

デプスカメラを用いた斜面崩壊時の変位計測に関する研究 – 土砂災害時の救助活動における安全監視への適用性 –

尾上 修浩*・石澤 友浩*・檀上 徹*・福園 輝旗*

Study on Measurement of Slope Deformation by Using Depth Camera – The Applicability to the Safety Monitoring During Rescue Operations –

Yasuhiro ONOUE, Tomohiro ISHIZAWA, Toru DANJO, and Teruki FUKUZONO

**Storm, Flood and Landslide Research Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan
onoue@bosai.go.jp, ishizawa@bosai.go.jp, t.danjo@bosai.go.jp*

Abstract

This study investigates the effectiveness of using a depth camera to detect the risk of slope failure. There are many challenges to be met when applying methods for evaluating the risk of slope failure to safety monitoring during rescue activities at a disaster site, because setting the instruments requires a considerable amount of time and technical knowledge. We therefore focused on a depth camera because it is easy to use, easy to set and can monitor a wide area. In this study, we conducted a model slope failure test to verify the effectiveness of deformation measurement with a depth camera. The results indicated that a depth camera can detect a minute slope deformation over a short distance even under rainy conditions. However, greater depth resolution and a stable measurement depth are required for accurate long distance measurements. Therefore, a minute slope deformation over a long distance could be detected by using a high-precision depth camera, which could also be applied to a slope failure prediction method and as a tool to support safety monitoring during firefighting (rescue operations).

Key words: Depth camera, Slope failure, Deformation measurement, Rescue operation, Safety monitoring

1. はじめに

近年、局地的な短時間豪雨や大型の台風により大規模な気象災害が頻発している。平成 30 年 7 月豪雨や令和元年台風 19 号の日本列島上陸時には、広範囲にわたる領域に大雨特別警報や土砂災害警戒情報が発令され、家屋の浸水や河川の氾濫、土砂災害等が多数発生した^{1),2)}。このような大規模災害の発生時には、消防機関をはじめとする対応機関はその総力を挙げて災害対応や住民の救助活動等に尽力する必要がある。しかし、災害現場で活動する消防隊員も常に危険と隣り合わせにある。例えば、昭和 47

年 7 月豪雨により発生した高知県土佐山田町繁藤の土砂災害では、警戒中であった消防団員 1 名が土砂崩れに巻き込まれた。その団員の救助活動中に大規模な土砂崩れが再度発生し、これにより消防職員・団員を含む 60 名もの人々が犠牲となった事例がある³⁾。ほかにも、平成 26 年 8 月豪雨により広島県広島市内で多数の災害が発生した際、活動していた広島市消防局の職員 1 名が土石流に飲み込まれ犠牲となった事例もある⁴⁾など、救助活動中の二次災害により命を落とすこともある。また、大規模な土砂災害に巻き込まれた住民の救助活動には、長時間か

* 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門

つ多数の人員を必要とする場合が多いことから、それだけ二次災害の発生に巻き込まれる危険性も高くなる。

現在、総務省消防庁の警防活動時等における安全管理マニュアル⁵⁾の中では、土砂災害時の救助活動中の安全管理において、安全監視員を配置して目視により土砂災害の兆候がないかを注視し、危険があれば注意喚起や退避命令を行うことを基本として示している。しかし、土砂災害発生の兆候は多様であり、発生の直前までは変化も微小なものであるため、すべてを目視のみで把握することは困難である。また、活動が長時間にわたる場合、安全監視員の交替が行われるため、活動初期からの一貫した変化や異変を把握することは難しくなり、目視による安全監視には限界がある。

土砂災害の兆候を検知する既往の研究として、傾斜計や伸縮計を用いて斜面の変位を直接計測する方法が挙げられる。これらの計測結果を用いることで、斜面の崩壊時刻の予測を行う手法が提案され実用化されている^{6),7)}。しかしながら、傾斜計や伸縮計の設置には一定の手間が掛かることや、効果的な設置場所の選定等にも専門知識が必要となる。さらに、これらの機器を用いた計測範囲は局所的なものであり、斜面を広範囲に監視することを必要とした救助活動の場合、計測機器を多地点に設置する必要があることから、容易ではない。

また、上述した計測方法とは異なる非接触での計測手法として、高精度な 3 次元測量 (3D レーザースキャナ) や、静止画や動画等を用いた 3 次元画像解析手法が挙げられる。新井場⁸⁾は、3D レーザースキャナを用いて崩壊前の斜面変位計測を行い、斜面表面の微小な変位を検知することが可能であることを示した。石澤ら⁹⁾は、2 台のデジタルカメラを用いた 3 次元画像解析から、地表面に設置したマーカーを計測することで降雨時における斜面の変位挙動を観測できる可能性を明らかにした。しかしながら、3 次元測量機器の多くは高価であり、1 回の計測に時間を要することや、機器本体も大型なものが多いため、設置の自由度が低いという課題も挙げられる。また、3 次元画像解析を行うためには、マーカーの設置が必要であることから、傾斜計や伸縮計の設置と同様に、専門知識が必要となる。迅速な対応が求められる救助活動において、上述した計測機器を用

いることは、未だ課題が多いと考えられる。

そこで筆者らは、現場での救助活動に求められる即応性、設置の容易さ、広範囲の安全監視、専門知識が不要な計測手法を念頭に考慮し、容易にリアルタイムで非接触の距離計測が可能なデプスカメラに着目した。

本報告では、土砂災害時の救助活動の安全監視に用いることを想定し、小型および実物大の模型斜面の崩壊実験過程の変位計測を行うことで、デプスカメラによる斜面の変位計測の有効性を検証した。

2. デプスカメラについて

2.1 デプスカメラの原理と特徴

デプスカメラとは、レーザー光が反射するまでに掛かる時間から距離を計測する ToF(Time of Flight)方式¹⁰⁾や、2つのカメラから得られる画像を用いて距離を計測するステレオビジョン方式¹¹⁾を用いることで、カメラからの奥行き距離等の三次元情報を取得することができる機器である。本研究では、ステレオビジョン方式のデプスカメラを使用している。機器本体は手のひらに乗るサイズであり、非常にコンパクトである(図 1)。



図 1 使用したデプスカメラの外観
Fig. 1 Exterior of the depth camera used in this report.

次に、ステレオビジョン方式による測距原理について説明する。図 2 のように、仕様・性能等が同一の 2 つのカメラ (焦点距離を f 、カメラ間距離を B とする) を人間の目のように平行に配置して、対象物 P を撮影したとき、左右のカメラで撮影した対象物 P の写真座標系における水平位置は $\Delta x = x_l - x_r$ だけずれる。このとき、 x_l : 左カメラ写真における対象物 P の水平位置、 x_r : 右カメラ写真における対象

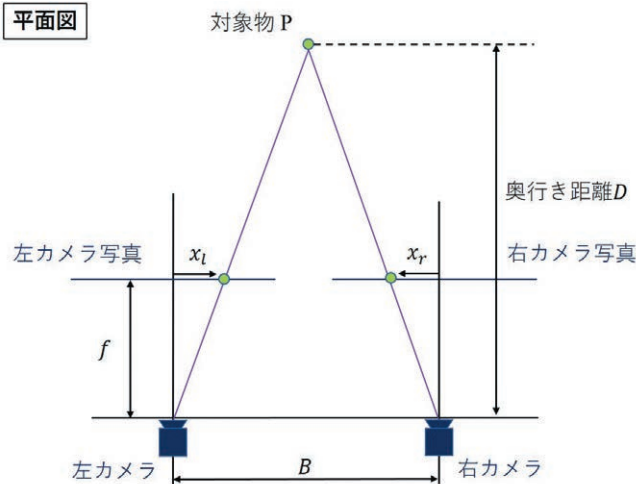
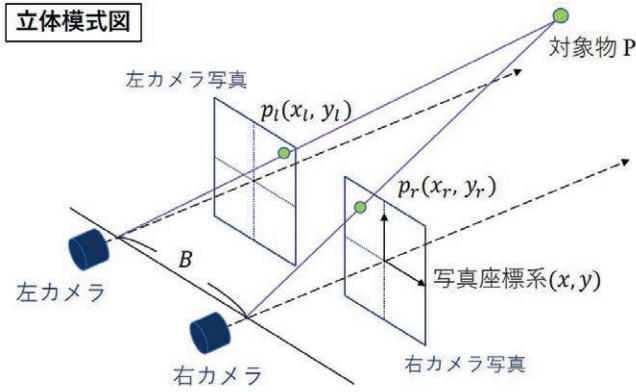


図2 ステレオビジョンによる測距原理の模式図
Fig. 2 Measurement principle of stereo vision.

物 P の水平位置である。上記の位置ずれ量 Δx は視差とよばれるもので、視差が分かれば、三角形の相似から奥行き距離 D は式 (1) により求めることができる。

$$D = \frac{f \cdot B}{x_l - x_r} = \frac{fB}{\Delta x} \quad (1)$$

なお、左右のカメラが同一の高さで平行に配置されていれば、写真座標系における対象物 P の鉛直位置 y_l および y_r は同一であり、 $y_l = y_r$ が成り立つ。また、奥行き距離 D の計算上も使用しない。以上の原理を用いることにより、デプスカメラで風景を撮影すると、画像内の各ピクセルに奥行き距離を含む距離画像(以下、デプスフレームと称する)が得られる。図3にデプスカメラから得られたデータの例を示す。図中左の画像はデプスフレームを得るために撮影された通常の写真(以下、原画像と称する)であり、図中右のコンター図は座標等が原画像に対応したデ

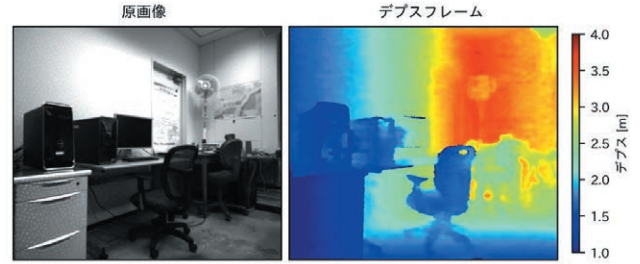


図3 デプスカメラから得られるデータの例
Fig. 3 Example data from the depth camera.

プスフレームである。デプスフレームには1ピクセル毎に計測された奥行き距離値が含まれており、コンター化を行うことで、カメラからの奥行き距離を可視化することができる。図3のコンター図を見ると、カメラからの奥行き距離が近いものは青く、遠いものは赤く可視化されており、画像内の広い範囲を計測できていることが分かる。さらに、デプスカメラの特徴として挙げられるのが、リアルタイム性である。使用するデプスカメラの仕様や性能にもよるが、概ね最低でも1秒当たり6枚のデプスフレームが出力されるので、計測にある程度の時間を要する3Dレーザースキャナと比較すると、時間分解能は大幅に優れていると言える。加えて、計測対象物が画角内に収まるように設置して機器を起動すれば計測が可能なので、設置場所の選定を容易に行えることも大きな利点の1つである。

以上で述べた特徴(機器のコンパクトさや設置の容易さ、データのリアルタイム性)は土砂災害現場における救助活動のような、即応性や簡易性が必要とされる用途に有効であると言える。

2.2 デプスカメラの距離分解能

前節ではデプスカメラの特徴や優位性について記述したが、その一方で、デプスカメラで計測される奥行き距離には精度面における課題もある。視差が Δx の時の奥行き距離を D 、視差が最小単位分 (dx) だけ増加した時の奥行き距離を D' とすると、距離分解能 ΔD は次のように求められる。

$$\Delta D = D - D' = \frac{fB}{\Delta x} - \frac{fB}{\Delta x + dx}$$

上式を整理すると、次式を得る。

$$\Delta D = \frac{dx \cdot D^2}{fB + dx \cdot D} \cong \frac{dx \cdot D^2}{fB} \quad (2)$$

このとき、 dx は最小視差(単位：ピクセル)と呼ばれるもので、機器や撮影状況にもよるが、通常、1.0ピクセル以下であることが多い。また、分母中の $dx \cdot D$ が距離分解能 ΔD に与える影響は非常に小さく、省略することができる。

式(2)より、デプスカメラの距離分解能は計測対象までの距離 D が離れるのに比例して、二次関数的に低下していくため、遠距離の計測になると小さな変位を検知することは難しくなることが予想される。距離分解能を向上させるためには、カメラ間距離 B を長くすることや、焦点距離 f の長い(画角の狭い)カメラを用いることが有効であるが、デプスカメラ本体のコンパクトさや、ある程度の画角は確保しなければならないことから、デプスカメラを用いる上で距離分解能については一定の限界がある。

以上で述べた特徴を有するデプスカメラを用いて、斜面崩壊時の変位計測への適用性について検証していく。検証はまず小型模型土槽を用いた実験で有効なデータ整理・分析方法の検証を行い、次に実物大の模型斜面の崩壊実験により適用性を検証した。

3. デプスカメラを用いた斜面の変位計測と計測データの整理・分析方法

デプスカメラによる斜面の変位計測の有効性を検証するため、小型の模型土槽を用いて斜面の崩壊実験の計測を行い、計測データの整理・分析を行った。

3.1 小型模型土槽を用いた実験の概要

実験には、斜面長 50 cm、幅 25 cm、傾斜角度 30° の小型模型土槽と土槽底部に地下水を想定した給水システムを有する小型実験装置(図4)を使用した。模型斜面は、土槽内に含水比を均一にした珪砂で厚さ 3 cm になるよう作成した。給水は、3つある地下水給水箇所のうち、図4に示す最下流の1箇所のみから行った。模型斜面の変位計測に用いるデプスカメラは Intel 社製の RealSense D435i を使用した。主な諸元・性能は表1のとおりである¹²⁾。本デプスカメラを模型斜面に対して正対した位置に設置して計測(録画)を行った(図5, 図6)。なお、計測時間は斜面に給水を行う直前から崩壊発生後までであり、フレームレートは1秒間に6枚(6 frame/sec.)の設定とした。

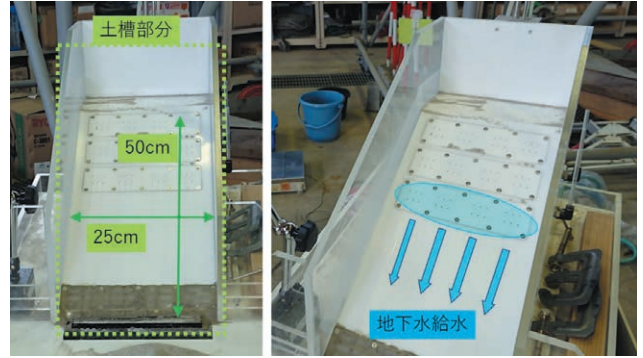


図4 小型実験装置の概要
Fig. 4 Small-scale experimental device (earth tank and water supply spots).

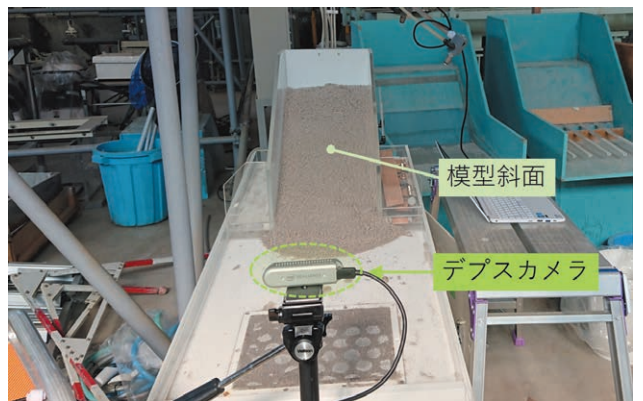


図5 実験の様子
Fig. 5 View of experiment.

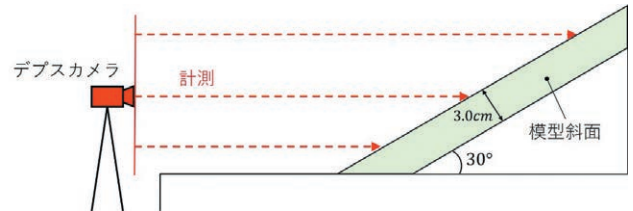


図6 デプスカメラの配置図
Fig. 6 Arrangement of the depth camera.

表1 使用したデプスカメラの諸元・性能
Table 1 Specification of the depth camera used in this report.

項目 [単位]	数値
最大解像度 [ピクセル]	1280×720
フレームレート [frame/sec.]	6, 15, 30
カメラ間距離 [mm]	50
焦点距離 [mm]	1.93
画角(水平×垂直) [°]	85×57(±3)
機器寸法(幅×奥行×高さ) [mm]	90×25×25

3.2 計測データの整理・分析方法

2章で述べたように、デプスカメラで計測することでカメラからの奥行き距離を含んだデプスフレームが得られる。その計測データを用いて斜面変位の可視化や変位量の経時変化を分析するために、以下の手順で整理を行った。

- (i) 時刻 t において得られたデプスフレームと直前の5フレーム分を合わせた計6フレームを平均化して時刻 t のデプスフレームとする。この処理を1フレームずつオーバーラップして繰り返す。
- (ii) 斜面に給水を開始した時刻におけるデプスフレームを初期値とし、初期時刻以降の時間のデプスフレームとの差分を取ることで、奥行き方向の変位量(以下、デプス変位量と称する)の分布が得られる。このデプス変位量の分布をコンター化し、斜面変位の可視化を図る。この整理によって得られたデプスフレームの差分を差分フレームと称し、経時変化を分析する。
- (iii) デプス変位量の経時変化を見るため、差分フレーム中の座標 (i, j) にある1ピクセルの値を d_p とし、給水開始から崩壊後までの1ピクセルのデプス変位量の経時変化を分析する。
- (iv) デプスカメラは斜面全体の変位を計測することができるという特徴を利用して、1ピクセルでの分析とは別に、面的な複数ピクセルのデプス変位量の分析を行う。差分フレーム中で任意に指定したエリア(サイズ M 画素 \times N 画素)の値をすべて抽出し、それらの平均値をそのエリアのデプス変位量 d_R とすると、 d_R は式(3)で表せる。

$$d_R = \frac{1}{MN} \sum_{i=-M/2}^{M/2} \sum_{j=-N/2}^{N/2} d_{i,j} \quad (3)$$

ただし、 $d_{i,j}$ は指定したエリアの中心位置 (i, j) のデプス変位量である。(iii)と同様に、 d_R も給水開始から崩壊後までの経時変化を分析する。

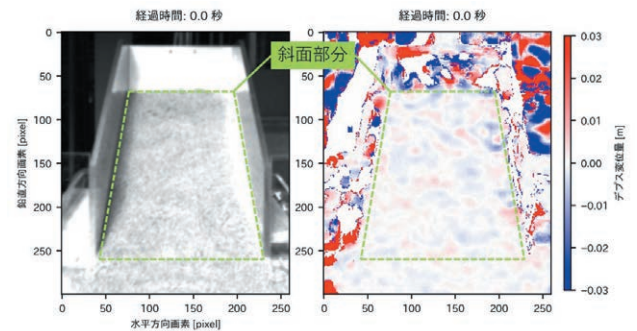
3.3 計測データの分析

3.3.1 差分フレームのコンター化による分析方法の検証

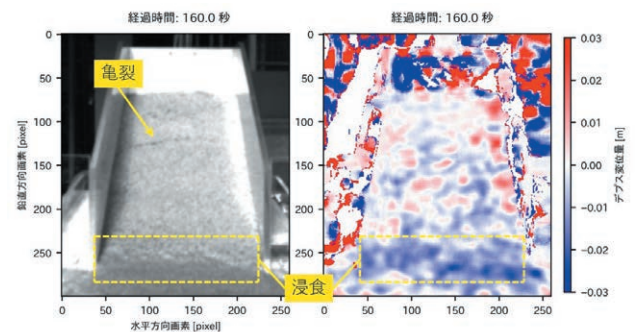
本章の実験において、斜面の崩壊は給水開始後163秒で発生した。図7にデプスカメラで計測した3時刻における原画像とそれに対応する差分フレームを示す。差分フレーム中の青色のコンターは負の

変位(カメラから遠ざかる方向)を表し、赤色は正の変位(カメラに近づく方向)を表している。図7には給水開始時刻(経過時間0.0秒)、崩壊の直前(経過時間160.0秒)および崩壊後(経過時間165.0秒)の3つの時刻を示す。

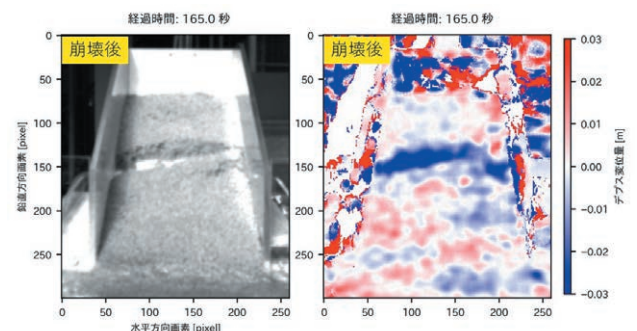
図7(a)の差分フレームに注目すると、(a)の時刻は地下水の供給がなく、変位が生じていない状態にも関わらず、差分フレームのコンターに僅かながら変化が見られる。これはデプスカメラでの計測の際に、同定される視差の量がゆらぎを持つことで、計



(a) 給水からの経過時間 0.0 秒



(b) 経過時間 160.0 秒(崩壊直前)



(c) 経過時間 165.0 秒(崩壊後)

図7 各時刻における原画像(左)とそれに対応する差分フレームのコンター(右)

Fig. 7 Original image (left) and depth deform contour (right) at each time.

測値にも約 1～2 mm のばらつきが生じているためである。また、斜面に対し正対したデプスカメラで計測することで、1ピクセル内に含まれる斜面部分も奥行方向の勾配を有しているため、計測値に誤差が生じ得ることも要因として考えられる。

図 7 (b) は崩壊直前の時刻である。原画像中では斜面中腹に亀裂が発生しており、法先付近では浸食が発生していることが確認できる。差分フレームの対応する部分に注目すると、亀裂が発生した斜面中腹部分には青色や赤色のコンターが分布している。これは計測されたデプス変位量が図 7 (a) の差分フレームで見られたばらつきを超えたため、斜面の変位を可視化できていると考えられる。また、法先付近には濃い青色の変化が見られるが、これは浸食により生じた比較的大きな変位が表れている。

図 7 (c) は崩壊後の時刻であり、原画像中では亀裂の発生していた部分よりも下側の斜面が流下していることが確認できる。差分フレームでは、それと対応して流下により砂が失われた部分は濃い青色の変化を示しており、斜面下部では流下した砂が堆積することでほらみだしを生じた斜面の変化が赤色のコンター変化として明瞭に表れている。

以上のように、デプスフレームの差分を取ってコンター化することで、斜面表面の変位を可視化することが可能であると言える。

3.3.2 デプス変位量の経時変化による分析方法の検証

本項では、3.2 の (iii), (iv) の手順により、差分フレーム中の任意の 1ピクセルにおけるデプス変位量 d_p と、指定したエリアの面的なデプス変位量 d_R をピックアップし、給水開始から崩壊までの経時変化を分析する。なお、 d_R の計算方法は式 (3) である。

d_p と d_R の指定は図 8 に示すとおり、差分フレームのコンターや原画像から判断して、斜面に変位が生じている部分を d_R の計算対象エリアとした。次に、指定エリアの中心軸に沿って、エリアの上端、中心、下端にあたるピクセルのデプス変位量をそれぞれ $d_{p(01)}$, $d_{p(02)}$, $d_{p(03)}$ とした。

図 9 に給水開始から崩壊までの $d_{p(01)} \sim d_{p(03)}$ の経時変化を示す。図 7 (a) で見られたように、 d_p は常に約 1～2 mm のばらつきを持っているが、それを超えるデプス変位量は検知できており、変位の増加傾向を読み取ることができる。 $d_{p(01)}$ は給水開始後 10 秒あたりからデプス変位量が正の方向に増

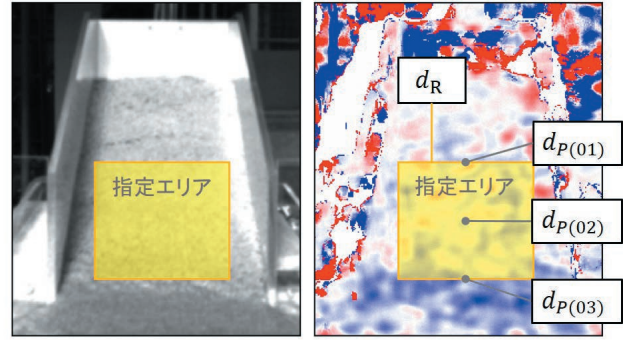


図 8 d_p および d_R の指定場所
 Fig. 8 Diagram showing the designated locations of d_p and d_R .

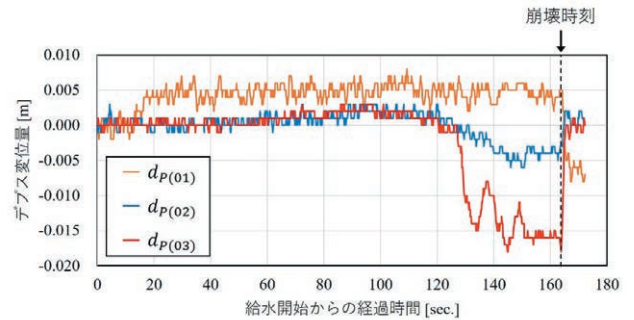


図 9 d_p の経時変化
 Fig. 9 Time histories of d_p .

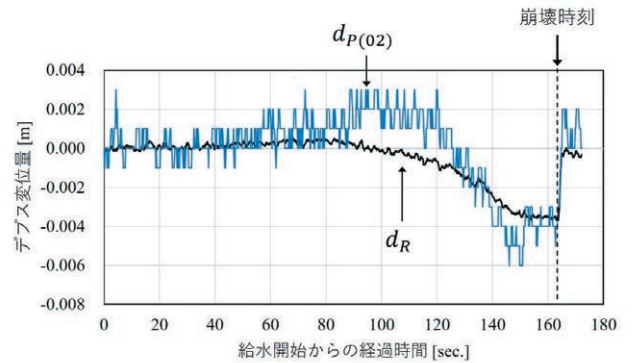


図 10 d_R と $d_{p(02)}$ の経時変化の比較
 Fig. 10 Comparison between d_R and $d_{p(02)}$.

加しており、以降は崩壊時刻まで主な変化はない。 $d_{p(02)}$ と $d_{p(03)}$ は経過時間 120 秒までは類似した傾向を示しており、それ以降はどちらもデプス変位量が負の方向に増加している。 $d_{p(03)}$ は変位の増加傾向が明らかに大きいですが、これは $d_{p(03)}$ が斜面法先付近のデプス変位量であり、浸食の影響を捉えているためである。経過時間 150 秒からは $d_{p(02)}$ と $d_{p(03)}$ の経時変化は停滞し、崩壊時刻で変位は急変している。次に、 d_R と指定エリア中心のデプス変位量 $d_{p(02)}$ の経時変化を比較したものを図 10 に示す。両者を比較してみると、 d_R は時間の経過に伴うばらつきが少

なく、変位の増加傾向を滑らかに読み取ることができ、これは d_R が複数のデプス変位量の統計的な平均であるため、1ピクセルの変位量と比較してばらつきが抑えられているためである。また、 d_R は斜面に生じた変位の拡がりによっても変化するため、より細かく変位の増加傾向を表すことができている。図 10 の場合であれば、指定エリア内における負のデプス変位量の分布が時間の経過とともに増加することで、結果的に d_R も負の方向に増加していると解釈することができる。

3.3.3 整理・分析方法の考察

デプスカメラの計測データの整理・分析結果から、次のことが確認できた。

- (1) 差分フレームをコンター化して表示することで、斜面内の変位が生じている場所を可視化して表示することが可能である。
- (2) 任意に指定した1ピクセルのデプス変位量 d_p の経時変化に注目した場合、変位の生じているエリア内でも、場所によって大きく異なる傾向を示す結果となった。また、時間の経過に伴うばらつきが大きく、変位の増加傾向を明確に読み取ることが難しい。
- (3) 面的なデプス変位量 d_R を算出することで、 d_p と比較してばらつきが少なく、より細かい変位の増加傾向を読み取ることができる。

以上から、デプスカメラで斜面の変状を検知するために、まず差分フレームのコンター化を行い、変位の生じている部分を強調して可視化することで、斜面内のどの部分に崩壊の危険性があるかを判別する手がかりになると考えられる。また、デプス変位の経時変化を見るには、1ピクセルに注目するよりも、面的なデプス変位量の平均を算出することで、より細かく変位の増加傾向を捉えることができる。これらを踏まえ、デプスカメラの計測データの有効な整理・分析方法として、差分フレームのコンター化と面的なデプス変位量の平均を算出する方法が有効であると言える。なお、本章で行った整理・分析結果は実験後の計測データを用いて行ったものであるため、リアルタイムに実行できているわけではないが、計算方法は単純であるため、デプスカメラでリアルタイムに得られるデータから即時出力することも十分可能であると考えられる。

本章で検証を行った整理・分析方法を用いて、次

章では実物大の模型斜面実験の計測を行い、デプスカメラの適用性の検証を行った。

4. デプスカメラの適用性の検証

本章では、実物大の斜面における崩壊過程をデプスカメラにより計測し、降雨時においても斜面に生じる変位を検知できるかの分析を行い、デプスカメラの適用性について検証していく。

4.1 実物大の模型斜面実験の概要

図 11 に実験の概要図を示す。底面と側面とが不透水の土槽にマサ土を用いて模型斜面を作製した。模型斜面の形状は、斜面長 10.00 m、幅 3.90 m、鉛直深さ 1.15 m、傾斜角度 30° である。斜面内には様々な計測センサを設置し、種々の物理量変化を 15 秒間隔で測定しているが、本報告では地表面変位の議論を主とするため、図 11 に示すインバー線式伸縮計 SD の結果と比較する。インバー線式伸縮計では、模型斜面後方の不動点と斜面上に設置した杭(移動点)の間をインバー線で結ぶことで、斜面接線方向の地表面変位を計測している。デプスカメラは3章と同機種の RealSense D435i を2台用いて計測した。1台は、斜面全体が画面内に入るよう斜面法先から 5 m 離れた場所で斜面に正対して設置した(以下、カメラ A と称する)。もう1台は、近距離からの計

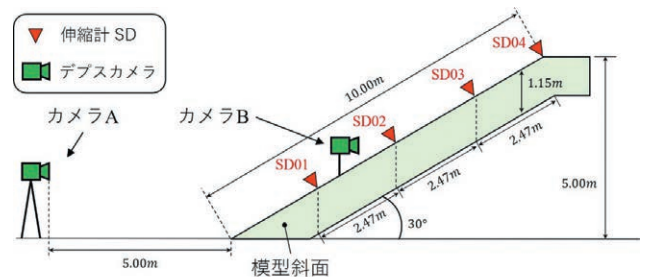


図 11 模型斜面実験の概要図

Fig. 11 Schematic diagram of model slope experiment.

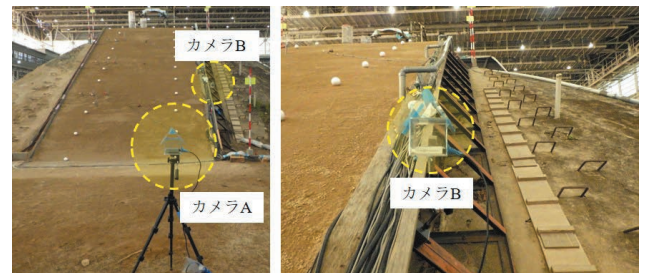


図 12 デプスカメラの設置状況

Fig. 12 Arrangement of depth cameras (Camera A and B).

測を目的とし模型斜面脇の土槽枠にマグネットで固定することにより、斜面の中腹～天端付近を対象に計測した(以下、カメラ B と称する)。カメラの配置状況を図 12 に示す。

図 13 にカメラ A および B から取得された原画像とデプスフレームを示す。本実験では、斜面の奥行き方向の変位をデプスカメラで計測するという目的の統一を図るため、カメラ B は斜面に対して正対した方向を向けて計測を行った。その関係上、カメラ B は画角の一部にのみ斜面が映り込む形となっている。カメラ A については遠距離からの計測であるので、斜面全体を画面内に収めることができている。

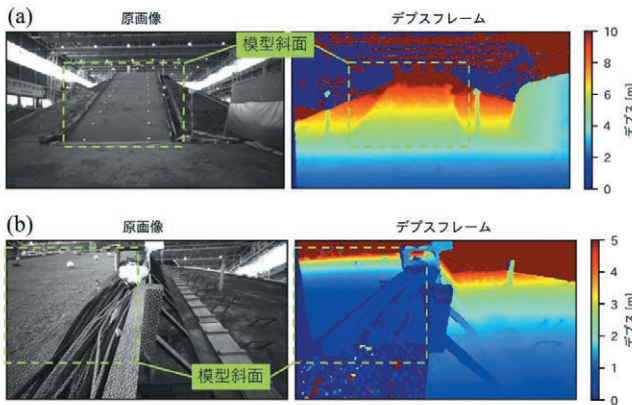


図 13 設置したカメラからの原画像とデプスフレーム (a)カメラ A, (b)カメラ B

Fig. 13 Original image and depth frame from Camera A and B. (a) Camera A, (b) Camera B.

4.2 実験結果

4.2.1 伸縮計による地表面変位の経時変化

図 14 に本実験の降雨履歴と地表面変位 d_{SD} の経時変化を示す。なお、地表面変位の向きとデプス変位の向きを統一するため、 d_{SD} は斜面下流に向かう方向の変位を負としている。そのため、降雨に伴い変位は負の方向に増大している。降雨条件は時間雨量 30 mm/h の履歴を 3 回与え、履歴毎に 36 時間以上の無降雨期間を設けた。斜面崩壊は 3 回目の降雨履歴中に発生した。そのため、以降は 3 回目の降雨開始時刻を「0」秒として述べていく。斜面崩壊は 9,326 秒後に土砂の流動が目視で確認できるようになり(以後、本時刻を流動開始時刻とする)、最終的に崩壊に至った。図 15 は 7,800 秒後からの地表面変位 Δd_{SD} の経時変化を示している。なお、本実験

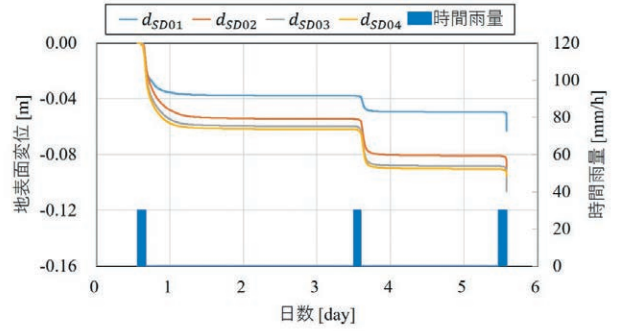


図 14 実験中の降雨条件と地表面変位 d_{SD}

Fig. 14 Rainfall intensity and ground surface displacement (d_{SD}) in the experiment.

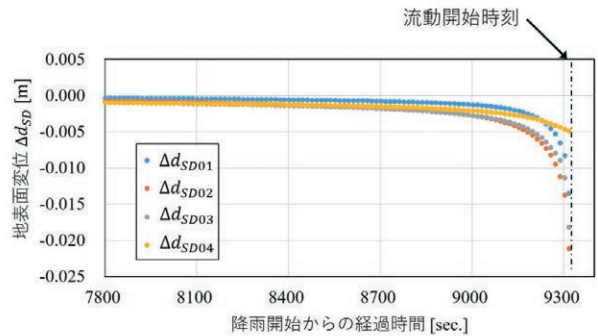


図 15 経過時間 7,800 秒からの地表面変位 Δd_{SD} の経時変化

Fig. 15 Time histories of Δd_{SD} from 7,800 second.

では 15 秒間隔で計測したため、流動開始時刻より 8 秒前(降雨開始から 9,318 秒)の計測値が最終値となっている。図 15 に注目すると、 Δd_{SD} は流動開始時刻に近づくにつれて累乗的に増加しており、特に SD02 と SD03 において、顕著な変位の増加傾向が見られる。

4.2.2 差分フレームの経時変化

本項ではまず、3.3.1 で行った整理と同様に、差分フレームをコンター化して斜面変位の可視化を図る。対象とするデータについては、図 15 から判断して、地表面変位の増加が顕著となり始める流動開始時刻の 300 秒前(9,026 秒)から土砂の流動後までのデータを対象とし、降雨開始から 9,026 秒の時刻のデプスフレームを初期値として、それ以降の時刻の差分フレームを整理した。

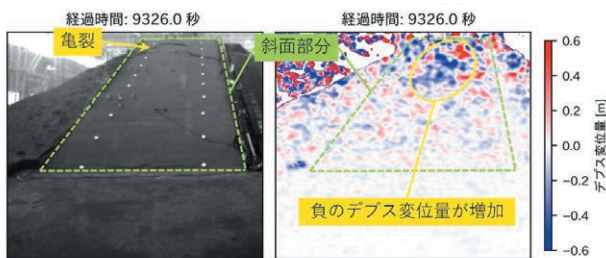
図 16 にカメラ A の 3 時刻における原画像と差分フレームのコンターを示す。なお、時刻は降雨開始から 9,326 秒後と 9,327 秒後、9,333.8 秒後とした。

図 16(a)を見ると、(a)は流動開始時刻のデータであるため、原画像上では斜面上部に亀裂が発生し、

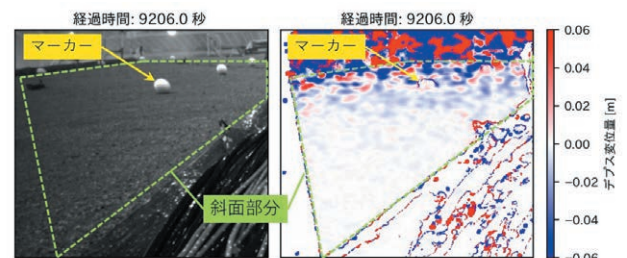
斜面が沈下している。差分フレームのコンターに注目すると、斜面下部では約 2 cm ~ 10 cm, 上部では約 10 cm ~ 30 cm 以上のばらつきが散見される。式 (2) を用いた距離分解能の概算では、 dx (最小視差単位) が良い条件であれば、斜面下部の距離分解能は 2 cm ~ 5 cm, 斜面上部の距離分解能は 10 cm ~ 15 cm であるのに対して、差分フレーム中に見られるばらつきはそれよりも大幅に大きい。これは降雨環境下による計測で最小視差単位 dx も低下しており、距離分解能の低下が著しくなっていることが原因のひとつと考えられる。しかし、図中に示した部分では約 40 cm ~ 50 cm の負のデプス変位 (青色) の分布が確認できており、流動開始時のような目視でも確認できる変位は検知できていると考えられる。図 16 (b) は流動開始時刻の 1 秒後 (土砂が流下している最中) の図である。斜面上部は土砂の流下によ

り大きく沈下しており、斜面下部においては上部とは反対に大きくはらみだしていることが原画像から確認できる。差分フレームでは、斜面下部に約 5 cm ~ 20 cm の正のデプス変位が多く分布している。これは (a) で述べた斜面下部におけるばらつきを超えたデプス変位が検知されていると考えられる。

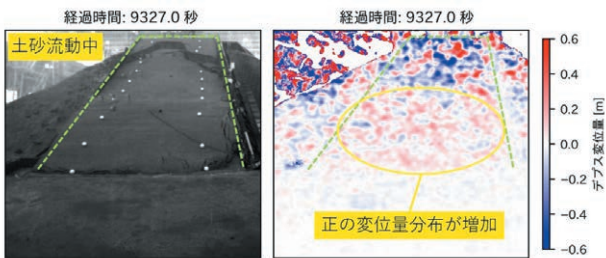
図 16 (c) は土砂の流動が停止した後の時刻である。斜面上部の土砂は流下で大部分が失われ、下部には流れ込んだ土砂が堆積していることが原画像から確認できる。差分フレームでもそれと対応して、斜面上部のコンターは青く、下部のコンターは赤く変化している。また、土砂が流下した範囲や堆積した場所と、差分フレーム上で変化が生じている場所は一致していることから、デプスカメラによる計測は原画像との写真座標上の位置ずれが少ないことも確認できる。



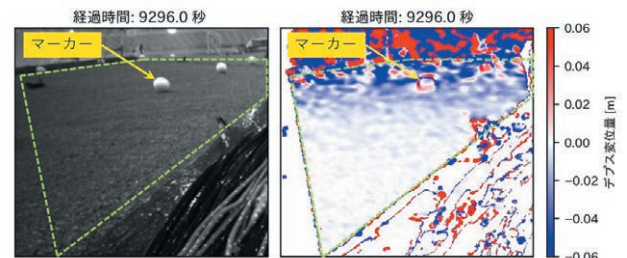
(a) 降雨開始から 9326 秒後 (流動開始時刻)



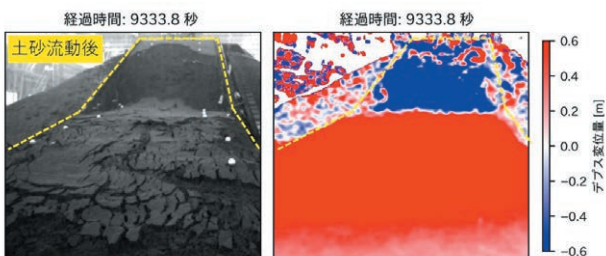
(a) 降雨開始から 9206 秒後 (流動開始時刻の 120 秒前)



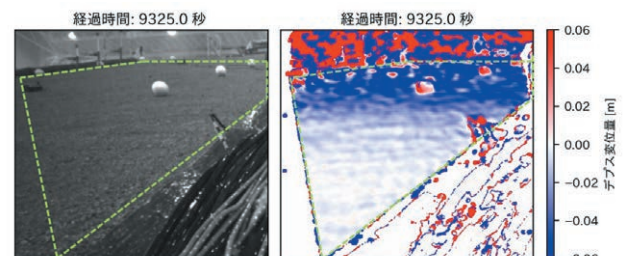
(b) 流動開始時刻の 1 秒後 (土砂の流動中)



(b) 降雨開始から 9296 秒後 (30 秒前)



(c) 土砂流動停止後 (降雨開始から約 9334 秒後)



(c) 降雨開始から 9325 秒後 (1 秒前)

図 16 カメラ A での各時刻における原画像 (左) と差分フレームのコンター図 (右)

Fig. 16 Original image (left) and depth deform contour (right) at each time (from Camera A).

図 17 カメラ B での各時刻における原画像 (左) と差分フレームのコンター図 (右)

Fig. 17 Original image (left) and depth deform contour (right) at each time (from Camera B).

次に、カメラ B の整理結果について示す。なお、土砂流動時に固定していたカメラが動いたため、カメラ B の計測データについては流動開始時刻までを取り扱うこととした。

図 17 にカメラ B の 3 時刻における原画像と差分フレームのコンターを示す。なお、時刻は降雨開始から 9,206 秒後（流動開始時刻の 120 秒前）と 9,296 秒後（30 秒前）、9,325 秒後（流動開始直前）を対象とした。また、図を見易くするために、斜面部分に該当する場所のみを切り取って表示している。

図 17 (a) は流動開始時刻の 120 秒前である。カメラ B は近距離での計測であるため、斜面部分のデプス変位のばらつきは約 1 cm 以下であり、こちらは降雨による計測値への影響も比較的少ないと考えられる。また、斜面部分は全体的に負のデプス変位を示す青色のコンターの分布が多くなっており、斜面上部に向かうにつれてコンターの色も濃くなっている（負のデプス変位量が大きい）傾向が見て取れる。

図 17 (b) は流動開始時刻の 30 秒前である。差分フレームに注目すると、(a) と比較して斜面部分を占める負のデプス変位は約 1 cm ～ 6 cm の分布が増加しており、コンターの変化として明瞭に表れている。また、図中にて指し示した 3 次元画像解析用⁹⁾の白球（マーカー）付近のコンターは、斜面の変化とは反対に赤色の変化が見られる。これは、地表面の変位に伴ってマーカーが斜面下部に向かって移動したことにより、結果としてデプスカメラに近づいた（正のデプス変位が生じた）結果と推測される。

最後に、図 17 (c) に注目する。(c) の時刻は流動開始時刻の 1 秒前であるので、斜面の変位もほぼ最大に達していると考えられる。それと矛盾なく、差分フレームのコンターには明瞭な変化が確認できる。すなわち、斜面上部のデプス変位量はほとんどの部分で 6 cm 以上に達しており、コンターは濃い青色に変化している。また、マーカーに該当する部分のコンターは濃い赤色の変化を示している。同図の原画像では斜面の変状を目視で確認できないが、差分フレームのコンターでは変化の度合い（崩壊までの切迫性）を客観的に捉えることができていると言える。

4.2.3 デプス変位量の経時変化

本項では、面的なデプス変位量 d_R の経時変化を見ていく。図 18 は d_R を算出した各対象エリアの場

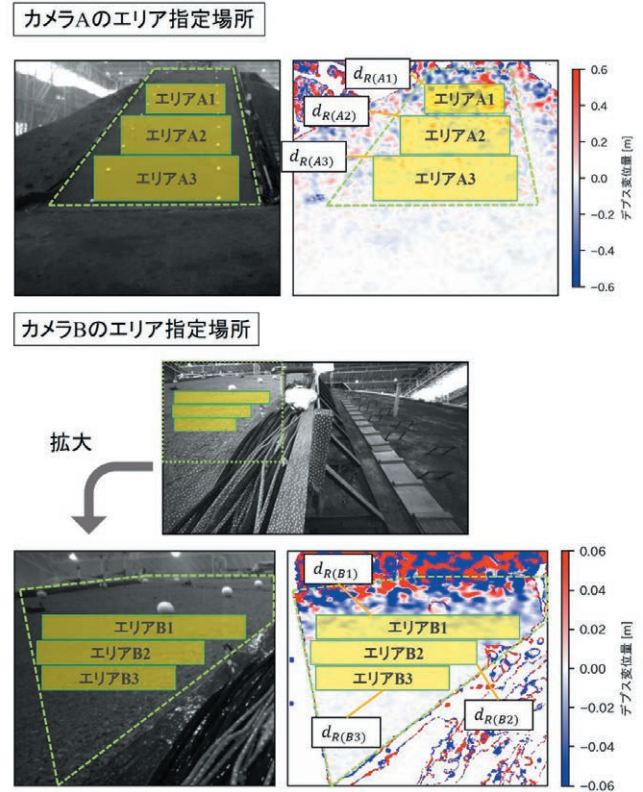


図 18 カメラ A, B におけるエリアの指定場所
 Fig. 18 Diagram showing the designated location of areas (Camera A and B).

所を示している。カメラ A では斜面全体を大きく 3 つに分類し、斜面上部をエリア A1、中部をエリア A2、下部をエリア A3 とした。カメラ B では、斜面部分のうち、主にマーカーがある場所よりも下部側の斜面部分を対象として、3 つのエリア (B1 ～ B3) に分割した。

図 19 にカメラ A における d_R の経時変化を示す。 $d_{R(A1)}$ はカメラから最も離れたエリアの変位量であるため、面的なデプス変位量の平均を算出してもばらつきは非常に大きく、1 秒程度の短い時間内で 10 cm 以上のばらつきが散見される。また、9,026 秒から流動開始時刻に至るまで、明確な変位の増加傾向も見られない。 $d_{R(A2)}$ と $d_{R(A3)}$ についても同様で、変位量のばらつきは $d_{R(A1)}$ と比較すると小さいが、流動開始時刻に至るまで、変位の増加傾向を読み取ることは難しいと言える。しかし、 $d_{R(A1)} \sim d_{R(A3)}$ のすべてで流動開始時刻以降からは明瞭な変化を見せており、目視でも確認できるような変化であれば、対象斜面から離れた位置で、かつ降雨環境下においても変位を検知できていることが確認できる。

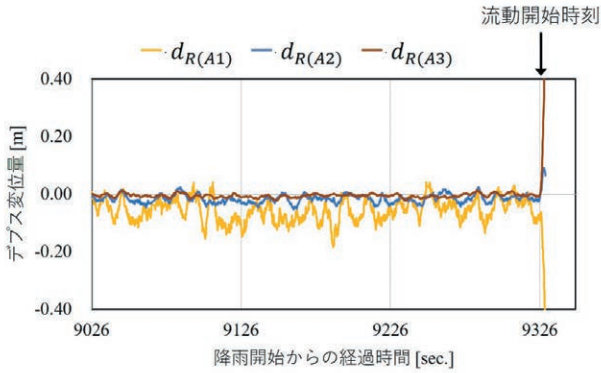


図 19 カメラ A における d_R の経時変化
Fig. 19 Time histories of d_R (Camera A).

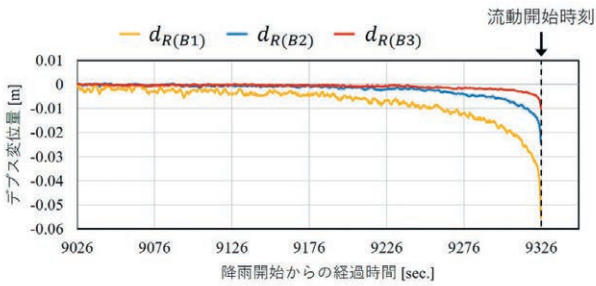


図 20 カメラ B における d_R の経時変化
Fig. 20 Time histories of d_R (Camera B).

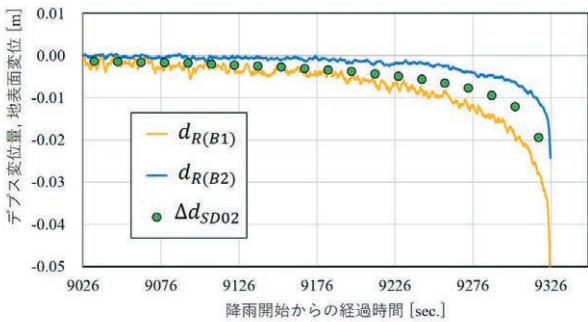


図 21 $d_{R(B1)}$ と $d_{R(B2)}$, Δd_{SD02} の経時変化の比較
Fig. 21 Comparison between $d_{R(B1)}$, $d_{R(B2)}$ and Δd_{SD02} .

図 20 にカメラ B における d_R の経時変化を示す。差分フレームのコンターでは、斜面上部側 (エリア B1 側) に向かうにつれて変化の度合いも大きくなっていったが、その見かけどおり、絶対的な変位量だけでみると $d_{R(B1)}$ は最も大きな変位を示し、 $d_{R(B3)}$ は最も小さな変位を示している。しかし、変位の増加傾向に注目すると、 $d_{R(B1)} \sim d_{R(B3)}$ の 3 つとも流動開始時刻に近づくにつれて累乗的に増加しており、類似した増加傾向を示している。なお、カメラからの距離の関係上、 $d_{R(B1)}$ のばらつきは他と比較して大きい、明確に変位が増加傾向にあるという特徴は十

分に読み取れる。

次に、カメラ B における d_R とインバー線式伸縮計による地表面変位 Δd_{SD} の経時変化との比較を試みる。図 21 に $d_{R(B1)}$ と $d_{R(B2)}$, Δd_{SD02} の経時変化をプロットしたものを示す。考慮すべき点として、伸縮計とデプスカメラでは計測している変位の方向が異なるため、両者の変位量は必ずしも一致するとは限らない。しかしながら、図 21 を見ると、両者の変位の増加傾向についてはよく類似している。これはデプスカメラで計測する変位の方向が必ずしも伸縮計と同じでなくとも、同様な変位の増加傾向が得られることを示している。

4.3 考察

本章では、デプスカメラを用いて降雨環境下で実物大模型斜面実験の変位計測を行い、3 章で有効と示されたデータの整理・分析方法により適用性を検証した。以下にその結果を踏まえた考察を記す。

図 16, 17 の差分フレームにおいて、斜面から 5 m 離れた位置からの計測 (カメラ A) では、遠距離からの計測であることに加え、降雨等が要因と考えられる距離分解能の低下が著しいことから、デプスカメラの計測値に大きなばらつきがあり、流動開始時刻以前の微小な斜面変位を検知・可視化することは困難であった。しかしながら、流動開始時刻以降の目視でも確認可能な変位については明瞭に可視化することができており、また、原画像上において斜面に変化が生じた場所と差分フレーム上で変化を示した場所は一致していたことから、変位の生じた場所を的確に示すことができていると言える。近距離からの計測 (カメラ B) では、距離分解能の低下が少ないため、流動開始時刻に近づくにつれて増加していく斜面の変位を明瞭に可視化できており、原画像で斜面の変状を見るよりも明確に崩壊の切迫性を表すことができていた。これら結果は、計測に用いるデプスカメラの性能をより良いものにする (距離分解能の優れたものを用いる) ことや、計測値のばらつきを低減させることにより、遠距離からの計測でも土砂流動開始前の変位を検知して可視化できる可能性を示している。

また、図 19, 20 のデプス変位量の経時変化において、カメラ A では、デプス変位量のばらつきが大きく、流動開始時刻以前で変位の増加傾向を読み取ることが難しいが、流動開始時刻以降は急激に増加

しており、時間的な遅れがほとんどなく、リアルタイム性を有していると言える。カメラ B では、デプス変位量が流動開始時刻に近づくにつれて累乗的に増加しており、伸縮計による地表面変位と比較すると(図 21)、類似した変位の増加傾向を示した。これら結果により、デプスカメラによる地表面の変位計測が既往の斜面崩壊の時間予測法に適用できる可能性も十分に考えられる。

以上のことから、デプスカメラによる斜面の変位計測は、降雨環境下であっても適切な設置場所の選定や計測に用いるカメラを高精度にすることにより、十分な適用性を有すると言える。また同時に、機器本体がコンパクトであり計測に専門的な知識を要しないことに加え、広い範囲を計測できることから、土砂災害時の救助活動のような、時間的に切迫しており、人員の限られた状況化における斜面の安全監視の補助としても適用性があると言える。

5. まとめ

本報告では、コンパクトでかつリアルタイムな 3 次元計測が可能なデプスカメラを用いて、斜面崩壊時の変位計測への適用性を検証することを目的に、小型の模型土槽を用いた模型斜面の崩壊実験、および、実物大の模型斜面の崩壊実験時における地表面の変位計測とデータ整理・分析を行った。その結果から得られた知見を以下に示す。

- (1) デプスカメラの距離計測値から斜面の地表面変位を数値化して得られた結果を用いて、斜面に変位の生じた部分を可視化して表示することができる。
- (2) 変位の経時変化を見るとき、1 ピクセルの情報を用いるよりも、任意の対象範囲内の複数ピクセルの変位量を平均することで、変位の増加傾向をより細かく読み取ることができる。
- (3) 上記(1)(2)の整理方法を用いて実物大の模型斜面の崩壊実験による適用性の検証を行った結果、対象斜面から 5 m 離れた位置からの計測では、土砂の流動が開始してからの、目視でも確認可能な変位を検知することができた。近距離に配置したデプスカメラの計測では、流動開始時刻の数分前にあたる、累乗的に変位が増加するフェーズにおいて、斜面に生じた変位を明瞭に可視化することができた。さらに、デプスカ

メラにより計測された変位を伸縮計による地表面変位と比較した結果、類似した増加傾向を示した。

以上のように、デプスカメラを用いた斜面の変位計測は崩壊検知に対する適用性を有すると言える。また、デプスカメラは機器本体がコンパクトで設置の自由度が高く、計測に専門的な知識が不要であること、広範囲を速やかに計測できることから、土砂災害時の救助活動において、目視での安全監視を補助するためのツールとしても十分な適用性を有すると言える。

今後は、デプスカメラの性能を高精度なものにすることや、計測値のばらつきを低減させる方法を模索することで、遠距離からでも斜面崩壊前の微小な変位を検知できる可能性が考えられ、近距離の計測においてはさらに細かいデプス変位量の増加傾向を読み取ることができ、既往の斜面崩壊時間の予測法にも適用できる可能性が十分に考えられる。

謝辞

本研究にあたり、株式会社東洋計測リサーチの皆様には模型斜面の作成および計測等にご尽力、ご助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 三隅良平(2020)：平成 30 年 7 月豪雨における被害の概要。防災科学技術研究所主要災害調査、第 53 号、1-32、<http://doi.org/10.24732/nied.00002167>。
- 2) 内閣府(2020)：令和元年台風 19 号に係る被害状況等について(令和 2 年 4 月 10 日 9 時 00 分現在)。
(http://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon19/pdf/r1typhoon19_45.pdf, 2020.09.30)
- 3) 土佐山田町(1973)：昭和 47 年 7 月豪雨・繁藤山くずれ災害記録。6-17、楠目印刷有限会社。
- 4) 総務省消防庁：8 月 19 日からの大雨等による広島県における被害状況及び消防の活動等について。
(<https://www.fdma.go.jp/disaster/info/assets/post755.pdf>, 2020.09.30)
- 5) 総務省消防庁：警防活動時等における安全管理マニュアル。
(https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/kento002.html, 2020.09.30)
- 6) 福園輝旗(1985)：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, Vol.22, No.2, 8-13.
- 7) 石澤友浩・酒井直樹・諸星敏一・福園輝旗(2013): 傾斜計を用いた斜面崩壊時の地中内部変位計測による崩壊予測の有効性. 地すべり, Vol.50, No.6, 268-278.
- 8) 新井場公德(2006): 斜面の二次危険度予測のための遠隔計測手法に関する研究. 消防研究所報告第 100 号, 17-26.
- 9) 石澤友浩・檀上徹・尾上修浩・酒井直樹・福園輝旗(2019): 3次元画像解析による降雨時斜面の変位挙動の検知について. 第16回地盤工学会関東支部研究発表会, 54-56.
- 10) 安富啓太・川人祥二(2016): Time-of-Flight カメラ. 映像情報メディア学会誌, Vol.70, No.6, 880-885.
- 11) 公益財団法人 画像情報教育振興協会(2015): デジタル画像処理 [改定新版]. 318-325, 日興美術株式会社.
- 12) Intel Corporation: Intel® RealSense™ Depth Camera D435i. (<https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435i/>, September 30, 2020)
- (2020年10月27日原稿受付,
2020年12月2日改稿受付,
2020年12月2日原稿受理)

要 旨

変位計測による斜面崩壊の危険度評価手法を最前線で活動する消防の立場で用いる場合，計測機器の設置の手間や，設置時に専門知識を要するなど，実装には現状としての課題が多い．そこで，現場での救助活動に対する即応性，設置の容易さ，広範囲の安全監視，専門知識が不要な計測手法を念頭に考慮し，非接触の距離計測をリアルタイムに行うことができるデプスカメラに着目した．本研究では，模型斜面の崩壊実験の過程をデプスカメラで計測し，その有効性を検証した．その結果，精度においては分解能の限界や計測値のばらつき等の課題はあるものの，近距離での計測においては，降雨時という悪条件下においても微小な変位の計測が可能であった．そのため，より高精度のデプスカメラを用いれば，遠距離計測でも微小な変位の検知が可能となるため，既往の変位計測による斜面崩壊予測への適用や消防活動時の安全監視の補助ツールとしても適用が期待できる．

キーワード：デプスカメラ，斜面崩壊，変位計測，救助活動，安全監視