

Lecture

現場で役に立つ地すべり工学 第7回 Key points in field work for landslide engineers No.4

4. 監視と予測

Monitoring of landslide movement and forecasting of slope failure occurrence

土佐信一／国土防災技術株式会社

Shinichi TOSA／Japan Conservation Engineers & Co., Ltd.

キーワード：動態観測，地表伸縮計，GPS

Key words：field observation, extensometer, GPS

4.1 初期動態観測

4.1.1 動態観測の種類

地すべりの動態観測には，時と場所，目的に応じた様々な手法が用いられる。

以下，実務的に用いられている手法を主体に，地すべり発生直後に，とくに移動量を把握するための観測手法を挙げ，その概要と現場適用時の注意点について述べる。

4.1.2 地表伸縮計

クラックを挟む地表の2点間の伸縮量を計測するもので，単に伸縮計，あるいは地盤伸縮計とも呼ばれ，地すべり移動量観測の最も代表的な手法である。

クラックを挟んで観測対象地点の両端に杭を設置し，熱膨張性の低いインバー線を張って一端に計器を設置する。計器はインバー線の繰り出し機構を有し，繰り出し量を地すべりの移動量として記録する。

計器は，7日巻や30日巻のアナログチャート式が従来の主流で記録紙の読取分解能は0.2mmである。移動速度が2～4 mm/h以上になるとカム機構で電氣的に接点信号を出力する警報接点機能付きの計器もよく使われている。

近年はデジタル式計器の発達・普及がめざましく，記録期間の拡大（6ヶ月以上），分解能の向上（0.1mm），警報接点機能の高度化（任意の移動速度や複数段階化），オンライン自動計測化への対応などが図られている。

(1) 設置上の注意点

- ① インバー線の設置方向と地すべり移動方向を一致さ

せることが重要である（図4.1.2(a)）。

- ② 主滑落崖より上部にも後退性の引張亀裂が認められる場合，見逃しのないように伸縮計を設置する。
- ③ 地すべり地内のクラックをはさむと，地すべりブロック間の相対移動量が計測できる（同図(b)）。伸縮計だけで地すべり全体の絶対移動量を把握するには，頭部から連続配置とすることが必要がある（同図(c)）。
- ④ 移動方向が不明の場合，同図(d)のようにするとよい。

(2) インバー線の保護

インバー線は，雨風，動植物，人為ノイズを避けるため塩ビ管等で保護する。とくに回転灯やサイレンなど警報器と連動させる場合は誤動作防止のために重要である。

移動量が増大すると，塩ビ管のソケットが外れて突発ノイズや誤警報の原因となることも多い。添え木を当てるなど工夫の余地もあるが，活動が活発な地すべりでは補修を頻繁に行うのが肝要である。

また災害発生直後などは，落差の大きい滑落崖でインバー線が無保護の状態を設置せざるを得ない場合もあるが，強風であおられ誤動作することが多い。その他，イ

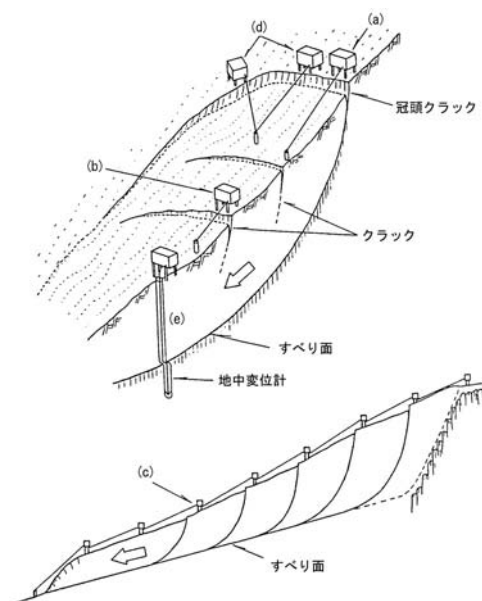
図4.1.1 地表伸縮計の設置方法¹⁾

表4.1.1 主な地すべり観測方法

対象	観測方法	孔内観測
移動量・変状	地表伸縮計，丁張，亀裂変位計，標柱観測，GPS，地盤傾斜計，監視カメラ	—
	孔内傾斜計，パイプ歪計，地中変位計，多層移動量計	○
水文・気象	地下水位計，間隙水圧計	○
	流量計	—
構造物	雨量計，積雪深計，温度計，日射量計，風向風速計	—
	土圧計，ひずみ計，鉄筋計，ロードセル（アンカー荷重計）	—

ンバー線が長くなると精度は低下するし、インバー線の方法変換に滑車を用いても感度が落ちる。計器の精度や分解能とのバランスから、インバー線は20m以内の直線とし、可能な限り全長を保護するのが望ましい。

積雪地域では雪対策も悩みの種である。伸縮計本体と保護管の両方に、雪の沈降力と、傾斜地では雪のクリープとグライドをあわせた斜面雪圧が作用する。豪雪地域では防水・排水を確保しつつ地中ないし半地中の埋設構造とするか、十分な強度で地上部を保護する必要がある。

(3) データの整理と活用

データは時系列図に整理し（図4.1.2参照）、雨量や地下水位と併記して、降雨、水位と移動状況との関係を調べ、滑動・停止の条件など地すべり運動の機構を検討する。

4.1.3 地中変位計

地表伸縮計が2点間の相対移動量を測るのに対し、地中変位計は地すべり移動土塊の絶対移動量を測ることができる（図4.1.1(e)）。

新規の地すべり発生直後に、初期動態観測として地中変位計を利用するケースは稀であろうが、活動が活発で小ブロック化の進行が著しいとき、地表伸縮計では亀裂の見逃しリスク（挟み逃しリスク）があるのに対し、地中変位計はブロック内に配置するだけで見逃しなく絶対移動量を測ることができる。また長期的な視野からは、機構調査における各種調査孔のボーリング掘削・孔仕上げの段階で、地中ワイヤーを保孔管の外周に予め建て込んでおけば、孔内傾斜計やパイプ歪計がスケールオーバーになった後でも移動量が観測可能なメリットもある²⁾。

なお地中変位計の弱点として、地中ワイヤーの抜け上がりが生じると十分な精度が得られないことと、観測初期の感度が鈍いことが挙げられる³⁾。このため、地中ワイヤーの端部固定にはグラウチングや加圧アンカーなど確実な方法をとるとともに、保孔管はせん断破壊されやすい材質・構造とするなどの注意が必要である。またす

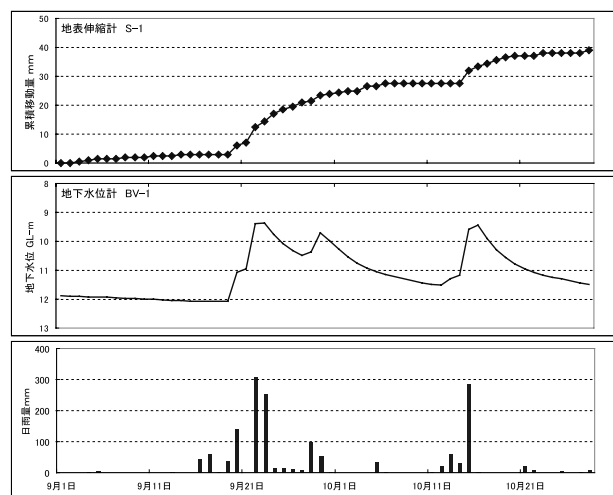


図4.1.2 結晶片岩地すべりの地表伸縮計解析図の例

べり面が2層ある場合にも検出できるように、測定孔は確実に不動岩盤まで掘りぬいてあることが重要である。

4.1.4 丁張（ちょうはり）

これもクラックをはさむ2点間の伸縮量を測る方法で、ぬき板ともいう。木杭や板材と大工道具だけで設置でき、特殊な測定器が要らない手軽さが最大の特徴である。

(1) 設置要領

- ① クラックを挟んで観測対象地点の両端に杭を設置する。横木固定の安定性を確実にするため、各々2本以上を用いる（図4.1.3(a)）。
- ② 横木を渡し、両端を釘などで固定する。
- ③ 横木の中央部を鋸で切断する。
- ④ 切断後、破断面の間隔を計測して初期値とする。

(2) 留意事項

- ・センサー等による自動計測はできないが、水平移動量と沈下量を測ることができる。
- ・段差が大きいときは、一方の横木に縦木を組み合わせるとよい（同図(b)右参照）。この場合、目盛り付きのスケールテープを縦横に貼っておくと、移動量が直読できる。

4.1.5 亀裂変位計

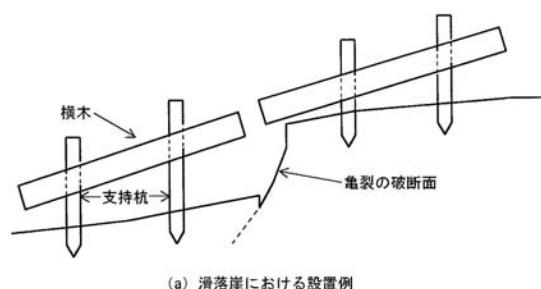
コンクリート構造物などに生じた亀裂の伸縮量を測る方法である。継目計、クラックゲージともいう。据付固定する測定ツールとして、縦横スケール付きの透明アクリル板を貼って直読できるようにしたもの（写真4.1.1）、バーニヤ目盛付きのロッドタイプ測定器、電気信号に変換できるセンサー型（歪変換器で±5 mm程度）なども活用されている。

(1) 設置要領

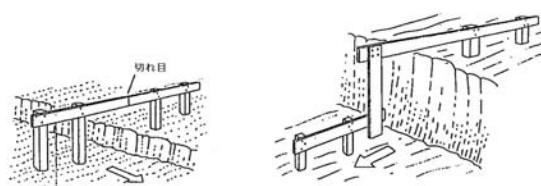
- ① 亀裂を挟んで構造物の両側に測量ピンを打ち込む。
- ② 定期的にピンの間隔をノギス等で計測する。

(2) データの整理

丁張や亀裂変位計のデータは、地表伸縮計と同様、時



(a) 滑落崖における設置例



(b) 側壁部における設置例

図4.1.3 丁張

間～移動量関係図に整理して利用する。

4.1.6 標柱測量

地すべり地内に設置した移動計測点（標柱）の移動量と方向を測量によって求めるもので、移動杭観測とも呼ばれる。

(1) 見通し測量

地すべり地外の不動地に設けた基準点から、格子状に配置した標柱を直線的に視準し、交点付近の標柱の移動方向と移動量を算出する方法である（図4.1.4）。

(2) 基準点測量

不動地の基準点をもとに標柱の座標を測量で求め、三角測量の原理で経時の移動量と移動方向を求めるものである。測量には高精度の光波測距測角儀（トータルステーション）を用いる。

(3) 精度

観測精度は測距儀の器械精度と距離に依存する。現在の1級トータルステーションの性能は、測角精度が0.5～1秒、測定可能距離 D と精度 e が、反射プリズムで $D \leq 4000\text{m}$, $e = \pm(2 + 2\text{ppm} \cdot D)\text{mm}$, 反射シートで $D \leq 500\text{m}$, $e = \pm(3 + 2\text{ppm} \cdot D)\text{mm}$, ノンプリズムで $D \leq 200\text{m}$, $e = \pm(5 + 10\text{ppm} \cdot D)\text{mm}$ 程度となっている。

したがって反射プリズム使用時の距離500mの測距精度はカタログ上は $\pm 3\text{mm}$ となるが、実際には測距儀～ターゲット間の温湿度差などの誤差要因が混入し、測角誤差も含めて実用精度はもう少し劣る。大気熱による誤差を除くため観測時間帯を日の出・日の入り前後の時間帯に限定するなどの制約もある。



写真4.1.1 亀裂変位の計測

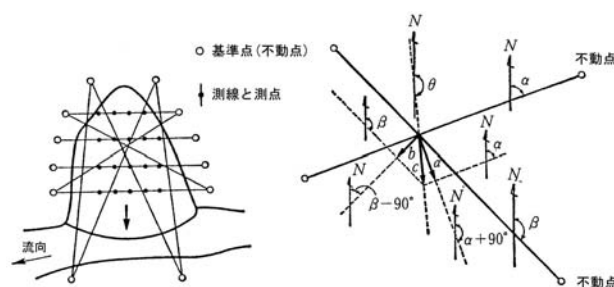


図4.1.4 見通し測量の概念¹⁾

(4) データの整理

移動量と方向をベクトルで平面図に記入し、ブロック区分の判断に活用する（図4.1.5）。観測が複数回にわたる場合、期間毎のベクトル連結で表すと、各観測期間ごとの移動状況の違いが明瞭になる。

(5) 災害時の応急監視への活用例

ノンプリズム型測距儀には、測定可能距離200mで精度 $\pm(3 + 2\text{ppm} \cdot D)\text{mm}$ 程度の性能を持つものがある。ノンプリズム時の精度はターゲットの反射率や平滑さによって大きく異なるが、コンクリート表面が視準できるなど条件が揃えば、災害直後で移動土塊内に立ち入りできないなど他に観測手段がないケースでも、移動量の監視に役立てられることがある。

4.1.7 GPS

移動量観測のためのGPS（Global Positioning System）が地すべり地に実用的に導入されて10年以上が経過し、現在、GPSはすでに中～大規模地すべりにおける移動量観測の一手法として定着しつつある。

基礎的な解説は入門書⁵⁾に譲り、ここでは地すべりフィールドすなわち山間地におけるGPSの観測精度向上のための注意点について述べる。

(1) GPSの精度

地すべり移動量観測に用いられるのは干渉測位で、不動地の基準点と地すべりブロック内の観測点とで同時受信した衛星電波データを用いて、観測点の三次元座標を計算で求める。公称精度は一般に

水平： $\pm(5\text{mm} + 1\text{ppm} \times \text{基線長})\text{mm}$

垂直： $\pm(10\text{mm} + 2\text{ppm} \times \text{基線長})\text{mm}$

と表される。単純計算すると基線長1000mの公称精度は水平方向 $\pm 6\text{mm}$ 、垂直方向 $\pm 12\text{mm}$ となるが、山間部では精度に不利な条件が多く注意が必要である。

(2) 精度確保のための留意事項

GPS受信機には経済的な1周波型と長大基線長向きの2周波型があるが、地すべりで多用される1周波型を前提に述べる。

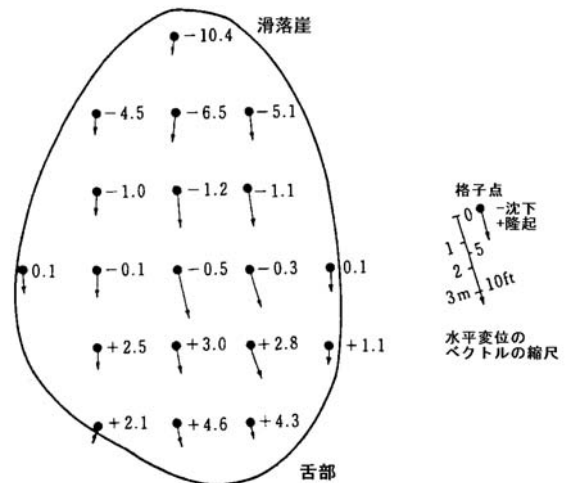


図4.1.5 変位ベクトル表示例¹⁾

- ① 上空視界・開空度の確保：衛星電波を同時多数に受信する必要があるため、衛星電波を遮蔽する樹木や建物が少ないほどよい。
- ② 基線長：精度の式どおり短いほどよい。2 km以内、できれば1 km程度が望ましい。
- ③ 基線長と観測点との標高差：対流圏遅延、とくに大気中の水蒸気量の影響を避けるためできるだけ小さく、100～200m以内に抑えるべきとの意見が多い。
- ④ マルチパスの回避：衛星電波がトタン屋根や人工構造物などに反射して受信機に入るものをマルチパスと呼び、精度劣化の一因である。
- ⑤ 時間帯の選定：衛星配置の偏りは精度を低下させる。RTK-GPS (Real-Time Kinematic GPS) 等による隔測型の人為観測の場合、衛星配置による精度低下率DOPが良好な時間帯に実施するよう、観測時間帯の計画が重要である。

上記のうち、①～④はすべて基準点や観測点の選定に関わる問題である。換言すれば、基準点・観測点の適地選定がGPS計測の精度を左右するとも言え、決定的に重要である。この必要条件が確保できない地すべり現場にはGPSを適用してはならないし、適用できない。

(3) データ整理

据置き型のGPS連続観測では、時間的に密な観測データが多く得られるが、地すべりが停止していても観測値に一定のバラツキがあるため判定に悩むことがある（図4.1.6）。なお同図ではセッション長（基線解析にかかるGPSデータの受信時間長さ）を大きくするとバラツキが



写真4.1.2 連続観測用GPSの設置例

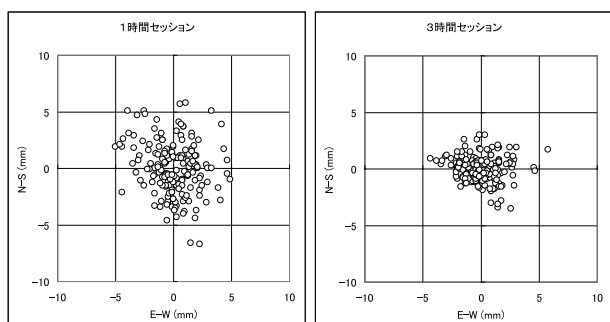


図4.1.6 GPS観測データの平面プロット例

小さくなる傾向もわかる。

ただし本来のGPS観測の目的は、地すべり移動の量と方向を求めることにある。図4.1.7は、地すべり移動量がバラツキの幅を十分に超え、活動状況が見事に水平移動ベクトル図に現れた例である。

(4) 統計処理

精度上の注意点を十分に考慮してもなお、水平 ± 5 mm、垂直 ± 10 mmのバラツキを大幅に改善するのは難しい。このように根源的なバラツキを持つGPS観測データに対して、統計処理で誤差を低減するアプローチがある。

図4.1.8は、ノイズを含んだGPS時系列データから統計モデルのパラメータ推定をする方法として、トレンドモデルと呼ばれる確率構造を持った状態空間モデルを用いて、ノイズを含む計測データから真の変位挙動を推定する手法を用いた例である⁷⁾。トレンドモデルの予測値は、概ね2 mmの精度を実現している。

地すべりの管理基準値は、1 mm以下の精度を有する地表伸縮計を前提とする場合が多く、GPSとは同列に扱えない問題があったが、トレンドモデルのように予測精度を向上させれば、既往調査種の管理基準値の運用に近づくことができる。

4.1.8 監視カメラ

現地の状況を遠隔地から画像イメージで把握するために、監視カメラが用いられる。mm単位の移動量センサー類に比べ、画像監視は解像度の限界があるため、微

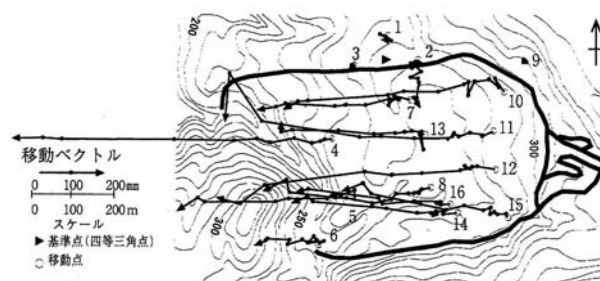


図4.1.7 椎泊地すべりのGPS水平移動ベクトル⁶⁾

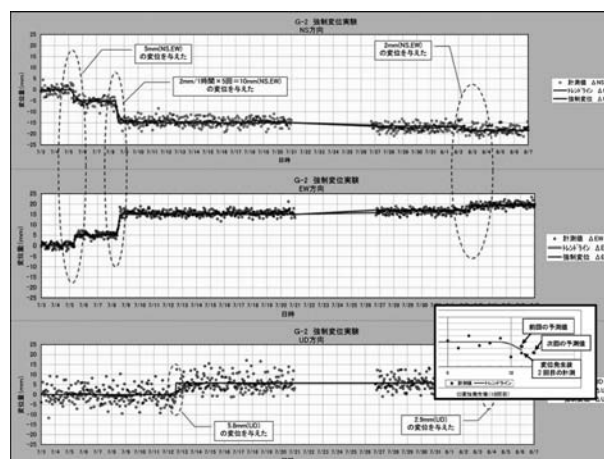


図4.1.8 統計処理（トレンドモデル）の例⁷⁾



写真4.1.3 Webカメラ設置例

小変動よりも大域把握に適し、地すべりではとくに末端崩壊や河道埋塞、湛水監視などに有効である。

画像は情報量が多いため、伝送には従来は同軸ケーブルが用いられたが、光ファイバケーブルの普及に伴い光アナログ伝送、コーデックなどを経て、近年はMPEGなど動画圧縮技術を活用したIP化が主流となりつつある。

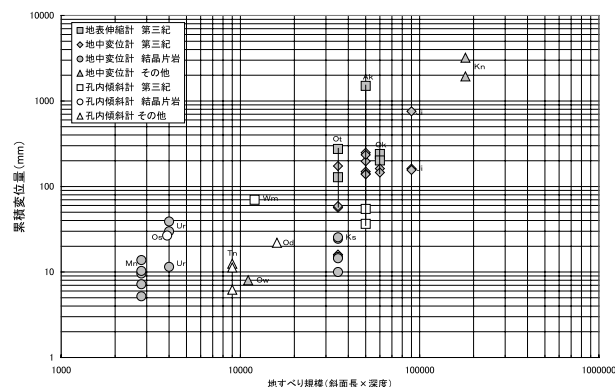
一方、既設光ファイバ伝送路が未整備の場合でも、インターネット回線を用いて画像伝送を行う方法がある。例えばNTTのISDN回線の人口カバー率は極めて高く、全国ほぼ全域で64kBPSのデジタル回線が利用できる。都市域で普及している超高速回線と比べればかなり低速だが、現地サイトに商用電源・ISDN回線・固定IPとWebカメラを組み合わせれば、容易に画像監視システムを構築できる。遠隔地サイトではWWWブラウザさえあれば監視でき、専用の受像設備が不要といったコスト低減のメリットもある。

4.1.9 観測方法による移動量の違い

同じ地すべりブロックの移動量が、頭部の引張領域にある地表伸縮計で大きく、中央部の地中変位計や圧縮領域の末端部で小さいことは通常よく目にする。また管理基準値の設定や崩壊予測式の運用例は、地表伸縮計に対するものこそ多いが、地中変位計・孔内傾斜計等での運用や、地表伸縮計データとの相関について報告されたものはほとんどない。

このため土佐⁸⁾は、地質別・地すべり規模別に、同じ地すべりで異なる観測方法による移動量が得られたデータを収集して比較検討を試みた。その結果、便宜的な指標として、地すべり斜面長とすべり面深度の積（概ね、地すべり断面積に相当）を「地すべり規模」と定義した場合、地すべり規模と累積変位量には正の相関が認められた（図4.1.9）。

また地表伸縮計に対する地中変位計の累積変動量の比は、Ok地すべりで $1/5 \sim 1/2$ （平均的には $1/3$ ）、Ok地すべりでは $1/2$ 程度となっている。また地中伸縮計に対する孔内傾斜計の、すべり面付近における累積変動

図4.1.9 地すべり規模と移動量の関係⁸⁾

量はAk地すべりでは $1/3 \sim 1/10$ 程度（平均的には $1/5$ ）となっており、相互の関係は

$$\text{地表伸縮計} \approx \text{地中伸縮計} \times (2 \sim 5)$$

$$\text{地中伸縮計} \approx \text{孔内傾斜計} \times (3 \sim 10)$$

と表され、地表伸縮計>地中伸縮計>孔内傾斜計、の大小関係があることがわかった。

このように同じ地すべりでも観測方法や、さらには場所の違いにより移動量が異なるため、管理基準や警戒避難体制の運用には注意が必要である。

4.1.10 動態観測結果の利用方法

最後に、上述した初期動態観測結果の利用方法を列挙して次号へ送る。

- ① 移動速度とクリーブ破壊式を利用した崩壊予測（次号、第8回）
- ② 移動量や移動速度による警戒避難基準の策定（第9回）
- ③ 自動観測によるモニタリングとソフト対策（第10回）

参考文献

- 1) 地すべり観測便覧編集委員会（1996）：地すべり観測便覧，（社）地すべり対策技術協会，pp.77-291
- 2) 松浦純生（1998）：地すべり対策施工跡地における維持・管理のための自動監視システム，地すべり学会関西支部機関誌らんどすらいどNo.14，pp.12-25
- 3) 川崎幸一郎（1998）：地中変位計によるすべり面検出不能の原因と対策，（社）地すべり対策技術協会，地すべり対策技術フォーラム'98講演集，pp.1-4
- 4) 建設省河川局（1997）：改訂新版建設省河川砂防技術基準（案）同解説 調査編，pp.213-214
- 5) 例えば土屋淳・辻宏道（2000）：新訂版やさしいGPS測量，日本測量協会
- 6) 中里裕臣（2002）：農業土木におけるGPS利用技術（その4）-GPSを用いた地すべり調査-，農業土木学会誌70(1)，pp.47-53
- 7) shamen-net研究会ホームページ（2006）：<http://www.shamen-net.org/>
- 8) 土佐信一・山見ゆかり・榎田充哉・三輪照光（2001）：地すべり管理基準値の設定手法について，第四十一回治山研究発表会論文集，pp.191-195
（原稿受付2006年6月15日，原稿受理2006年6月23日）