

長大斜面における GPS 変位計測と大気遅延補正の効果 (その 2)

山口大学大学院 学 ○難波辰弥 板垣壮真 正 中島伸一郎 清水則一
住金鉱業株式会社 小野雅和 錠前幸久
国際航業株式会社 正 岩崎智治
古野電機株式会社 正 増成友宏

1. 目的

GPS 変位計測システムは広い領域を自動的に連続計測できることから斜面等の安全監視に適しているが、高低差の大きい現場では電波の大気遅延による影響を受け計測結果に誤差が生じる。本研究では、高低差の大きい斜面における GPS 変位計測結果に対して、まず、修正 Hopfield モデルを用いた大気遅延補正¹⁾を適用する。次に、現場における不動点の計測結果を用いる補正法²⁾を適用し、その効果について検討する。

2. 大気遅延と補正法¹⁾

GPS 衛星から発射される電波は大気圏を通過するとき大気の影響を受け屈折するため、見かけの経路が長くなる。これを電波の大気遅延という。受信機間の高低差の小さい場合、電波は同じ気象条件の大気中を伝播するため大気遅延は相殺される。しかし受信機間の高低差が大きいと、伝播経路長に有為な差が発生しその経路差分の大気遅延は相殺されず、計測結果に誤差を生じる。大気遅延量 ΔR は修正 Hopfield モデルによって式 (1) で推定される。

$$\Delta R = 10^{-6} \int N_{dry} ds + 10^{-6} \int N_{wet} ds, \quad N_{dry} = 77.64 \frac{P}{T} \left(\frac{h_d - h}{h_d} \right)^4, \quad N_{wet} = \left(-12.96 \frac{e}{T} + 3.718 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \right) \left(\frac{h_w - h}{h_w} \right)^4 \dots (1)$$

ここで、 N_{dry} と N_{wet} はそれぞれ乾燥成分と湿潤成分の屈折指数、 h_d と h_w はそれぞれ乾燥大気と湿潤大気の最大高さ、 P は大気圧 (hPa)、 T は絶対温度 (K)、 e は水蒸気分圧 (hPa) である。地表面の大気圧、温度、湿度を計測し (水蒸気分圧は湿度、温度から推定)、式 (1) によって大気遅延量を推定し GPS の基線解析をすることで補正できる¹⁾。

3. 高低差の大きい斜面における GPS 変位計測結果と補正適用結果

図-1 に示す石灰石鉱山において行われた GPS 変位計測結果に対して、2 の大気遅延補正を適用した。本現場では図-1 のように斜面頂部に基準点 K-1 を、斜面上に計測点 G-1~G-9 を設置している。基準点と各計測点との高低差を表-1 に示す。図-2 は 2008 年の G-1 における高さ方向変位の経時変化であり赤線が大気遅延補正を行っていない計測結果である。図より計測結果は夏季にかけて隆起し秋季から冬季にかけて沈下する年周期的な変動を示し、斜面における挙動として不自然である。また、短い周期の変動も計測期間を通して見られる。図-3 に G-1 と基準点の大気遅延量の差を示す。図より変位計測結果と同様、大気遅延量差にも夏季に盛り上がる年周期的な変動や短い周期の変動が見られる。他の計測点でも同様の計測結果と大気遅延量差の変動を得た。G-1~G-3 について高さ方向変位と大気遅延量差の関係を調べると、図-4 に示すように相関係数 R は約 0.9 となり両者は強い正の相関がある。このことから、計測結果に年周期的な変動や短い周期の変動が見られたのは大気遅延

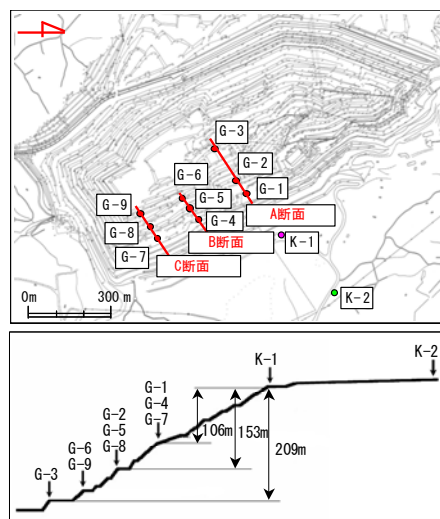


図-1 GPS 受信機の配置

表-1 基準点と各計測点との高低差

No.	高低差 (m)	No.	高低差 (m)
G-1	106	G-6	183
G-2	153	G-7	106
G-3	209	G-8	148
G-4	106	G-9	183
G-5	151		

キーワード 長大斜面, GPS 変位計測, GPS 固有の誤差要因, 大気圏モデル, 大気遅延補正

連絡先 〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1 山口大学工学部社会建設工学科 TEL (0836)85-9011

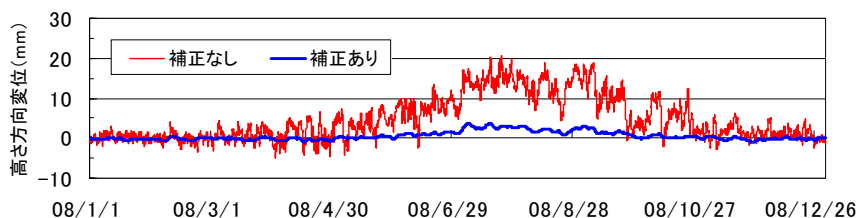


図-2 GPS 変位計測結果および修正 Hopfield モデルによる大気遅延補正

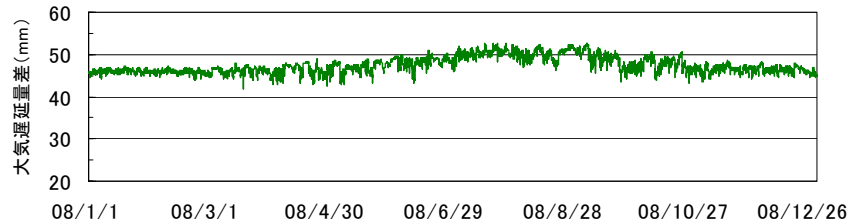


図-3 修正 Hopfield モデルから算出した大気遅延量差 (G-1)

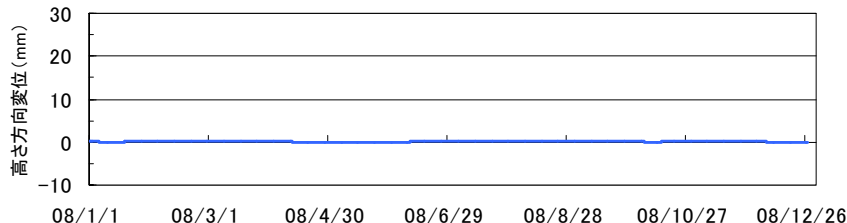


図-6 現場の計測結果を用いた補正結果 (G-1 高さ方向)

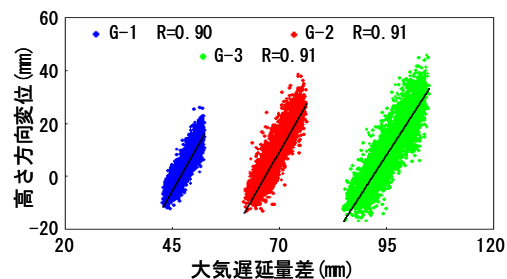


図-4 高さ方向変位と大気遅延量差の関係

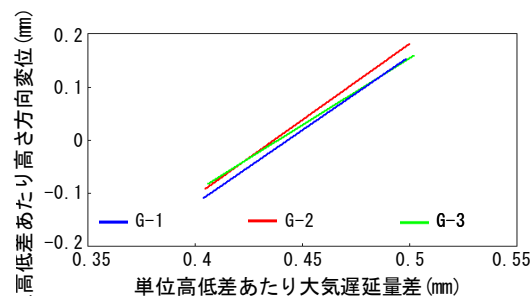


図-5 単位高低差あたりに換算した高さ方向変位と大気遅延量差の関係(回帰直線)

の影響が原因であると考えられる。そこで、修正 Hopfield モデルによる大気遅延補正を行った結果が図-2 の青線である。補正に際して、気象データは現場から約 7km 離れた測候所の値を用いた。この結果から、修正 Hopfield モデルによる大気遅延補正法によりその影響をほぼ除去できている。また、この結果は 2007 年のデータを用いた前報³⁾と同様の結果である。次に、図-4 の G-1～G-3 の回帰直線において、高さ方向変位、大気遅延量差ともにそれぞれの高低差で除することにより単位高低差あたりに換算した。その回帰直線は図-5 に示すようにほぼ一致した。このことから単位高低差あたりの大気遅延量差はいずれの計測点に対してもほぼ等しく、高低差からこの値を推測することが可能と考えられる。

4. 現場における不動点の計測結果を用いた補正結果

3では修正 Hopfield モデルによって計測結果は大きく改善されたが、図-2 の青線のように完全には誤差を除去することができなかった。そこで、図-5 の単位高低差あたりの大気遅延量差はほぼ等しいという結果に着目し、ここでは計測点 G-9 を不動点とみなし、求める計測点の高低差から高さ方向の誤差を算出し、各計測点の計測結果から G-9 で得られた誤差を引くことで大気遅延誤差を除去する。この方法は筆者らの 2) の方法と同様であるが、ここでは図-5 によってその方法に論拠を与えた。G-1 の補正結果を図-6 に示す。図-6 から年周期的な変動はほとんど除去されることが分かる。以上のことから、現場において大気遅延補正用の点を設置すると、修正 Hopfield モデルによる大気遅延補正では補正しきれない誤差まで除去できるものと考えられる。

5. 結論

GPS 計測により生じる年周期的な誤差が大気遅延によるものであることを明らかにし、修正 Hopfield モデルによる補正法を適用しその効果を調べた。また、現場の不動点の計測データを補正誤差と考える方法に論拠を与え、修正 Hopfield モデルでは取りきれない誤差も除去できる可能性を示した。

参考文献

- 1) 増成友宏, 清水則一: GPS による地盤変位計測における気象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
- 2) 岩崎智治, 佐藤渉, 曾田英揮, 田中幹大, 清水則一: GPS を用いたフィリダム外部変形計測における高低差の影響と補正方法について, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演集, VI-139, 2009.
- 3) 平林 憲, 于 萌萌, 清水 則一, 小野 雅和, 岩崎 智治, 増成 友宏: 長大斜面における GPS 変位計測と大気遅延補正の効果, 第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 157-161, 2010.