

## 寄 書

### GPS 高さ観測と大気遅延量について —御前崎地方の精密水準と比較して—

呉新華<sup>1)\*</sup>・西修二郎<sup>1)\*\*</sup>・今給黎哲郎<sup>1)</sup>・  
田中 稔<sup>2)</sup>

- 1) 国土地理院測地観測センター
- 2) 鹿児島大学理学部

(2003 年 1 月 24 日受付, 2003 年 8 月 24 日改訂,  
2003 年 12 月 25 日受理)

### GPS Height Coordinate and Tropospheric Delay —Comparing with the Precise Leveling in Omaezaki—

Wu Xinhua<sup>1)</sup>, Shujiro Nishi<sup>1)</sup>,  
Tetsuro Imakiire<sup>1)</sup> and Minoru Tanaka<sup>2)</sup>

- 1) Geodetic Observation Center,  
Geographical Survey Institute
- 2) Faculty of Science, Kagoshima University

(Received January 24, 2003; Revised August  
24, 2003; Accepted December 25, 2003)

#### Abstract

GPS continuous observation and repeated precise leveling between Kakegawa and Omaezaki, Tokai area, Japan, have been carried out by the Geographical Survey Institute for detecting vertical deformation and identifying its noise characteristics. Comparing relative height differences obtained from two different observations with each other, it is made clear that the annual change in leveling result is in phase with that of zenith

total delay (*ZTD*) of troposphere given by GPS analysis, but the amplitude of the former is twice larger than that of tropospheric *ZTD*. In contrast, it is found out that the linear subsidence rate given by GPS is a little larger than that from leveling.

#### 1. はじめに

御前崎周辺地域の地殻変動を監視するため、国土地理院は、掛川～御前崎間の一等水準点において、精密水準測量の繰り返し測定を定期的実施してきた。その一方、GPS による電子基準点網 GEONET (GPS Earth Observation NETwork) および高精度比高観測点 HVAN (High Vertical Accuracy Network) での観測も行われている。また 1998 年から、電子基準点掛川 (93052)～浜岡 2 (960625)～御前崎 (93101) 間での取付け精密水準測量も繰り返しで実施されるようになり、比高変化の同時比較が可能になった (Figure 1)。

しかし、観測手法や誤差源の違いにより、GPS と水準観測による季節変動や経年速度などの結果は同じ期間においても、必ずしも一致していないことが示された (呉・他, 2003)。本稿では、GPS 連続観測から得られた掛川～御前崎間の比高結果を精密水準測量結果と比較し、両者の年周変動と経年変化の差異を明らかにし、その原因について考察する。

#### 2. 比高変動の観測結果

御前崎周辺の精密水準測量は地殻変動観測で最も古く、かつ詳細に実施されてきた主要な手段の一つであった。Figure 2 のように、掛川市～浜岡町の水準路線 (140-1～2595) において、これまで 20 数年間の精密水準測量による比高変動は、長期的に約 5 mm/yr の沈降変動に加え、短期的には振幅約 7 mm の季節変動を示しながら現在に至っている (国土地理院, 2000～2002)。

一方、GPS 連続観測から得られる座標の上下成分は、水平成分に対し 3～4 倍程度のばらつきを有するほか、振幅 1 cm ほどの年周変動を含んでおり、本来 3 次元的情報である GPS 観測の全てを有効に利用できていない。しかし、誤差要因の多くが空間的に強い相関を持つためか、短基線ではこの顕著な周期変動が 2 点間の比高から消えている。

GPS と水準測量の比高変動を比べるため、まず、1998 年から始まった電子基準点間の取付け水準測量

\* Now at GIS Institute, PASCO Corporation

\*\* Now at Japanese Association of Surveyors

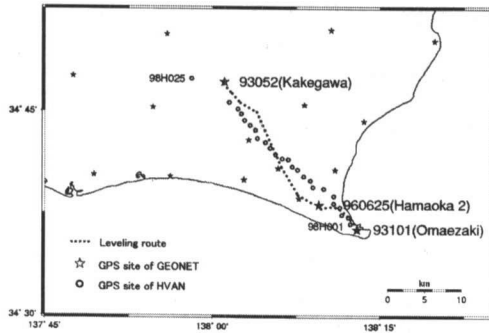


Fig. 1 Locations of GPS observation sites and the precise leveling route in Tokai area.

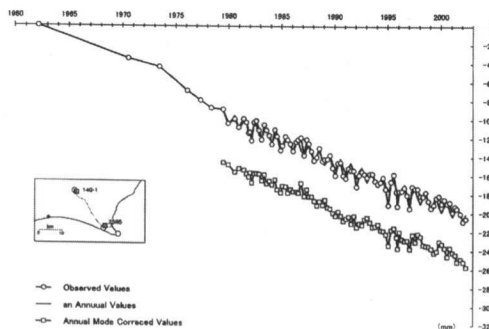


Fig. 2 Temporal Change of BM 2595 (HAMA-OKA) by precise leveling (Fixed BM: 140-1 and Fixed Year: 1962).

と GPS 連続観測による測位解の上下成分を Figure 3 に示す。これらの観測結果に対して、下式を用いて経年変化速度と年周変動振幅を近似回帰計算した。

$$y = a + b \cdot x + c \cdot \sin(2\pi x/t) + d \cdot \cos(2\pi x/t) \quad (1)$$

Figure 3 により、掛川を基準とした浜岡 2 と御前崎の比高変動では、いずれも水準測量の年周変動が GPS の結果より大きい。

次に、比較的異常変動が少なかった 1996.4~2000.4 の 4 年間における GPS 観測点の掛川~御前崎間の GPS 比高と水準点 140-1~2595 間の水準測量結果 (Figure 2) を Figure 4 に示した。GPS 比高は GEONET の新解析結果 (Hatanaka *et al.*, 2003) を用いた。両者の時系列の直線成分と年周成分は最小二乗法によって求めた。この図では、電子基準点と水準点とは異なる比高点であるため、縦軸におけるずれがあるものの、両者の年周の違いははっきり分かる。

GPS 比高の年周を式(1)で回帰すると、得られる振

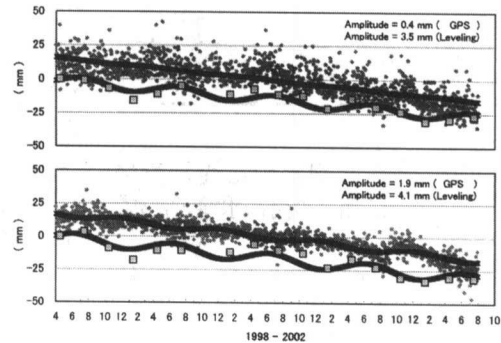


Fig. 3 Annual changes of the relative height differences by GPS and leveling between 2 sites of GEONET (upper: Kakegawa-Hamaoka 2; lower: Kakegawa-Omaezaki).

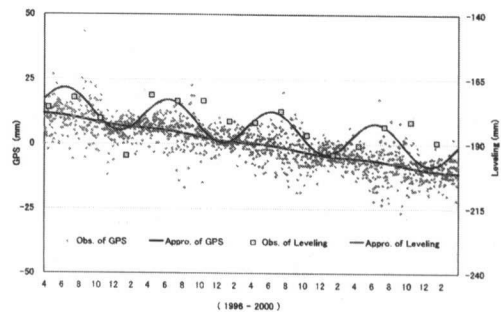


Fig. 4 Comparison of time series of the relative height differences between GPS (GEONET site: Kakegawa-Omaezaki) and precise leveling (BM: 140-1-2595) during the period from April 1996 to April 2000.

幅の近似値は 0.7 mm である (回帰精度  $\pm 5.2$  mm, 相関係数  $R=0.79$ )。これは年周変動の振幅であるならば、GPS 比高振幅は水準比高の 1/10 に相当することになる。

岩淵ほか (2001) は GEONET 連続観測で得られたルーチン解析結果を用いて、1996 年夏季と冬季の 2 期間 (各約 2 ヶ月間) の GPS 上下成分  $h$  と天頂大気遅延量  $ZTD$  について相関解析および主成分分析した結果、広域的な空間分布において両者は密接に関係することが確認された。しかし、解析期間が短いため、時系列での経年変化と年周変動については議論されなかった。そこで、GEONET の新解析結果を用いて、電子基準点掛川、御前崎 2 観測点の上下成分  $h$  および大気遅延量  $ZTD$  について、1996.4~2000.4 間の時系列を考察した。

まず、 $h$  と  $ZTD$  を式(1)で近似回帰させた結果、掛川と御前崎において、 $h$  の年周振幅 8.62 mm と 8.71 mm がそれぞれ得られた。 $ZTD$  の年周変動振幅はそれぞれ 114.60 mm と 112.66 mm であった。近似回帰による  $h$  および  $ZTD$  の年周変動には位相差が認められるが、その差はわずかであり、年周変動の考察には影響が小さいため、本稿では考慮しない。

次に、経年変動を除いた  $h$  のばらつきと  $ZTD$  の関係を Figure 5 に示す。その結果、 $ZTD$  に対する  $h$  の (4 年間の平均) 勾配は、掛川と御前崎がそれぞれ 0.0602 (相関係数 0.45) と 0.0672 (相関係数 0.36) であることを検出した。

回帰計算で求めたそれぞれの振幅、両方の相関勾配などから、 $ZTD$  による掛川-御前崎間比高変動の最大値 (幅) を概算した。即ち、GPS 解析で求められる 2 点間比高の年周変動の最大幅は約 1.34 mm、振幅にすると 0.67 mm である。

これは Figure 4 に示した結果とほとんど一致する。このことから、GPS 比高に余剰的な年周変動 (0.7 mm) を生じさせた原因は、主に  $ZTD$  の推定誤差による大気遅延量補正の不十分さによる可能性が否定できない。

GPS と水準測量による比高の経年変化に関する系統差を検証するため、地震予知連絡会会報 (国土地理院, 2000~2002) 中の電子基準点掛川~浜岡 2、掛川~御前崎の 2 区間の比高経年変化について、GEONET の新解析結果および取付け水準の結果を用いて再計算した結果 (Table 1), GPS による沈降速度は水準測量結果よりやや大きな値を示す。

Figure 3 と同期間 (1996.4~2000.4) のほか、1996.4 から幾つかの期間において、掛川~御前崎 2 点間の GPS 比高 ( $\Delta h$ ) および  $ZTD$  較差 ( $\Delta ZTD$ ) を計算した (Table 2)。

これによると、GPS 観測点間 (掛川~御前崎) の比高および  $ZTD$  較差の 4 年間の経年変化は両方ともほぼ一定している。すなわち、2 点間の  $ZTD$  較差がわずかずであるがほぼ一定の割合で経年変化しているため、これと相関を持つ比高の推定値も影響を受け、GPS による比高の経年変化が水準測量結果から系統的にずれる要因となっているものと考えられる。

### 3. 考 察

精密水準測量の比高結果に見られる季節変動の原因はまだ特定されていないが、水準測量における最大の

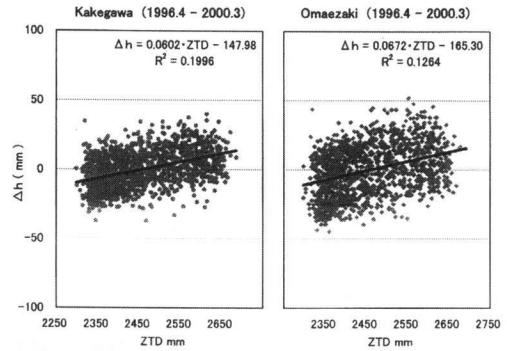


Fig. 5 Scatter-plot of ellipsoidal height to ZTD by GPS solutions (Left: Kakegawa; Right: Omaezaki).

誤差源の一つであるレフラクション誤差の未補正が大きく寄与していると思われる (鷲谷・根本, 2000)。しかし、従来の経験式で計算される結果はこの年周振幅より小さい (今給黎, 2003)。

一方、GPS 連続観測による上下成分時系列の年周変動は、複数の要因によって生じた可能性があるため結論づけることはできないが、主に大気遅延量補正の不十分さに起因する見かけのものであると考えられる。

Figure 2 の水準測量結果と掛川~御前崎間の  $ZTD$  較差に対し、1996.4~2000.4 の 4 年間のデータよりトレンド成分を除去したものとそれに年周変動をフィッティングした結果を Figure 6 に示す。

この 4 年間に、精密水準測量による比高変動の年周振幅が 5.9 mm であるに対し、 $ZTD$  較差の変動振幅は 2.5 mm であった。両者の誤差源はまだ特定

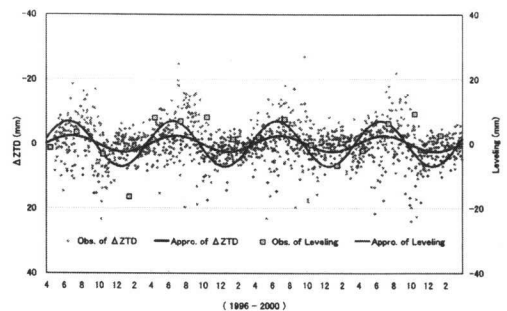


Fig. 6 Comparison of periodical variance between the GPS- $ZTD$  difference (GEONET site: Kakegawa - Omaezaki) and precise leveling (BM: 140-1 - 2595) during the period from April 1996 to April 2000.

Table 1. The annual change of relative height differences by GPS and leveling (mm/yr)

from	to	Kakegawa~Hamaoka 2		Kakegawa~Omaezaki	
		Leveling	GPS	Leveling	GPS
1998. 4-2000. 1		-5.7	-3.8	-7.8	-6.3
1998. 4-2000.10		-3.4	-3.4	-3.5	-6.5
1998. 4-2001. 4		-4.3	-4.7	-4.8	-6.8
1998. 4-2001.10		-5.1	-5.7	-6.2	-7.2
1998. 4-2002. 4		-6.2	-6.8	-7.1	-7.3
1998. 4-2002. 7		-6.2	-7.2	-7.1	-8.0

Table 2. The annual change of  $\Delta h$  and  $\Delta ZTD$  by GPS (mm/yr)

from	to	Kakegawa~Hamaoka 2		Kakegawa~Omaezaki	
		$\Delta h$	$\Delta ZTD$	$\Delta h$	$\Delta ZTD$
1996. 4-2000. 4		-4.3	+0.4	-5.8	+0.3
1998. 1-2000. 1		-2.3	0.0	-6.5	+0.3
1998. 4-2001.10		-5.7	+0.1	-7.2	+0.5
1996. 4-2002. 4		-5.7	+0.3	-6.6	+0.4

できていないが、互いの差異は観測手法と誤差性質の違いによるものであろう。

ZTDの季節変動は、地上約5m（観測点ピラー高）より上部の大気水蒸気分布を直接反映しているのに対し、水準測量では地表付近における温度の鉛直分布関数により決定される大気レフラクシオンと年周変動の関係を定量的に把握するためには、温度鉛直勾配を実際の観測によってモデル化する必要がある。

比高の経年変化について、GPS観測と水準測量との結果には系統的な差があると同時に、GPS観測点間のZTDの較差においても系統的な経年変化が存在している可能性が示された。このことから、海陸など地理的な条件によって、水蒸気分布の非一様性に起因するGPS観測点間の大気遅延の水平勾配が、GPS比高の経年変化に影響を与える可能性があると考えられる。

GPS連続測位で1mmレベルの精度が確立されつつあるなかで、観測結果および誤差源をより詳細に、議論をより深くすることが期待される。

#### 4. おわりに

御前崎周辺の上下変動について、水準測量の大きな季節的年周変動は、GPSではそのほとんどが2点間の比高から消えている。その余剰の変動は、主に大気遅延量の影響によるものと考えられる。

一方、比高の経年変動において、GPS観測と水準測量との結果には系統差の存在が明らかにされた。また、GPS比高の経年変化には、大気遅延勾配に起因する系統差が含まれている可能性も示唆した。

#### 謝 辞

本稿の改訂にあたっては、編集者および査読者の皆様から貴重なご指導と有益な助言をいただいた。ここに記して心から感謝の意をいたします。

#### 参考文献

- 呉新華・西修二郎・田中 穰（2003）：御前崎地方の比高について—GPSと水準を比較して、月刊地球，号外，No.41，63-70.
- 国土地理院（2000～2002）：東海地方の地殻変動，地震予知連絡会会報，第64～67巻.
- Hatanaka, Y., T. Iizuka, M. Sawada, A. Yamagiwa, Y. Kikuta, J. Johnson and C. Rocken (2003): Improvement of the analysis strategy of GEONET, Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol.49, 11-37.
- 岩淵哲也・千田克志・内藤勲夫（2001）：GEONETの国土地理院ルーチン解析から得られた鉛直測位解と天頂大気遅延量の関係，測地学会誌，第47巻第4号，755-772.
- 鷺谷 威・根本盛行（2000）：水準測量における季節変動について—静岡県菊川町・小笠町間の隔週水準測量—，日本測地学会第94回講演会要旨，95-96.
- 今給黎哲郎（2003）：御前崎地域水準測量にみられる年周変化の区別特性について，月刊地球，号外，No.41，56-62.