

交通インフラ周辺広域斜面の崩壊危険性評価 に関する調査・研究

京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 教授 杉山 友康

1. はじめに

全国自然災害発生数は、半世紀前と比較して激減した。これは、全国で防災対策が進められると同時に、鉄道などの交通機関では、維持管理が体系化され予防保全の考え方も定着し、施設に対する耐性が向上してきた成果といえる。一方で、近年の気候変動による温暖化の影響もあり、単時間豪雨の発生頻度が増加していることもあり、一旦災害発生をみたとき、その被害は広域かつ規模が拡大しつつある。特に、鉄道・道路などのインフラ施設での被害は、周辺の斜面崩壊による土石流、土砂流入などによる被害が増加し、広域にわたる斜面の危険性判断手法が必要となると同時に、こうした被災時の早期復旧に係わる研究・技術開発が急務となっている。そこで、本調査・研究では、まず最近の広域災害の実態を明らかにした上で、過去の鉄道沿線斜面の危険度評価に関する研究をレビューし、最近の気象変化に見合う今後の研究開発の在り方を提言する。

2. 調査・研究の概要

実施した内容は以下のとおりである。

(1) 過去の災害事例分析

広域あるいは災害復旧に長期間要した災害について、過去の災害事例を分析し、特に降雨状況に着目して現状を明らかにする。

(2) 広域斜面の危険度評価に関する過去の研究事例のレビューと課題の抽出

広域斜面の危険性を判定する手法は、これまでも多くの研究結果が報告されている。そこで、文献調査を行うことにより提案されている評価手法の特徴を明らかにした上で、交通インフラにおける評価手法としての課題を明らかにした上で、今後推進すべき研究課題の提案を行う。

(3) 斜面崩壊箇所のプロフィール情報の簡易取得方法の検討

同時多発的に発生する災害をみた場合、個々の状況を一次情報として把握する方法は、航空機からのビデオや写真などの情報によることが多い。これらの方法では個々の被害情報を詳細に把握することができない。そこでより簡易かつ迅速に情報を得る手法による被災箇所プロフィール情報の取得手法を試みる。実現場での試験を実行して、その可能性を探る。

以下では、上記3点の検討結果の概要を示す。

3. 広域災害の傾向

最近の災害の傾向を、1955年（昭和30年）から2012年（平成24年）までの57年間に西日本地域で発生した55回の鉄道の広域災害について文献^{1), 2)}によりその傾向を調べた。図1に広域災害の誘

因別発生回数を示す。これから、広域災害をもたらす誘因は、梅雨前線、台風によるものが明らかに多いことがわかる。このことは、月別発生頻度を示す図 2 から容易に推察できる。こうした広域災害が発生した時の降雨量について示したものが図 3 である。ここでは、1955 年（昭和 30 年）以降 10 年毎にマークを区別して雨量を示している。1955 年（昭和 30 年）から 10 年間は、降雨に対するインフラ設備の耐災性も低く、連続雨量 300mm 以下で発生するケースが多く、時間雨量 40mm/h 以下で広域災害となるケースもみられる。その後、防災対策も進み 1966 年（昭和 40 年）以降においては、広域災害となる降雨量も少しずつ大きくなる傾向を示す。特に 1998 年（平成 10 年）以降では、連続雨量にばらつきがあるものの、時間雨量 80mm/h を超えるような短時間豪雨が観測されるような場合に広域災害となる傾向が明らかに見て取れる。

以上のように、災害発生数そのものは減少傾向にあるものの、特に近年この傾向が鈍化している要因のひとつとして、外力である短時間豪雨の出現頻度の増加といった雨の降り方の変化があげられる。図 4 は、気象庁資料³⁾による 1975 年（昭和 50 年）以降の時間雨量 80mm/h 以上の観測回数出現頻度を示したものであるが、明らかに増加傾向にある。こうしたことから、過去に経験したことのないような豪雨に見舞われることにより、これまで特に注視して来なかった箇所での被害発生なども懸念され、これに対応した備えが必要となる。

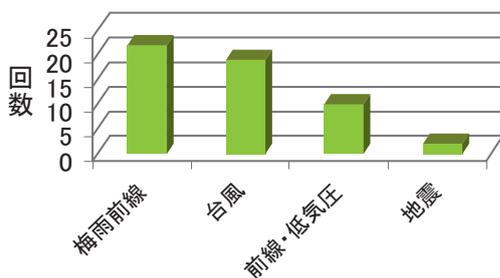


図 1 広域災害の誘因別発生頻度

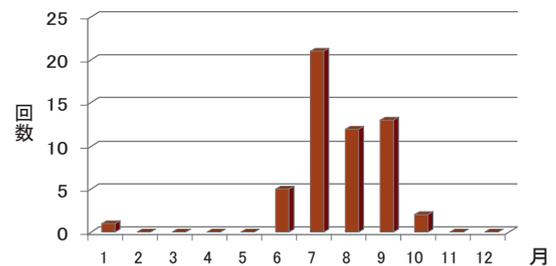


図 2 広域災害の月別発生頻度

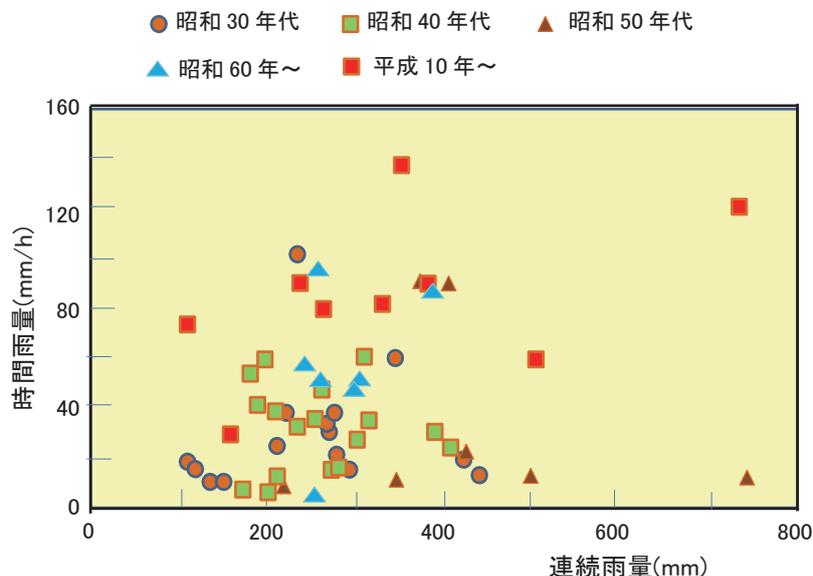


図 3 広域災害発生時の降雨状況

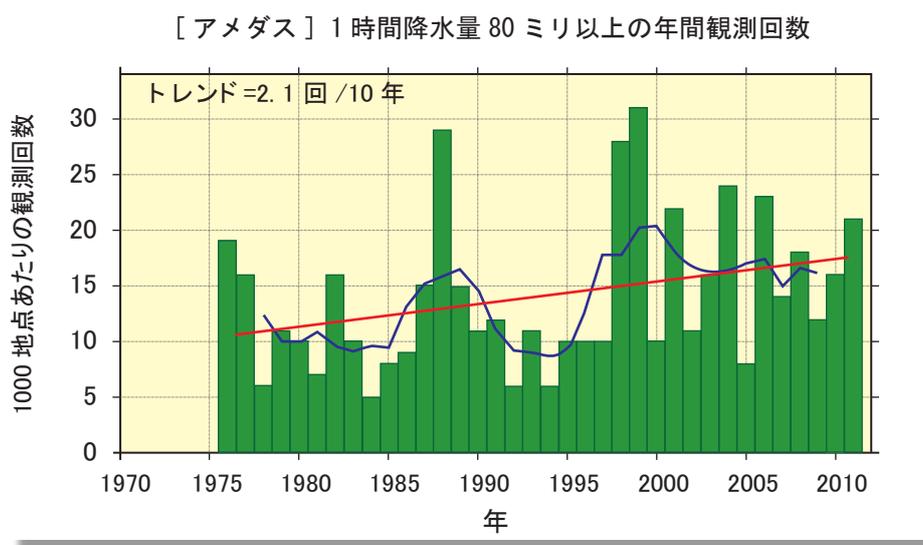


図4 1975年以降の80mm/h以上の降雨の出現頻度³⁾

4. 広域斜面の危険度評価手法と課題

一般的に斜面の崩壊危険性を評価する手法としては、以下の3つがあげられる

- (1) リモートセンシングや数値地形情報に基づく評価
- (2) 力学的な解析手法に基づく評価
- (3) 過去の被災事例分析から得た採点方式による評価

以下では、これらの評価手法の特徴とその研究事例および課題をまとめる。

(1) リモートセンシングによる評価

空中（衛星、航空機など）からの写真やレーザ測量による地被、地形状況から地上での踏査を行うことなく、斜面の崩壊危険性を判断するもので、一度に広域にわたる範囲での評価が可能な手法である。鉄道では、昭和50年代から広域検査の一つの手法として用いられてきた。これは、航空機やヘリコプターからの空中写真によって斜面状態を判読し、判読結果や危険因子をまとめて斜面管理基図として整理したものである。しかし、判読結果から危険性を判断するためには、一定の専門的知識が必要なため、実用に供されるほどには至らなかった。その後、技術の進歩によって、判読結果で得た情報を過去の崩壊地と似た素因を抽出し、これに基づいて自動的に危険箇所を抽出する手法⁴⁾や衛星画像からの危険箇所抽出手法が試みられるようになった⁵⁾。最近では、コンピューター技術の進展により、画像処理能力も格段に進むと同時に、空中からのレーザ測量技術によって、1m×1mのメッシュで植生によって被覆された箇所でも地上面の位置を捉える数値地形モデル技術の進歩も著しい。このため、図1に示すように、画像から得られる植生情報と傾斜などの地形情報から統計的な手法を経て危険箇所を抽出する技術⁶⁾へと発展してきている。しかし、これらの技術は、過去に崩壊した箇所と同様な素因を有する箇所を抽出するもので、危険性を示す評点によっては抽出される範囲が異なったりする上に、崩壊に到った降雨などの外力は無視されていることもあり、今後想定される極端な気象条件下での危険性の判定が不可能な、いわば定性的危険度評価の域を抜けていない。

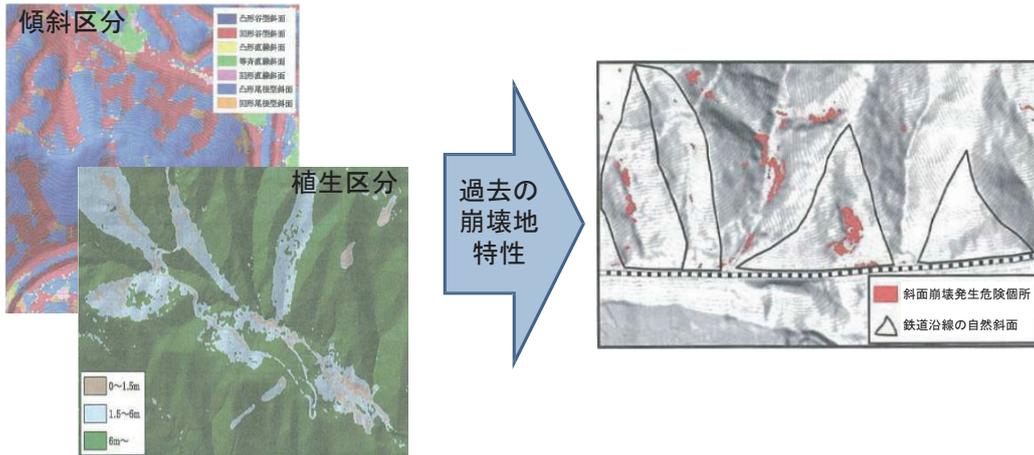


図5 地形・地被除法に基づく崩壊危険個所の抽出
(文献⁶⁾に基づき筆者が修正・加筆)

(2) 力学的解析手法による評価

地盤工学的な理論から導きだされる安定計算による評価が代表的であり、多くが提案されている。この手法は、あくまでごく狭い範囲の個別斜面の評価に有効であるが、同時に多くの斜面やある領域を持った斜面全体の評価には不向きといえる。しかし、このような理論的な雨水浸透や斜面安定の計算をやや広域(たとえば一つの集水範囲)範囲において実行して斜面崩壊の危険性を判断する手法⁷⁾⁸⁾⁹⁾(図6)が試みられるようになってきた。これらの手法は、地盤の浸透特性と強度特性から、降雨外力を入力することによって、時間的、空間的に変化する危険性の判断を可能とするものである。すなわち、航空レーザ測量によって得た地形情報から傾斜角や傾斜方向を自動的に計算し、理論計算に基づいた地下水の流れと水位を計算したうえで地盤工学的な安定計算を行って安定度を求めるもので、どこがいつの時点で不安定となっているかを求めることができる。

しかし、評価のための地盤パラメータとして、表層土厚さ、透水性、強度などが必要であり、これらの精度が結果の精度に大きく影響する。特に、地形状況や斜面の植生の種類や状態による透水特性、表層土厚さ、強度等が異なるものと考えられるが、これが差別化できていないため、精度的な課題を有している。

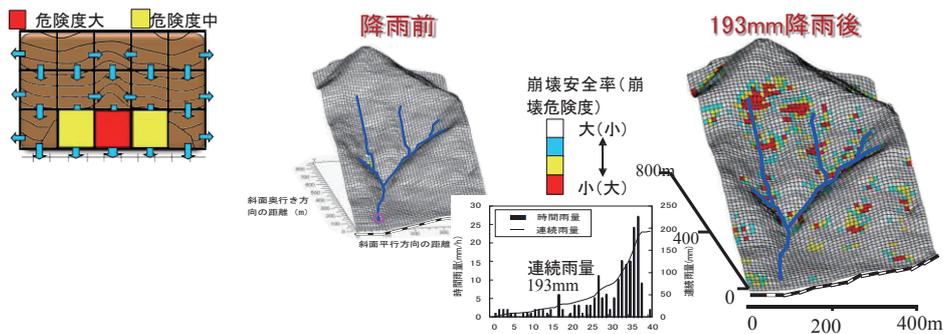


図6 地形情報と力学的解析手法によって得る広域斜面崩壊危険個所抽出
(文献⁹⁾に基づき筆者が一部修正・加筆)

(3) 過去の被災事例分析から得た採点方式による評価

過去の崩壊事例を統計的な分析によって作成した採点方式の評価法が代表的である。この手法を利用することで、一度に多くの個所の評価が可能であり、実務的に有用なため多くの期間ですでに実用に供されている。しかし、鉄道施設である盛土や切土を対象としており、線路や道路から距離のある自然斜面に適用することができない。

5. 求められる斜面危険度評価手法の提案

3章、4章で示した現在までに提案されている道路や鉄道沿線の広域斜面の危険性を評価する手法および極端化する気象条件下から、今後取り組むべき課題を以下の2点に絞って提案する。

- (1) 広域斜面を対象としてリモートセンシング技術が有効であり、これらの情報から降雨外力を指標とした評価方法の開発
- (2) 上記の開発のためには、これを高精度化するものとして、リモートセンシング情報から地盤の強度定数を求めることの検討

そこで、図7に示すように、空中写真や航空測量データに基づき、地盤情報の推定を行い、この情報を使用した計算のモデルの開発を提案する。この際、既存の研究成果をできるだけ多く活用することで、短期間に成し得るものとする。

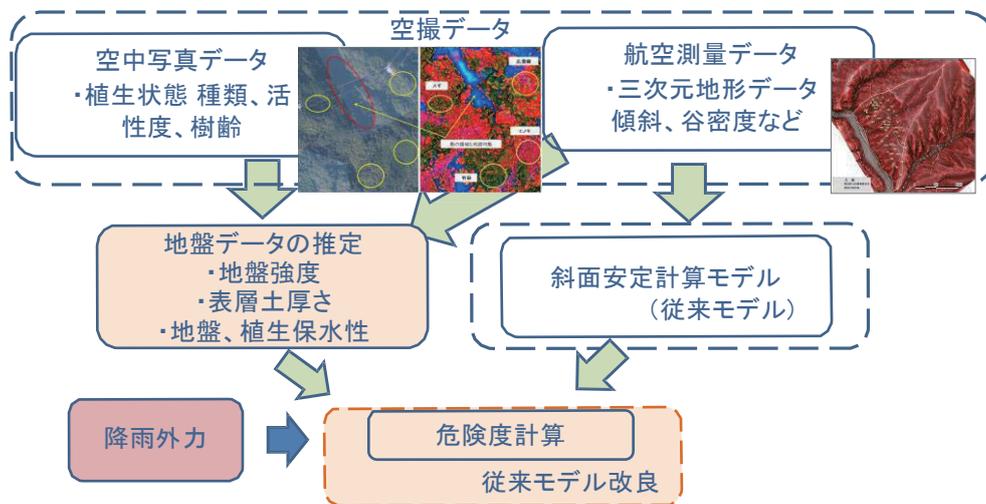


図7 空撮データに基づく広域斜面の降雨災害危険度評価手法

6. 小型UAVを利用した斜面崩壊箇所の早期復旧支援の検討

災害が発生した場合、迅速に状況を把握したうえで、早期復旧を図ることは、公共交通機関として重要である。斜面災害では、①現地における崩壊箇所の迅速な状況把握、②土砂量など復旧数量の簡易算定、③具体的復旧対策方法の検討、といった手順を踏むことになるが、特に現地の状況把握に多くの時間を要することがあり、これを省力化することが求められる。そこで、近年小型化や低価格化がすすむ小型のUAV (Unmanned Aerial Vehicle) に着目し、これまで地上からの目視や簡易計測で判断していた災害状況の把握に代わり、小型UAVを用いた空からの撮影画像から3Dモデリング技術を活用することで、迅速に災害状況を把握し、復旧計画の業務を支援する手法を検討した。

6.1 研究の目標

高精度な計測を目的とするのではなく、迅速性と現場の省力化に主眼を置き、災害発生後1日以内で有効な情報を提供することを目標とする。具体的には、小型 UAV により、迅速に災害発生状況を撮影し、復旧数量、予算算定など復旧対策検討まで含めた、現場と内業の効率化を図ることを最終目標としている。

本研究では、UAV で撮影した写真から写真測量による 3D 測量データを作成し、3D 測量データにより横断面作成、および土砂量算出を行う。

6.2 使用機材

UAV の種類には多種多様なものがあるが、災害時の可搬性を考慮して、表 1 の小型 UAV を採用した。これは、全長が 40cm 程度であり、重量も 1.3kg と一人で十分持ち運べるサイズとなっている。

表 1. UAV 機器

	無人ヘリコプター (RPH2A)	中型 UAV (マルチコプター)	小型 UAV (マルチコプター)
機体写真			
機体仕様	全長: 5.3m 重量: 330kg 飛行時間: 60 分 搭載重量: 100kg	外径寸法: 0.85 × 0.85 × 0.4m 重量: 4kg 飛行時間: 10 ~ 15 分 搭載重量: 4kg	全長: 390mm 重量: 1.3kg 飛行時間: 20 分
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・自律航行が可能 ・遠隔操作が可能 ・レーザースキャナなど搭載可能機材が多様 	<ul style="list-style-type: none"> ・自律航行 ・GPS/ジャイロによる姿勢制御システム ・自動帰還 	<ul style="list-style-type: none"> ・軽量 ・自動離陸 ・自動帰還システム ・タブレットへの画像転送
搭載機材	デジタル一眼レフカメラ レーザースキャナ IMU(慣性航法装置)	デジタル一眼レフカメラ ビデオカメラ	小型カメラ 動画: 4k、FHD 静止画: 1240 万画素

6.3 三次元立体画像 (3D モデル) の作成

(1) 画像取得

UAV による空撮は図 8 に示すように、撮影範囲に対して平行撮影を実施する。撮影は、平行撮影か収斂撮影としオーバーラップを 80%程度とる。

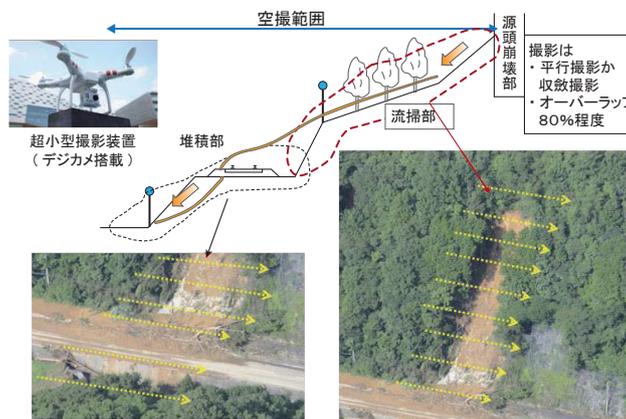


図 8 UAV 撮影方法

(2) カメラキャリブレーションと同時調整

焦点距離、センサーサイズを基にカメラキャリブレーションを実施し、同時調整によって写真ごとの幾何学的位置（ジオメトリ）を確定させる。GCP や初期外部標定要素を使用した場合は絶対座標で、使用しない場合は相対的な座標で 3D オブジェクトが生成される。

(3) モデリングとテクスチャ貼付

同時調整によって得られたジオメトリを基に、複数画像間の同一地点を画像マッチングによって抽出し、タイル化されたエリアの点群を生成する。次に、その点群から 3D-TIN モデルを構築した後、撮影したデジタル写真（テクスチャ）をそのモデルの各サーフェースに投影してマッピングすることにより、三次元立体画像（テクスチャ付 3D オブジェクト、図 9）を生成する。



図9 三次元立体画像（.3D モデル）

6.4 現場試験

2013 年 8 月に豪雨によって発生した山口、島根県内の鉄道沿線斜面崩壊箇所について、UAV による撮影と 3D モデル作成を実施した。図 10 に UAV 撮影状況を、図 11 に UAV 撮影写真を、図 12 に作成した三次元立体画像（以下、3D モデルと称する）を示す。小型 UAV により、災害状況を把握できること、および 3D モデルの作成が可能であることを確認した。この時点では、3次元データの精度については検討していない。



図 10 UAV による撮影状況



図 11 UAV での撮影画像

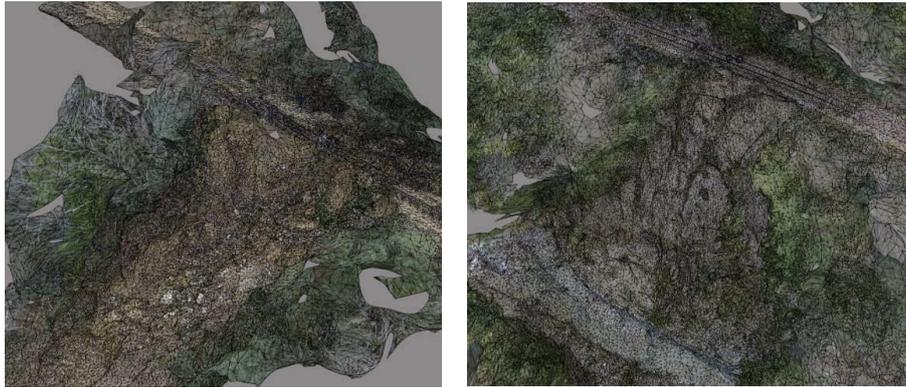


図12 作成した 3D モデル (左 : 56 k 450 m、右 : 58 k 400 m)

6.5 精度検証のための現場撮影

前節では、山口県下での実施試験において UAV を用いた災害復旧に関わる簡易測量の可能性が見いだせた。そこで、福知山線廃線敷において、UAV 撮影と精度検証用にトータルステーションによる横断測量 (TS 測量)、VRS 測量 (基準点測量)、地上レーザスキャナによる測量を実施した。図 13 は UAV 撮影画像により作成した 3D モデルである。この際、UAV による 3D モデルに VRS 測量および TS 測量の結果から GCP (Ground Control Point) を与え、配置とポイント数の妥当性を検証した。本検証では 54 点の GCP を計測したが、直線状 3 点、面的 4 点、全域 54 点の配置の比較を行った



図13 精度検証の対象とした福知山線廃線 3D モデル

地上レーザによる点群データと UAV による点群データの鉛直方向差分を算出した結果を図 14～16 に示す。青色 (約 0.4m 未満) は差分 (誤差) が少なく赤色 (約 2.7m 以上) に近づくに従いその大きくなる。赤色に表示されている箇所は、樹木部になっている。GCP を線状に 3 点に配置した場合は、GCP の軸に沿って精度が高く周辺に向かうに従い黄色や赤の部分が増え地上レーザとの差が大きくなっていった。面的に 4 点配置した場合は計測エリア全域にわたり青い領域が広がり全体的に精度が保たれていた。全域 54 点の GCP を使用した場合は、面的 4 点配置した場合より多少精度が向上しているようではあるが 4 点を使用した場合と比べ有意な差は認められなかった。以上から、復旧時に具体的工事計画を立てるような精度の高い結果を得るためには、基準点を対象箇所になくとも 4 点かつ可能な限り高さの異なる位置に設ける必要があることが分かった。

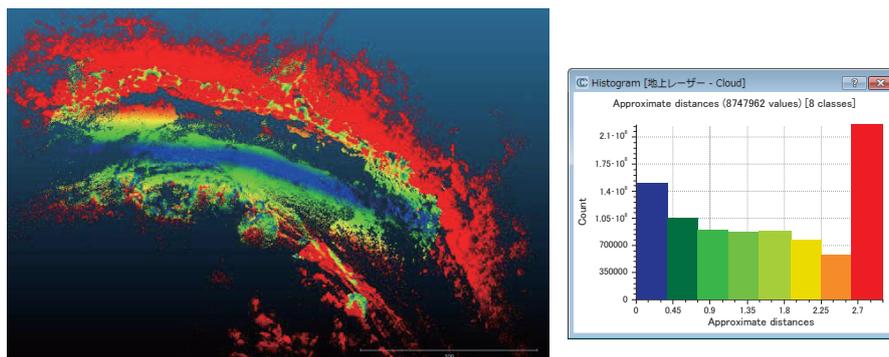


図 14 地上レーザ比較 直線状 3 点

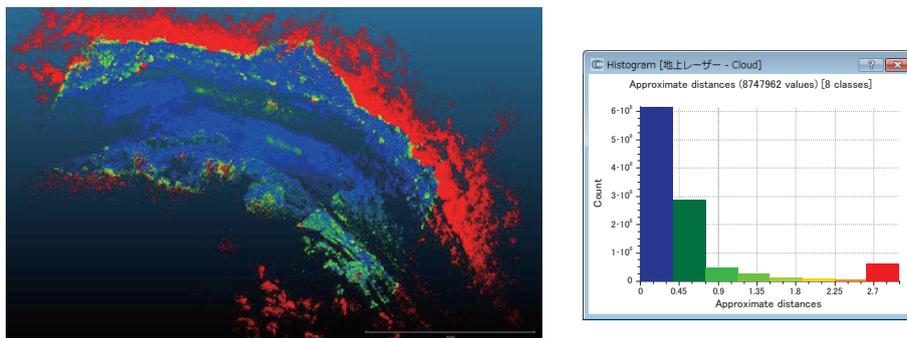


図 15 地上レーザ比較 面的 4 点

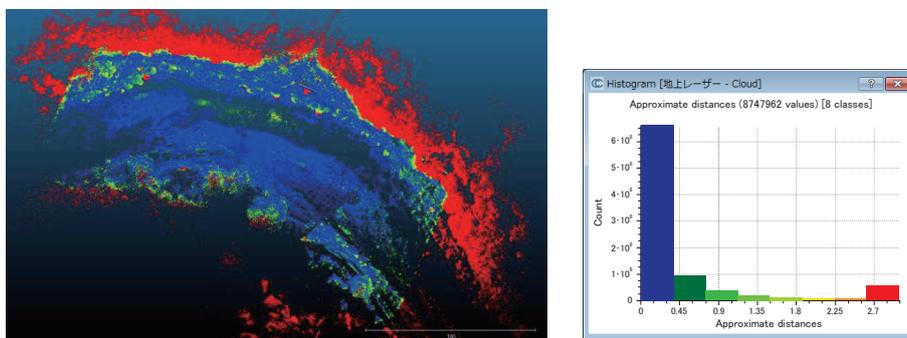


図 16 地上レーザ比較 全域 54 点

6.6 土砂量算定プログラム

3D モデルから面積、崩壊土量を算出するためプログラムを作成した。これによる作業フローは図 17 に示す通りである。

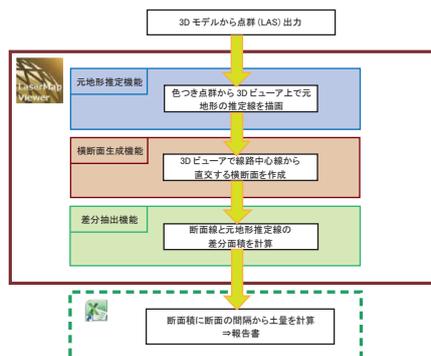


図 17 土砂量算定プログラムの作業フロー

本プログラムによる 2013 年山口豪雨災害の算出事例を図 18、図 19、表 2 に示す。この事例では、一連の操作を十分慎重に行っても 10 分前後で結果を得ることができた。

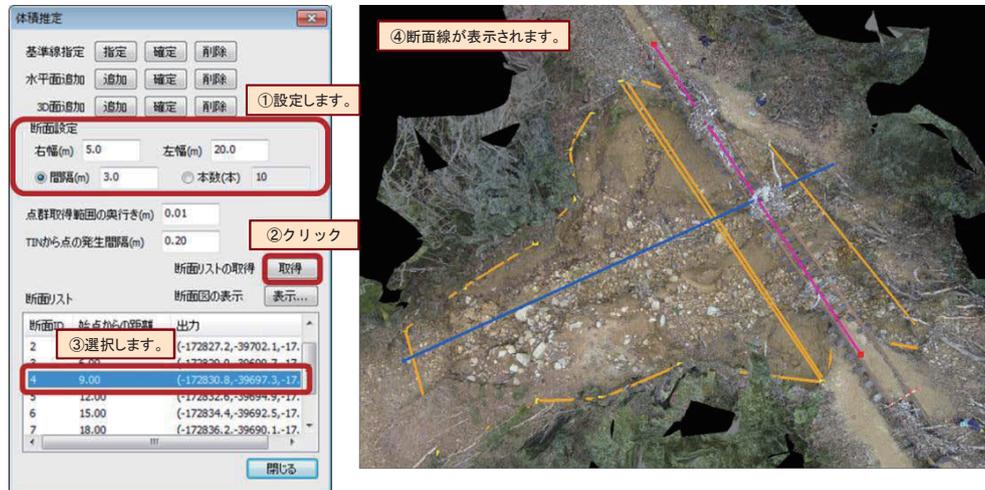


図 18 土砂量算定のための断面作成

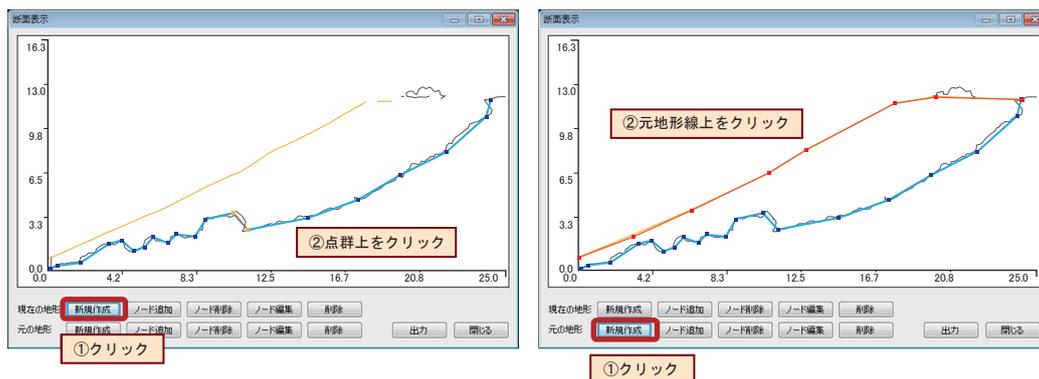


図 19 元地形の推定

表 2. 土砂量の計算例

地点名	崩壊部断面積 [m ²]	延長 (断面間隔) [m]	小計 [m ³]
58k360m	229.12	10	2291.20
58k370m	243.49	10	2434.90
58k380m	93.09	10	930.90
合計			5657.00

6.7 特徴

災害調査において、廉価な超小型ヘリと 3D モデリング技術により、地上調査では把握しきれない情報まで、簡便且つ迅速に災害状況を把握することが可能であることが分かった。UAV 活用による利点は以下のとおりである。

- ① 現地における災害状況の迅速な把握

- ② 土砂量など復旧数量の簡易算定
- ③ 復旧対策検討のための内業作業の省力化

また、災害時には、地上調査、UAV、航空機を用途に応じて使い分けることで、災害時の迅速な復旧支援に貢献できるものと考えられる。

7. おわりに

過去からの災害の実態を検証し、さらに現在までの研究成果をレビューしたうえで、今後進めるべき研究開発の提案を行った。ここで示した危険度評価手法の他、リスク抽出された個所での具体的対策工や被災時の早期復旧支援技術など研究・開発要素は多くある。ここで提案した内容を次年度以降さらに具体化して進め、極端化する気象条件下における交通機関のリスク低減に向けて一歩ずつ前進させる予定である。

参考文献

- 1) 日本国有鉄道施設局：国有鉄道線路災害記録（昭和 16 年度～昭和 61 年度）。
- 2) 日本鉄道施設協会：防災特集号，昭和 62 年～平成 24 年）。
- 3) 気象庁ホームページ：気候変動監視レポート (2013)
- 4) 例えば杉山友康，野口達雄：鉄道における斜面災害とその対応策，物理探査，Vol.50，No.6，pp.600-614，1997.
- 5) 石原慎一郎，島重章，吉國洋：リモートセンシングによる土砂崩壊の予測，広島工業大学紀要研究編，Vol.36，pp.91-98，2002.
- 6) 長谷川淳，太田岳洋：空間数値情報を用いた斜面崩壊の発生危険個所抽出手法，鉄道総研報告，Vol.26，No.9，2012.9.
- 7) 沖村孝，鳥居宜之，尾崎幸忠，南部光広，原口勝則：豪雨による土砂災害を対象としたリアルタイムハザードシステムの構築，新砂防，63 卷，6 号，2011
- 8) 黒川潮，阿部和時，大丸裕武，松浦純生：物理則モデルによる表層崩壊危険度評価，地すべり，Vol.43，No.6，pp.351-355，2007.3
- 9) 石川智史，杉山友康，布川修，佐溝昌彦：数値地形モデルを用いた土石流発生箇所の斜面安定性および渓流水量の試算，第 46 回地盤工学研究発表会講演集，pp.1827-1828，2011.7.