去フィルタによる統計的不確かさ、湿度センサの温度依存性の補正に伴う不確かさ、湿度センサ温度と気温の差の補正に伴う不確かさ、及びヒステリシスによる不確かさから求められている(Kizu *et al.* : 2018)。また、RS92の相対湿度観測における不確かさは、校正時の誤差による不確かさ、湿度センサの温度依存性の補正に伴う不確かさ、日射の影響による乾燥バイアス補正に伴う不確かさ、湿度センサの時定数及びタイムラグ補正に伴う不確かさから求められている(Dirksen *et al.* : 2014)。相対湿度の急変域(図5の2500m付近)では各ゾンデ共CFHとの差が不確かさの範囲を超えており、特にiMSで顕著である。RS92の相対湿度は圏界面付近を除いた高度20000mまでおおよそ不確かさの範囲内であり、iMSや11Gに比べて妥当であると判断できる。

図6には地上から高度15000mまでの気温(左)、相対湿度(右)に対する相対湿度差の関係を示す。図6左の気温との関係では 0°C 以上の環境ではiMS, 11GがCFHに比べて低湿度を示し、 -40°C 付近では2018年1月の観測を除いてiMS, 11GがCFHより高湿度を示す傾向がある。一方図6右の相対湿度との関係ではRS92のCFHに対する相対湿度差はおおよそ $\pm 5\%$ RHの範囲であるが、iMSと11Gについては2016年11月の観測を除いて40%RHより高湿度環境においてCFHに比べて低い値を示す傾向があり、最大で-15%RH程度の差が見られる。この40%RHより高湿度環境での差は、図3～図5の2000mより下層で見られた乾燥バイアスに対応するものと思われ、湿度センサ温度による誤差を軽減することにより改善する可能性が考えられる。iMSと11Gの湿度センサの温度依存性

については $-60^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ で湿潤バイアスを示す特性が分かっており(Kizu *et al.* : 2018)GDPではこのバイアスを補正しているが、2016年11月や2018年4月の観測では、なお湿潤バイアスが見られる結果となった。

図7には各比較観測における体積混合比(以下、混合比)の観測結果を、図8には混合比の差(各GPSゾンデ-CFH)を示す。どの観測においても相対湿度が非常に低い環境へ変化する高度(2018年1月の観測では11000m付近, 2018年4月の観測では12500m付近)において各GPSゾンデとCFHの混合比の差が大きくなっている。RS92の混合比差は全体的にiMS, 11Gに比べて小さく、高度10000mまでは概ね3～10%程度の差であった。iMS, 11Gについては2000mより下層及び5000m～7500mの高度では比較的差が小さく、差の平均は2000m以下でiMSが-6%, 11Gが-4%, 5000～7500mではiMSが+16%, 11Gが+12%であるが、CFHに対する差の傾向としては相対湿度での比較と同様の結果である。ただし相対湿度での比較では2000mより下層でiMS, 11GとCFHの差が-1～-5%RH程度であり比較的大きい差であったが、対流圏下層では上空に比べて水蒸気量が多いため混合比の差で見ると比較的小さい値となった。

5. まとめ

高層気象台では、GRUANの観測サイトとして高精度な水蒸気観測を実施するため、高性能基準ゾンデであるCFHと毎日の観測で使用されているGPSゾンデによる比較観測を2015年から年2回実施してきた。本報告ではその比較観測方法やCFHと各GPSゾンデのGDPとの比較結果を示した。観測データの比較結果から11GとiMSの相対湿度については高度2000mより下層ではCFHに比べて1～5%RH低く、5000m付近では逆に1～2%RH程度高い特性が見られ、相対湿度の急変域ではCFHとの相対湿度差がそれぞれのゾンデの不確かさよりも大きい結果となった。RS92の相対湿度についてはCFHとの差は小さく概ね不確かさの範囲内であった。また、気温と相対湿度差の関係では、気温の観測値が -40°C 付近の環境において、11GとiMSの値がCFHに比べて高い特性が見られた。

GRUANにおける水蒸気の観測は気圧や気温とともに最も優先度の高い気象要素とされており、GCOS(2009)で示されているGRUAN用の基準ラジオゾンデ観測に要求される性能では、水蒸気観測については対流圏で精度(Precision)が2%, 確度(Accuracy)が2%となっている。本報告で示した比較観測では最もCFHとの差が小さいRS92でも対流圏で10%程度の差が見られており、GRUANで要求されている精度が非常に高いものであることが分

かる．本報告では GDP で観測データ処理を行っている RS92, iMS 及び 11G を CFH と同時に飛揚した観測は 1 事例のみであったが，今後も複数の GPS ゾンデと高性能ゾンデの比較観測を継続することにより，各 GDP の特性調査や性能比較を行うことができ，GDP がバージョンアップされた際の精度評価にも利用することができる．

謝 辞

本稿を草するに際し，高層気象台観測第一課，気象庁観測部観測課の皆様には多大なご協力を賜った．また明星電気株式会社の皆様には技術情報を公開して頂いた．これらの方々に厚くお礼申し上げます．

引用文献

- Dirksen, R. J., M. Sommer, F. J. Immler, D.F. Hurst, R. Kivi, and H. Vömel (2014) : Reference quality upper-air measurements: GRUAN data processing for the Vaisala RS92 radiosonde. *Atmos. Meas. Tech.*, **7**, 4463 - 4490.
- GCOS (Global Climate Observing System) (2009) : GRUAN Implementation Plan 2009-2013. GCOS-134, WMO-TD-No.1506, 53pp.
- 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.
- Hyland, R. W. and A. Wexler (1983) : Formulations for the Thermodynamic Properties of the saturated Phases of H₂O from 173.15K to 473.15K, *ASHRAE Trans*, 89(2A), 500 - 519.
- 岩渕真海(2012) : ドップラーライダー観測データ品質管理手法の開発と性能評価．高層気象台彙報, **70**, 23 - 30.
- 気象庁(1990): 国際気象通報式第 8 版, 平成 2 年 3 月, 1 - 25.
- 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 Technical Document 5 (GRUAN-TD-5), Rev 1.0 (2018-02-21), 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.
- Meisei(発行年不明) : 簡易 GPS ゾンデ受信システム取扱説明書(CFH 湿度センサ観測(RS-11G 編)).
- 能登美之・吉井博之・岩渕真海(2012) : GRUAN(GCOS Reference Upper Air Network)における高層気象台の役割．高層気象台彙報, **70**, 7 - 12.
- 杉立卓治・藤原正智(2014) : ゴム気球搭載用水蒸気計．「高層気象観測の発展と現実」．気象研究ノート第 229 号, 47

- 72.

- Vömel, H., D. E. David, and K. Smith (2007) : Accuracy of tropospheric and stratospheric water vapor measurements by the cryogenic frost point hygrometer: Instrumental details and observations. *J. Geophys. Res.*, **112**, D08305, doi:10.1029/2006JD007224.
- Vömel, H., T. Naebert, R. Dirksen, and M. Sommer (2016) : An update on the uncertainties of water vapor measurements using cryogenic frost point hygrometers. *Atmos. Meas. Tech.*, **9**, 3755 - 3768.