

携帯型斜め写真撮影システム (PALS) による 3次元災害地形把握

川上 誠博・下村 博之(株式会社パスコ)

1. 要旨

近年、各地で地震・火山・土砂災害等の自然災害が多発している。特に土砂災害は、気候変動の影響を受け、規模の甚大化や頻度増加の傾向が見られる。例えば、平成 26 年の広島土砂災害や平成 25 年の熊本県阿蘇地区での土砂災害は、広範囲で同時多発的に被害が及んだ。また、火山噴火や天然ダム形成・決壊といった現象が時間ともに進行し、二次災害範囲の移動や拡大の可能性が高い。このため、被害の拡大防止や軽減を図るには、迅速に災害範囲を把握し、応急対策を行うことが重要となる。

一方で、デジタル写真と多視点画像解析 (Structure from Motion : 以下、SfM と称す) ソフトウェアの普及に伴い、簡易的に 3 次元モデルデータを生成する計測技術が注目されている。これらの地形データ生成技術を災害時に活用することで、災害状況の確認とほぼ同時に地形データを生成し、迅速な初動体制の確保が実現できると考えられる。

本報告では、SfM 解析への応用が可能な斜め写真撮影システムの概要と、災害時における同システム及び 3 次元モデルの活用事例、および精度検証について記す。

2. 目的

平成 25 年 10 月 16 日に発生した台風 26 号による伊豆大島土砂災害に際し、迅速に災害状況の把握を行うため、携帯型斜め写真撮影システム (Portable Aerialphotography and Locator System : 特許 No.5373140 他) (以下、PALS と称す) による空撮から、パノラマ写真

やオルソモザイク画像を作成した。発災当日に撮影された唯一の鮮明な空撮画像として、いち早く国土交通省、東京都、公益社団法人砂防学会などの関係機関に提供した。さらに、SfM 解析を用いた 3 次元モデルデータを生成し、その後の砂防学会緊急調査団の現地調査や判読において、災害直後の状況分析に活用された (石川ら 2014) ¹⁾。

PALS は、広域的な範囲において現況把握を効率的に行うための斜め写真撮影システムであるが、座標値を持った精度の検証を行ってきてもならず、災害後の縦横断地形解析等への適否には、疑問が残る状況であった。そこで伊豆大島を例に、発災当日に緊急撮影された斜め写真画像から生成した 3 次元モデルデータと、現地地形を地上レーザ測量で取得したデータとを比較し、精度検証を行った。

3. 斜め写真撮影装置 (PALS) の概要

3.1 撮影装置の主な特徴

(1) 機器構成

PALS は、汎用のデジタルカメラとレーザ測距儀等を一体化させた撮影装置と制御装置で構成される (表 1, 図 1)。

(2) いつでもどこでも撮影が可能

使用する機材は、小型軽量で携行性、操作性に優れ、ヘリコプター等の有人航空機に持ち込み撮影が可能となるため、飛行が可能な範囲において、いつでもどこでも撮影が可能となる。

(3) 確実な撮影とデータ取得

写真撮影は、撮影者が有人航空機に搭乗し、撮りたい箇所を確認しながら撮影を行う (図 2)。

表 1 PALS の主な仕様

項 目	仕 様
レーザ計測可能範囲	50m 以上～約 4km
被写体計測位置精度	写真中央の被写体までの距離 1000m 程度の場合に、50mRMSE 程度（測量目的ではない）
写真画素数	1,620 万画素 (4,928 × 3,264 ピクセル)
写真記録フォーマット	JPEG
撮影部の支持	手持ち (ヘリコプター等への固定不要)
オペレーター	最低：1 名
連続使用時間	3 時間以上（バッテリー容量次第）



図 1 PALS 機器構成

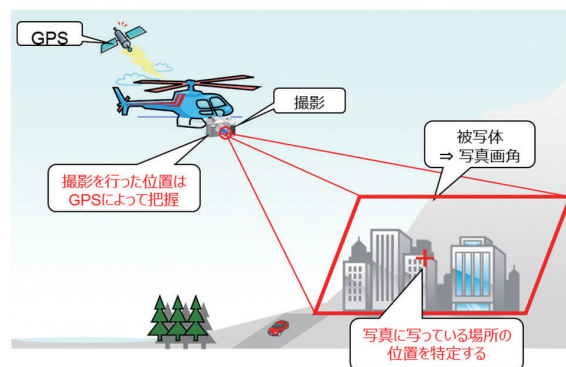


図 2 PALS の撮影概念図

特に大規模災害時など、緊急を要しながらも情報不足の状況下において、撮影者が現地を確認し、撮影範囲を確定できるメリットがあり、災害状況を確実に捉えることが可能となる。

(4) 位置情報・撮影ポイントの把握

撮影画像データとともに、撮影時のカメラ位置（緯度・経度・高度）だけでなく、被写体



図 3 カメラ位置と写真中心の位置の整理
(オレンジ：被写体位置、緑色：撮影位置)
(Google Earth 上に表示)

中心の方向・角度・距離を自動計測し記録する。これにより、カメラ位置と被写体中心を示す KML や Shape ファイル形式で出力され、Google Earth や GIS ソフト上で撮影位置を表示・検索しながら撮影が可能となる（図3）。

(5) 膨大なデータの容易な整理

撮影データは、撮影および被写体の位置情報を管理することで、膨大なデータを容易に整理できる。そのため、災害時など緊急時には、着陸後からデータをコピーする時間だけで、撮影写真のデータベースが作成できるため、迅速かつ正確な整理が可能となる。

(6) 連続写真による各種の加工処理を実現

高精細な撮影画像からパノラマ画像が作成可能で、かつ広域なエリアの3次元モデルを作成することもできる。

4. 伊豆大島災害における活用

4.1 災害概要

平成 25 年 10 月 15 日から 16 日にかけての台風 26 号の通過により、伊豆大島では日雨量 800

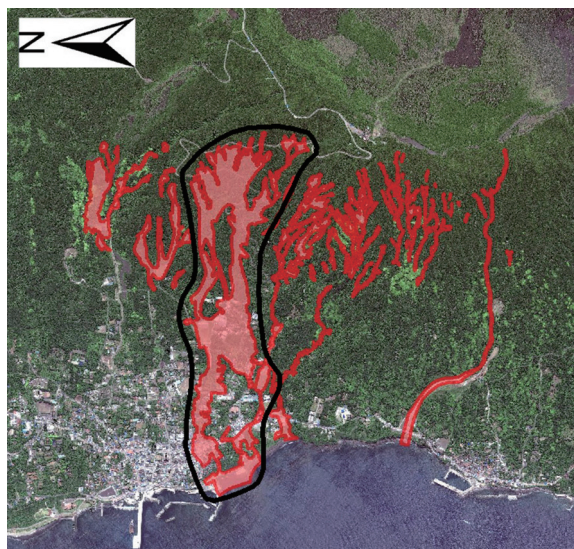


図4 崩壊地範囲(枠を中心にモデル化)
(出典:国土地理院、土砂流出箇所のKMLファイルに加筆)

mmを越す未曾有の豪雨に見舞われた。16日未明に元町地区上流域の大金沢を中心に、源頭部や中腹の斜面で崩壊が多発し、土石流となって下流の住宅地まで到達し、甚大な被害が発生した。

現地は、火山地域特有の緩い尾根や未発達地形により、土砂は複数方向に流下し、広範囲に及んだ。災害前後の空中写真から土砂移動が活発となった範囲を示す(図4)。

被害の状況は、死者35名、行方不明者4名、発生時刻が午前3時～4時頃であったことが、人的被害を大きくした要因のひとつとされており、真夜中の避難行動への課題が浮き彫りとなった。

4.2 撮影の実施

撮影飛行は、16日午後からヘリコプターに搭乗し、伊豆大島西方(海側)から侵入して、大金沢流域の崩壊地および土砂流出区域を中心に、旋回を繰り返し撮影した。ラップ率については、災害状況を細部にわたり把握するため70～80%程度で撮影した。離陸から着陸までの約2時間のフライトで、約50分間撮影を行った。撮影諸元(表2)、撮影範囲(図5)および撮影画像のサンプル(図6, 7)を示す。

表2 伊豆大島撮影状況

諸元	実施結果
フライト時間	約2時間
撮影時間	50分
使用データ容量	10GB
撮影枚数	2,660枚
撮影範囲の標高差	0-530m
撮影面積	3.0km ²
ラップ率	70-80%



図5 撮影範囲と位置(飛行イメージ)



図6 高精密な斜め写真画像①(元町地区)



図7 高精密な斜め写真画像②
(上流御神火スライライン付近)

4.3 地形モデルの作成

(1) パノラマ画像の作成

災害対応では、現地での活動を指揮する上で、分解能が高く、かつ被害全体範囲を把握できるパノラマ写真による状況把握が有効となる。そこで、連続撮影した写真を精査し、パノラマ写真を作成した。パノラマ写真は、災害状況の



図8 大金沢流域全体のパノラマ写真

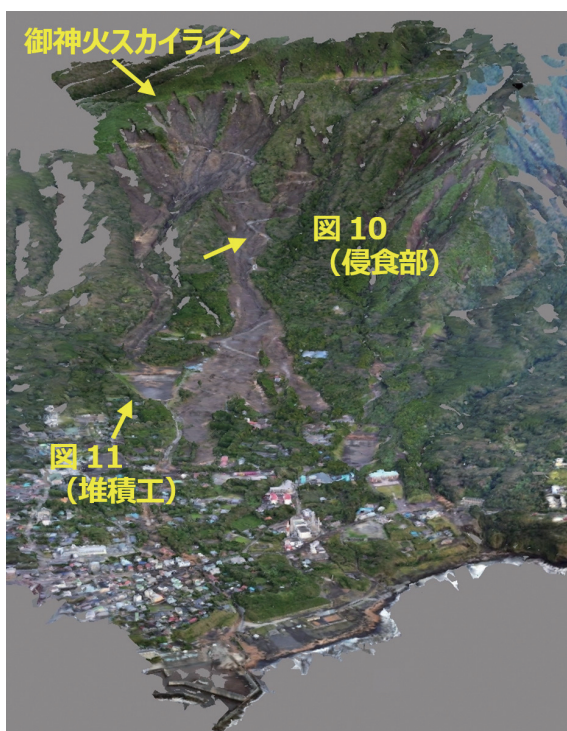


図9 3次元モデル(流域全体)

全体を把握するための正面図(図8)、特に被害が大きくなっている大金沢流域を中心とした正面、および大金沢右岸側からの市街地の状況を判断できる斜めのアングルの3パターンを作成した。

パノラマ写真の作成に所用した時間は、データ取得後から写真合成まで約30分であった。

(2) 3次元モデルの作成

3次元モデルは、撮影した写真画像データを基にAcute3D社のSfM解析ソフトウェア「Smart3D capture」を用いた。作成範囲は、大金沢流域の中心に約1.5kmの範囲とした。

解析作業は、災害発生時の緊急性を考慮し、できるだけ処理時間を短くするため、画像取り込み→バンドル調整→3次元モデルの生成(タイポイント・TIN作成)→テクスチャ貼付までの作業をソフトウェアの自動処理で実施した。また、バンドル調整等を含めた各種設定値についてもソフトウェアの推奨設定を採用した。

3次元モデルの作成には、写真約900枚を処理し、写真撮影後の画像取り込みからモデル作成の最終工程までで約36時間を要した(図9)。

4.4 災害状況判読

作成された3次元モデルを用いて、災害状況判読を実施した。3次元モデルは、TINへのテクスチャ貼付が基本となるため、斜めからの



図10 侵食・崩壊状況を描写した3次元モデル



図 11 3次元モデル (堆積工付近)

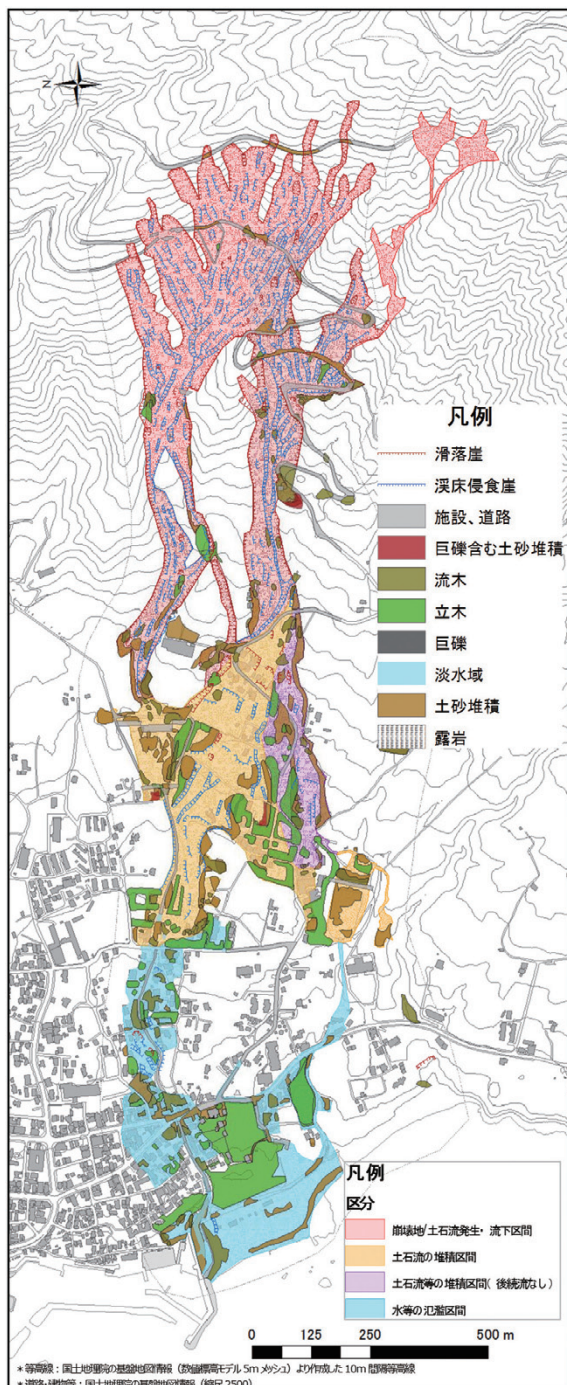


図 12 PALS を活用した写真判読結果

アングルも描写が可能となる(図 10, 11)。このため、現地の侵食深さや河床の露岩状況も明確に表現できており、現地の状況を評価しやすい。図 12 に示される溪床侵食崖などは、3次元モデルからの判読が有効であった。

一方で、樹木に覆われている箇所は、写真から河床を視認できないことが多く、マッチング処理も粗くなり、3次元モデル(DSM)が十分に表現されないため、3次元処理前の高解像度の単画像を基に、情報を読み取り判読した。

4.5 成果と課題

(1) 3次元モデルの有効性

一般に、災害直後における空からの被害範囲および状況把握には、迅速性があるため斜め写真撮影が先行する。斜め写真はスポット撮影となり、崩壊地の空間座標上の位置や崩壊形状が捉えにくく、判読結果に誤差が生じやすい。また、崩壊地や侵食等の深さ方向の情報も得難い状況となっている。

これに対し、PALSによる3次元モデル画像は、周辺の地形全体を3次元化できるため、崩壊地の位置や規模も特定しやすく、深さ方向も定量的な評価が可能となり、判読精度が大幅に向上する。さらに、災害状況の把握だけでなく、地形モデルまでが一気に作成可能となるため、大幅な作業時間の短縮となる。

このことから、迅速な救助活動・調査の初動体制の確保が可能でありメリットが大きい。

(2) 課題

災害直後の時間的制約を抱える中で、比較的短時間で3次元モデルの提供ができたが、状況把握を優先させたため、作成したモデルの精度検証はしていない状況であった。そこで、地上レーザ計測により取得した現地地形図と、SfM解析で作成した3次元モデルによる地形図を比較し精度検証を行うこととした。

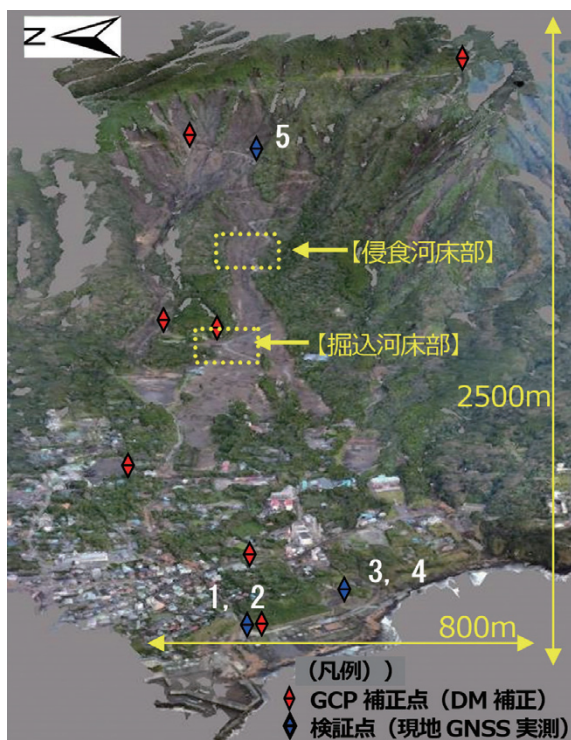


図 13 検証モデル図

5. 精度検証の方法

5.1 検証方針

PALS- 3次元モデルの精度を確認すべく、現地測量を実施して両者の比較により定量的ならびに定性的な検証を行った。

比較検証のうち、「定量的な検証」を目的として、斜め写真で判別可能な5点を検証点として、GNSS 測量を実施し、3次元モデルから得られる座標値との比較を行った。

また、3次元モデル図の「定性的な検証」として、地上レーザ測量を実施し現地の地形形状を取得した上で断面図を生成し、形状の比較を行った。なお、現地形の検証位置は、土砂流出が著しい箇所では溶岩が露岩する斜面や河床等の位置を選定した(図13)。

5.2 検証モデル

(1) PALS- 3次元モデル

3次元モデルは、① PALS 撮影時に取得したオリジナルの座標値を用いたモデル(以下 ORG モデル) と、② PALS の写真画像におけ



図 14 GCP 点の例 (境界点)

る特徴点に DM (東京都 2500 デジタル白図) より7点の GCP 点 (Ground Control Point) を与え偏歪補正したモデル(以下、GCP モデル)の2種類とした(図14)。後者の GCP モデルは、事前に既存地形データが得られていれば、災害などの緊急時でも、位置補正情報として使用可能である。

なお、GCP 点は PALS 画像と DM 図の両方で場所が明確に判別できる位置を流域全体から抽出した。

(2) 現地形モデル

現地形モデルは、地上型3次元レーザスキャナ (RIEGLE 社 VZ-400) (以下、地上 LS) を用いて地形の高精度な3次元モデルを作成した。

表 3 地上 LS の計測諸元

項目	仕様
計測面積	約 4,500㎡
機械配置点	3, 4 点/箇所
計測距離	25-120m
計測精度	0-5mm

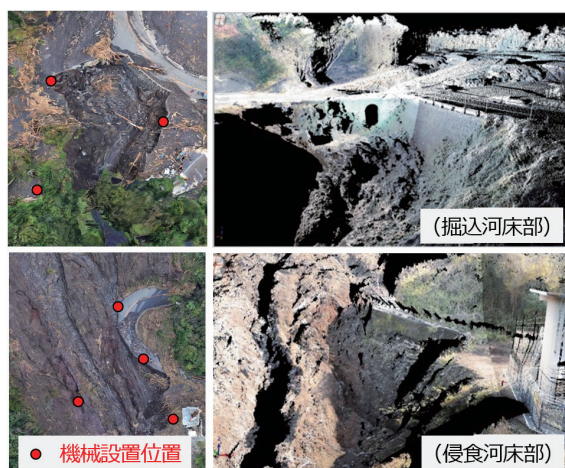


図 15 地上レーザ測量の点群データと機械位置

地上 LS による現地地形計測は、レーザの照射方向による影の部分やオーバーハング地形を表現するため、機械点を3～4箇所配置し、複数方向から計測を行った(表3、図15)。

6. 精度検証の結果

6.1 定量的な検証

定量的な検証には、絶対値による精度として PALS-3 次元モデルと GNSS 測量にて計測した5点の座標値を比較した。現地検証点(GNSS計測点)は、流域の上流と下流に区別しつつ、PALS 画像で確認でき現地で明瞭な判別が可能なポイントを選定した(図16)。

その結果、① ORG モデルと現地検証点の差は、X, Y 方向で平均 3.3m 程度、Z 方向は平均で 1.2m 程度となり、2 点間誤差では、平均 5.3m 程度となった。

一方、② GCP モデルと現地検証点の差は、X, Y 方向で平均 0.8m 程度、Z 方向は平均で 0.2m 程度となり、2 点間誤差では、平均 1.7m 程度



図 16 現地検証点と 3 次元モデルの位置

表 4 3次元モデルと現地検証点の差分

検証点 No	① ORG モデルと 現地検証点の差 (m)				② GCP モデルと 現地検証点の差 (m)			
	X	Y	Z	Δ	X	Y	Z	Δ
1	0.41	1.26	-1.71	2.16	0.11	1.14	-0.52	1.25
2	1.57	5.83	-1.56	6.23	0.01	0.94	-0.39	1.02
3	2.41	6.33	-0.44	6.78	-0.15	-0.12	0.3	0.35
4	2.37	6.51	-0.94	6.99	-0.19	0.27	0.14	0.36
5	2.42	3.41	-1.5	4.42	0.75	5.36	-0.73	5.46
差の平均 (m)	1.84	4.67	-1.23	5.32	0.11	1.52	-0.24	1.69
XY,Z 平均	3.25		-1.23	-	0.81		-0.24	-
標準偏差	0.78	2.03	0.47	1.82	0.34	1.97	0.39	1.92

となり、既存地形図に基づく GCP 補正で精度向上が確認された。

6.2 定性的な検証

定性的な検証は、掘込みが著しい河床部および局所的な侵食河床部において、3次元モデルと現地地形データの断面を抽出し、相対的に形



図 17 掘り込み河床部の断面形状比較図

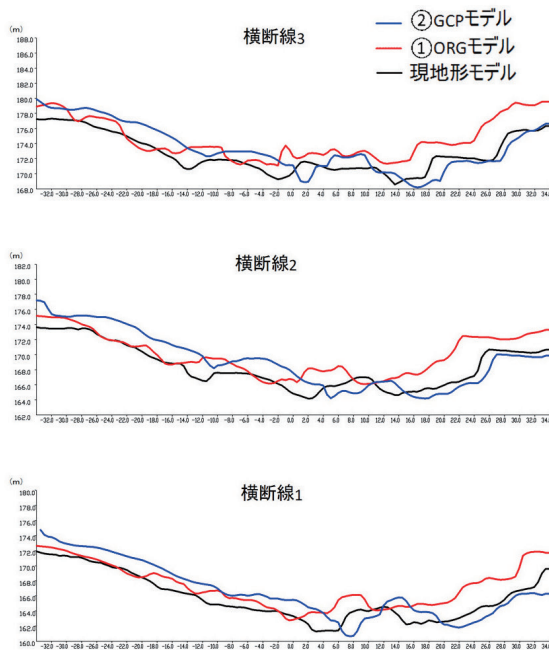


図 18 侵食河床部の断面形状比較図

状の比較した (図 17, 18)。

その結果、① ORG モデル⇔③現地地形モデル (地上 LS) では、南北方向で2~4m 程度の差となった。また② GCP モデル⇔③現地地形モデル (地上 LS) も近似することが確認された。特に下流の掘込河床部では、同様の凹凸を示している。このことから、局所的な箇所では

も PALS- 3 次元モデルは、概ね現地地形を反映しているものと評価できる。

7. 考察

伊豆大島の災害対応を通じて、緊急時における PALS による写真撮影、パノラマ写真および 3 次元モデル作成により、迅速な災害対応およびその有効性が確認できた。精度の課題に対しても、流域全体の位置関係、流域内の微細な河道地形において、災害直後の緊急的な場面として十分な精度を有していることが確認できた。

特に、パノラマ写真と 3 次元モデルでは、高解像度画像により詳細な状況判読が可能となる。また、災害直後の危険地域や立入禁止区域等の規制区域においても、机上にて流域内の斜面崩壊や河床侵食等が把握できるとともに、実測では危険が伴う斜面や溪流の断面図が作成できる。さらに不安定化した災害現地において危険箇所の絞り込みや、計画的な調査計画の立案など安全面での効果も大きい。このことから、災害応急対策での安全で効果的な初動体制の確立する手段として活用できる。

また、緊急時以外でも継続的なモニタリングによる経年変化の解析や、高解像度の写真を 3 次元化することで事業説明や住民説明などに用いるなど、活用の幅は広い。

一方で、① ORG モデル、② GCP モデルとも、部分的に現地地形との差が大きい箇所も認められた。これらは画像が不鮮明な箇所について誤差が大きくなる傾向があることから、より広範囲な状況下での SfM 解析の活用には、撮影角度や枚数等による品質レベルを留意する必要がある。

今後は、災害地形の最適な撮影方法などを検討し、より精度を高める技術を確立していく予定である。

以上

参考文献

- 1) 石川芳治・池田暁彦・柏原佳明・牛山素行・林真一郎・森田耕司・飛岡啓之・小野寺智久・宮田直樹・西尾陽介・小川洋・鈴木崇・岩佐直人・青木規・池田武穂：2013 年 10 月 16 日台風 26 号による伊豆大島土砂災害, 砂防学会誌, Vol.66 No.5 p61-72, 2014

執筆者

川上 誠博 (かわかみ よしひろ)
株式会社パスコ



(共著者) 所属は筆頭著者に同じ
下村 博之 (しもむら ひろゆき)