

長大斜面におけるGPS変位計測と 大気遅延補正の効果

平林 憲^{1*}・于 萌萌¹・清水 則一¹・小野 雅和²・岩崎 智治³・増成 友宏⁴

¹山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²住金鉱業株式会社 八戸鉱業所 (〒031-0815 八戸市松館字長坂37-2)

³国際航業株式会社 shamen-net事業部 (〒183-0057 東京都府中市晴見町2-24-1)

⁴古野電気株式会社 システム機器事業部 (〒662-0934 兵庫県西宮市西宮浜2-20)

*E-mail: hirabayashi@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

露天掘り鉱山斜面のモニタリングは、斜面の安全管理だけでなく経済的な生産の立場からも重要である。一方、数kmにおよぶ掘削延長、また、時には数100mにも達する高低差がある長大斜面に対する適切な計測手法は今尚確立されていない。その中で、GPSによる変位計測システムは現在では多くの現場で適用され、実務的にも有効なモニタリングシステムであることが理解されるようになってきた。

GPS変位計測の高精度化の課題として、計測点間に大きな高低差がある場合、気象条件に起因する電波の大気遅延誤差を無視できなくなることが挙げられる。そこで本報告では、露天掘り鉱山の長大斜面における計測結果に対し、筆者らの提案した大気遅延補正法を適用し、GPS変位計測結果の補正効果を検証する。

Key Words : GPS, displacement monitoring, weather conditions, atmospheric delay, correction method

1. はじめに

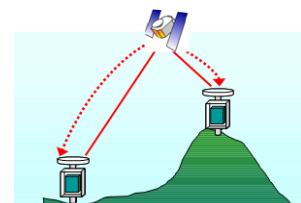
GPS (Global Monitoring System, 人工衛星測量システム) による変位計測システムは広範囲の岩盤の3次元変位をリアルタイムに計測することが可能である¹⁾⁴⁾。また、トレンドモデルを用いることによって、1~2mmの精度で計測することが可能となった⁵⁾⁶⁾。

GPS変位計測システムは「地すべり斜面の監視」「高速道路の法面の安全監視」「トンネル掘削の影響による地盤挙動の監視」「ダム堤体の安全監視」など、幅広く用いられており、今後更なる精度の改善が求められている。

GPS変位計測システムの高精度化が実現されるにつれ、GPSシステム固有の誤差要因が無視できなくなる。固有誤差要因には、(a) 気象条件による電波遅延、(b) 上空障害物による電波の乱れ、(c) 電波のマルチパス、などが挙げられる。これらの誤差要因の中でも (a) 気象条件による電波遅延、による誤差は特に大きく、その補正は重要であるが、これまで困難と考えられていた。

筆者らはModified Hopfieldモデルを用いることによる大気遅延補正法を適用し、その有効性を検証した⁵⁾⁶⁾。

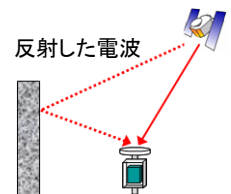
本研究では、その方法の効果についてより詳細な検証を行うために、石灰石露天掘り鉱山の長大岩盤斜面において、長期間にわたりGPS変位計測を実施し、大気遅延補正法を適用している。本報告は、その結果の一部を示すものである。



(a) 気象条件による電波遅延



(b) 上空障害物による電波の乱れ



(c) 電波のマルチパス

図-1 GPSシステム固有の誤差要因

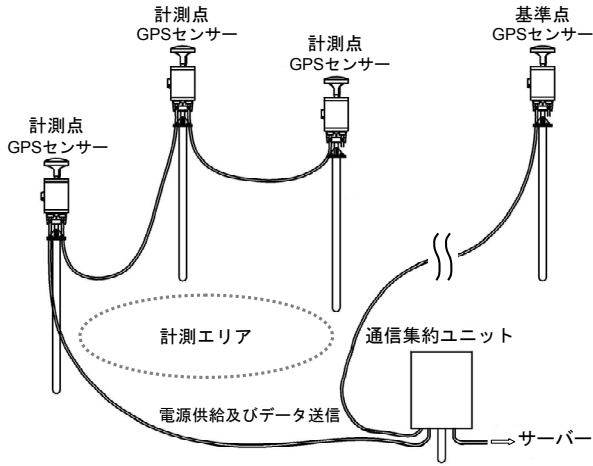


図-2 GPS変位計測システム

2. GPS変位計測システムの概要

(1) モニタリングシステム

ここで使用するGPS変位計測システムの概要を図-2に示す⁴⁾。基準点と各計測点にセンサーを設置し、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している。各受信機への電力はケーブルを介して供給する。通信集約ユニットは、データ・メモリーおよびネットワークデバイスから構成される。

人工衛星から受信したデータは、センサーから通信集約ユニットに送られ、メモリーに一旦保存される。そして、現場から離れたオフィスのサーバーの命令によってダウンロードされ、自動解析によって3次元変位を得て、その結果はホームページ上でリアルタイムで表示される^{3),4)}。

(2) 相対測位法

GPSによる変位計測では、相対測位法（干渉測位法とも呼ぶ）⁹⁾と呼ばれる方法によって、計測点の座標（変位）を求める。

計測点を mi 基準点を mb 、人工衛星を衛星 k と l とすると、電波の位相の2重位相差は次式(1)のように表される。

$$\phi_{mi-mb}^{k-l} = \frac{r_{mi-mb}^{k-l}}{\lambda} + N_{mi-mb}^{k-l} + \varepsilon_{\phi_{mi-mb}}^{k-l} + \frac{T_{\phi_{mi-mb}}^{k-l}}{\lambda} \quad (1)$$

ただし、 λ は衛星から送られる電波の波長、 r_{mi-mb}^{k-l} 、

N_{mi-mb}^{k-l} 、 $\varepsilon_{\phi_{mi-mb}}^{k-l}$ は、それぞれ、計測点 mi 、および、

基準点 mb と衛星 k および l 間の距離、整数値バイアス、観測誤差と関係する項である。センサー、人工衛星の時計誤差および、電離層の影響（基準点と計測点間の距離は数km以内とすると）は二重位相差をとることで相殺さ

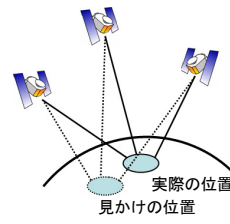


図-3 大気遅延による位置の誤差

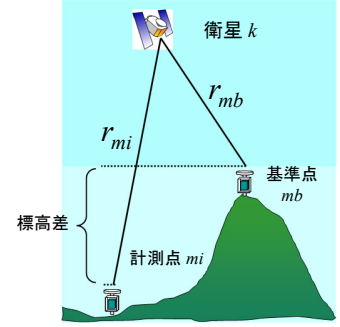


図-4 高低差による伝搬経路長の相違

れる。なお、 $T_{\phi_{mi-mb}}^{k-l}$ が気象の影響による電波の大気遅延に基づく誤差であり、基準点と計測点間の高低差が数10mを超える場合、無視できなくなる。

相対測位法では、式(1)を観測方程式とし、左辺の二重位相差が計測され、右辺の r_{mi-mb}^{k-l} に含まれる計測点座

標（緯度、経度、高さ）および未定定数 N_{mi-mb}^{k-l} を最小二乗法によって求める。

(3) 大気遅延

GPSの電波は伝搬経路上の大気を進むとき屈折し、受信機到達に遅れを生じる。そのため、受信機で測定される位相にも遅れが生じる。この現象は大気屈折、あるいは大気遅延と呼ばれる。大気遅延が生じた場合、図-3のように、実際の位置が見かけの位置にあるように計測される。

基準点と計測点の距離が数km以下の比較的短い基線長の場合には、搬送波は同じ気象条件の中を伝搬すると考えられ、気象の影響は相殺される。しかし、短基線長であっても、基準点と計測点の間に数10mの高低差がある場合、伝搬経路長 r_{mi} と r_{mb} に差が生じ、その高低差分の気象影響は相殺されない（図-4）。したがって、高低差分の気象条件を適切に考慮し、基線解析を行わなければ、解析結果に誤差が生じる。

(4) Modified Hopfieldモデル

本研究では、大気遅延を仮定するためのモデルとして、Modified Hopfieldモデル¹⁰⁾を採用する。

Hopfieldは大気遅延を、乾燥（dry）成分と湿潤（wet）成分とに分離できるとして、次のように表した。

$$\Delta R^{trop} = 10^{-6} \int N_d^{Trop} ds + 10^{-6} \int N_w^{Trop} ds \quad (2)$$

N_d^{Trop} および N_w^{Trop} は、それぞれ、屈折性（reflectivity）の乾燥成分および湿潤成分で、次のような経験式が与え

られている。

$$N_d^{Trop} = N_{d,0}^{Trop} \left(\frac{1-h}{h_d} \right)^4, \quad N_{d,0}^{Trop} = 77.64 \frac{p}{T} \quad (3)$$

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

$$N_{w,0}^{Trop} = -12.96 \frac{e}{T} + 3.718 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (4)$$

ただし、 p は大気圧、 T は絶対温度、 e は水蒸気圧である。また、 h_d および h_w は、それぞれ、乾燥大気および湿潤大気の高さで、次のように与えられる。

$$h_d = 40136 + 148.72(T - 273.16) [\text{m}], \quad h_w = 11000 \quad [\text{m}]$$

さらに、水蒸気圧 e は、湿度を $RH[\%]$ とすると、次の式で推定される。

$$e = 6.112 \frac{RH}{100} \exp \left(\frac{17.62T - 4813}{T - 30.03} \right) \quad (5)$$

上記のモデルより、大気遅延量（式(2)）を推定するために、計測現場における気圧、温度、湿度を測定すればよい。

従来、数10km以上の長基線を対象とする一般的なGPS測量の分野では、地表気象によって対流圏全体の大気遅延量推定することはできないとされ、Modified Hopfieldモデルの有効性は疑問視されていた。しかし、岩盤工学におけるGPSの適用では、基線長は高々数km以内であり、対流圏内の電波の伝播経路の気象条件はほとんど同じとみなされ、その間の大気遅延は相殺され、基準点と計測点の高低差間の遅延のみが影響すると推測される。筆者らは、この点に着目して、地表付近の気象データによって遅延量差を推定して補正することに成功した⁵⁾⁶⁾。

3. 露天掘り長大斜面への大気遅延補正法の適用

図-5に示す石灰石露天掘り鉱山でGPS変位計測を行っている。図-6にセンサーの設置状況を示す。G-1からG-9は斜面上の計測点であり、斜面頂上の地表面上に基準点K-1、また、K-2に第2基準点を設置した。

基準点と各計測点間の高低差は100～200mであり、高低差分の気象変化による伝搬遅延が、計測結果に影響を及ぼすと推測される。計測は2006年11月に開始され、現在も継続して行われている。

図-8は、A断面のG-3における約2年に渡る変位計測結果である（基準点はK-1）。K-1とG-3の高低差は209mである。緯度方向、経度方向の水平変位にはほとんど変動

は見られないが、高さ方向変位については、夏場に大きく浮き上がる年周期変動が見られる。この期間に計測領域付近での掘削はほとんど行われておらず、掘削による変位は生じていないものと考えられる。

このような、水平変位に見られない高さ方向変位の年周期変動は、気象の影響による変動の特徴であり⁵⁾⁶⁾、Modified Hopfield モデルによる大気遅延補正法⁵⁾⁶⁾を適用する。

図-9に現場に近い気象測候所で観測された気象データ（気圧、気温、湿度）、および、式(5)に示す水蒸気圧、式(2)で得られる大気遅延量から求めた基準点と計測点間の天頂方向の大気遅延量差を示す。



図-5 石灰石露天掘り鉱山の全景

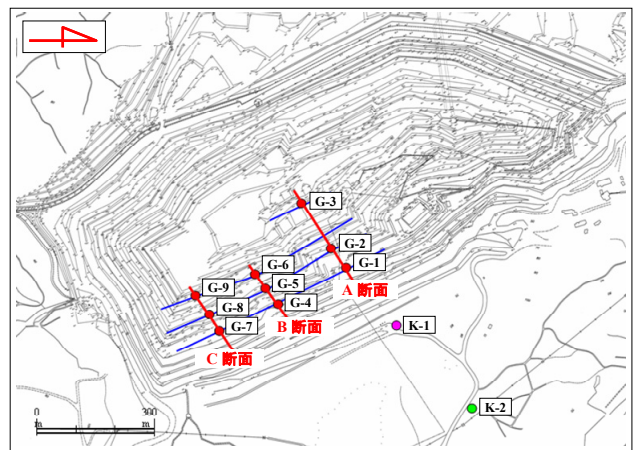


図-6 平面図

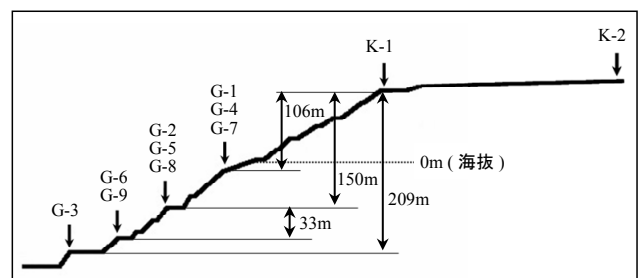


図-7 断面図

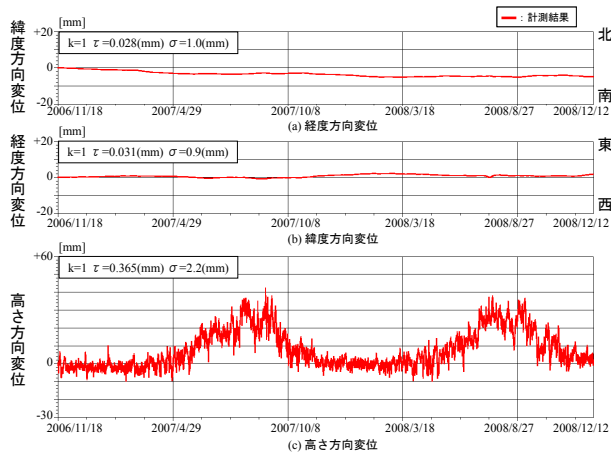


図-8 G-3における変位計測結果

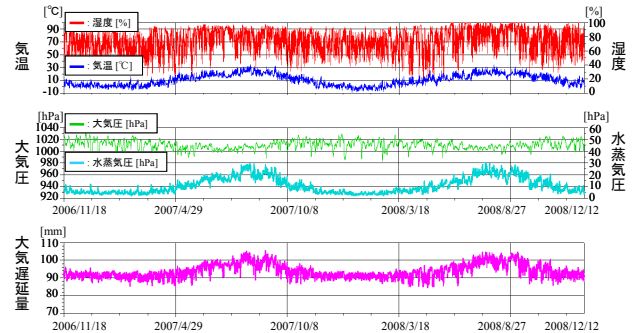


図-9 気象データと推定した大気遅延量

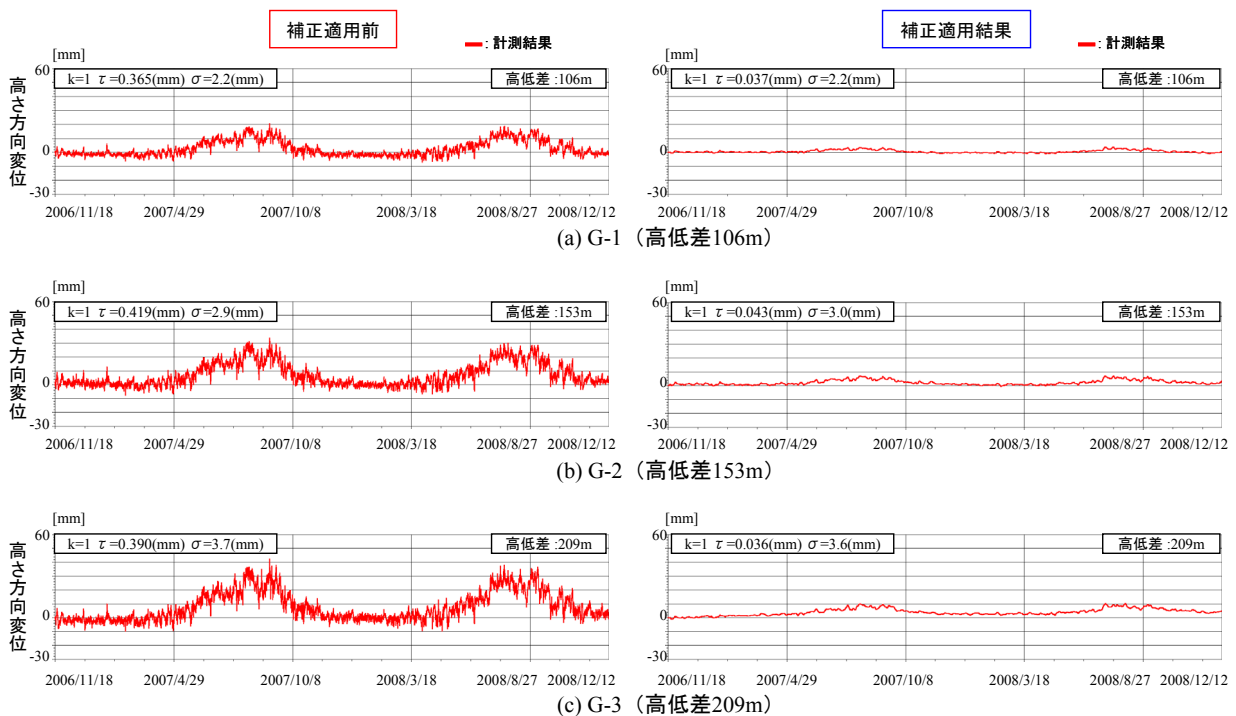


図-10 大気遅延補正適用結果

図-9の大気遅延量差と図-8に示される高さ方向変位にはほとんど相似の年変動が見られる。

Modified Hopfieldモデルを適用した相対測位に基づく基線解析を行った結果を図-10に示す。図-10には、A断面の3つの計測点G-1, G-2, G-3における補正前の高さ方向変位と、補正後の高さ方向変位を示している。

計測点と基準点の高低差が大きいほど、高さ方向変位の変動は大きくなるが、いずれの計測点も大気遅延補正によって、その変動がほとんどなくなり、適正に補正されている。

4. むすび

基準点と計測点間に数10mを越える高低差がある場合、GPS変位計測結果には、気象条件の変化に基づく電波の大気遅延が生じ、その影響は高さ方向の変位に年周期変動として表れる。

Modified Hopfieldモデルに基づく大気遅延補正法によって、そのような気象の影響を適切に補正することができると示された。

謝辞：本研究の一部は石灰石鉱業協会の奨励研究として実施された。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 清水則一，桜井春輔：GPS の岩盤変位計測への適用，資源と素材，109(1):1-7, 1993.1.
- 2) 近藤仁志，M. Elizabeth Cannon，清水則一，中川浩二：GPS による地盤変位モニタリングシステムの開発．土木学会論文集，No.546/VI-32，pp.157-168，1996.9.
- 3) 岩崎智治，武智国加，武石朗，清水則一：道路斜面の維持管理を目的とした計測評価システムの開発，土と基礎，vo.50，No.6(533)，pp.25-27，2002.6.
- 4) 増成，T.，K.田中，N.大久保，H.及川，K.武智，T.岩崎，N.清水：GPS Continuous Displacement Monitoring System，Int. Sympo. Field Measurements in Geomechanics，FMGM03，pp.537-543 2003.9.
- 5) 清水則一，安立 寛，小山修治：GPS 変位モニタリングシステムによる斜面変位計測結果の平滑化に関する研究．資源・素材学会誌，114(6):9-14，1998.6.
- 6) 松田浩朗，安立 寛，西村好恵，清水則一：GPS による斜面変位計測結果の平滑化処理法と変位計測予測手法の実用性の検証，土木学会論文集，No.715/III-60，pp.333-343，2002.9.
- 7) 増成友宏，清水則一：GPS による地盤変位計測における気象の影響の補正方法の検討，土木学会論文集 F，Vol.63，No.4，pp.437-447，2007.
- 8) 増成友宏，武地美明，船津貴弘，清水則一：現場気象データを用いた GPS 変位計測の補正について，土木学会論文集 F，Vol.65，No.3，pp.356-363，2009.
- 9) 土屋 淳，辻 宏道：新・GPS 測量の基礎，社団法人日本測量協会，2002.
- 10) Hoffman-Wellenhof, H., H. Lichtegger and J. Collins: GPS – Theory and Practice, Springer, 1993.

GPS DISPLACEMENT MEASUREMENTS IN A LARGE SLOPE AND CORRECTION OF THE METEOROLOGICAL ERRORS

Ken HIRABAYASHI, Moumou YU, Norikazu SHIMIZU,
Masakazu ONO, Tomoharu IWASAKI and Tomohiro MASUNARI

The GPS (Global Positioning System) displacement monitoring system is now using at many places; landslides, cut slopes and dam, etc. In this paper, continuous monitoring results for last two years at large slopes of a limestone quarry are shown. Since the height of slope is more than 200m, the atmospheric delay of the GPS signal wave caused by weather conditions influences on the measurement results. The authors have proposed a correction method of the meteorological errors to improve the measurement accuracy. The method was applied to the above measurement results and it was proven that the proved is very effective to remove the error.