

気象災害ハザードマッピング技術の開発

浦越 拓野* 福原 隆彰**
 布川 修*** 長谷川 淳*

Development of a Hazard Mapping System Related to Meteorological Disasters

Takuya URAKOSHI Takaaki FUKUHARA
 Osamu NUNOKAWA Atsushi HASEGAWA

We have newly developed a hazard mapping system related to landslides, strong winds, avalanches and rock-falls. Firstly, meteorological conditions, e.g. intensities of rain, wind and snow, are estimated based on meteorological simulation or weather statistics. Secondary, the hazards for railway are evaluated with consideration on topographical factors. Finally, the evaluated hazards are mapped on geographical information system. This hazard mapping system is helpful for engineers to find out the locations where they should make surveys and construct countermeasures against the disasters.

キーワード：斜面崩壊，強風，雪崩，落石，ハザードマップ

1. はじめに

気象災害の形態には、降雨による土砂災害あるいは洪水災害，強風災害，雪崩災害等がある。しかし、これらの災害に関して、地表の傾斜や植生状況などの素因，誘因としての雨，風，雪といった気象外力（以下，外力と称する）の大きさ，災害の発生危険度等を総合的に把握することは難しかった。線路沿線を対象に，これらの情報の一元的な表示が可能となれば，気象災害に関する線区の特徴の把握や，弱点箇所の抽出が容易になり，より効率的な防災対策の検討が可能となることが期待される。

そこで土砂災害，強風災害，雪崩災害，落石災害（以下，本報告ではこれらを気象災害と称する）を対象とし，これらの災害に関する素因や外力，耐力・危険度評価結果を一元的に可視化する気象災害ハザードマッピング技術を開発した。開発においては，まずハザードマップ作成に必要なデータ処理の流れを検討した。次に外力の推定方法を検討し，さらに耐力や危険度の評価方法を検討した。一連の検討において，近年広く利用されつつある数値的な地形情報を積極的に利用することで，効率的にハザードマップを作成できるように工夫した。最後にハザードマップとしての表示方法と，利用方法について検討した。本報告では，これらの結果について記述する。

2. データ処理の流れ

気象災害ハザードマッピング技術における情報処理の流れを整理した（図1）。まず地形情報として数値標高モデル（Digital Elevation Model; DEM）を準備する。DEMは，地表面の標高値がメッシュ状に配列されたデータである。DEMの取得方法には，航空レーザ測量によるDEMの作成（図2）や，国土地理院が公開している基盤地図情報¹⁾からのDEMの入手等がある。また，評価対象により，数値表層モデル（Digital Surface Model; DSM）を用いる場合もある。DEMが地表面の標高データであることに対して，DSMは植生等の土地被覆物上面の標高データである（図2）。なおメッシュごとに

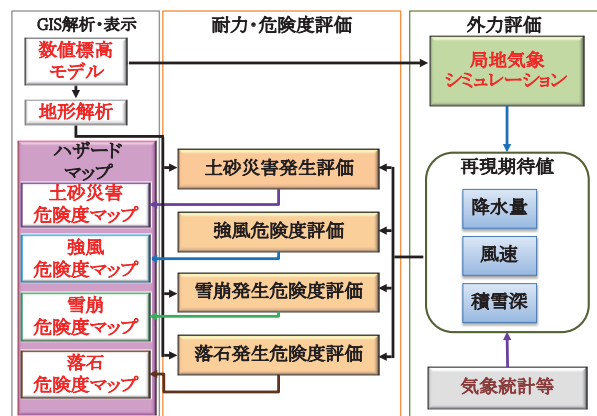


図1 気象災害ハザードマッピング技術における情報処理の流れ

* 防災技術研究部 地質研究室
 ** 防災技術研究部 気象防災研究室
 *** 防災技術研究部 地盤防災研究室

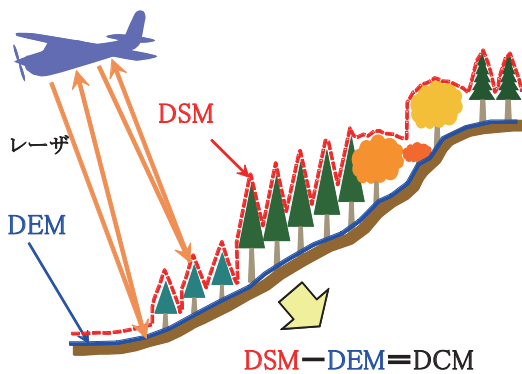


図2 航空レーザ測量によるDEMおよびDSMの取得イメージ

DSMの値からDEMの値を差し引くことで、植生等の高さに対応するデータを得ることができ、これは数値樹冠モデル (Digital Canopy Model; DCM) と呼ばれる。

次に、降水量や風向・風速等の気象外力を推定する。これには、局地気象シミュレーションにより推定する方法²⁾や気象統計に基づく確率降水量等を用いる方法がある。

ついで、外力推定結果に基づき、各気象災害に関する耐力や危険度を評価する。耐力・危険度評価において必要な情報の一部、たとえば斜面の傾斜を、DEMを用いた解析 (地形解析) により得ることができる。

最後に、耐力・危険度評価結果を線路位置等とともに地理情報システム (Geographical Information System; GIS) 上に表示する。GIS上には、外力推定結果や地形解析結果等を合わせて表示することができる。

3. 外力推定

外力推定の方法として局地気象シミュレーションによる方法²⁾、気象統計による方法を検討した。

3.1 局地気象シミュレーションによる外力推定

局地気象シミュレーションでは、計算の対象とした領域をある間隔でのメッシュに区切り気象状況を計算することで、各メッシュでの降水量や風向・風速等を面的に把握することができる。この局地気象シミュレーションを用いて、以下の手順で外力推定を行った。

- (1) 鉄道沿線の風速計や雨量計、または気象庁などの気象観測点における観測データから顕著な気象現象 (例えば強風、大雨等) の事例を複数集める。
 - (2) 局地気象シミュレーションで、それらの事例を再現する。
 - (3) 局地気象シミュレーションにおけるメッシュごとに、強風や大雨等の再現期待値や再現期間を求める。
- なお、本検討では、局地気象シミュレーションモデル

としてWRFモデル³⁾を用い、再現期間や再現期待値の推定には極値統計法の一つである修正Jensen & Frank法⁴⁾を用いた。局地気象シミュレーションによる外力推定の利点として、アメダス等の観測地点がない箇所を含めて、面的に気象外力を推定できることが挙げられる。例えば強風現象は気象観測点の設置間隔 (数km ~ 25km程度) に比べ、狭い領域 (数100m ~ 数km程度) で発生する場合がある。このような現象を対象とする場合、局地気象シミュレーションを用いることで、現象毎に必要なとされる空間分解能で外力を推定しうる。

3.2 気象統計による外力推定

気象統計による方法では、長期間にわたり蓄積されたデータから確率最大積雪深を算出し、4.3節の雪崩災害についての気象外力とした。

気象統計による外力推定の利点として、気象シミュレーションに比べ容易に外力を推定できることが挙げられる。また蓄積されたデータから、例えば30年確率、50年確率、100年確率というように異なる再現期間での外力を推定することもできる。さらに気象庁が公開している確率降水量⁵⁾等を参照することもできる。

4. 耐力・危険度評価

4.1 土砂災害 (斜面の表層崩壊)

斜面の表層崩壊に関する評価を、次の2つの手法で実施した。まず第一の手法 (手法①) は広範囲を対象に斜面の表層崩壊の発生危険性を評価する手法⁶⁾である。この手法では、斜面の表層崩壊に関わる素因のうち、統計解析により特に寄与が大きいと判断された傾斜・斜面型・植生状況を1mメッシュDEMと1mメッシュDSMから解析する。次に、これらの素因の斜面崩壊への寄与を表す点数表を用いて、メッシュごとに発生危険性を点数化し、表層崩壊が発生する可能性を相対的に評価する。

第二の手法 (手法②) は斜面の降雨時の安定性を評価する手法⁷⁾である。この手法では、斜面を10m間隔のメッシュに区切り、斜面表層の力学特性や水理特性等を入力し、メッシュごとに降雨の浸透による表層土中の飽和度や地下水位の変化を考慮し、斜面表層の相対的な安定性を求める。

同一箇所を対象に、手法①と手法②による評価を行い、比較した結果を図3 (a) に示す。なお手法②では、当該領域で土砂災害が発生した際の、近傍のアメダスによる実測降雨を入力した。手法①により危険度が2および3と評価された箇所は、手法②による相対的な安全率が1.5以上であった。また手法①により危険度が4および5と評価された箇所では、手法②による相対的な安全率が1.05未満となる箇所は5%未満であった。このように、

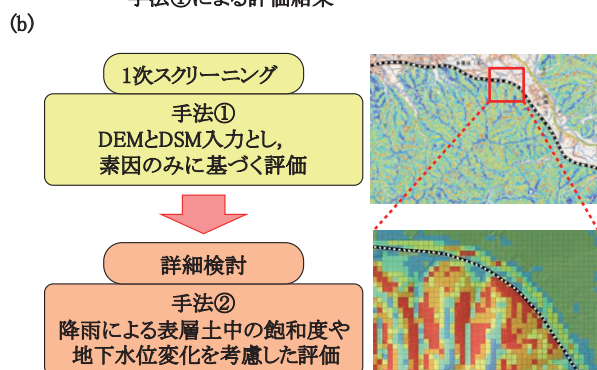
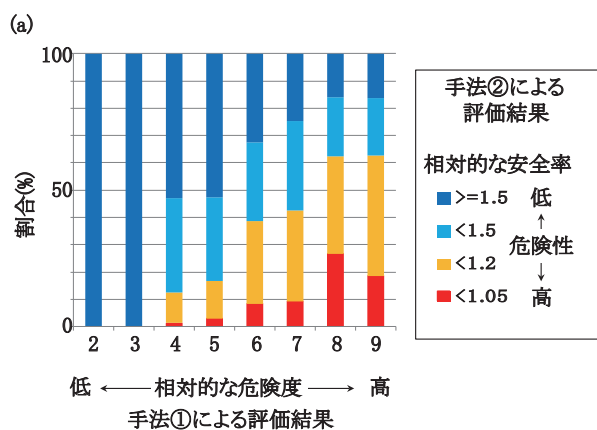


図3 手法①と②による斜面の表層崩壊に関する評価
(a)：評価結果の比較 (b)：評価手順のイメージ

手法②で相対的な安全率が低い、すなわち危険性の高い箇所を、手法①で見逃す、すなわち危険性が低いと判定する例は少ない。よって、DEMとDSMのみを入力データとして災害素因に基づき危険度を評価する手法①を広範囲を対象とした1次スクリーニングに用い、手法①で危険度が高いと判断された特定の斜面を対象に、降雨や表層土中の飽和度を考慮できる手法②を適用してより詳細な検討を行うことができると考えられる(図3(b))。

4.2 強風災害

強風の外力を推定するために、局地気象シミュレーションによる外力評価手法を適用した。まず対象地域における過去の強風事例25ケースを局地気象シミュレーションを用いて再現し、強風の再現期待値(図4(a))および再現期間を求めた。本検討では東西方向および南北方向のメッシュサイズをそれぞれ250mとした。

次に線路が含まれているメッシュごとに、車両や鉄道構造物の条件で定まる転覆限界風速⁸⁾を算出した(図4(b))。一つのメッシュ内に異なる種類の鉄道構造物が位置する場合には、それぞれで転覆限界風速を求め、それらの最小値を、そのメッシュにおける転覆限界風速とした。

以上で得られた強風の再現期待値・再現期間と転覆限界風速を比較して、転覆限界風速以上となる強風の再現期間を求めた。この再現期間を地図上にマッピングし、

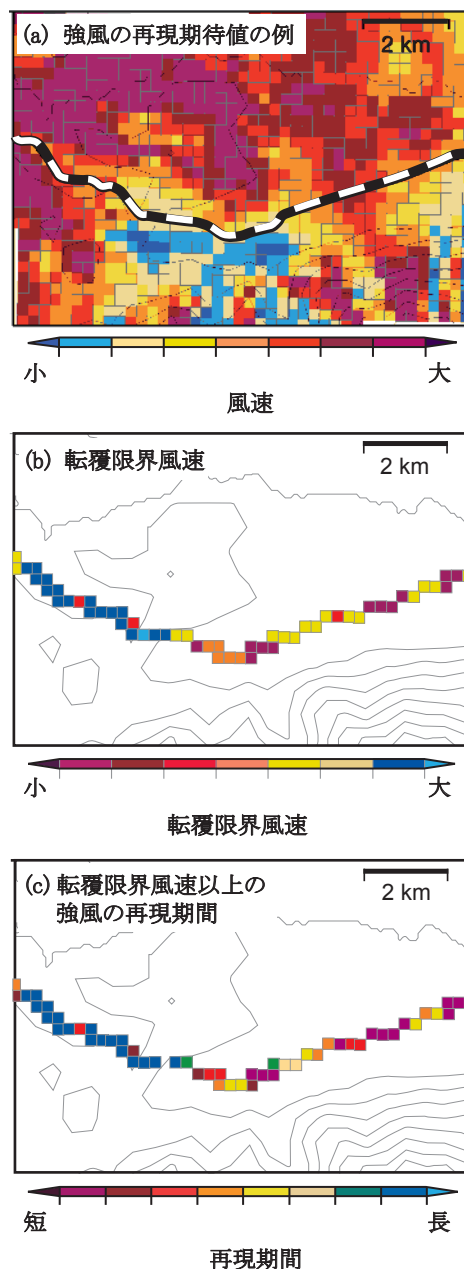


図4 転覆限界風速以上の強風が発生する再現期間の評価

強風災害に関する評価結果とした(図4(c))。この図では、再現期間が短いほど、転覆限界風速以上の強風が発生する可能性が高いことを示す。

4.3 雪崩災害

鉄道沿線における雪崩災害の危険度評価手法として、斜面(発生区)における雪崩発生確率と、雪崩発生箇所から線路までの雪崩到達確率をそれぞれ求め、両者の積から線路における雪崩災害の危険度を評価する手法⁹⁾が実用化されている。ここでは、この既存手法において航空レーザ測量データを活用することで、効率的に雪崩災害の危険度を評価し、マッピングする手法を検討した。

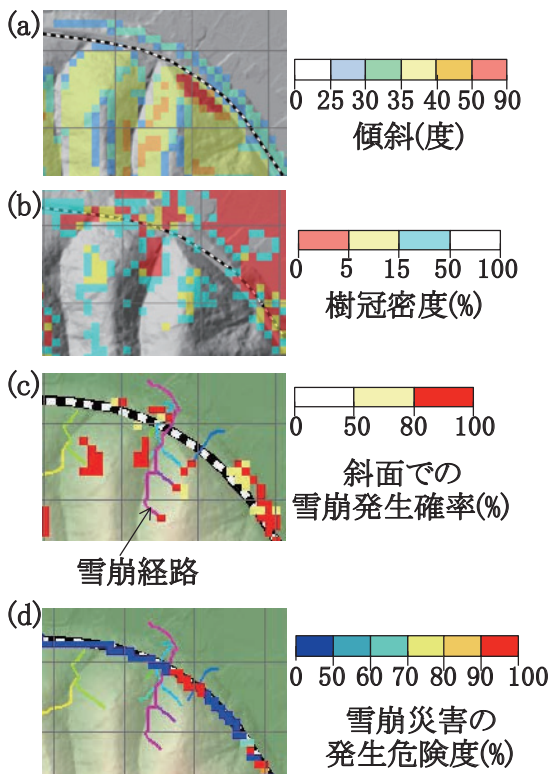


図5 雪崩災害の発生危険度の評価

斜面における雪崩発生確率は、雪崩の発生斜面などの特徴を基にして統計的手法により作成されたスコア表を用いて、斜面の傾斜、樹冠密度、確率最大積雪深から求められる⁹⁾。本検討では、このうち斜面の傾斜と樹冠密度を、航空レーザ測量データを用いて解析することとした。まず傾斜 s を、10mメッシュDEMを用いて、式(1)¹⁰⁾により求めた(図5(a))。

$$s = \text{atan} \left\{ \left(\frac{z(i+1, j) - z(i-1, j)}{2d} \right)^2 + \left(\frac{z(i, j+1) - z(i, j-1)}{2d} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ここで、 $z(i, j)$ はメッシュ (i, j) における標高、 d はメッシュ間隔である。次に樹冠密度を、小林ほかの手法¹¹⁾を参考にして以下のように求めた。まず1mメッシュDEMと1mメッシュDSMから1mメッシュDCMを作成した。次に、あるメッシュのDCMの値が2m以上であれば当該メッシュは「樹木有り」とし、2m未満であれば「樹木なし」と判定した。そのうえで、 10×10 メッシュの範囲中で「樹木有り」と判定されたメッシュ数の割合を樹冠密度とした(図5(b))。

得られた傾斜と樹冠密度と、別途推定した確率最大積雪深から、スコア表⁹⁾を用いて斜面での雪崩発生確率を求めた(図5(c))。次に雪崩が落水線に沿って移動

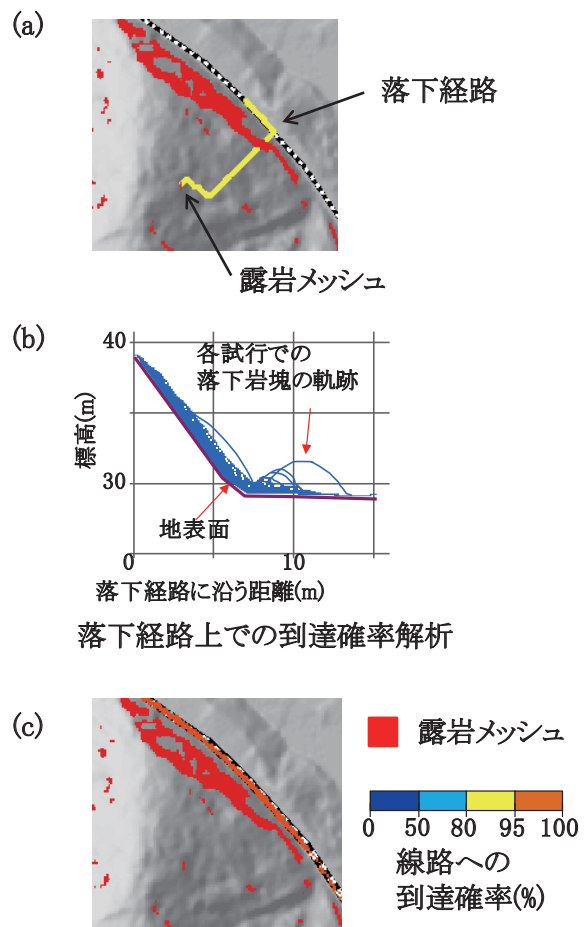


図6 線路への落石到達確率の評価

すると仮定し、10mメッシュDEMを用いて雪崩発生確率が50%以上であるメッシュを起点とする落水線を解析し、雪崩経路とした。ここで落水線は、中心メッシュと隣接するメッシュとの間の2メッシュ間の勾配をそれぞれ計算し、最も急な落下勾配となる方向を順につないで得た。得られた雪崩経路上で、既往手法⁹⁾に基づき落差と流走距離の比から雪崩到達確率を求めた。

以上で得られた雪崩発生確率と雪崩到達確率の積を、線路上での雪崩災害の発生危険度とした(図5(d))。以上により、10mメッシュの分解能である雪崩経路における雪崩災害の発生危険度が得られる。一般に雪崩は幅をもって流下するため、得られた雪崩災害の発生危険度を、その雪崩経路を含む連続する斜面全体の雪崩災害の発生危険度とした。

4.4 落石災害

落石災害に関する評価¹²⁾は、露岩の抽出¹³⁾、岩塊の落下経路の推定、落石到達確率の評価からなる。まず露岩の抽出では、1mメッシュDEMを用いて、地表面の曲率と傾斜の条件から露岩を抽出した¹³⁾(図6(a))。以下、これを露岩メッシュと称する。

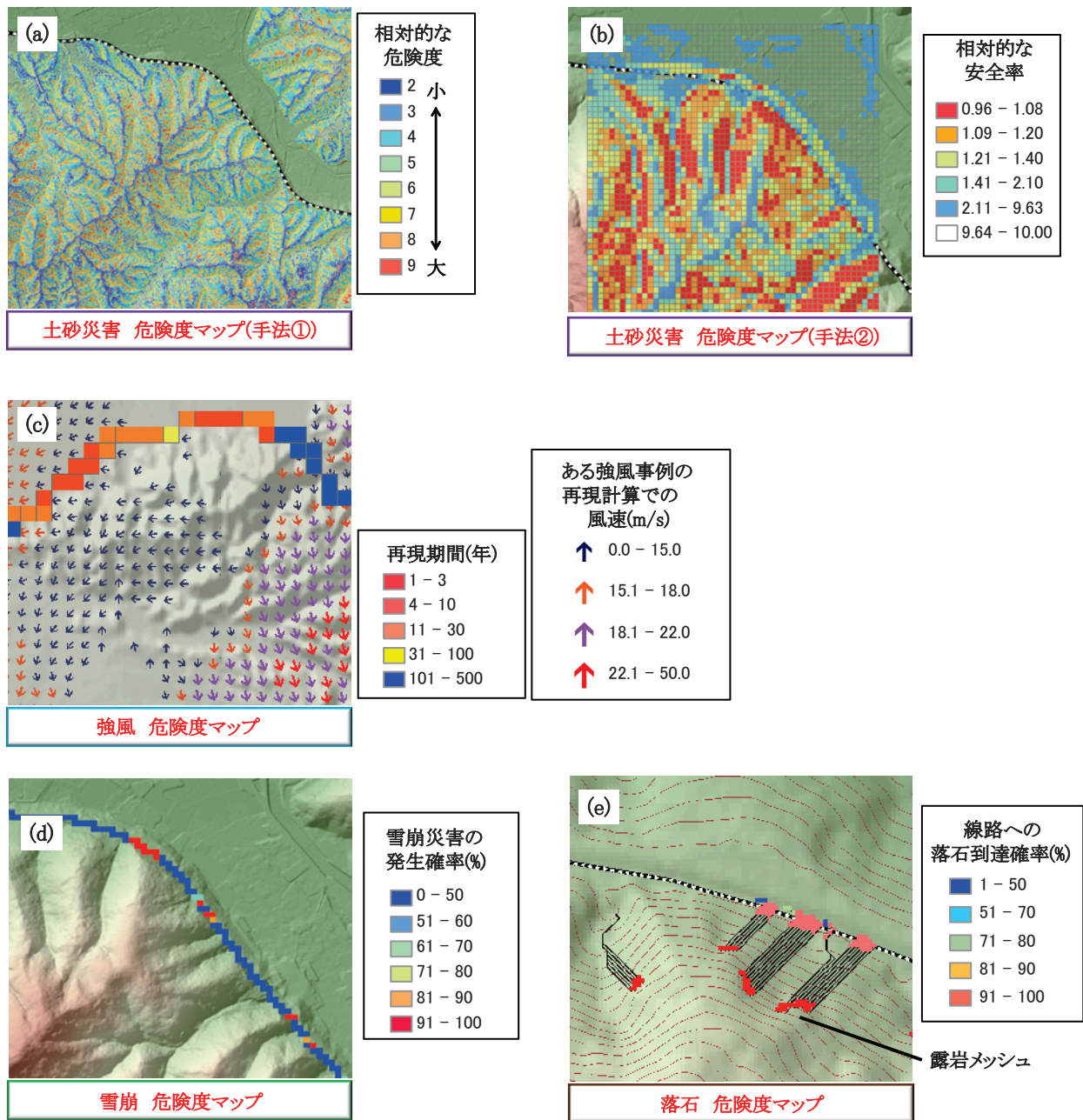


図7 ハザードマップの表示例

本図は表示例であり、評価の入力パラメータや評価結果は実際とは異なる。

次に岩塊が落水線に沿って落下すると仮定し、1mメッシュDEMを用いて、露岩メッシュを起点とする落水線を解析し、岩塊の落下経路とした(図6(a))。

ついで落下経路上での落石到達確率解析を行った。落下経路に沿う2次元断面を作成し、モンテカルロシミュレーションによって落石到達確率を計算した(図6(b))。本検討では、2次元断面上でのモンテカルロシミュレーションによる落石到達確率の解析手法として、吉田らの手法^{14) 15)}を用いた。

落下経路の推定とモンテカルロシミュレーションによる到達確率の評価を、全ての露岩メッシュに対して実施

した。これらの結果から、線路が位置するメッシュでの落石到達確率を抽出し、評価結果とした(図6(c))。

5. ハザードマップ

3章、4章で得られた外力および耐力・危険度評価結果をGIS上にマッピングした。マッピング例を図7に示す。本検討ではGISとしてArcGIS(Esri社製)を用いた。

本技術により、土砂災害、強風災害、雪崩災害、落石災害に関する耐力・危険度等の一元的な可視化が可能と

特集：防災技術

なり、気象災害に関する線区の特徴の把握や弱点箇所の抽出、各種の気象災害を考慮した効率的な防災対策の検討が可能となることが期待される。また災害に関する素因、例えば表層土厚、斜面傾斜、斜面被覆状況、露岩分布等を、耐力・危険度評価結果とともに保存し、ハザードマップに表示することで、災害の危険性が高い箇所での素因の把握やそれに応じた対策の検討が可能となる。

それぞれのハザードマップの活用方法として、以下のような例が考えられる。まず土砂災害危険度マップ（図7(a), (b))は発生源における危険度を評価しており、現地調査箇所の選定に用いることができる。次に強風危険度マップ（図7(c))は転覆限界風速を超える強風の再現期間を示しており、また雪崩危険度マップ（図7(d))は線路位置での雪崩災害の発生確率を示している。これらのマップは、対策工設置の優先順位や設置範囲の検討に用いることができる。また、落石危険度マップ(図7(e))は、露岩と推定された箇所から仮に岩塊が落下した場合の、線路への到達確率を示しているため、調査すべき露岩の選定に用いることができる。なお本手法では露岩分布自体も推定結果であるため、現地調査により露岩の有無の確認が必要である。

また、本ハザードマップでは線路近傍のみでなく、広範囲の災害素因をも把握できる。そのため、これまでは線路から一定程度離れているために情報を取得し難かった範囲についても、本ハザードマップが対策の必要性等を検討するツールとなりうる。

なお、本ハザードマップは、ある推定された外力のもとで評価された、静的なハザードマップである。時々刻々と変化する気象データや気象予報等に対応する逐次評価型のハザードマップの構築は今後の課題である。

6. まとめ

土砂災害、強風災害、雪崩災害、落石災害を対象とし、これらの災害の素因や外力、耐力・危険度評価結果を一元的に可視化できる気象災害ハザードマッピング技術を開発した。本技術により、気象災害に関する線区の特徴の把握や弱点箇所の抽出、各種の気象災害を考慮した効率的な防災対策の検討が可能となることが期待される。

文献

1) 国土交通省国土地理院：基盤地図情報サイト、<http://www.gsi.go.jp/kiban/> (参照日：2015年11月19日)

2) 福原隆彰, 宍戸真也：局地的気象現象の面的推定手法，鉄道総研報告，Vol.30, No.3, pp.11-16, 2016

3) Skamarock, W.C., JKlemp, J.B., Judhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J.B., “A Description of the Advanced Research WRF Version 3,” *NCAR Technical Note*, Vol.475, 2008.

4) Cook, N.J., “Improving the Gumbel analysis by using M-th highest extremes,” *Wind and Structures*, Vol.1, No.1, pp.25-48, 1998.

5) 気象庁：異常気象リスクマップ，<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/riskmap/index.html> (参照日：2015年11月19日)

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箇所抽出手法，鉄道総研報告，Vol.26, No.9, pp.23-28, 2012

7) 浅野嘉文, 川尻峻三, 布川修, 太田直之, 杉山友康, 渡邊論：降雨時における斜面表層崩壊を再現する簡易解析モデルの提案，地盤工学ジャーナル，Vol.8, No.4, pp.579-595, 2013

8) 日比野有, 石田弘明：車両の転覆限界風速に関する静的解析法，鉄道総研報告，Vol.17, No.4, pp.39-44, 2003

9) 新山純一, 松田宏, 飯倉茂弘, 河島克久, 藤井俊茂：東北新幹線盛岡・八戸間のなだれ危険度とその工学的意義，日本雪工学会誌，Vol.19, No.2, pp.12-23, 2003

10) 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

11) 小林容子, 本間信一, 松田宏：航空レーザ測量を用いた最近の雪崩危険度評価技術，日本雪氷学会誌，Vol.76, No.6, pp.441-450, 2014

12) Urakoshi, T., Hasegawa, A., Sekiguchi, Y., and Akiyama, Y., “Evaluation of Hazardous Area of Falling Rocks Using Digital Elevation Model,” presented at the *10th Asian Regional Conference of IAEG*, Kyoto, Japan, Sep 26-29, 2015, Tp1-p10, 1079300.

13) 長谷川淳, 太田岳洋：数値標高モデルを用いた簡易な露岩抽出手法，日本応用地質学会平成27年度研究発表会講演論文集，pp.115-116, 2015

14) 吉田博, 右城猛, 榊谷浩, 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

15) 社団法人日本道路協会：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－，pp.5-100, 2002