

数値標高モデルを用いた落石ハザードマップ作成手法

長谷川 淳* 浦越 拓野*

Hazard Mapping Method about Rockfall using Digital Elevation Model

Atsushi HASEGAWA Takuya URAKOSHI

Because of uncertainty of the relation between rockfalls and external forces caused by the events such as rain-falls, earthquakes, melting snow, it is difficult to predict the occurrence of rockfall. In order to take measures against rockfall disasters, it is necessary to make clear distribution of the rock-outcrops, the possibility of falling, a falling path, and reachability to the railway. But it is difficult to obtain these matters with respect to all the rock outcrops because there are too many natural slopes adjacent to the railways to survey. Here, we introduce a method of hazard map creation about rockfalls using Digital Elevation Models. By this method, it is possible to know the risk of rockfall extensively along the railway.

キーワード：落石，ハザードマップ，GIS，数値標高モデル

1. はじめに

落石は、斜面崩壊、地すべり、土石流などの他の土砂災害に比べ降雨や地震などの外力との因果関係が不明瞭であり、また前兆現象がほとんど見られないことから、その発生を予測することが困難な現象である。鉄道ではあらかじめ定められた基準値を超過する降雨、風速、地震等を観測した場合に列車の運行を規制する運転規制が導入されているが、前述のような落石の特徴により、運転規制のみで落石災害を防ぐことは難しい。このことから、沿線の自然斜面において落石の発生が懸念される箇所について事前に調査を行い、必要に応じて落石対策を講じることが重要である。対策にあたっては、発生源の位置や規模を把握し、落下する可能性がある岩塊の大きさや落下経路、線路への到達の可能性を推定することが肝要である。しかし鉄道沿線には無数の自然斜面があり、鉄道用地外も含めた広範囲を調査し対策に必要な情報を収集するためには膨大な時間と費用を要する。このため、鉄道用地内外を含む広い範囲において落石発生源の位置や規模、落下経路や線路への到達確率を把握することができれば、鉄道沿線の斜面を管理するうえで有効な手段となると考えられる。

一方、近年、土砂災害に関わる調査に航空レーザ測量が多用されるようになってきた。航空レーザ測量により作成された数値標高モデル（Digital Elevation Model；DEM）では地表面の細かな形状が表現され、これをもとに作成した陰影図等から微地形を判読することが可能であり^{例えば1)}など、DEMを用いることで落石発生源とな

る露岩を抽出できる可能性がある。また地形の形状をもとにした落下経路解析や、落石シミュレーションの結果をDEM上に表示させることも可能であると考えられる。

そこで本論では、航空レーザ測量により作成したDEMを用いて露岩の抽出から線路への落石の到達確率の表示までを行う落石ハザードマップを作成する手法について検討した結果について記述する。

2. 露岩の地形的な特徴と地形量との関係

露岩がない自然斜面と露岩の地形の形状を比較すると、露岩がない斜面は比較的凹凸が少ないのに対し、露岩は斜面から突出し表面は凹凸が大きく急傾斜面（あるいはオーバーハング）を形成することが多い（図1）。このことから露岩は、①急傾斜面を形成し、かつ、②周辺の斜面から突出した地形、であると言い換えることが



図1 露岩の分布状況の例

* 防災技術研究部 地質研究室

特集：防災技術

できる。この2点の特徴をDEMを用いて表す場合、①は「傾斜量」を、②は「曲率」を用いるのが適当であると考えられる。ここで傾斜量と曲率は以下のように定義する。

・傾斜量²⁾

対象格子点 (x_i, y_i) に x 方向および y 方向に隣接する 4 格子点 (x_{i-1}, y_i) , (x_{i+1}, y_i) , (x_i, y_{i-1}) , (x_i, y_{i+1}) の標高値から近似差分により求める。対象格子点 (x_i, y_i) における標高を $u(x_i, y_i)$ とすると傾斜量 $S(x_i, y_i)$ は(1)式で近似される。

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

・曲率²⁾

曲率 $L(x_i, y_i)$ は勾配の微分であり、(2)式で近似される。

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

曲率は、(2)式の計算結果の値が正であれば対象格子点 (x_i, y_i) は周囲の点に比べくぼんでいる状態(凹状の地形)を表し、負であれば対象格子点 (x_i, y_i) は周囲の点に比べ突出している状態(凸状の地形)を表す。

露岩部における傾斜量と曲率の値の傾向を把握するため、現地踏査で確認した露岩の分布位置および範囲を 1m メッシュ DEM から生成した等高線図上に描画し、「露岩部分」と「山地全体(露岩部分を含む)」の傾斜量と曲率の頻度分布を比較した(図2)。傾斜量の頻度分布をみると、「山地全体」の傾斜の最頻値は 38 度付近で、50 度以上の頻度は非常に少ない。これに対し「露岩部分」は傾斜量がおおむね 40 度以上で、最頻値は 52 度付近である。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)ともにほぼ同程度の頻度であるが、露岩部分では負の値は正の値の 2 倍以上の頻度になる。これらのことから、露岩は山地全体に比べてより急傾斜で凸状の地形を呈する傾向があり、傾斜量および曲率を用いて露岩を抽出できる可能性があると考えられる。

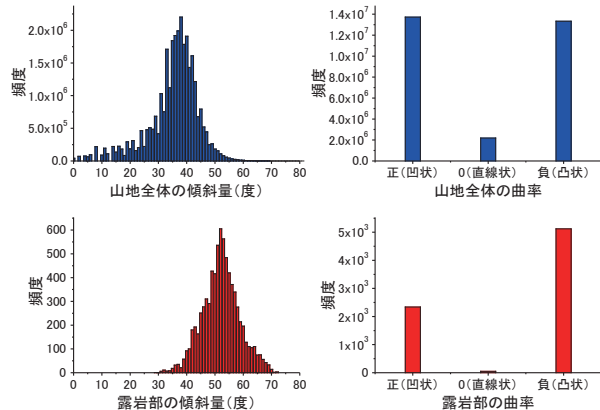


図2 傾斜と曲率の頻度分布

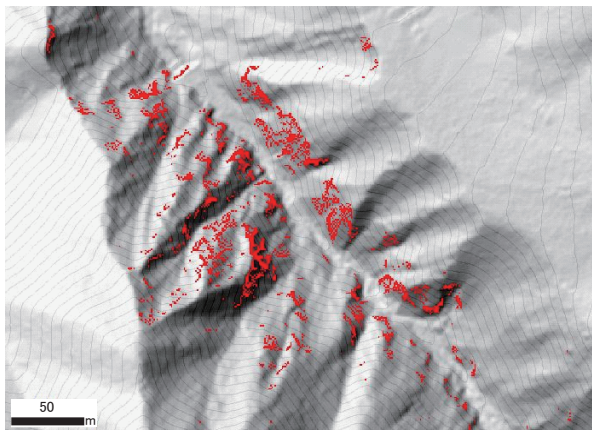
3. 露岩抽出法

前章の結果をもとに、露岩分布箇所を表す特徴が①傾斜量 50 度以上、②曲率が負の値(凸状の地形)であるとして、DEMを用いた露岩の抽出を試みた。具体的には、傾斜量を① 50 度未満と② 50 度以上に、曲率を負の値(凸状の地形)、0(平らな地形)、正の値(凹状の地形)に区分し、傾斜量 50 度以上と曲率が負の値の論理積をとった(図3の(a))。抽出結果は散点的に分布し、実際に露岩が分布する箇所抽出点が特に密に分布するなどの傾向はみられない。この原因としては、曲率は対象格子点とそれに隣接する格子点の標高値から計算され、隣接する格子点とのごくわずかな標高値の差による局所的かつ微小な凹凸を表すことから、傾斜量が 50 度以上の斜面における微小な凸状の箇所も抽出されてしまうことのほか、露岩であっても凸状の形状だけでなく、凹状の形状や平らな面を呈する場合があることなどが挙げられる。また、露岩は幅、奥行き、高さがある程度の広がりを持つことから、このような地形を抽出するためには局所的な値を求める方法よりも、ある程度広範囲における傾斜や凹凸の傾向を求める方法が有効であると考えられる。そこで、空間フィルタリングに着目した。

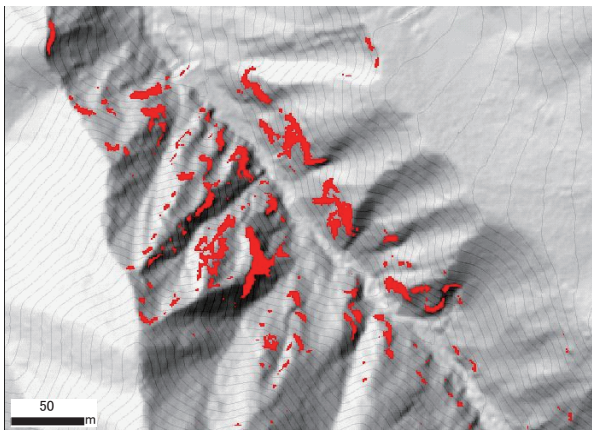
空間フィルタリングとは、リモートセンシング画像に含まれるノイズの除去や、画像の特徴を抽出するために用いられ、任意の大きさの計算窓を設定して対象画像にかぶせ、計算窓内に含まれる画素値をあらかじめ設定されている計算方法に従い演算し、中央の画素に算出された値を返す手法である³⁾。適用する計算方法は統計値など様々であるが、ここでは計算窓内に含まれる値の最頻値を中央の画素に返す処理(以下、最頻値フィルタと称する)を適用した。空間フィルタリングの適用に際しては、適用段階として、①曲率に空間フィルタリングを適用した後に傾斜量と論理積をとる場合と、②曲率と傾斜量の論理積をとった結果に空間フィルタリングを適用する場合の 2 ケースを、計算窓の大きさを 3×3 から 17×17 までの範囲で試行した結果、現地で確認した露岩の分布状況とある程度再現可能な抽出結果を得るためには、曲率に計算窓の大きさが 9×9 の最頻値フィルタを適用し、その後、曲率が負(凸状の地形)と傾斜が 50 度以上との論理積をとるのが最適であることがわかった。空間フィルタリング適用後の結果を図3の(b)に、露岩の抽出フローを図4に示す。

4. 抽出結果の検証

露岩抽出手法の精度や汎用性を検証するため、露岩抽出結果の検証を行った。実際の露岩の分布と露岩抽出結果との比較を図5に示す。



(a)空間フィルタリング適用前



(b)空間フィルタリング適用後

図3 空間フィルタリング適用前後での露岩抽出結果の比較

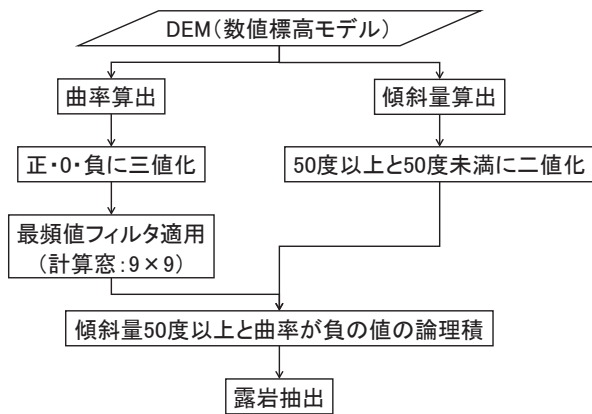


図4 露岩抽出フロー

図5に青色の実線で示すような比較的大規模な露岩については概ね本手法により抽出することができたが、溪岸などに分布する数m程度の小規模な露岩については抽出できなかった。また、露岩が分布していない急勾配斜面を誤って抽出している場合が認められたほか、露岩の分布形状(規模)を正確に抽出するのは困難であることがわかった。このような傾向は、図3、図5に示した

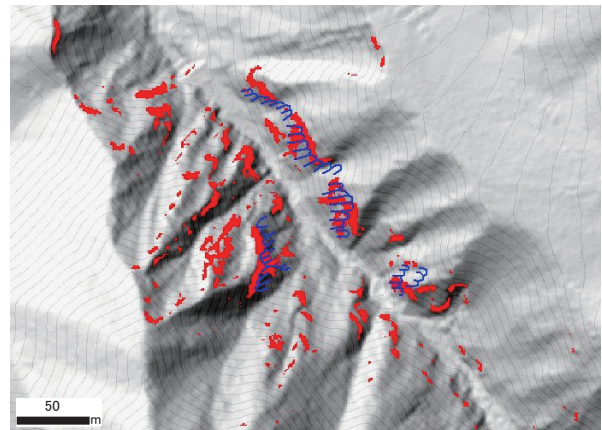


図5 露岩抽出結果(図3(b))と実際の露岩分布(青色の実線で表示)の比較

地域と比較してより急峻またはよりなだらかな地形を呈する地域で行った検証でも同様であった。本手法は傾斜50度以上かつ凸状の地形という単純な条件を用いているため、前述のような誤抽出・過抽出を避けることは難しいと考えられる。一方で、本手法は特定の地域だけでなく汎用的に使用することが可能であり、ある程度の規模の露岩であれば露岩のおおよその位置や分布範囲を容易に把握することができるという特徴がある。このことから、本手法により作成した露岩抽出図は、未踏査の斜面において露岩の分布状況の概略を把握し、詳細調査の実施や防災投資計画の立案などに生かすための一次的なスクリーニング用の資料として有用であると考えている。

なお、DEMを作成する際には、樹木や建物などの被覆物を除去するためこれらの分離処理(フィルタリング)が行われるが、地表面までレーザーが到達しにくい樹木が密生する箇所などではフィルタリングを行う際に地表面の凹凸も除去される場合があるため、航空レーザー測量の実施時期やデータの分解能だけでなく、フィルタリング手法についても検討することで、露岩の抽出精度を向上できる可能性がある。

5. 落下経路の解析

2章で記述した手法によって抽出された露岩から岩塊が斜面下方に落下した場合を対象に、岩塊の落下経路をDEMを用いて推定する手法について検討した。

本検討では、落下岩塊が斜面の最大(下向き)傾斜方向に移動すると仮定した。この落下経路をDEMを用いて解析するために、まず落下経路の起点を、2章の手法で抽出された露岩があるメッシュとした。次に、DEM上で隣接する2メッシュ間での傾斜 g_d (d は岩塊が位置するメッシュから見た8方位での方向)を、式(3)~(10)で定義し、 g_d が最大となる方向(最大傾斜方向)を落下

特集：防災技術

経路とした。

$$g_{北} = \frac{u(x_i, y_j) - u(x_i, y_{j+1})}{\Delta y} \quad (3)$$

$$g_{北東} = \frac{u(x_i, y_j) - u(x_{i+1}, y_{j+1})}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \quad (4)$$

$$g_{東} = \frac{u(x_i, y_j) - u(x_{i+1}, y_j)}{\Delta x} \quad (5)$$

$$g_{南東} = \frac{u(x_i, y_j) - u(x_{i+1}, y_{j+1})}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \quad (6)$$

$$g_{南} = \frac{u(x_i, y_j) - u(x_i, y_{j-1})}{\Delta y} \quad (7)$$

$$g_{南西} = \frac{u(x_i, y_j) - u(x_{i-1}, y_{j-1})}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \quad (8)$$

$$g_{西} = \frac{u(x_i, y_j) - u(x_{i-1}, y_j)}{\Delta x} \quad (9)$$

$$g_{北西} = \frac{u(x_i, y_j) - u(x_{i-1}, y_{j+1})}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \quad (10)$$

図6の矢印Aは、この方法で得られる落下経路の方向を示している。このような計算を逐次実施し、メッシュをつなげて落石の落下経路とした。なお、図6の矢印BやCのように、1つのセルから2つ以上の最大傾斜方向が解析された場合には、全ての最大傾斜方向を落下経路とした。したがって、1つの起点（抽出された露岩があるメッシュ）から複数の落下経路が得られる場合がある。また落下経路の解析に最大傾斜方向を使用する場合、落下岩塊がDEM上の凹地、すなわち当該メッシュの標高より周囲8メッシュの標高が高いメッシュに到達した場合には、計算を続行することができなくなる。しかし実際の落石現象では落下岩塊が地表の凹地を越える場合があることから、本検討では凹地から周囲8メッシュへの上向き勾配の最小値が10度未満の場合には、その方向を落下経路とするよう定めた。図6の矢印Dはこのような場合の例を示す。

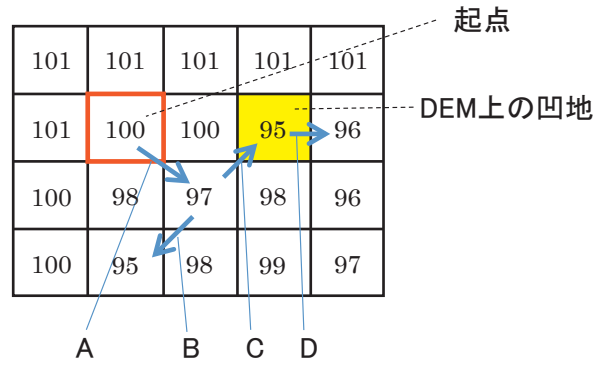


図6 落下経路解析の概念図
(格子はDEMのメッシュを、数値は標高を示す)

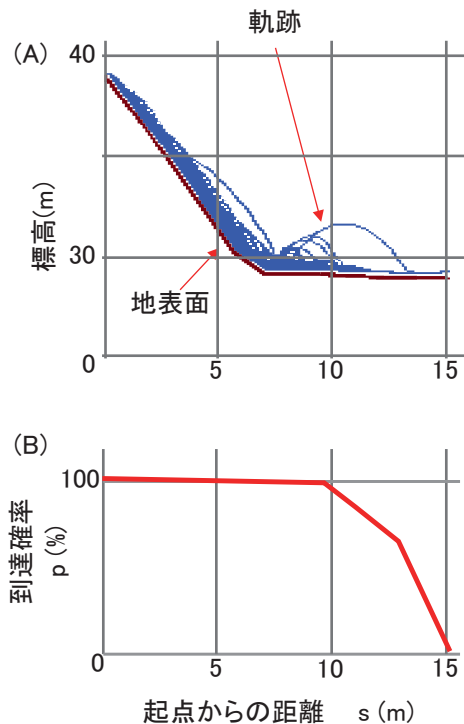


図7 落石到達確率の解析例
(落石シミュレーションで得られる軌跡(A)と到達確率(B))

6. 線路への落石到達確率の評価

線路への落石到達確率の評価にあたっては、既存の落石シミュレーションのうち、広く利用されている吉田らの方法⁴⁾を用いた。吉田らの方法では、モンテカルロシミュレーションにより2次元断面上で落下岩塊の到達確率を解析できる。各試行では、落下岩塊と地表面の間の摩擦係数と反発係数、落下岩塊の運動が回転やすべりから跳躍に遷移する際の限界速度などのパラメータが、その出現頻度確率が正規分布に従うように自動的に設定される。

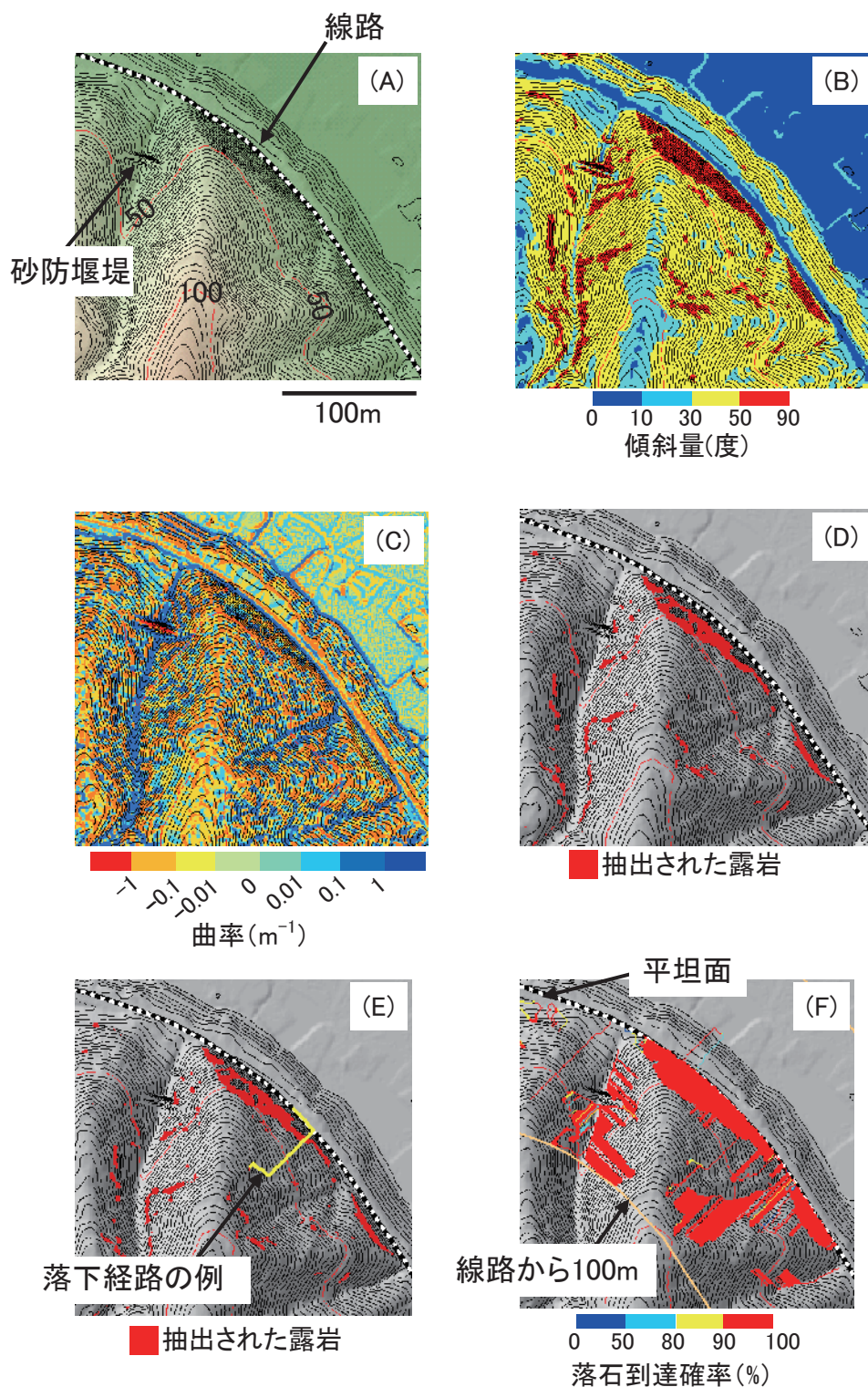
本検討では、5章の手法で得られた岩塊の落下経路上でシミュレーションを実施した(図7(A))。シミュレー

ションの結果から、起点からの距離sの位置に到達する確率pを(11)式とした(図7(B))。

$$p(s) = \frac{N_{reached}}{N_{trial}} \times 100 \quad (11)$$

ここで、 N_{trial} は全試行回数、 $N_{reached}$ は落下岩塊がsに到達した、あるいはsを越えた試行回数である。

5章の落石経路解析の結果では、起点が異なる落下経路が斜面下方で重なり、同一のメッシュにおいて複数の到達確率が得られることがある。ここでは、これらの最大値を当該メッシュにおける落石の到達確率とした。



- (A) 1mメッシュDEMによる等高線図（図中の数字は標高を示す）
- (B) 傾斜量図
- (C) 曲率図
- (D) 露岩抽出結果
- (E) 落下経路の解析結果（図では1経路のみを示しているが、実際には線路から100m以内に分布するすべての抽出された露岩を基点とする落下経路を得る）
- (F) 落石到達確率の解析結果

図8 計算例

表1 落石シミュレーションのパラメータ

設定種別	項目	値	
斜面特性	摩擦係数	平均	0.48 [1]
		標準偏差	0.06 [1]
	鉛直方向の反発係数	平均	0.58 [1]
		標準偏差	0.26 [1]
	水平方向の反発係数	平均	0.77 [1]
		標準偏差	0.17 [1]
落下岩塊の運動が回転やすべりから跳躍に遷移する際の限界速度	平均	8.5 m/s [1]	
	標準偏差	2.5 m/s [1]	
岩塊特性	直径	1 m	
	質量	170 kg	
解析設定	試行回数	100 回	
	時間刻み	0.05 s	

[1] 日本道路協会, 2002, 落石対策便覧に関する参考資料-落石シミュレーション手法の調査研究資料-

7. 計算例

3章, 5章, 6章で述べた手法により, 航空レーザ測量により作成した1mメッシュのDEMを用いて露岩の抽出から線路への落石の到達確率の解析までを実施した例を図8に示す。

まず, 1mメッシュDEM(図8(A))から傾斜量(図8(B))と曲率(図8(C))を解析し, これらの結果から露岩を抽出する(図8(D))。次に, 抽出された露岩を起点とする落下経路を解析する(図8(E))。なお, ここでは抽出された露岩のうち線路から100m以内のメッシュを解析対象とした。その上で, 得られた落下経路すべてで落石シミュレーションを実施し, 線路への落石の到達確率を算出した(図8(F))。なお, 落石シミュレーションを実施する際に設定したパラメータは表1のとおりである。到達確率の算出結果では, 線路近傍の露岩から落石が発生した場合はほぼ100%の確率で線路まで岩塊が到達し, 砂防堰堤や平坦面がある場合はそこで岩塊が停止するとの結果が得られた(図8(F))。

8. まとめ

本手法では, 数十平方キロメートルにおよぶ広範囲であっても, 実用的な計算時間で露岩の抽出から到達確率

の算出まで行うことが可能である。解析結果については, 露岩がまとまって分布し, かつ線路への到達確率が高い箇所については実際に現地調査を行い, 落石の可能性や対策工の必要性の検討を行うなど, 詳細な調査が必要な斜面を絞り込む際の資料として有用であると考えられる。一方で, 露岩の誤抽出が避けられないこと, 落下経路・到達確率ともにある条件の下で解析した結果であることなどの課題もあるため, 今後も引き続き解析手法の高度化を検討していく。

なお, 本研究の一部は, 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) 千葉達郎, 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) 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
- 3) 長谷川均: リモートセンシングデータ解析の基礎, 古今書院, pp.74-77, 1998
- 4) 吉田博, 右城猛, 榎谷浩, 藤井智弘: 斜面性状を考慮した落石覆工の衝撃荷重の評価, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1603-1616, 1991

■ 2017年5月号（特集：防災技術）の訂正

特集論文の表中に誤りがありました。

以下のように訂正させていただき、お詫び申し上げます。

箇所	誤	正
28 ページ 表1 落石シミュレーションのパラメータ 岩塊特性, 質量	170kg	1360kg