

土石流・流出氾濫シミュレーションによる 鉄道被災の発生リスク評価

赤松 良久¹

¹山口大学大学院教授 創成科学研究科.

論文近年、豪雨災害が頻発する中で土石流を起因とする鉄道被害が多く報告されている。本研究では、山口県内の鉄道沿線の171地点を対象とした土石流シミュレーションを実施し、土石流が鉄道に直撃するリスクを土砂堆積厚として評価した。その結果、土石流警戒区域外に土石流が流出する可能性および山麓に線路が位置する地点や土石流が長距離流動後に線路に到達する地点で鉄道被災の発生リスクが高いことが示された、また、土石流シミュレーションから定量評価した鉄道被災リスクと相関のある地形特性を用いた統計モデルの構築により、鉄道被災発生リスクが評価可能であることが示唆された。

キーワード：土石流、鉄道被災、リスク評価、iRIC

1. はじめに

近年、地球温暖化の進行に伴う気候変動により、全国各地で豪雨災害が多発する中で、土石流を起因とする鉄道被害が多く報告されている。例えば、平成30年7月豪雨では、鉄道への土砂流入や線路流出などによって全国の鉄道業者の計17路線が運転休止を余儀なくされた¹⁾。鉄道は物流・人的移動に重要なインフラ設備であるが、一度被害を受けると復旧まで時間を要することも多いため、このような土石流を起因とする鉄道被害への対策は必要不可欠である。このような土石流を起因とする鉄道被害の防災・減災対策を講じるためには、発生する土石流の挙動を把握し、鉄道や河川への影響を把握することが求められる。しかし、現状の土石流警戒区域および土石流特別警戒区域のみの情報では、土石流の挙動を把握できないため、土石流を起因とする鉄道被災の発生危険性を評価することは困難である。

そこで、土石流の挙動を把握する手法として土石流シミュレーションが挙げられ、実災害を対象に多くの研究に活用されており^{2) 3)}など、これらによって、土石流シミュレーションが実際に発生した土石流の流動・堆積過程を高い精度で再現できることが示されている。また、大中ら⁴⁾は、地理情報解析と土石流シミュレーションにより複合災害の危険性を評価し、複合災害の危険性を評価する上での土石流シミュレーションの有用性を示唆している。しかし、鉄道線路への具体的な影響評価がされておらず、検討は不十分である。森ら⁵⁾は、航空レーザー測量で得られたDEMを用いて、鉄道沿線近傍の溪流の危険度を評価する手法を提案している。村上ら⁶⁾は、

高速道路近傍の危険溪流について、過去の災害履歴などの既往資料および10mメッシュのDEMを用いて、砂防指針⁷⁾に基づく危険度の評価を実施している。このような地形に基づく危険溪流の机上評価は、現地調査を伴わないため広域での適用が期待されるが、これらの既往研究は土石流による発生土砂量等の具体的な被害規模については検討されていない。以上より、数値シミュレーションにより、鉄道への土石流による影響を明確化することで鉄道被災のリスクを定量的に評価するとともに、地形との関係性を明らかにし、地形を基に鉄道被災のリスクを評価することは、今後の防災・減災対策を講じる上で非常に重要である。

以上の背景を踏まえ、本研究では、山口県全域を対象に土石流を起因とした鉄道被災発生リスクを、土石流シミュレーションにより得られる物理量を基に定量的評価することによって、山口県で発生し得る本複合災害の規模を視覚的に明示すること、さらに、得られた鉄道被災リスクと地形特性の関係を比較検討することによって、土石流を起因とする鉄道被災のリスクを、簡便に評価することを目的とした。実施内容としては、山口県内を対象に地理情報ソフトウェアを用いて、土石流を起因とする鉄道被災の危険箇所を抽出し、本危険箇所を対象に土石流シミュレーションを実施し、土石流による鉄道被災のリスクを定量的に評価した。また、その結果を用いて、リスクマップを作成することにより、山口県における鉄道被災のリスクを明示した。また、土石流シミュレーションによって定量的に評価された鉄道被災のリスクと、周辺の地形特性の関係を比較することによって、地形から鉄道被災のリスクを簡便に推定する方法を検討した。

2. 鉄道被災危険箇所の抽出

(1) 危険箇所の抽出方法

はじめに、山口県における土石流を起因とする鉄道被災のリスクの危険箇所をEsri社のArcMAPI0.8.1⁹⁾を用いて抽出した。ここで、用いたデータは、国土数値情報⁹⁾より入手できる鉄道路線のポリラインおよび山口県土砂災害警戒区域等マップ¹⁰⁾よりダウンロードした土石流警戒区域である。なお、解析対象としたのは、山口県内に存在する8つの在来線であり、解析対象を在来線のみとしたのは、山口県内の山陽新幹線の線路はほとんどが高架橋上に敷設されており、土石流による被災リスクが低いと判断したためである。手順を以下に示す。

①山口県内の土石流警戒区域と在来線の鉄道路線のポリラインが重なっている箇所を ArcMAP のインターセクト機能で抽出した。

②抽出した箇所の土石流警戒区域を記録し、それらを重複が無いように整理した。

③該当する土石流警戒区域を ArcMAP により抽出した。

このとき抽出された土石流警戒区域は、鉄道線路と重なっていると判定された区域であり、土石流により鉄道線路に土砂が流出する可能性が比較的高いと考えられる。

(2) 危険箇所の抽出結果

路線ごとの抽出された危険箇所の地点数を図-1に示す。沿岸部の平野に位置する小野田線、宇部線では山間部を通る区間が存在しないため、土石流警戒区域と重複する区間が存在せず、土石流による鉄道被災の危険箇所が抽出されなかった。危険箇所の地点数が最も多かった路線は、山陰本線であったが、本路線は路線長が山口県内で2番目に長い路線であり、空間的に多くの土石流警戒区域と重なったことや、山麓付近に路線の多くが敷設されていたことが要因と考えられる。一方、路線長が最も長い山陽本線は、山陰本線と比較すると危険箇所の地点数が少なかった。これは、山陽本線は瀬戸内海沿岸の都市部・平野部を多く通過していることから、土石流警戒区域と重なる箇所が少なかったためと考えられる。以上により、山口県内における土石流を起因とする鉄道被災の発生危険箇所を抽出することができた。

3. 土石流シミュレーションによる評価

(1) 方法

a) 土石流シミュレーション

前章で抽出した危険箇所を対象に土石流シミュレーションを用いて、より詳細に鉄道被災リスクを検討した。なお、土石流シミュレーションにはiRIC¹¹⁾のMorpho2DHソルバ¹²⁾を用いた。Morpho2DHソルバは、一般曲線座標

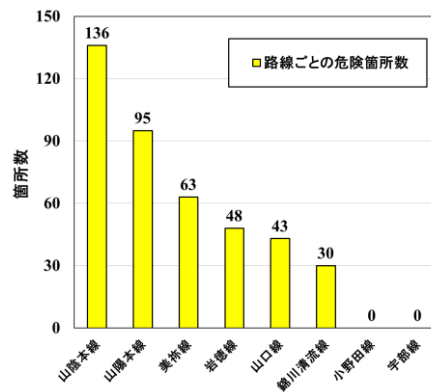


図-1 路線ごとの危険箇所の地点数

表-1 土石流シミュレーションの計算パラメータ

計算格子サイズ	2m × 2m
タイムステップ (s)	0.001 ~ 0.01
斜面崩壊面積 (m)	5 × 5
斜面崩壊深さ (m)	0.3
最大浸食深さ (m)	0.1 ~ 0.3
土砂濃度	変化
静止堆積濃度	0.6
液体として振る舞う土砂割合	0.2
土砂粒径, 最小流動深 (m)	0.01
内部摩擦角 (Degree)	34
層流層の厚さの比	0.4
抵抗係数	72

で境界適合座標を用いた非定常平面二次元流れと河床変動計算のモデルに、土石流・泥流モデルを加えた計算ソルバであり、斜面崩壊を初期条件として土石流の流動・堆積過程を表現可能なモデルである。なお、大中ら²⁾において本手法を用いた解析結果が実災害における被害状況と一致することが確認されている。表-1にMorpho2DHの計算パラメータを示す。計算パラメータは、Morpho2DHの技術報告書¹³⁾を参考に設定し、最大浸食深さは基準を0.1とし土石流が流動しなかった場合に上限0.3の間で適宜設定した。また、地形データは山口県全域の標高が再現可能である10mメッシュのDEMを内挿補間により、5mメッシュにダウンスケーリングした地形データを用いた。なお、1つの危険箇所につき、1つの計算領域を作成し、複数の危険箇所が重なる箇所では、まとめて1つの計算領域を作成し計算を行った。また、源頭部の位置を予測することは困難であるため、斜面崩壊が発生しやすいとされる0字谷¹⁴⁾の遷急点周辺で、主に候補位置を設定し、発生した土石流の流出範囲が最も広がった位置を最終的な斜面崩壊位置とした。なお、源頭部の個数は計算領域内の危険箇所と同数とした。また、対象溪流に砂防堰堤が存在した場合は、砂防堰堤より下流に源頭部を設定して計算を行った。また、本検討では、10mメッシュのDEMの地形のみで複合災害の危険性を評価しており、鉄道の盛り土、建物などは反映していない。

表-2 各路線の土石流シミュレーション結果

	計算域の数	土砂が鉄道に流出	土砂が土石流警戒区域外に流出
山陰本線	52	19(36.5%)	7(13.5%)
山陽本線	18	6(33.3%)	4(22.2%)
美祢線	37	23(62.2%)	21(56.8%)
岩徳線	19	12(63.2%)	7(36.8%)
山口線	27	15(55.6%)	13(48.1%)
錦川清流線	18	17(94.4%)	16(88.9%)
合計	171	92(53.8%)	68(39.8%)

b) 鉄道被災リスクマップの作成

土石流シミュレーションにより得られる鉄道被災のリスクを明示し、鉄道被災のリスクの規模や分布を確認するため、土石流シミュレーション結果を基に鉄道被災リスクマップを作成した。ここで、リスクマップを作成する際には、土石流シミュレーション結果により得られた、土石流による線路への平均土砂堆積厚を使用した。ここで、評価指標に鉄道への平均土砂堆積厚を用いたのは、鉄道への平均土砂堆積厚は各計算地点の鉄道上の堆積や洗堀の傾向を表現することができると考えたためである。

c) 鉄道被災リスクと地形特性の関係

土石流シミュレーションは、多大な時間と労力を要するため、土石流を起因とする鉄道被災のリスクと地形特性の関係を明らかにすることで、地形特性を基に、土石流を起因とする鉄道被災のリスクを簡便に評価することができる考えた。したがって、本検討では、各計算地点で地形特性を算出し、土石流シミュレーション結果との比較を実施した。なお、本検討では、源頭部を1か所設定した地点のうち、溪流と鉄道線路がおおよそ直交し、鉄道へ土砂が流出した地点のみを対象とした。はじめに、ArcMAPの水文解析ツールを用いて、溪流ポリラインを作成する。これより得られる溪流ポリラインと、線路が交わる位置の土砂堆積厚を目的変数とし、各地形特性を説明変数とし、それぞれの関係について考察した。なお、各地形特性は、土石流シミュレーションに使用した地形データと同様のものを用いて算出した。ここで、各地形特性は正規分布に従わないものが見られたため、ケンドールの順位相関係数 (τ) を用いて、目的変数との関係性を評価した。次に、上記の目的変数を対数変換したものを目的変数、有意な相関が認められた地形特性を説明変数として、一般化線形モデル (GLM) による重回帰分析を実施した。なお、解析には R-4.1.3¹⁵⁾ (R Development Core Team) の GLM 関数を使用した。モデル選択のためのパッケージ・ライブラリは MuMIN¹⁶⁾ を使用し、 ΔAIC が 2.0 以下となって全モデルを対象にモデルから得られた推定値と、計算値の比較を行った。

(2) 結果

a) 土石流シミュレーションの結果

前章で抽出した、土石流を起因とする鉄道被災の発生

危険箇所における、iRICのMorpho2DHを用いた土石流シミュレーションを実施した。282か所の危険箇所のうち、土石流警戒区域が重なっている箇所はまとめて1つの計算域とした結果、計算域は合計171地点となった。

各路線の土石流シミュレーション結果を表-2に示す。集計の結果、抽出した危険箇所の半数以上の箇所で土石流により、土砂が鉄道に到達するということが明らかとなった。また、土石流シミュレーションによって、土砂が土石流警戒区域外に流出した箇所が68地点と、全計算域の約4割存在し、土石流警戒区域の付近では警戒区域の外であっても、土石流による被害の危険性があることが明らかとなった。危険箇所の抽出数が最も多かった山陰本線では、土砂が鉄道に流出した箇所が36.5%と比較的低く、同様に、危険箇所の抽出数が二番目に多かった山陽本線では、土砂が鉄道に流出した箇所が33.3%と比較的低かったが、山陰本線と山陽本線は沿岸の平坦な土地に敷設されていることが多かったため、土石流により土砂が鉄道へ到達しにくかったためと考えられる。一方、路線が山麓の斜面上に位置することが多い美祢線、岩徳線、山口線、錦川清流線では、半数以上の計算域で土石流によって土砂が鉄道に流出していた。特に、路線のほとんどが山麓に敷設されている錦川清流線では、1地点を除く全計算地点で、土石流によって鉄道へ土砂が流出しており、錦川清流線は土石流を起因とする鉄道被災の危険性が高い路線であることが示唆された。また、美祢線は路線長が46.22kmと比較的短いものの、土石流により土砂が鉄道に流出した地点が最も多く、土石流を起因とする鉄道被災の危険性が高い路線であることが示唆された。以上により、山口県の在来線ごとの土石流による線路への土砂流出の危険性が示された。

b) 鉄道被災リスクマップの作成結果

土石流による鉄道への平均土砂堆積厚が高かった上位2地点および下位2地点での土砂堆積厚分布を図-2に示す。鉄道への平均土砂堆積厚が最も高かった地点(図-2(a))では、溪流沿いに線路が敷設されており、当該溪流を流れた土石流が停止・堆積することによって、線路への土砂堆積厚が高くなっている。また、本地点では、溪流上で土石流が停止しているため、下流への被害は発生しなかった。次に、鉄道への平均土砂堆積厚が2番目

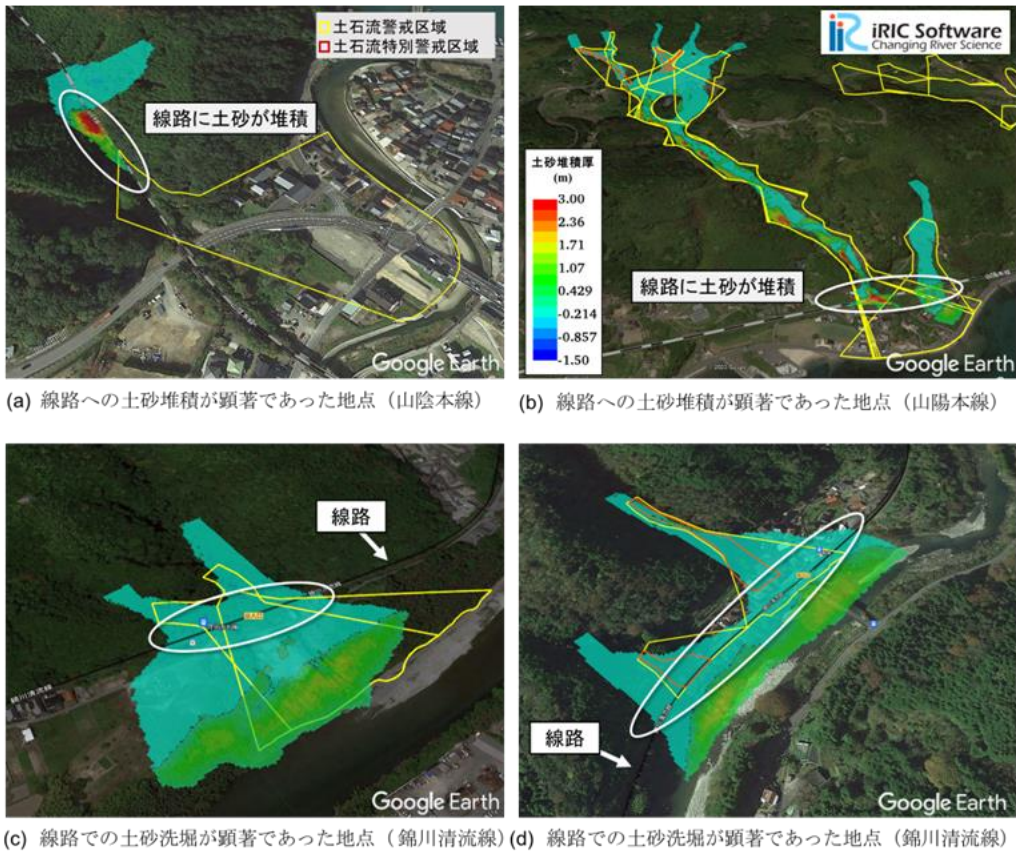


図-2 土石流を起因とする鉄道被災のリスクが高い地点

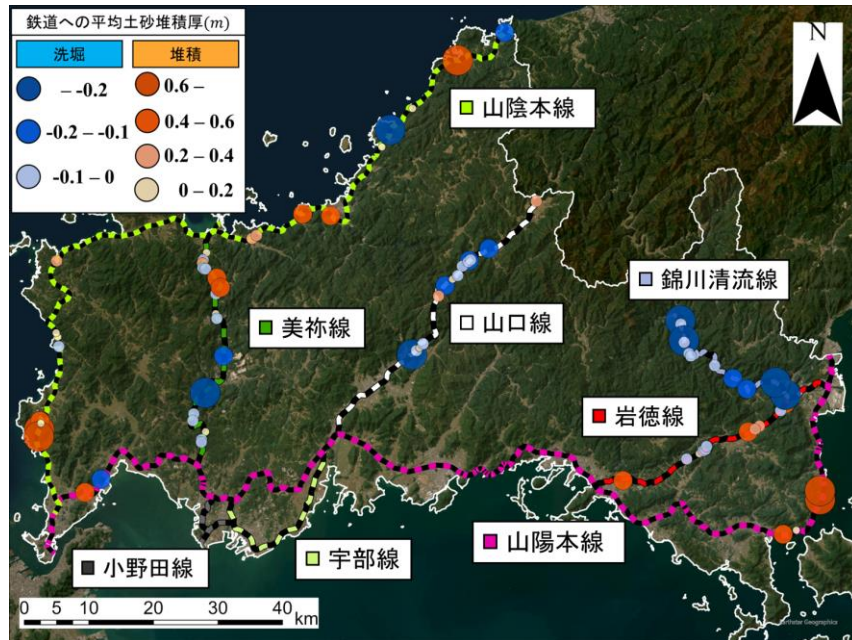


図-3 土石流を起因とする鉄道被災リスクマップ

に高かった地点（図-2(b)）では、複数の土石流が、長距離を流動し、平坦な土地に敷設されている線路上で停止・堆積していることが分かる。したがってこの地点では、長距離を流動することによって土石流が発達し、生産された大量の土砂が線路上で堆積したため、線路上での土砂堆積厚が高くなったと考えられる。鉄道への平均

土砂堆積厚が最も低く、土砂洗堀が顕著であった地点（図-2(c)）や2番目に低かった地点（図-2(d)）では、発生した土石流が急勾配の斜面を流動することによって、線路付近が土石流により浸食されていた。このような土地では線路の流出の危険性が高いことが考えられる。このように、土石流シミュレーションによって得られる鉄

表-4 線路への土砂堆積厚と各地形特性の比較結果

	τ	p-value
源頭部から線路までの距離	0.174	0.103
源頭部から線路までの平均勾配	-0.269	< 0.05
集水域面積	-0.152	0.155
線路上の平均勾配	-0.451	< 0.01
逆勾配箇所の割合	-0.131	0.223
蛇行度	-0.0365	0.739
源頭部から線路までの比高	0.0277	0.803
標高変化量(Δ5m)の分散	-0.340	< 0.01
勾配変化量(Δ5m)の分散	-0.216	< 0.05
勾配の分散	-0.229	< 0.05
標高の分散	0.00997	0.934
線路より上流15mの平均勾配	-0.384	< 0.01

道への土砂堆積厚および土砂量によって、鉄道被災リスクを定量的に評価することができた。

次に、土石流シミュレーションによって推定した、各計算域の鉄道への平均土砂堆積厚を用いて、土石流を起因とする鉄道被災リスクマップを作成した。鉄道被災リスクマップを図-3に示す。本マップにより、錦川清流線では、前述したように鉄道での土砂洗堀が顕著であることが確認できる。また、山口線や美祢線などでも、局所的に土砂洗堀が顕著であることが確認でき、そのような地点は山麓の斜面上に線路が敷設されている、図-2(c)(d)のような地形であった。また、沿岸に位置する山陰本線や山陽本線で土砂堆積が顕著であったが、図-2(b)のような、長い溪流を持ち、線路付近で土石流が停止・堆積するような地形が沿岸に多かったことが要因と考えられる。なお、同一路線内でも、土石流を起因とする鉄道被災のリスクの種類や規模は様々であり、各地点の局所的な地形が鉄道被災と関係していると考えられる。

以上、土石流を起因とした複合災害の発生リスクが高い箇所において、土石流シミュレーションによる定量的な評価を行った結果、鉄道線路上および源頭部から線路到達までの地形形状が、線路への土砂堆積あるいは洗堀の規模に影響することが示された。また、土石流シミュレーション結果を用いて、鉄道被災リスクマップを作成することによって、各計算地点における鉄道への平均土砂堆積厚を明示することで、山口県内に位置する各地点での土石流を起因とする鉄道被災の分布や規模を把握することができた。

c) 鉄道被災リスクと地形特性の関係

溪流ポリラインと、線路が交わる位置の土砂堆積厚を目的変数とし、各地形特性を説明変数とし、それぞれの関係について、ケンドールの順位相関係数 (τ) を用いて比較した結果を表-4に示す。ここで、集水域面積、線路上の平均勾配以外の地形特性については溪流ポリライ

表-5 土石流シミュレーションによる計算値と推定値の相関が最も高かったモデル

	偏回帰係数	標準誤差	p値
(切片)	1.78E-01	6.89E-02	1.34E-02
線路上の平均勾配	-2.14E-02	5.68E-03	5.57E-04
溪流上の勾配の分散	7.99E-04	4.82E-04	1.05E-01
溪流上の標高変化量の分散	1.44E-04	1.23E-04	2.48E-01

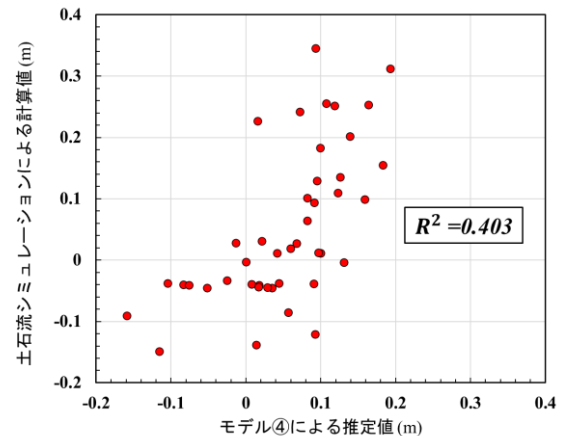


図-4 構築したモデルによる推定値と土石流シミュレーションによる計算値の比較

ン上で算出したものである。なお、集水域面積はArcMAPの水文解析ツールを用いて算出した。表-4より、源頭部から線路までの距離、集水域面積、逆勾配箇所の割合、蛇行度、源頭部から線路までの比高、溪流上の標高の分散は有意な相関が認められなかった。また、有意な相関が認められたのは、源頭部から線路までの平均勾配、線路上の平均勾配、標高変化量の分散、勾配変化量の分散、勾配の分散、線路より上流15mの分散であった。有意な相関が認められた地形特性は、ほとんどが地形勾配に関わるものであったが、土石流の流動形態が地形勾配に大きく関係していることが要因と考えられる。特に、線路上の平均勾配 ($\tau=-0.451, p<0.01$) や、線路より上流15m間の平均勾配 ($\tau=-0.384, p<0.01$) などの、線路近傍の地形勾配に関わるパラメータは、溪流と線路の交点における土砂堆積厚との間に、強い相関が認められた。また、有意な相関が認められた地形特性のうち、標高変化量の分散、勾配変化量の分散、勾配の分散などは、これらが高いほど直線的な斜面となり、これらが低いほど凹凸のある斜面となるパラメータであり、これらは土石流の発達に大きく関わっていると考えられる。

これらの有意な相関が認められた6つの地形特性を用いて、GLMによる重回帰分析を実施した。目的変数である、対数変換後の溪流と線路の交点における土砂堆積厚は、おおそ正規分布に従っていたため、確率分布は正規分布とし、リンク関数はidentityとした。また、標高変化量の分散と、源頭部から線路までの平均勾配は互い

に相関が認められたため、それぞれを分けて解析を実施した。ΔAIC が 2.0 以下となった全モデルの中で、土石流シミュレーションによる計算値と最も相関が高かったモデルの概要を表-3、土石流シミュレーションによる計算値と本モデルによる推定値の比較を図-4 に示す。本モデルによる推定値は全体的に過小評価傾向であり、決定係数が 0.403 であった。また、溪流と鉄道の交点での土砂堆積厚が、負である箇所を洗堀による危険箇所、正である箇所を堆積による危険箇所と定義し、本モデルによる推定値および計算値による判定を行った。その結果、全体での正解率は69.76%であり、本モデルは、溪流と鉄道がおおよそ直交する場合における、土石流による鉄道線路上での土砂の堆積あるいは洗堀の傾向をおおよそ予測できることが示唆された。

4. 結論

本研究では、はじめに、地理情報処理ソフトである ArcMAP を用いて、山口県内全域を対象に、土石流を起因とする鉄道被災の発生危険箇所を抽出した。その結果、山口県内には鉄道被災のリスクが高い箇所は 415 か所存在することが分かった。危険箇所は、都市部などの平野部を除く、小野田線と宇部線を除く山口県内の在来線に存在することが分かった。次に、そのうち 282 か所の危険箇所を対象とした土石流シミュレーションの実施により、抽出した危険箇所の 53.8%と、半数以上の箇所で土石流によって線路へ土砂が流出することが明らかとなった。また、土石流シミュレーションを実施した計算地点の約 4 割の地点で、土石流が土石流警戒区域外に流出した。これより、土石流警戒区域外であっても土石流による被害の危険性があることが示された。また、土石流シミュレーションにより鉄道線路への土砂堆積厚を算出することで、鉄道被災リスクを定量的に評価することができた。その結果、鉄道線路上および源頭部から線路到達までの地形形状が、鉄道線路への土砂堆積あるいは洗堀の規模に影響することが示唆された。また、鉄道への土砂堆積厚によって、土石流を起因とする鉄道被災リスクマップを作成することにより、山口県内に位置する各路線での鉄道被災の分布・規模を把握することができた。

最後に、土石流シミュレーションによって定量的に評価された、土石流による鉄道への土砂堆積厚と、周辺の各地形特性の関係を比較した結果、溪流沿いおよび線路上の勾配や標高に関する地形特性と有意な相関が認められた。さらに、一般化線形モデルを用いて、鉄道の土砂堆積厚を目的変数、有意な相関が認められた周辺の地形特性を説明変数としてモデルを構築することにより、土石流による線路への土砂堆積あるいは洗堀の傾向を推定できることが示唆された。

謝辞：本研究は中国建設弘済会技術開発支援事業の助成「土石流・流出氾濫シミュレーションによる鉄道被災の発生リスク評価（研究代表者：赤松良久）」の助成を受けて実施した。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 内閣府：平成 30 年 7 月豪雨による被害状況について、2019/1/9、
<http://www.bousai.go.jp/updates/h30typhoon7/pdf/300801_h30typhoon7_01.pdf> (2023/5/1 閲覧)
- 2) 竹林洋史, 藤田正治：2018 年 7 月に広島県安芸郡熊野町川角で発生した土石流の流動特性, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 75, No. 1, 362-369, 2019.
- 3) 竹林洋史, 藤田正治：2018 年 7 月に広島市安芸区矢野東で発生した土石流の流動特性, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 75, No. 2, I_859-I_864, 2019.
- 4) 大中臨, 赤松良久, 杉田唯：土石流シミュレーションによる山口県内の複合災害発生ポテンシャルの検討, 河川技術論文集, 第 26 巻, 2020.
- 5) 森泰樹, 杉山友康, 里深好文, 栩野博：数値標高モデルを用いた小規模溪流の危険評価に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 77, No. 1, 24-38, 2021.
- 6) 村上豊和, 下野宗彦, 中田幸男：高速道路に影響を与える土石流危険溪流の資料調査に基づく評価手法, 地盤工学会中国支部論文報告集, 地盤と建設 Vol.34, No. 1, 19-27, 2016.
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説, 2016.
- 8) ESRI 社：ArcMAP ArcGIS Desktop, <<https://desktop.arcgis.com/ja/desktop/>> (2023/5/1 閲覧)
- 9) 国土地理院：国土数値情報ダウンロード, <<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.htm>> (2023/5/1 閲覧)
- 10) 山口県：山口県土砂災害警戒区域等マップ, <<https://d-keikai.pref.yamaguchi.lg.jp/MapKeikai.aspx>> (2023/5/1 閲覧)
- 11) 一般社団法人 iRIC-UC：iRIC Software, <<https://desktop.arcgis.com/ja/desktop/>> (2023/5/1 閲覧)
- 12) 一般社団法人 iRIC-UC：iRIC Morpho2DH, <<https://i-ric.org/solvers/morpho2dh/>> (2023/5/1 閲覧)
- 13) 田中春樹：iRIC を用いた土石流解析, 応用技術株式会社, OGI Technical Reports vol.74, pp.39-44, 2016.
- 14) 塚本良則：浸食谷の発達様式に関する研究(I), 新砂防, 第 25 巻, 4 号, pp.4-13, 1973.
- 15) 統計ソフト R-3.6.1: R Core Team 2019, <<https://www.r-project.org/>> (2023/5/1 閲覧)
- 16) Bartoń.K：Multi-Model Inference, R package version 1.46.0, 2022.