

# 館野と GEONET 観測点「つくば 2A」における可降水量の比較

野島 孝之\*・古林 絵里子\*

## A comparison of precipitable water vapor observed at Tateno and GEONET Tsukuba2A

NOJIMA Takayuki, KOBAYASHI Eriko

### 要旨

高層気象台では、2009年11月に全地球測位システム(Global Positioning System; GPS)を用いた GPS 気柱水蒸気量観測設備を整備し、観測点「館野(TATN)」として GPS 観測を行っていたが、現在は館野の近傍に位置する国土地理院の GNSS(Global Navigation Satellite System)連続観測システム(GNSS Earth Observation Network System; GEONET)観測点「つくば 2A(TSK2)」のデータを利用している。

本調査では、両観測点における GPS 観測データから算出される可降水量データ(以下、GPS 可降水量)の比較を行い、両観測点間のデータ特性について調査した。その結果、館野の GPS 可降水量は、つくば 2A の GPS 可降水量に比べて月平均値で 0.5mm 程度小さい傾向があることが分かった。この差は、可降水量が多い時期においては 2%程度に該当し、両者に大きな差はないといえる。また、館野と同一地点である高層気象台では GPS ゾンデによる高層気象観測を行っており、そのデータから算出される可降水量データ(以下、GPS ゾンデ可降水量)と GPS 可降水量を比較したところ、館野とつくば 2A の GPS 可降水量同士の差は、GPS ゾンデ可降水量との差よりもさらに十分小さいことが分かった。加えて、GPS ゾンデ可降水量を利用する際には、GPS ゾンデの種類に依存した観測特性の違いを考慮する必要があることも分かった。

### 1. はじめに

全球気候監視システム(Global Climate Observing System; GCOS)は、長期にわたる気候変動監視のための基準となる高精度の高層気象観測データ等の取得や、より空間的に密な観測・監視システムへの校正データ提供などを目的として、GCOS 基準高層気象観測網(GCOS Reference Upper Air Network; GRUAN)を構築しており、高層気象台はその観測サイトに登録されている(高層気象台：2021)。

GRUAN 観測サイトにおける必須機器としては、ラジオゾンデや地上気象観測機器のほかに、可降水量測定のための GNSS/GPS 受信機が挙げられている。高層気象台では、2009年11月に GPS 気柱水蒸気量観測設備の運用を開始して観測点「館野(TATN)」として GPS 観測を行い、その観測データから算出した可降水量を GRUAN リードセンターへ報告してきた。そして、2020年2月からは、国土地理院によって運用されている GNSS 連続観測システムの観測点のうち、館野(北緯 36 度 3 分 26.26 秒，東

\*高層気象台 観測第一課



図1 館野とつくば 2A の位置

地理院地図(<http://maps.gsi.go.jp/>)を加工して作図。

経 140 度 7 分 35.44 秒，楕円体高 66.798[m])から北西約 6km に位置している観測点「つくば 2A(TSK2)」(北緯 36 度 6 分 20.07 秒，東経 140 度 5 分 13.66 秒，楕円体高 69.99 [m])の観測データから算出した可降水量を報告している。図 1 に、館野とつくば 2A の詳細な位置を示す。

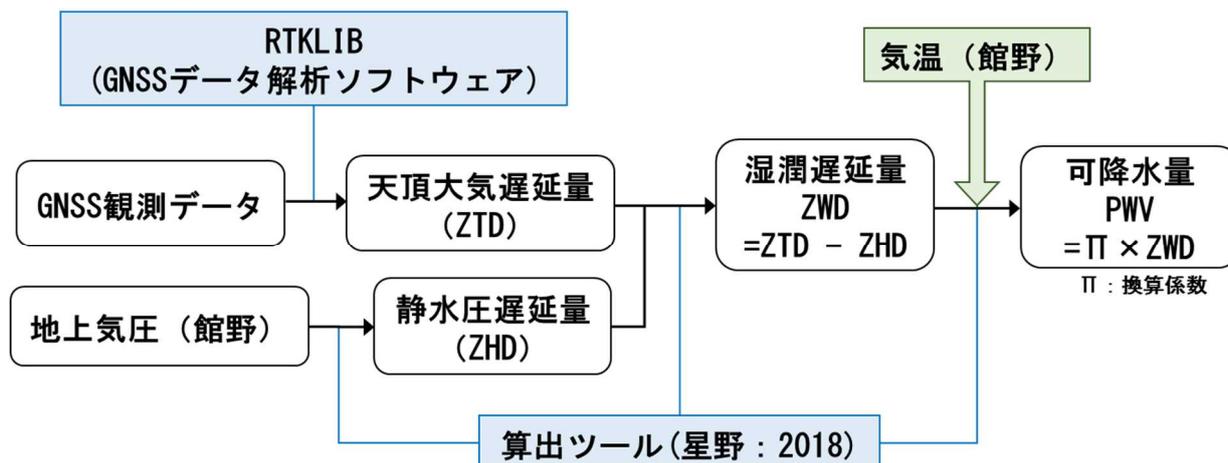


図 2 GPS 可降水量の算出過程

本調査では、館野とつくば 2A における可降水量を比較し、両観測点間のデータ特性を確認することを目的とした。

## 2. 比較手法

### 2.1 比較データ

#### (1) GPS 可降水量

GPS 衛星から発射された電波は、大気中に含まれる水蒸気の影響で伝搬が遅れる(遅延する)性質を持ち、この湿潤遅延量(ZWD)を求めることで、可降水量を算出することができる。GPS 可降水量を求める過程を図 2 に示す。

GNSS 観測データは、館野とつくば 2A のデータを使用した。なお、本調査では、館野とつくば 2A の双方とも、GPS のみを解析対象とし、仰角 5° 以上の衛星から得られる電波を利用して解析した。また、つくば 2A の観測データは、国土地理院の「電子基準点データ提供サービス」(<https://terras.gsi.go.jp/>)。ただし、2010 年 3 月以前は NASA(National Aeronautics and Space Administration)の「CDDIS(Crustal Dynamics Data Information System) GNSS data and products archive」([https://cddis.nasa.gov/Data\\_and\\_Derived\\_Products/GNSS/GNSS\\_data\\_and\\_product\\_archive.html](https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/GNSS_data_and_product_archive.html))を利用して入手した。

GPS 観測データから、大気の大気天頂方向における遅延量である天頂大気遅延量(ZTD)を算出する際は、GNSS データ解析ソフトウェア「RTKLIB(ver.2.4.2)」(高須ほか：2007)を使用し、算出式は

$$ZTD = 10^{-6} \left( \frac{k_1 R}{m_a g_m} p_s \right) + 10^{-6} \left\{ \int_H^{\infty} \left[ \left( k_2 - k_1 \frac{m_v}{m_a} \right) \frac{p_v}{T} + k_3 \frac{p_v}{T^2} \right] dz \right\}$$

と表される。ここで、実験的に求められる係数  $k_1=77.60$

[K/hPa],  $k_2=71.98$ [K/hPa],  $k_3=3.754 \times 10^5$ [K<sup>2</sup>/hPa], 普遍気体定数  $R=8314.34$ [J/kmol · K], 乾燥大気分子量  $m_a=28.9644$ [kg/kmol], 水蒸気分子量  $m_v=18.0152$ [kg/kmol]とし、 $p_s$  は地上気圧を、 $H$  は観測点の楕円体高をそれぞれ表す。また、水蒸気も含めた大気密度  $\rho$ , 重力加速度  $g$  を用いて、 $g_m$  は次式で表される。

$$g_m = \frac{\int \rho(z)g(z)dz}{\int \rho(z)dz}$$

RTKLIB による算出過程では衛星軌道情報等のパラメータを入力する必要がある。IGS(International GNSS Service)精密暦と PCV(Phase Center Variation)データは CDDIS から、ジオイドモデルは国土地理院データ提供サービスからそれぞれダウンロードした。

一方、大谷ほか(1998)によると、地上気圧から算出式

$$ZHD = 10^{-6} k_1 \frac{R}{m_a g_m} p_s$$

によって、乾燥大気による静水圧遅延量(ZHD)を算出することができる。

ZTD は、乾燥大気による遅延量である ZHD と水蒸気による遅延量である ZWD との合計である。したがって、ZWD は ZTD と ZHD との差を求めることで算出できる。

地上気温  $T_s$  から加重平均気温

$$T_m = 19.5265 + 0.8963 T_s$$

を求め、 $T_m$  から係数

$$\Pi = \frac{10^5}{R_v \left( k_2 - k_1 \frac{m_v}{m_a} + \frac{k_3}{T_m} \right)}$$

を求めることで、最終的には可降水量

$$PWV = \Pi \times ZWD$$

を求められる。なお、 $R_v$  は水蒸気の気体定数である。

ZTD からの可降水量算出には、高層気象台において開発した算出ツール(星野：2018)を利用した。

ZHD 及び可降水量の算出には、地上気圧と気温の気象観測データを用いるが、これらには館野で観測した地上気象観測データから GPS アンテナ高度における値へ補正したものを使用し、つくば 2A については館野との距離を考慮した内挿も行ったうえで補正した。地上気象観測に使用している測器に関する情報を、表 1 に示す。

## (2) GPSゾンデ可降水量

高層気象台では、毎日 2 回、00UTC と 12UTC に GPS ゾンデを飛揚して高層気象観測を行っている。本調査では、西村ほか(2002)に示されているものと同様の手法を用いて、高層気象観測データを利用して得られた混合比を気圧で積分していくことで GPS ゾンデ可降水量を求め、GPS 可降水量との比較を併せて実施した。混合比の積分範囲は、地上から気球到達高度までとした。

なお、GPS ゾンデは次々と新しい機種が開発されてお

り、今回の比較期間中には、高層気象台は 4 種類の GPS ゾンデを使用している。また、使用する GPS ゾンデに合わせて、データ処理のためのプログラムも変更している。表 2 に、高層気象台で使用してきた GPS ゾンデの種類等を示す。

## 2.2 比較期間及び時刻

比較期間は、館野において GPS 観測を開始した 2009 年 11 月から、観測を停止した 2020 年 10 月までとした。

また、GPS ゾンデに関しては、高層気象台での使用が開始された 2009 年 12 月以降の観測データを使用した。ただし、館野の水蒸気量観測設備においては、2016 年 2 月から繰り返し不具合が発生し、観測データに異常が生じていた可能性がある。修理を行って同年 12 月に運用を再開したが、本調査では、2016 年の観測データは比較対象から除くこととした。

比較時刻に関しては、GPS ゾンデの観測時刻に合わせて、09JST と 21JST のデータを使用した。

表 1 館野での地上気象観測に使用している測器の種類、型式、製造会社、設置されている高さ

測器の種類	型式	製造会社	測器の高さ
温度計	K5639AJ	Y D K テクノロジーズ	地上 1.5[m]
気圧計	PTB330	Vaisala	地上 2.2[m]

表 2 高層気象台で使用してきた GPS ゾンデの種類、使用期間、データ処理システム及び製造会社  
ただし、RS-11G 型 GPS ゾンデの使用期間中、週 1 回は RS92-SGP 型 GPS ゾンデを併用。

使用開始	GPSゾンデ	データ処理プログラム	製造会社
2009/12/01	RS92-SGP型GPSゾンデ	DigiCORA Sounding Sysytem MW31	Vaisala
2013/07/02	RS-11G型GPSゾンデ	MGPS2	明星電気
2017/09/13	iMS-100型GPSゾンデ	MGPS2	明星電気
2020/06/29	RS41-SG型GPSゾンデ	DigiCORA Sounding System MW41	Vaisala

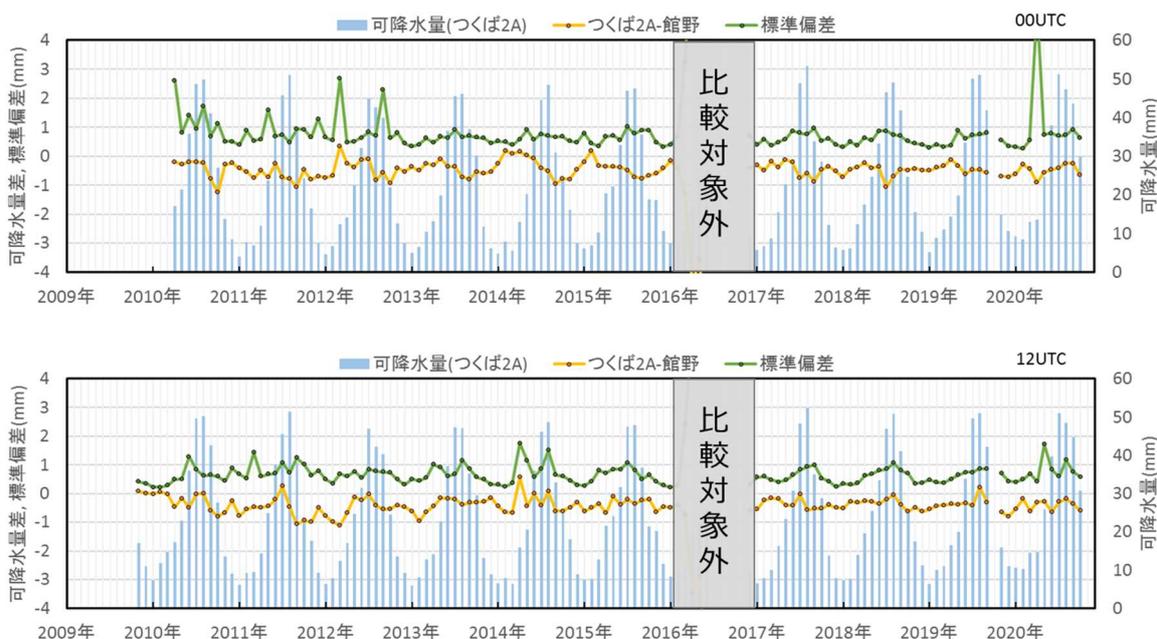


図3 館野とつくば2Aにおける月毎のGPS可降水量

棒グラフはつくば2Aの可降水量月平均値を表す。また、橙線はつくば2Aと館野の可降水量差を、緑線はその標準偏差を表す。

なお、2016年のデータには、館野の不具合を反映したデータが含まれている可能性があるため、比較対象外とした。

### 3. 比較結果

#### 3.1 GPS可降水量の比較

図3に、館野とつくば2Aにおける月毎のGPS可降水量を比較した結果を示す。2016年の観測のほか、機器障害に伴う欠測等により対象外となった観測を除くと、比較対象となった観測数は00 UTC では3328回、12UTC では3476回である。

00UTC、12UTCともに、可降水量は暖候期に多く、寒候期に少ないという季節変化が見られる。また、全期間を通して、館野の値がつくば2Aの値に比べて0.5mm程度小さい傾向が見られ、差の標準偏差は0.5~1.0mm程度と小さく、可降水量が多い暖候期に大きくなっている。こ

れらの傾向について、00UTCと12UTCとの間には特段の違いは見られない。なお、00UTCでは、2020年4月における差の標準偏差が他の期間と比べて大きかったが、これは当該月内で館野のGPS可降水量が明らかに大きかった1観測分に起因している。前後の観測では大きな差は生じていないことから、一時的な機器の不具合等によるものではないかと推察されるが、原因の特定には至っていない。

また、図4は館野とつくば2AにおけるGPS可降水量の相関関係を表した散布図であり、概ね1対1の正の相関がみられる。

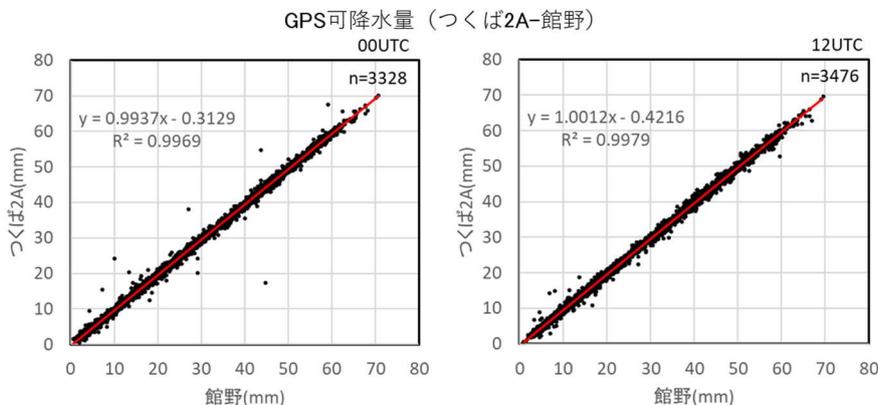


図4 館野とつくば2AにおけるGPS可降水量の相関関係(2016年除く)

月別平均値(2016年除く)

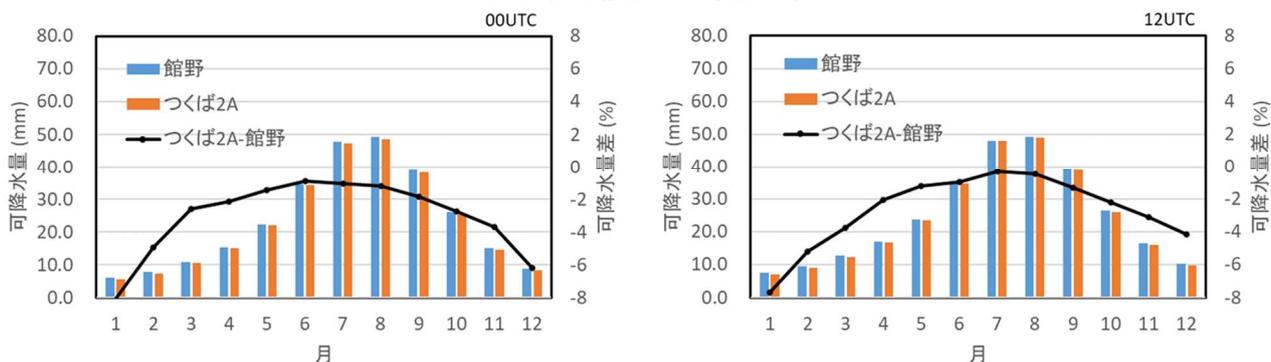


図5 館野とつくば2Aにおける各年の月平均 GPS 可降水量及び可降水量差(2016年除く)

青色棒グラフは館野の、橙色棒グラフはつくば2Aの月平均可降水量を表す。

また、折れ線は「つくば2Aと館野の可降水量差」の「つくば2Aの可降水量」に対する割合(%)を表す。

図5には、各年のGPS可降水量を月平均した結果を示す。ここでの可降水量差は、つくば2Aの値に対する館野の値との差の割合を示している。寒候期は可降水量自体が少なくなるため、差の割合は大きく4~8%程度となっている。一方、可降水量が多くなる4~10月の差は2%程度であった。

3.2 ZTDの比較

図3において、館野とつくば2Aには系統的に0.5mm程度の可降水量差があることを示した。この系統誤差が生じる原因について検証するため、GPS観測データから可降水量を算出する過程で求めたZTDの値を比較した。

図6に館野とつくば2Aの月毎のZTDを比較した結果を、また、図7に両地点におけるZTDの相関関係を表した散布図をそれぞれ示す。いずれも、可降水量と同様に系統的な差があることを示している。図2で示したとおり、

ZTDはGPS観測データを処理することで算出される。したがって、館野とつくば2Aの可降水量差は、両地点におけるGPSデータの差によって生じている可能性があると考えられる。

両地点におけるGPS受信機に着目すると、館野ではTrimble NetR8、つくば2AではTrimble 5700と使用機器が異なることから、それに起因してGPSデータに差が生じた可能性がある。また、GPS観測データの誤差をもたらす原因としては、大谷ほか(1998)によって、GPS受信アンテナ自体の持つ位相特性の違い、あるいは、同一衛星から発射された電波のうち、GPS受信機で直接受信された電波と反射物(高層ビルなど)によって反射されて異なる経路で受信された電波とが干渉することでノイズが発生するというマルチパスなどが挙げられていることから、それらに起因して差が生じている可能性はある。

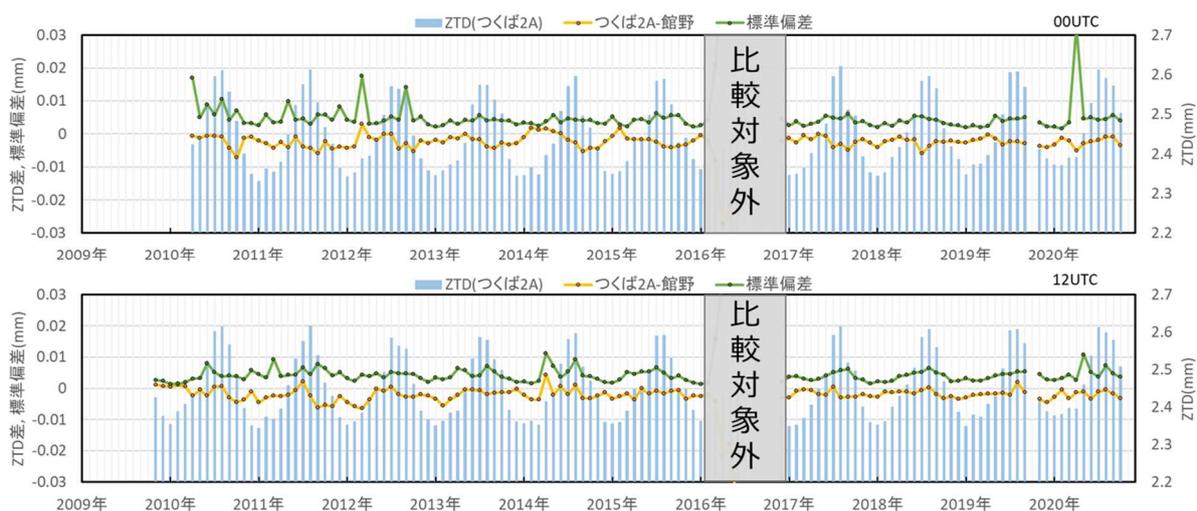


図6 館野とつくば2Aにおける月毎のZTD

各グラフ要素は図3と同様。ただし、可降水量ではなくZTDを表す。

### 3.3 GPS可降水量とGPSゾンデ可降水量との比較

図8に、GPS可降水量とGPSゾンデ可降水量の比較結果を示す。GPS可降水量同士を比較した際と同様に、機器障害に伴う欠測等により対象外となった観測を除くと、比較対象となった観測数は00 UTC では3512回、12UTC では3633回である。

GPS可降水量同士の差は、GPS可降水量とGPSゾンデ可降水量との差に比べて十分小さい。また、GPS可降水量とGPSゾンデ可降水量との差は、00UTCではおおよそ±2mmの範囲であるが、12UTCでは00UTCより差が大きくなり、最大では8月にGPSゾンデ可降水量の方が約4mm多い。

このように季節や時間によって系統的な差が存在することは、全国的なGPS可降水量とGPSゾンデ可降水量の比較検証においても確認されていた(西村ほか：2002)。この際、日射やGPS可降水量算出過程に着目した考察が行われたが、明確な原因は得られておらず、本調査においても原因の究明には至っていない。

ただし、00UTCでは、2018～2019年の特に7月と8月に可降水量差が大きく、GPSゾンデ可降水量が少ない傾向が明瞭であるが、この期間、GPSゾンデはiMS-100を使用していた。古林・星野(2018)は、iMS-100はRS-11Gに比べて対流圏の500hPaより下層で相対湿度の観測値が小さいという傾向を指摘しており、本調査における可降水量差はこの影響を受けたものであると考えられる。

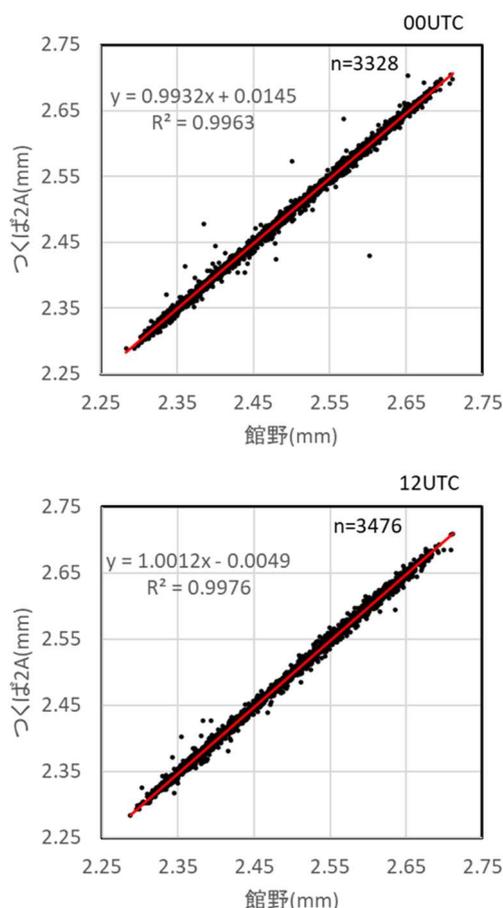


図7 館野とつくば2AにおけるZTDの相関関係(2016年除く)

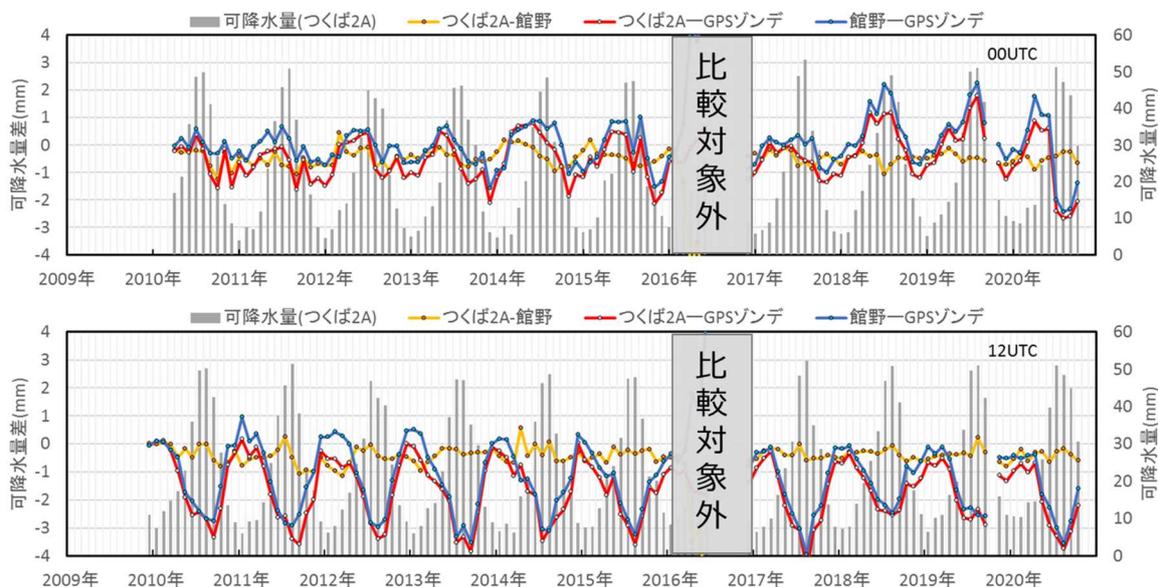


図8 GPS可降水量とGPSゾンデ可降水量に係る月別値

棒グラフはつくば2AのGPS可降水量月平均値を、橙線はつくば2Aと館野のGPS可降水量差を表す。

また、赤線はつくば2AのGPS可降水量と高層気象台のGPSゾンデ可降水量との差を、青線は館野・高層気象台のGPS可降水量とGPSゾンデ可降水量との差を表す。

なお、2016年のデータには、館野の不具合を反映したデータが含まれている可能性があるため、比較対象外とした。

また、RS-41を使用していた2020年後半は、00UTCと12UTCともにGPS可降水量よりもGPSゾンデ可降水量が多いという特徴が見られた。この点については、古林(2022)によって、2020年6月から導入されたRS-41はiMSに比べて500hPaより下層で湿度の測定値が高い特性があると示されており、GPSゾンデの変更による影響が考えられる。一方、同期間のGPS可降水量とGPSゾンデ可降水量との差を月毎に比較すると、00UTCと12UTCの差が小さくなっており、これは2020年前半以前には見られなかった傾向である。このことは、RS-41は、それまでのゾンデよりも、観測時間に依存した湿度の測定誤差が小さくなっていることを示唆している。以上のように、GPSゾンデは種類によって異なる観測特性を持ち、GPSゾンデ可降水量も影響を受ける可能性がある。

また、GPSゾンデ観測においては、気球が低高度で破裂して観測が終了する場合がある。GPS可降水量は大気上端までの水蒸気量を反映している一方、GPSゾンデ可降水量は気球到達高度に依存することから、低高度で観測終了した場合、両者の可降水量差は大きくなる。

このほか、観測に要する時間については、GPSゾンデ観測は気球飛揚から破裂までの1時間程度、GPSは電波が通過する秒単位未満の短時間と差異がある。

したがって、GPS可降水量とGPSゾンデ可降水量を比較する際には、これらの点に注意する必要がある。

#### 4. まとめ

高層気象台は、GRUAN観測サイトとしてGPS 気柱水蒸気量観測設備を整備してGPS観測を行っていたが、現在はつくば2AのGNSS観測データを利用している。

本調査では、2009年11月～2020年10月の期間における館野とつくば2AでのGPS可降水量及びGPSゾンデ可降水量の比較を行い、各観測点間のデータ特性について調査した。その結果、館野のGPS可降水量はつくば2AのGPS可降水量に比べて、季節によらず月平均値で0.5mm程度小さい傾向があるものの、両者の差は小さいことが分かった。これらの差は、両観測点の受信機や周辺環境等に起因したものであると考えられる。

また、高層気象台のGPSゾンデ可降水量とGPS可降水量を比較したところ、館野とつくば2AのGPS可降水量同士の差は、GPSゾンデ可降水量との差よりもさらに十分小さいことが分かった。加えて、GPSゾンデ可降水量を利用する際には、GPSゾンデの種類に依存した観測特性の違いを考慮する必要があることも分かった。

#### 謝 辞

本調査を行うにあたり、高層気象台のみなさまに数々のご助言を賜り、気象庁情報基盤部数値予報課の星野俊介技術専門官には、観測データ処理に際してご協力いただいた。これらの方々に、厚くお礼申し上げます。

#### 引用文献

- GCOS(2009): GRUAN Implementation Plan 2009-2013, GCOS-134, WMO-TD-No.1506, 33-34.
- 星野俊介(2018): 館野の周辺 GEONET 観測点における可降水量解析結果の比較, 高層気象台観測第一課部内資料.
- International GNSS Service, Daily 30-second observation data, Greenbelt, MD, USA:NASA Crustal Dynamics DataInformation System (CDDIS), Accessed June 22, 2021 at doi:10.5067/GNSS/gnss\_daily\_o\_001.
- International GNSS Service, GNSS Final Combined Satellite and Receiver Clock Solution (5 minute) Product,Greenbelt, MD, USA:NASA Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS), Accessed June 22, 2021 at doi: 10.5067/GNSS/gnss\_igsclk5\_001.
- 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.
- 古林絵里子(2023): RS41-SG型とiMS-100型GPSゾンデの比較観測による特性評価, 高層気象台彙報, **78**, 21-39.
- 高層気象台(2021): GCOS 基準高層観測網(GRUAN), 高層気象台彙報, 特別号, 75-78.
- 西村昌明・岩淵哲也・内藤勲夫・里村幹夫(2003): GPS可降水量のラジオゾンデによる再検証, 天気, **50**, 12, 21-29.
- 西村昌明・内藤勲夫・岩淵哲也・里村幹夫(2002): GPSとラジオゾンデから推定される可降水量の相互比較, 静岡大学地球科学研究報告, **29**, 2002年7月, 61-75.
- 大谷竜・内藤勲夫(1998): GPS可降水量の物理と評価, 気象研究ノート, **192**, 15-33.
- 高須知二・久保信明・安田明生(2007): RTK-GPS用プログラムライブラリ RTKLIBの開発・評価および応用, GPS/GNSSシンポジウム2007予稿集.