

GPS による斜面変位計測システムと計測精度の向上について

A DISPLACEMENT MONITORING SYSTEM USING GLOBAL POSITIONING SYSTEM AND IMPORVEMNT OF THE MEASUREMENT ACCURACY

○秋山晋八*, 清水則一**, 岩崎智治***, 武石朗****, 増成友宏*****
Shinya AKIYAMA, Norikazu SHIMIZU, Tomoharu IWASAKI, Akira TAKEISHI and Tomohiro MASUNARI

A new type of displacement monitoring system using GPS has been developed by the authors. It can simultaneously measure the three-dimensional displacements of many points over an extensive area and display the results on a monitor screen in real time. The trend model, which is a data processing method, is adopted to improve the accuracy of the measurement results. Our system can provide highly accurate and precise measurement results compared with conventional GPS receivers. Practical applications to large open quarries, landslide slopes, and cut slopes for road construction have proven that the system is useful for monitoring the displacement of slopes. In this paper, further improvement of the measurement accuracy is discussed.

Key Words: displacement measurements, GPS, improvement of the accuracy, monitoring of slope stability

1. はじめに

筆者らは、長大斜面の安全監視を目的として、GPS¹⁾による斜面変位計測システムを開発し²⁾⁴⁾、これまでに露天掘り鉱山斜面や地すべり地に適用してきた。さらに、適応フィルタリング⁵⁾やトレンドモデルによる平滑化処理が適用し、高精度長期連続3次元変位計測に成功している⁶⁾⁷⁾。

斜面を計測する場合、事前に現場踏査を行い、観測条件の良い場所を選定する必要がある。しかし、上空が開け、観測条件の良い現場は多くはない。周りに障害物があると、マルチパス等の影響から計測値に誤差が生じ、精度良い計測は困難となる⁸⁾。今後は更なるGPS変位計測システムの高精度化が必要である。

本研究では、ある現場の計測点上空に障害物等が存在する場合について、GPSによる斜面変位計測システムの計測精度向上を目的とした解析段階での適切な処理法を検討する。

2. GPSによる変位計測システム³⁾⁴⁾⁸⁾

本章では、筆者らが用いているGPSによる斜面変位計測システムについて示す。本システムは、地盤の変位速度や現場の適応性により表-1に示す3種類のシステムに大別できる。

(1) システム 1

システム1は、①アンテナと受信機、②中継・通信器、③解析・表示部の3つの要素から構成される。つまり、図-1に示すように、アンテナと受信機を基準点および計測点に設置し、それらを信号ケーブルによって中継機と通信インターフェイスに接続し、さらに管理センターに設置した解析と表示用のパーソナルコンピュータに接続する。電源はケーブルによって供給され、人工衛星から受信した信号とデータはケーブルを通してコンピュータに送られ、設定した時間間隔で解析し、結果は直ちに表示される。この間すべて自動処理さ

*	学生会員	山口大学 大学院 理工学研究科
**	正会員 博士(工学)	山口大学 工学部 社会建設工学科
***	正会員 修士(工学)	国際航業(株)
****	正会員	国際航業(株)
*****	正会員	古野電気(株)

される。計測はRTK (Real Time Kinematic) 測位法を用い、スタティック測位法と比べ精度は若干劣るが、リアルタイム性に優れるため速度変位の速い斜面崩壊に向いているシステムである。

(2) システム 2

システム2は、基準点と各計測点にアンテナと受信機をそれぞれ設置し、電源はバッテリー等によって供給する。人工衛星から受信した信号とデータは受信機内のメモリ、またはメモリカードなどの記録媒体に一旦保存し、それらをコンピュータにダウンロードして、スタティック測位法で解析し変位を得る。受信データのダウンロードは、直接受信機とパーソナルコンピュータをRS-232Cで接続する。変位計測の遅いすべり・概成確認向きで、リアルタイム性には乏しいが、精度が良く、購入コストや設置手間では有利なシステムである。

(3) システム 3

システム3は、システム2と同様にスタティック測位法を用い、変位速度はあまり早くないが毎日計測したい場合に用いるシステムである。電源は商用電源を使用し、システム1に比べて、精度は良いがリアルタイム性がやや劣る。インターネットや携帯電話で、計測結果をリアルタイムに知ることが出来るうえ、公衆回線を通じ、データ回収方法や観測スケジュールの変更等の制御が容易に行える⁸⁾。

表-1 GPS計測システムの概要

	システム1	システム2	システム3
計 測	広範囲にわたり斜面表面の三次元変位を多点同時に自動計測		
システム制御	オンライン自動制御(センサーケーブル)	オフライン自動制御	オンライン自動制御(公衆回線)
測位方法	RTK測位法	スタティック測位法	
リアルタイム性	○	×	△
観測時間	短い(数秒程度)	長い(1時間～数時間)	比較的長い(1時間～3時間)
使用受信機	MG0212型(MG3111型でも可)	MG2110型(MG3111型でも可)	MG3111型
電 源	AC100V(商用電源)	DC12V(カーバッテリー等)	AC100V(商用電源)
データ回収	センサーケーブルによる自動回収	PCによる現地回収(手回収)	公衆回線による自動回収
データ解析	自動	手動	自動
計測結果の表示	専用PC上で自動表示	専用ソフトで手動表示	インターネットで結果配信
参考図	図-1	図-2、図-3	図-3、図-4

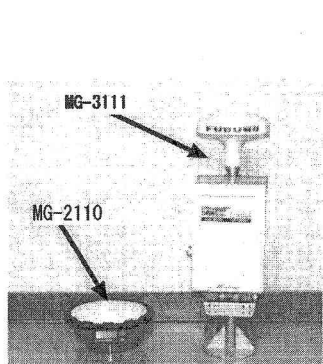
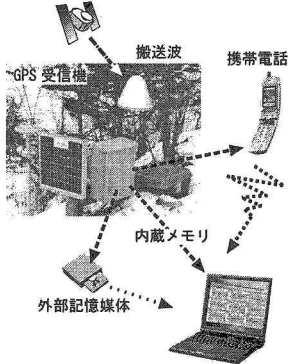
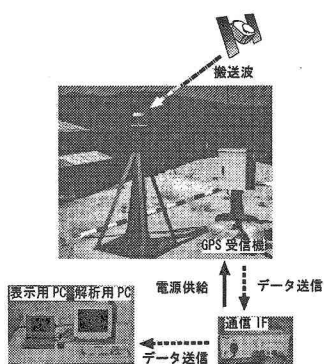


図-1 オンラインシステム

図-2 オフラインシステム

図-3 斜面変位計測用 GPS 受信機⁸⁾

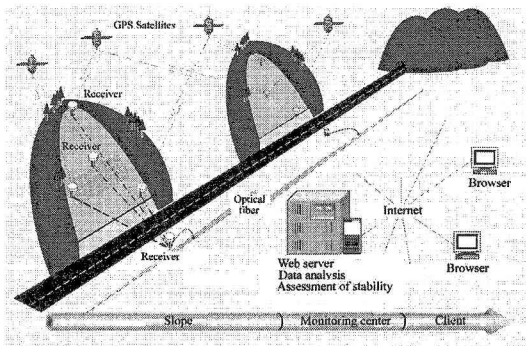


図-4 道路管理用計測システム⁸⁾

3.トレンドモデルによる計測結果の処理

GPSの一般的な測量精度は水平方向に対して、 $5\sim 10\text{mm} + 1\text{ppm} \times \text{基線長}$ 、上下方向に対して $10\sim 20\text{mm} + 2\text{ppm} \times \text{基線長}$ とされている⁹⁾。しかしながら、斜面の安全監視を目的とした変位計測に適用する場合、より高い精度で計測できることが必要である。

これまでに、筆者らが提案するデータ処理法⁹⁾を適用すれば、GPS 変位計測システムの計測結果は、真の変位挙動に不規則ノイズが加わった1つの時系列データのとして得られることが示されている⁹⁾。一般の時系列データに対しては数々の解析手法があり¹⁰⁾、斜面の変位挙動に追従できる適切な平滑化手法を選べば、真の変位挙動のよりよい推定が可能となる。

適用する平滑化手法について要求される事項は、1) 長期にわたる計測結果に適用できること、2) 計測誤差などの偶然の変動に影響されにくいこと、3) シンプルで現場においても適用性が高いこと、などである。長期的な計測結果に適用される最も簡単なモデルとしては、多項式回帰モデルが知られている。ところが、多項式回帰モデルは真の挙動が実際に多項式に従う場合にはよい推定値を与えるが、そうでない場合には挙動の変化をうまく捉えられないことや、計測データに追従しすぎて偶然の変動を拾うという欠点がある。

そこで、筆者らは時間方向に連続的に計測した変位に対して、平滑化手法のひとつであるトレンドモデル¹⁰⁾を適用することを提案した⁹⁾。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ステム方程式とし、観測方程式と連立させるものである。

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

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

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。

式(1)において、 $v_n=0$ の場合、すなわち、 $\Delta^k u_n=0$ は、 $k-1$ 次多項式を解にもつ確定的な通常の差分方程式となり、よく知られている多項式回帰モデルの式と一致する。つまり、トレンドモデルとは、多項式回帰モデルの差分方程式のかわりに、 u_n の k 階差分がほぼ0となるように仮定し、平滑化のモデルと真の変位挙動の間に確率的な誤差（システムノイズ）を設定したものといえる。

式(1)および式(2)で表したトレンドモデルにおいては、確率差分方程式の階数 k （モデル次数）、計測誤差を表すパラメータ σ^2 （観測ノイズの分散）、モデル誤差を表すパラメータ τ^2 （システムノイズの分散）が未知である。ここでは、トレンドモデルにカルマンフィルタのアルゴリズムを適用して計測変位の平滑化を行い、さらに、観測ノイズおよびシステムノイズの分散値（ σ^2 および τ^2 ）は、それらの尤度が最大となるように推定する。また、モデル次数 k はAIC（赤池情報量基準）が最小となるように推定する¹⁰⁾。

この方法によって、突発性変位やクリープ変位など様々なパターンの変位の平滑化と、真の値の推定が精度良く行われることが示された⁹⁾。また、図-5は人為的にアンテナに変位を与えて、それをGPSによって計測し、さらにトレンドモデルによる平滑化を適用した結果である。平滑化によって与えられた変位を、1mm内の差で計測できることが示された（表-2 参照）。

表-2 トrendモデルによる精度実証実験結果⁹⁾

与えた変位 (mm)	平滑化結果 (mm)	差 平滑化結果-GPS (mm)
9.6	8.7	0.9
7.4	8.3	0.9
5.6	4.8	0.8
4.3	5.1	0.8
3.3	3.0	0.3
2.5	2.6	0.1
2.0	1.9	0.1

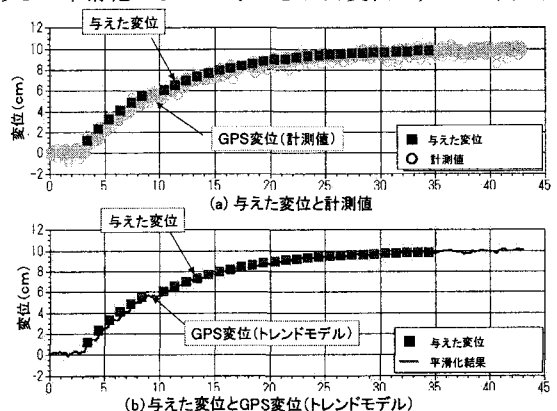


図-5 トrendモデルによる精度実証実験⁹⁾

4. 計測精度の向上について

GPS による斜面変位計測システムは、これまで多くの現場に適用し、高精度に長期間安定して自動連続計測が可能であるなど、その実用性および現場適用性の確認を行ってきた¹⁾。さらに、計測結果の後処理として、前述のトレンドモデルによる平滑化を行うことで、mm 単位の計測が行えることが示されている⁷⁾。しかしながら、GPS 受信機が設置してある計測点が必ずしも良好な観測条件であるとは限らない。

そこで、本章では観測条件の問題に着目し、障害物の影響を考慮した適切な解析処理法について検討を行う。これにより、解析段階において障害物を考慮した処理を行うことが可能になれば、GPS による変位計測の適用範囲は広がる。

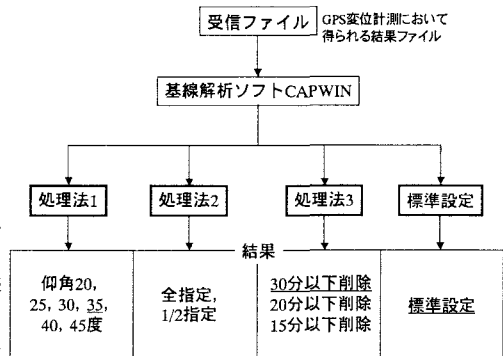


図-6 検討フロー図

(1) 検討項目

検討を行ったフロー図を図-6に示す。ここで、図-6にある標準設定とは、通常の設定における解析処理を指す。ある地すべり斜面における計測点1および計測点3の6月の計測結果に対して、3つの方法を用いて検討を行った。処理法1は、仰角マスクを任意設定することで、低仰角にある衛星を削除する方法である。処理法2および処理法3は、受信状態の悪い衛星データを解析計算に用いないようにすることで精度を向上させるものであり、処理法2は衛星軌道情報から、視覚的に障害物に遮られている衛星を確認し、その衛星を解析計算に使用しないように禁止衛星として指定して、解析を行う方法であり、処理法3は1時間のデータから合計の受信記録が短いものを定量的な判断により削除し、削除後のデータにより解析を行う方法である。そこで、今回の検討では、60分毎の衛星受信データのうち、連続受信記録が全体(60分)の15分以下、20分以下、30分以下の場合、そのデータを削除して解析を行う。連続受信記録の定義図を図-7に示す。また、各計測点の上空写真を図-8に示す。

以上の3項目において同様のデータを用いて解析を行い結果に対して、標準偏差、解析に用いた全データ数に対する解を得たデータ数の割合、平均衛星観測数の3つのパラメータを求めた。なお、ここでの平均衛星観測数とは、60分中に衛星からデータを取得した回数を1ヶ月の日数で平均したものと定義する。受信データ解析はCAPWIN(古野電気株)を用いる。計測結果については、図-6のアンダーラインに示された項目に対して検討する。

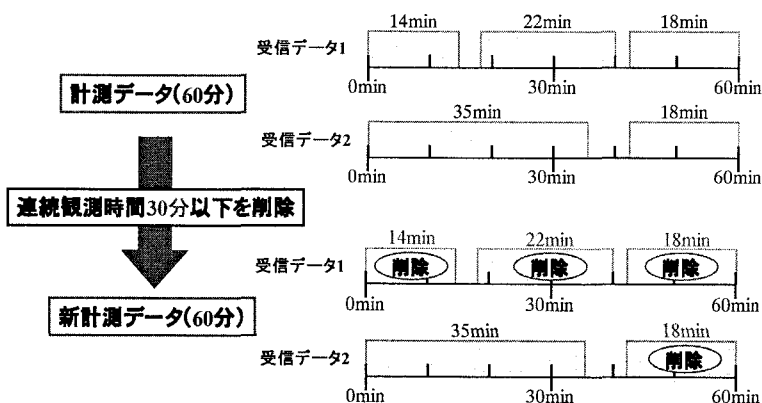
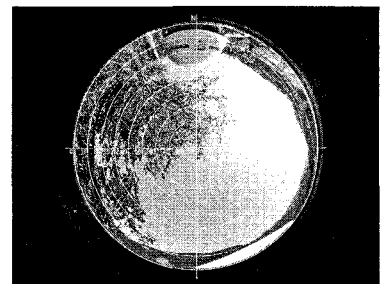
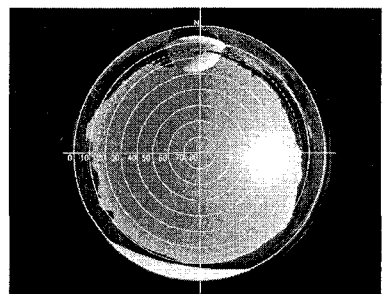


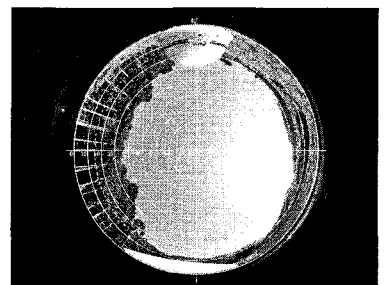
図-7 連続受信記録の定義 (例: 連続受信時間30分以下を削除)



(a) 計測点1

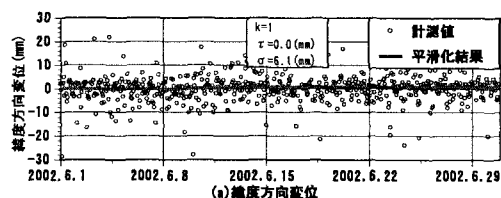


(b) 計測点2

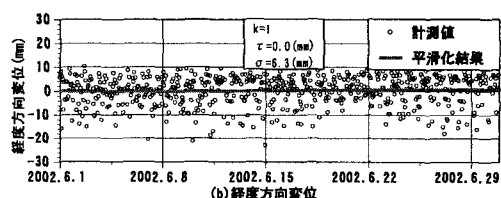


(c) 計測点3

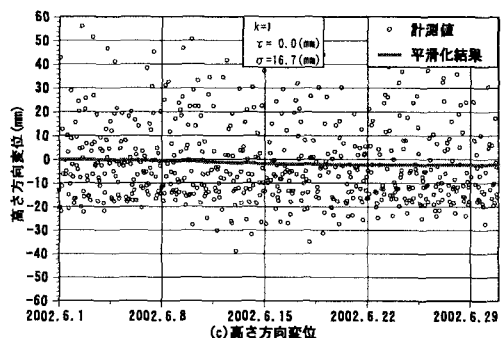
図-8 各計測点の上空写真



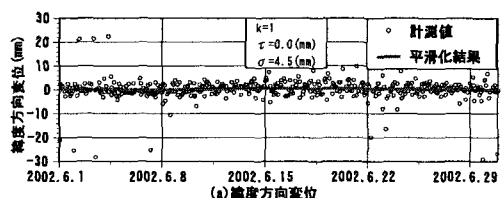
(i) 従来処理



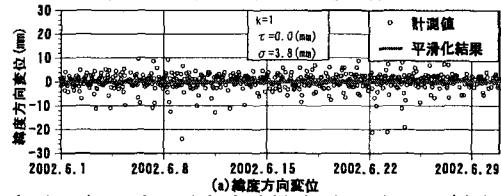
(i) 従来処理



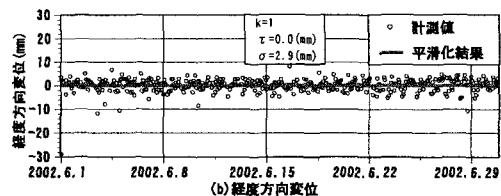
(i) 従来処理



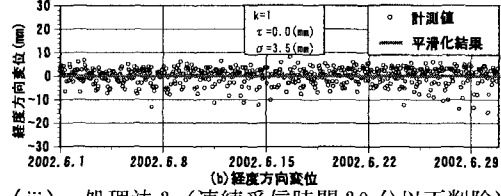
(a) 緯度方向変位



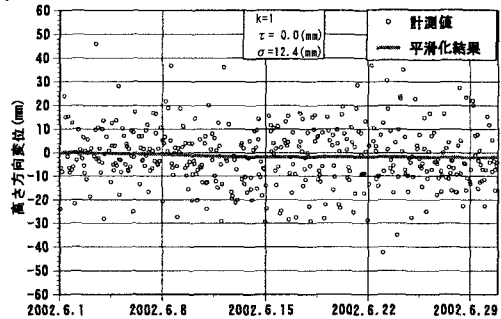
(a) 緯度方向変位



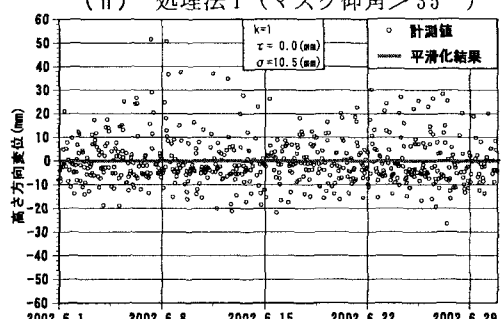
(b) 経度方向変位



(b) 経度方向変位



(c) 高さ方向変位



(c) 高さ方向変位

図-9 精度向上のためのデータ処理結果

(2) 検討結果

計測精度の向上を図った結果の1例を示す(図-9)。これは、計測点3に対して処理法1および処理法3を用いた結果である。図-9の(ii)は処理法1の仰角マスクを任意に設定する方法を用い、仰角を35度に設定した結果である。また、図-9の(iii)は、受信状態の悪い衛星ファイルを除去する項目において、処理法3を用い連続受信時間30分以下を削除した結果である。

検討項目に示したように、各項目3つのパラメータを求めた。本節では、検討パラメータの1つである標準偏差について述べることとする。

処理法1および3は、従来处理よりも、標準偏差が小さく、真の変位に対して計測値のばらつきが抑えられている事が確認できる。緯度方向および高さ方向に対しては、処理法1よりも処理法3を用いた方が標準偏差は小さいが、経度方向では、処理法3よりも処理法1を用いた方が標準偏差は小さくなっている。その上、標準偏差が従来处理と比べて半分以下に抑えられている事から、大きくばらつきが抑えられている結果となっている。これは計測点3の障害物が、経度方向に35度の付近まで達し(図-9)、仰角を35度に設定することで精度向上が図られたと考えられる。

以上のように、障害物がある環境においての観測を行う場合、観測条件に応じ、解析段階で何らかの処理を行うことで、精度を向上させることができる可能性が示された。今後は、他のパラメータや、仰角設定の角度などを詳細に検討する必要がある。

5. おわりに

上空に障害物がある場合の計測においては、解析段階において任意に適切な処理を行うことで精度を向上させることができる可能性を示した。処理法1においては、低仰角に分布する障害物において効果が期待できる。さらには、上空の障害物を確認し、的確に仰角設定を行うことで、より精度の高い計測が可能である事が示された。また、処理法3については、観測環境状態にかかわらず幅広い適用が可能であり、精度向上が期待できることが示された。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、山口大学卒業生の松田浩朗博士、野村貴司氏、佐藤泰史氏の協力を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本測地学会編：新訂版 GPS，日本測量協会，1989.
- 2) 櫻井春輔，清水則一，古谷茂也，皿海章雄：GPS による切取り斜面の変位測定，土木学会論文集，No.475/Ⅲ-24，pp.137-142，1993.
- 3) 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/Ⅵ-32，pp.157-168，1996.
- 4) 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，資源と素材，Vol.112，No.5，pp.283-288，1996.
- 5) 清水則一，江上知幸，中川浩二，桜井春輔：GPS による地盤変位計測結果の適応フィルタリングを用いた一評価法，No.487/Ⅲ-26，pp.275-278，1994.
- 6) 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，土と基礎，Vol.48，No.2，pp.25-27，2000.
- 7) 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.
- 8) 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システムの開発，土と基礎，vol.50，No.6(533)，pp.22-27，2002.
- 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，資源と素材，Vol.114，No.6，pp.397-402，1998.
- 10) 北川源四郎：時系列解析プログラミング，岩波書店，390 p，1993.
- 11) 松田浩朗，清水則一，吉富功，川畑一洋，千葉敏博，頼所幹宏：GPS による長大斜面の変位計測の精度について，資源・素材学会誌，Vol.119，No.6,7，pp.387-395，2003.7.