

航空レーザ測量データによる 斜面災害要注意箇所抽出

ASSESSMENT OF INCIDENCE OF LANDSLIDES AND ROCKFALLS
BY USE OF LiDAR DATA

長谷川 淳¹・太田 岳 洋²
Atsushi HASEGAWA and Takehiro OHTA

¹公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: hasegawa.atsushi.61@rtri.or.jp

²山口大学大学院創成科学研究科 (〒753-8512 山口県山口市吉田 1677-1)

E-mail: takohta@yamaguchi-u.ac.jp

Key Words: LiDAR, DEM, DSM, landslide, rockfall

1. はじめに

斜面崩壊や落石の発生には、地形、地質、地下水、植生、人工改変などの様々な要因が関与している。従来、自然斜面の安定性の評価は空中写真判読や現地踏査により行われてきた。これらの方法は計測機器や調査機器を使用する調査手法と比較して短時間で斜面を調査することが可能であるが、得られる評価結果が定性的であり、調査者によって評価結果が異なる場合がある。また鉄道などの長大な線形構造物の沿線には非常に多くの自然斜面が分布しており、これらすべての斜面について調査を実施する場合には膨大な費用と時間を要するなどの問題点もある。

一方、近年では航空レーザ測量技術の発展にともなう格子点間隔が 1m 以下の細密な数値標高モデル (Digital Elevation Model : DEM) が作成されるようになったほか、国土地理院によって基盤地図情報として航空レーザ測量による 5m メッシュの数値標高モデルが公開されるようになった。これらのデータを用いることで、一般に入手可能な地形図や空中写真では判読が困難な微地形を判読することが可能であり、DEM を利用した様々な検討が行われている^例

例えば 1), 2), 3) など

本論では、斜面表層の崩壊 (以下、斜面崩壊と称する) の発生が懸念される箇所と落石の発生源となる露岩を、航空レーザ測量データを用いて客観的かつ簡易に抽出する手法について検討した結果を記述する。

2. 斜面崩壊と落石の要因

検討対象とした地区の概要を表-1 に示す。各地区において複数時期に撮影された空中写真の判読と現地踏査を行い、落石の発生源と降雨により発生した斜面崩壊地に見られる地形や植生等の特徴について検討した。

(1) 斜面崩壊の要因

斜面崩壊の要因 (外力としての降雨や地震は除く) としては、地質条件、地形条件、地下水条件、人工改変等の環境条件が挙げられるが、本検討ではこれらのうち航空レーザ測量により情報を得ることが可能と考えられる地形条件、植生条件 (人工改変を含む) に着目した。各地区において過去 50 年以内に撮

表-1 検討対象地区

対象地区	調査範囲 (km ²)	地質	地形	植生
D地区(九州地方)	25	火成岩 (凝灰岩類)	比較的緩傾斜な低山地 幅の広い谷を形成, 溪床勾配: 緩	針葉樹(植林)が優勢, 伐採地多い
N地区(中国地方)	25	火成岩 (花崗岩類)	急峻な山地 V字谷を形成, 溪床勾配: 急	針広混交林および針葉樹(植林)が優勢
T地区(四国地方)	34	堆積岩 (砂岩・頁岩)	緩傾斜な低山地~丘陵地 幅の広い谷を形成, 溪床勾配: 緩	常緑広葉樹が優勢
S地区(中部地方)	28	変成岩 (片岩)	急峻な山地 V字谷を形成, 溪床勾配: 急	針葉樹(植林)や落葉広葉樹が優勢

影された3~4時期の空中写真を用い, 斜面崩壊, 微地形, 植生, 人工改変等を判読した. 判読した斜面崩壊の総数は, D地区: 21箇所, N地区: 17箇所, T地区: 421箇所, S地区: 68箇所, このうちN地区の2箇所は地震により発生した斜面崩壊であることから, 今回の検討からは除外した.

a) 地形条件

斜面崩壊が発生しやすい地形条件については様々な研究が行われており, 谷型斜面^{例えは4)}など, 0次谷⁵⁾, 傾斜と比集水面積の組合せ^{6), 7)}など, 斜面の形状や傾斜が斜面の安定性に大きく影響を与えていると考えられている. 各地区について空中写真判読と現地踏査を行った結果, 多くの斜面崩壊が集水地形や急勾配斜面で発生しており, 既往研究と同様の傾向があることがわかった. そこで1mメッシュDEMから等高線図と傾斜量図を作成し, 斜面の傾斜や形状と斜面崩壊との関係について検討した. なお以降では, DEMから算出した傾斜のことを「傾斜量」と表記する.

崩壊地におけるDEMから算出した傾斜量の頻度分布では, とくに30度以上で頻度が急激に増加する傾向が認められた. そこで各地区の崩壊地における30度以上の頻度が占める割合を算出したところ, D地区: 88%, N地区: 96%, T地区: 73%, S地区: 95%であった. 検討対象とした斜面崩壊はいずれも崩壊深が浅く, また崩壊面は概ね平滑であったことから, 崩壊面の傾斜は崩壊前の斜面の傾斜と概ね一致すると仮定し, 斜面の傾斜が30度以上の箇所斜面崩壊が発生しやすいと判断した.

次にDEMから作成した等高線図から崩壊地を含む斜面の垂直断面形状と水平断面形状を読み取り, 鈴木(1997)⁸⁾にもとづき, この組み合わせにより斜面型を区分した. 各地区で確認したすべての斜面崩壊に対する各斜面型において発生している斜面崩壊の割合(以下, 崩壊発生割合と称する)をみると, 凹形谷型斜面と等斉谷型斜面で崩壊発生割合が特に

多い(図-1). これらの斜面型は集水地形であり, これらの斜面型で斜面崩壊が発生しやすいと判断した.

b) 植生条件および人工改変

複数時期の空中写真の判読および現地踏査により各地区の植生を7種類(広葉樹, 針広混交林, 針葉樹(成熟林), 針葉樹(幼齢林), 伐採地(伐採直後), 伐採地(若齢二次林), 竹林)に区分し, 斜面崩壊と崩壊発生時の植生との関係について検討した. 各植生区分1km²あたりの崩壊箇所数(以下, 植生区分ごとの崩壊発生率と称する)をみると, いずれの地区においても伐採地(伐採直後)で斜面崩壊が発生しやすい傾向がみられるほか, 地区によっては伐採地

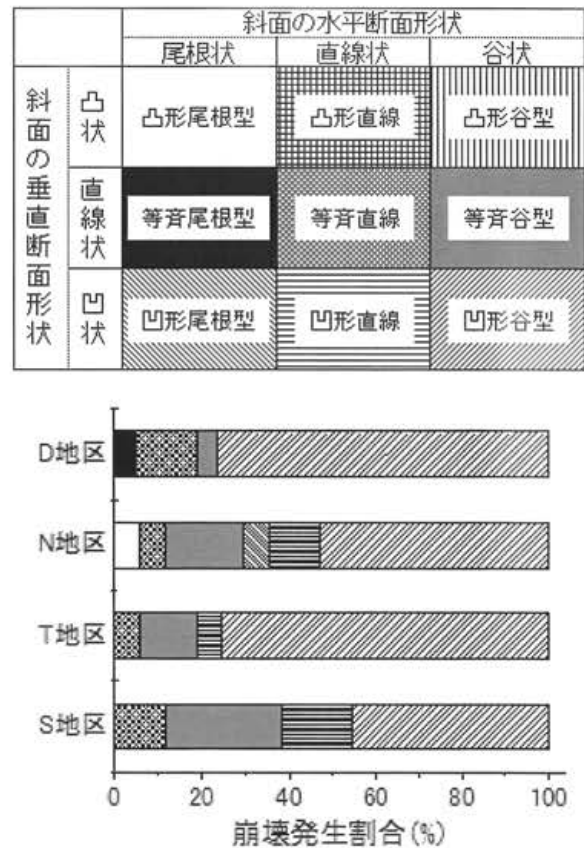


図-1 斜面型の区分(上図)と斜面型ごとの崩壊割合(下図)

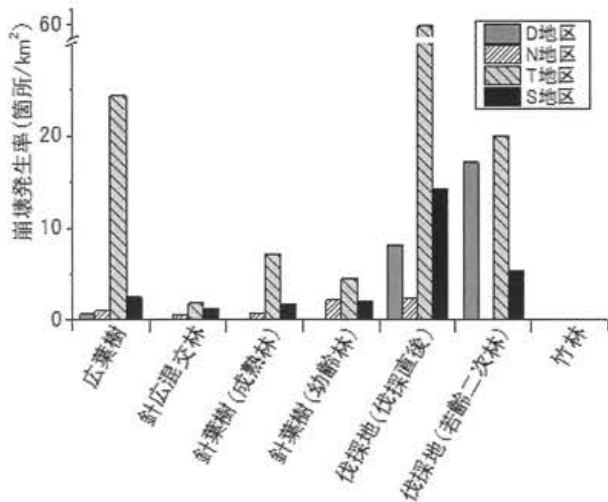


図-2 植生区分ごとの崩壊発生率

(若齢二次林)や針葉樹(幼齢林)でも多くの崩壊が発生していることがわかる(図-2)。これらのことから、植生がない(伐採地(伐採直後))、または植生があまり生育していない(伐採地(若齢二次林)、針葉樹(幼齢林))という植生条件が斜面崩壊の要因のひとつであると考えられる。この結果は、人為的な伐採や伐採からの植生の回復過程で斜面崩壊が発生しやすいことを明らかにした既往研究^{9), 10), 11)}などの結果と矛盾しない。なお、T地区では広葉樹においても崩壊発生率が高くなっているが、この原因としては、T地区の広葉樹が他の地区に比べて樹高が低い(10m未満のものが多い)疎林であり、根系の発達程度や降雨の緩衝能力など表層崩壊の抑制に繋がると考えられる能力が成熟した広葉樹林より低くなっている可能性が挙げられる。

(2) 落石の要因

落石の要因としては、落石の発生源となる露岩や転石の分布、岩盤の割れ目や風化程度などの地質条件と、岩塊が分布する斜面の傾斜などの地形条件が挙げられる。しかし、このうち岩盤の割れ目や風化程度、小規模な転石の分布については詳細な現地踏査によらなければ得られない情報である。そこで、リモートセンシングデータから情報を抽出できると考えられる落石の発生源となる露岩の分布について検討した。

露岩が分布していない斜面と露岩の地形の形状を比較すると、露岩が分布していない斜面は比較的滑らかで凹凸が少ないのに対し、露岩は斜面から突出するように分布し、周辺は凹凸が大きく、急傾斜あるいはオーバーハング状を呈することが多い。そこで、現地踏査で確認した露岩分布箇所と山地全体(露岩を含む)の斜面における傾斜量と斜面の凹凸を表

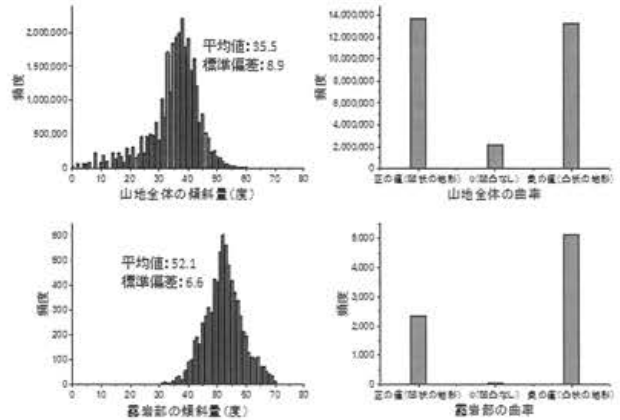


図-3 傾斜量と曲率の頻度分布

す曲率をDEMから算出して比較した(図-3)。ここで母数は、山地全体が30,436,043、露岩部が7,653である。

傾斜量についてみると、山地全体の傾斜量の平均値は35.3度で、50度以上の頻度は著しく少ない。これに対し、露岩部は傾斜量の平均値が52.1度で、頻度のほぼすべてが40度以上であるなど、山地全体と比べ頻度分布の特徴が大きく異なる。また曲率については、山地全体では正の値(凹状の地形)、負の値(凸状の地形)ともにほぼ同様の頻度になるが、露岩部では負の値(凸状の地形)が正の値(凹状の地形)の倍以上の頻度となっている。これらのことから、露岩は山地全体に比べより急傾斜で凸状の地形であるといえ、傾斜量が50度以上で曲率が負の値(凸状の地形)が露岩の地形的な特徴であると判断した。

3. 数値標高モデル・数値表層モデルによる地形と植生の区分

2章の結果から、斜面崩壊の要因として斜面の傾斜と形状、植生の状態が挙げられることがわかった。そこで数値標高モデル(DEM)および数値表層モデル(DSM)を用いてこれらの要因を区分する手法について検討した。

(1) DEMによる地形区分

地形条件のうち斜面の傾斜が30度以上の箇所については、DEMを用いて算出する傾斜量¹²⁾で区分可能であるため、DEMを用いた斜面形状の区分について検討した。図-1の斜面型は斜面の垂直断面と水平断面の組み合わせにより斜面の形状を幾何学的に区分する手法であり、この斜面の垂直断面形状と水平断面形状をDEMから求めるには縦断曲率と平面曲率⁷⁾が有用であると考えられる。図-4において、

DEMの格子点間隔を d 、各格子点における標高値を $Z1\sim Z9$ とし、

$$A = \{(Z4 + Z6) / 2 - Z5\} / d^2 \quad (1)$$

$$B = \{(Z2 + Z8) / 2 - Z5\} / d^2 \quad (2)$$

$$C = (-Z1 + Z3 + Z7 - Z9) / 4d^2 \quad (3)$$

$$D = (-Z4 + Z6) / 2d \quad (4)$$

$$E = (Z2 - Z8) / 2d \quad (5)$$

とすると、縦断曲率 PrC (Profile Curvature) と平面曲率 PIC (Plan Curvature) は、それぞれ式 (6)、(7) で定義される¹³⁾。

$$PrC = 2(AD^2 + BE^2 + CDE) / (D^2 + E^2) \quad (6)$$

$$PIC = -2(AE^2 + BD^2 - CDE) / (D^2 + E^2) \quad (7)$$

ここで、

- ・縦断曲率が負の値：垂直断面が凸（凸形）
- ・縦断曲率が正の値：垂直断面が凹（凹形）
- ・平面曲率が負の値：水平断面が凹（谷型）
- ・平面曲率が正の値：水平断面が凸（尾根型）
- ・各曲率の値が0：凹凸がなく直線状（等斉・直線）であることを示す。本検討で用いたDEMは格子点間隔が1mであるため、この場合の縦断曲率と平面曲率は1辺が2mの範囲内の凹凸を表す。しかし、地形図等の判読により斜面型の区分を行う場合は、2m四方程度のごく狭い範囲ではなく、明瞭な尾根や谷で境される数m～数十m程度の範囲をひとつの斜面として判読するため、単にDEMの縦断曲率と平面曲率を組み合わせるだけでは適切に斜面形状を区分することができない。そこで、ノイズの除去やある一定の範囲の傾向を把握する際に用いられる画像処理手法である空間フィルタリング¹⁴⁾を適用した。図-5に、縦断曲率と平面曲率を組み合わせた結果に空間フィルタリングを適用した例（ここでは計算窓を9×9、計算窓内の最頻値を中央のピクセルに返す処理を適用）を示す。これをみると、谷部は凹形谷型斜面、尾根部は凸形尾根型斜面として表現できており、斜面の形状を概ね区分することができているといえる。

(2) DSMによる植生区分

2章で得られた斜面崩壊の発生に寄与していると考えられる植生条件（植生がない、または植生があまり生育していない箇所）は、針葉樹（成熟林）などに比べ植生の高さ（樹高）が低いため、樹高に着目することで植生を区分することが可能になると考えられる。そこで、地盤面の標高値に植生などの土地被覆物の高さが加わったデータであるDSMからDEMを減算することで、樹木の高さを算出した。本論ではこれを数値樹冠モデル（Digital Canopy

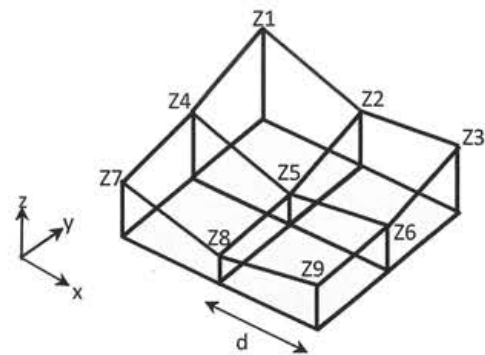


図-4 DEMの例

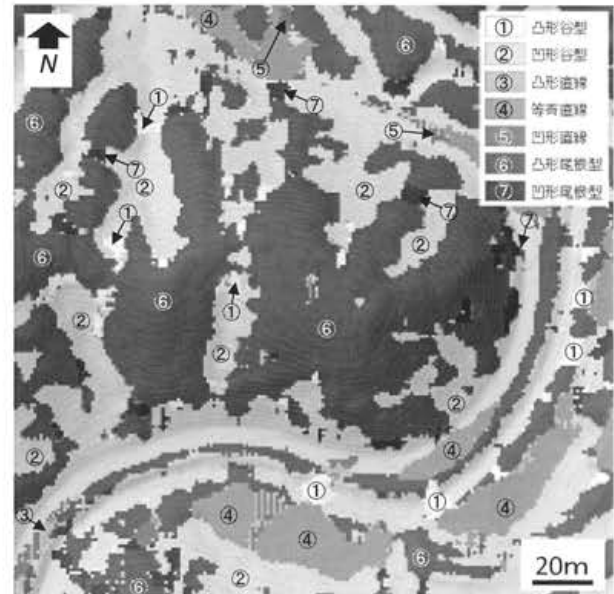
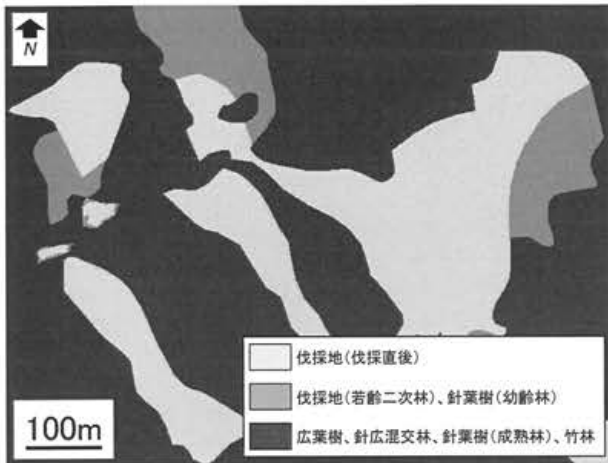


図-5 斜面型の区分結果

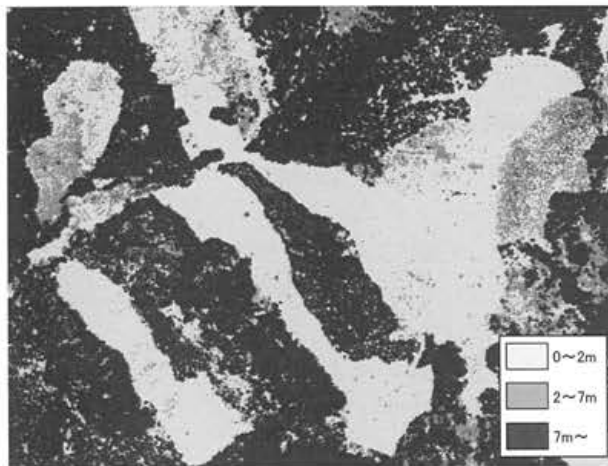
Model : DCM) と称する。各植生区分におけるDCMの値の頻度分布を検討した結果、以下のような傾向が見られた。

- ・広葉樹、針広混交林、針葉樹（成熟林）、竹林：平均値が15～20mで、DCMの値は0～30mの幅広い頻度分布を示す
- ・針葉樹（幼齡林）、伐採地（若齡二次林）：DCMの値は概ね10m未満である
- ・伐採地（伐採直後）：各地区ともに0mに大きなピークを有し、DCMの値は概ね2m未満である

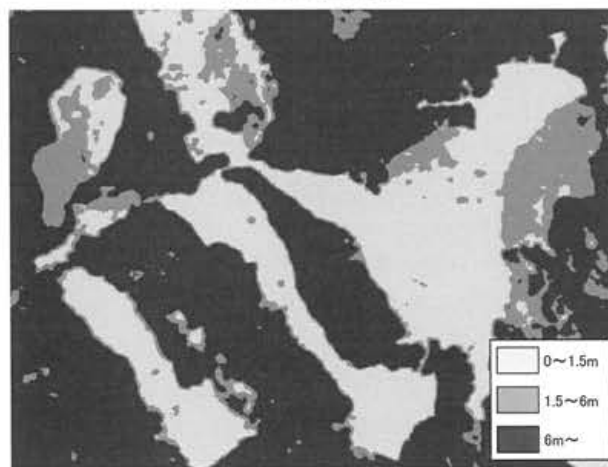
以上のことからDCMを用いて広葉樹、針広混交林、針葉樹（成熟林）、竹林を区分することは困難であるといえる。しかしこれらの植生区分における斜面崩壊の発生頻度に大きな差異が見られないことから（図3）、これらの植生区分は同じグループとして扱ってもよいと判断した。また同様の理由で伐採地（若齡二次林）と針葉樹（幼齡林）も同じグループとして扱えると考えた。なお伐採地（伐採直後）については、他の植生区分とDCMの頻度分布が異なるため区分が可能である。そこで空中写真判読と現



(a) 植生区分図



(b) DCM区分図



(c) 空間フィルタリング適用後のDCM区分図

図-6 植生区分図と DCM 区分図

地踏査により作成した植生区分図と DCM の区分結果が調和的になるよう閾値を以下のように設定した。

- ・ 0~2m : 伐採地 (伐採直後)
- ・ 2~7m : 伐採地 (若齢二次林), 針葉樹 (幼齢林)
- ・ 7m~ : 広葉樹, 針広混交林, 針葉樹 (成熟林), 竹林

空中写真判読および現地踏査により作成した植生区分図 (図-6 (a)) と DCM 区分図 (図-6 (b)) を比

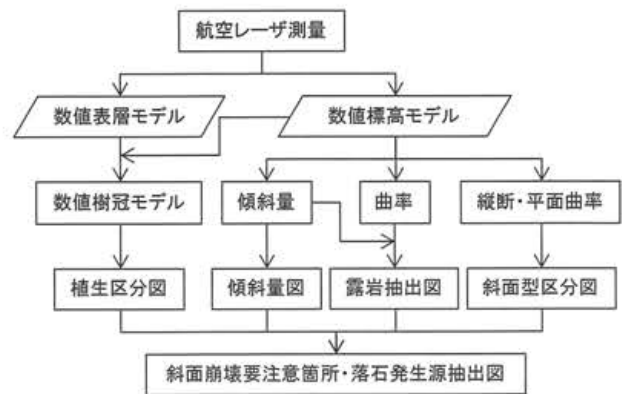


図-7 抽出フロー

較すると、DCM 区分図では伐採地 (伐採直後), 伐採地 (若齢二次林), 針葉樹 (幼齢林) の分布箇所や形状はよく再現できている。しかし針葉樹 (成熟林) や広葉樹の分布範囲に DCM の値が低い箇所が散在している。これは樹冠と樹冠の間の隙間であり、この影響を除去するため、斜面形状の区分と同様に空間フィルタリングを適用した (図-6 (c)) ; ここでは計算窓を 9×9 とし、計算窓内の中央のセルに平均値を返す空間フィルタリングを適用)。空間フィルタリング後の DCM について前述の閾値を適用した場合に良好な植生区分結果を得られなかったため、図-6 (c) の凡例に示すように閾値を再度調整し、各植生区分の分布範囲や形状を再現した。

4. 斜面災害発生危険度の評価

斜面の傾斜, 斜面型, 植生を数値標高モデルおよび数値表層モデルを用いて区分した結果は数値として取り扱うことができる。そこでこれらを説明変数, 崩壊か未崩壊かを目的変数として, ロジスティック回帰分析¹⁵⁾により各要因の項目の寄与度および要因間の寄与度を求めた。ロジスティック回帰分析とは, 2値の質的な被説明変数と, 質的または連続的な説明変数との関係をモデル化する際に用いられる手法のひとつである。

求めた寄与度に応じて要因の各項目および要因ごとに重みづけを行い, 重ね合わせることで, 崩壊地および崩壊地と類似する地形・植生条件下にある箇所 (斜面崩壊の要注意箇所) を抽出した。抽出フローを図-7に, 抽出結果を図-8に示す。また落石については, 第2章の結果から, 傾斜量が50度以上と曲率が負 (凸状の地形) のふたつの条件の論理積をとり, 落石発生源となる露岩を抽出した (図-8)。

なおこれらの結果については, 現地踏査による検証を行い, 崩壊地や斜面崩壊が発生する可能性があると考えられる箇所や露岩の分布位置が概ね抽出さ

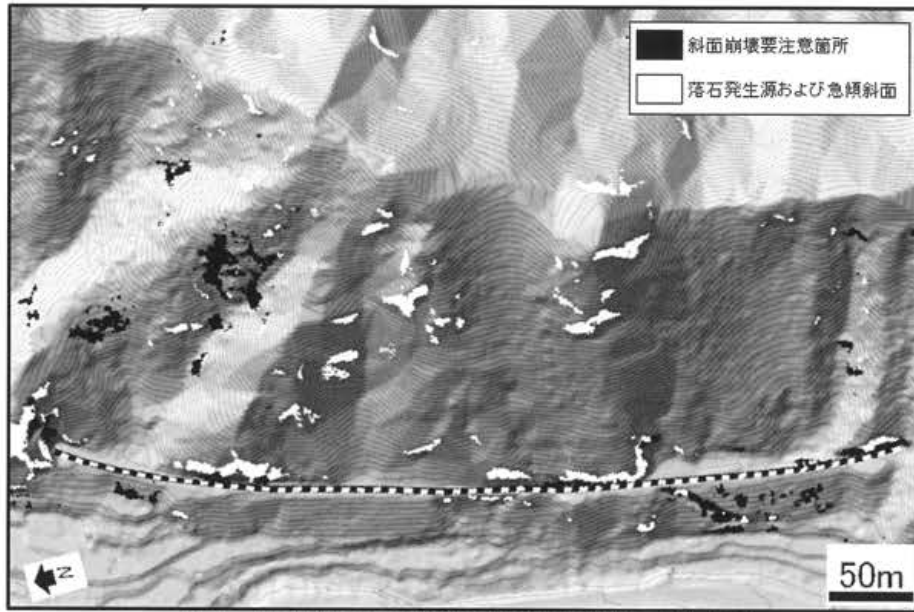


図-8 斜面崩壊の要注意箇所と落石発生源の抽出結果

れていることを確認した。

5. 結論

本手法は広域の概略調査手法として有効であると考えられる。すなわち日常的に検査を行うことが難しい鉄道用地外の斜面や溪流における斜面崩壊および落石の要注意箇所を本手法により抽出することで、防災対策を行う際の詳細調査（現地踏査やシミュレーションなど）を実施する箇所を絞り込むことが可能になる。

謝辞 本稿の作成にあたっては、3名の匿名査読者の方々から有益なご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

なお本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) 千葉達朗, 富田陽子, 鈴木雄介, 荒井健一, 藤井紀綱, 宮地直道, 小泉市朗, 中島幸信: 航空レーザ計測にもとづく青木ヶ原溶岩の微地形解析, 富士火山, pp.349-363, 2007.
- 2) 千木良雅弘: 深層崩壊 - どこが崩れるのか -, 近未来社, 231p.
- 3) 高見智之: 細密 DEM を活用した地形解析に基づく重力変形斜面の類型化, 応用地質, Vol. 56, No. 5, pp. 210-218, 2015.
- 4) 田中茂: 山地斜面の崩壊箇所の予想について, 建設工学研究所報告, No. 4, pp. 147-161, 1963.
- 5) 塚本良則: 侵食谷の発達様式に関する研究 (I) - 豪

雨型山崩れと谷の成長との関係についてのひとつの考え方 -, 新砂防, 87, pp. 4-13, 1973.

- 6) 羽田野誠一: 豪雨に起因する表層崩壊危険度調査の一手法, 第13回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, pp. 3-4, 1976.
- 7) 沖村孝: 地形要因からみた山腹崩壊発生危険度評価の一手法, 新砂防, 35-3, pp. 1-8.
- 8) 鈴木隆介: 建設技術者のための地形図読図入門 第1巻 読図の基礎, 古今書院, p. 122, 1997.
- 9) 塚本良則: 森林と表土の荒廃プロセス - 小起伏山地におけるハゲ山の形成過程, 砂防学会誌, Vol. 54, No. 4, pp. 82-92, 2001.
- 10) 塚本良則: ハゲ山モデル - 小起伏山地における森林と表土の荒廃・回復過程の分析 -, 砂防学会誌, Vol. 54, No. 5, pp. 66-77, 2002.
- 11) 塚本良則: 土砂災害と対策の時代変化 - ハゲ山モデルによる小起伏山地の災害分析 - 砂防学会誌, Vol. 54, No. 6, pp. 43-50, 2002.
- 12) 太田岳洋, 八戸昭一: 数値標高モデルによる地形計測の現状と応用例, 応用地質, Vol. 46, No. 6, pp. 347-360, 2006.
- 13) Peter a. Burrough and Rachael A. McDonnell: Principles of Geographical Information System, Oxford University Press, p. 191, 1998.
- 14) 加藤正人: 改訂 森林リモートセンシング - 基礎から応用まで -, 日本林業調査会, p. 122, 2007.
- 15) Annette J. Dobson, 一般化線形モデル入門 原著第2版, 264p, 2008.

(2016. 5. 31 受付)