

## 長大斜面における GPS 変位計測の大気遅延補正とその効果\*

中島伸一郎<sup>1</sup> 清水則一<sup>2</sup> 平林憲<sup>3</sup>  
増成友宏<sup>4</sup> 岩崎智治<sup>5</sup> 小野雅和<sup>6</sup>

### Effects of Correction of Atmospheric Delays on GPS Displacement Measurements in Large Slopes

by Shinichiro NAKASHIMA<sup>a</sup>, Norikazu SHIMIZU<sup>b</sup>, Ken HIRABAYASHI<sup>c</sup>,  
Tomohiro MASUNARI<sup>d</sup>, Tomoharu IWASAKI<sup>e</sup> and Masakazu ONO<sup>f</sup>

- a. Assistant Professor, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai Ube Yamaguchi, 755-8611, Japan (Corresponding author, E-mail: nakasima@yamaguchi-u.ac.jp, FAX: 0836-85-9301)
- b. Professor, Yamaguchi University
- c. Former graduate student, Yamaguchi University
- d. Research fellow, Yamaguchi University
- e. Technical manager, Kokusai Kogyo Co., Ltd.
- f. Sumimetal Mining Co., Ltd.

Atmospheric delays sometimes cause non-negligible errors in the measurement of ground surface displacements using GPS, especially when there is a large difference in height between a measurement point and the reference point of the GPS receiver. In the previous studies, the authors have suggested a correction method for such atmospheric delays, which uses a modified Hopfield model and on-site hourly-observed surface weather data at site. In order to evaluate the effectiveness of this correction method, long-term field measurements were conducted in the present study on a large slope in an open-pit limestone quarry. Nine GPS receivers were set on the slope as the measurement points with height differences of 106 ~ 209 m to a fixed reference point, and their three-dimensional displacements were measured every hour. The measurement results from the two-year period revealed that the conventionally processed GPS displacements at all measurement points clearly showed yearly-periodic variations and short-wave irregularity in the vertical component, which were concluded to be due to atmospheric delays caused by the difference in height between the measurement points and the fixed reference point. On the other hand, applying our suggested atmospheric delay correction method, we confirmed that the correction could successfully remove the yearly-periodic variations and short-wave irregularity. These results prove that the GPS ground surface displacement measurement system is also applicable to sites where there is a large difference in height of over 100 m, if the atmospheric delays are corrected using the modified Hopfield model and on-site surface weather data.

**KEY WORDS:** Large Slopes, Displacement Measurement, Global Positioning System, Atmospheric Delay, Error Correction

#### 1. 序 論

石灰石鉱山等の長大斜面における日常的な計測は、安全監視の観点とともに、経済的な採掘やリスクマネジメントの観点から重要性は増している。鉱山の斜面は、一般に長大かつ広大で、採掘事業が長きにわたるため計測も長期間となり、その要求に合う計測システムが必要である。これまでにも、光波測距儀<sup>1)</sup>、ボ

アホール・エクステンソメータ<sup>2)</sup>、AE<sup>3)</sup>、高精度傾斜計<sup>4)</sup>、応力測定<sup>5)</sup>などの適用が試みられている。

それに対し筆者らは、GPSの利用が有効であると考え、GPSを活用した変位計測システムの開発<sup>6-8)</sup>、高精度化のためのデータ処理法の提案<sup>9,10)</sup>、そして、実際の鉱山斜面<sup>11,12)</sup>に適用してきた。このシステムは、鉱山斜面だけでなく、地すべり斜面の安全監視<sup>13)</sup>、道路斜面の維持管理<sup>14)</sup>、ダム の 堤 体 計 測<sup>15,16)</sup>、トンネル建設の施工管理<sup>17)</sup>などに適用されている。

GPSによる変位計測の高精度化が実現されるにつれ、GPS固有の誤差要因のうち、特に、1) 気象による電波遅延、2) 上空障害物による電波の乱れ、3) 電波の多重経路(マルチパス)、などに対応する必要が出てきた。なかでも、大気遅延と呼ばれるGPS衛星からの電波の遅延による誤差は、長大斜面のように計測点と基準点との高低差が大きくなる場合、誤差が無視できなくなることがあり、その対処が重要となる。しかし、その誤差の除去はき

\*2011年10月13日受付 2012年2月3日受理

- 1. 山口大学大学院 理工学研究科 助教
  - 2. 正会員 山口大学大学院 理工学研究科 教授
  - 3. 山口大学大学院 理工学研究科 学生(研究当時)
  - 4. 山口大学大学院 理工学研究科 研究員
  - 5. 国際航業株式会社 第2技術部 技術マネージャー
  - 6. 住金鉱業株式会社 八戸鉱業所 採掘部
- [著者連絡先] FAX: 0836-85-9301  
E-mail: nakasima@yamaguchi-u.ac.jp

キーワード: 長大斜面, 変位計測, GPS, 大気遅延, 誤差補正

わめて難しく<sup>18)</sup>、GPSの地盤変位計測あるいは測地応用に対する究極の精度制限因子であろうと言われている<sup>19)</sup>。

筆者らは、このような大気遅延による誤差に対して、基準点と計測点間の基線長が数 km 以内の場合、地表の気象データを用いた Modified Hopfield モデルによる補正法が有効であることを示した<sup>20, 21)</sup>。その成果に基づき、長大斜面においても GPS によって高精度に変位計測を実施することが可能となるが、大気遅延補正法の適用性と限界についてはまだ十分な研究成果が積まれていないのが実情である。大気遅延への影響因子である高低差、気象条件および基線長について、それぞれ個別に変化させ、発生する誤差の度合いと補正の効果を明らかにする必要がある。

本研究では、鉱山の長大斜面に対する GPS による変位計測手法を確立するため、現場における長期連続計測を実施し、計測結果に及ぼす大気遅延誤差の影響に関して分析するとともに、大気遅延モデルの補正効果の検証と課題を明らかにするものである。これまでの研究<sup>20, 21)</sup>で用いてきた全国数箇所の現場は、基線長および気象条件が現場ごとに大きく異なり、測点数も各現場につき 1～2 点と少なかった。そのため、補正法を適用しうる現場条件および気象条件の広さを把握する意味では有意義であったものの、高低差による影響のみを取り出して独立的に論じることは困難であった。これに対して、本研究の現場は、基線長 550 m 以内という気象条件がほぼ同一とみなせる狭いエリア内に、100～200 m の異なる高低差を持った計測点が合計 9 点設置されている現場である。つまり、観測点の基線長および気象条件の差による影響を排除し、高低差のみによる影響を検討しようというのが本研究の特徴である。

## 2. GPS 測位における大気遅延とその補正法

GPS 衛星から送られる電波は、大気圏（対流圏、成層圏、中間圏、熱圏）を通過するときに屈折し、直線を進む場合と比べ受信機到達に遅れを生じるため、受信機で計測される位相にも遅れが生じ、これが測位の誤差となる。特に、地表に近い対流圏では、日々または季節ごとに気象が変化するので、高精度に変位を計測する時にはその影響を無視できないことがある。

一般に、基線長（基準点と計測点の距離）が数 km 以下のような GPS 測位としては比較的短基線の場合は、電波はほぼ同じ気象条件の大気の中を伝播するため、水平方向の座標については気象の影響は相殺されると考えられる。一方、比較的短基線の場合であっても基準点と計測点の間に高低差がある場合、両点における電波の伝播経路長に違いがあり、その経路差において気象の影響は相殺されず、基線解析において気象条件を適切に考慮しないと、後に述べる 2 重位相差においても誤差として残り、特に計測点の高さ座標を正しく求めることができなくなる可能性がある。

GPS 変位計測における大気遅延の補正の必要性はこれまでも指摘されており、測地測量において検討されているが<sup>22-24)</sup>、上記のように、高低差が大きく観測点間距離が数 km 以下の狭い範囲における変位計測においては、まだ十分検討されていない。

本章では、GPS 測位の基礎式のなかに表現される大気遅延と、本研究で適用する補正方法<sup>20, 21)</sup>について概要を述べる。

### 2・1 相対測位の基礎式と大気遅延

GPS によって高精度に測位するためには、干渉測位法と呼ばれる相対測位法<sup>25)</sup>が用いられる。したがって、高精度変位計測を目的とする本研究も相対測位法を用いる。

相対測位法では、基準点と計測点にそれぞれ受信機を配置し、GPS 衛星から送られる搬送波の位相（以下、簡単に位相と呼ぶ）を計測して、基準点を原点とした計測点の相対座標を求める。

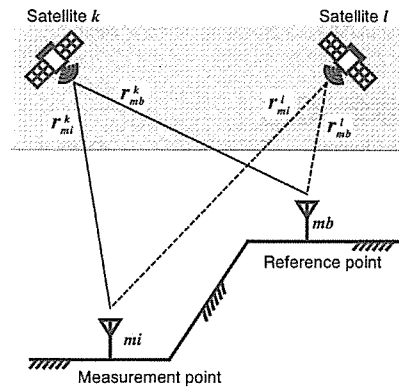


Fig.1 GPS signal path.

計測点  $mi$  において人工衛星  $k$  から受信した位相を  $\phi_{mi}^k$  とすると、それは次のように表される (Fig. 1 参照)。

$$\phi_{mi}^k = \frac{r_{mi}^k + I_{\phi_{mi}^k}^k + T_{\phi_{mi}^k}^k}{\lambda} + \frac{c(\delta t_{mi} + \delta t^k)}{\lambda} + N_{mi}^k + \varepsilon_{\phi_{mi}^k}^k \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $r_{mi}^k$  は計測点  $mi$  と GPS 衛星  $k$  との距離、 $\lambda$  は搬送波の波長、 $I_{\phi_{mi}^k}^k$  は電離層遅延（電離層を通過する際に生じる遅延）、 $T_{\phi_{mi}^k}^k$  は大気遅延、 $\delta t_{mi}$  は計測点  $mi$  に設置した受信機の時計誤差、 $\delta t^k$  は GPS 衛星の時計誤差、 $N_{mi}^k$  は整数値バイアスと呼ばれる未知数、 $\varepsilon_{\phi_{mi}^k}^k$  は他の要因による誤差である。

基準点  $mb$  で計測される位相も式 (1) と同様に表され、これを  $\phi_{mb}^k$  とし両位相の差  $\phi_{mi}^k - \phi_{mb}^k$  をとる。また、GPS 衛星  $l$  に対しても同様の位相差  $\phi_{mi}^l - \phi_{mb}^l$  をとり、さらに、これら二つの位相差の差 (2 重位相差と呼ぶ) を次のように求める

$$\phi_{mi-mb}^{k-l} = (\phi_{mi}^k - \phi_{mb}^k) - (\phi_{mi}^l - \phi_{mb}^l) \quad \dots \dots \dots (2)$$

式 (2) に位相の式 (1) を代入して整理すると 2 重位相差は次のように表される。

$$\phi_{mi-mb}^{k-l} = \frac{r_{mi-mb}^{k-l}}{\lambda} + \frac{T_{\phi_{mi-mb}^{k-l}}}{\lambda} + N_{mi-mb}^{k-l} + \varepsilon_{\phi_{mi-mb}^{k-l}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $r_{mi-mb}^{k-l}$ 、 $T_{\phi_{mi-mb}^{k-l}}$ 、 $N_{mi-mb}^{k-l}$ 、 $\varepsilon_{\phi_{mi-mb}^{k-l}}$  は、式 (1) および同様の式の右辺の各項から得られ、それぞれ、計測点と GPS 衛星間の距離、大気遅延、整数値バイアス、観測誤差に係る項である。なお、本研究のように基線長がせいぜい数 km 以下の場合、同じ人工衛星からの電波は同環境の電離層を通過するため、各計測点の電離層遅延はほぼ等しく、最初の位相差をとった段階で相殺される。

式 (3) の左辺の 2 重位相差は各受信機によって計測された位相から観測量として求められるので、式 (3) を観測方程式として、右辺の  $r_{mi-mb}^{k-l}$  に含まれる計測点  $mi$  の 3 次元座標と未知整数  $N_{mi-mb}^{k-l}$  を最小二乗法によって求めることができる。この解析のことを基線解析と呼ぶ。このとき、大気遅延に係わる式 (3) の右辺第 2 項を適切に評価しなければ解析結果に誤差が生じる。

### 2・2 大気遅延モデル

大気遅延の補正としては、水蒸気ラジオメータにより大気の水蒸気量を直接計測して補正量を算出する方法や GPS のデータ中に含まれる水蒸気遅延量を推定する方法が知られている<sup>22, 28)</sup>が、即時性が求められる変位計測に適用することは困難である。それに対して、筆者らは、気温、湿度、大気圧などの気象条件を用いて大気遅延量を推定するモデルのひとつである Modified Hopfield モデルが有効であることを示した<sup>20, 21)</sup>。もともと大気

遅延モデルは人工衛星の軌道確定のために 1970 年代に研究されたものであり<sup>29-32)</sup>、GPS 測位に適用する場合、電波の伝播経路に沿った大気の大気条件を用いるものではないので、補正方法として必ずしも厳密でないとの指摘があった<sup>19, 24)</sup>。しかし、鉱山や建設分野の変位計測では、基線長は数 km 程度以下であり、上空の電波の伝播経路に沿った気象に基づく誤差は位相差を取ることによって相殺され<sup>19)</sup>、計測点間の高低差による誤差だけになると考え、地上付近の気象を用いて Modified Hopfield モデルを適用したところ良好な結果を得た<sup>20, 21)</sup>。

Hopfield<sup>26, 27)</sup>は大気遅延を、乾燥成分 (dry 項) と湿潤成分 (wet 項) とに分離できるとして次のように表した。

$$\Delta R^{trop} = 10^{-6} \int N_d^{trop} ds + 10^{-6} \int N_w^{trop} ds \dots\dots\dots (4)$$

$N_d^{trop}$  および  $N_w^{trop}$  は、それぞれ、屈折性 (refractivity) の乾燥成分および湿潤成分で、地表からの高さによって決まる四次関数として、大気圧  $p$  (単位: hPa)、大気中の水蒸気圧  $e$  (単位: hPa)、大気の絶対温度  $T$  (単位: K)、および、地表からの高さ  $h$  (単位: m) の関数として次のように与えられている。

$$N_d^{trop} = N_{d,0}^{trop} \left(1 - \frac{h}{h_d}\right)^4 \dots\dots\dots (5)$$

$$N_w^{trop} = N_{w,0}^{trop} \left(1 - \frac{h}{h_w}\right)^4 \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $h_d$  および  $h_w$  は、それぞれ乾燥大気および水蒸気の最大高さで、 $h_d = 40136 + 148.72 (T - 273.16)$  [m]、 $h_w = 11000$  [m] で与えられる。また、 $N_{d,0}^{trop}$ 、 $N_{w,0}^{trop}$  はそれぞれ乾燥大気と水蒸気の地表面での天頂方向の屈折性で、次の近似式で与えられる。なお、 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  は経験的に得られた係数である。

$$N_{d,0}^{trop} = c_1 \frac{p}{T} \quad c_1 = 77.64 \text{ [K/hPa]} \dots\dots\dots (7)$$

$$N_{w,0}^{trop} = c_2 \frac{e}{T} + c_3 \frac{e}{T^2} \quad c_2 = -12.96 \text{ [K/hPa]} \\ c_3 = 3.718 \times 10^5 \text{ [K}^2\text{/hPa]} \dots\dots\dots (8)$$

水蒸気圧  $e$  について、本研究では、相対湿度を  $RH$  (単位: %) として次の近似式を用いている<sup>33)</sup>。

$$e = 6.112 \frac{RH}{100} \exp\left(\frac{17.62T - 4813}{T - 30.03}\right) \dots\dots\dots (9)$$

上記のモデルを用いれば、計測現場において、大気圧、気温、相対湿度を観測することによって大気遅延量が推定され、気象条件を考慮した基線解析が実施できる。

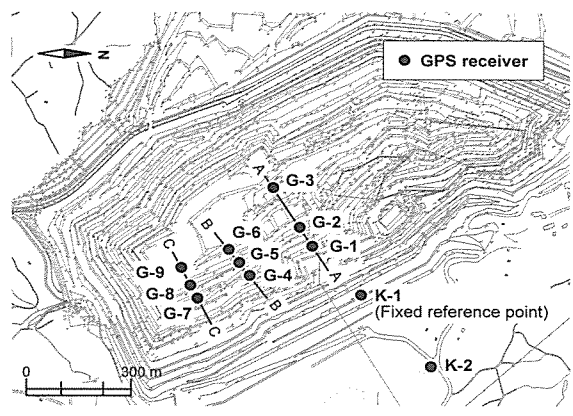
一般の GPS 測位においても、上記の Modified Hopfield や Saastamoinen などの大気遅延モデルを用いた基線解析プログラムを利用することが多いようである。しかし、その際、実際の気象状況に関わらず標準的な大気条件 (気圧 1010 hPa、気温 20°C、相対湿度 50%) を与えているため、測位現場における現実の気象には対応しない。したがって、実質的には正しい大気遅延補正を行っていることにはならない。本研究では、現場の気象条件を用いることによって大気遅延の補正を行い、その効果を調べる。

3. 現場計測と大気遅延補正

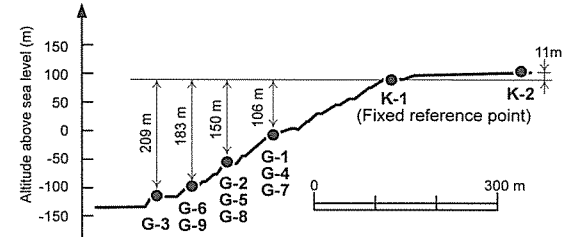
筆者らにより、現場の地表気象を用いた大気遅延補正が有効であることの例を示したが<sup>20, 21)</sup>、まだ、十分なデータの集積や検討がなされていないため、ここでは、鉱山において長期にわたる



Fig.2 Testing site (open-pit limestone mine).



(a) Plan view



(b) Elevation view

Fig.3 Layout of GPS receivers.

現場計測を実施し、大気遅延の影響の確認、および、補正の妥当性の検証を行う。

3・1 計測現場の概要と計測システム

Fig. 2 は現場計測を実施した石灰石露天掘り鉱山の全景である。計測点は、Fig. 3 に示すように A、B、C の 3 つの断面にそれぞれ 3 点、合計 9 点 (G-1 ~ G-9) を配置した。また、K-1 は基準点で、K-2 は参照点として設置した。基準点からの基線長 (BL: Baseline length) は  $BL = 252 \sim 550$  m、高低差 (HD: Height difference) は  $HD = 106 \sim 210$  m である (Table 1 参照)。

Fig. 4 に本研究で用いた GPS 変位計測システムを示す。受信機はアンテナと中継ボックスからなり、それらをケーブルによって連結し通信集約ユニットに接続する。通信集約ユニットは、システムを制御するコンピュータ、メモリーおよび通信機器から構成される。計測された位相は、GPS 衛星からの他のデータとともに通信集約ユニットのメモリーに一旦保存される。そして、計

Table 1 Positions of the GPS receivers.

GPS receiver name	Baseline length, BL [m]	Altitude above see level [m]	Height difference from the fix reference point K1, HD [m]
Fixed Reference point			
K-1	0	95	0
Measurement points			
K-2	285	105	11
G-1	252	-11	106
G-2	334	-58	153
G-3	470	-115	209
G-4	351	-56	106
G-5	404	-89	151
G-6	459	-50	183
G-7	478	-11	106
G-8	523	-54	148
G-9	550	-89	183

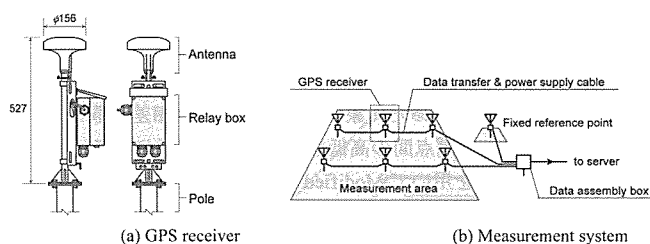


Fig. 4 GPS displacement monitoring system.

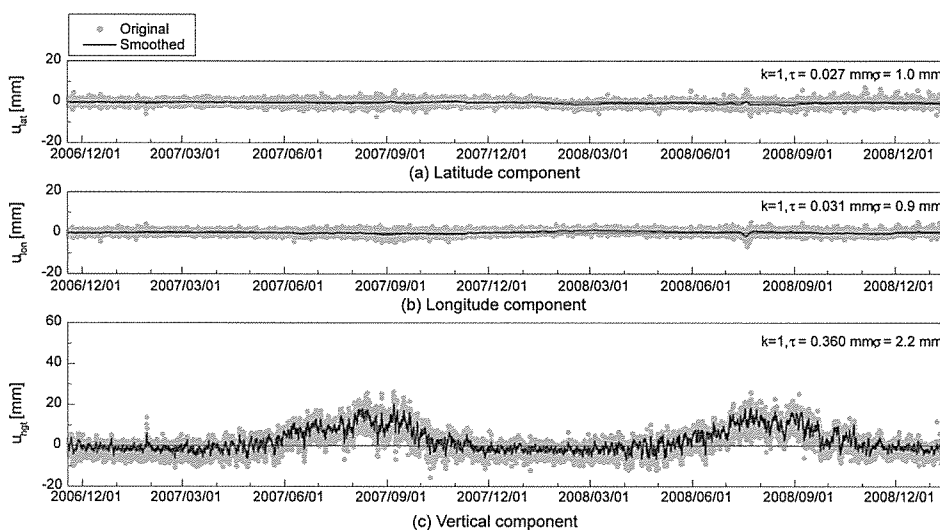


Fig. 5 Hourly-measured GPS displacement at G-1, latitude ( $u_{lat}$ ), longitude ( $u_{lon}$ ) and vertical ( $u_{hgt}$ ) components. (Height difference,  $HD = 106$  m).

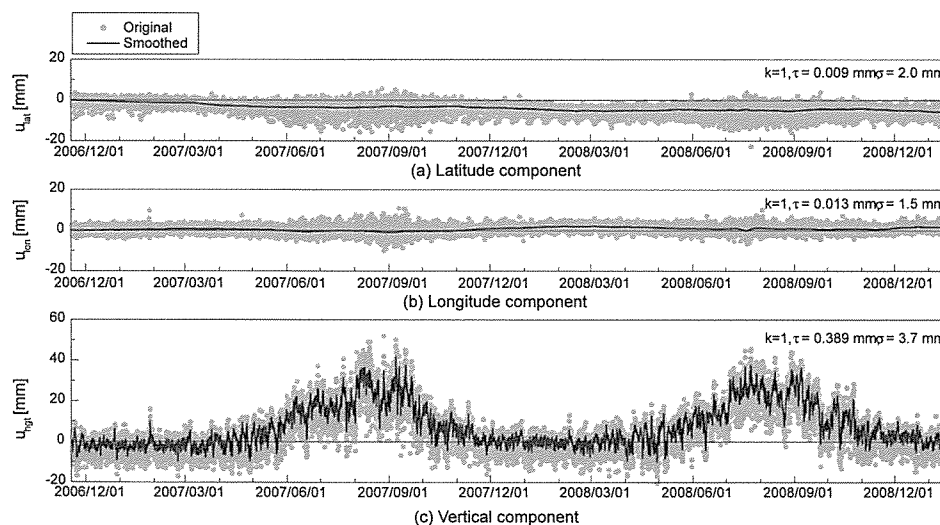


Fig. 6 Hourly-measured GPS displacement at G-3, latitude ( $u_{lat}$ ), longitude ( $u_{lon}$ ) and vertical ( $u_{hgt}$ ) components. (Height difference,  $HD = 209$  m).

測現場から離れたサーバーがデータをダウンロードし、2章に述べた基線解析を行って変位を求める。これら一連の動作はすべて自動的に処理される。

このシステムでは、GPS衛星から送られる電波のうちL1波(1575.42 MHz、波長約19 cm)を用い、各受信機において30秒毎に位相を計測する。基線解析は1時間蓄積した計測データを用いるスタティック方式であり、変位は1時間毎に得られる。

### 3・2 長期連続計測結果

すべての計測点に対する計測結果を示す紙面の余裕がないため、本論文では、基準点との高低差が106 mの計測点G-1、および、高低差が計測点の中でも最も大きく209 mの計測点G-3における約2年間(2006年11月-2009年1月)の連続計測結果(基準点はK-1)をそれぞれ、Fig. 5およびFig. 6に示す。両図に示す結果は、一般的に行われている標準大気(前出2・2)を与えた

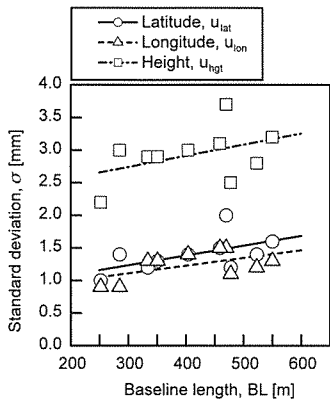


Fig.7 The standard deviation ( $\sigma$ ) that was estimated by the trend model VS baseline length ( $BL$ ).

基線解析の結果で、便宜的に補正前と呼ぶことにする。図中●は基線解析によって得られた計測結果(1時間毎)であり、実線は基線解析結果に対してトレンドモデル<sup>34)</sup>を適用して得られた平滑化結果(真の値の推定値)である。図中 $k$ はトレンド次数、 $\tau$ はシステムノイズの標準偏差、 $\sigma$ は計測ノイズの標準偏差の推定値を表す。これらは、平滑結果を得る際に同時に求められるものである。特に、 $\sigma$ はGPS変位計測に対する計測誤差の推定値となる。これまでの筆者らの研究によって、トレンドモデルは基線解析結果から真の値を推定するために有効であることが示されている<sup>9,10)</sup>。

Fig. 7 にすべての計測点に対してトレンドモデルによって推定した標準偏差  $\sigma$  の値を基線長との関係で示す。緯度 ( $u_{lat}$ )、経度 ( $u_{lon}$ )、高さ ( $u_{hgt}$ ) のいずれの成分の標準偏差も、従来から知られているように基線長に対して線形的に増加している。また、緯度、経度の標準偏差は 1 ~ 2 mm、高さ方向では 2 ~ 4 mm であり、基線長が 1 km 以下の標準的な GPS 測位の標準偏差 (水平方向で 5 mm、高さ方向で 10 mm) と比べるとよい精度で計測されていることが分かる。

Fig. 5 および Fig. 6 から、緯度および経度方向の計測結果について、約 2 年の計測期間中、基線解析結果 (図中●) は上述の標準偏差に対応しておおむね  $\pm 3 \sim 4$  mm 以内の範囲にあり、トレンドモデルによる真の変位の推定値はほぼ一定で 0 前後を示して

いることがわかる。計測開始以前から期間を通じて、計測領域周辺では石灰石は掘削されていないため、この計測結果は妥当と判断される。

一方、高さ方向の計測結果については、基線解析結果は 11 月中旬から 4 月中旬ごろまでは 0 をはさんでおおむね  $\pm 6 \sim 8$  mm の幅で推移しているが、4 月中旬から 11 月中旬にかけて増加の後、減少しており、この現象は G-1 および G-3 とともに毎年繰り返しており、年周期を持っていると考えられる。また、年周期の増減とともに、日程度の短周期の変動も示しており、それらの変動の大きさは、高低差の大きい G-3 が G-1 に比べて大きい。掘削は行われていない状況を考えて、高さ方向の計測結果は実際の変位現象としては不自然である。

以上のような計測結果の特徴は、他のすべての計測点においても同様である。そこで、緯度、経度方向の計測は問題がないと考えて、以下では高さ方向の計測結果に絞って考察する。

3・3 気象観測結果と大気遅延量、および、高さ方向の変動の関係

3・2 で見られた計測結果の特徴から、高さ方向の計測結果は気象の変化に基づく大気遅延の影響を受けている可能性が高い。ここでは、その確認をとるため、地表気象から大気遅延量を推定して高さ方向の計測結果との関係を調べる。

Fig. 8 に、計測現場から最寄りの気象庁の測候所 (八戸測候所、現場から約 7 km の位置) で観測された 1 時間ごとの気温  $T$  [°C]、大気圧  $p$  [hPa]、相対湿度  $RH$  [%] および、それらの観測結果から式 (7) によって推定した水蒸気圧  $e$  [hPa] を示す。さらに、Fig. 8 の気象データに基づき Modified Hopfield モデルによって基準点と計測点における天頂方向の大気遅延量 ( $ZAD$ : Zenith atmospheric delay) を推定し、両者の差をとる。なお、これを大気遅延量差 ( $ZAD_{diff}$ : Zenith atmospheric delay difference) と呼ぶことにする。大気遅延量差は両点の高低差に対する遅延量を意味し、この遅延量は 2 重位相差 (式 (3) 参照) によっても相殺されず、誤差の要因となる。大気遅延量差  $ZAD_{diff}$  を基準点と計測点の高低差  $HD$  で除し、高低差 1m 当りに換算して Fig. 9 にその推移を示す。

Fig. 9 から大気遅延量差は、4 月中旬ごろから 11 月中旬ごろまでに増加と減少の変動を示す。この変動は Fig. 5 および Fig. 6 に見られた高さ方向の計測結果の変動と相似している。また、大気遅延量差の内、dry 項は絶対値が大きいものの変化は小さく、一方、

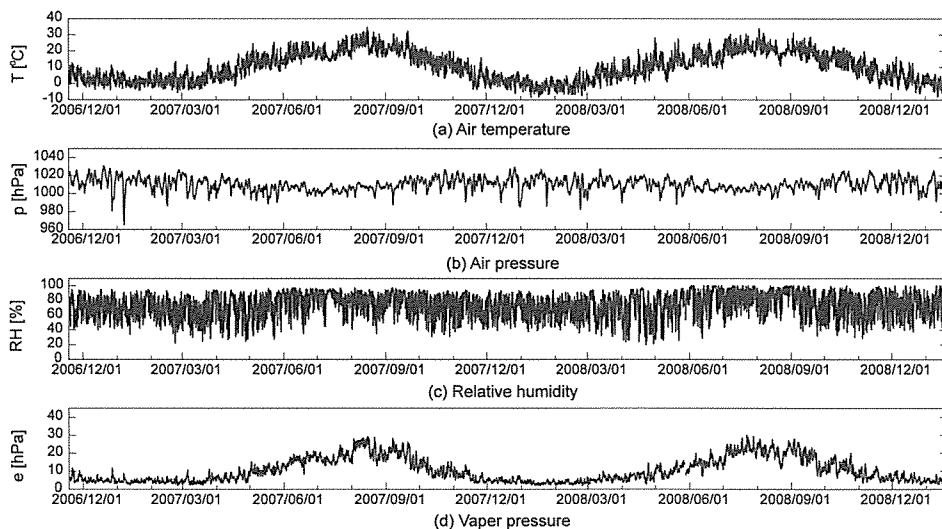


Fig.8 Hourly-observed meteorological data, air temperature ( $T$  [°C]), air pressure ( $p$  [hPa]), relative humidity ( $RH$  [%]) and vapor pressure ( $e$  [hPa]) at Hachinohe Weather Station, about 7 km from the testing site.

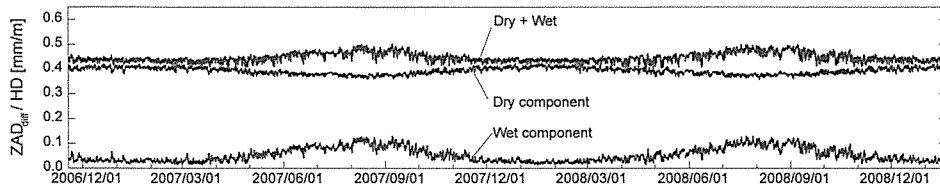


Fig.9 Zenith atmospheric delay difference ( $ZAD_{diff}$  [mm]) per one meter of height difference ( $HD$  [m]), which is calculated from the meteorological data in Fig. 7.

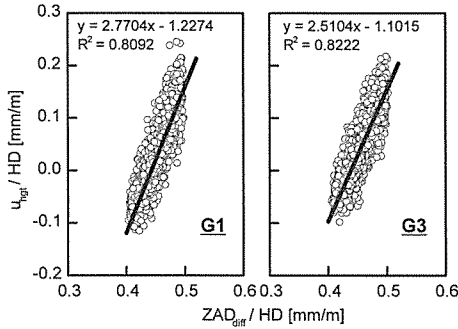


Fig.10 Relation between the vertical displacement measured by GPS ( $u_{hgt}$ ) and the zenith atmospheric delay difference calculated from the meteorological data ( $ZAD_{diff}$ ). They are normalized by the height difference between the measurement point and the fixed reference point ( $HD$ ). The straight lines in the figures are the linear regression lines.

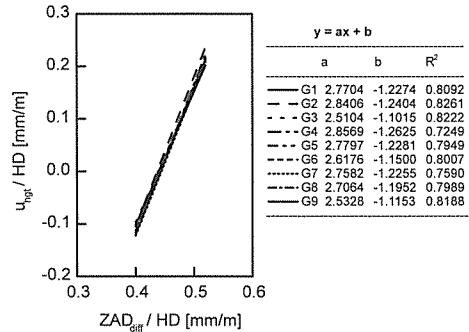


Fig.11 Linear regression lines for all measurement points.

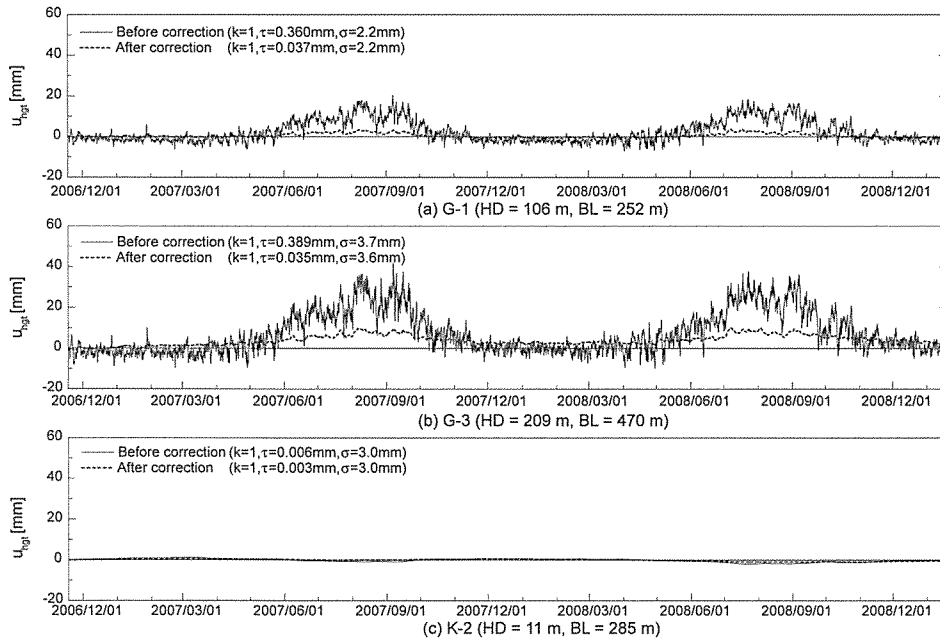


Fig.12 Atmospheric-delay-corrected GPS vertical displacements at G-1, G-3 and K-2.

wet 項は絶対値は小さいが変化が大きい。このことより、大気遅延量差の変動は wet 項の影響が大きいことがわかる。言い換えると、水蒸気圧の変化が大気遅延量差に大きく影響することを示唆している。

次に、計測点 G-1 および G-3 における高さ方向の計測結果  $u_{hgt}$  (基線解析結果) を基準点との高低差  $HD$  で除して高低差 1m 当たりの値  $u_{hgt} / HD$  とし、高低差 1m 当たり大気遅延量差  $ZAD_{diff} / HD$  (Fig. 9 参照) との対応をとって示したのが Fig. 10 である。図には回帰直線も示している。いずれの結果も相関係数が 0.9 前後であり、両者には高い正の相関関係がある。すべての計測点に対し同様な対応を取ると相関係数は 0.85 ~ 0.9 の正の相関があり、

得られた回帰直線を描くと、Fig. 11 に示すようにすべてほぼ一致する。すなわち、計測点に係わらず、高さ方向の計測値は、単位高低差当たりの大気遅延量差から同程度の影響を受けていることを表している。このことから、ただちに高さ方向の計測値の変動が大気遅延のみに起因するといえないが、大気遅延が高さ方向の計測値の変動に大きな影響を及ぼしていることは確かである。

以上のような考察から、高さ方向の計測値の変動は大気遅延の影響を大きく受けているものと考え、次節では Modified Hopfield モデルを適用した大気遅延補正を行う。

### 3.4 補正結果

Fig. 12 (a) および Fig. 12 (b) に計測点 G-1 および G-3 の高さ方

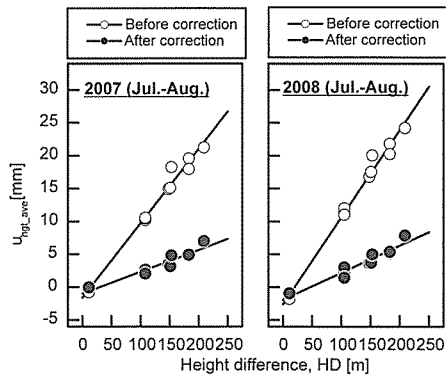


Fig.13 Evaluation of the correction effect.

向変位の計測値に対する大気遅延補正の結果を示す。すなわち、Fig. 8 に示した毎時観測された気象データを Modified Hopfield モデル式に代入し、大気遅延を考慮した式 (3) を用いて基線解析を行った。図には補正前の結果 (Before correction) も併せて示している。また、Fig. 12 (c) には、参考のため大気遅延の影響がほとんどないと思われる参照点 K-2 (基準点 K-1 との高低差が 11m) の高さ方向変位の計測値を示す。なお、ここでは、補正前後を比較しやすいようにトレンドモデルによる平滑値のみを示す。

G-1 および G-3 のいずれの計測点においても、4 月中旬から 11 月中旬にみられた変動が補正されているだけでなく、年間を通じて見られた周期の短い変動もほぼなくなっている。特に、11 月中旬から 4 月中旬までの計測結果については、参照点 K-2 の結果と比べても遜色ない。他のすべての計測点においても同様の結果を得た。

すべての計測点における大気遅延補正の効果を評価するため、計測値の変動が最も大きくなる 7～8 月の計測値の平均値  $u_{hgt\_ave}$  を求めて比較した。得られた計測値の平均値を高低差との関係で整理した結果を Fig. 13 に示す。この図から、計測値の変動は大気遅延補正により 1/4 程度にまで抑えられていることが確認できる。すなわち、地表気象観測データと Modified Hopfield モデルによって大気遅延補正を行えば、計測結果は大きく改善されること

が示された。

理想的にはこの補正によって全計測点の計測値の変動量がゼロに抑えられることが望ましいが、Fig. 13 を見る限りは高低差 100 m 当たり 2～3 mm 程度の変動が残っている。ただし、残った変動量についても、高低差に対して極めて強い線形関係を持って増加していることは、大気遅延をさらに緻密に考慮することで補正の精度を向上できる可能性を示唆している。今回用いた気象データが計測現場そのものの観測値ではなく数 km 離れた測候所における観測値であることや、大気遅延モデルの誤差などが原因として考えられるが、補正精度の一層の改善については今後の課題である。

#### 4. 強制変位実験による補正効果の検証

本章では、実際に生じる変位の計測に対する大気遅延補正の効果を調べるために強制変位実験を行う。

##### 4.1 強制変位実験の概要

Fig. 12 から、大気遅延の影響が少なく補正効果も顕著な 2～3 月、および、大気遅延の影響が増加する 5～6 月に、アンテナに人為的に強制変位を与えてこれを計測する強制変位実験を行った。実験は、Fig. 14 に示す計画に従い、基準点 K-1 の高さ方向に 5、10、20、35 mm の強制変位を、K-1 のセンサーの取付け金具に当該厚さの亚克力板を挟み、あるいは、抜くことによって与えた (Fig. 15 参照)。

なお、実験期間として、7～8 月ではなく、5～6 月を選んだ理由は、前者の期間は補正後に残る変動量は最大となるが変動の変化の大きさは小さく、後者の期間は変動の変化が最大となり変位計測に最も不利な影響を与えると考えたからである。

Fig. 16 に実験期間 (2009 年 1 月～7 月) の気象観測データと基準点と計測点間の大気遅延量差 (天頂方向、高低差 1 m 当たり) を示す。過去 2 年と同様に (Fig. 8 参照) 2～3 月の変動は小さく、5～6 月は徐々に増加し変動も大きく、5～6 月に大気遅延に基づく大きな変動を含むことが予測される。

##### 4.2 計測結果と補正効果

参照点 K-2 における高さ方向の計測結果を Fig. 17 (a) に示す。高低差 (11 m) が小さいため、補正をしなくても計測期間を通じ

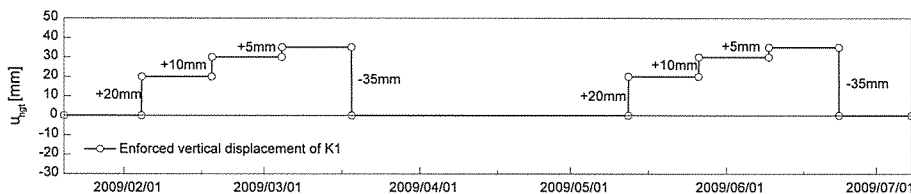


Fig.14 Vertical displacement of K1 given in the enforced displacement test.

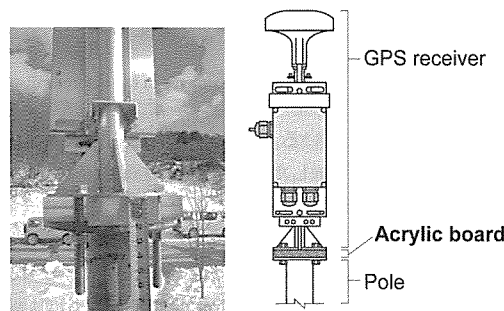


Fig.15 Predetermined vertical displacement was given to the GPS receiver K-1 by sandwiching acrylic boards between the receiver and the pole.

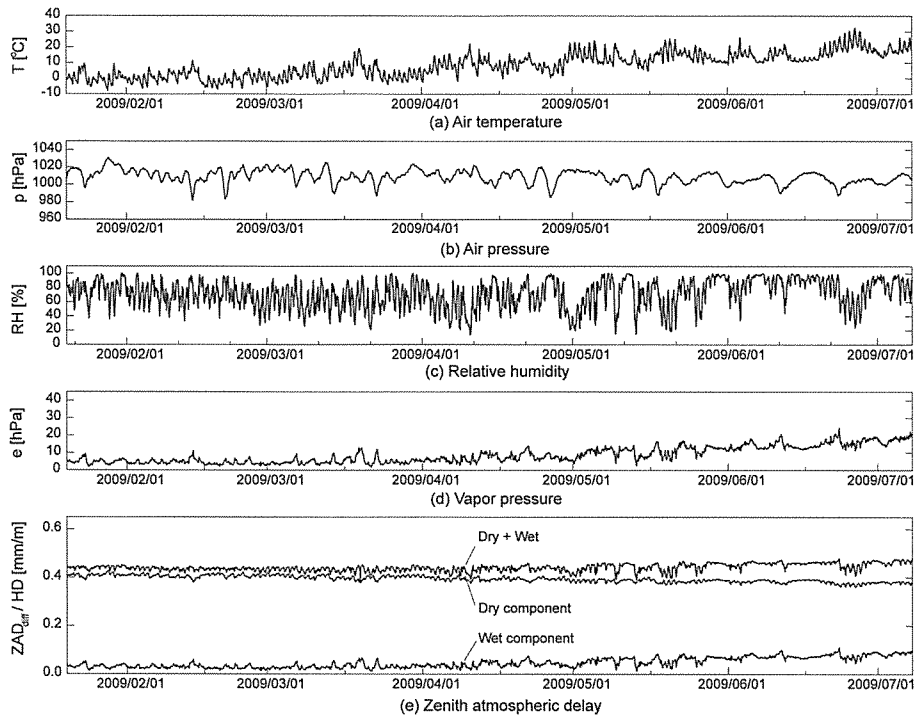


Fig.16 Hourly-observed meteorological data at Hachinohe Weather Station during the enforced displacement test, from which the zenith atmospheric delay (ZAD) was calculated.

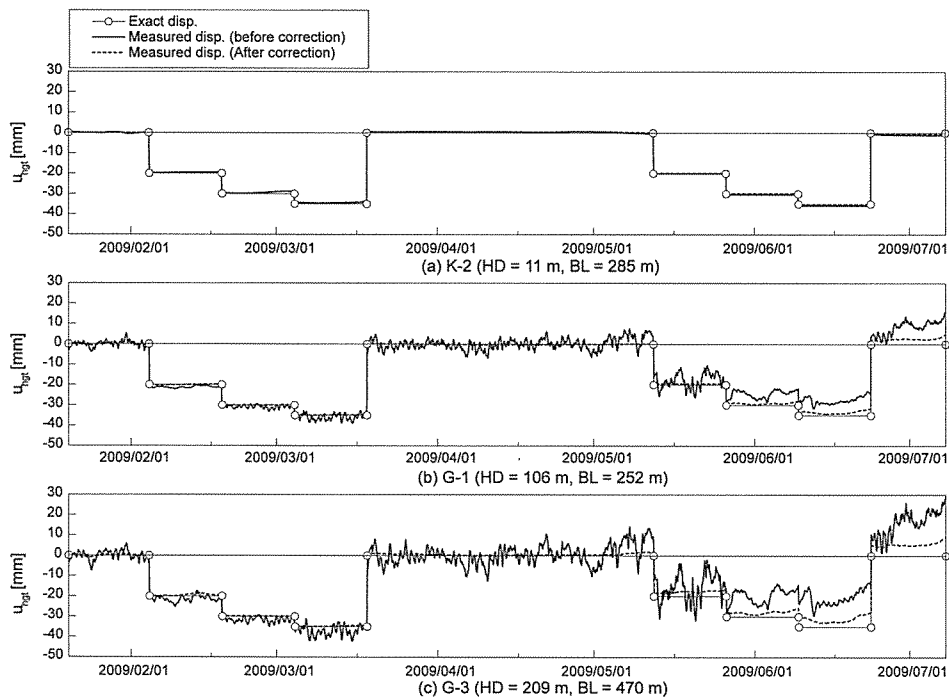


Fig.17 Atmospheric-delay-corrected GPS displacements in the enforced displacement test.

与えた変位に対して 1 mm 前後の差で精度良く計測されている。この結果は、これまでの筆者らの研究と同様の結果である。したがって、与えた変位に対して 1 mm 前後の差で計測されることが補正効果の目安となる

計測点 G-1 および G-3 に対して、与えた変位および補正前後の計測結果を併せて Fig. 17 (b) および Fig. 17 (c) に示す。計測結果としてトレンドモデルによる平滑化結果を示す。計測点 G-1 について、2～3月では補正をしない場合でも、20 mm および 10

mm の変位をおおむね捉えているが、5 mm の変位については日程度の短周期の変動が大きく明確には捉え切れていない。また、短周期変動の振幅はその後、徐々に大きくなり、5月以降は変位が生じたことはおおまかに捉えているが、正確な数値を得ることは難しい。特に、6月以降は Fig. 16 に示した大気遅延量の増加の影響が顕著に出ているものと思われる。これに対して、大気遅延補正を行った結果については、まず、短周期の変動がほぼ除去され、5月末頃までは、与えた変位を 1 mm 前後の差で正確に検



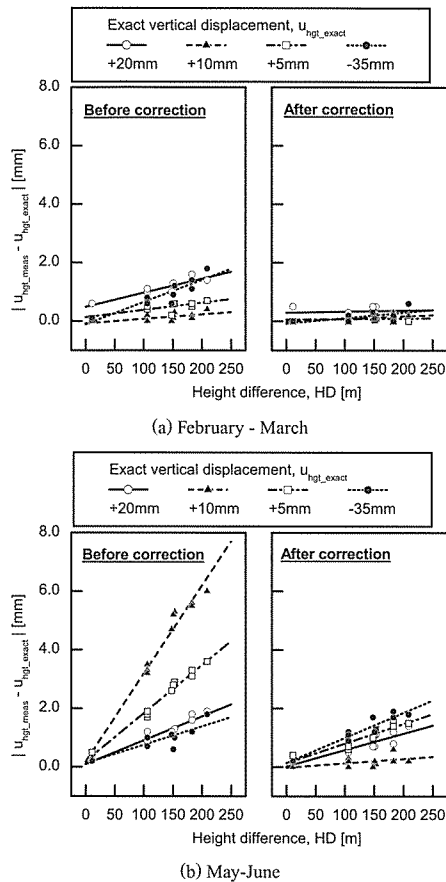


Fig.18 Difference between the measured ( $u_{hgt\_meas}$ ) and the exact ( $u_{hgt\_exact}$ ) vertical displacements.

出している。大気遅延が大きく増加する6月以降においても、計測結果に大幅な改善が見られ、5 mmの変位もおおむね捉えている。ただし、6月以前の結果と比べると計測精度は劣る。

一方、計測点 G-3 について、補正を行わない場合は、2～3月においても日程度の短周期の変動がみられ、10 mm 程度の変位は検出されているが正確な数値を得ることは難しい。計測点 G-3 の高低差は G-1 に比べてほぼ2倍 (209 m) であるので、大気遅延量の影響が大きく、4月以降は、20 mm 以上の変位であれば生じたことは分かるが数値を得ることは困難である。これに対し、大気遅延補正を行った結果は、短周期の変動もほぼ除去され、5 mm の変位もおおむね捉えられ、10 mm 程度の変位であればほぼ正確に検出できるほどまでに改善されている。しかし、6月以降については G-1 の結果よりも大きな誤差を伴う結果となっている。

すべての計測点に対し、計測結果  $u_{hgt\_meas}$  と与えた変位  $u_{hgt\_exact}$  との差を各計測点の基準点 K-1 からの高低差に対してプロットすると、Fig. 18 のようになる。

Fig. 18 (a) から、計測結果と与えた変位との差は、大気遅延量の変動が小さい2～3月においては、補正前が高低差100 m 当たり1 mm、補正後においては高低差によらず1 mm 以下となり、大気遅延補正によって、高低差が小さい場合と同程度の精度 (与えた変位と1 mm 程度の差) で変位を検出できるまで改善されていることがわかる。

一方、Fig. 18 (b) からは、大気遅延量が増加する5～6月では、計測結果と与えた変位の差は、補正前が高低差100 m 当たり4 mm 程度、補正後においては2 mm 程度以下となり、大気遅延補

正によって補正前と比べ1/2以下にまで改善されていることがわかる。これは、大きな改善であるが、5 mm 程度の変位であれば即時的に検出できるもの、高低差が小さい場合と同程度の精度で計測できるまではいたらなかった。

以上のことから、地表気象観測データを用いる大気遅延補正によって、基準点との高低差の大きい計測環境における GPS 変位計測は大幅に改善されることが明らかとなった。しかしながら、大気遅延量の変動の大きい時期においてはなお誤差が残り、計測精度は大気遅延量の変動の小さい時期に比べて劣ることとなる。大気遅延量の変化の大きさによらず、年間を通じて同じ精度で計測できるよう補正法を改善することは今後の課題である。

### 5. 結 論

本研究は、GPS 変位計測における大気遅延の影響を調べ、地表気象と大気遅延モデルによる補正法を適用するとともに、変位計測への効果を検証した。その結果を以下に取りまとめる。

- ・石灰石鉱山の長大斜面において、高低差が106～209 m の9点の計測点を配置し、約2年間にわたり標準的なGPS測位に基づく連続変位計測を行った。その結果、いずれの計測点も緯度、経度方向の計測結果は、従来と同様な妥当な計測結果を得たが、高さ方向については、年間を通じて日程度の短周期的な変動があり、また、4月中旬から11月中旬にかけて増加、および、減少を繰り返す年周期的な変動が見られた。その変動の大きさは高低差に比例し、もっとも大きい時期は8月前後であり、当計測現場では高低差100 m あたり10 mm 程度であった。
  - ・高さ方向の計測結果と、地表気象観測データから推定した電波の大気遅延量との対応を調べたところ、強い正の相関があった。それらの関係を単位高低差あたりに換算すると、すべての計測点でほぼ一致した。このことから、高さ方向の計測値の変動は大気遅延によるものと推察された。なお、本研究では、大気遅延量の推定に Modified Hopfield モデルを用いた。
  - ・Modified Hopfield モデルと地表気象観測データを用いて大気遅延を考慮した基線解析を行ったところ、日程度の短周期の変動はおおむね除去されるとともに、4月中旬から11月中旬にかけての変動も補正された。ただし、もっとも変動が大きい8月前後では、最大で高低差100 m あたり2～3 mm 程度の誤差が残った。
  - ・変位計測における大気遅延量の影響と Modified Hopfield モデルによる補正の効果を検証するために、強制変位実験を行った。その結果、大気遅延の増減が比較的小さい時期 (当現場では11月中旬から4月中旬) においては、計測点の高低差が100～200 m 程度の場合、大気遅延補正の適用によって、高低差が小さい場合と同程度 (真の変位と1 mm 程度の差) で計測できることが示された。一方、大気遅延が大きく増減する時期 (当現場では4月中旬から11月中旬) においては、大気遅延補正の適用によって、5 mm の変位はおおむね捉えられまでに改善されているが、高低差が小さい場合と比べると精度がやや劣る結果となった。
- 以上のように、高低差が100 m を超えるような計測点に対しても、地表気象観測に基づく Modified Hopfield モデルを適用することによって、大気遅延の影響を大幅に補正し、おおむね適正に補正できることが示された。ただし、大気遅延量が大きく増減する時期においては、高低差に比例した誤差が残るため、この点を一層改善することが今後の課題である。
- 謝辞 本研究の一部は、石灰石鉱業協会の奨励研究金 (2009年) の支援を受けて実施した。また、本研究における解析

の一部，および，図表の作成は，山口大学大学院学生の于 萌萌さん（研究当時），難波辰弥君，板垣壮真君に協力を得た。ここに感謝の意を表する。

### References

- 1) K. Kawahata, T. Itou and M. Tonsyo: *Limestone*, **297** (1999), 20-27.
- 2) K. Kaneko, Y. Noguchi, K. Soda and M. Hazuku: *Jouranal of MMIJ*, **112** (1996), 915-920.
- 3) M.Ujihara, T. Kanagawa, M. Fujii and T. Ishida: *Proc. 39th Symp. on Rock Mech.* (2010), Japan Society of Civil Engineers, pp.134-138.
- 4) Y. Obara, E. Nishiyama and S.S. KANG: *Journal of MMIJ*, **122** (2006), 582-588.
- 5) E. Nishiyama, T. Miyamoto, J. Kodama, S. Kawasaki and K. Kaneko: *Journal of MMIJ*, **124** (2008), 570-575.
- 6) N. Shimizu and S. Sakurai: *Jouranal of MMIJ*, **109** (1993), 1-7.
- 7) H. Kondo, M.E. Cannon, N. Shimizu and K. Nakagawa: *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, **546** (1996), 157-268.
- 8) T. Masunari, K. Tanaka, N. Okubo, H. Oikawa, K. Takechi, T. Iwasaki and N. Shimizu: *Proc. Int. Symp. Field Measurements in Geomechanics, FMGM03* (2003), pp.537-543.
- 9) N. Shimizu, H. Adachi and S. Koyama: *Journal of MMIJ*, **114** (1998), 9-14.
- 10) H. Matsuda, H. Adachi, Y. Nishimura and N. Shimizu: *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, **715** (2002), 333-343.
- 11) N. Shimizu, H. Ono, H. Kondo and Y. Mizuta: *Journal of MMIJ*, **112** (1996), 283-288.
- 12) H. Matsuda, N. Shimizu, I. Yoshitomi, K. Kawahata, T. Chiba and M. Tonsyo: *Journal of MMIJ*, **119** (2003), 387-395.
- 13) H. Nakazato, K. Inoue, E. Abe, K. Takagi, T. Masunari and Y. Takechi: *Journal of the Japan Landslide Society*, **144** (2008), 55-61.
- 14) T. Iwasaki, K. Takechi, A. Takeishi and N. Shimizu: *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **50** (2002), 25-27.
- 15) Y. Yamaguchi, T. Kobori, M. Yokomori, M. Oono and T. Iwasaki: *Journal of Japan Society of Dam Engineers*, **15** (2005), 137-148.
- 16) E. Itaya, A. Morita and T. Arakaki: *Engineering for Dams* **264** (2008), 47-56.
- 17) H. Hirano, Y. Usuda, K. Kanzawa, K. Miyata and N. Shimizu: *Journal of Japan Society of Civil Engineers F*, **65** (2009), 364-380.
- 18) G. Beutler, H. Bock and E. Brockman: *Bernese GPS Software Version 5.0*, Astronomical Institute, University of Bern, (2005), pp.165-177.
- 19) A. Tsuchiya and H. Tsuji: *Shin GPS Sokuryo no Kiso*, (Nihon Sokuryo Kyokai, Tokyo, 2002), pp.187-192.
- 20) T. Masunari and N. Shimizu: *Journal of Japan Society of Civil Engineers F*, **63** (2007), 437-447.
- 21) T. Masunari, Y. Takechi, T. Funatsu and N. Shimizu: *Journal of Japan Society of Civil Engineers F*, **65** (2009), 356-363.
- 22) H. Nakamura (Eds): *GPS Kisho-gaku, Kisho Kenkyu Nohto No.192*, (Nihon Kisho Gakkai, Tokyo, 1998), pp.27-31, p.92, pp.124-127.
- 23) M. Satomura, S. Shimada, Y. Goto and M. Nishikori: *Proc. Int. Assoc. of Geodesy Symposia* (2005), Vol.128, Symposium G01, pp.44-47.
- 24) Geodetic Observation Center, Geospatial Information Authority of Japan: *Journal of the Geographical Survey Institute*, **103** (2004), 2-51.
- 25) P. Misra and P. Enge: *Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance Second Edition*, (Ganga-Jamuna Press, Lincoln, 2006) 390p. (Translation by The Institute of Positioning, Navigation and Timing of Japan: *Seisetsu GPS: Kihon-gainen Sokui-genri Shingou to Jushinki*, (Shoukadoh-shoten, Kyoto, 2010), 526p.)
- 26) H.S. Hopfield: *J. Geophys. Res.* **74** (1969), 4487-4499.
- 27) B.H. Wellenhopf, H.Lichtenegger and J.Collins: *GPS Theory and Practice, 5th rev. ed.* (Springer-Verlag Wien New York, 1992) 435p.
- 28) D.M. Tralli, T.H. Dixson and S.A. Stephens: *J. Geophys. Res.*, **93** (1988), No.B6, 6545-6557.
- 29) J. Saastamoinen: *Bulletin Géodésique*, **107** (1973), 13-34.
- 30) D.E. Wells: *Doppler Satellite Control, Technical Reports / Dept. of Surveying Engineering, University of New Brunswick*, No.29, (Dept. of Surveying Engineering, University of New Brunswick in Fredericton, N.B., 1974), pp.48-62.
- 31) C.C. Goad and L. Goodman: *AGU Annual Fall Meeting* (1974), pp.12-17.
- 32) A.E. Niel: *J. Geophys. Res.*, **101** (1996), 3227-3246.
- 33) World Meteorological Organization, *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Appendix 4B, WMO-No. 8 (CIMO Guide)*, Geneva (2008), pp.1.4-29.
- 34) G. Kitagawa: *Jikeiretsu-kaiseki Puroguramingu*, (Iwanami Shoten, Tokyo, 1993), 390p.