

GPS による斜面の変位計測結果と不連続面調査結果を用いた 安定評価法について

A METHOD FOR ASSESSING THE SLOPE STABILITY USING GPS DISPLACEMENT MEASUREMENT RESULTS TOGETHER WITH GEOMETRIC DATA OF DISCONTINUITIES

○松田浩朗*, 野村貴司**, 藤谷隆之***, 清水則一****

Hiroaki MATSUDA, Takashi NOMURA, Takayuki FUJITANI and Norikazu SHIMIZU

The GPS displacement monitoring system has been successfully developed by the authors and their colleague, and it is used for monitoring an open quarry, landslide slopes, and cut slopes. The system can measure three dimensional displacements continuously with high accuracy. This paper presents a method for assessing the slope stability using both GPS displacement measurement results and geometric data of discontinuities. The method aims to estimate a potential block of the wedge failure, and to predict the failure time. An experiment is shown to demonstrate the validity of the proposed method.

Key Words : slope stability, displacement measurements, discontinuities, GPS, prediction of slope failure

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⁾を変位計測に適用し、新しいGPS変位モニタリングシステムを開発している²⁾。そして、露天掘り鉱山斜面や地すべり地に適用し、高精度長期連続3次元変位計測に成功した³⁾⁴⁾。今後は、時間的な連続計測および3次元変位計測の特徴を生かした、斜面の安定評価法の開発が必要である。

岩盤斜面の安定性を検討する際、岩盤は節理や層理などの不連続面が存在し、岩盤崩壊はこの不連続面に支配される岩盤すべりの形態を取ることが多い。このため、岩盤斜面の安定評価において不連続面の幾何学情報は重要であり、従来からも不連続面調査結果からステレオネットを用いて安定性の評価が行われてきた。しかしながら、この調査結果は、変位計測結果などのモニタリング情報と必ずしも有効にリンクされていない。

一方、斜面のモニタリングは変位計測によって行われることが多いが、結果の利用については、主に時系列的な評価、すなわち、変位速度や変位の値を用いることによって行われているようである。

本研究では、GPSによって斜面上の3次元変位が時々刻々と得られる特徴を生かして、時系列的な評価と不連続面調査結果を取り入れた幾何学的な評価を連動させて、斜面の安定評価を行う方法を提案する。さらに、実測結果に基づくシミュレーション実験の結果を述べ、本方法の妥当性を検証する。本研究では岩盤すべりのうち、くさび型すべりについて検討する。

2. 安定評価手法

本章では、不連続面調査結果と計測された変位方向を用いて、すべりが生じている不連続面を推定する方法⁵⁾⁶⁾と、崩壊に至るような加速クリープ変位に対する崩壊時刻の予測手法⁷⁾をそれぞれ述べ、最後にそれらを結合する⁸⁾。

* 学生会員 修士(工学) 山口大学 大学院 理工学研究科

** 学生会員 山口大学 大学院 理工学研究科

*** 正会員 修士(工学) 日本技術開発㈱

**** 正会員 博士(工学) 山口大学教授 工学部 社会建設工学科

(1) 幾何学的手法^{7), 8)}

図-1は、(文献7)に示されているステレオネットを用いた安定評価の概要図である。くさび型すべりは、1)くさびの交差線の傾斜が不連続面の内部摩擦角より大きく、かつ2)くさびの交差線の傾斜角が斜面の傾斜より小さい、場合において発生する。つまり、すべり面に作用する滑動力がそれに対する抵抗力より大きいこと、すべり方向に自由面(斜面)が存在することが条件となる。図-1においては、斜面を表す大円より外側にあり、内部摩擦角を表す円より内側に存在する不連続面の組み合わせが、くさび型すべりが発生する可能性がある。

不連続面調査結果からすべての不連続面の組み合わせにおいて、すべりが発生する可能性のあるくさびの稜線方向を求める。図-1においては、不連続面を表す大円の交点が、くさび型すべりが発生した場合のすべり方向となる。GPS計測においては3次元変位が精度よく計測されるので、ステレオネット上に変位方向を表すベクトルを示すことができる。そこで、上に述べた不連続面の組み合わせの中で、計測結果から得られた変位方向と一致する不連続面の組み合わせに対して、くさび型すべりが発生していると考え、その不連続面を検出する。図-1においては、不連続面1、および不連続面3の組み合わせであるくさび1-3においてくさび型すべりが発生していると判断する。

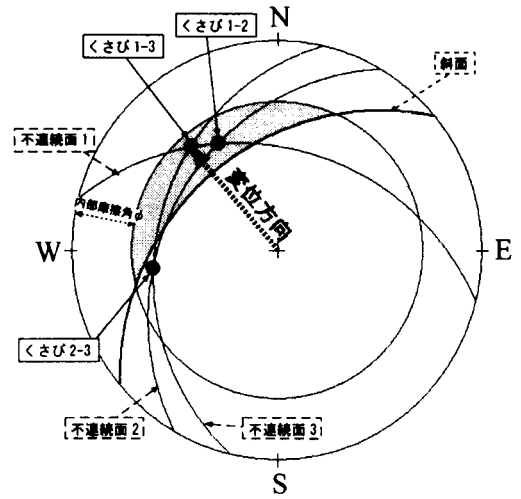


図-1 くさび型すべり

(2) 時系列的手法¹⁾

加速クリープ変位の模式的な経時変化図を図-2(a)に示す。斜面崩壊に至る加速クリープ変位は、崩壊時刻において変位は発散する。図-2(a)において、等変位間隔でデータを抽出し、図-2(b)のように t_{i-1} と t_i をプロットする。それらの点に最小二乗法を適用して得られた直線と $t_{i-1}=t_i$ を示す直線との交点が斜面崩壊の予測時刻となる。

(3) 提案手法

上に述べた不連続面の幾何学的な情報を用いる方法と、時系列手法による方法を組み合わせて、GPSによって時々刻々計測される3次元変位からすべりを生じているくさびブロックと、その挙動予測を行う⁹⁾。

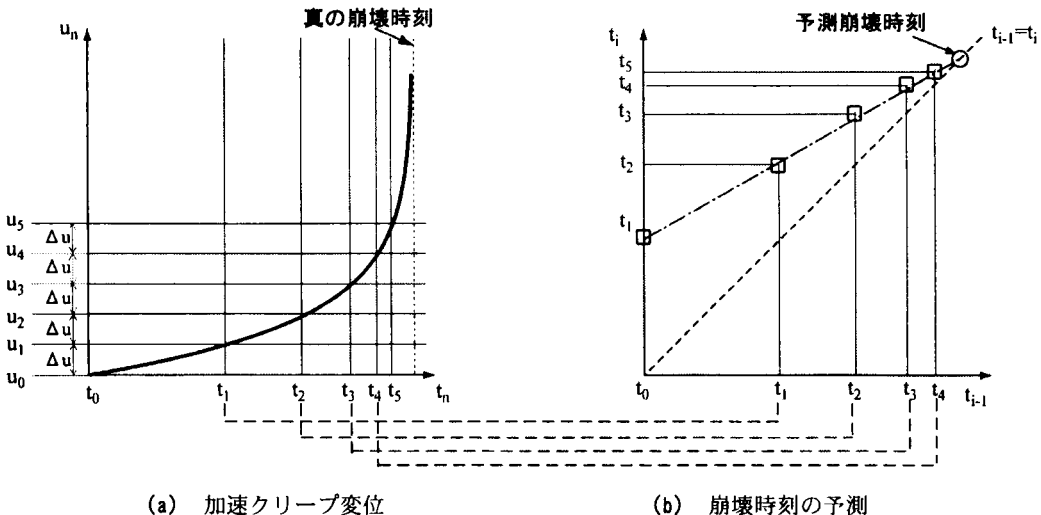


図-2 崩壊時刻の予測手法⁶⁾

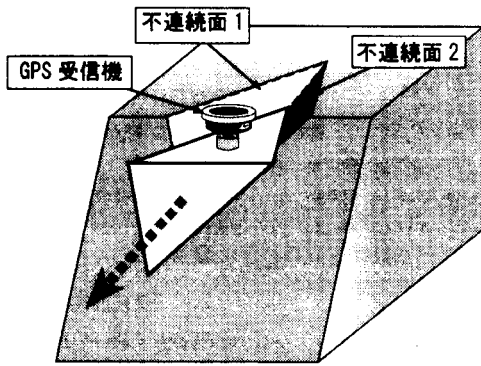


図-3 くさび型すべりを模擬したモデル斜面

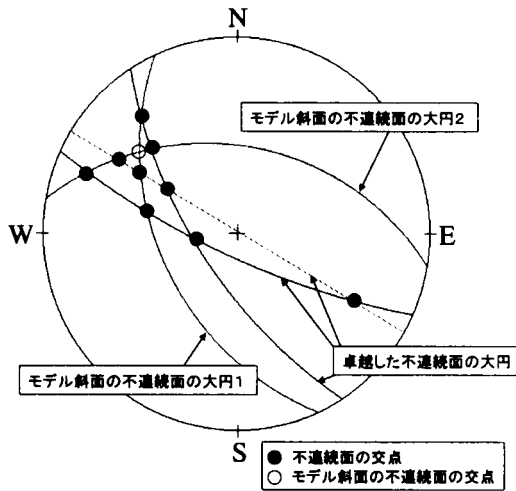
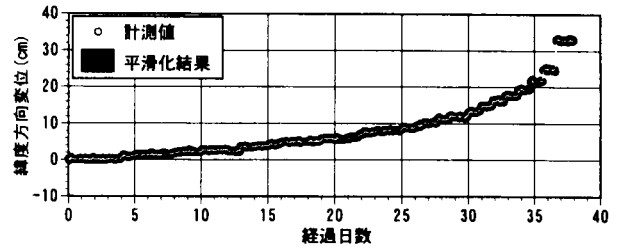
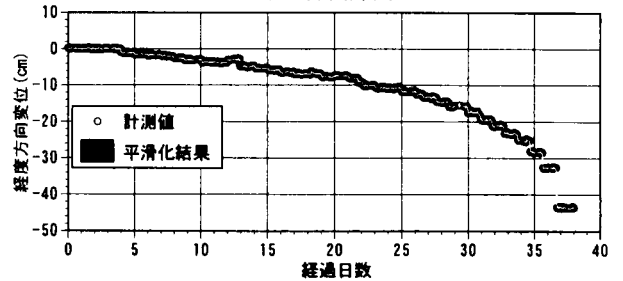


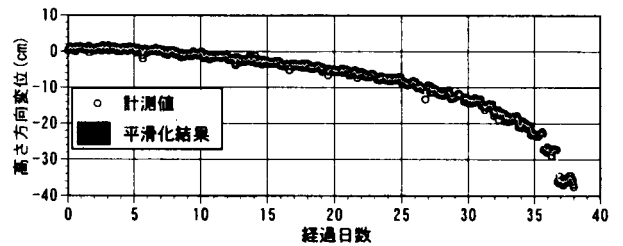
図-4 卓越した不連続面とモデル斜面の不連続面



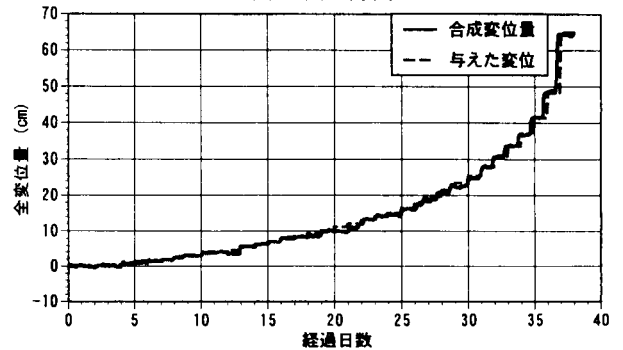
(a) 緯度方向



(b) 経度方向



(c) 高さ方向



(d) 全変位量

図-5 計測結果および平滑化結果

3. シミュレーション実験

図-3に示す、くさび型すべりを模擬したモデル斜面を用いて実験を行った⁹⁾。実験は、くさびブロックを模擬したブロックの上面にGPS受信機を設置し、このブロックにくさびの稜線に沿って移動変位を与えた。移動変位は、斜面崩壊の実測例¹⁰⁾を参考に1日1回くさびブロックに与え、GPSで計測を行った。この崩壊例から、本実験では計測開始後39~40日目に崩壊することになる。本研究では、ある鉱山斜面において行われた不連続面の調査結果から、その鉱山斜面において卓越した不連続面に併せて、本実験に用いた実験機の不連続面を用い、その中から、実験機の不連続面を検出することを試みる(図-4参照)。ここで、モデル斜面の不連続面およびくさびの稜線をクリノメータにより計測した結果、不連続面1の傾斜、および傾斜方位はそれぞれ、 57° 、および 245° 、不連続面2の傾斜、および傾斜方位はそれぞれ、 54° 、および 10° であり、このくさびの稜線は、傾斜、および傾斜方位が、 34° 、および 309° であった。本研究では、この値を真の値として用いる。

図-5に、本実験での計測結果、および計測結果に対するトレンドモデルによる平滑化結果⁹⁾を示す。図は上から、緯度方向、経度方向、高さ方向と、これらの平滑化結果から合成して得られた全変位量と与えた変位との比較である。図中、○印は計測値であり、実線(白抜き)は平滑化結果を示している。図から、移動変位を1日1回与えたため、計測値は階段状になっているものの、平滑化結果はうまく追従している。また、適用した移動変位に対して、ほぼ正確に計測されている。

この平滑化結果から求めた変位方向(傾斜、傾斜方位)を図-6に示す。図から、傾斜および傾斜方位とも、変位量が増加するに従い、ばらつきが小さくなり、真の値に近づいていくことがわかる。図-6の結果を計測1日毎に平均した結果を図-7に示す。図-7から、平均することによってばらつきが小さくなっており、計測15日目以降、傾斜および傾斜方位とも、 10° 未満の誤差で計測されている。さらに、計測25日目以降では、 2° 未満の誤差となっている。

次に、図-5(d)に対して、前述した崩壊時刻の予測を行った結果を図-8に示す。予測は計測15日目から1日毎に行っている。図から、計測20日目付近では大きくばらついているものの、計測25日目以降では、ほぼ真の崩壊時刻に収束している。この結果より、崩壊の約1週間前には、崩壊時刻が予測できている。

さらに、図-7の結果を用いて、すべりの生じている不連続面を推定するシミュレーションを行った結果を図-9に示す。図中+印は、計測された変位方向を1日毎にプロットしたものである。図から、変位量が大きくなるに従い、モデル斜面の不連続面の交点に近づいていくことが分かる。また、図-10に、変位方向計測値と崩壊時刻の予測値が収束した、計測25日目の変位方向の計測結果を用いたシミュレーション結果を示す。図から、モデル斜面の不連続面の組み合わせを、他の不連続面の組み合わせの中からほぼ捉えていることがわかる。

4. おわりに

本研究では、GPSによる3次元変位計測を活用し、不連続面調査結果に基づく幾何学的な斜面の安定評価手法を提案し、その妥当性を実験とシミュレーションにより検証した。さらに、時系列評価法⁹⁾を組み合わせ、加速クリープ変位に対する崩壊時刻の予測も可能であることを示した。

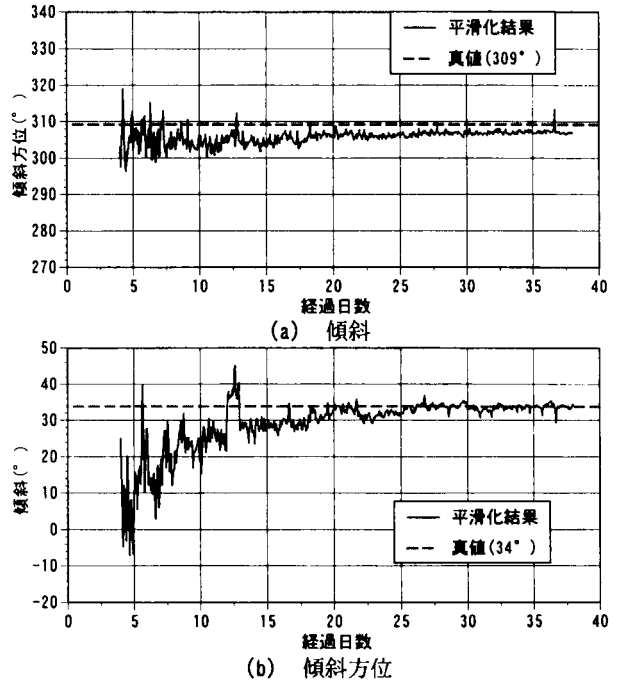


図-6 平滑化結果から算出した傾斜および傾斜方位

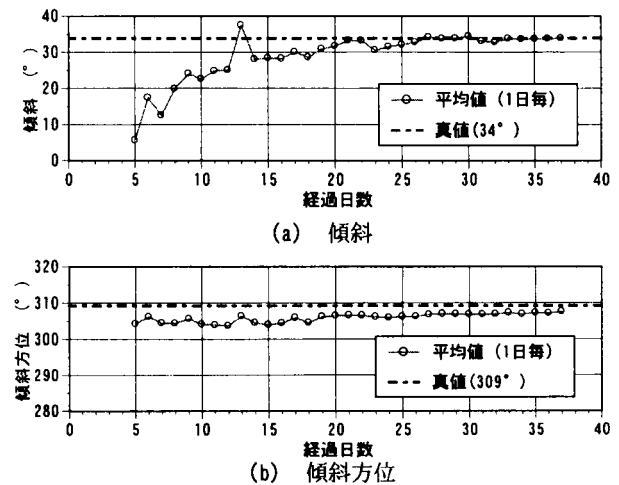


図-7 傾斜および傾斜方位の平均値(1日毎)

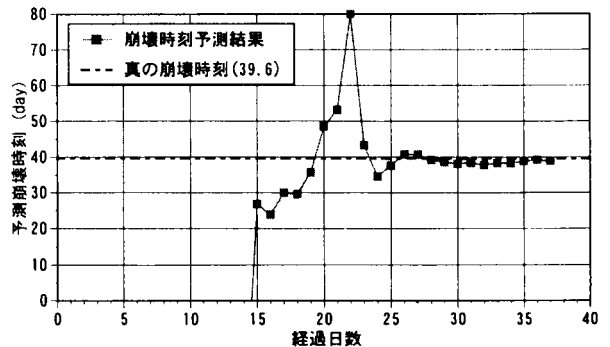
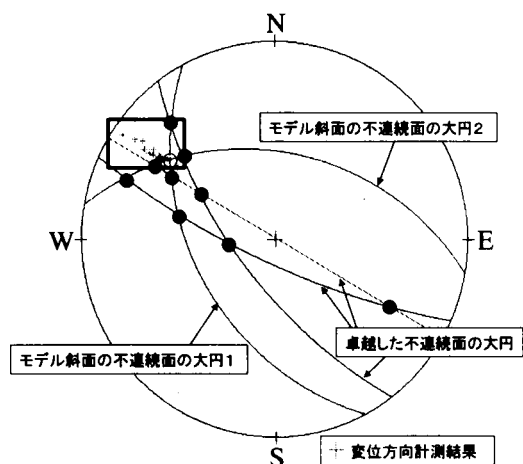
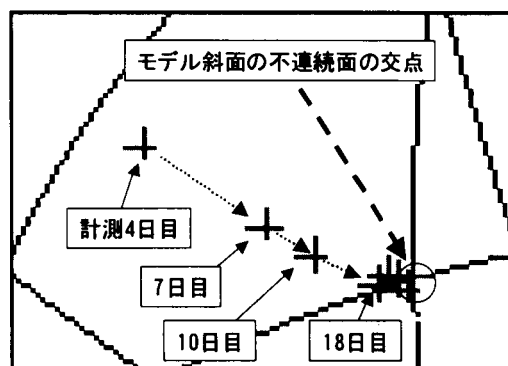


図-8 崩壊時刻の予測結果

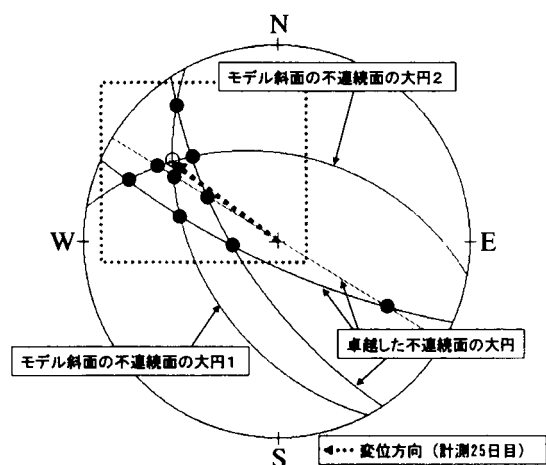


(a) 変位方向計測結果

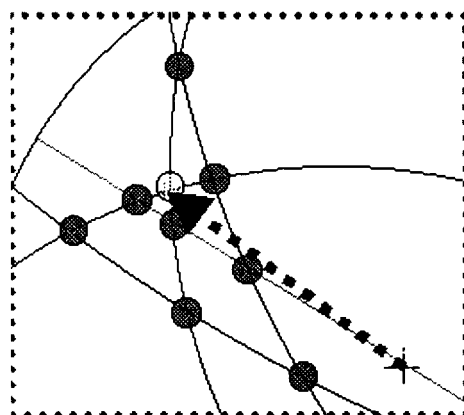


(b) (a)の拡大図

図-9 シミュレーション結果1



(a) 変位方向計測結果



(b) (a)の拡大図

図-10 シミュレーション結果2 (計測25日目)

本手法により、すべりが生じている不連続面の組み合わせを絞り込むことができ、さらに、崩壊に至る場合、その崩壊時刻を予測できる可能性が示された。

GPS変位計測システムによって、2～5年にわたり安定した3次元変位の連続計測を行っており^{11),12)}、今後はその特性を活用した斜面の安定評価法の開発が課題と考えている。

図-11は変位計測に基づいた斜面の安全監視法(DMA: Displacement Monitoring Approach)である^{13),14)}。この方法は3つの方法によって構成されている。1)時系列解析法:時々刻々得られる計測変位あるいは変位速度から将来の変位挙動を予測し、管理基準値と比較することで、安全監視をする。2)幾何学解析法:不連続面等の幾何学的なデータと変位計測結果から斜面の崩壊モード(すべり、くさび、トップリング破壊)やその位置と規模を推定することで安全監視をする。3)逆解析法:計測変位から強度定数などを逆解析によって求め、安全率の推移を求めることによって安全監視を行う。本報告は、DMAの枠組みの中で1)および2)を組み合わせた方法について述べた。

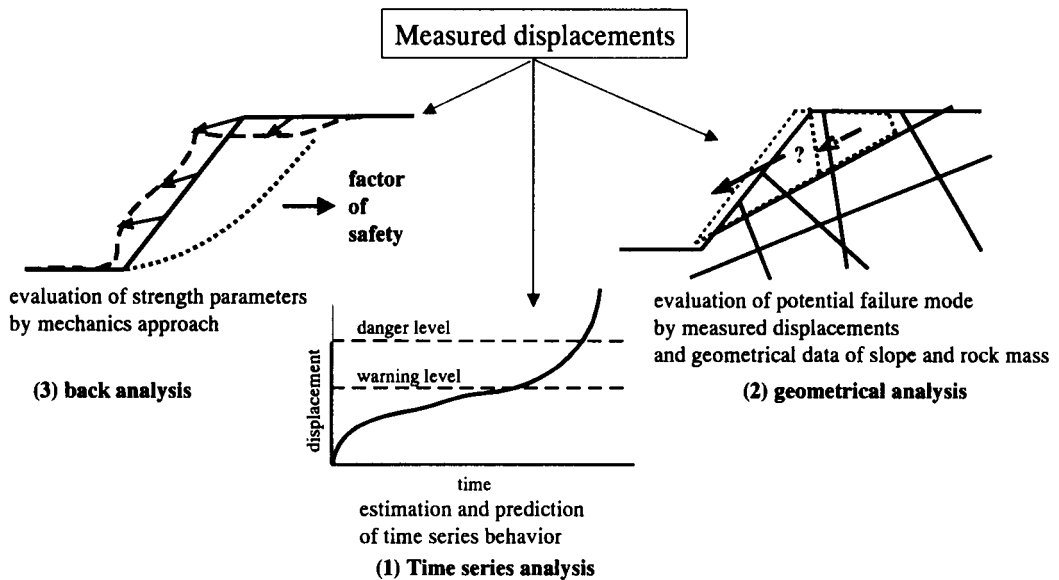


図-11 DMA：変位モニタリングアプローチ

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.
- 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，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.
- 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.
- 7) Hoek, E. and Bray, J. (小野寺透，吉中龍之進訳)：岩盤斜面工学，朝倉書店，1979.
- 8) 深光良介，松田浩朗，清水則一：不連続面調査と変位計測結果を用いた岩盤斜面の安定評価について，土木学会中国支部研究発表会発表概要集，pp.401-402，2000.6.
- 9) 清水則一，野村貴司，松田浩朗，藤谷隆之：GPSによる連続変位計測と不連続面調査結果を用いた斜面の安定評価法について，第57回土木学会年次学術講演会講演概要集，CD-ROM，pp.793-794，2002.9.
- 10) 土木学会：岩盤斜面の安定解析と計測，pp.161-166，1994.
- 11) 松田浩朗，西村好恵，清水則一，吉富功，今行忠：秋芳鉱山における残壁のGPSによる長期変位計測，第22回西日本岩盤工学シンポジウム論文集，pp.73-76，2001.7.
- 12) 秋山晋八，野村貴司，藤谷隆之，松田浩朗，清水則一，坂尾和男，鉄賀博巳，松永博則：GPSによる地すべり変位計測 ～山口県西津黄における連続観測 (その3)～，第57回土木学会年次学術講演会講演概要集，CD-ROM，pp.795-796，2002.9.
- 13) Shimizu N. : Displacement monitoring by using Global Positioning System for assessment of slopes, the 9th Int. Congress on Rock Mechanics, Paris, pp.1435-1438, 1999.8.
- 14) Shimizu N. and Matsuda H. : Practical applications of the Global Positioning System for the assessment of slope stability based on the Displacement monitoring Approach, ISRM Regional Symposium, KJ-Rock2002, pp. 57-70, 2002.7.