高低差の大きい長大斜面の GPS 変位計測における 不動点計測値を用いた対流圏遅延補正法の提案と効果の検証 *

中島伸一郎¹ 難波辰弥² 板垣壮真³ 曾田英揮⁴
岩崎智治⁵ 清水則一⁶ 小野雅和⁷

Tropospheric Delay Correction of GPS Displacement Measurements in the Presence of Large Height Differences using Fixed-point Observation

by Shinichiro NAKASHIMA^a, Tatsuya NAMBA^b, Souma ITAGAKI^b, Hideki SODA^c,
Tomoharu IWASAKI^d, Norikazu SHIMIZU^e and Masakazu ONO^f

- 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. Former graduate student, Yamaguchi University
- c. Japan Water Agency
- d. Kokusai Kogyo Co., Ltd.
- e. Professor, Yamaguchi University
- f. Hachinohe Mining Co., Ltd.

A tropospheric delay is known to give non-negligible error to measurements in precise displacement monitoring using Global Positioning System (GPS), when difference in height between GPS antenna points is large, or more than a few tens of meters. One effective way to reduce such error, in the case of short baselines (less than a few kilo-meters), is to process GPS signal taking mathematical tropospheric model such as the Modified Hopfield model, and meteorological data near the measurement site. However, under the condition of large height difference between antenna points, some amount of error still remains after the correction, especially in the seasons that weather changes a lot. Therefore, this paper proposes a new method to correct tropospheric delay error more easily and effectively than the correction method using mathematical tropospheric model and meteorological data. In our method, tropospheric delay error is directly measured at a fixed point, and the measured error is proportionally allocated to the other measurement points depending on the height differences between the reference point and the measurement points. This proposed correction method was applied to a field measurement that had continued for more than five years at an open-pit limestone quarry, which had nine GPS antennas with a maximum height difference of 209 meters. The results showed that the proposed correction method successfully removed the tropospheric delay errors better than the conventional method. Furthermore, according to a measurement performance test that was carried out in the same site, 5-millimeter displacement given to an antenna in height direction could be detected within 1-millimeter accuracy.

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

1. 序 論

GPS (Global Positioning System)^{1, 2)} を利用した変位計測 (GPS 変位計測と呼ぶ) は、精度向上のためのデータ処理法と計測システムの開発³⁻⁸⁾ によって、広範囲の地盤や大規模構造物の変位を三次元的に自動連続計測できるようになり、鉱山の長大斜

面^{9, 10)} や地すべり斜面の安全監視¹¹⁾、道路斜面の維持管理¹²⁾、ダム の堤体計測^{13, 14)}、トンネル建設の施工管理¹⁵⁾、火山活動監視¹⁶⁾ などの実務に適用されている。

GPS による変位計測の高精度化が実現されるにつれ、これまで は見過ごされてきた GPS 固有の誤差要因に対処する必要が生じ てきた。なかでも、気象状態の変化に基づく大気の影響で GPS 衛星からの電波が遅延する現象は対流圏遅延と呼ばれ、それ による高さ方向変位の誤差は、長大斜面のように計測点と基準点 との高低差が大きい場合、無視できず、その対処が重要である。

筆者らは、対流圏遅延による誤差に対して、基準点と計測点間 の基線長が GPS としては比較的短い数 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^{5, 17, 18)}。しかしながら、基準点と計測点間の高 低差が大きく、かつ、気象の影響の大きい時期には、完全に補正

*2014 年 4 月 22 日受付 2014 年 7 月 29 日受理

- 1. 山口大学大学院 理工学研究科 助教
- 2. 山口大学大学院 理工学研究科 学生 (研究当時)
- 3. 山口大学大学院 理工学研究科 学生 (研究当時)
- 4. (独) 水資源機構 総合技術センター試験・解析 G
- 5. 国際航業株式会社 海外事業部防災水資源部
- 6. 正会員 山口大学大学院 理工学研究科 教授
- 7. 八戸鉱山株式会社 八戸鉱業所採鉱部

[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, 対流圏遅延, 誤差補正

Fig.1 Full-view of the field measurement site (an open-pit limestone quarry).

しきれない誤差が残ることがあり、この点の改善が課題となっている^{17, 18)}。特に、一般的な切土斜面等と比べて斜面高さが大きい露天掘り鉱山斜面(残壁)に対して、対流圏補正は重要である。

そこで、本研究では、対流圏遅延による誤差を簡便に、しかもよりよく抑制する方法を提案し、その妥当性と補正効果を検証することを目的とする。

本文では、まず、長大斜面の変位計測における Modified Hopfield モデルによる対流圏遅延補正の効果^{17, 18)}と課題について述べる。次に、これまでの計測結果と理論的な考察に基づき、対流圏遅延誤差と高低差との比例関係が単なる経験的な現象に留まらず、理論的な背景を有することを明らかにした上で、対流圏遅延の簡易で効果的な補正方法を提案し、長期計測結果に対してこれを適用し、気象データを用いた Modified Hopfield モデルによる補正結果と比較する形で提案方法の妥当性を評価する。最後に、GPS 受信機のアンテナに人為的な変位を与える強制変位実験により、変位検出の精度から提案方法の効果を検証する。

2. Modified Hopfield モデルによる対流圏遅延補正の効果と課題

対流圏遅延は、電波が対流圏を通過する際に大気(気象状態、特に水分)の影響を受けて屈折し、計測点への到達が遅れる現象である。この現象により、基準点と高低差の大きい計測点においては、主に高さ方向の変位に年周期および日周期の誤差が生じる。対流圏遅延による誤差に対して、筆者らは、基準点と計測点間の基線長が数 km 以内の場合、地表近くの気象データを用いた Modified Hopfield モデルによる補正が有効であることを示した⁵⁾。Modified Hopfield モデルは、Zaastamoinen など他の対流圏遅延補正モデル^{1, 2)}とともに以前から知られていたが、理論上は電波の伝搬経路に沿う気象データが必要で、地表の気象データのみを用いては、十分な補正ができないと考えられていた。しかし、筆者らは、基線長が短い場合、上空の気象条件は各計測点に対しておおむね同一であるため、GPS 変位計測で用いる相対測位法の観測式において上空の対流圏遅延量はほぼ相殺され、計測点間の高低差に起因する遅延量差による影響のみが、変位計測結果を支配すると考えた。そして、実測結果を通して、地表付近で測定した気象データ(温度、湿度、気圧)を用いた Modified Hopfield モデルが対流圏遅延補正に効果があることを示した^{5, 17, 18)}。しかし、序論でも述べたように、上記の方法では高低差が大きい長大斜面の場合、対流圏遅延による誤差は完全には消去できないことが課題となっている¹⁸⁾。

本章では、実測例を通してその課題を明示する。

2・1 計測現場と計測方法の概要

筆者らは、八戸の石灰石露天掘り鉱山において、2006 年 11 月

(a) Plan view

(b) Elevation view

Fig.2 Layout of GPS antennas.

から約 6 年以上の長期にわたり、GPS による長大斜面の変位を自動連続計測している。

計測点は Fig. 1, および Fig. 2 に示すように A, B, C の 3 つの断面にそれぞれ 3 点を配置し、さらに、K-1 は基準点で、K-2 は K-1 が不動点であることを確認するための参照点である。基準点から各計測点への基線長と高低差は Table 1 に示すとおりで、基線長 500 m 程度の狭い範囲内に、最大で 200 m を超える高低差で 9 点の受信機が設置されているところが当現場の特徴である。また、当現場は採掘が終了してすでに長期間経っており安定していることから、採掘や不安定化等による新たな斜面の変位は生じていないと考えられる。

Fig. 3 に本研究で用いた GPS 変位計測システム¹⁸⁾を示す。計測は、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 秒ごとに位相を観測し、1 時間蓄積した観測データを用いるスタティック方式により、1 時間毎に変位を得る。

Table 1 Positions of the GPS antennas.

GPS antenna name	Baseline length, BL [m]	Altitude above sea 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	-11	106
G-5	404	-56	151
G-6	459	-89	183
G-7	478	-11	106
G-8	523	-54	148
G-9	550	-89	183

2・2 計測結果と Modified Hopfield モデルによる補正と課題

Fig. 4 は同一断面 A で標高の異なる 3 つの計測点 G-1, G-2, G-3 における高さ方向変位の計測結果である。図には、基線解析によって得られた結果に対してトレンドモデル¹⁹⁾を適用して推定した変位を示しており、先の研究¹⁸⁾で示した 2 年間の計測結果にその後の 3 年間の計測結果を新たに加えている。図中 k はトレンド次数, τ はシステムノイズの標準偏差, σ は計測ノイズの標準偏差の推定値である¹⁹⁾。なお, 2009 年 2 ~ 7 月にかけて計測結果が欠けているのは, この間, 強制変位実験 (後述) を行ったからである。

Fig. 4 において実線は通常の基線解析結果 (補正前と呼ぶ), 点線は計測現場から最寄りの気象庁測候所 (八戸測候所, 標高 27.1 m, 現場から約 7 km の位置) で観測された 1 時間ごとの気象データ (気温, 大気圧, 相対湿度) を用い Modified Hopfield による対流圏遅延補正を行った結果である。図から補正前の高さ方

Fig.3 Drawing of GPS antenna and system diagram.

向変位はいずれの計測点においても夏季に隆起する年周期変動と日程度の短周期変動が見られる。このような変動は高さ方向変位のみに現れ, 対流圏遅延に起因する誤差であることが分かっている¹⁸⁾。一方, Modified Hopfield による対流圏遅延補正によって

Fig.4 Height components of GPS measurements, before and after correction of tropospheric delay error by modified Hopfield model. Hourly-observed meteorological data at Hachinohe Weather Station (altitude above sea level: 27.1 m, about 7 km from the testing site) was used in the correction by modified Hopfield model.

Fig.5 Correlative relationships between heights measured by GPS and zenith tropospheric delays estimated from meteorological data.

この変動は減少し、例えば、夏季のピーク値は補正前後で25%程度に減少するなど、計測結果は補正前と比べて大きく改善されているものの、特に夏季の変動は完全には取り除けていないことが分かる。Fig. 4に見られる残余する変動の除去が Modified Hopfield による対流圏遅延補正の課題である。

3. 不動点における計測値を用いた対流圏遅延補正法の提案

著者の一部は、フィルダムの変位計測（高低差最大 79.3 m）において、高さ方向変位の変動が計測点の基準点からの高低差に比例すると考えて、不動点（基準点からの高低差 26.2 m）での高さ方向変位の変動量を計測点付近の対流圏遅延に起因する誤差とし、この値を高低差の大きさに比例させて他の計測点（基準点からの高低差 79.3 m）の補正值とする補正法を示した^{20, 21)}。本手法の適用により、高さ方向変位の変動を抑えることに成功したものの、単一計測点での短期間（1 年半）での事例であり、地盤の真の変位が不確かな条件下での結果である。したがって、補正効果の評価は不十分で、補正法としての適用の可能性を示したという域に留まっている。

同時に、この方法は、高さ方向変位の変動が対流圏遅延に基づく誤差であること、および、高さ方向変位の変動が高低差に比例していること、を前提とするが、これらの前提の妥当性の根拠を示していないため、工学的な手法としての提案には至っていないといえる。

そこで、本研究では、上記 2 点について、高低差がより大きく計測点数も多い本現場の長期計測結果と、対流圏遅延を記述するモデル式を用いた理論的考察により妥当性を新たに検証した上で、対流圏遅延の補正法として提案する。

3・1 各計測点の高さ方向変位の変動と高低差の関係

まず、GPS による変位計測において、不動点であっても、年間を通じて高さ方向に見られる計測変位の変動は、対流圏遅延に起因することについては、筆者らの一連の研究によって示されている^{5, 17, 18)}。ここでは、前報¹⁸⁾にさらに 3 年間の計測結果を加えて検証した結果を Fig. 5 および Table 2 に示す。高さ方向に見られる計測変位の変動と対流圏遅延量差 (ZTD_{diff}: Zenith tropospheric delay difference, 基準点と計測点間における天頂方向の対流圏遅延量の差) は強い相関があり、高さ方向変位の変動は、対流圏遅延に起因していることを示している。

次に、高さ方向変位の変動と計測点の基準点からの高低差との関係を調べる。最初に、Hopfield モデルに基づいて、対流圏遅延量と高低差との関係について考察する。

Hopfield モデルによれば、地表からの高さ h [m] における天頂方向の大気遅延量 ZTD (h) は次式により求めることができる²⁾。

Table 2 Correlation coefficients between heights measured by GPS and zenith tropospheric delays estimated from meteorological data.

Section	Sensor No.	Correlation coefficient
A	G-1	0.9157
	G-2	0.9322
	G-3	0.9206
B	G-4	0.8874
	G-5	0.9179
	G-6	0.9260
C	G-7	0.8928
	G-8	0.9142
	G-9	0.9154

$$\begin{aligned} \text{ZTD}(h) &= 10^{-6} N_{d0}^{\text{trop}} \int_0^h (1 - h/h_d)^4 dh \\ &+ 10^{-6} N_{w0}^{\text{trop}} \int_0^h (1 - h/h_w)^4 dh \\ &= \frac{10^{-6}}{5} \{ N_{d0}^{\text{trop}} h_d (1 - h/h_d)^5 + N_{w0}^{\text{trop}} h_w (1 - h/h_w)^5 \} \cdots (1) \end{aligned}$$

ここに、 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_{d0}^{trop} 、 N_{w0}^{trop} はそれぞれ乾燥大気と水蒸気の地表面での屈折性であり、大気圧 p [hPa]、気温 T [K]、水蒸気圧 e [hPa] から、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。

$$\begin{aligned} N_{d0}^{\text{trop}} &= c_1 \frac{p}{T}, & c_1 &= 77.64 \text{ [K/hPa]} \\ N_{w0}^{\text{trop}} &= c_2 \frac{e}{T} + c_3 \frac{e}{T^2}, & c_2 &= -12.96 \text{ [K/hPa]} \\ & & c_3 &= 3.718 \times 10^5 \text{ [K}^2\text{/hPa]} \cdots \cdots (2) \end{aligned}$$

いま、気象データが得られている地上の点を地表面 $h = 0$ m とし、同一の気象環境で計測点が高さ h に、基準点が高さ $h + \Delta h$ にあるものとする。計測点と基準点における天頂方向の対流圏遅延量を式 (1) によって求め、その差を取れば、基準点と計測点との間に生ずる天頂方向の対流圏遅延量差 ZTD_{diff} (Zenith tropospheric delay difference) となる。

$$\text{ZTD}_{\text{diff}} = \text{ZTD}(h + \Delta h) - \text{ZTD}(h) \cdots \cdots (3)$$

ここで、地表面近傍 (h : 数百 m 以内) では、 h/h_d および h/h_w は十分に小さいので、式 (1) の 2 次以降を無視して 1 次近似すれば、次の式が得られる。

$$\text{ZTD}(h) \approx \frac{10^{-6}}{5} \{ N_{d0}^{\text{trop}} h_d (1 - 5h/h_d) + N_{w0}^{\text{trop}} h_w (1 - 5h/h_w) \} \cdots (4)$$

Fig.6 Relationships between heights measured by GPS and height differences between the reference point and the measurement points.

式 (4) を使って天頂方向の対流圏遅延量差 ZTD_{diff} を求めると次の関係が得られる。

$$ZTD_{diff} = 10^{-6} (N_{d0}^{trop} + N_{w0}^{trop}) \Delta h \quad \dots\dots\dots (5)$$

つまり、式 (5) より、基準点と計測点との間に生ずる対流圏遅延量差は高低差 Δh に比例し、その比例係数は、地表面の気象条件 (大気圧、気温、水蒸気圧) から定まる大気の屈折率 $10^{-6} (N_{d0}^{trop} + N_{w0}^{trop})$ に等しい。したがって、以上の対流圏遅延モデルに基づく考察から、地表から数百 m の以内の範囲であれば、対流圏遅延量は高低差に比例すると考えておむね妥当である。

一方、Fig. 5 および Table 2 に示したように、高さ方向変位の変動と対流圏遅延量差は強い正の相関があるので、式 (5) の結果をあわせると、高さ方向変位の変動は高低差に比例することが推察される。

そこで、各計測点の高さ方向変位の変動 (ここでは対流圏遅延補正前の計測値の月間平均値) と計測点 - 基準点間の高低差との関係をプロットし、月ごとに回帰直線を引いたのが Fig. 6 である。図より、回帰直線の勾配は、冬期に小さく、夏期に大きく、月ごとに異なるが、いずれの月においても、高さ方向変位の変動は高低差とおおむね比例する傾向にある。

さらに、1 時間ごとに得られる 5 年間の全ての計測結果 (強制変位実験期間を除く) について、高さ方向変位の変動を各点の高低差で除した上で、計測点間で相互に比較した。Fig. 7 は、横軸に G-1、縦軸にその他の計測点 (G-2 ~ G-9) を取ってプロットしたものである。凡例には回帰直線の傾きと勾配を示している。図より、高低差で除した高さ方向変位の変動は、いずれの計測点についても、原点を通り傾き 1.0 の直線上におおむね乗っている、すなわち全ての計測点で、傾きはおおむね一致している。したがって、高さ方向変位の変動と高低差は、すべての計測点の時々刻々のデータについておおむね比例することがわかる。

以上のことから、本章の冒頭で述べた文献^{20, 21)}の補正法が前提とする、「高さ方向変位の変動が対流圏遅延に基づく誤差であり、その変動の大きさは計測点と基準点の高低差に比例する」という関係は、高低差がより大きく、計測点数も多い本現場の長期観測データにおいても成り立つことが確認された。同時に、対流圏遅延を記述する Hopfield モデル式に基づく考察から、上述の前提が理論的な客観性を有するものであることが新たに示された。

3・2 不動点計測値を用いた簡易補正法の提案

3・1 で妥当性が検証された 2 つの前提を用いると、文献^{20, 21)}

Fig.7 Comparison of measured heights normalized with height difference of the measurement points from the reference point. u_{hgt} : height component of GPS measurements, HD: height difference of measurement point from the reference point.

に示されるように、不動点計測値を用いて対流圏遅延による誤差を簡易に補正することが可能となる。

すなわち、Fig. 8 に示すような高低差のある計測現場において GPS 変位計測の基準点 (fixed reference point) とは別に、対流圏遅延補正のための基準となる計測点を不動地盤上に設置する。この第 2 不動点 (fixed point for tropospheric delay measurement, 基準点との高低差 h_0) では、変位はゼロであるから、計測される高さ方向変位 $y_0(t)$ は理想的には対流圏遅延による高さ方向変位の変動 $e_0(t) (= y_0(t))$ を直接的に計測したものとみなすことができる。そして、その大きさ $y_0(t)$ を基準点と計測点との高低差 h_i に応じて比例配分することによって、各高さの計測点での対流圏遅延による高さ方向変位の変動 $e_i(t)$ を次式で推定し補正を行うという方法である。

Fig.8 Diagram of proposed correction method of tropospheric delay.

$$e_i(t) = \frac{h_i}{h_0} y_0(t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

したがって、高低差 h_i の計測点における真の変位 $u_i(t)$ は、計測変位 $y_i(t)$ から対流圏遅延による高さ方向変位の変動 $e_i(t)$ を差し引くことによって求めることができる。

$$u_i(t) = y_i(t) - e_i(t) = y_i(t) - \frac{h_i}{h_0} y_0(t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

4. 現場計測結果に基づく提案方法の妥当性の検証

4・1 長期計測結果に対する適用

3で提案した方法を八戸石灰石鉱山のGPS変位計測結果に適用しその効果を調べる。当現場は前述のとおり実際には掘削や不安定化等による斜面の変位は生じていないので、不動点としてどの計測点を選んでよいが、ここでは仮に、高低差が183 mのG-9を対流圏遅延による高さ方向変位の変動を計測用の不動点とする。G-9の高さ方向変位の計測結果はFig. 9(a)であり、これはFig. 8の説明模式図における $y_0(t)$ ($= e_0(t)$: 不動点で計測される対流圏遅延による高さ方向変位の変動)に相当する。

この計測値をFig. 8に示すように高低差に応じて比例配分すれば、高低差 h_i における対流圏遅延による高さ方向変位の変動は

$e_i(t) = y_0(t) (h_i/h_0)$ である。たとえば、計測点G-1は基準点との高低差が106 mであるから、 $h_i = 106$ m, $h_0 = 183$ mとして、この高低差での対流圏遅延による高さ方向変位の変動 e_i を求めるとFig. 9(b)のようになる。一方、計測点G-1の高さ方向変位の計測結果(Fig. 8における $y_i(t)$)はFig. 9(c)であるから、 $y_i(t)$ から $e_i(t)$ を差し引くことにより、計測点G-1における対流圏遅延による高さ方向変位の変動を除去した計測変位 $u_i(t)$ を求めることができる。差し引いた結果をFig. 9(d)に示す。この結果をトレンドモデルにより平滑化処理することにより、対流圏遅延による高さ方向変位の変動の影響を除去した変位を得る。

上述の補正法により、G-9を対流圏遅延による高さ方向変位の変動計測用の不動点としてG-1～G-8の長期計測結果を補正した。補正結果の代表例として、Fig. 10はG-1, G-2, G-3の高さ方向変位について、(a)対流圏遅延補正を行わない場合、(b)Modified Hopfieldモデルによって対流圏遅延補正を行った場合、(c)不動点計測値を用いて対流圏遅延補正を行った場合の結果を比較したものである。これらはいずれもトレンドモデルによる平滑化結果を示している。図よりModified Hopfieldモデルによる補正では、夏期に隆起する季節変動がわずかに残っているのに対して、本研究の不動点計測値を用いた補正では、季節変動がさらに小さくなっていることが確認できる。また、短い周期の変動についても、Modified Hopfieldモデルを用いた補正に比べてさらに改善している。

すべての計測点における対流圏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を求めて比較したのがFig. 11である。この図から、計測値の変動は、Modified Hopfieldモデルによる補正では、補正なしに比べて1/2～1/4程度まで抑えられているのに対して、不動点計測値を用いた補正では1/10以下にまで変動が抑えられていることが確認できる。すなわち、不動点計測値を用いた補正では、ほぼ確実に対流圏遅延による高さ方向変位の変動が除去できることが示された。

4・2 強制変位実験結果に対する補正効果の検証

この方法が変位計測にどのような効果があるか調べるために、2009年1月～7月に実施した強制変位実験についても不動点計測値を用いた対流圏遅延補正を実施し、その効果を検証した。ここに強制変位実験とは、GPSアンテナに人為的に強制変位を与えてこれを計測するものである。実験はFig. 12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のセンサの取り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。

なお、不動点計測値を用いた対流圏遅延補正を行うためには、基準点を含む2個の不動点が必要である。ところが、本実験では

Fig.9 An illustrative example of the procedure of the proposed correction method for tropospheric delay.

Fig.10 Height components of GPS measurements at G-1, G-2 and G-3, uncorrected results (a), corrected by modified Hopfield (b), and corrected by proposed method (c).

Fig.11 Average heights through July and August.

Fig.12 Displacement given to K-1 in height direction in the measurement performance test.

基準点である K-1 に変位を与えているため、K-1 と G-9 の相対変位は強制変位量を含んでしまい、対流圏遅延による高さ方向変位の変動のみを計測することはできない。そこで、不動点として K-1 の代わりに参照点 K-2 を使い、K-2 と G-9 との関係から対流圏遅延による高さ方向変位の変動を求めて補正を行うこととした。

Fig. 13 は、計測点 G-1, G-2, G-3 に対して、与えた変位 (exact displacement), 対流圏遅延補正を行わない場合 (before correction), Modified Hopfield モデルにより対流圏遅延補正を行った場合 (corrected using modified Hopfield model), 不動点計測値を用いて対流圏遅延補正を行った場合 (corrected using the observation at the

Fig.13 Given and measured displacements in measurement performance test.

Fig.14 Differences between given and measured displacement.

fixed point) の結果を示す。これらはいずれもトレンドモデルによる平滑化結果である。図より、2～3月の結果については、いずれの計測点についても、Modified Hopfield モデルによる対流圏遅延補正によって、与えた変位をほぼ正確に捉えており、5 mm の変位も検出できている。また、対流圏遅延補正を行わない場合に現れる短周期的な変動についてもほぼ除去されている。一方、大気遅延が大きく増加する6月以降の結果について Modified Hopfield モデルによる補正結果を見ると、計測点 G-1 では 5 mm の変位も概ね捉えているが、高低差が大きくなる G-2、G-3 では 5 mm の変位の検出は困難である。これらに対して、不動点計測値を用いた対流圏遅延補正結果を見ると、Modified Hopfield モデルによる補正では捉えきれなかった、高低差の大きい G-2 や G-3 の6月以降の結果についても、与えた変位を正確に検出できていることがわかる。

全ての計測点について、計測結果（補正結果）と与えた変位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. 14 のようになる。ここでは、対流圏遅延による計測値の変動の大きい5～6月の結果を示している。Fig. 14 (a) と Fig. 14 (b) の比較より、Modified Hopfield モデルによる補正では、補正前と比べれば計測誤差は 1/2 以下にまで改善されているものの、高低差が大きくなるにしたがって誤差が増大する傾向は残っており、高低差 200 m で最大 2 mm 程度の誤差が生じている。一方、Fig. 14 (c) より、不動点計測値を用いた対流圏遅延補正では、誤差は 1 mm 以内に抑えられており、高低差による依存性も見られない。以上より、不動点計測値を用いた対流圏遅延補正により、誤差 1 mm 以内で変位計測が可能であることがわかった。

一方、計測結果のばらつきを確認するため、計測結果と与えた変位との差の標準偏差をプロットしたのが Fig. 15 である。Fig.

Fig.15 Residual standard deviations of the measurements.

15 (a) より、補正前では基準点と計測点との高低差がほぼ無い場合には標準偏差 0.5 mm 以下で計測が行なわれているが、高低差の増大とともに標準偏差は比例的に増加し、その増加率は高低差 100 m あたりで最大で 4 mm 程度である。Fig. 15 (b) より、Modified Hopfield モデルによる補正により標準偏差は補正前と比べて 1/4 程度以下にまで改善されるが、高低差に依存して増大する傾向は残っており、その増加率は高低差 100 m あたりで最大 1 mm 程度である。これらに対して、不動点計測値を用いた対流圏遅延補正では、標準偏差が 1 mm 以下にまで抑えられるとともに、高低差への依存性もほぼ無くなっていることが確認できる。以上の結果より、不動点計測値を用いた対流圏遅延補正により、1 mm 以下の精度が確保されることがわかった。

以上のことから、不動点計測値を用いた対流圏遅延補正によって、Modified Hopfield モデルでは補正しきれなかった誤差についても効果的に補正できることが明らかとなった。気象データによる対流圏遅延量推定という過程を要することなく、遅延量を直接的に測定して簡易に補正できるので、実用性の高い補正法といえる。なお、実際の現場に本補正法を適用する際には、第 2 不動点をどこに設置するかが問題になると思われる。不動地盤で、基線長が短く、気象条件が基準点および計測点と同一、かつ、上空障害やマルチパスなどの誤差要因の影響がない、という条件をクリアした上で、基準点との高低差をどの程度確保する必要があるのかという点が問題になると思われる、この点については今後の検討課題である。

5. 結 論

本研究は、高低差の大きい GPS 変位計測現場において、高さ方向変位計測結果に生ずる対流圏遅延誤差を、簡易的に補正する手法として、不動点を用いて対流圏遅延誤差を直接的に求めて補正する手法を提案し、その補正効果を検証した。その結果を以下に取りまとめる。

- GPS 変位計測において、基準点と計測点との高低差が大きい場合に、高さ方向変位の計測結果に現れる変動は、対流圏遅延に起因する誤差で、その変動量は基準点と計測点との高低差に比例することを、石灰石鉱山での長期連続計測結果（計測期間約 5 年、最大高低差 209 m、計測点数 9 点）に基づき実証した。また、対流圏遅延を記述する Hopfield モデル式による考察に基づき、対流圏遅延誤差と高低差との比例関係が理論的背景を有するものであることを明らかにした。
- 前項の性質を利用し、不動点（GPS 基準点とは高低差の異なる

不動地盤上の計測点）で計測される高さ方向変位の変動を対流圏遅延による誤差とみなし、この値を基準点と計測点との高低差に応じて比例配分することによって、他の計測点の補正值とする簡易補正法を提案した。

- 不動点計測値を用いた対流圏遅延補正法を長期計測結果に適用した結果、気象データを用いた Modified Hopfield モデルによる補正では除去しきれなかった誤差をほぼ完全に除去することができを確認した。
- 強制変位実験結果に対しても不動点計測値を用いた対流圏遅延補正法を適用した結果、5 mm 程度の変位に対しては、本補正法により誤差 1 mm 以内、精度 1 mm 以内で地盤変位を検出することが可能であることを明らかにした。

References

- 1) 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: 精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機, (松香堂書店, 京都, 2010), 526p.)
- 2) B. Hoffman-Wellenhof, H. Lichtenegger and J. Collins: *GPS: Theory and Practice Fifth Revised Edition*, (Springer-Verlag New York, 2001) 370p. (Translation by S. Nishi: GPS—理論と応用, (Springer-Verlag Tokyo, Tokyo, 2005), 435p.)
- 3) N. Shimizu, H. Adachi and S. Koyama: *Journal of MMIJ*, **114** (1998), 9-14.
- 4) H. Matsuda, H. Adachi, Y. Nishimura and N. Shimizu: *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, **715** (2002), 333-343.
- 5) T. Masunari and N. Shimizu: *Journal of Japan Society of Civil Engineers F*, **63** (2007), 437-447.
- 6) T. Masunari, Y. Takechi, N. Tamura, T. Funatsu and N. Shimizu: *Journal of Japan Society of Civil Engineers F*, **64**, (2008), 394-402.
- 7) 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.
- 8) T. Iwasaki, T. Haraguchi, W. Sato, T. Masunari, J. Uchida and N. Shimizu: *Journal of the Japan Landslides Society*, **49**, (2012), 174-185.
- 9) N. Shimizu, H. Ono, H. Kondo and Y. Mizuta: *Journal of MMIJ*, **112** (1996), 283-288.
- 10) H. Matsuda, N. Shimizu, I. Yoshitomi, K. Kawahata, T. Chiba and M. Tonsyo: *Journal of MMIJ*, **119** (2003), 387-395.
- 11) H. Nakazato, K. Inoue, E. Abe, K. Takagi, T. Masunari and Y. Takechi: *Journal of the Japan Landslide Society*, **144** (2008), 55-61.
- 12) T. Iwasaki, K. Takechi, A. Takeishi and N. Shimizu: *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **50** (2002), 25-27.
- 13) Y. Yamaguchi, T. Kobori, M. Yokomori, M. Oono and T. Iwasaki: *Journal of Japan Society of Dam Engineers*, **15** (2005), 137-148.
- 14) S. Nakashima, H. Kawasaki, S. Kubota, T. Nakano and N. Shimizu: *Journal of Japan Society of Civil Engineers F3*, **68** (2012), 1-12.
- 15) H. Hirano, Y. Usuda, K. Kanzawa, K. Miyata and N. Shimizu: *Journal of Japan Society of Civil Engineers F*, **65** (2009), 364-380.
- 16) E. Saito and M. Iguchi: *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **51** (2006), 21-30.
- 17) T. Masunari, Y. Takechi, T. Funatsu and N. Shimizu: *Journal of Japan Society of Civil Engineers F*, **65** (2009), 356-363.
- 18) S. Nakashima, N. Shimizu, K. Hirabayashi, T. Masunari, T. Iwasaki and M. Ono: *Journal of MMIJ*, **128** (2012), 437-447.
- 19) 北川源四郎: *時系列解析プログラミング*, (岩波書店, 東京, 1993), 390p.
- 20) T. Iwasaki, W. Sato, H. Soda, M. Tanaka and N. Shimizu: *Proc. 64th Annual Conf. the Japan Society of Civil Engineers*, IV-139 (2009), 277-278.
- 21) H. Soda, N. Sato, S. Jikan and T. Iwasaki: *Engineering for Dams*, **281** (2010), 4-16.