

CCDカメラ斜面監視システムの開発と その地すべり発生予測への適用性

鳥居 邦夫¹・宮木 康幸²・山川 優樹³・別所 正治⁴・佐藤 啓介⁵

¹正会員 工博 長岡技術科学大学 教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

²正会員 工博 長岡技術科学大学 助教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

³正会員 修(工) 長岡技術科学大学 助手 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

⁴正会員 修(工) 横河工事株式会社 (〒170-8452 東京都豊島区西巣鴨 4-14-5)

⁵学生会員 修(工) 長岡技術科学大学大学院工学研究科材料工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

本研究では、CCDカメラを用いた地すべり・斜面崩壊の監視システムの開発を行った。本システムは、監視対象斜面に設置したターゲットを CCD カメラで撮影し、得られたデジタル画像の解析処理によりターゲット位置を抽出し、写真測量の原理により座標値を求めるものである。直接的な斜面変位の計測による方法に比べ、比較的広い面積を統括的に監視できること、リアルタイムの状況把握が可能であること等の利点が挙げられる。

屋内模型実験ならびに実斜面における観測を行い、システムの信頼性を検証した。実斜面観測では、斜面変動の前兆現象から崩壊に至るまでの過程を捉えることに成功した。そこで、この観測結果を各種提案されている地すべり理論に適用し、本システムの地すべり・斜面崩壊の危険予測に対する適用性に関して検討を行った。

Key Words : landslide, slope failure, slope observation system, digital image analysis, photogrammetry, CCD camera

1. はじめに

道路や鉄道の沿線において、地すべりや斜面崩壊の危険を伴う区域の監視は、災害や事故を未然に防ぐ上で非常に重要である。現在、様々な斜面監視方法が提案され、実績を挙げているとともに、斜面崩壊の機構解明^{1),2),3)}や危険予測に関する研究^{4),5),6),7)}が盛んに行われている。斜面監視方法としては、標柱とレベル・セオドライド、伸縮計、地盤傾斜計などを用いた地盤変動計測^{8),9)}や、GPS を利用した移動量計測¹⁰⁾などの方法が提案され、実績を挙げている。しかし、こうした既存の監視方法は、監視設備設置の手間や維持・管理コスト、局所的観測に限られるなどの点で問題がある。

著者らは、こうした欠点を補う新たな斜面監視の方法として、CCD カメラ (Charge Coupled Device Camera) を用いた斜面監視システムの開発研究を行ってきた。本システムは、監視斜面に設置したターゲットを CCD カメラで撮影し、得られたデジタル画像に対して画像解析処理^{11),12),13)}を行い、画像内のターゲット位置を抽出し、写真測量の原理^{14),15)}によりターゲットの 3 次元座標値を求めるというものである。

インパル線などを用いた監視方法は、斜面上の標点の変位を直接的に計測するものである。これとは異なり、本システムでは観測対象斜面の全域にターゲットを設置し、これらを同時に観測するため、斜面の変動情報を一括して取得することが可能である。また、従来の方法では、斜面上に多くの観測機器を設置する必

要があるのに対し、本システムでは、人工ターゲットを設置する代わりに、斜面上の岩石や樹木といった自然物を代替ターゲットとして用いることもでき、観測機器の設置作業における危険を避けることができる。本システムの特長としては、無人での連続監視が可能であること、インパル線などを用いた斜面上の 2 点間の変位計測とは異なり、比較的広い面積を面的に監視できることなどが挙げられる。

本システムの開発にあたって特に、(1) 一般に市販されている CCD カメラ (或いはデジタルカメラ) とパーソナルコンピュータを使用し、安価な機材でシステムを構築できること、(2) 斜面への設置作業が容易で、機動性・適用性の高いシステムとすること、(3) 遠隔地での無人自動監視を可能とすることの 3 点を念頭に置いた。こうしたカメラ観測を応用した斜面の監視・点検システムに関する研究は、他の研究グループによっても行われている¹⁶⁾。本研究では更に、実斜面における観測データの分析を行い、本システムの崩壊時期の予測手法に対する適用可能性についても検証を行う。

本システムのプロトタイプは平成 7 年度に完成し、盛岡市の JR 山田線沿線において初めて実斜面への適用を行った^{17),18)}。平成 8 年度には糸魚川市の親不知斜面に¹⁹⁾、更に、平成 9 年度には上信越自動車道上越ジャンクション付近の切通し斜面に適用するなど²⁰⁾、ケース・スタディを重ねて本システムの適用性・信頼性の検証を行ってきた。本研究では、模型実験と実斜面の観測結果との比較によりシステムの精度や信頼性の検証

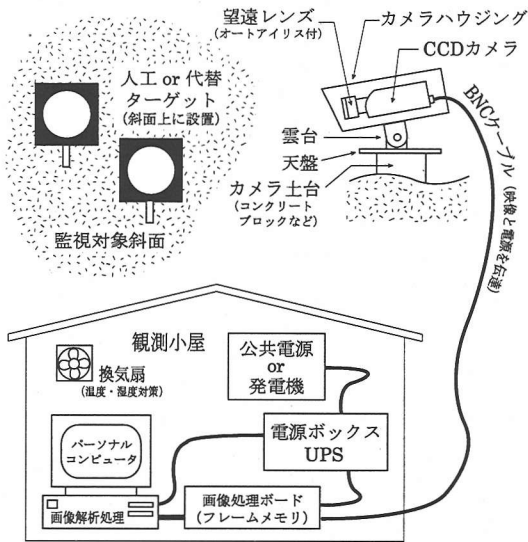


図-1 CCD カメラ斜面監視システムの概要図

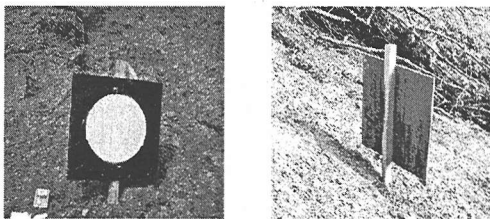


図-2 人工ターゲット (左図：表側，右図：裏側)

を行う。本システムを用いた実斜面の観測（新潟県新井市長沢地内の「よしお沢」，平成 12 年度に観測を実施）において，斜面変動を捉えることに成功したので，各種提案されている斜面変動の前兆現象を用いた地すべりや斜面崩壊の予測手法を適用し，本システムの事前予測への適用性について検討を行う。

2. CCD カメラ斜面監視システムの概要

(1) システムの構成

本システムは，監視斜面上の複数のターゲットを 2 台の CCD カメラで同時撮影し，得られたデジタル画像から画像解析処理^{(11),(12),(13)}により画像上のターゲット位置を抽出し，写真測量の原理^{(14),(15)}を適用してターゲットの 3 次元座標値を求め，地すべり斜面の変動を監視するものである。システムの概略図を 図-1 に示す。

斜面監視を行うに際しては，斜面が見渡せる 2 カ所の場所に CCD カメラを設置する必要がある。撮影された画像からターゲット座標を求めるため，カメラは風や交通振動などの影響を受けないよう安定した場所に設置するのが望ましい。また，ターゲットとしては，

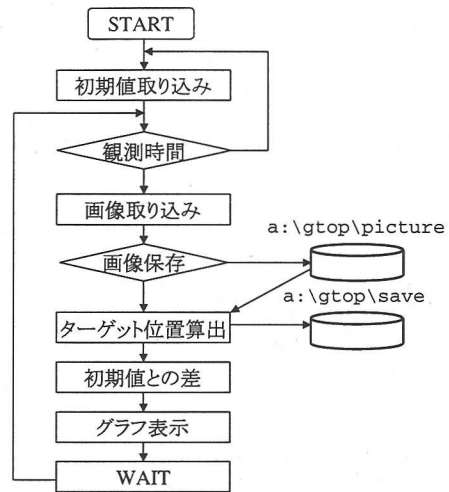


図-3 観測のフロー図

デジタル画像処理の際に自然斜面との識別が容易な物であればよく，人工ターゲットを斜面上に設置する方法と，斜面上の岩石や樹木といった自然物を代替ターゲットとして用いる方法⁽²¹⁾とがある。人工ターゲットとしては，画像解析によるターゲット位置の抽出が容易となるよう，図-2 のように黒地の板に白色の円を描いたものを用いることが多い。後者の代替ターゲットの方が，ターゲット設置作業の際の労力や危険を避けることができ，CCD カメラを設置するだけで済むという点で優れているが，ターゲット抽出のための画像処理が複雑になる⁽²¹⁾という短所がある。なお，ターゲットに蓄光材料を用いたり，電灯を内蔵して発光させる方法を用いれば，夜間計測も可能である。著者らの研究グループでは，屋内実験^{(22),(23)}によりこれらの良好な適用性を確認しているが，実斜面観測における適用性の検討は課題として残されている。また，日照や気象条件による観測データへの影響の考慮も必要であり，対策方法の開発と評価を現在行っている段階である⁽²⁴⁾。

カメラ 2 台を用いた 3 次元計測の適用性と精度⁽²⁵⁾については，著者らの研究グループで屋内実験⁽²⁶⁾と屋外観測^{(17),(18),(27)}により検証を行ってきた。本論文の第 3 章でも，屋内模型実験による 3 次元計測結果を述べる。しかしながら，実斜面でのシステム設置においては，カメラ 2 台の設置場所と撮影視野の確保が容易ではないケースも多い。そこで，カメラを 1 台のみとして簡易化した 2 次元計測システムについても，実斜面への適用と精度検証を行ってきた^{(20),(28)}。これらの研究実績をふまえて，本研究では特に，システム全体としての実斜面観測に対する適用性や信頼性の検証，ならびに観測により捉えられた前兆現象から，地すべり危険予測を行う方法を提案することを主たる目的とする。そのため，屋内模型実験では 3 次元計測を行ったが，実

表-1 システムに必要な機材

	品名	数量	材料・用途・備考
カ メ ラ 関 係	CCD カメラ	1 台	モノクロ 38 万画素, CCD 素子サイズ: 対角 1/2inch
	カメラ電源ボックス	1 台	カメラへの電源供給
	オートアイリスレンズ	1 個	自動絞り, 焦点距離: 12 mm
	カメラハウジング	1 個	風雨対策用
	雲台	1 台	カメラハウジングの固定
	天盤	1 台	アクリル板・鋼板で作製, 300 × 300 × 10 mm
	カメラ台	1 個	コンクリートブロック, 300 × 300 × 250 mm
	BNC ケーブル	3 本	100 m, 電源・映像用
	ターゲット	10 個	コンパネ板, 300 × 300 × 10 mm
	ターゲット固定杭	10 本	木杭, 釘などで固定
バ ソ コ ン 関 係	パソコン	1 台	観測制御用
	モニタ	1 台	画像表示用
	画像処理ボード	1 台	フレームメモリ搭載
	スイッチャ	1 台	画像の切替え
	無停電電源装置 (UPS)	1 台	停電対策
	UPS 増設バッテリー	1 台	停電対策
	観測小屋	1 屋	キャンプ用テントを使用

斜面観測ではカメラ 1 台の 2 次元計測システムとし、簡単な画像処理でターゲット座標の抽出が行えるよう、図-2 に示す人工ターゲットを用いた。システムの簡易化により、観測精度の低下が懸念されるが、本論文では、簡易化システムを用いても実用上十分な精度で斜面変動を捉えることができたことを報告する。

(2) システムに必要な機材

本システムの構築にあたって使用した機材は、表-1 に挙げた通りである。システムを低コストなものとするため、これらの機材は安価な製品に抑えられている。CCD カメラは、映像転送用と電源供給用の 2 本のケーブルを要する AC 電源タイプではなく、BNC ケーブル 1 本で映像と電源を取ることができる VP 電源タイプを使用した。こうしてカメラ電源は観測小屋内の電源ボックスから取ることとするため、カメラハウジング内に電源を設置する必要がなくなる。その他、システムを長期連続運用するには、カメラや観測制御用パソコンに連続供給が可能な電源の確保が必要となる。

(3) 斜面監視方法

斜面監視システムの一連の流れについて説明する。人工ターゲットを用いる場合には、まず斜面上に複数のターゲットが設置される。斜面上の自然物を代替ターゲットとして用いる場合には、この作業は不要である。また、監視対象斜面の全域とターゲットが撮影可能で、かつ安定した場所に CCD カメラが設置される。CCD カメラによって斜面状況が一定時間ごとに撮影され、得られた画像は観測小屋内に設置されているパソコンのフレームメモリ（画像処理ボード）内のバンクメモリ

にデジタル画像として保存される。画像が保存されると、パソコンは自動的に画像処理プログラムを実行し、画像解析によりターゲット位置を抽出し、ターゲットの画面内座標値および 3 次元座標値（あるいは 2 次元座標値）を計算する。その後、得られたターゲット座標値と前のサイクルで計測された座標値との差を取り、ターゲットの変位として表示される。これら一連の流れを図-3 に示す。斜面の変動状況によっては、地すべり危険警報を出すなどの措置を取ることとなる。

これら 1 サイクルに要する処理時間は、ターゲット数や撮影時間間隔により異なるが、数秒から数十秒程度である。これを一定時間ごとに繰り返し、24 時間無人連続観測を行う。撮影間隔は、画像処理に要する時間との兼ね合いに留意して設定する必要があり、本研究の観測では数十秒から数分程度の間隔に設定した。

なお、撮影画像からターゲットの 3 次元座標を求めるための写真測量の原理については文献^{(14),(17),(18),(19),(20),(21)}に記されている。また、ターゲット位置抽出のためのデジタル画像解析手法は、本論文の主題とはやや離れた内容であるので、付録 I で簡単に述べるに留める。

3. 屋内模型実験によるシステムの検証

前章で説明したシステムを実斜面の計測に適用するのに先立ち、屋内模型実験を行い、本システムによって地すべりや斜面崩壊を捉えることが可能であるかについて検証を行う。すなわち、模型斜面に対し人為的に崩壊を発生させ、それに伴って模型斜面上に設置したターゲットが変位する様子を、CCD カメラ撮影とデジタル画像解析によって検出できるかどうかを調べる。

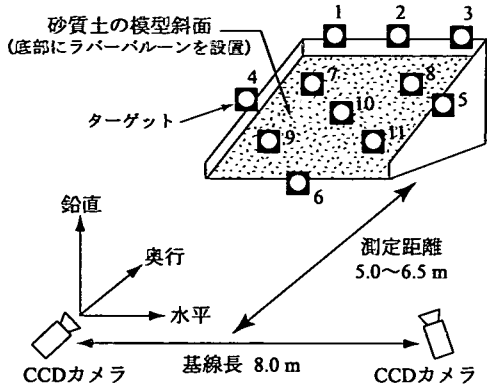


図-4 屋内模型実験の装置の配置図

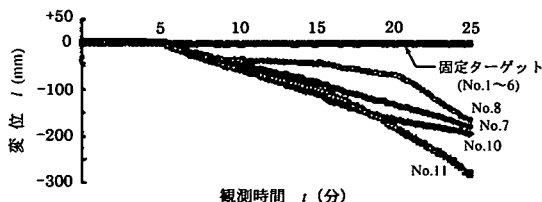


図-5 模型実験におけるターゲット変位の経時変化

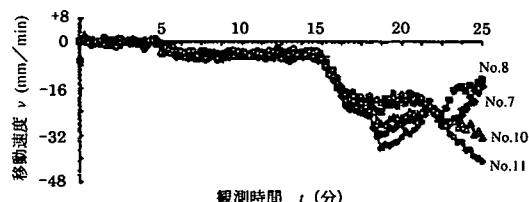


図-6 模型実験におけるターゲット移動速度の経時変化

(1) 屋内模型実験の概要

実験装置²⁶⁾の配置図を 図-4 に示す。屋内の安定した実験場に設置された土槽の底部には、人為的に斜面崩壊を発生させるためのラバーバルーンが配置されており、その上に砂質土を用いて勾配 1 : 1.25 の模型斜面を作製した。実験開始時は、バルーンにエアが満たされているが、バルーンは 3 箇所までエアの調節ができるようになっており、実験開始後、徐々にエアを排出していくことによりバルーンが沈下し、その上に設置された模型斜面が崩壊するというものである。

ターゲットは模型斜面上 (No. 7~11) に設置するだけでなく、斜面変動の相対量を判別しやすくするため、不動点としての固定ターゲット (No. 1~6) を土槽の支保部材に設置した。測定距離 (カメラと斜面間の距

離) は 5.0~6.5m であり、カメラ基線長 (2 台のカメラ間隔) は 8.0m である。CCD カメラによる撮影や画像解析によるターゲット位置抽出といった一連の流れは、前章で述べたものと同様であるが、後述の実斜面観測 (カメラ 1 台の 2 次元計測) とは異なり、屋内実験では 2 台のカメラを用いた 3 次元計測を行った。

(2) 実験結果

模型実験により得られたターゲット変位の経時変化を 図-5 に示す。横軸は実験開始からの時間 (分)、縦軸は各ターゲット (No. 7~11) の変位 (mm) をそれぞれ示す。ただし、ターゲット No. 9 については、計測ミスによるデータ欠損のため、ここには示していない。また、固定ターゲットとして設置した No.1~6 の変位についても示してあるが、当然のことながら変位はゼロのままとなっている。ターゲット変位は、2 枚の撮影画像を用いた画像解析により 3 次元座標を求め、ターゲット初期位置からの変位を計算し、変位ベクトルのノルムで示している。この図から分かるように、実験開始後約 5 分が経過した辺りからターゲットがゆっくりと変位し始め、約 15 分が経過した辺りから次第に急速に変位が進行するようになり、およそ 25 分後には崩壊に至っている。この場合における「崩壊」とは、画像解析で追尾していたターゲットが解析範囲からスケールアウトして追尾不能となった時点を示している。図-6 に、ターゲット移動速度の経時変化を示す。5~15 分の間は微小な速度のまま推移し、15~18 分の間で急速に速度が増加し、その後は速度の緩急を何度か繰り返して崩壊に至っている。

詳しくは実斜面観測結果の分析を行った第 5 章で述べるが、地すべりにおけるクリープ破壊挙動は、ゆっくりとした微小な変位を生じるような前兆現象を経て、変位の緩急を幾度か繰り返した後に、最終的な崩壊に至ることが知られている³³⁾。従って、斜面変動の観測により危険予測を行う場合には、こうした前兆現象の微小変位をも正確に捉え得る精度を有することがシステムに要求される。ここで示した実験結果は、地すべり危険予測に対する本システムの適用可能性を示すものである。しかしながら、実斜面における地すべりは、本実験よりもはるかにゆっくりとした微小な変位によるものであるから、実斜面観測に対する適用性の検証のためには、更なるケース・スタディが必要である。従って、次章では実斜面における観測について述べる。

4. 実斜面の観測への適用

前章では、屋内模型実験によるシステムの検証について述べ、本システムを用いて斜面変動の前兆現象から崩壊に至るまでの過程を捉えることができることを示した。本研究においては更に、地すべりが発生し得



図-7 「よしお沢」の地すべり観測現場の位置図



図-8 観測斜面の全景

ると予想される実斜面において観測を行い、斜面変動とその前兆現象を捉えることに成功した。そこで本章では、その観測概要と観測結果について述べる。

(1) 実斜面観測の概要

観測現場は新潟・長野県境付近の新潟県新井市大字長沢字よしお沢地先の斜面（以下、「よしお沢」と称す）である。その位置図を 図-7 に示す。この周辺は、これまでも地すべりが多発している地域である。図-8 に観測対象とした斜面の全景を示すように、既に大規模な土砂崩落が生じているが、観測当時もお地すべりが進行していた。観測は、地すべり頻度が高いと考えられる梅雨期の平成 12 年 5 月 26 日から 7 月 1 日までの約 1 ヶ月間に渡って行い、撮影間隔は 20 秒に設定して 24 時間連続無人計測を行った。ただし、本観測では前述した夜間計測に対応したターゲットは用いなかったため、観測機器は連続稼働させたが、取得データは夜間のもを除いて採用した。前述のように、ここでの観測では CCD カメラ 1 台による 2 次元計測とし、人工ターゲットを用いたシステムとした。観測斜面は、既に土砂崩落が始まっている区域のうち、幅

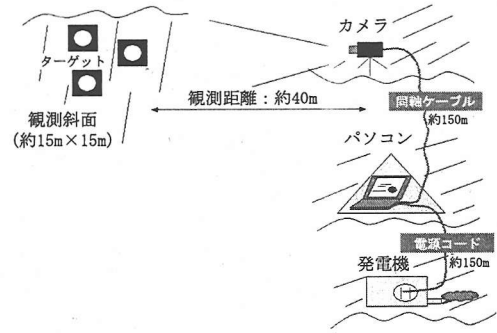


図-9 「よしお沢」斜面観測の機材設置レイアウト

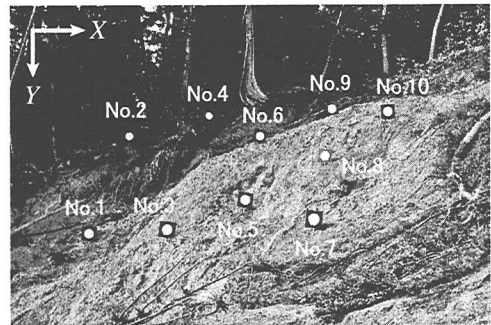


図-10 ターゲット設置状況（観測開始時のカメラ撮影画像）



図-11 CCD カメラ設置状況

約 15m x 長さ約 15m の範囲とし、観測距離（CCD カメラとターゲット間の距離）は約 40m である。

(2) 観測機材の設置

よしお沢の観測現場における機材設置レイアウトを図-9 に示す。現場付近では、観測機材への供給電源として公共電源を利用できなかったため発電機を設置したが、本システムを実用として長期連続運用するには、連続供給が可能な電源の確保が必要である。図-10, 11 にそれぞれ、ターゲット設置状況、および CCD カメラ設置状況を示す。ターゲットは、斜面に木杭を打ち込み、図-2 のような人工ターゲットを固定した。図-10

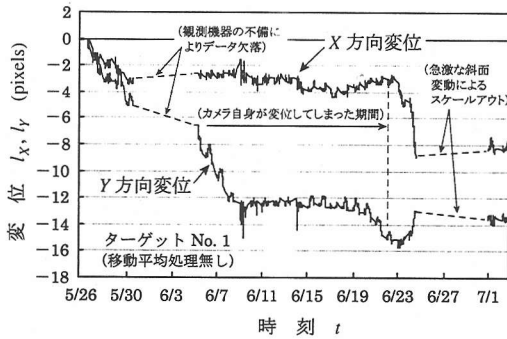


図-12 全観測期間でのターゲット No. 1 の変位の経時変化

に示すようにターゲットは計 10 個を用いたが、斜面上で既に崩落が始まっている領域に 8 個のターゲット (No. 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10) を設置した。また、ターゲット変位算出の基準となる不動点として、未崩落の場所に 2 個のターゲット (No. 2, No. 4) を設置した。

(3) 観測データの処理 (移動平均法)

実斜面観測では、実際にターゲット変位が無くても、風雨や日照、交通振動等の影響を受けて観測データに「ブレ」が含まれる。しかし斜面監視においては、小さなブレを含むデータよりも、ある時間スパンにおける変動傾向 (トレンド) が重要である。そこでここでは、時間間隔 Δt 毎に観測された変位データ l_t の n 項移動平均 \bar{l}_t を、 l_t を含む過去の n 個のデータを用いて、

$$\begin{aligned} \bar{l}_t &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n l_{t-(k-1)\Delta t} \\ &= \frac{1}{n} [l_t + l_{t-\Delta t} + \dots + l_{t-(n-1)\Delta t}] \end{aligned} \quad (1)$$

と定義し、変位データに移動平均処理を施してブレを排除した。項数 n を多く取ればブレの少ないデータとなる一方、データ変動の検知が遅れるため、適切な項数を選択する必要がある。本研究では、前述の各種要因によるブレの影響を排除するには $n=3$ で十分と判断し、 $\Delta t=20$ 秒毎の変位観測データ l_t に対して 3 項移動平均処理を施し、これを用いて移動速度 $v_t = (\bar{l}_t - \bar{l}_{t-\Delta t}) / \Delta t$ を計算した。変位および移動速度のデータはリアルタイムで記録される。なお、以降に示すグラフでは、移動平均処理の有無を明記してある。

(4) 観測結果

全観測期間を通してのターゲット中心座標の変位の経時変化を図-12 に示す。ここでは、全 10 個のターゲットのうちで最大変位を示した No. 1 について示してある。次章でクリープ挙動について詳しい考察を行う際には、ターゲット相互の相対変位を用いる方法なども考えられるが、本論文では、最大変位を示し、か

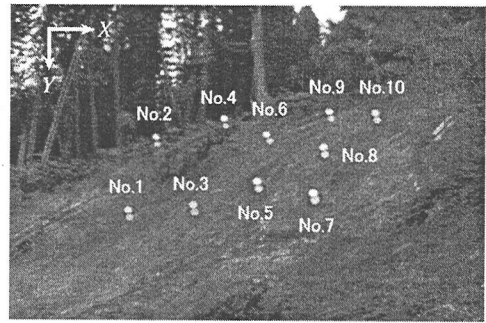


図-13 観測開始から 6 月 21 日までの間の比較画像

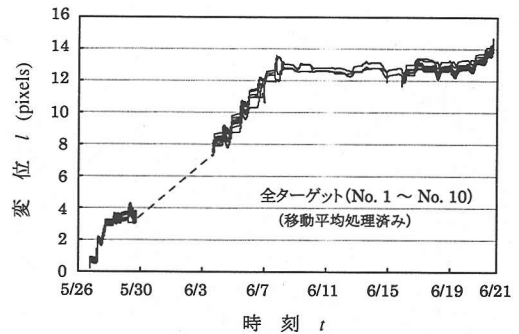


図-14 観測開始から 6 月 21 日までの全ターゲットの変位

つ画像解析においてスケールアウトを起こすことなく最も大きな変位レベルまでターゲット位置を追跡できたターゲット No. 1 を対象として検討することとした。グラフは横軸に観測時間、縦軸にターゲット初期位置からの画像上での X 軸、Y 軸方向変位 l_x, l_y (pixels) を示してある。変位の方向は、図-10 において右方向を X 軸正方向、下方向を Y 軸正方向としている。

カメラの CCD 素子サイズと画素数 (約 38 万画素) より画素ピッチは $d = 12 \mu\text{m}$ と求められ、表-1 に示したように焦点距離は $b_f = 12 \text{mm}$ である。また、第 4.(1) 節で述べたように、観測距離は $L = 40 \text{m}$ である。従って、付録 I.(5) の式 (I.5) により距離 l を求めると、画像の 1 pixel は斜面上での約 4 cm の変位に相当することが分かる。なお、本観測の観測精度 (変位に対する感度) は 1 pixel (約 4 cm) であるが、ブロックマッチング法と画素間の補間処理³⁴⁾を併せて用いることにより、サブピクセル分解能 (0.5 pixel, 0.25 pixel 等) での変位の検知も可能となると考えられる。観測の精度は、観測距離、観測範囲、CCD カメラの解像度などにより決まる。近年、CCD カメラの性能は急速に向上しており、更なる観測の高精度化が可能と見込まれる。

図-12 では、2 つの期間で観測データの欠落が見られる。これらの原因として、5 月 30 日から 6 月 3 日までの 5 日間については、観測機器の設定を確認・修

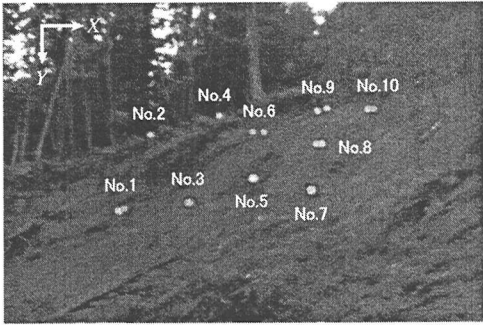


図-15 6月21日から観測終了時までの間の比較画像

正したところ計測が正常に回復したことから、観測機器の不備によるものと考えられ、これ以降は安定して観測が行われた。また、6月25日から6月29日までの5日間については、以降で詳細な検討を行うが、斜面変動による急激なターゲット変位により、ターゲットが画像解析範囲からスケールアウトしてしまい、ターゲット位置を追尾できなかったことが原因と考えられる。これは、観測開始時に予め設定する画像解析範囲を、各ターゲットの周辺でターゲットの大きさの数倍程度の範囲としているため、解析範囲を設定し直すことにより、6月30日より正常な計測が再開された。しかし、このようにターゲットに急速な大変位が生じた場合などに対しては、今後、解析手法の改善により計測のロバスト性の向上を図る必要がある。

図-12によると、観測開始から6月8日頃までの観測初期の期間で、特にY軸負方向の変位が生じている。また、6月19日から22日頃までの期間で、更に変位が進行している。この期間では、僅かではあるがX軸負方向にも変位が生じている。即ち、撮影画像に向かって左上方向のターゲット変位が計測されたことになる。そこで、観測開始から6月21日までの期間における斜面変動の様子を詳しく見るために、図-13に、この期間の最初と最後の2枚の撮影画像(ビットマップ形式)のピクセル値(グレースケール256階調)を各ピクセルごとに足し合わせて2で割る処理を行い、ターゲット変位の様子分かるようにしたものを示す。同図より、不動点を含む全ターゲットや周囲の樹木などもほぼ一様に左上方向に変位していることが分かる。また、図-14にこの期間における全ターゲット(No.1~No.10)の変位ノルム $l = \sqrt{l_x^2 + l_y^2}$ をまとめて示す。同図からも、この期間では全ターゲットにおいてほぼ一様な変位が観測されていることが分かる。以上より、この期間に観測されたターゲット変位は、カメラ自身が変位してしまったことによるものと考えられる。従って、本観測で安定して斜面変動のデータが取得できるようになったのは6月21日以降であると考えられ、以下ではこれ以降の観測結果を検討対象とする。

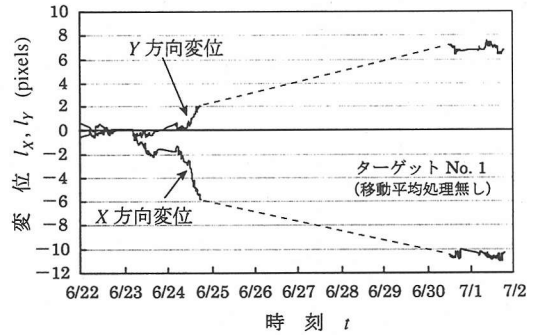


図-16 ターゲット変位の経時変化(ターゲット No. 1)

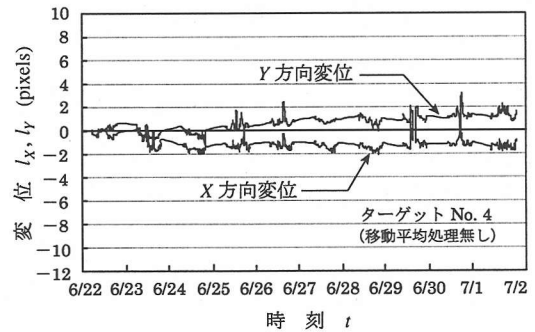


図-17 ターゲット変位の経時変化(ターゲット No. 4)

さて、斜面変動が顕著となった6月21日以降、観測終了の7月1日までの期間における様子を見るため、図-15に、これら両日の撮影画像に対し図-13と同様の処理を行ったものを示す。不動点 No. 2, 4, ならびにターゲット No. 3, 5 では変位は見られないが、斜面に向かって右上と左下領域のターゲット No. 1, 6, 7, 8, 9, 10 に変位が生じている。この期間におけるターゲット変位の経時変化を、変位を生じたターゲット No. 1 と、不動点として設置したターゲット No. 4 についてそれぞれ図-16, 17 に示す。図-15と同様、変位が生じたものと生じないものとの違いが明らかに表れている。図-16では、崩壊によるものと見られるスケールアウトにより、6月25日から30日の間でデータが欠落しているが、23日頃から斜面に向かって左下方向に顕著な変動が発生し始め、幾度か変動の緩急を経て、24日以降で次第に急速な変動となって25日に崩壊に至り、30日までに変動は落ち着いていることが分かる。また、この期間において、いったん変動が収まった後にまたすべり出すという挙動を何度か繰り返している。ターゲット変位は最大で、X方向に-11 pixels(左方向に約44 cm)、Y方向に+7 pixels(下方向に約28 cm)程度であった。一方、図-17では、変位は1~2 pixel(s)前後で推移しており、変位の顕著な進展は見られない。

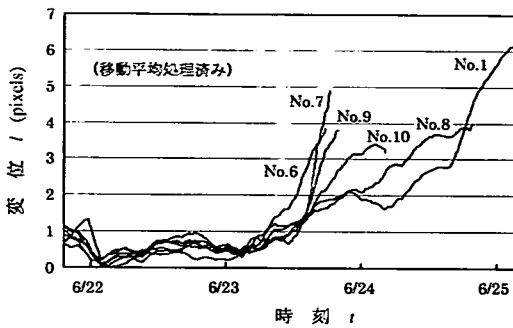


図-18 ターゲット変位の経時変化 (No. 1, 6, 7, 8, 9, 10)

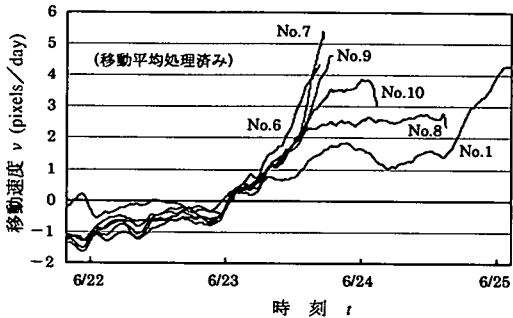


図-19 ターゲット移動速度の経時変化 (No. 1, 6, 7, 8, 9, 10)

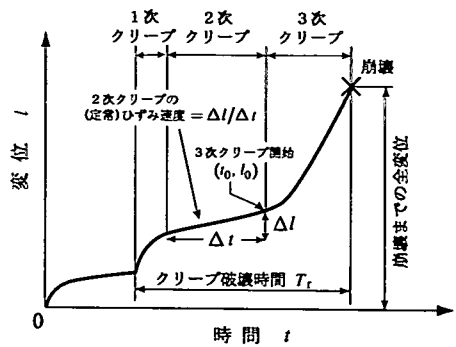


図-20 斜面のクリープ破壊挙動の模式図³⁵⁾

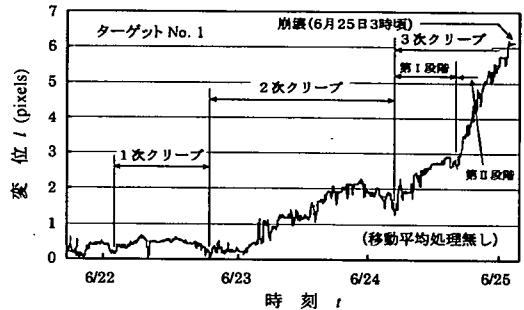


図-21 「よしお沢」における変位の経時変化

(5) 屋内模型実験との比較

特に急速な変動を生じた6月21日から25日までの期間について、ターゲット No. 1, 6, 7, 8, 9, 10の変位と移動速度をまとめたものを、それぞれ図-18, 19に示す。変位は、X, Y方向成分による変位ベクトルのノルムで示している。図-18では、6月22日から緩やかな変動が始まり、特に23日以降から次第に急速に変位が進むようになり、変位の進行と停止を何回か繰り返しながら、25日にはターゲットがスケールアウトしている。また、移動速度を示した図-19より、変動の初期段階から最終的な崩壊に至るまでの間では、速度の緩急を何度か繰り返しつつ、次第に移動速度が増加していくのが分かる。これらと同様の傾向は、屋内模型実験の結果で示した図-5, 6においても、それぞれ認められる。すなわち、本システムを用いた屋内模型実験ならびに実斜面観測によって、地すべりの前兆現象から崩壊に至るまでの一連の過程を捉えることができたことより、本システムの斜面観測への適用性、ならびに今回行った実斜面観測の妥当性が確認された。

5. 地すべり発生予測手法への適用

本システムでは、カメラ撮影画像の画像解析により、監視対象斜面の表面変位が、斜面上に設置したターゲッ

トあるいは代替ターゲット(斜面上の岩石や樹木などの自然物)の変位を介して得られる。地盤工学の分野で、地すべり発生予測の方法として提案されているものとしては、土中の間隙水圧や地下水位を計測する方法など様々なものがあるが、斜面表面の変位観測を用いた予測方法としては、地すべり土塊のクリープ挙動や、表面移動速度の逆数の経時変化の特性を利用した方法が提案されている^{29),30),31),32)}。本章では、これらの地盤工学的方法をよしお沢の実斜面観測結果に適用し、本システムの観測結果を地すべり発生予測に応用できるかに関して検討を行う。

(1) クリープ挙動に関する考察

地すべりや大規模な山崩れにおいては、斜面の変動が始まった後、必ずしも直ちに崩壊に至るのではなく、すべり面の発生・進展から崩壊に至るまでには、ある程度の時間が掛かることが知られている⁷⁾。それは一般に、土の変形やすべり面の進展には土中の間隙水の移動が伴い、とくに粘性土では透水に時間を要するために、土の破壊挙動は時間依存的・進行的であるためである³³⁾。斜面崩壊に要する時間は、例えば数百メートルの斜面の場合、たとえ急傾斜であっても数日から数十日を要することが多いとされる。

典型的なクリープ破壊挙動³⁵⁾の模式図を図-20に示

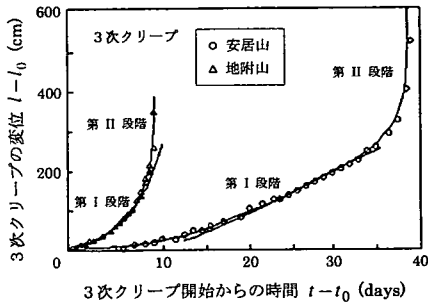


図-22 安居山・地附山の地すべりにおける変位の経時変化⁷⁾

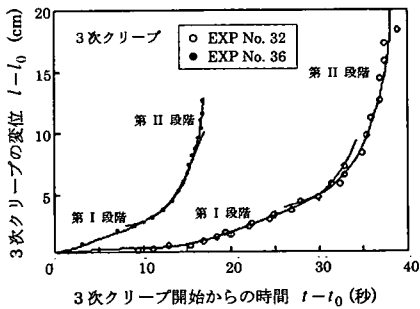


図-23 崩壊実験における変位の経時変化⁷⁾

す。同図に示すように、すべり出したあと時間経過と共に移動速度が漸減する1次クリープの後に、移動速度が一定の定常的な2次クリープが進行し、続いて次第に移動速度が増大していく3次クリープに遷移し、最終崩壊に至るという経過をたどることが分かる⁷⁾。

よしお沢の観測結果について、図-21に6月21日17時から、崩壊によりターゲットがスケールアウトしたと見られる25日3時までのターゲットNo.1の変位の経時変化を示す。最終的な崩壊に直接つながる1次クリープは6月22日3時頃より始まり、22日18時頃にいったん変動が落ち着いた後に2次クリープに遷移して、しばらくは一定速度で変位が進行していくが、またいったん変動が落ち着いた後に、24日4時頃より速度が漸増する3次クリープが始まり、25日3時頃に崩壊したものと見られる。また、図-21には、次節で述べる3次クリープの分類(第I、第II段階)も示してある。図-21の挙動は図-20と類似しており、本システムを用いた観測によって、崩壊の前兆現象である1次、2次クリープ、ならびに崩壊直前の3次クリープを捉えることが可能であることが示された。

なお、本章での検討は、最大変位を示したターゲットNo.1(変位ノルムで約52cm)について行っているが、前章で図-15, 18, 19に示したように、本観測で得られた斜面変動は、同一斜面内でも各点の変位は大小様々な不均一なものであった。こうした場合におけ

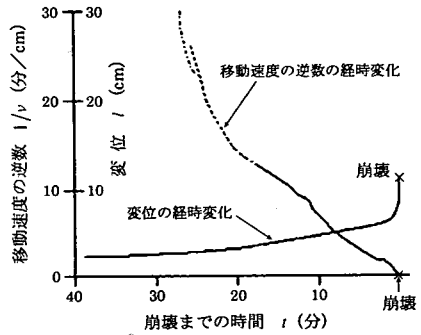


図-24 砂斜面崩壊実験における変位と移動速度の逆数の経時変化^{4), 29)}

る斜面変動の評価は、今回の方法の他にも、各ターゲットの相対変位で行う方法等が考えられる。一方、大きなすべり土塊を形成して斜面全体が変位する場合には、不動点を基準とした絶対変位で評価するのが妥当であろう。このように、地すべりの形態によって適切な評価法を適宜選択する必要がある。斜面全体の挙動を一度に捉えることができるという本システムのメリットを活かし、各種の評価法を選択できる点が、インバール線などを用いた従来の監視方法にはない大きな特長であるが、その選択方法は今後開発する必要がある。

(2) 3次クリープ挙動の特徴に関する考察

林⁷⁾は3次クリープの挙動を更に詳しく調べ、3次クリープにおける変位 l の経時変化を見ると、時刻 t に伴い変位 l が直線的に漸増する「第I段階」と、崩壊直前において2次関数的に l が急速に増加していく「第II段階」とに分けられることを見いだした。そこで、ここでは3次クリープについて詳しく見てみる。3次クリープ発生時刻を t_0 、その時の変位を l_0 とし、それからの時間 $t-t_0$ と変位 $l-l_0$ との関係を、昭和47年12月に発生した福井市の安居山の地すべりと平成9年6月に発生し都市近郊の地すべりとして注目された長野市内の地附山の地すべり⁷⁾について図-22に、林による砂斜面崩壊実験⁷⁾について図-23に、引用してそれぞれ示す。これらの図中にも記されているように、3次クリープにおける「第I段階」と「第II段階」の挙動の特徴に違いが見られる。また、福垣^{4), 29)}による崩壊実験結果を引用して図-24に示す。同図中の変位の経時変化を見ると、緩やかに進行していた変位が崩壊直前で急速な増加に転じており、先の図と同様の挙動を示していることが分かる。前節で図-21に示したよしお沢のクリープ挙動においては、6月24日4時頃に3次クリープが始まったと考えられ、変位の増加が比較的緩やかな「第I段階」を経て、同日17時付近を境としてクリープ挙動の特徴が急に変化し、急速に変位が進行する「第II段階」に遷移し、崩壊へと至っている。

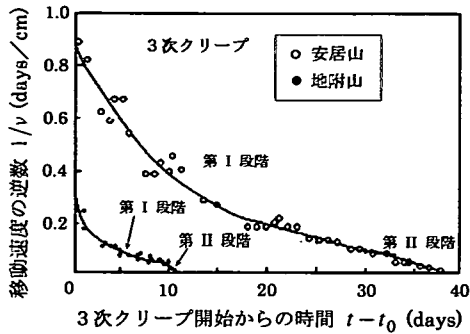


図-25 安居山・地附山での移動速度の逆数の経時変化⁷⁾

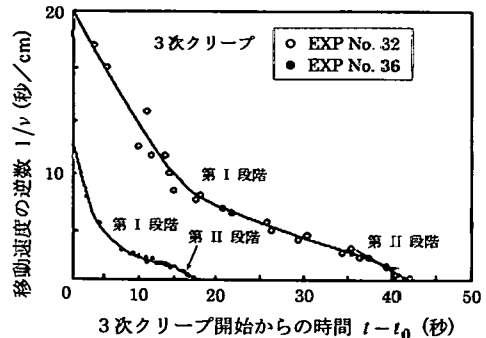


図-26 崩壊実験における移動速度の逆数の経時変化⁷⁾

(3) 移動速度の逆数の経時変化に関する考察

先に示した屋内模型実験やよしお沢の観測結果でも見られたように、1次、2次クリープまでのゆっくりとした挙動と異なり、3次クリープに移行した後は、最終的な崩壊に近づくにつれて次第に急速に変位が進展することが知られている^{7),30)}。3次クリープのこうした崩壊直前の現象については、表面移動速度の逆数 $1/v$ の経時変化に基づく検討方法が提案されている^{7),29)}。ここではこの検討方法に基づき、安居山と地附山の地すべり観測データ⁷⁾、林による崩壊実験の結果⁷⁾、ならびに福圏による崩壊実験の結果^{4),29)}との比較を行い、本システムによる観測結果が地すべり予知の検討方法に適用可能であるかについて調べる。

地すべり斜面の表面移動速度を v 、時刻を t として、 $t \sim 1/v$ 関係で示したものを、安居山および地附山の地すべり⁷⁾について 図-25 に、林による崩壊実験⁷⁾について 図-26 にそれぞれ引用して示す。福圏による崩壊実験^{4),29)}については、既出の 図-24 に示されている。また、よしお沢の観測結果について、6月23日以降の分を 図-27 に示すが、前節で述べたように3次クリープに移行したのは6月24日4時頃と見られ、以下では特にこの領域に着目して検討する。図-21、22、23、24と同様に、一般に $t \sim 1/v$ 曲線においても、3次クリープでは「第I段階」と「第II段階」の挙動の違いが認められることが多いとされる^{4),29)}。このことは、図-25、26においても明瞭であり、図中に各段階の区別が記されている。図-24でも、移動速度の逆数 $1/v$ の経時変化を見ると、崩壊の約3分前で急に挙動が変化している。図-27に示すよしお沢の観測結果においても、3次クリープにおいては「第I段階」後半でいったん移動速度の増加が収まり、6月24日17時を境に「第II段階」に移行した後は、移動速度が急速に増加して一気に崩壊に至っていることが分かる。

(4) 3次クリープ初期挙動による崩壊予測

図-25、26中には、それぞれ2つの曲線が描かれているが、これらの間にはそれぞれ明瞭な差異が認めら

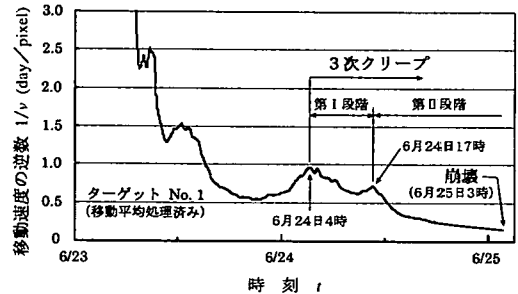


図-27 よしお沢における表面移動速度の逆数の経時変化

れる。すなわち、各々の図より、3次クリープ初期の「第I段階」において $t \sim 1/v$ 曲線の勾配が急であるほど、3次クリープ開始からの崩壊時間が短い傾向があることが分かる。このことは、3次クリープ初期の移動速度 v を用いて崩壊時間を予測できる可能性を示唆している。そこで、3次クリープ開始時 (t_0, l_0) からの変位 Δl とその時間 Δt から3次クリープ初期の移動速度を調べ、それにより崩壊時間の予測を行ってみる。3次クリープ発生以後、 $\Delta l = 10 \text{ cm}$ だけ変位が進行するのに要する時間 $\Delta t |_{\Delta l=10 \text{ cm}} \text{ (day)}$ と3次クリープ発生時 t_0 から崩壊までの時間 $T_r \text{ (day)}$ との間には、

$$T_r = 2.13 (\Delta t |_{\Delta l=10 \text{ cm}})^{1.6} \quad (2)$$

なる関係式が成立し^{36),37)}、林による崩壊実験⁷⁾においても良好な相関が得られている。

さて、式(2)に、よしお沢の観測結果(図-21)を適用してみる。第5.(1)節で述べたように、図-21より、3次クリープが始まったのは6月24日4時頃と見られ、この時点の時刻を t_0 、変位を l_0 とする。 $\Delta l = 10 \text{ cm}$ は本観測では約2.5 pixelsに相当し、図-21によると、変位が $l = l_0 + \Delta l$ まで進行した時刻は、「第I段階」を少し越えて「第II段階」に入り込んではいるが、24日17時頃であり、3次クリープ開始時 t_0 からの時間は $\Delta t |_{\Delta l=10 \text{ cm}} = 13 \text{ 時間} = 0.54 \text{ 日}$ であった。これを式(2)に代入すると、時刻 t_0 からの崩壊時間は

$T_r = 0.79$ 日 = 19時間 となり、崩壊予想時刻は 6 月 24 日 23 時頃と求められる。これは、観測においてターゲットがスケールアウトしたことから崩壊したと見られる時刻 (6 月 25 日 3 時) を比較的精度良く予測できており、本システムによる観測結果が、この崩壊予測方法に適用可能であることが分かる。

6. 結論

本研究では、CCD カメラと撮影画像の解析処理による地すべり・斜面崩壊監視システムを構築し、屋内模型実験ならびに実斜面の観測を行い、システムの精度の検討、適用性・信頼性の検証、および危険予知方法への適用を行った。屋内模型実験の結果と実斜面の観測データとの比較を行い、本システムにより地すべりや斜面崩壊の前兆現象である初期の微小な変位から、最終的な崩壊に至るまでの一連の経過を捉えることができることを確認した。また、地盤工学分野で提案されている各種の崩壊予測方法に対して本研究で行った実斜面における観測結果を適用し、本システムにおいてもこれらの予測方法が適用可能であることを確認した。以上の成果より、本システム全体としての適用性・信頼性を検証できたと言える。

今後の課題としては、以下の事項が挙げられる。1 つ目は、人工ターゲットを用いずに、斜面上の自然物を代替ターゲットとして用いた画像解析技術の適用性・信頼性を向上させることである。これについて本論文では触れなかったが、現在、著者らが開発中である²¹⁾。2 つ目は、カメラ自身の振動や気象条件による撮影エラーなどといった事態にも対処し得るような、信頼性の高いシステムとすることである。こうした問題点を解決し、斜面監視、危険予知・照査、警報発令といった一連の操作を無人・連続で行えるような統合的システムへと発展させて行くことを目標としたい。

謝辞： 本研究は、財団法人セコム科学技術振興財団より特定総合研究として平成 11 年度から 3 年間の研究助成を受けて行った。ここに記して謝意を表す。

付録 I デジタル画像処理

本研究における画像処理は、画像処理範囲の設定、コントラスト・ストレッチ、しきい値の決定、2 値化、ターゲット輪郭線の抽出、ターゲット重心座標の計算という手順で行われる。ここでは、画像の背景がほぼ黒色で、その中の白色円形ターゲットを抽出するという状況を想定し、各手順を説明する。

(1) コントラスト・ストレッチ

本システムでは、モノクロ画像を対象として画像処理を行っているため、画像の各ピクセルが持つ情報は

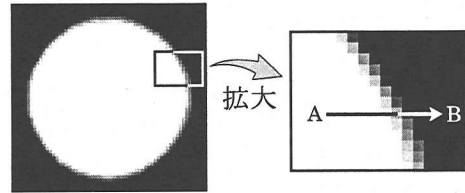


図-28 ターゲット撮影画像とその拡大図

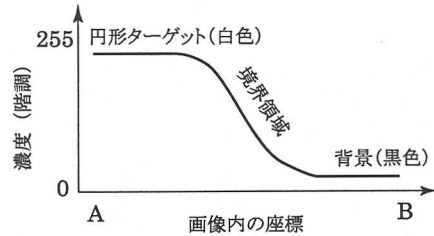


図-29 ターゲットと背景の境界近傍 (A → B) の濃度分布

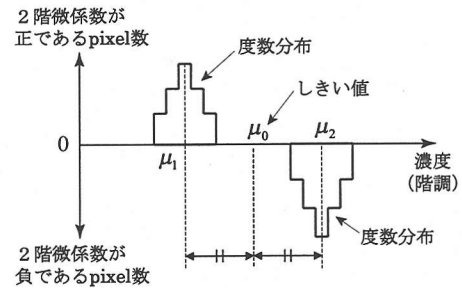


図-30 2 値化のしきい値の自動決定の概念図

濃度 (グレースケール) のみで、それは 0~255 階調である。しかし、実際の斜面観測で得られる画像においては、ほとんどのピクセルの濃度階調レベルは 50~100 程度の範囲内であり、そのままでは画像処理によりターゲット位置の抽出を行うのは困難である。そこでコントラスト・ストレッチを施し、画像が持つ濃度レベルを 0~255 階調に拡大することにより、ターゲット抽出が容易になるようにしている。この処理は、

$$Z' = \frac{Z - Z_1}{Z_2 - Z_1} \times 255 \text{ (階調)} \quad (I.1)$$

という変換式により行う。ここで、 Z_1 、 Z_2 はそれぞれ画像処理範囲における最小・最大濃度であり、 Z は変換対象ピクセルの濃度、 Z' は変換後の濃度である。

(2) しきい値の自動決定

ターゲット輪郭線の抽出処理の前に、しきい値を決めておく必要があるが、抽出に最適なしきい値は画像ごとに異なるため、各時刻の画像データ取得のたびに、最適なしきい値を自動決定するアルゴリズムが必要となる。

ここでは、その手続きについて述べる。本研究で用いたターゲットのように黒地に白色の円などのパターンでは、図-28のように拡大してみると、図中のA→B上をたどっていくと、円の輪郭線付近の濃度変化が大きいことが分かる。ただし実際の画像では、図-29に示すように、境界周辺はグレーの領域となっており、ある幅を持っている。これは、点 (x, y) における濃度を $f(x, y)$ としたとき、その微係数が輪郭線の近傍領域の前後で急激に変化していると考えることができ、この性質を利用して、以下のように2値化のしきい値を決定する。まず、ラプラシアン・フィルタを用いて画像処理範囲内の濃度 $f(x, y)$ の2階微係数を求めることにより、輪郭の強さがスカラー値として求められる。ラプラシアン・フィルタは、

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (I.2)$$

と表され、デジタル画像処理に即した離散型で表すと、

$$\nabla^2 f(x_i, y_j) = \left\{ \begin{aligned} & \{f(x_{i+1}, y_j) - f(x_i, y_j)\} \\ & - \{f(x_i, y_j) - f(x_{i-1}, y_j)\} \\ & + \{f(x_i, y_{j+1}) - f(x_i, y_j)\} \\ & - \{f(x_i, y_j) - f(x_i, y_{j-1})\} \end{aligned} \right\} \quad (I.3)$$

となる。2階微係数は、図-29において、下に凸な曲線部分では正值、上に凸な部分では負値、直線部分ではゼロとなる。2階微係数が正值・負値であるピクセル濃度の度数分布をそれぞれ描くと図-30のようになる。そして、2階微係数が正值であるピクセルの平均濃度 μ_1 と、負値であるピクセルの平均濃度 μ_2 を求めておき、これらの平均値 $\mu_0 = (\mu_1 + \mu_2)/2$ を2値化の際のしきい値と決定する。

(3) 2値化

2値化処理とは、画像に対してあるしきい値を設定し、それより大きい濃度のピクセルを255(白色)、小さい濃度のものを0(黒色)の濃度に変換する処理をいう。この処理は、デジタル画像処理で物体形状を認識する際に多用され、本研究で用いたターゲットのような色の明暗が鮮明なものに対して有効な処理方法である。本研究で行った画像解析では、2値化処理の前に、前節の手法によって予め最適しきい値を決定している。

(4) 重心座標値の計算

前節までの処理により2値化された画像を用いてターゲット輪郭線の抽出を行い、ターゲット重心座標を求める。輪郭線抽出アルゴリズム¹³⁾の詳細は割愛する。輪郭線で囲まれた閉領域を R 、領域に含まれるピクセルの個数を N とすると、ターゲット重心座標 (x_c, y_c) は、

$$x_c = \frac{1}{N} \sum_{(x_i, y_j) \in R} x_i, \quad y_c = \frac{1}{N} \sum_{(x_i, y_j) \in R} y_j \quad (I.4)$$

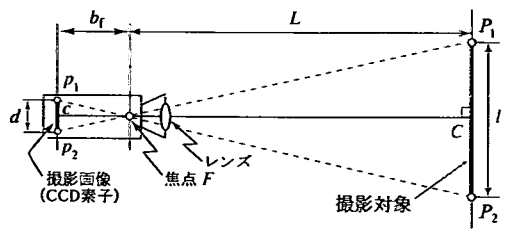


図-31 撮影対象物と撮影画像との幾何学的関係の模式図

と求められる。

(5) デジタル画像解析による距離の計算法

デジタル画像解析によるターゲット変位などの実際の距離の計算法を述べる。簡単のため、図-31に示すように撮影対象の中央点 C の近傍、かつ撮影方向に垂直な面内で、点 $P_1 \sim P_2$ 間の距離 l を考える。対物距離を L 、焦点距離を b_f 、撮影画像1 pixel (CCD素子の画素ピッチ1つに対応)の大きさを d とする。撮影画像の両端を点 p_1, p_2 、中央を点 c 、焦点を F とする。 $\triangle P_1 F P_2$ と $\triangle p_1 F p_2$ とは相似関係にあるから、求める距離 l は、

$$\frac{l}{L} = \frac{d}{b_f} \Rightarrow l = \frac{d}{b_f} L \quad (I.5)$$

となる。なお、ここでは中央点 c, C 近傍で考えたが、この点から離れるに連れて誤差は大きくなる。そこで本システムでは、ターゲット輪郭線抽出の前処理として、画像収差を内部標準要素とした補正³⁸⁾を行うことにより、画像周辺部に発生するゆがみを取り除いている。また、実観測では撮影方向を斜面に対して垂直に取れないことが多いが、この場合には、撮影方向に対する斜面の方向を予め調べておき、斜面上の撮影対象(ターゲット等)を撮影方向に垂直な面に投影したものが撮影画像であると考えることにより、斜面上での実距離を求めることができる。

参考文献

- 1) 土質工学会編: 土砂災害の予知と対策, 土質工学会, 1994.
- 2) 地盤工学会編: 計測結果の解釈と計測管理, 地盤工学会, 1999.
- 3) 土木学会編: 岩盤斜面の調査と対策, 土木学会, 1999.
- 4) 福園 輝旗: クリープ変形式を基にした斜面崩壊時刻の予測について, 地すべり, 第27巻, 第2号, pp. 38-40, 1990.
- 5) 齊藤 迪孝: 斜面崩壊時刻予測のためのクリープ曲線の適用について—崩壊予測の批判に答えて—, 地すべり, 第24巻, 第1号, pp. 30-38, 1987.
- 6) 土屋 智, 大村 寛: 斜面崩壊時刻の予測法と適用結果について, 地すべり, 第26巻, 第1号, pp. 1-8, 1989.
- 7) 林 拙郎: 移動計測による崩壊発生時期の予測, 平成3年度地すべり学会関西支部シンポジウム講演資料, pp. 1-30, 1991.
- 8) 谷口 敏雄, 藤原 明敏: 地すべり調査と解析 (改訂版), 山海堂, 1994.

- 9) 山田 剛二, 渡 正亮, 小橋 澄治: 地すべり・斜面崩壊の実態と対策, 山海堂, 1983.
- 10) (財) 道路保全技術センター編: トンネル坑口部等の岩盤崩壊対策の考え方, 1996.
- 11) 森 俊二, 坂倉 柾子: 画像認識の基礎 [I], オーム社, 1986.
- 12) 森 俊二, 坂倉 柾子: 画像認識の基礎 [II], オーム社, 1986.
- 13) 眞嶋 隆行: ターゲットを用いない部材計測システムの実用化に関する研究, 長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文, 1997.
- 14) 小櫻 義隆: 鋼橋の完成検査システムに関する開発研究, 長岡技術科学大学大学院工学研究科博士論文, 1987.
- 15) 日本測量学会編: 写真による三次元測定応用写真測量, 共立出版, 1983.
- 16) 加藤 洋次, 掛橋 孝夫, 高田 知典: デジタルカメラを用いた斜面点検システムの開発, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, 第 6 部門, pp. 148-149, 1996.
- 17) 渡辺 亮: CCD カメラを用いた斜面崩壊監視システム, 長岡技術科学大学工学部卒業課題研究論文, 1996.
- 18) 傅 雨: CCD カメラを用いた斜面監視システムの実斜面への適用, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, 第 6 部門, VI-146, pp. 292-293, 1996.
- 19) 藤林 健: CCD カメラを使った斜面監視システムの親不知斜面への適用, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, 第 6 部門, VI-34, pp. 68-69, 1997.
- 20) 茂木 健: CCD カメラを用いた斜面崩壊監視システムの上越ジャンクション裏山地区斜面への適用, 長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文, 1998.
- 21) 八木 和也, 宮木 康幸, 烏居 邦夫: カラー画像を用いた代替ターゲットの自動抽出に関する研究, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, 第 6 部門, VI-126, pp. 252-253, 2001.
- 22) 傅 雨: 発光体をターゲットとして利用した CCD カメラによる計測システムの基礎的研究, 第 12 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp. 459-461, 1994.
- 23) 樺野 雅哉: CCD カメラを用いた斜面監視システムの三俣斜面への適用, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, 第 6 部部門, VI-159, 2000.
- 24) 西村 友宏: CCD カメラ斜面監視システムによる地すべり動態観測に関する研究, 長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文, 2002.
- 25) 中西 規祥: CCD カメラを用いた斜面崩壊監視システムに関する基礎的研究, 長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文, 1993.
- 26) 古井 正弘: CCD カメラを用いた斜面監視システム開発の基礎的研究, 第 12 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp. 457-458, 1994.
- 27) 菅原 光一: CCD カメラを用いた斜面崩壊監視に関する研究, 第 10 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp. 316-319, 1992.
- 28) 平島 孝明: 旋回装置付き CCD カメラを用いた 2 次元斜面監視システムの開発, 長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文, 1999.
- 29) 福岡 輝旗: 表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法, 地すべり, 第 22 巻, 第 2 号, pp. 8-13, 1985.
- 30) 斉藤 迪孝: 斜面崩壊発生時期の予知に関する研究, 鉄研報告, No. 626, pp. 36-45, 1968.
- 31) 土屋 智, 大村 寛: 斜面崩壊時刻の予測式とその力学的特徴に関する考察, 地すべり, 第 25 巻, 第 2 号, pp. 2-8, 1988.
- 32) 林 拙郎, 駒村 富士弥, 朴 甫源: 斜面崩壊発生時期の予測について—斜面崩壊の経時進行過程—, 地すべり, 第 24 巻, 第 4 号, pp. 11-18, 1988.
- 33) Asaoka, A., Nakano, M., Noda, T., Takaine, T. and Kaneda, K.: Progressive failure of heavily overconsolidated clay under constant load application, an experiment and its simulation, in: A. Asaoka, T. Adachi and F. Oka (eds.), *Deformation and Progressive Failure in Geomechanics*, Proc. of IS-NAGOYA '97, pp. 69-74, 1997.
- 34) 吉田 琢磨: デジタルカメラを用いた斜面崩壊遠隔監視システム, 長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文, 2002.
- 35) 斉藤 迪孝, 上沢 弘: 斜面崩壊時期の予知, 地すべり, 第 2 巻, 第 2 号, pp. 7-12, 1966.
- 36) 斉藤 迪孝: 第 3 次クリープによる斜面崩壊時期の予知, 地すべり, 第 4 巻, 第 3 号, pp. 1-8, 1968.
- 37) 斉藤 迪孝: 斜面崩壊予想, 土と基礎, 第 29 巻, 第 5 号, pp. 77-82, 1968.
- 38) 社団法人 日本写真測量学会・解析写真測量委員会編: 解析写真測量 改訂版, 1997.

(2001.9.3 受付)

DEVELOPMENT OF THE SLOPE OBSERVATION SYSTEM USING CCD CAMERA AND ITS ADAPTABILITY TO THE LANDSLIDE FORECASTING

Kunio TORII, Yasuyuki MIYAKI, Yuki YAMAKAWA, Masaharu BESSHO and Keisuke SATO

A landslide observation system using CCD camera is developed. The procedure in this system is as follows. Some digital images of the slope are taken with the camera, and 3-D coordinates of each target setted on the slope are computed by the digital image analysis based on the method of photogrammetry. Compared with the conventional observing methods, this system can simultaneously observe larger area.

We examined reliability of the system by conducting the laboratory model test and in-situ slope observation. A remarkable movement of the slope was detected with this system. By applying observation data to several proposed theory, we show the adaptability of the system to the landslide forecasting.