

GPS 可降水量のラジオゾンデによる再検証

西村 昌明*1・岩淵 哲也*2・内藤 勲夫*1・里村 幹夫*3

要 旨

2000年1月～12月の1年にわたって、気象庁などの14ラジオゾンデ観測点近傍の国土地理院全国GPS連続観測網(GEONET)の54GPS観測点におけるGPS可降水量を、新たにアンテナ位相特性モデル、高精度海洋潮汐荷重効果などを取り入れた解析ソフトウェアで推定し、それらを09JSTと21JSTのラジオゾンデ可降水量と比較した。その結果、両者はそれぞれの平均値の差(GPS-ラジオゾンデ)が -0.3 mmで一致し、従来見られたGPS可降水量の負のバイアスがほぼ解消された。しかし、両者の差のばらつき(標準偏差)は従来とほぼ同じ大きさの 2.3 mmであり、特に21JSTでは、GPS可降水量は可降水量の増大につれてラジオゾンデ可降水量より小さく推定される傾向が今回も見られ、また可降水量の差には季節性、地域性も見られた。この原因について、さまざまな観点から考察・議論したが、明確なことはわからなかった。

1. はじめに

GPSは、衛星からの電波が地上の受信機に到達するまでの時間を精密に測ることにより、受信機の位置はもとより電波の大気中の遅延(大気遅延)も精密に決定することができる。この大気遅延の天頂成分(Zenith Tropospheric Delay : ZTD)に及ぼす水蒸気の寄与(Zenith Wet Delay : ZWD)を適当な仮定のもとで分離すると、可降水量(Precipitable Water Vapor : PWV)が得られる(Askne and Nordius, 1987 ; Bevis *et al.*, 1994ほか)。GPS可降水量情報は従来のラジオゾンデ観測に比べ高い時間分解能で得ることが可能で、特に日本では、国土地理院が整備した約1000点からなるGPS連続観測網(GEONET) (Miyazaki *et al.*, 1997ほか)に基づくと、気象庁のAMeDAS観測網に匹敵する高い空間分解能の可降水量の二次元分布を得ることが可能である。

さて、GPS可降水量(以下GPS_PWV)を天気予報などに利用するためには、その信頼度をラジオゾンデ可降水量(以下SONDE_PWV)などによって比較評価しておく必要がある。まず、アメリカ中部のGPS特別観測によると、GPS_PWVと水蒸気ラジオメータによる可降水量(WVR_PWV)はRoot Mean Square (rms)において 1.5 mm程度で一致すること(Rocken *et al.*, 1995 ; Duan *et al.*, 1996)、また、この時にはSONDE_PWVとGPS_PWVの定量的な比較・議論はなされなかったが、それらの差はWVR_PWVとGPS_PWVとの差よりは大きいことが報告されている。一方、米国Massachusetts州Westford周辺の集中比較観測では、PWV差(GPS_PWV-SONDE_PWV)の平均値で約 2.0 mm、その標準偏差で約 2.0 mmの結果を得て、SONDE_PWVの負のバイアスの存在を示唆した(Coster *et al.*, 1996)。その後、アメリカ中部のNOAA GPS観測ネットワークデータを用いた解析では、PWV差の平均値で ± 0.1 mm以下、標準偏差で約 2.5 mmの一致(Wolfe and Gutman, 1999)、また、オーストラリア南西部の比較観測では、rmsにおいて 1.5 mm程度での一致(Tregoning *et al.*, 1997)がそれぞれ報告されている。さらに最近の米国における研究では、後述する式(2)の気柱の加重平

*1 総合研究大学院大学数物科学研究科・国立天文台地球回転研究系。

*2 米国大学連合大気科学研究センター (UCAR)。

*3 静岡大学理学部地球科学教室。

—2002年8月8日受領—

—2003年10月22日受理—

均気温を地上気温から近似的に得ると、GPS_PWV は SONDE_PWV に対して 4%~5% の負のバイアスを示すことが報告されている (Dai *et al.*, 2002)。

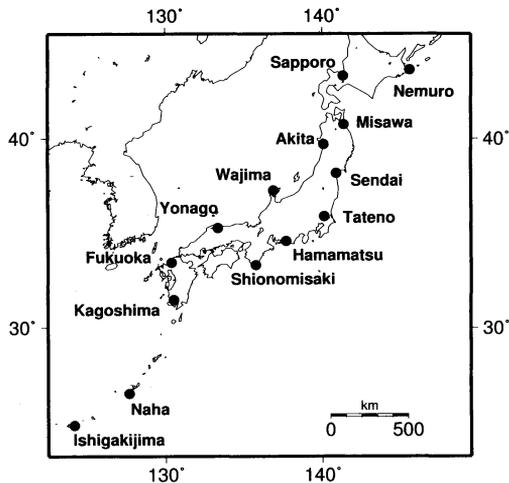
一方、日本においては、気象庁ラジオゾンデ観測点 10か所とその近傍における GEONET の GPS 観測点のそれぞれ 1年間データから、PWV 差の平均値で -2.7 mm、標準偏差で 2.6 mm が得られている (Ohtani and Naito, 2000)。さらに、彼らは、21JST における GPS_PWV が PWV の増加に対応して緩やかに SONDE_PWV より少なくなることを見出し、この原因を海洋潮汐荷重による観測点の上下変動にあるのではないかと推測した。一方、この GPS_PWV の負のバイアスは、アンテナの電子的な受信位置である位相中心が電波の入射仰角に依存して変動すること、アンテナを保護するレドームによる GPS 電波の遅延、アンテナ架台装置 (ピラー) 上部での反射波 (マルチパス) などのアンテナ特性の影響による可能性が考えられ (Hatanaka *et al.*, 2001a)、GEONET のアンテナ特性の補正を目的とした Phase Central Variation (PCV) モデルが、ピラーとレドームの組み合わせで分類したモニュメントタイプとアンテナタイプごとに提案されている (Hatanaka *et al.*, 2001b)。実際に、PCV モデル未導入時のデータ解析では、PWV 差で最大 7.0 mm の機種依存性が見出されている (西村ほか, 2001)。

なお、Nakamura *et al.* (2003) は、1999年 5月以降、気象庁のラジオゾンデ測器が更新されたこと、それ以前のラジオゾンデ・データでは、PWV で 1 mm~2 mm 程度のドライバイアスがあったことなどを指摘し、Ohtani and Naito (2000) で報告された GPS_PWV の負のバイアスは、実際には 5 mm 程度であったのではないかと推測している。

以上をまとめると、日本における GPS_PWV と SONDE_PWV の比較評価における問題点は、主として、

- GPS アンテナの位相中心変動特性による GPS_PWV の負のバイアス
- 海洋潮汐荷重に起因する可能性が考えられる 21 JST における GPS_PWV と SONDE_PWV の特異な関係
- 1999年以前の SONDE_PWV のドライバイアス

がある。そこで、本報告では、上記 PCV モデル (Hatanaka *et al.*, 2001b) に加え、主要 11分潮を考慮した最新の海洋潮汐荷重効果モデル (GOTIC II) (Matsumoto *et al.*, 2001) を導入した GPS 解析ソフ



第 1 図 ラジオゾンデ観測点。

トウェアで解析して得られた GPS_PWV と測器更新後の気象庁ラジオゾンデ・データによる SONDE_PWV との相互比較を行った結果について述べる。

2. データおよび解析

2.1 データ

ラジオゾンデ・データはラジオゾンデ測器更新後の 2000年 1月~12月における気象庁の 12観測点と浜松・三沢の防衛庁管轄の 2観測点の特異点データを含む気温・湿度データを主に用いた。一方、GPS 観測データは、上記のラジオゾンデ観測点から水平距離 60 km 以内、標高差 100 m 以内の GEONET の 54点を選び、1つのラジオゾンデ観測点に対し複数の GPS 観測点を対応させて用いた (第 1 図および第 1 表参照)。なお、GPS_PWV に及ぼす PCV モデルの影響などをアンテナ・モニュメントタイプの組み合わせごとに比較するために、ラジオゾンデ観測点と GPS 観測点との位置関係、アンテナ・モニュメントタイプなどを第 1 表にまとめた。

2.2 ラジオゾンデ・データの解析

SONDE_PWV は (1) 式を用いて求めた。

$$SONDE_PWV = \frac{1}{g} \int r dp \quad (1)$$

ここに、 r は混合比、 g は重力加速度、 p は気圧である。このとき、ラジオゾンデの放球地点の標高での混合比の値を GPS 観測点の標高での値に補正して用いたが、混合比の算出に必要な水蒸気圧を高度に対して

第1表 ラジオゾンデ観測点およびその近傍の GPS 観測点の情報。水平距離は緯度方向・経度方向における各 GPS 点とラジオゾンデ点間距離の平均を北方向・東方向として示した。鉛直方向はラジオゾンデ観測点の標高から GPS 観測点の標高を差し引いた値である。アンテナ・モニュメントタイプのコード (TRM1 など) は、最初の3文字がアンテナタイプを示し、TRM が TRM 23903.00, LEI が LEIAT 303, TOP が TOP 700779 A を表す。また4文字目の数字はモニュメントタイプを示し、1 : GSI 1, 2 : GSI 2, 3 : GSI 3, 4 : GSI 4 を示す。

ラジオゾンデ観測点	緯度 (deg)	経度 (deg)	標高 (m)	ラジオゾンデとGPSの平均距離			GPS観測点の数	アンテナ・モニュメントタイプごとの観測点数							
				緯度方向 (N: +, km)	経度方向 (E: +, km)	標高差 (m)		TRM1	TRM2	TRM4	LEI4	TOP3	TOP4		
根室	43° 20'	145° 35'	39	-7	-6	5	4								
札幌	43° 03'	141° 20'	19	10	7	-27	4				3			1	
秋田	39° 43'	140° 06'	7	-21	5	-26	2				1			1	
三沢	40° 42'	141° 23'	37	-3	2	-2	5				5				
仙台	38° 16'	140° 54'	43	3	7	13	4				2	1		1	
館野	36° 03'	140° 08'	31	7	-1	0	7	3	1		2	1			
輪島	37° 23'	136° 54'	14	-12	8	-5	4				1			1	2
浜松	34° 45'	137° 42'	45	6	5	12	2	2							
潮岬	33° 27'	135° 46'	69	13	3	47	3				2			1	
米子	35° 26'	133° 21'	8	1	-11	-29	4				2			1	1
福岡	33° 35'	130° 23'	15	-6	5	-21	4				2			1	1
鹿児島	31° 33'	130° 33'	31	-12	-9	5	4				3			1	
那覇	26° 12'	127° 41'	27	3	1	-71	4				2			1	1
石垣島	24° 20'	124° 10'	7	-3	-9	3	3				1			2	

指数関数的に減少すると仮定した。

2.3 GPS データの解析

2.3.1 ZTD の推定

GPS 解析はジェット推進研究所 (JPL) で開発された GIPSY-OASIS II (GIPSY) 解析ソフトウェアによった。精密単独測位解析手法を採用する GIPSY は、衛星時計情報として JPL 時計情報ファイルを用い、受信機時計の誤差をモデルにより確率論的に推定する (日置ほか, 1998 など)。このとき、ZTD は変動制限値内で極端な変動のないランダムウォーク過程に基づいて確率論的に推定される。また、解析では ZTD の変動制限値を 1.3 mm/min (PWV 換算で約 0.2 mm/min) と設定して、ZTD を 5 分毎に推定した。

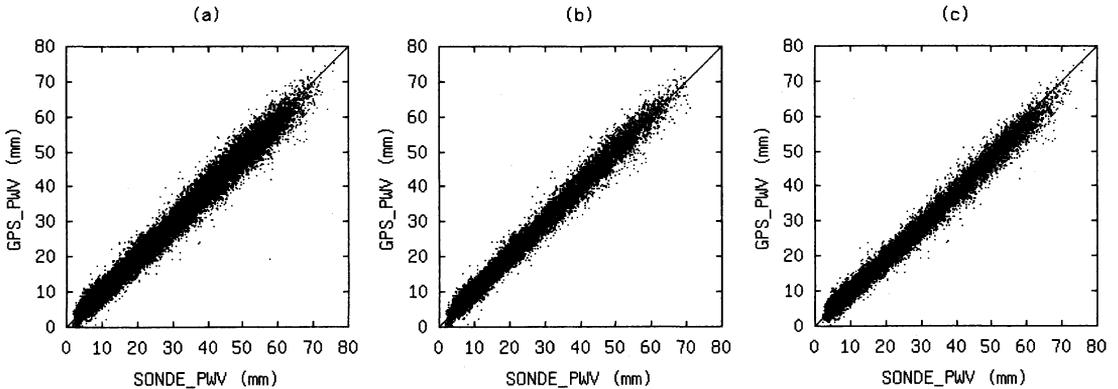
ところで、衛星方向の大気遅延量を ZTD に投影するためには大気遅延量の仰角依存性を表す関数 (マッピング関数: MF) を必要とするが、ここでは Niell の MF (NMF) (Niell, 1996) を採用した。ZTD は主に乾燥大気の寄与である天頂静水圧遅延量 (Zenith Hydrostatic Delay: ZHD) と水蒸気による ZWD からなり、その結果、NMF もこれらに対応する関数からなっている。すなわち、ZHD 用の NMF (HNMF) は、緯度・標高に加え、その日の初めからの通算日もパラメータ化することで、大気層厚の季節変化を考慮して

いる。しかし、ZWD 用の NMF (WNMF) は、緯度のパラメータのみで定義されている。GEONET のように観測点で気圧の測定がなされていない場合の GPS 解析では、まず ZHD の暫定値を米国標準大気モデル (例えば小倉, 1984) から推定した地上気圧から求め、その衛星方向の遅延を HNMF で投影して求め、それを観測される衛星方向の遅延からあらかじめ差し引いておき、その残差を衛星方向の水蒸気による遅延とみなして、WNMF を介して ZWD を最小二乗法で推定する。しかし、ZHD は観測点の気圧の実測値に基づかないことから、解析結果は慣習的に ZHD の暫定値とこの ZWD の和の ZTD としてファイルされる。なお、この解析では、大気遅延勾配モデルを導入して、水蒸気分布の方位異方性 (波数 1) を考慮した大気遅延の水平勾配 (MacMillan, 1995) も同時推定した。

2.3.2 GPS_PWV の算出

一般に、ラジオゾンデ観測は毎日 09JST と 21JST の 2 回行われるが、それらの観測は観測時刻の 30 分前に放球されることから、ZTD データは 08:30~09:00 JST の平均値と、20:30~21:00JST の平均値を用いた。

GPS 解析で与えられた ZTD から GPS_PWV を求めるためには、GPS 観測点での実際の地上気圧値から



第2図 SONDE_PWV と GPS_PWV との相関図。(a) 全データを含めた場合. 差の平均値は -0.3 mm, 標準偏差は 2.3 mm, 差の rms は 2.3 mm である. また, 一次相関式は $\text{GPS_PWV} = 0.97 \times \text{SONDE_PWV} + 0.53$ である。(b) 09JST の場合. 差の平均値は 0.4 mm, 標準偏差は 2.1 mm, 差の rms は 2.1 mm である. 一次相関式は $\text{GPS_PWV} = 1.00 \times \text{SONDE_PWV} + 0.45$ である。(c) 21JST の場合. 差の平均値は -1.0 mm, 標準偏差は 2.3 mm, 差の rms は 2.5 mm である. 一次相関式は $\text{GPS_PWV} = 0.94 \times \text{SONDE_PWV} + 0.47$ である.

与えられる ZHD を求め, ファイルされていた ZTD から差し引かねばならないが, ここではラジオゾンデデータの地上気圧から測高公式を用いて GPS 観測点での気圧を求め, ZHD を算出した. そして, GPS_PWV は, (2) 式で示すように, ラジオゾンデデータから求めた水蒸気分圧で重み付けられた気柱の平均気温(加重平均気温)から得られる比例常数 Π を, ZTD から ZHD を差し引いた ZWD に乗じることで得られる (Askne and Nordius, 1987).

$$\text{GPS_PWV} = \Pi \cdot \text{ZWD} \quad (2)$$

$$\Pi = 10^5 / R_v (k'_2 + k_3 / T_m)$$

$$k'_2 \equiv k_2 - k_1 (m_v / m_d)$$

$$T_m = \frac{\int \frac{e}{T} dz}{\int \frac{e}{T^2} dz} \approx 0.72 T_s + 70.2$$

ここに, R_v は水蒸気の気体定数 ($461 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), k_1 , k_2 , k_3 は実験的に求められた物理定数 ($k_1 = 77.6 \text{ K/hPa}$, $k_2 = 71.98 \text{ K/hPa}$, $k_3 = 3.754 \times 10^6 \text{ K}^2/\text{hPa}$), m_v , m_d はそれぞれ水蒸気, 乾燥大気のも分子量, T_m は加重平均気温 (K), T は気温 (K), e は水蒸気圧 (hPa) である. また加重平均気温の近似式は Bevis *et al.* (1994) によって得られた経験式で, ここに T_s は地表気温を示す.

なお, ここでは, GPS 解析で得られた ZTD データの異常値を確認するために, ZHD の最小値を ZTD の

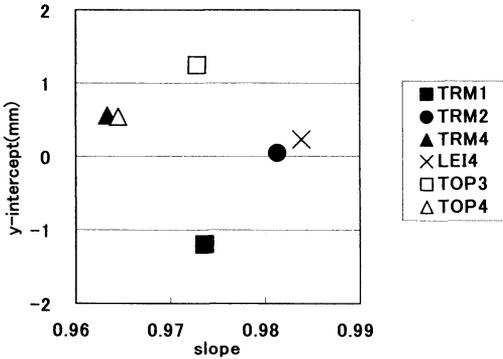
最小値, ZHD の最大値と ZWD の最大値の和を ZTD の最大値とすることで, $2.2 \text{ m} \sim 2.9 \text{ m}$ を ZTD の閾値と設定した. また, 異常値になると, ZTD は変動制限値 (1.3 mm/min) のペースで正常値に戻るため, 1 日間のデータに異常値が存在した場合, それは可降水量の変動が変動制限値を上回ることを示すことから, その日と翌日のデータは使用しないこととした.

3. 比較結果

3.1 可降水量の平均値の差

第2図は SONDE_PWV と GPS_PWV の相関図である. 差の平均値は -0.3 mm であり, 従来見られた GPS_PWV における $2 \text{ mm} \sim 3 \text{ mm}$ 程度の負のバイアスが解消され, Wolfe and Gutman (1999) の結果と同程度の一致を示した. しかし, この結果は Coster *et al.* (1996) による比較結果と異なるが, Nakamura *et al.* (2003) によると, 彼らが使用したラジオゾンデは PWV 換算で 3 mm 程度のドライバイアスがあると推測しているため, この相違は使用したラジオゾンデの機種が異なるためと考えられる.

第3図は GPS_PWV と SONDE_PWV の一次相関式を示す. y 切片はどのタイプも $-1 \text{ mm} \sim 1 \text{ mm}$ ぐらいの範囲で収まり, 機種依存性は最大で約 2.4 mm であり, 西村ほか (2001) に比べて解消されたことがわかる. ここで, 大気遅延勾配の推定時・非推定時の ZTD 差は, GEONET の1996年夏季のデータ解析 (本解析データと同じ期間の解析) で, 2 週間の平均で約



第3図 アンテナ・モニュメントタイプごとの SONDE_PWV と GPS_PWV の一次相関式の傾きと y 切片。一次相関式は、 $GPS_PWV = \text{傾き} \times SONDE_PWV + y$ 切片と表す。

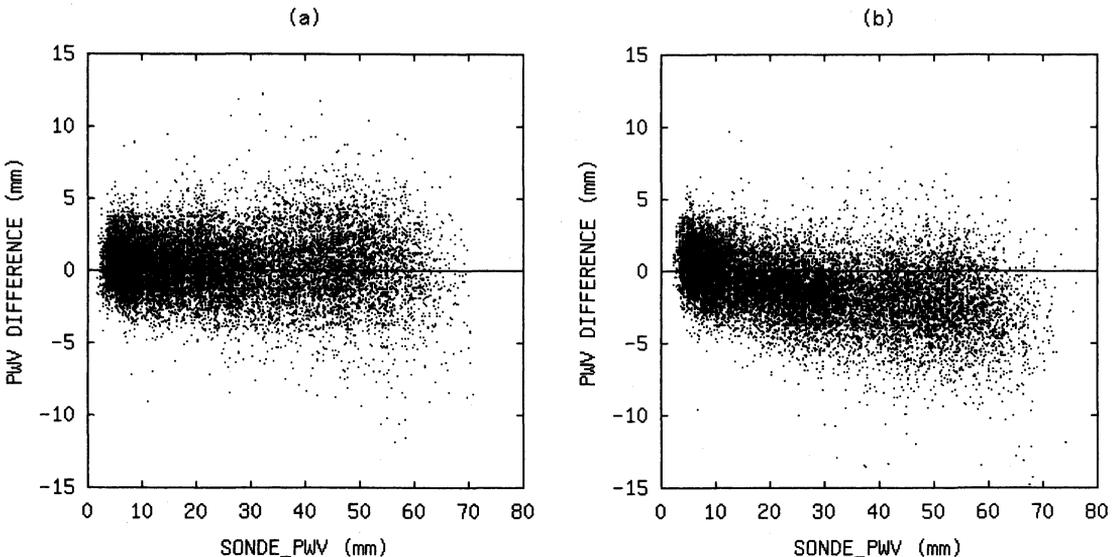
0.5 mm, 最大約 3 mm であり, 可降水量に換算すると, 最大でも 0.5 mm 未満と小さいことが確認されている (Iwabuchi *et al.*, 2003). よって, この結果から, GPS_PWV における負のバイアスの主な原因はアンテナ特性であり, これが PCV モデルの採用で解消されたことがわかる。しかし, この PCV モデルは仰角依存性のみ考慮されたモデルであるので, PCV 方位角依存性などの未知の機種依存性がまだある可能性が示唆される。はじめにふれたように, Dai *et al.* (2002) は地上

気温からの加重平均気温に起因する負のバイアスを得たが, これは, 加重平均気温が比例常数 H を通して ZWD に乗じられる係数であるために, ZWD の増大に伴って GPS_PWV が必然的に大きくなることから容易に推測される。しかし, 彼らも指摘しているように, 本報告での解析のように, 加重平均気温をラジオゾンデ・データから決定している場合は, この誤差は十分に低減されていると考えられる。

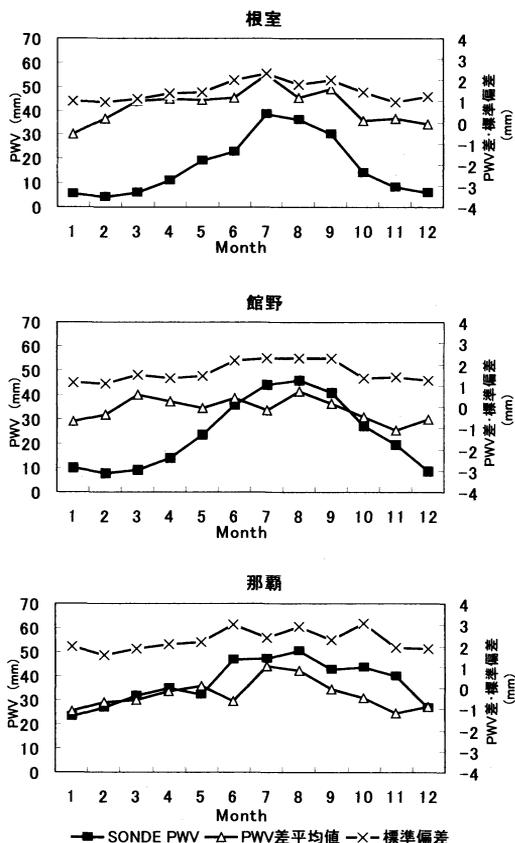
ところで, 第2図で示すように, 09JST における PWV 差の平均値は 0.4 mm を示すのに対し, 21JST における PWV 差の平均値は -1.0 mm を示し, これらの間に系統的な違いが見られる。さらに, SONDE_PWV と GPS_PWV の一次相関式の傾きを見ると, 09JST の傾きは 1.00 であるのに対し, 21JST の傾きは 0.94 となり, 21JST では PWV に依存した系統誤差があることを示している。そこで, 09JST と 21JST の系統的な違いをより詳しく調べるため, 第4図に SONDE_PWV と PWV 差との関係を示す。09JST の場合, SONDE_PWV が 0 mm~60 mm の間で, PWV の増加に対して PWV 差はほとんど -5 mm~5 mm の間にあるが, 21JST の場合, PWV が約 10 mm を越えると, GPS_PWV が小さく推定される傾向が見られる。

3.2 可降水量差の季節性・地域性

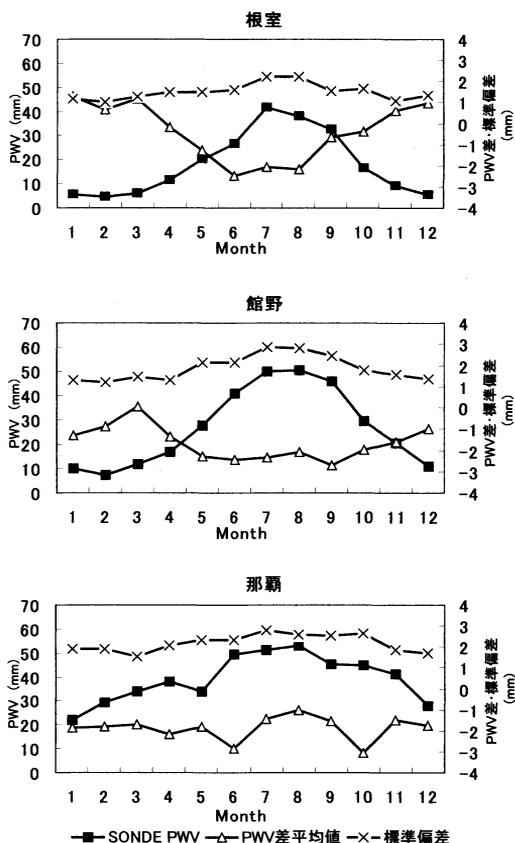
そこで, 09JST と 21JST における PWV 差の系統的



第4図 SONDE_PWV と PWV 差 (GPS_PWV - SONDE_PWV) との関係。PWV 差は GPS_PWV から SONDE_PWV をひいたもの。(a) 09JST の場合。(b) 21JST の場合。



第5図 09JSTにおけるPWV差の月平均値、および標準偏差とSONDE_PWVの月平均値。



第6図 第5図と同じ。ただし21JST。

な違いの原因を調べるために、根室・館野・那覇の事例について、PWV 差の月平均値と標準偏差、および SONDE_PWV の月平均値を第5図および第6図に示す。根室・館野では、09JST の PWV 差の年周差はほとんどないのに対し、21JST の PWV 差の年周差が大きい。特に夏季では、09JST より21JST において GPS_PWV がより小さく推定される。一方、那覇では、21JST の PWV 差の年周差がほとんどなく、季節に関係なく、09JST より21JST において GPS_PWV が SONDE_PWV より小さく推定される。このことから、21JST の PWV 差には季節変化のみならず地域性も見られることがわかる。

一方、標準偏差（ばらつき）を見ると、根室・館野では冬季では1 mm程度であるのに対し、夏季では2 mm~3 mmと大きくなる。しかし、那覇では年間を通して、根室・館野の夏季並みのばらつきが見られる。

また、標準偏差が2 mm~3 mmの時期の SONDE_PWV は、どの地点でも20 mm以上となっている。

4. 議論

ここでは、上述の PWV 差のばらつきの一般的な要因と、09JST と21JST における SONDE_PWV と GPS_PWV の間の系統的な相違の原因について考察する。

まず PWV 差のばらつきの要因として、GPS_PWV の算出過程で生じる誤差が考えられる。このうち ZHD の計算誤差は、気圧に対する係数の誤差により約2.4 mm であり (Elgered *et al.*, 1991)、これは GPS_PWV に変換すると約0.4 mm となる。次に ZWD を PWV に変換する際の誤差は、(2) 式の各パラメータの誤差によるが、このうち、加重平均気温が GPS_PWV に及ぼす誤差は、ラジオゾンデの気温測定精度 ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 程度) から、高々0.5 mm 程度で、他のパラメータによる誤差は無視できる大きさである。

一方、ラジオゾンデの湿度測器は防水保護キャップが付いていないため、降水・多湿時に湿度測器が濡れて過大な湿度値をもたらす、これによって SONDE_PWV に誤差が生じることが考えられる。しかし、今回の解析ではこの根拠を得るには至っていない。

以上の他に、水蒸気の鉛直分布構造の季節変化が Niell マッピング関数では考慮されていないこと、GPS は衛星観測範囲の平均値であるのに対して、ラジオゾンデは通過経路の積算値であるなどの観測対象の違いが顕著に反映されることなどが考えられる。これらのうち、GPS およびラジオゾンデの観測対象の違いに注目すると、GPS_PWV は仰角15°以上の漏斗状空間の水蒸気の平均値であるのに対し、SONDE_PWV はラジオゾンデ通過経路の水蒸気の積算値である。日本は四方を海で囲まれ、複雑な地形であるため、ローカルな水蒸気分布が起りやすい。例えば、佐々木・木村 (2001) は夏季静穏日の関東地方での PWV 分布の日周変動を調べた結果、山側と沿岸部で、最大 5 mm 程度の差が生じることを示した。このようなローカルな水蒸気変動は大気下層で卓越すると考えられる。このとき、GPS の大気遅延勾配モデルによる大気遅延水平勾配の推定によって、大気遅延勾配と衛星配置の南北軸非対称のカップリングに起因する GPS_PWV のバイアスが低減することによって (例えば、Iwabuchi *et al.*, 2003)、GPS_PWV の精度はわずかに向上する (例えば、Bar-Sever *et al.*, 1998)。一方、通常のラジオゾンデのルーチン観測による SONDE_PWV にはこれが反映されにくいと考えられる。こうした影響が PWV 差のばらつき要因となることが推測される。逆に、PWV 差のばらつきなどの存在は GPS 水蒸気情報が日周変化性の局地循環の研究に有力な情報であることを示唆している。GEONET に基づく GPS 水蒸気情報の今後の利用研究に期待したい。

次に、09JST と 21JST における SONDE_PWV と GPS_PWV の間の系統的な相違の原因について考える。まず、本研究の GPS 解析には最新の海洋潮汐荷重効果モデルを導入したが、09JST と 21JST の系統的な違いは、Ohtani and Naito (2000) の結果と比べると、解消されなかった。また、最近行われたマイナー分潮を含む 54 分潮の海洋潮汐を考慮した海洋潮汐荷重効果 (松本, 2001) でも、GPS_PWV に及ぼす影響は 0.2 mm 程度であることから、海洋潮汐荷重効果がこれらの違いの原因にはなりにくいと思われる。一方、上述したように 21JST の PWV 差には季節性、地域性が見られ

た。そこで、09JST と 21JST との違いを夏季と冬季に分けて考察してみると、夏季と冬季、09JST と 21JST で大きく異なる日射の有無の影響が考えられ、それには 4 つの可能性が考えられる。第 1 はラジオゾンデの気温測定誤差の可能性である。ゾンデの気温測器は、昼間は日射を吸収して真の気温よりも高くなり、夜間は赤外放射により真の気温よりも低くなる可能性があるが、測器は日射の影響を極力取り除くために表面に反射率の良いアルミニウムの真空蒸着が施され、また太陽高度角・ゾンデの高さ (気圧) をパラメータとして日射の影響を補正しているため、一般的には、この影響は考えにくい。第 2 は GPS のピラーが熱膨張する可能性である。例えば、GEONET のピラーが日射によってサブミリオーダーの水平変位を生じることが報告されている (阿部ほか, 1999)。測位解鉛直成分の誤差 (UD_bias) と GPS_PWV 誤差 (dPWV) との関係式は経験的に

$$dPWV = UD_bias \times 0.27 \times \Pi \quad (3)$$

で近似されるから (Shoji *et al.*, 2000)、 Π を近似値 0.15 とすると、ピラーの鉛直方向の膨張も水平方向と同じオーダーであれば、この誤差に起因する GPS_PWV の誤差は最大でも 0.04 mm 程度となり無視できる。第 3 は電離層の影響である。解析期間中は太陽活動の極大期であったため、電離層の擾乱や電子密度の増大が GPS 電波に影響を及ぼし、日中時の 09JST と日没後の 21JST で違いが生じることも考えられる。しかし、これがどの程度かは見積もっていない。第 4 に、水蒸気鉛直分布構造の日周変化の影響が考えられる。PWV が多くなる夏季晴天日は日射量が多くなり、水蒸気を最も多く含む大気混合層の層厚に顕著な日周変化が生じる可能性があり、09JST と 21JST にその違いが生じる可能性が考えられる。上述したように、本研究で使用した Niell マッピング関数はこのような水蒸気鉛直分布構造を全く考慮していないので、これが 09JST と 21JST との違いを与える可能性は十分考えられる。今後のマッピング関数の開発研究が待たれる。

5. まとめ

ラジオゾンデ測器変更後の 2000 年のデータを用いて、GPS_PWV と SONDE_PWV との相互比較を行った。その際、これまでの研究で問題となっていた GPS_PWV の負のバイアスと GPS_PWV から SONDE_PWV を差し引いた PWV 差の 09JST と 21

JST における系統的な違いを解消するために、アンテナ位相中心変動や海洋潮汐荷重効果の影響を考慮した、PCV モデルと海洋潮汐荷重モデルを GPS 解析に導入した。その結果、主として PCV モデルの導入結果により、PWV 差の平均値は -0.3 mm となり、GPS-PWV の負のバイアスはほぼ解消された。しかし、PWV 差のばらつき (標準偏差) は従来とほぼ同じ 2.3 mm であり、09JST と 21JST における PWV 差の PWV に対する系統的な違いも解消されず、また 21 JST の PWV 差には季節性、地域性も見られた。この原因を日射、マッピング関数などに着目して種々考察を加えたが、明確な原因は得られなかった。

謝 辞

本研究に対して、気象研究所の瀬古 弘氏、小司禎教氏、青梨和正氏、また、気象庁の故中村 一氏、国土地理院の山際敦史氏、マサチューセッツ工科大学の A. E. Niell 氏に多くの貴重なご意見を頂いた。また、本論文の改稿に懇切丁寧なコメントをお寄せ下さった査読者 2 人および編集委員に心より感謝します。

参 考 文 献

- 阿部 馨, 菊田有希枝, 堀田暁子, 堀 弘, 菅 富美男, 田村 孝, 藤咲淳一, 大滝 修, 日下正明, 畑中雄樹, 石原 操, 1999: 電子基準点の日照変位, 日本測地学会第92回講演会要旨, 103-104.
- Askne, J. and H. Nordius, 1987: Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data, *Radio Science*, **22**, 379-386.
- Bevis, M., S. Businger, S. Chiswell, T. A. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken and R. H. Ware, 1994: GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water, *J. Appl. Meteor.*, **33**, 379-386.
- Bar-Sever, Y. E., Kroger, P. M., and Borjesson, J. A., 1998: Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver, *J. Geophys. Res.*, **103**, 5019-5035.
- Coster, A. J., A. E. Niell, F. S. Solheim, V. B. Mendes, P. C. Toor, K. P. Buchmann and C. A. Upham, 1996: Measurements of precipitable water vapor by GPS, radiosondes, and a microwave water vapor radiometer. Proceeding of ION GPS-97, Institute of Navigation.
- Dai, A., J. Wang, R. H. Ware and T. van Hove, 2002: Diurnal variation in water vapor over North America and its implications for sampling errors in radiosonde humidity, *J. Geophys. Res.*, **107**, 10.1029/2001JD000642.
- Duan, J., M. Bevis, P. Fang, Y. Bock, S. Chiswell, S. Businger, C. Rocken, F. Solheim, T. van Hove, R. Ware, S. McClusky, T. A. Herring and R. W. King, 1996: GPS Meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water, *J. Appl. Meteor.*, **35**, 830-838.
- Elgered, G., J. L. Davis, T. A. Herring and I. I. Shapiro, 1991: Geodesy by radio interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay, *J. Geophys. Res.*, **96**, 6541-6555.
- Hatanaka, Y., M. Sawada, A. Horita and M. Kusaka, 2001a: Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET-Part 1: Measurement of phase characteristics, *Earth Planets Space*, **53**, 13-21.
- Hatanaka, Y., M. Sawada, A. Horita, M. Kusaka, J. M. Johnson and C. Rocken, 2001b: Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET-Part 2: Evaluation of the phase map by GEONET data, *Earth Planets Space*, **53**, 23-30.
- 日置幸介, 島田誠一, 大谷 竜, 1998: GPS 解析ソフトウェア, 気象研究ノート, (192), 73-92.
- Iwabuchi, T., S. Miyazaki, K. Heki, I. Naito, and Y. Hatanaka, 2003: An impact of estimating tropospheric delay gradients on tropospheric delay estimations in the summer using the Japanese nationwide GPS array, *J. Geophys. Res.*, **108** (D10), 4315, doi: 10.1029/2002JD002214.
- MacMillan, D. S., 1995: Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1041-1044.
- 松本晃治, 2001: マイナー一潮の海洋潮汐荷重による GPS 観測点の変位, 日本測地学会第96回講演会要旨, 33-34.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa and M. Ooe, 2001: GOTIC2: A program for computation of oceanic tidal loading effect, *J. Geod. Soc. Japan*, **47**, 243-248.
- Miyazaki, S., T. Saito, M. Sasaki, Y. Hatanaka and Y. Iimura, 1997: Expansion of GSI's nationwide GPS array, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **43**, 23-34.
- Nakamura, H., H. Seko, Aerological Observatory and Meteorological Instruments Center, 2003: Drybias of humidity measurements by rawinsondes revealed by the comparison with GPS derived precipitable water vapor, Proceeding of International Workshop on GPS Meteorology, Tsukuba, Jan. 14-17,

- 2003, No. 1-24.
- Niell, A. E., 1996 : Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *J. Geophys. Res.*, **101**, 3227-3246.
- 西村昌明, 岩淵哲也, 内藤勲夫, 里村幹夫, 2001 : GEONET の GPS データから求めた可降水量とラジオゾンデデータとの比較, 日本測地学会第96回講演会要旨, 103-104.
- Ohtani, R. and I. Naito, 2000 : Comparisons of GPS-derived precipitable water vapors with radiosonde observations in Japan, *J. Geophys. Res.*, **105**, 26917-26929.
- 小倉義光, 1984 : 一般気象学, 東京大学出版会, 314pp.
- Rocken, C., T. van Hove, J. Johnson, F. Solheim, R. Ware, M. Bevis, S. Chiswell and S. Businger, 1995 : GPS/STORM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 468-478.
- 佐々木太一, 木村富士男, 2001 : GPS 可降水量からみた関東付近における夏季静穏日の水蒸気量の日変動, *天気*, **48**, 65-74
- Shoji, Y., H. Nakamura, K. Aonashi, A. Ichiki, H. Seko and Members of GPS/MET Japan Summer Campaign 1997 in Tsukuba, 2000 : Semi-diurnal and diurnal variation of errors in GPS precipitable water vapor at Tsukuba, Japan caused by site displacement due to ocean tidal loading, *Earth Planet Space*, **52**, 685-690.
- Tregoning, P., R. Boers, D. O'Brien and M. Hendy, 1998 : Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations, *J. Geophys. Res.*, **103**, 28701-28710.
- Wolfe, D. E. and S. I. Gutman, 1999 : Developing an operational, surface-based, GPS, water vapor observing system for NOAA : network design and results, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 426-440.

Recomparison of GPS Retrieved Precipitable Water Vapor with Radiosonde Observations

Masaaki NISHIMURA^{*1}, Tetsuya IWABUCHI^{*3}, Isao NAITO^{*2}
and Mikiyo SATOMURA^{*4}

^{*1} (*Corresponding author*) *School of Mathematical and Physical Science, The Graduate University for Advanced Studies • Earth Rotation Division, National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, 181-8588, Japan.*

^{*2} *School of Mathematical and Physical Science, The Graduate University for Advanced Studies • Earth Rotation Division, National Astronomical Observatory.*

^{*3} *COSMIC, UCAR FL4.*

^{*4} *Institute of Geosciences, School of Science, Shizuoka University.*

(Received 8 August 2002 ; Accepted 22 October 2003)
