

## GPSとラジオゾンデから推定される可降水量の相互比較

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2008-01-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 西村, 昌明, 内藤, 勲夫, 岩淵, 哲也, 里村, 幹夫 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.14945/00000384">https://doi.org/10.14945/00000384</a>

## GPSとラジオゾンデから推定される可降水量の相互比較

西村昌明<sup>1</sup>・内藤勲夫<sup>2</sup>・岩淵哲也<sup>3</sup>・里村幹夫<sup>4</sup>

### A comparison of precipitable water vapor obtained from GPS and radiosonde

Masaaki NISHIMURA<sup>1</sup>, Isao NAITO<sup>2</sup>, Tetsuya IWABUCHI<sup>3</sup>, and Mikio SATOMURA<sup>4</sup>

**Abstract** In order to account for the validity of precipitable water vapor (PWV) obtained from Global Positioning System (GPS), we compared PWV obtained from GPS (GPS\_PWV) and that obtained from radiosonde (SONDE\_PWV).

We used radiosonde data from 14 stations in Japan, and also GPS data of GEONET stations established by Geographical Survey Institute (GSI) near radiosonde stations during January 1999 and December 2000 in the present investigation.

The antenna phase center of GEONET varies by elevation angle of microwave path from GPS satellites, and we applied an antenna specific phase characteristic model to the GPS\_PWV. When we estimated GPS\_PWV without the antenna specific phase characteristic model, average difference between GPS\_PWV and SONDE\_PWV (GPS\_PWV-SONDE\_PWV: PWV difference) was -3.7mm. This average PWV difference varied by each antenna/monument type. On the other hand, when we estimated GPS\_PWV with the antenna specific phase characteristic model, it decreased to 1.8mm. This PWV difference did not vary by antenna/monument type.

We also compared two kinds of PWV at 00UTC and those at 12UTC. At 12UTC, GPS\_PWV was usually lower than SONDE\_PWV when PWV increased. When it is rainy or very humid, GPS\_PWV tended to be much lower than SONDE\_PWV. This tendency was caused by the fact that the sensor of the hygrometer of radiosonde was wet.

Finally, we investigated a relationship between PWV difference and distance between GPS station and the position of radiosonde, but could not find a clear correlation between them.

**Key Words:** Global Positioning System (GPS), radiosonde, Precipitable Water Vapor (PWV), GPS Earth Observation Network System (GEONET)

#### 序論

地殻変動の精度向上および気象予測の向上を目指すために、GPS気象学と呼ばれるGPS電波の大気による遅延についての研究が始まった。その中でラジオゾンデデータから推定される可降水量(以後SONDE\_PWVと記す)とGPS電波の伝播遅延量から推定される可降水量(以後GPS\_PWVと記す)との相互比較によるGPS電

波の伝播遅延量の精度確立の研究が進められている。可降水量とは単位面積当たりの対流圏上端までの気柱に含まれる水蒸気量の総合計である。

アメリカでは、1993年5月に、「GPS/STORM」と呼ばれる実験観測が行われ、その中でSONDE\_PWVとGPS\_PWVとの相互比較が行われた。その結果、SONDE\_PWVとGPS\_PWVはrmsで1.0~1.5mmの精度で一致した(Duan *et al.*, 1996)。

<sup>1</sup>静岡大学大学院理工学研究科, 〒422-8529 静岡市大谷836

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529 Japan  
E-mail: nimasa@f5.dion.ne.jp (M.N.)

<sup>2</sup>国立天文台地球回転研究系, 〒181-8588 三鷹市大沢2-21-1

<sup>2</sup>Earth Rotation Division, National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo, 181-8588 Japan

<sup>3</sup>科学技術振興事業団(気象研究所), 〒305-0052 つくば市長峰1-1

<sup>3</sup>Japan Science and Technology Corporation (Meteorological Research Institute), 1-1 Nagamine, Tsukuba, 305-0052 Japan

<sup>4</sup>静岡大学理学部地球科学教室, 〒422-8529 静岡市大谷836

<sup>4</sup>Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529 Japan

一方、日本では1996年6月～12月の期間において、10点のラジオゾンデ観測点とその近傍のGEONETのGPSデータを用いてSONDE\_PWVとGPS\_PWVとの相互比較が行われた。その結果、SONDE\_PWVに比べ、GPS\_PWVの方が2.7mmほど系統的に小さく推定された。また、標準偏差は2.6mmになった(Ohtani *et al.*, 2000)。この結果は、アメリカの結果に比べ、精度が悪い。

また、ラジオゾンデが風に流される影響により、GPSが捕らえる大気状態とラジオゾンデが観測する大気状態が異なってしまい、SONDE\_PWVとGPS\_PWVとの間に系統的な差が生じてしまう可能性が指摘された。しかしデータ数が少なく明確なことは言えなかった(西村ほか, 2000)。更に、アンテナ・レドーム・ピラータイプの違いによるアンテナ位相中心の変動についても研究され、その電波入射仰角依存性についてのモデルも作られた(Hatanaka *et al.*, 2001)。

以上のことを踏まえて、本研究では日本の14点のラジオゾンデ観測点とその近傍のGPS観測点を使用し、1999年1月～2000年12月のデータを用いて、以下の点に着目してSONDE\_PWVとGPS\_PWVとの比較を行った。

#### ① GPSアンテナ位相中心変動(PCV)の電波入射仰角依存性の影響

アンテナ位相中心は衛星配置やGPS電波入射仰角により変動を起こし、その変動はアンテナ・レドーム・ピラータイプごとに異なることが分かっている。ところが、日本において、今まではアンテナ位相中心変動(PCV)は重要視されていなかった。そのため、GAMIT・Bernese解析ソフトウェアによる従来のGPS解析ではIGS01と呼ばれるアンテナのみのPCVの電波入射仰角依存性を考慮したモデルを取り入れているだけである。また、GIPSY解析ソフトウェアでは、JPLが作成したアンテナ位相中心のオフセット値のみが取り入れられていた。本研究では、解析時にJPLが作成したアンテナ位相中心のオフセット値のみを考慮した場合と、Hatanaka *et al.* (2001)が開発したGEONETのアンテナ・レドーム・ピラータイプを考慮したPCVの電波入射仰角依存性モデル(Phase Center Variationモデル: PCVモデル)を考慮した場合との結果を比較し、PCVの電波入射仰角依存性がGPS\_PWVにどのような影響を及ぼしているかを調べた。更にPCVモデルを考慮することで、GPS\_PWVにどのように影響するかを調べた。

#### ② 解析時間の違いによる影響(end effectの影響)

ラジオゾンデ観測は00UTCと12UTCの2回行われている。そこで、GPS\_PWVとSONDE\_PWVとの相互比較も00UTCと12UTCの1日2回行っている。しかし、一般にGPSでは00UTCで観測を翌日のものと切り換えられており、00UTCはGPSデータの端部にあたってしまう。GPS電波伝播遅延量は、データの端部になると、未来のデータがないため、位相バイアスの決定精度が悪くなり、また未来のパラメータからの先験的な制約条件が緩くなってしまうことから、精度が落ちるとされている(畑中, 1998)。この影響がSONDE\_PWVとGPS\_PWVとの差にどのように影響しているかを調べる。

#### ③ 降水等によるラジオゾンデ湿度センサーの異常値検出による影響

気象庁によるラジオゾンデ観測の場合、ラジオゾンデ測器の湿度センサーは降水等から保護するキャップがついていない。そのため、降水時や湿度が大変高い時には湿度センサーに水滴がついてしまい、異常に高い湿度を計測結果としてしまう可能性がある。このよ

うな時、SONDE\_PWVとGPS\_PWVとの差にどのような影響を及ぼすかを調べた。

#### ④ ラジオゾンデが風に流される影響

ラジオゾンデが風に流されることにより、GPSが捕らえる大気状態とラジオゾンデが観測する大気状態が異なってしまい、SONDE\_PWVとGPS\_PWVとの間に系統的な差が生じてしまう可能性がある。本当にこのような傾向が生じるのかを本論文で再検討した。

### 解析地域・期間

#### 1. 解析地域概況

ラジオゾンデデータの解析地点は全国14箇所(根室・札幌・秋田・三沢・仙台・館野・輪島・浜松・潮岬・米子・福岡・鹿児島・那覇・石垣島)である。配置図をFig.1に、座標値をTable 1に示す。

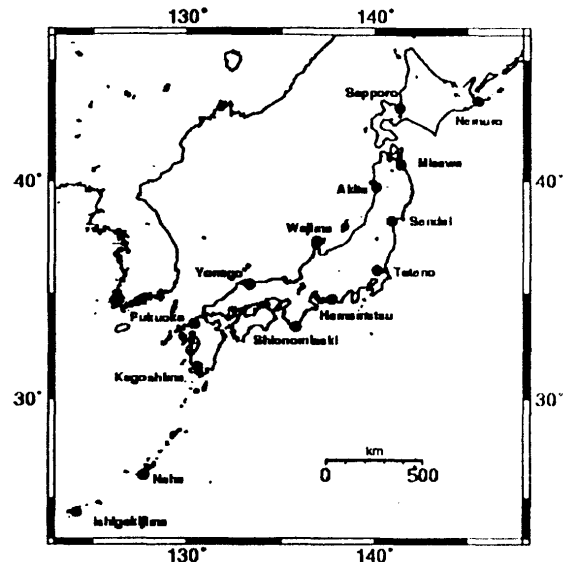


Fig. 1 Observation stations of radiosonde.

Table 1 Coordinates of the observation stations of radiosonde.

Name of station	Latitude		Longitude		Elevation m
	deg.	min.	deg.	min.	
Nemuro	43	20	145	35	39
Sapporo	43	3	141	20	19
Akita	39	43	140	6	7
Misawa	40	42	141	23	37
Sendai	38	16	140	54	43
Teno	36	3	140	8	31
Wajima	37	23	136	54	14
Hamamatsu	34	45	137	42	45
Shionomisaki	33	27	135	46	69
Yonago	35	26	133	21	8
Fukuoka	33	35	130	23	15
Kagoshima	31	33	130	33	31
Naha	26	12	127	41	27
Ishigakijima	24	20	124	10	7

Table 2 Coordinates of GPS stations.

	Locations of GPS stations	GPS station number	Latitude		Longitude		Ellipsoidal height (m)	Elevation (m)
			deg.	min.	deg.	min.		
Nemuro	Nemuro C.	940006	43	17	145	31	51	21
	Nemuro C.	950119	43	22	145	48	49	16
	Nemuro C.	960512	43	14	145	16	74	43
	Nemuro C.	960519	43	12	145	31	83	54
Sapporo	Otaru C.	940013	43	11	141	2	113	80
	Atsuta V.	950117	43	24	141	26	76	44
	Ebetsu C.	960520	43	5	141	33	55	24
	Eniwa C.	960522	42	53	141	35	67	36
Akita	Honjo C.	940031	39	24	140	3	68	30
	Kawabe T.	950188	39	39	140	14	75	36
Misawa	Rokkasho V.	950152	40	58	141	22	60	25
	Towada C.	950153	40	37	141	12	117	80
	Hachinohe C.	950156	40	31	141	31	46	8
	Noheji T.	960537	40	52	141	8	70	33
	Misawa C.	960539	40	40	141	23	87	50
Sendai	Rifu T.	940037	38	19	140	57	74	32
	Taiwa T.	950177	38	25	140	51	83	41
	Watari T.	950179	38	2	140	51	80	38
	Yamato T.	960549	38	25	141	13	49	8
Tateno	Tsukuba C.	92110	36	6	140	5	70	30
	Yasato T.	93002	36	16	140	11	94	53
	Kasumigaura T.	93006	36	6	140	21	69	30
	Tone T.	93014	35	52	140	9	47	10
	Shimodate C.	960582	36	18	139	59	76	35
	Ishige T.	960583	36	7	139	56	68	28
	Ami T.	960584	36	2	140	12	71	32
Wajima	Wajima C.	940053	37	23	136	54	51	14
	Suzu C.	950253	37	27	137	16	50	13
	Togi T.	960575	37	9	136	43	49	12
	Notojima T.	960576	37	7	136	60	74	37
Hamamatsu	Inasa T.	93050	34	50	137	41	81	41
	Hamakiata C.	93097	34	47	137	48	65	25
Shionomisaki	Kushimoto T.	940070	33	29	135	46	52	13
	Udono V.	950316	33	44	136	1	62	23
	Susami T.	950377	33	30	135	36	70	31
Yonago	Matsue C.	940074	35	26	133	4	70	35
	Mizokuchi T.	950379	35	21	133	27	126	90
	Yonago C.	960654	35	26	133	21	47	12
	Mihonoseki T.	960656	35	34	133	8	44	9
Fukuoka	Koga C.	940087	33	44	130	29	49	16
	Maebaru C.	950450	33	32	130	15	78	45
	Tsukushino C.	950451	33	30	130	31	88	55
	Nakabaru T.	960771	33	21	130	27	62	29
Kagoshima	Makurazaki C.	940098	31	16	130	18	43	11
	Kushikino C.	950488	31	43	130	17	62	29
	Ibusuki C.	950490	31	14	130	39	47	15
	Kagoshima C.	960721	31	33	130	38	80	48
Naha	Tamagusuku V.	940100	26	8	127	46	128	101
	Ishikawa C.	960741	26	27	127	50	145	115
	Tokashiki V.	960744	26	10	127	21	150	121
	Chinen V.	960745	26	10	127	50	97	70
Ishigakijima	Ishigaki C.	960749	24	32	124	18	43	19
	Ishigaki C.	960750	24	20	124	10	47	23
	Tketomi T.	960751	24	3	123	48	63	41

Table 3 Difference of the position between GPS and radiosonde stations.

	GPS station number	Horizontal distance between radiosonde station and GPS station			Height difference (radiosonde-GPS) (m)
		NS (N:+, km)	EW (E:+, km)	Distance (km)	
Nemuro	940006	-5	-7	9	18
	950119	4	24	24	23
	960512	-11	-35	37	-4
	960519	-15	-7	17	-15
Sapporo	940013	15	-33	36	-61
	950117	38	11	40	-25
	960520	4	24	24	-5
	960522	-18	27	33	-17
Akita	940031	-35	-5	36	-23
	950188	-7	15	17	-29
Misawa	950152	29	-2	30	12
	950153	-9	-20	22	-43
	950156	-20	15	25	29
	960537	-10	15	33	4
	960539	-4	0	4	-13
Sendai	940037	5	5	8	11
	950177	16	-5	18	2
	950179	-26	-5	26	5
	960549	16	35	39	35
Tateno	92110	5	-5	8	1
	93002	24	5	25	-22
	93006	5	24	25	1
	93014	-20	2	20	21
	960582	27	-16	32	-4
	960583	7	-22	23	3
	960584	-2	7	8	-1
Wajima	940053	0	0	0	0
	950253	7	40	41	1
	960575	-26	-20	33	2
	960576	-29	11	32	-23
Hamamatsu	93050	9	-2	9	4
	93097	4	11	12	20
Shionomisaki	940070	4	0	4	56
	950316	31	27	41	46
	950377	5	-18	19	38
Yonago	940074	0	-31	31	-27
	950379	-9	11	14	-82
	960654	0	0	0	-4
	960656	15	-24	28	-1
Fukuoka	940087	16	11	20	-1
	950450	-5	-15	16	-30
	950451	-9	15	17	-40
	960771	-26	7	27	-14
Kagoshima	940098	-31	-27	41	20
	950488	18	-29	34	2
	950490	-35	11	36	16
	960721	0	9	9	-17
Naha	940100	-7	9	12	-70
	960741	27	16	32	-84
	960744	-4	-37	37	-90
	960745	-4	16	17	-39
Ishigakijima	960749	22	15	26	12
	960750	0	0	0	8
	960751	-31	-40	51	-10

Table 4 Kinds of Receiver, antenna and monument of GPS stations.

	GPS station number	Receiver type	Antenna type	Monument type
Nemuro	940006	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS13
	950119	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960512	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS14
	960519	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
Sapporo	940013	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS13
	950117	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960520	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960522	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
Akita	940031	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS13
	950188	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
Misawa	950152	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	950153	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	950156	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960537	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960539	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
Sendai	940037	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS13
	950177	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	950179	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960549	LEICA SR9600	LEIAT303	GS14
Tateno	92110	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS12
	93002	TRIMBLE 4000SSE	TRM23903.00	GS11
	93006	TRIMBLE 4000SSE	TRM23903.00	GS11
	93014	TRIMBLE 4000SSE	TRM23903.00	GS11
	960582	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960583	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960584	LEICA SR9600	LEIAT303	GS14
Wajima	940053	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS13
	950253	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960575	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS14
	960576	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS14
Hamamatsu	93050	TRIMBLE 4000SSE	TRM23903.00	GS11
	93097	TRIMBLE 4000SSE	TRM23903.00	GS11
Shionomisaki	940070	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS13
	950316	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	950377	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
Yonago	940074	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS13
	950379	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960654	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960656	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS14
Fukuoka	940087	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS13
	950450	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	950451	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960771	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS14
Kagoshima	940098	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS13
	950488	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	950490	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960721	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
Naha	940100	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS13
	960741	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960744	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS14
	960745	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
Ishigakijima	960749	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS14
	960750	TRIMBLE 4000SSI	TRM23903.00	GS14
	960751	TOPCON GP-R1DY	TOP700779A	GS14

Table 5 Coordinates of weather stations.

Name of station	Wether station number	Latitude		Longitude		Elevation m
		deg.	min.	deg.	min.	
Nemuro	420	43	20	145	35	39
Sapporo	412	43	3	141	20	26
Akita	582	39	43	140	6	21
Hachinohe	581	40	32	141	32	28
Sendai	590	38	16	140	54	43
Tateno	646	36	3	140	8	31
Wajima	600	37	23	136	54	14
Hamamatsu	654	34	42	137	43	33
Shionomisaki	778	33	27	135	46	75
Yonago	744	35	26	133	21	8
Fukuoka	807	33	35	130	23	15
Kagoshima	827	31	33	130	33	31
Naha	936	26	12	127	41	53
Ishigakijima	918	24	20	124	10	7

ここで、根室・札幌・秋田・仙台・館野・輪島・潮岬・米子・福岡・鹿児島・那覇・石垣島は気象庁の管轄であり、三沢・浜松は防衛庁が管轄している。

GPS観測点は、ラジオゾンデ観測点から、水平距離が60km以内、標高差が100m以内のGEONET点を選んだ。GPS観測点座標値の一覧をTable 2に示す。Table 2中の標高は、日本本土部分はGPS解析で得られた座標値をwgs2tky座標値変換プログラム(Tobita 1994)により標高に変換した。離島部分はJGEOID98による日本周辺のジオイドマップ(Kuroishi 2000)よりジオイド高を求めて変換した。また、ラジオゾンデ観測点とGPS観測点との位置間隔をTable 3に示す。更に、GPS観測点それぞれのレシーバー、アンテナ、モニュメントタイプの一覧をTable 4に示す。モニュメントタイプとは、アンテナを保護するレドームと、ピラーの種類の組合せにより4種類に分けられたものである(Hatanaka et al., 2001)。

また、降雪・降水データを求めるために最寄りの官署で観測されている地上気象データを使用した。使用した官署の座標値をTable 5に示す。

2. 解析期間

解析期間は、1999年1月～2000年12月である。ただし、1999年5月～10月ごろにかけてラジオゾンデ測器の湿度センサーが変更されている。観測点によっては1ヶ月以上にわたる長期間の欠測がある場合がある。

解析方法

1. ラジオゾンデデータの解析

解析にあたり、(財)気象業務支援センターから提供される「月報(気象庁)」のCDROMを用いた。

1-1. SONDE\_PWVの算出方法

まず、観測が行われている面(観測面)ごとの温度から、その面の飽和水蒸気圧を(1)式から求めた。

$$\ln(e_s/6.11) = L(1/273 - 1/T)/R_v \dots\dots\dots(1)$$

- $e_s$ : 飽和水蒸気圧(hPa)
- $T$ : 気温(K)
- $L$ : 潜熱( $2.50 \times 10^6$  J/kg)
- $R_v$ : 水蒸気の比気体定数( $461 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

求めた飽和水蒸気圧と相対湿度から、観測面ごとの水蒸気圧を(2)式より求めた。

$$e = e_s \cdot RH/100 \dots\dots\dots(2)$$

- $e$ : 水蒸気圧(hPa)
- $RH$ : 相対湿度(%)

ここで、ラジオゾンデの放球地点での水蒸気圧の値をGPS観測点での値に直さなければならない。補正の際、水蒸気量は高度とともに指数関数的に減少すると仮定した。水蒸気は乾燥大気のように指数関数で近似できる鉛直プロファイルをもつとは限らないが、実際の分布を見ると、指数関数あるいは線形関数で近似できる場合が多く確認される。線形関数と指数関数で近似した水蒸気圧の差は0.004hPaであり、無視できる。ここでは指数関数を用いた。

求めた水蒸気圧と温度、気圧を利用して、観測面ごとの混合比を求めた。混合比とは水蒸気の密度と乾燥空気の密度に対する比である。使用した式を(3)式に示す。

$$W = \epsilon \cdot e / (P - e) \dots\dots\dots(3)$$

- $\epsilon \equiv m_w/m_a = 0.622$
- $W$ : 混合比(g/kg)
- $m$ : 水蒸気の分子量(18.0152kg/kmol)
- $m_a$ : 乾燥空気の分子量(28.9644kg/kmol)
- $P$ : 気圧(hPa)

求めた混合比を気圧で積分することにより、SONDE\_PWVを求めた。

$$\text{SONDE\_PWV} = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_{\infty}} W dp \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{SONDE\_PWV} = \sum \left\{ \frac{(W_i + W_{i+1})}{2g} (P_i - P_{i+1}) \times 10^3 \right\}$$

- $P_{\infty}$ : 大気層上端での気圧(hPa)
- $p_s$ : ラジオゾンデ放球地点での気圧(hPa)
- $P_i$ : ある観測面*i*での気圧(hPa)
- $P_{i+1}$ : ある観測面*i*のすぐ上の観測面での気圧(hPa)
- $W_i$ : ある観測面*i*での混合比(g/kg)
- $W_{i+1}$ : ある観測面*i*のすぐ上の観測面での混合比(g/kg)
- $g$ : 重力加速度( $9.8 \text{ m/s}^2$ )

## 1-2. ラジオゾンデの移動距離の解析方法

ラジオゾンデの風向・風速データはラジオゾンデの移動データから求められているので、風向・風速からラジオゾンデの移動の様子が分かる。

ラジオゾンデの風向・風速データの観測時間・観測終了高度からラジオゾンデの上昇速度を求めた。また、ラジオゾンデは上層に行くほど上昇速度は速くなるが、本研究では等速であると仮定した。

さらに、風速・風向データを用いて、ラジオゾンデの南北方向・東西方向の速度を求めた。求まった速度から、次式より観測面間の南北方向・東西方向の水平移動距離を求めた。

$$Dns_i = \frac{1}{2} \{ V_i \cos(\theta_i + 180) + V_{i+1} \cos(\theta_{i+1} + 180) \} t_{i-(i+1)} \quad (5)$$

$$Dew_i = \frac{1}{2} \{ V_i \sin(\theta_i + 180) + V_{i+1} \sin(\theta_{i+1} + 180) \} t_{i-(i+1)}$$

$Dns_i$ : 観測面*i*とその上の観測面*i+1*との間をラジオゾンデが南北方向に移動した水平距離(m)

$Dew_i$ : 観測面*i*とその上の観測面*i+1*との間をラジオゾンデが東西方向に移動した水平距離(m)

$V_i$ : 観測面*i*の風速(m/s)

$V_{i+1}$ : 観測面*i*のすぐ上の観測面での風速(m/s)

$\theta_i$ : 観測面*i*の風向(deg)

$\theta_{i+1}$ : 観測面*i*のすぐ上の観測面での風向(deg)

このように求まった観測面間の水平移動距離を地表から高度2000mまで足し合わせ、さらにGPS観測点とラジオゾンデ観測点との位置関係を考慮した。南北成分・東西成分を合成し、GPS観測点から高度2000mでのラジオゾンデの位置までの水平距離を求めた。このデータはラジオゾンデが風で流される影響を調べるために使用する。

## 2. GPSデータの解析

GPSデータは、GIPSY-OASIS II (GPS Inferred Positioning System - Orbit Analysis and Simulation Software II: 以後GIPSYと記す)で解析した天頂遅延量データおよび電波伝播遅延水平勾配データを使用した。

## 2-1. GIPSYソフトウェアによる解析

解析は2通りのパラメータの組合せで行った。それぞれ解析パラメータの概要をTable 6に示す。天頂遅延量データ、電波伝播遅延水平勾配の推定間隔は両者とも5分ごとに推定した。伝播遅延量を天頂方向の遅延量である天頂遅延量に変換する関数(マッピング関数)はNiellのマッピング関数(Niell 1996)を用いた。Niellのマッピング関数では観測点の緯度、高度、大気層の季節変動を考慮している。また、電波伝播遅延水平勾配推定にあたり、MacMillanの異方性マッピング関数(MacMillan 1995)を採用した。

1999年3月~5月のデータに関しては、JPLが作成したアンテナ位相中心のオフセット値のみを取り入れた場合とPCVモデルを考慮した場合の両方について解析したが、その他の期間はPCVモデルを考慮した場合のみ解析を行った。

## 2-2. GPS\_PWVの算出方法

天頂遅延量データは以下のような処理をしてGPS\_PWVに変換した。

ラジオゾンデ観測は、00:00UTCの場合、前日の23:30に放球し、12UTCの場合、11:30UTCに放球して

いる。そのため、それと比較するGPSデータは11:30UTC~12:00UTCの天頂遅延量データと23:30UTC~24:00UTCの天頂遅延量データを用いた。

天頂遅延量からGPS\_PWVに変換するにはGPS観測点での気圧と気温の値が必要である。そこで、ラジオゾンデデータを内挿・外挿し、GPS観測点の高さでの値を求めた。

天頂遅延量は静水圧遅延量と湿潤遅延量とに分けられる。静水圧遅延量をGPS観測点での気圧から次式(Saastamoinen 1971)により求めた。

$$ZHD = 0.0022765 P_{\text{GPS}} / (1 - 0.00266 \cos^2 \phi - 0.28 h_{\text{GPS}}) \dots (6)$$

$\phi$ : GPS観測点の緯度(deg)

$h_{\text{GPS}}$ : GPS観測点の楕円体高(m)

ZHD: 静水圧遅延量(m)

静水圧遅延量が除かれると残りは湿潤遅延量だけになる。湿潤遅延量に加重平均気温から求まる係数を掛けることでGPS\_PWVに変換できる。そこでラジオゾンデデータから次式(Bavis *et al.*, 1992)を用いて加重平均気温を求めた。

$$T_m = [ \int (e/T) dz ] / [ \int (e/T^2) dz ] \dots (7)$$

$$T_m = \frac{\sum \left[ \frac{e_i + e_{i+1}}{T_i T_{i+1}} \right]}{\sum \left[ \frac{e_i + e_{i+1}}{T_i^2 T_{i+1}^2} \right]}$$

$T_m$ : 加重平均気温(K)

$e_i$ : ある観測面*i*での水蒸気圧(hPa)

$e_{i+1}$ : ある観測面*i*のすぐ上面での水蒸気圧(hPa)

$T_i$ : ある観測面*i*での気温(K)

$T_{i+1}$ : ある観測面*i*のすぐ上面での水蒸気圧(hPa)

求まった加重平均気温は次に示す(8)式により変換係数 $\Pi$ (Askne & Nordius 1987)になる。この変換係数 $\Pi$ を湿潤遅延量に掛けることでGPS\_PWVを求めた。

$$\Pi = 10^5 / R_v (k'_2 + k_3 / T_m) \dots (8)$$

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

$$\text{GPS\_PWV} = \Pi \text{ ZWD}$$

$k_1$ : 実験的に求められた物理定数(77.6K/hPa)

$k_2$ : 実験的に求められた物理定数(71.98K/hPa)

$k_3$ : 実験的に求められた物理定数( $3.754 \times 10^5 \text{K}^2/\text{hPa}$ )

ZWD: 湿潤遅延量(m)

GPS観測点のうち静水圧遅延量が最も小さくなるのは、楕円体高が最も高い点(150m)で台風が通過したような時である。その気圧は約970hPaであり、そのときの静水圧遅延量は(6)式より約2.2mである。また、最も大きくなるのは、楕円体高が最も低い点(43m)が高気圧に覆われたときであり、その気圧は約1030hPaで、静水圧遅延量は約2.4mになる。

天頂遅延量は静水圧遅延量と湿潤遅延量との和であるため、天頂遅延量が2.2mより小さくなることはない。2.2mを天頂遅延量の最小の閾値とした。

また、PWVの最大値は約80mmである。この時の湿潤遅延量は、(8)式より約0.5mであるので、天頂遅延量の最大値の閾値は静水圧遅延量の最大値2.2mと湿潤遅延量の最大値0.5mの和である2.9mとした。

天頂遅延量が2.2m~2.9mの閾値に当てはまらないよ



Table 6 Parameters in the GPS data process.

	March-May 1999	Jan. 1999-Dec. 2000
Interval of zenith tropospheric delay (ZTD) estimation	5min	5min
Interval of atmospheric delay gradient estimation	5min	5min
Restriction value of ZTD	5.0d-8km/sqrt (sec)	1.7d-7km/sqrt (sec)
Restriction value of tropospheric delay gradient	5.0d-9km/sqrt (sec)	5.0d-9km/sqrt (sec)
Restriction of coordinates (first)	0.1km	0.1km
Restriction of coordinates (final)	1.0d-5km	1.0d-5km
Information of GPS satellite's orbit and clock	JPL	JPL
Mapping function (Hydrostatic component)	Niell (1996)	Niell (1996)
Mapping function (Wet component)	Niell (1996)	Niell (1996)
Gradient model	MacMillan (1995)	MacMillan (1995)
PCV model	JPL (offset of phase center)	Hatanaka (2001)
Load model of ocean tides	GOTIC	GOTIC II

うな異常値が表れた場合、パラメータ推定の手法上、12時間～24時間かけて徐々に正常値に戻る。そこで、1日間のデータに閾値に当てはまらない値が存在した場合、今回の解析では、その日と翌日のデータは使用しなかった。

## 解析結果

### 1. GPSアンテナ位相中心変動の仰角依存性の影響

1999年3月～5月の期間において、PCVモデルを使用しない解析とPCVモデルを使用した解析を行った。このときのSONDE\_PWVとGPS\_PWVとの比較は、アンテナ・モニュメントタイプごとに行った。

まず、PCVモデルを使用しない解析によるGPS\_PWVとSONDE\_PWVとの相関をFig.2の上図に示す。また、PCVモデルを使用した解析によるGPS\_PWVとSONDE\_PWVとの相関をFig.2の下図に示す。横軸がSONDE\_PWVであり、縦軸がSONDE\_PWVである。また図中にはPWV差の平均と差の平均からの標準偏差も記した。

PCVモデルを使用しない場合、GPS\_PWVはSONDE\_PWVに比べて、4mm近く小さく推定され、負のバイアスが見られた。また、このときの標準偏差は2.9mmとなっている。PCVモデルを使用すると、PWV差の平均値は1.8mmになり、PCVモデルを使用しない場合に見られた負のバイアスは解消された。また、標準偏差は2.0mmとなり、PCVモデルを使用しない場合に比べて小さくなった。このことから、PCVモデルを考慮に入れないと、PCV仰角依存性の影響により、GPS\_PWVは小さく推定されることが分かる。

アンテナ・モニュメントタイプごとのGPS\_PWVとSONDE\_PWVとの一次相関式

$$GPS\_PWV = slope \times SONDE\_PWV + y-intercept$$

の傾きとy切片の値をFig.3に示す。上図はPCVモデルを使用しない場合における一次相関式の傾きとy切片の値である。下図はPCVモデルを使用した場合における一次相関式の傾きとy切片の値である。PCVモデルを使用しない場合、アンテナ・モニュメントタイプの違いにより、傾き、y切片ともに大きく異なることが分かる。例えば、TRIMBLE製アンテナとGS12モニュメントタイプの組合せの場合、傾きが約0.90であり、y切片が約0.0mmであるのに対し、TOPCON製アンテナとGS14モニュメントタイプの組合せの場合、傾きが約1.03であり、y切片が約-6.0mmにも達している。このことから、PCV仰角依存性によるGPS\_PWVへの影響は、アンテナ・モニュメントタイプごとに異なることが分かる。一方、PCVモデルを使用した場合、全てのアンテナ・モニュメントタイプで、傾きは0.94～0.97、y切片は0.0mm～2.1mmの範囲に収まっている。

### 2. 解析時間の違いによる影響(end effectの影響)

1999年1月～2000年12月の全データについて、SONDE\_PWVとGPS\_PWVとの比較を00UTCと12UTCとに分けて行った。解析の際には、PCVモデルを考慮した。

解析時間ごとのSONDE\_PWVとGPS\_PWVの相関図をFig.4に示す。上図が00UTCでの相関図、下図が12UTCでの相関図である。横軸はSONDE\_PWV、縦軸はGPS\_PWVである。標準偏差は00UTC、12UTCの間に大きな差はない。また差の平均値も、両者ともに±1mm以内に収まっている。しかし、一次相関式

$GPS\_PWV = slope \times SONDE\_PWV + y-intercept$  は、00UTCで傾きが0.99であるのに対し、12UTCは0.93となり、end effectの効果を受けていない12UTCの方がむしろSONDE\_PWVと合わない結果となった。また、y切片は00UTC、12UTCともに変わらなかった。00UTC

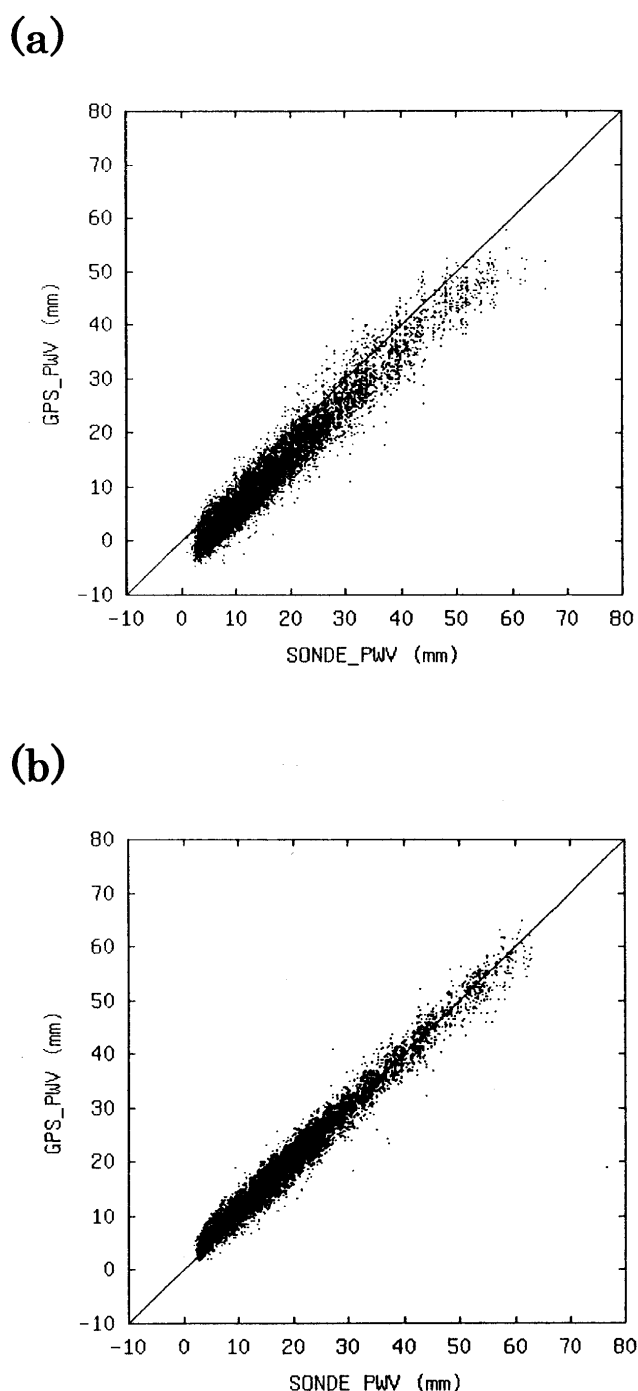


Fig. 2 Relation of SONDE\_PWV and GPS\_PWV (March - May 1999).

(a) Without PCV model. Mean of difference is  $-3.7\text{mm}$  and S.D. is  $2.9\text{mm}$ .

(b) With PCV model. Mean of difference is  $1.8\text{mm}$  and S.D. is  $2.0\text{mm}$ .

のGPS\_PWVがSONDE\_PWVとより良く一致したことから、end effectの効果は大気遅延の推定にほとんど影響していないと考えられる。また、12UTCではPWV差とPWVの量とに關係があることが分かった。

解析時間ごとのSONDE\_PWVとPWV差との相關図をFig.5に示す。上図が00UTC、下図が12UTCでの相關図である。横軸はSONDE\_PWV、縦軸はPWV差である。

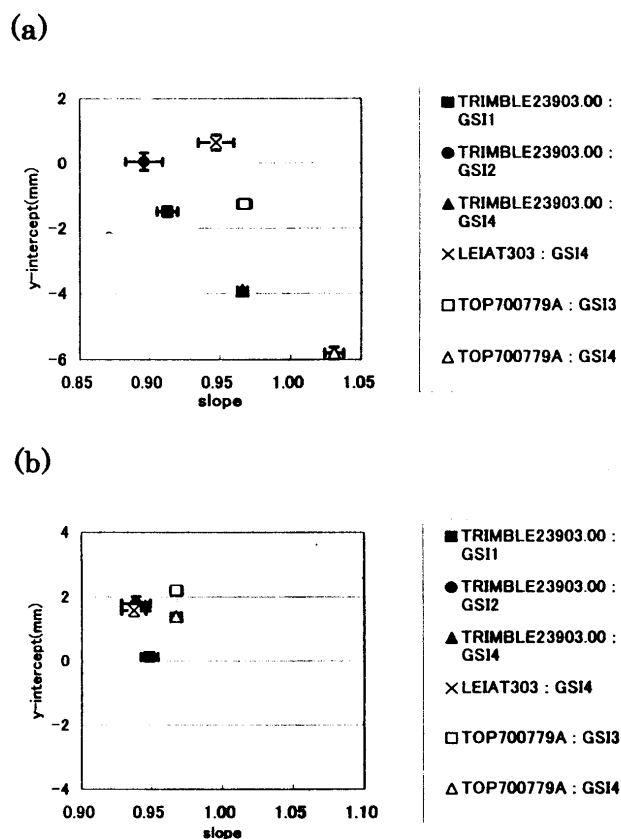


Fig. 3 Coefficients of linear function (  $\text{GPS.PWV} = \text{slope} \times \text{SONDE.PWV} + \text{y-intercept}$  ) by antenna / monument types (March - May 1999).

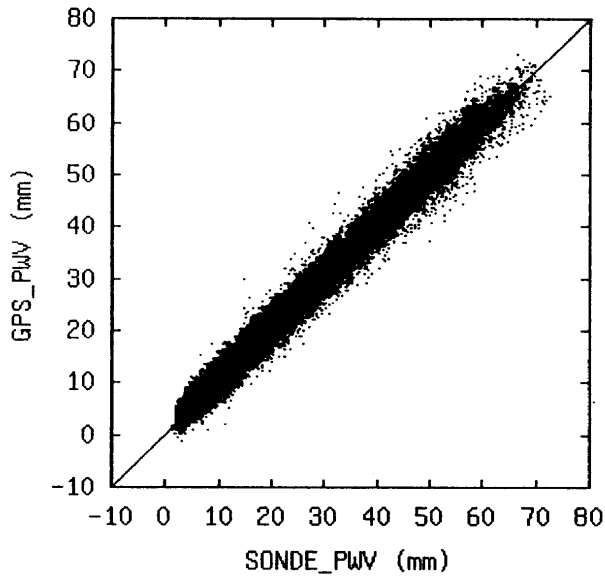
(a) Without PCV model.

(b) With PCV model.

00UTCの場合、SONDE\_PWVが大きくなってもPWV差はほとんど $-5\text{mm} \sim 5\text{mm}$ の間にある。しかし、SONDE\_PWVが $60\text{mm}$ 以上になるとPWV差が負、つまり、GPS\_PWVが小さく推定される。一方、12UTCの場合、SONDE\_PWVが小さいとPWV差が正になっており、GPS\_PWVの方が大きく推定される。また、SONDE\_PWVが大きくなるにつれて、PWV差は次第に負になり、SONDE\_PWVが $60\text{mm}$ 以上になると、PWV差はほとんどが負の値となる。

00UTCと12UTCにおけるSONDE\_PWVとGPS\_PWVとの相關の違いが生じる原因を調べるために、根室・館野・那覇の観測点においてPWV差の月平均値をとり変動を調べた。この際、データ数が10個以上の月について解析を行った。その結果をFig.6に示す。00UTCでは有意な変動は見られないのに対し、12UTCでは大きな季節変動が見られる。夏季にはPWV差が $-2\text{mm} \sim -6\text{mm}$ と大きく負になるのに対し、冬季ではPWV差が逆に $0\text{mm} \sim 4\text{mm}$ 程度の正になる。また、PWVが負になる現象は2000年夏より1999年夏の方が顕著に表れている。とくに那覇では、2000年夏におけるPWV差が負になる程度が小さい。これは、SONDE\_PWVの月平均値の変動パターン(Fig.7)と一致している。Fig.7から2000年夏より1999年夏の方がSONDE\_PWVは大きいことが分かる。以上のことから12UTCのPWV差の変動は、PWVの量に依存したものだといえる。

(a)



(b)

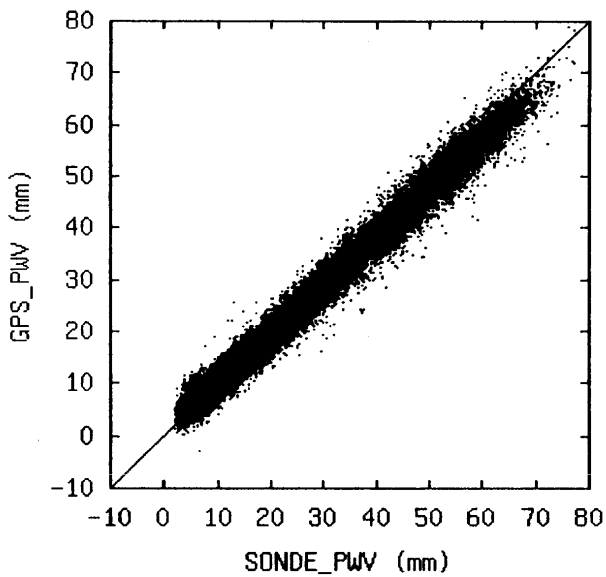


Fig. 4 Relation between SONDE\_PWV and GPS\_PWV at 00UTC and 12UTC (1999~2000).

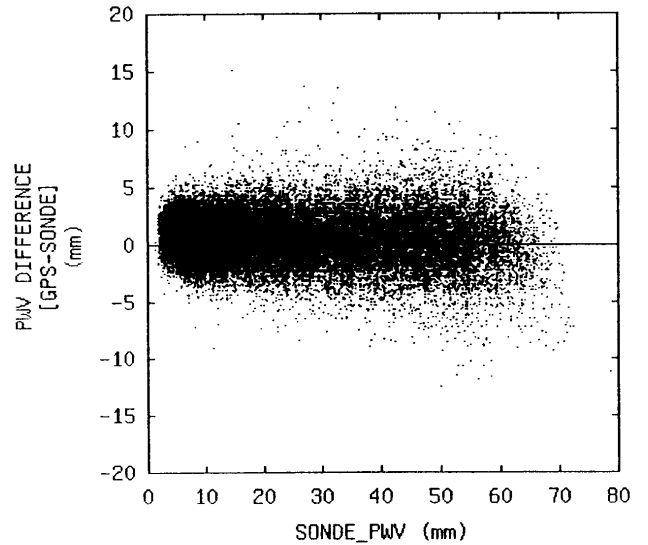
(a) 00UTC. Mean of difference is 0.5mm and S.D. is 2.1mm. Relation is  $GPS\_PWV = 0.99 \times SONDE\_PWV + 0.79$

(b) 12UTC. Mean of difference is -0.9mm and S.D. is 2.5mm. Relation is  $GPS\_PWV = 0.93 \times SONDE\_PWV + 0.91$

### 3. 降水等によるラジオゾンデ湿度センサーの異常値検出による影響

1999年1月~2000年12月の全データを利用して、多湿

(a)



(b)

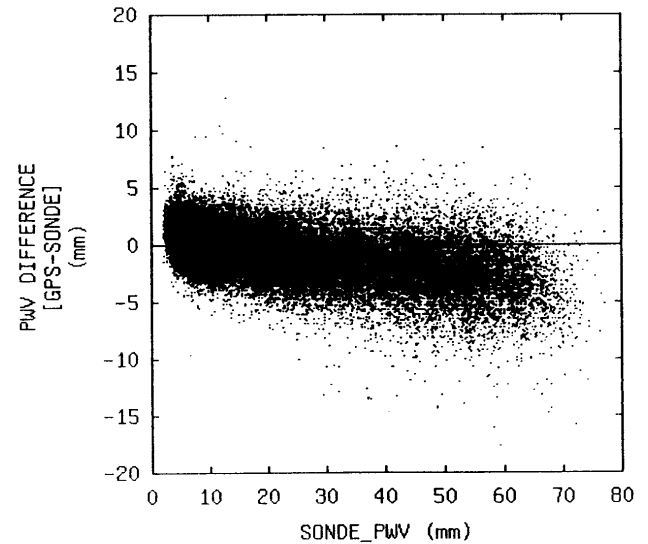


Fig. 5 Relation between SONDE\_PWV and PWV difference at 00UTC and 12UTC (1999-2000).

(a) 00UTC.

(b) 12UTC

時とそれ以外との間のSONDE\_PWVとGPS\_PWVとの相関の違いについて調べた。データは、解析時間に雨が降っている時とラジオゾンデデータから高度1000mまでの間に湿度が90%以上になっている時を「多湿時」とし、また、雨が降っていない時と高度1000mまでの間の湿度が90%未満の時を「多湿時以外」とした。解析の際にはPCVモデルを使用した。

多湿時、多湿時以外それぞれに分けたSONDE\_PWVとPWV差との相関図をFig.8に示す。多湿時の場合、SONDE\_PWVが60mm以上でPWV差が大きく負になる傾向を示した。一方、多湿時以外の場合、SONDE\_PWV

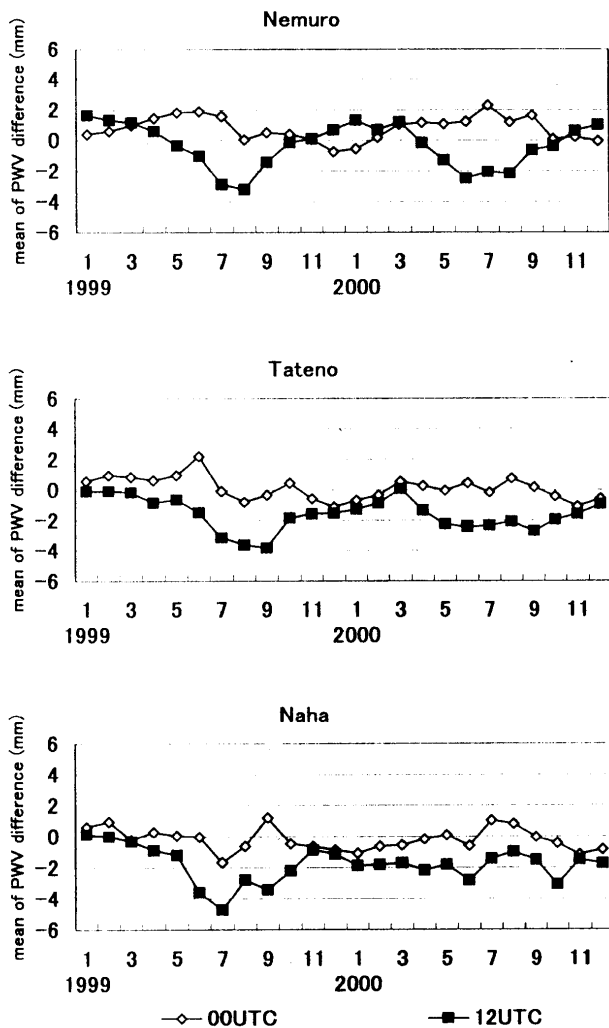


Fig. 6 Mean of PWV difference in each month at 00UTC and 12UTC (1999~2000).

V60mm以上になってもPWV差が大きく負になる傾向は見られなかった。

多湿時と多湿時以外それぞれのPWV差月平均値の変動をデータ数が10個以上の月について求め、その結果をFig.9に示す。根室・館野では5月~10月にかけて、多湿時データの方が多湿時以外のデータよりPWV差が負になる。また、那覇においては年間を通して、多湿時データの方が多湿時以外のデータよりPWV差が負になる。

ラジオゾンデの湿度センサーが濡れてしまうことで湿度が異常に高い値となってしまう影響は、SONDE\_PWVが60mm以上でPWV差が大きく負になる現象として表れる。PWVが小さい時、多湿期でもPWV差が大きく負にならないのは、気温が低いことにより湿度の異常値が水蒸気圧の値の誤差に大きく影響されないためであると考えられる。南西諸島において、年間を通して多湿時データの方が多湿時以外のデータよりPWV差が負になる原因は、亜熱帯気候であるため1年中温暖であり、島であるため多湿であることが考えられる。

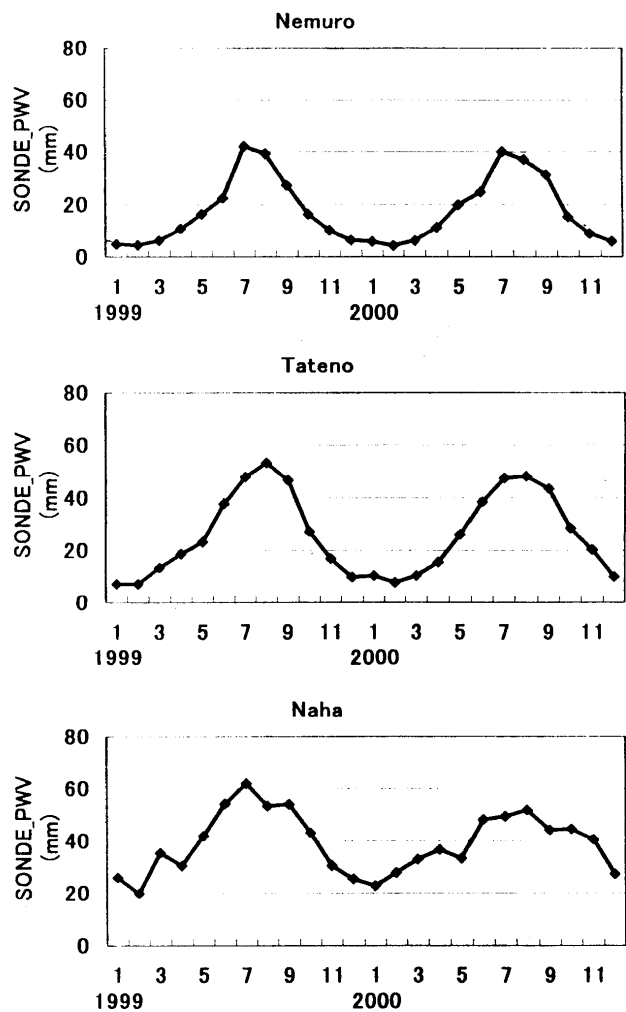


Fig. 7 Mean of SONDE\_PWV in each month (1999~2000).

#### 4. ラジオゾンデが風で流される影響

防衛庁管轄の浜松・三沢を除いたすべての点を用い、1999年10月~2000年12月の多湿時以外のデータを用い、PCVモデルを使用した。

GPS観測点から高度2000mでのラジオゾンデ位置までの水平距離とPWV絶対差との相関をFig.10とFig.11に示す。Fig.10はラジオゾンデの移動方向に投影したGPS電波伝播遅延水平勾配が3mm未満になる場合のデータを用いた相関図である。Fig.11はラジオゾンデの移動方向に投影したGPS電波伝播遅延水平勾配が3mm以上になる場合のデータを用いた相関図である。また、y軸に平行な線はGPSが捕らえることができる空間の水平距離を示している。図中の曲線は水平距離1kmごとのPWV絶対差平均値の変動を示している。一見、ラジオゾンデがGPSが捕らえることができる大気の外に出ている場合、両者ともPWV絶対差が大きくばらついており、ラジオゾンデ-GPS水平距離とPWV絶対差との間には関係があるように見える。しかし、PWV絶対差の平均値は水平距離が大きくなって一定の値を示している。つまり、ラジオゾンデが風に流されることによる影響は見いだされなかった。

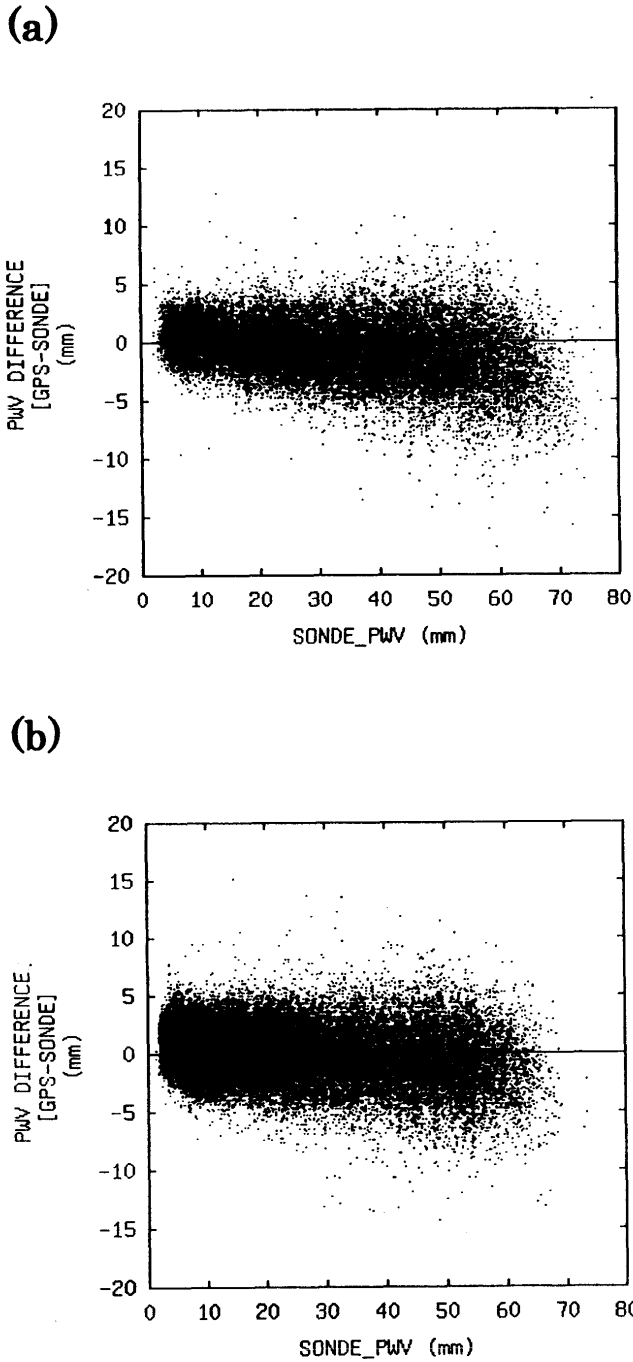


Fig. 8 Relation between SONDE\_PWV and PWV difference at wet case and dry case (1999~2000).  
 (a) Wet case.  
 (b) Dry case.

**議論**

1. SONDE\_PWVとGPS\_PWVとの相関の解析時間による違いについて  
 SONDE\_PWVとGPS\_PWVとの相関は、00UTCと12UTCとの間に大きな違いが生じた。この原因について議論する。
- 1-1. 日射による影響  
 00UTCと12UTCとの大きな違いは日射の有無である。

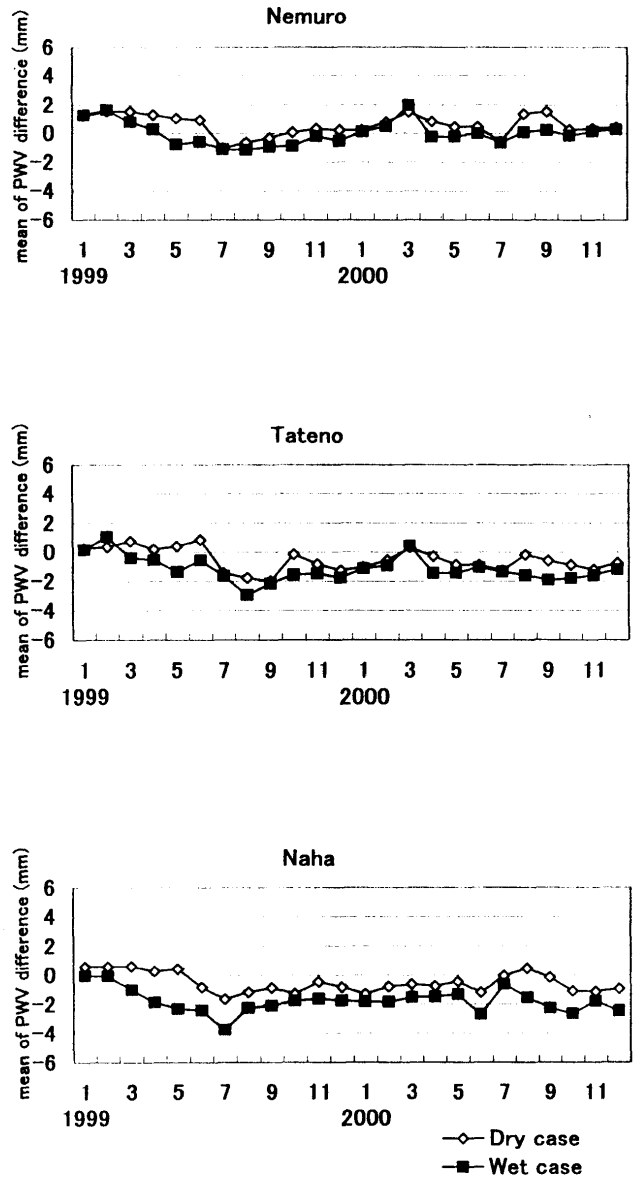


Fig. 9 Mean of PWV difference in each month at dry case and wet case (1999-2000).

そこで、日射の有無の影響について考える。  
 日射の影響は、ラジオゾンデの場合、気温測定に影響してくると、ラジオゾンデの気温測器であるサーミスタ温度計は直接外気にさらされているため、何かしらの措置を行わない限り、昼間(00UTC)は日射エネルギーを吸収して真の気温よりも高くなり、夜間(12UTC)は赤外放射のため真の気温よりも低くなる。しかし、日本で用いられているラジオゾンデの気温センサーは、測器の表面にアルミニウムの真空蒸着を施して反射率を上げ、気温測定誤差を小さくしている。反射率は波長によって異なり、赤外放射域(3~30 $\mu$ m)の場合、反射率は97%以上であり、赤外放射の影響は小さい。日射光の反射率は約80%であり、残り20%が気温測定誤差源となる。この誤差源はセンサーなどの熱収支の式・太陽高度角・ゾンデの高さ(気圧)により補正されている(朝倉ほか, 1995)。  
 日射によるGPS側の影響として、GEONETのステン

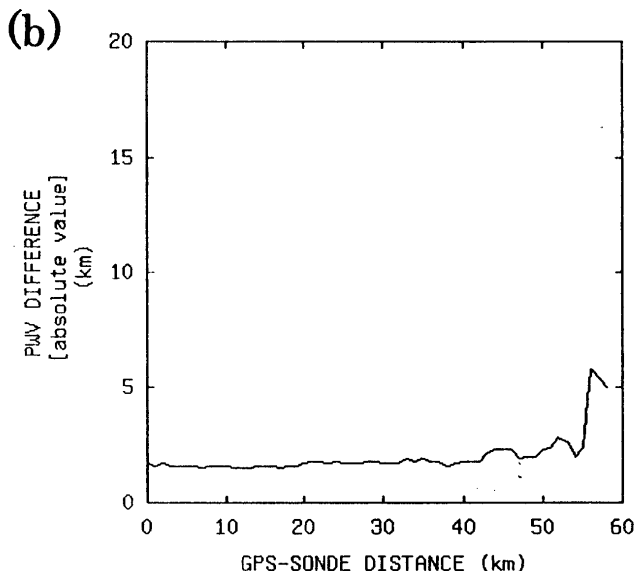
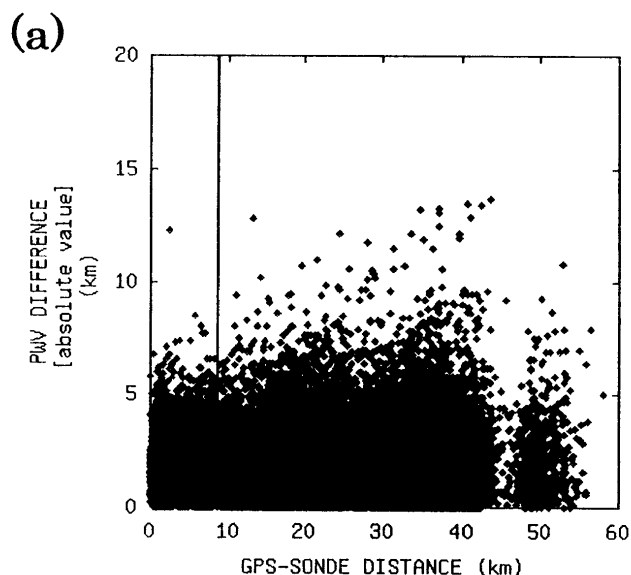


Fig. 10 Relation between GPS-SONDE distance and PWV difference (absolute value) at when absolute value of horizontal gradients is under 3mm. Vertical line is the distance that radiosonde is out of the space GPS observes.  
 (a) All date.  
 (b) Average PWV difference of GPS-SONDE distance.

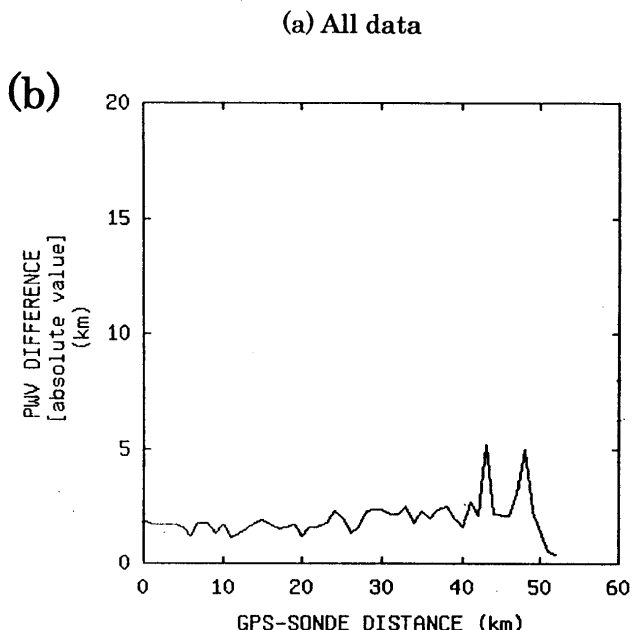
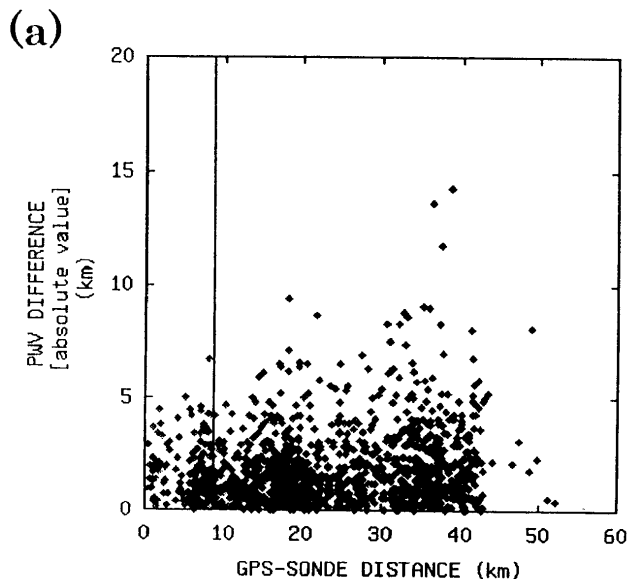


Fig. 11 Relation between GPS-SONDE distance and PWV difference (absolute value) at when absolute value of horizontal gradients is more than 3mm. Vertical line is the distance that radiosonde is out of the space GPS observes.  
 (a) All date.  
 (b) Average PWV difference of GPS-SONDE distance.

レス製のピラー部分が日射によって熱膨張する可能性が考えられる。阿部ほか(1999)はピラーの数mm程度の水平変位を確認している。

測位解鉛直成分の誤差とGPS\_PWV誤差との関係式は経験的に求まっており、次式のように表される(Shoji et al., 2000)。

$$dPWV = UD\_bias \times 0.27 \times \Pi \dots\dots\dots(10)$$

$dPWV$ : GPS\_PWV誤差

$UD\_bias$ : 測位解鉛直成分の誤差

この式を用いると、ピラーの鉛直方向への10mmの膨張はPWVで0.4mmの減少となりFig.5に示される数mmの差に比べ小さい。

1-2. 潮汐荷重の影響

本研究でのGPS解析では、GOTIC II 潮汐荷重モデル(Matsumoto et al., 2001)による主要11分潮の潮汐荷重効果を考慮している。しかし、これ以外の小さな分潮による影響により、SONDE\_PWVとGPS\_PWVとの差の00UTCと12UTCにおける違いが生じる可能性がある。1999年1月7日~1月12日において、GOTIC II 荷重潮汐モデルによる54分潮の荷重潮汐効果を考慮した解析(松本, 2001)では、大気遅延量はサブミリメートルのオーダーで変化することが分かった。この値はGPS\_PWVに変換すると無視できる量である。

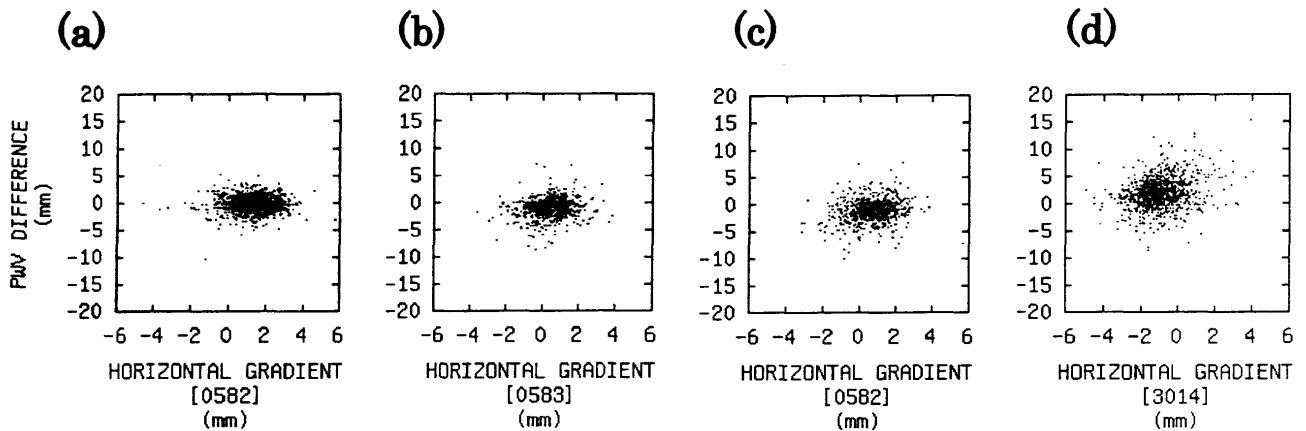


Fig. 12 Relation between PWV differences (GPS-SONDE) and horizontal gradients that mapped onto objective sites.

- (a) 0582-0583 (site distance is 21km). Correlation coefficient is 0.03.  
 (b) 0583-0584 (site distance is 31km). Correlation coefficient is 0.15.  
 (c) 0582-0584 (site distance is 38km). Correlation coefficient is 0.17.  
 (d) 3014-0582 (site distance is 51km). Correlation coefficient is 0.24.

### 1-3. PWVの変動量による影響

SONDE\_PWVとGPS\_PWVとの差の00UTCと12UTCの違いは、PWVが大きくなるにつれて顕著になる。PWVが大きい時は、大気擾乱が顕著な時であり、PWVの変動も著しいものと推測できる。本研究では、PCVを考慮した場合のGPS解析における天頂遅延量の拘束条件は $1.7d-7km/\sqrt{sec}$ である。これは、約 $76.5mm/hr$ の天頂遅延量の変動を考慮していることを示す。しかし、これ以上の大気変動が実際に起こっていた場合、そこで差が生じる可能性がある。遅延量 $76.5mm/hr$ の変化はGPS\_PWVに変換すると、約 $11.5mm/hr$ の変化に相当する。これ以上の変化が定常的に生じるとは考えにくい。

### 2. GPS電波伝播遅延水平勾配とGPS\_PWV差との関係

風によるラジオゾンデの移動によるラジオゾンデ-GPS間水平距離の変動とPWV差との関係を見出せなかった。これは、ラジオゾンデの移動が風によるものであるため、ラジオゾンデの移動とともに観測大気も移動していることが原因の1つと考えられる。

そこで、基準となるGPS観測点のGPS電波伝播遅延水平勾配を比較対象であるGPS観測点に投影した大きさと観測点間のPWV差(比較対象観測点-基準点)との関係について調べた。調査は、館野地域の観測点で1999年1月~2000年12月の全期間について行った。

その結果をFig.12に示す。縦軸はGPS観測点間の距離、横軸は基準点の伝播遅延水平勾配の大きさである。水平勾配が正の場合、比較対象の観測点側の電波が遅れていることを示し、数値が大きいと電波の遅れが大きいことを示している。つまり、比較対象の観測点側のGPS\_PWVが大きくなるはずである。一方、水平勾配が負の場合、比較対象の観測点とは反対側の電波が遅れていることを示している。つまり、基準点側のGPS\_PWVが大きくなるはずである。観測間距離が21kmでは相関係数が0.03であり、相関が見られなかった。観測間距離が31kmでは相関係数が0.15、観測間距離が51kmでは相関係数が0.24となった。観測間距離が長くなると、若干相関が認められるようになるが、その影響は小さい。

### 3. 考えられるGPS\_PWVの誤差

#### 3-1. GIPSY解析ソフトウェア上の問題

GIPSYソフトウェアによる解析において、受信機時計の処理に問題があることが指摘されている。その影響により、GEONETの3時間ごとにセッションを切るデータ取得方法と衛星配置の4分の位相ずれとのリンクにより45日周期の見かけの測位解変動が生じる(畑中, 2000)。その影響は鉛直測位解に20mm程度の振幅を生じさせている。この誤差によるGPS\_PWVへの影響は、(20)式より約 $0.8mm$ 程度であり、ほとんど影響はない。

#### 3-2. 天頂遅延量推定における問題

本研究では、GPS電波大気遅延量を天頂方向に投影するためにNiellマッピング関数を用いている(Niell 1996)。Niellマッピング関数では標準大気モデルとともに緯度・ジオイド高・DOY(Day of Year)の値から静水圧遅延成分の天頂遅延量が求まる。DOYを用いるのは大気層の厚さ(気圧)の季節変化を考慮するためである。しかし、実際には気圧の変動も複雑であり、Niellマッピング関数で定義している大気層の厚さと異なる場合がある。この誤差がGPS\_PWVに影響してくる可能性がある。(6)式より、気圧 $1hPa$ あたりの静水圧遅延は約 $2mm$ であり、GPS\_PWVに変換すると $0.03mm$ になる。よって、気圧の誤差によるGPS\_PWVへの影響は無視できるものである。

### 結論

#### 1. GPSアンテナ位相中心変動の電波入射仰角依存性の影響

GPSアンテナ位相中心変動の電波入射仰角依存性の影響によって、GPS\_PWVは大きな負のバイアスを生じる。また、差の平均値はアンテナ・モニュメントタイプの組合せにより異なる。そこでPCVモデルを考慮すると、GPS\_PWVの負のバイアスは解消された。しかし、アンテナ・モニュメントタイプの組合せごとの差の平均値の違いが $3mm$ 程度残る。

#### 2. 解析時間の違いによる影響(end effectの影響)

00UTCと12UTCそれぞれのSONDE\_PWVとGPS\_PW

Vとの差については、平均値や標準偏差には差が認められない。しかし、SONDE\_PWVとGPS\_PWVとの一次相関式をみると、12UTCのほうが00UTCより傾きが小さくなり、end effectの影響が考えられる00UTCより、12UTCの方がSONDE\_PWVと合わない結果となっている。この原因をアンテナ位相中心変動・日射・荷重潮汐・GPS電波大気遅延量の拘束値に着目して考えたが、明確な原因は分からなかった。この00UTCと12UTCの違いについては今後の研究課題となる。

### 3. 降水等によるラジオゾンデ湿度センサーの異常値検出による影響

ラジオゾンデの湿度センサーが濡れる事で、相対湿度が過大に表示される。この影響により、PWVが60mm以上になるとSONDE\_PWVの方が大きく推定される。また、気温が高い夏季には、GPS\_PWVに比べSONDE\_PWVが過大に推定される。とくに南西諸島では年間を通してこの影響がある。

### 4. ラジオゾンデが風で流される影響

ラジオゾンデが風に流されることで、GPSが捕らえている大気と異なってしまう影響を調べた。その結果、GPSとラジオゾンデとの距離とPWV差との関係は見られず、ラジオゾンデが風で流されることが、PWV差に大きな影響を及ぼすことはない。

## 謝辞

気象研究所第2研究室の中村一氏、瀬古弘氏、小司慎教氏、青梨和正氏には、本研究に対し、多くの貴重なご意見を頂いた。心より感謝の意を表す。

静岡大学理学部の新妻信明教授、鈴木款教授に原稿を読んで適切なコメントを頂き、論文の改良に大変役に立った。また、静岡大学理学部のM. Satish-Kumar博士に英語の校閲を頂いた。厚くお礼を申し上げる。

研究を進めるにあたり、多くの御助言や御意見を頂いた里村研究室の本田大介さん、後藤ゆかりさん、寺田めぐみさん、馬場高志さん、また卒業生の錦織牧子さん、井端吉郎さんをはじめ、お世話になった方々に重ねて感謝の意を表す。

## 引用文献

- 安部 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.
- 朝倉 正・関口理郎・新田 尚 (1995), 新版気象ハンドブック. 朝倉書店, 東京.
- Askne J. & Nordius H. (1987), Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data, *Radio Science*, **22**, 379-386.
- Bevis M., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R. A. & Ware R. H. (1992), GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, **97**, 15787-15801.
- Duan J. & Coauthors (1996), GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, **35**, 830-838.
- 畑中雄樹 (1998), GPS準リアルタイム解析における問題点 気象研究ノート 第192号 第10章 日本気象学会.
- 畑中雄樹 (2000), GIPSYによるGEONET解析結果に現れる偽の45日周期について. 日本測地学会第94回講演会要旨, 37-38.
- Hatanaka Y., Sawada M., Horita A. & Kusaka M. (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., Sawada M., Horita A. & Kusaka M. (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.
- 黒石裕樹 (2000), 日本のジオイドの重力手法による精密決定. 測地学会誌, **46**, 1-20.
- Ohtani R. & Naito I. (2000), Comparisons of GPS-derived precipitable water vapors with radiosonde observations in Japan. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 26917-26929.
- MacMillan D. S. (1995), Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations. *Geophysical Research Letters*, **22**, 1041-1044.
- 松本晃治 (2001), マイナー分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., Sato T., Takanezawa T. & Ooe M. (2001), GOTIC2: A Program for Computation of Oceanic Tidal Loading Effect. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, **47**, 243-248.
- Niell A. E. (1996), Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, **101**, 3227-3246.
- 西村昌明・里村幹夫・島田誠一・内藤勲夫 (2000), 北陸地方における前線通過時のGPS電波大気遅延変動について. 静岡大学地球科学研究報告, **27**, 37-48.
- Saastamoinen J. (1971), Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, in *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, *Geophysical Monographic Research*, **15**, 247-251.
- Shoji Y., Nakamura H., Aonashi K., Iehiki A., Seko H. & 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.
- Tobita M. (1994a), Development of Coordinate Transformation Program TKY2WGS. *Technical Memorandum of the Geographical Survey Institute*, **23**, 8-19.
- Tobita M. (1994b), Applications of the Precise Geodetic Network and Integration of the Coordinate Systems. *Technical Memorandum of the Geographical Survey Institute*, **24**, 1-37.