

単独測位用GPS受信機による 地盤変位計測の可能性

松田 浩朗¹・清水 則一²・工藤 洋三³

¹正会員 博(工) 飛鳥建設株式会社 技術研究所(〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬5472)
(元 山口大学大学院 理工学研究科 博士後期課程)

²正会員 博(工) 山口大学教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)
E-mail: shimizu@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 工博 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科(〒745-8585 山口県徳山市久米3538)

単独測位用GPS受信機は、相対測位方式のGPS受信機とは異なり、その測位精度から精密計測には不向きであると考えられている。筆者らは、これまでに、単独測位用GPS受信機によって精度よく相対座標を計測する方法を提案した。本研究では、この方法を発展させ、単独測位用GPS受信機によって地盤変位計測が可能となる方法を提案する。さらに、実測結果を用いたシミュレーションにより、提案法によって、実際の変位と数cm内の誤差で計測を行うことのできる可能性を示した。

Key Words : GPS, single positioning, displacement measurements, trend model

1. まえがき

GPS (Global Positioning System: 人工衛星測量システム)¹⁾は一般測量のみならず広大な地盤の変位計測手法にも利用されている²⁾。筆者らも、長大斜面の変位監視を目的として、GPSを利用した変位モニタリングシステムを開発し現場へ適用している³⁾。そして、そのシステムにおいて得られた計測結果をトレンドモデルによって平滑化処理を行うことで、mm単位の計測を可能とした⁴⁾。GPSは3次元変位の連続自動計測が可能で、また、他の計測機器に比べ、天候の影響や、計測条件について有利な点があり、優れた計測システムである。

GPSによる変位計測に使用される受信機は相対測位用受信機が利用されている。この相対測位方式の受信機の価格は、例えば1990年頃に比べると最近では安価なものでは1/10以下となっている。しかしながら、経済的な理由で計測点(受信機)の数が制限されることもある。

一方、GPSは人、車、船舶、航空機などのナビゲーションシステムとして普及している。ナビゲーションに利用される単独測位用のGPS受信機の測位精度は一般に15m程度であり⁵⁾、精密測量や変位計測に用いることは困難と考えられてきた。しか

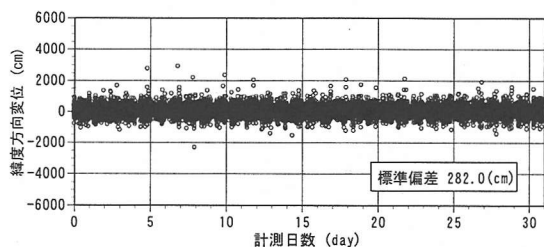
しながら、単独測位用のGPS受信機の価格は、相対測位用GPS受信機に比べて1/10～1/100程度であり、コスト面で非常に有利である。さらに、この受信機は一般的に小型であり、数cm四方の大きさのものがある。このため、単独測位用GPS受信機を用いて高精度に変位計測を行うことができれば、地盤の変位計測手法として非常に有用と思われる。

筆者らは単独測位用GPS受信機を用いて2点間の相対座標を従来の単独測位より優れた精度で計測する方法を提案した。その方法によれば、約50kmの基線を10cm程度の誤差で計測できることが示されている⁶⁾。これは通常の単独測位の精度が15m程度であることを考えると、大きな進歩である。

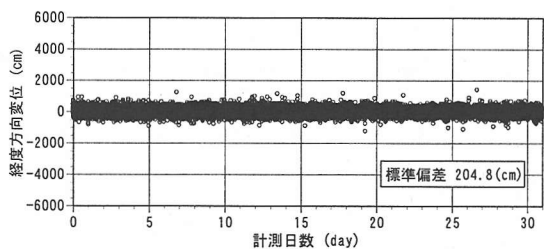
本研究では、この方法を発展させ、単独測位用GPS受信機を用いた地盤変位計測方法を提案し、実測結果に基づくシミュレーションによりその方法の妥当性を検証する。

2. 単独測位用GPS受信機による変位計測方法

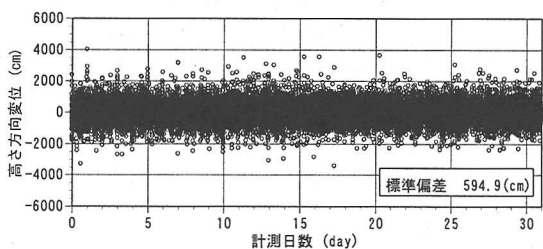
先に提案した方法⁷⁾は、基準点および計測点において同じ人工衛星を用いて単独測位を行い、同計測時刻の相対座標を求めるものである。単独測位の



(a) 緯度方向

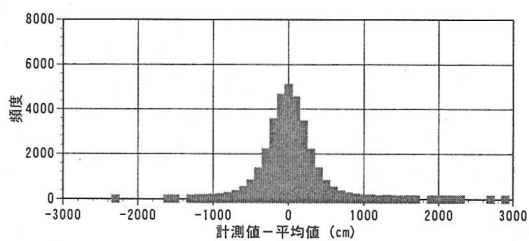


(b) 経度方向

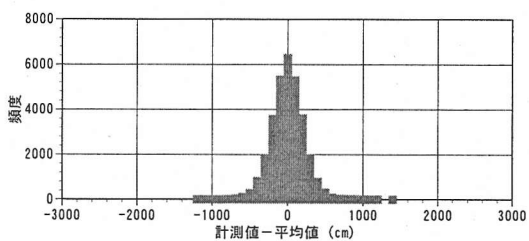


(c) 高さ方向

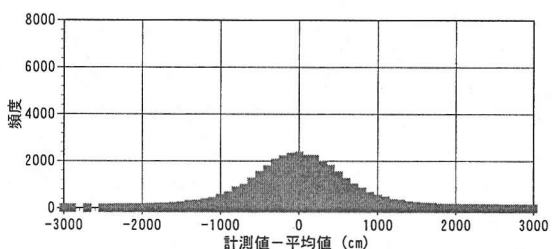
図-1 相対座標計測結果 (計測時間間隔60秒)



(a) 緯度方向



(b) 経度方向



(c) 高さ方向

図-2 相対座標計測結果の頻度分布

精度は一般に15m程度であるが、この方法によって相対座標の計測精度は大幅に向上することを示した。さらに、得られた相対座標をある時間の範囲で単純平均することで、約50kmの基線を10cm程度の誤差で測量できることを示した¹²⁾。

本研究においても、基準点および計測点に単独測位用GPS受信機を設置し、まず文献12)の方法を用いて、計測点の基準点に対する相対座標を計測することから始める。

(1) 単独測位と相対座標

基準点と計測点に単独測位用受信機を設置し、同じ人工衛星のデータを用いてそれぞれ単独測位を行う。具体的には、両点においてそれぞれ緯度、経度、高さを得る。次に、計測点と基準点の差を取り、基準点に対する計測点の相対座標を計測する。

図-1は、変動のない地盤上に基準点と計測点を設け(計測点間の距離31m)、計測点の相対座標を求めた一例である。なお、単独測位は60秒毎に行った。図-2に、そのヒストグラムを示す。緯度、経度、高さ方向の標準偏差は、それぞれ282.0cm、204.8cm、

594.9cmであり、 χ^2 検定により正規分布とみなしてよい結果となっている。単独測位の精度の15m程度と比べるとはるかに小さいが、まだ、このままでは変位計測に用いることはできない。

(2) 時間平均

図-1に示した計測結果に対して、1時間毎の平均を求めた結果を図-3に示す。標準偏差は緯度、経度、高さ方向に対して、それぞれ68.3cm、56.3cm、148.9cmである。これらの数値は、図-1、および図-2の結果と比べて1/4程度となり計測精度が約4倍向上したといえる。

(3) 平滑化処理

図-3に示すような誤差のある計測結果(図中○印)から真の変位を推定するために、トレンドモデル¹³⁾を適用する。図-3には、この計測結果に対してトレンドモデルを適用し、平滑化を行った結果(以下、平滑化結果)を実線で示す。

ここで、トレンドモデルとは、多項式回帰モデルに確率構造を導入したトレンド成分モデルをシ

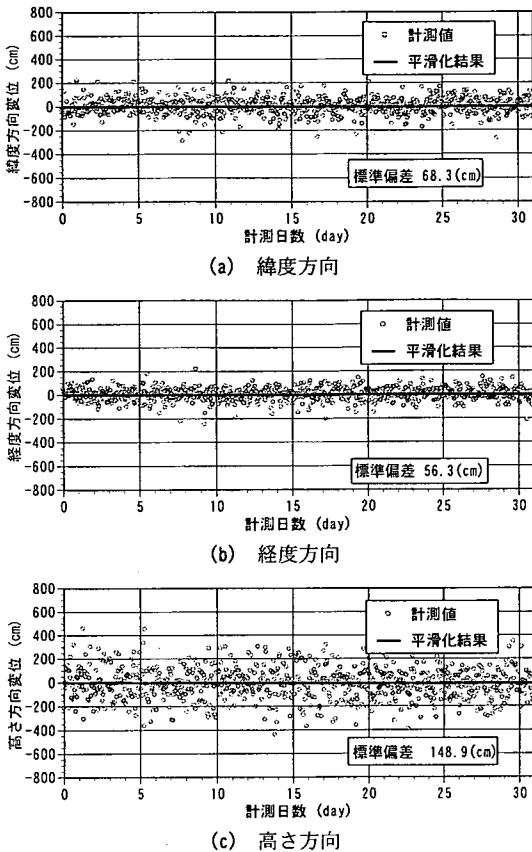


図-3 相対座標計測結果および平滑化結果
(60秒間隔の計測結果に対する1時間毎の平均値)

ステム方程式とし、観測方程式と連立させるものである¹³⁾。

$$\Delta^k u_n = v_n \quad (\text{システム方程式}) \quad (1)$$

$$y_n = u_n + w_n \quad (\text{観測方程式}) \quad (2)$$

ここで、上式において u_n は経時的に推移する真の変位、および y_n は実際に計測される変位である。また、 w_n は観測ノイズ(計測誤差:平均値0,標準偏差 σ の正規分布に従うと仮定)、および v_n はシステムノイズ(モデル誤差:平均値0,標準偏差 τ の正規分布に従うと仮定)である。 Δ は時間差分演算子であり、添字 k は差分の階数を意味する。トレンドモデルには、あらかじめ平滑化の関数形を与えずに、計測データに追従しすぎて偶然誤差の変動を拾いにくいこと、などの特徴があり、筆者らは、このモデルをGPS変位計測システムの計測結果に適用している⁹⁾¹¹⁾。

図-3において、相対座標計測結果そのものは大きくばらついているが、平滑化結果によって計測点が

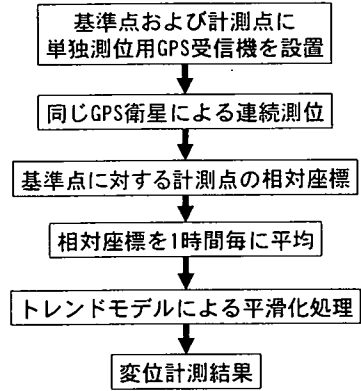


図-4 単独測位用GPS受信機による変位計測方法

静止状態にあることが分かる。このことから、単独測位結果の相対座標計測結果を1時間毎に平均し、その結果にトレンドモデルを適用し平滑化することによって変位計測を行うことが可能と考えられる。図-4に以上の流れをとりまとめる。

3. 実測結果に基づくシミュレーション

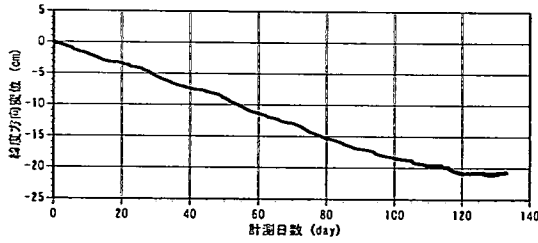
本章では、2.で示した方法の妥当性を検証するためにシミュレーションを行う。ここでは、別に計測された地すべり変位を真の値とし、この真の値と図-3の相対座標計測結果を重ね合わせて模擬計測データとする。この模擬計測データに対して2.の方法を適用し、得た変位を真の変位と比較して本方法の妥当性を検証する。

(1) 地すべり変位を用いたシミュレーション

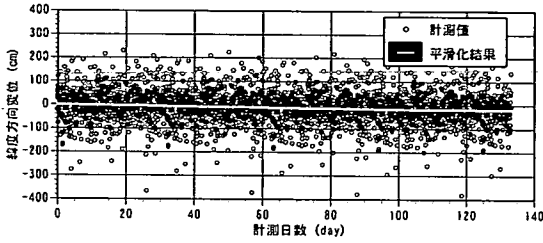
a) ケース1

図-5(a)に、ある地すべり地で計測された変位を示す。この変位を真の変位とし、2.(1)および(2)の手順で得た相対座標計測結果(図-3(a))を重ねたものを図-5(b)に示す。ここで、図-3に示す相対座標計測結果は1ヶ月間(31日間)の計測結果であるため、計測値を31日毎に繰り返して使用している。

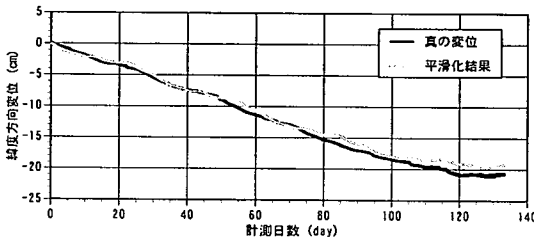
この模擬計測結果にトレンドモデルを適用して得た平滑化結果を図-5(b)の実線(白抜き線)で示す。さらに、真の変位と平滑化結果の比較を図-5(c)に示す。図-5(c)から、平滑化結果は真の変位と±3cm程度の範囲にある。この結果から、通常の単独測位ではなし得ない精度で変位が計測される可能性が示されている。



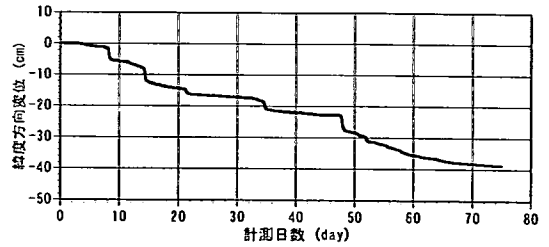
(a) 真の変位



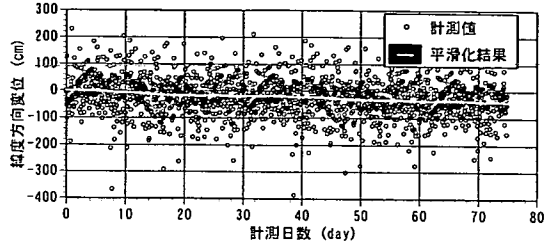
(b) 模擬計測結果および平滑化結果



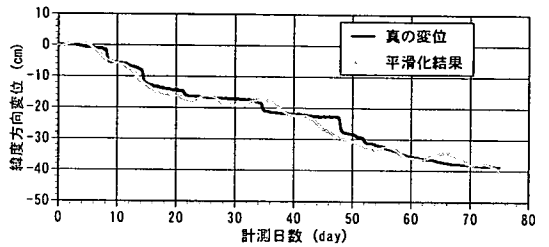
(c) 真の変位および平滑化結果
図-5 シミュレーション結果1



(a) 真の変位



(b) 模擬計測結果および平滑化結果



(c) 真の変位および平滑化結果
図-6 シミュレーション結果2

b) ケース 2

次に、図-6(a)に示すような、ケース1に比べて変位挙動がやや複雑な計測結果を真の変位として、同様にシミュレーションを行う。図-6(b)に模擬計測結果とトレンドモデルを適用して得られた平滑化結果を示す。また、図-6(c)に平滑化結果と真の変位の比較を示す。図-6(c)から、平滑化結果は複雑な挙動を示す真の変位と比べてやや大きな差が生じているところもある。しかし、この結果においても本手法による計測結果は真の変位と比べ、±3cm程度の誤差で真の変位を検出している。

以上のように、2. に示した方法によれば、単独測位用GPS受信機を用いても、シミュレーションで得られた程度の精度で変位が計測される可能性が示された。

(2) 平均時間の検討

ここでは、1時間毎に平均した相対座標計測結果を用いてシミュレーションを行った。一方、平均をとる時間を長くすると相対座標計測結果のばらつき

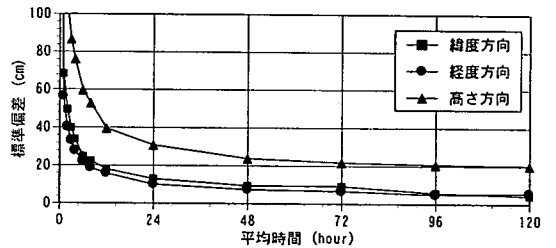


図-7 平均時間に対する相対座標計測結果の標準偏差

が小さくなり、計測精度が向上する可能性がある。

図-7に相対座標計測結果の平均をとる時間に対する標準偏差を示す。図から、平均時間を長くすると標準偏差が小さくなり、24時間以降においてほぼ収束していることがわかる。図-8に、一例として、図-1(a)の計測結果を24時間毎に平均して得られた相対座標計測結果(緯度方向)を示す。図から、図-3(a)の相対座標計測結果に比べてばらつきは大幅に小さくなっている。この結果の標準偏差は12.9cmであり、平均時間1時間の相対座標計測結果の標準偏差に比べ1/4以下となっている。

平均時間1時間のシミュレーション結果と比較

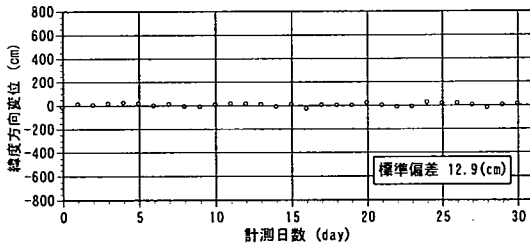
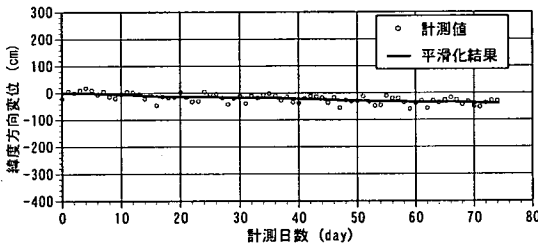
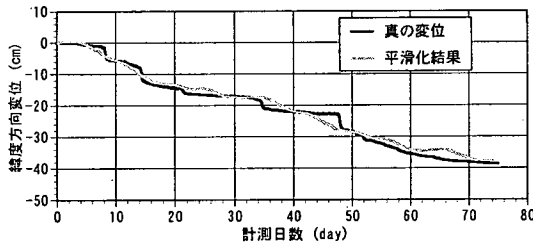


図-8 相対座標計測結果 (平均時間24時間)



(a) 模擬計測結果および平滑化結果



(b) 真の変位および平滑化結果

図-9 シミュレーション結果3

する目的で、平均時間24時間の相対座標計測結果によるシミュレーションを図-6(a)の変位を用いて行った。図-9(a)に、模擬計測結果とトレンドモデルを適用して得られた平滑化結果を示す。また、平滑化結果と真の変位の比較を図-9(b)に示す。図-9(b)から、平均時間24時間の結果を用いた場合も平均時間1時間の結果(図-6(c))とほぼ同じになった。このことから、平均する時間が1時間であっても24時間平均と同等の結果が得られることがわかる。

4. むすび

本研究では、単独測位用GPS受信機を用いて地盤変位計測手法を行うための方法を提案し、実測結果を用いたシミュレーションによってその妥当性を検証した。通常の単独測位用GPS受信機を直接利用した場合、精度が15m程度であるが、本手法

の手順、すなわち、

- (1) 基準点および計測点において同じGPS衛星で単独測位を行う、
- (2) 相対座標を求める、
- (3) その結果について1時間毎に平均する、
- (4) さらに、トレンドモデルを適用して平滑化する、

ことで、数cm内の誤差で変位計測が可能となることが示された。

ただし、複雑な変位挙動を用いたシミュレーションにおいて、急激な変位の変化に対する平滑化結果の追随性が悪い結果となった。これは、計測値のばらつきが変位量に比べ大きかったことが原因と思われる。今後、計測値のばらつきを抑える方法を検討することが課題である。

参考文献

- 1) 日本測地学会編：新訂版GPS、日本測量協会、1989。
- 2) Blodgett, J. C. : Monitoring land subsidence in Sacramento valley, California, using GPS. J. Surv. Eng., Vol.112, No.2, pp.112-130, 1990。
- 3) 福岡浩, 江崎豊充, 児玉信之: GPS測量による地すべり移動観測, 土と基礎, Vol.45, No.6, pp.29-31, 1997。
- 4) Gili, J. A., Corominas, J. and Rius, j. : Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring, Eng. Geol., Vol.55, No.3, pp.167-192, 2000。
- 5) 櫻井春輔, 清水則一, 古谷茂也, 血海章雄: GPSによる切り取り斜面の変位測定, 土木学会論文集, No.475/III-24, pp.137-142, 1993。
- 6) 近藤仁志, M. E. 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/IV-32, pp.157-168, 1996。
- 7) 清水則一, 小野浩, 近藤仁志, 水田義明: 長大残壁の安全監視へのGPS変位計測システムの応用に関する現場実験, 資源・素材学会誌, Vol.112, No.5, pp.283-288, 1996。
- 8) 清水則一, 小山修治, 小野浩, 宮下耕一, 近藤仁志, 水田義明: GPS変位モニタリングシステムの連続観測による安定性の検証と計測結果の処理方法の提案, 資源・素材学会誌, Vol.113, No.7, pp.549-554, 1997。
- 9) 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, Vol.113, No.6, pp.9-14, 1998。
- 10) 清水則一, 安立寛, 荒井正, 会津隆士: 地すべり監視におけるGPS変位モニタリングシステムの適用, 地盤工学会誌, Vol.48, No.2, pp.25-27, 2000。
- 11) 松田浩明, 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と変位挙動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。
- 12) 松田浩明, 清水則一, 工藤洋三: SA解除後のパソコンGPSの測位精度に関する研究, 土木学会論文集, No.693/VI-53, pp.245-249, 2001。
- 13) 北川源四郎: 時系列解析プログラミング, 岩波書店, pp.245-263, 1996。

(2002.10.28 受付)

APPLICABILITY OF SINGLE POSITIONING GPS RECEIVER TO DISPLACEMENT MEASUREMENTS

Hiroaki MATSUDA, Norikazu SHIMIZU and Yozo KUDO

The conventional single positioning method of GPS is generally not enough accurate for precise surveying. The authors have developed a method for measuring relative coordinates between two measurement points with better accuracy than the conventional one for the single positioning method.

In this paper, a new procedure of displacement measurements using the single positioning method is proposed. The trend model is applied to the previous method for smoothing the scattered measurement results. In order to verify the proposed procedure, numerical simulations with using measurement results are demonstrated for landslide displacement measurements.