

空間数値情報を用いた斜面崩壊の発生危険箇所 抽出手法

長谷川 淳* 太田 岳洋*

Assessment of the Incidence of Landslides Using of Numerical Information

Atsushi HASEGAWA Takehiro OHTA

Recently, a railway often suffers damage by a landslide that occurs at the natural slope beside a railway. If we check stability of all natural slopes beside a railway, we will need a huge amount of time and expenses. Therefore, it is important to develop an efficient and reasonable management method for natural slopes. In this research, we quantified the factors of landslides such as geomorphologic features and vegetation, using a digital elevation model and a digital surface model. Then we extracted the place that a landslide may be generated by use of the evaluated factors.

キーワード：斜面崩壊，傾斜，斜面形状，植生，数値標高モデル，数値表層モデル

1. はじめに

斜面崩壊の発生には、降雨や地震などの誘因だけでなく、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と考えられる。従来、斜面崩壊の発生危険度評価は、空中写真判読や現地踏査などにより行われてきた。これらは目視を主体とした調査法であり、計測機器や各種調査機器を使用する調査法に比べて短時間でより多くの斜面を調査することが可能である。しかしその評価結果は定性的であり、調査者により結果が異なる場合があるほか、長大な線形構造物である鉄道の沿線に多数分布する自然斜面すべてについてこれらの調査を実施するには膨大な費用と時間を要するなどの問題点がある。このため、広範囲の斜面を迅速かつ定量的に評価する手法の開発が望まれている。

一方、近年のコンピュータ技術の進歩や地理情報システム（Geographical Information System：GIS）の発達にともない、国土に関する様々な情報を数値化したデータの利用が進んでいる。例えば、国土地理院から刊行されている「数値地図 50m メッシュ（標高）」に代表される数値標高モデル（Digital Elevation Model：以下、DEM と称する）は、地形を標高値のメッシュデータとして表現したものである。このため地形に関する特徴を定量的に、かつ全国を均一な精度で評価できることから、これを利用した様々な検討が行われている^{1, 2, 3, 4)}。また、航空レーザ測量技術の発展により格子点間隔が 1m 以下

の細密かつ高精度な DEM が作成されるようになり、地表面の詳細な形状を定量的に表現できるようになった。このため、災害前後の地形面の変化量を抽出する試み^{5, 6)}や、DEM と衛星画像を用いて斜面災害が発生する危険のある箇所を抽出する試み⁷⁾など、防災分野においても DEM の利用に関する検討が行われている。

以上のことから、本研究では、斜面崩壊の要因となる各種条件を明らかにし、これらの条件を DEM などの空間数値情報を用いて数値化した。そして数値化した要因を用いて、斜面崩壊が発生する可能性がある箇所を広範囲かつ客観的に抽出する手法について検討した。

2. 各種調査による斜面崩壊の要因の抽出

検討対象として、ひとつの地区内で地質が比較的均質で、かつ他地区と地質が重複しないよう 4 つの地区を選定した。各地区の地形・地質などの概要を表 1 に示す。

2.1 検討方法

斜面崩壊の発生に寄与する要因を明らかにするため、空中写真判読、現地踏査等を行い、斜面崩壊箇所の特徴的な地形、地質、植生などの条件について検討した。調査項目は以下のとおりである。

2.1.1 空中写真判読

各地区について複数時期の空中写真を用い、表 2 に示す項目について判読を行った。

2.1.2 現地踏査

空中写真判読から得られた地形の区分や植生の分布状

* 防災技術研究部 地質研究室

表1 対象地区の概要

対象地区	面積 (km ²)	地質	地形	植生
D地区	25	火成岩 (凝灰岩類)	低山地 U字谷を形成 溪床勾配：緩	林業がさかん 針葉樹優勢 伐採地多い
N地区	25	火成岩 (花崗岩類)	急峻な山地 V字谷を形成 溪床勾配：急	針広混交林と 針葉樹が優勢
T地区	34	堆積岩 (砂岩・頁岩)	低山地～丘陵地 U字谷を形成 溪床勾配：緩	常緑広葉樹が優勢
S地区	28	変成岩 (片岩)	急峻な山地 V字谷を形成 溪床勾配：急	針葉樹と 広葉樹が優勢

表2 空中写真判読項目

区分	判読項目
地形	遷急線、遷緩線、崩壊地、ガリー、移動物質の堆積、 溪床の状態、集水地形、崖すい、岩盤の露出 など
植生	植生区分 (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)
人工改変	林道などの建設による切土・盛土、宅地造成、伐採および植林、 河川や溪流における護岸工事および砂防工事 など

況などについて現地踏査により確認・補足するとともに、空中写真では樹木などの影響で判読できない微地形、斜面上や溪流内の堆積物、露岩や転石の分布状況などについて調査した。

2.1.3 数値標高モデルの作成および解析

各地区について航空レーザ測量を行い、格子点間隔が1mのDEMおよび数値表層モデル (Digital Surface Model：以下、DSMと称する) を作成した。なおDEMとDSMについては第3章で詳述する。また、GIS上でDEMから作成した等高線図上に空中写真判読および現地踏査の結果をマッピングして地形区分図および植生区分図を作成し、各地区における斜面崩壊の発生に寄与する要因について検討した。

2.2 斜面崩壊の要因

斜面崩壊の要因としては、地質構造や岩石の風化程度などの地質条件、斜面の形状や傾斜、遷急線の有無などの地形条件、植生の有無や生育状況などの植生条件、湧水の有無や地下水位などの地下水条件、人工改変などの環境条件が挙げられるが、このうち地質条件や地下水条件を空間数値情報から得ることは困難である。そこで、表1に示した地質条件がほぼ均質と見なせる4地区の斜面崩壊箇所の特徴的な地形条件および植生条件について検討した。ここで検討対象とした斜面崩壊は、D地区：21箇所、N地区：17箇所、T地区：421箇所、S地区：68箇所、地震によって発生したN地区の2箇所を除き、いずれも降雨による表層崩壊である。

2.2.1 地形条件

空中写真判読および現地踏査の結果、いずれの地区においても集水地形や急傾斜の斜面で崩壊が発生する傾向が見られたため、DEMから算出した傾斜量およびDEMから作成した等高線図を用いて、斜面の傾斜や形状と斜面崩壊の関係について検討した。なお以降で「傾斜量」と記述する場合はDEMから算出した傾斜の値である。ここで対象格子点 (x_i, y_i) における標高を $u(x_i, y_i)$ とし、対象格子点のx方向およびy方向に隣接する4格子点の標高を $u(x_{i-1}, y_i)$, $u(x_{i+1}, y_i)$, $u(x_i, y_{i-1})$, $u(x_i, y_{i+1})$ とすると、対象格子点における傾斜量 $S(x_i, y_i)$ は以下の式で近似される。

$$S(x_i, y_i) = \left\{ \left(\frac{u(x_{i+1}, y_i) - u(x_{i-1}, y_i)}{2\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{u(x_i, y_{i+1}) - u(x_i, y_{i-1})}{2\Delta y} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

なお本検討では格子点間隔が1mのDEMを用いたため、(1)式において $\Delta x = \Delta y = 1m$ である。

DEMやDSMおよびこれらから算出した傾斜量などの格子状に並んだ点群データは、ラスタデータとして取り扱うことで他のデータとの比較や解析が容易になる。

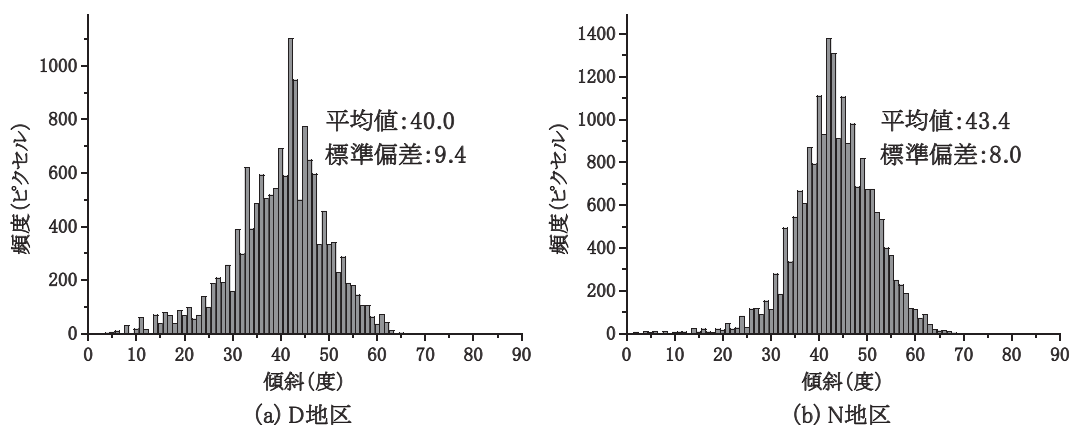


図1 崩壊地における傾斜量の頻度分布の例

ラスタデータは正方形または長方形のピクセルが規則正しく並んだものであり、各ピクセルは属性としてピクセル値と位置情報を有する。すなわち DEM の場合は各ピクセルが標高値（ピクセル値）と座標（位置情報）を有する。そこで DEM やその解析結果については、各格子点を中心点とする 1 辺が 1m のピクセルを生成し、各ピクセルに含まれる格子点の値をピクセル値としてラスタデータ化した。

崩壊地における傾斜量の頻度分布の例を図 1 に示す。ここで頻度とは、崩壊地内に含まれるピクセル数を表す。いずれの地区においても傾斜量の平均値は 40 度前後、標準偏差は 7～9 程度である。また、傾斜量が 30 度以上になると頻度が急激に増加する傾向がみられる。そこで、各地区において崩壊地に含まれるすべてのピクセルのうち傾斜量が 30 度以上のピクセルの割合を算出したところ、D 地区は 88%、N 地区は 96%、T 地区は 73%、S 地区は 95% であった。検討対象とした斜面崩壊は表層崩壊で崩壊深が浅く、また崩壊面は平滑であることから、崩壊面の傾斜は崩壊前の斜面の傾斜と概ね一致すると考えられる。これらのことから、斜面の傾斜が 30 度以上の箇所で斜面崩壊が発生しやすい傾向があると判断した。なお他地区に比べ T 地区で 30 度以下の頻度が比較的多い理由は、当該地区の崩壊地では崩壊面の中腹から下部にかけて崩積土が堆積し、比較的緩勾配の斜面を形成している場合が多く、DEM から算出される傾斜量もそれにともない小さくなる傾向があるためであると考えられる。

次に、DEM から作成した等高線図から崩壊地付近の斜面の垂直断面形状と水平断面形状を読み取り、この組み合わせにより斜面形状を区分⁸⁾した。各地区で確認した斜面崩壊の全数に対する各斜面形状において発生している斜面崩壊の数の割合をみると、凹形谷型斜面、等斉谷型斜面、凹形直線斜面、等斉直線斜面でほぼすべての斜面崩壊が発生していることがわかった（図 2）。このうち集水地形と称される凹形谷型斜面と等斉谷型斜面での発生割合が特に高い。このことから、集水地形などの特定の斜面形状が斜面崩壊の要因のひとつであると考えられる。

2.2.2 植生条件

各地区の植生を、①広葉樹、②針広混交林、③針葉樹（成熟林）、④針葉樹（幼齢林）、⑤伐採地（伐採直後）、⑥伐採地（若齢二次林）、⑦竹林に区分し、植生と斜面崩壊の関係について検討した。各地区の植生区分ごとの崩壊発生率（各植生区分 1km² あたりの斜面崩壊数）を図 3 に示す。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。また、地区によっては、伐採地（若齢二次林）や針葉樹（幼齢林）でも多くの斜面崩壊が発生している。これらのことから、

		斜面の水平断面形状		
		尾根状	直線状	谷状
斜面の垂直断面形状	凸状	凸形尾根型	凸形直線	凸形谷型
	直線状	等斉尾根型	等斉直線	等斉谷型
	凹状	凹形尾根型	凹形直線	凹形谷型

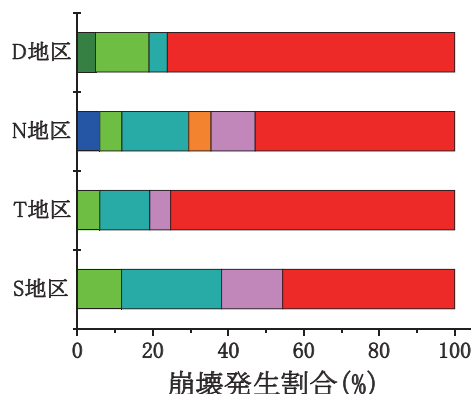


図 2 斜面形状区分（上図）と崩壊発生割合（下図）

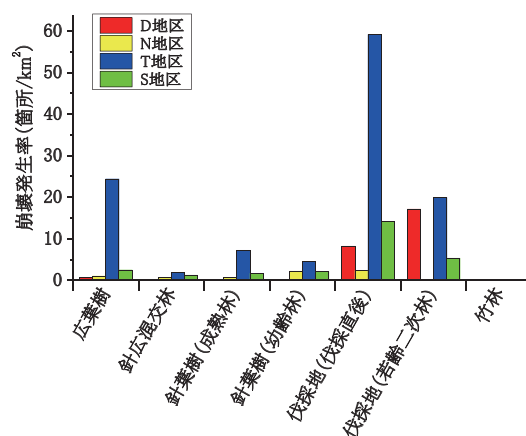


図 3 植生区分ごとの崩壊発生率

伐採地（伐採直後）、伐採地（若齢二次林）、針葉樹（幼齢林）のような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。

3. 数値標高モデルおよび数値表層モデルによる地形・植生条件の数値化

前章の結果から、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数値化する手法について検討した。

本検討で使用した DEM と DSM は、航空レーザ測量により得られたデータであり、格子点間隔が 1m の細密なデータである。航空レーザ測量では、飛行機やヘリコプターに搭載した機器から地上にレーザを照射し、地上

特集：防災技術

から反射されたパルスを観測する。レーザは樹木や建物などの土地被覆物や地盤面などで反射されるが、任意の点において複数回反射パルスを観測した場合、最後に観測されたパルス（ラストパルス）は最も長い経路を通ってきたものであり、地盤面で反射されたパルスであると考えられる。このラストパルスから作成されるのが、地盤面の標高のモデルである DEM である（図4）。一方、DSM は任意の点において最初に反射されたパルス（ファーストパルス）から作成される。ファーストパルスは樹木や建物などの土地被覆物の表面で反射されたものであると考えられるため、土地被覆物の表面の標高をモデル化したものであるといえる（図4）。

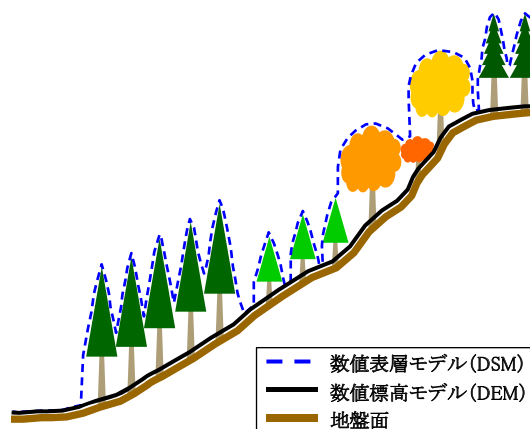


図4 数値表層モデルと数値標高モデルの違い

3.1 数値標高モデルによる地形条件の区分

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から算出できる傾斜量（式(1)）で容易に区分できる。そこで、DEMを用いた斜面形状の区分手法について検討した。図2の斜面形状は、斜面の垂直断面形状と水平断面形状の凹凸の組み合わせによる区分である。DEMから算出できる地形量のうち、これらを表すものとして、縦断曲率と平面曲率⁹⁾がある。図5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～Z9とし、

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

$$B = \{(Z2 + Z8) / 2 - Z5\} / d^2 \quad (3)$$

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

$$D = (-Z4 + Z6) / 2d \quad (5)$$

$$E = (Z2 - Z8) / 2d \quad (6)$$

とするとき、縦断曲率 PrC (Profile Curvature) と平面曲率 PIC (Plan Curvature) は、次式で定義される⁹⁾。

$$PrC = 2(AD^2 + BE^2 + CDE) / (D^2 + E^2) \quad (7)$$

$$PIC = -2(AE^2 + BD^2 - CDE) / (D^2 + E^2) \quad (8)$$

ここで縦断曲率が負の値の場合は垂直断面が凸（凸形）、正の値の場合は垂直断面が凹（凹形）、平面曲率が負の値の場合は水平断面が凹（谷型）、正の値の場合は水平断面が凸（尾根型）である。またいずれの曲率も値が0の場合は凹凸がなく直線状であることを表す。これらのことから、縦断曲率と平面曲率の組合せと斜面形状の関係は表3のようになる。本検討で用いたDEMは格子点間隔が1mであり、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ことになる。しかし、図2の斜面形状は数m～数十m程度の広がりを持つため、このままでは適切に斜面の形状を区分することができない。そこで、空間フィルタリングを適用した。空間フィルタリングとは、例えば3ピクセル×3ピクセルの大きさの計算窓を対象とするラスタデータにかぶせ、計算窓内に含まれるピクセル値をあらかじめ設定されている計算方法に従い計算し、その結果を中央のピクセル

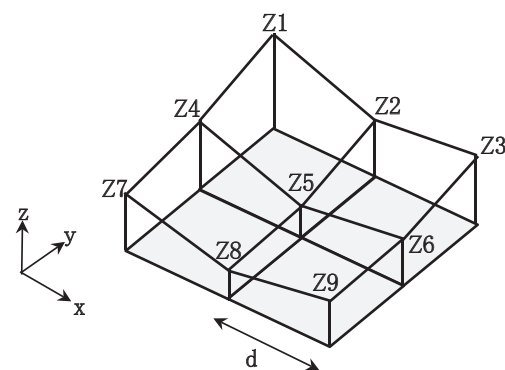


図5 DEMの例

表3 縦断曲率・平面曲率の組合せと斜面形状

		平面曲率の値		
		正	0	負
縦断曲率の値	負	凸形尾根型	凸形直線	凸形谷型
	0	等斉尾根型	等斉直線	等斉谷型
	正	凹形尾根型	凹形直線	凹形谷型

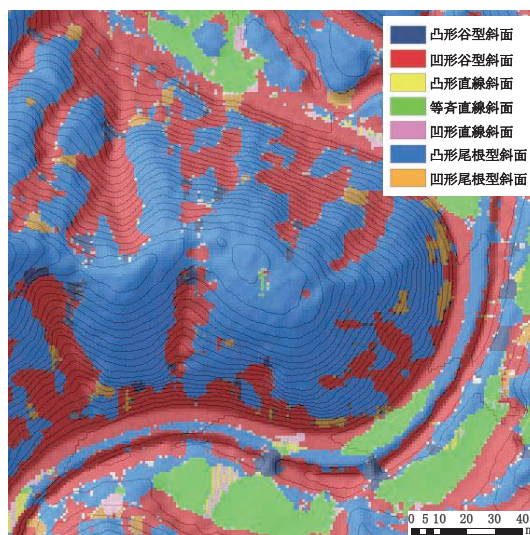


図6 斜面形状の区分例

に返すという処理を行うもので、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手法である。縦断曲率と平面曲率を組み合わせた結果に、計算窓を9ピクセル×9ピクセルとし、計算窓内の最頻値を中央のピクセルに返す空間フィルタリングを適用した結果を図6に示す。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、斜面の形状を適切に区分することができているといえる。

3.2 数値樹冠モデルによる植生区分

斜面崩壊の発生に寄与していると考えられる植生条件は、伐採地（伐採直後）などの植生がほとんどないか、あまり繁茂していない箇所であり、これらの植生区分は針葉樹（成熟林）や広葉樹に比べ植生の高さ（樹高）が低い。このことから、空間数値情報から樹高を求めることができれば、植生を区分できる可能性がある。そこで、DSMに着目した。DSMは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ため、DSMからDEMを減算することで、植生の高さを算出できる。これを数値樹冠モデル（Digital Canopy Model：DCM）と称する。DCMを用いて植生を区分する際の閾値を設定するため、各植生区分におけるDCM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。

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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の分布範囲やピークが類似する広葉樹、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。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考えられる。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うこととした。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と考えられる。そこで閾値を以下のように設定し、DCMを区分した。

- 0～2m：伐採地（伐採直後）
- 2～7m：伐採地（若齡二次林）、針葉樹（幼齡林）
- 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7（a））と、DCM区分図（図7（b））をみると、DCM区分図では伐採地（伐採直後）、伐採地（若齡二

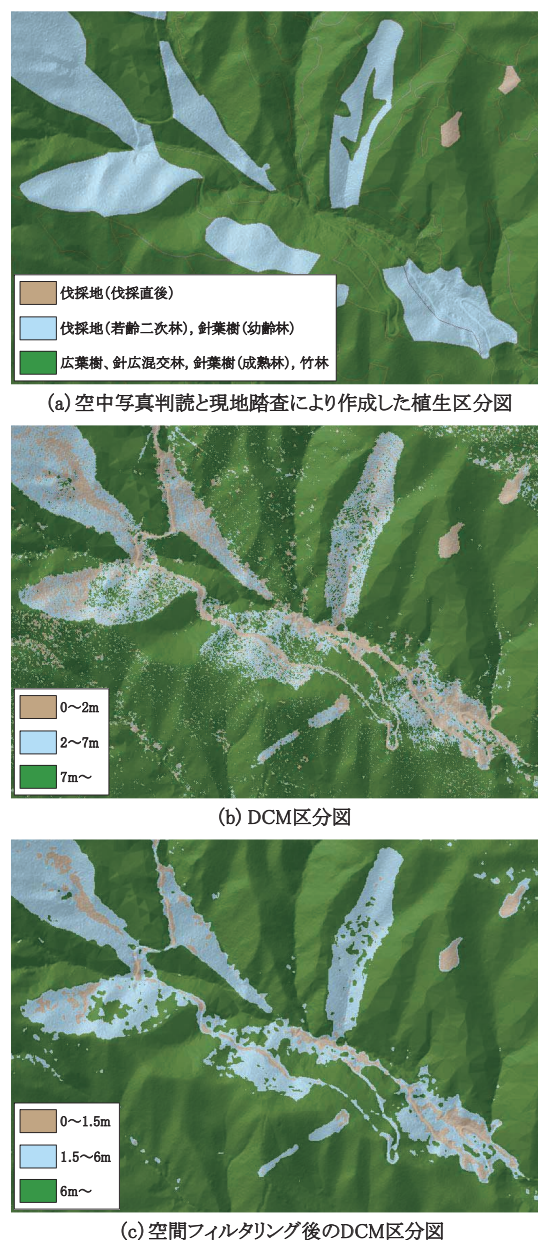


図7 植生区分図とDCM区分図の比較

次林）、針葉樹（幼齡林）の分布箇所や形状がよく再現されているが、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、前節と同様に空間フィルタリングを適用した。計算窓を9ピクセル×9ピクセルとし、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DCMに適用した結果を図7（c）に示す。空間フィルタリング適用前のDCM区分図（図7（b））と比べ、いずれの植生区分もその分布範囲や形状をよく再現することができている。ただし、谷底など植生が疎な箇所では、伐採地（若齡二次林）や針葉樹（幼齡林）に区分されるべき箇所が伐採地（伐採直後）として誤分類される傾向がある。

4. 斜面崩壊発生危険度の評価

斜面崩壊の要因と考えられる斜面の傾斜, 斜面の形状, 植生をDEMおよびDSMを用いて区分した結果は数値として取り扱うことが可能である。そこで崩壊地と崩壊地以外の山地のそれぞれについて各要因の値を抽出し, 崩壊地を判別するための各要因におけるカテゴリー(斜面形状であれば凸形尾根型斜面や凹形谷型斜面などの各項目)の寄与度および要因間の寄与度を統計的手法により求めた。この際, 採用した統計的手法は, 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の際に一般的に用いられるロジスティック回帰分析¹⁰⁾である。さらに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斜面崩壊発生危険箇所を抽出する手法を開発した。抽出フローを図8に, 抽出結果を図9に示す。なお, 本抽出結果については, 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が概ね抽出されていることを確認した。

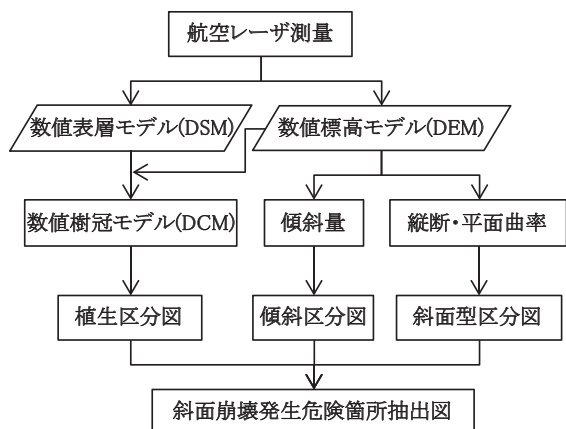


図8 抽出フロー

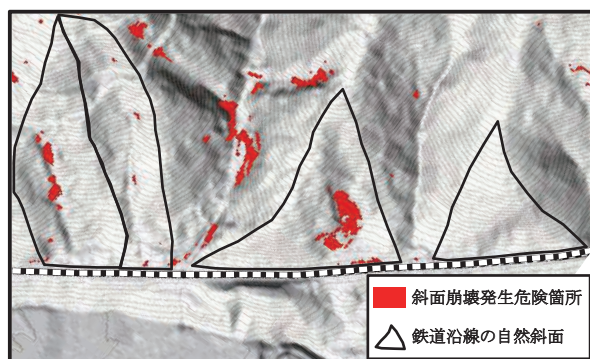


図9 抽出結果

5. まとめ

本報告では, 斜面崩壊の発生に関わる地形条件および植生条件を数値標高モデル(DEM)と数値表層モデル(DSM)を用いて数値化し, これらを用いて斜面崩壊の

発生危険箇所を抽出する手法について示した。

斜面崩壊の発生には, 地形や植生の条件のほか, 岩質や地質構造, 岩盤の風化程度, 割れ目の状態, 表層土の厚さ, 湧水の有無など様々な要因が関与していると考えられるが, これらの情報を空間数値情報から得ることは現時点では困難である。しかし, これまで述べたように, 地形条件と植生条件のみからでも斜面崩壊が発生する可能性がある箇所を抽出することが可能である。本手法は広域に分布する斜面や溪流を概略的に調査する一次スクリーニング手法として有効であると考えられる。すなわち定期的な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の発生危険箇所を本手法により把握することで, 防災対策を行う際に詳細調査(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できる。また, 定期的にデータを取得することで伐採地の拡大などの環境変化を把握することが可能になる。

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。

文献

- 1) 野上道男：50m-DEMによる地形計測値と地質の関係、地理学評論, Vol.72A, No.1, pp.23-29, 1999
- 2) 神谷泉, 田中耕平, 長谷川裕之, 黒木貴一, 早田靖博, 小田切聡子, 政春尋志：傾斜量図の作成とその応用, 情報地質, Vol.10, No.2, pp.76-79, 1999
- 3) 太田岳洋, 大野和巳：DEMによる地形計測プログラムの作成と四国地域における試計算, 情報地質, Vol.11, No.2, pp.104-107, 2000
- 4) 太田岳洋：数値地図50mメッシュ(標高)による三浦半島における斜面崩壊地の地形的特徴に関する検討 - 50m-DEMによる自然災害評価の限界と期待 -, 応用地質, Vol.46, No.6, pp.331-340, 2006
- 5) 中村良光, 椎葉秀作, 柏原佳明, 小川紀一郎：航空レーザ計測を用いた土砂生産流域における河床変動状況, 砂防学会誌, Vol.59, No.4, pp.54-57, 2006
- 6) 石丸聡, 川上源太郎, 田近淳, 対馬俊之, 阿部友幸, 滝澤昭博：2003年台風10号による北海道日高地方里平地区の崩壊の形態的特徴と発生場 - 航空レーザ測量データを用いた解析 -, 地すべり, Vol.45, No.2, pp.15-27, 2008
- 7) 太田岳洋, 長谷川淳, 榎本秀明：空間数値情報を利用した斜面の不安定性評価法, 鉄道総研報告, Vol.19, No.10, pp.27-32, 2005
- 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, 1997
- 9) Peter A. Burrough and Rachael A. McDonnell, "Principles of Geographical Information System", Oxford University Press, p.191, 1998.
- 10) Annette J. Dobson 著, 田中豊, 森川敏彦, 山中竹春, 富田誠 訳：一般化線形モデル入門, pp.139-162, 2008