広域二次元の土砂移動の危険度評価による避難所の孤立発生可能性の検証

EVALUATION OF EVACUATION CENTER ISOLATION POTENTIAL BASED ON WIDE-AREA 2D SEDIMET MOVEMENT HAZARD ASSESMENT

筒井　和男[1]・峩山　雄亮[2]・嶋田　圭悟[2]

Kazuo TSUTSUI, Yusuke HAGEYAMA and Keigo SHIMADA

[1]防災科学技術研究所（〒305-006 茨城県つくば市天王台 3-1）

E-mail: k.tsutsui@bosai.go.jp

[2]和歌山県土砂災害啓発センター（〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027 番 6）

***Key Words**: sediment movement, evacuation center, isolation potential, road network, AHP*

1. はじめに

近年，わが国では地震や集中豪雨に伴う土砂移動現象により，基幹道路や生活道路が寸断され，多数の集落が長期間にわたって孤立する事態が相次いでいる．2024 年能登半島地震では半島特有の道路網の脆弱性が露呈し，2016 年熊本地震や 2011 年紀伊半島大水害においても，大規模な斜面崩壊や河道閉塞によって外部とのアクセスが完全に遮断された地域（孤立集落）が発生した．内閣府の調査[1)]によれば，孤立の可能性がある集落は全国に約1万7千存在し，これは全集落の約 3 分の 1 を占める極めて深刻な課題である．孤立の定義は「道路交通及び海上交通による外部からのアクセスが途絶し，人の移動・物資の流通が困難もしくは不可能な状態」とされるが，その主要な要因として，土砂災害警戒区域などの不安定斜面がアクセス道路に隣接していることが指摘されている．

中山間地域の孤立リスクを定量的・客観的に評価する試みは，GIS（地理情報システム）の発展とともに深化してきた．吉田ら[2)]は，2004 年新潟県中越地震で，山間地において多発した土砂災害で交通網が寸断され，多数の孤立集落の被害実績に基づき 50 m メッシュ標高データから地下水の飽和しやすさを表す地形指標（TI）や斜面傾斜を算出し，それらを組み合わせることで道路寸断リスクおよび集落の孤立危険度を視覚化する手法を提案した．これは，潜在的な地形リスクを全国一律のデータで評価可能にした点で初期の取り組みの一つである．その後，小野と本郷[3)]は，地震動の最大地表面加速度（PGA）と斜面勾配を独立変数とする斜面崩壊の確率式（酒井らの評価式）を導入し，モンテカルロ法を用いた道路ネットワーク分析によって，各ノードの孤立確率を確率論的に算出する手法を提案した．小野と日比[4)]は，この手法を 2004 年新潟県中越地震の山古志村と 2016 年熊本地震の南阿蘇村の集落の孤立確率を求め，実際の被害と比較した．さらに，日比と小野[5)]は，特定の道路リンクが閉塞した際に孤立する人口規模と閉塞確率を掛け合わせた「クリティカル度」を定義し，効率的な孤立抑制対策が可能となる，道路区間を体系的に抽出する戦略的な評価法を提示している．

一方で，リスク評価の精度を規定する「斜面の地形・地質的素因」をより精緻に反映させる研究も進んでいる．種平ら[6)]は，20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2 や火山土地条件図を活用し，地質時代や層状構造（流れ盤・受け盤），岩種の特徴に基づき土砂移動形態を 6 分類するフローを構築した．これにより，形態ごとに異なる崩壊面積率の推定式を用いることで，地震時斜面崩壊の危険度予測の高度化を図っている．また，穂積ら[7)]は，自治体が管理する「防災カルテ」や「安定度調査表」に含まれる湧水，

植生，変状の有無，既設対策工の状況といった専門家による微視的な点検項目データ，地震動強度指標データ等を用いて，共分散構造分析とロジスティック回帰分析と， SMOTE により崩壊・非崩壊データの不均衡を組み合わせることで，斜面崩壊確率評価式を提案し，個別の法面や自然斜面における崩壊的中率の向上を実現している．

最近では，発災直後の迅速な情報把握を目的としたリアルタイム推定の試みもなされている．Fujita et al. [8]は，震度分布や土砂災害発生確率などのハザードデータに，実際の走行実績に基づくプローブ交通実績データを統合し，発災からの時間経過とともに孤立推定を更新するマルチセンシング手法を提案した．しかし，これら最新の動的推定手法においても，個々の斜面の詳細な地形的・地質的脆弱性に基づく事前のリスク評価結果を，いかに実効性のある防災計画や備蓄計画に結びつけるかという点には依然として課題が残る．特に，災害時に住民の生命を守る最後の砦となる「指定避難所」そのものが，拠点（役場等）からのアクセス経路の遮断によって孤立し，外部支援から取り残されるリスクについては，詳細な地形・地質情報の重ね合わせによる検証事例が十分とは言えない．

本研究の目的は，上述した既往研究の成果，すなわち「広域的な地形・地質情報に基づく危険度評価」と「道路ネットワークの構造的解析」を統合し，中山間地域における避難所の孤立可能性を事前に客観評価する手法を構築することである．本稿では，2011年紀伊半島大水害において甚大な土砂災害を経験した和歌山県那智勝浦町を対象地域とし，役場から主要な 4 つの指定避難所に至る最短経路上の土砂移動の危険度（AHP）を評価した．経路ごとの脆弱性を定量的に比較・検証することで，中山間地域におけるより実効的な避難体制の整備や，孤立を前提とした防災資機材の先行備蓄などの事前対策に資する知見を得ることを目指した．また，紀伊半島大水害時に発生した孤立集落の発生要因となった道路被災箇所を調査し，本稿での土砂移動の発生危険度評価結果と比較し考察を行った．

2. 調査地の概要

(1) 紀伊半島大水害の概要

紀伊半島南東部にある那智勝浦町は，主に太田川と那智川の流域に区分される．紀伊半島大水害の際，2011 年 8 月 30 日から 9 月 4 日にかけて，台風第 12 号による記録的な豪雨により，太田川流域では広範

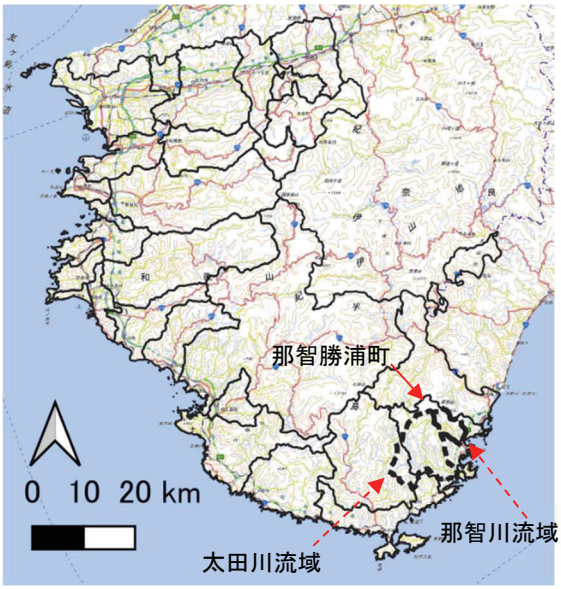


図-1 対象地域の位置図

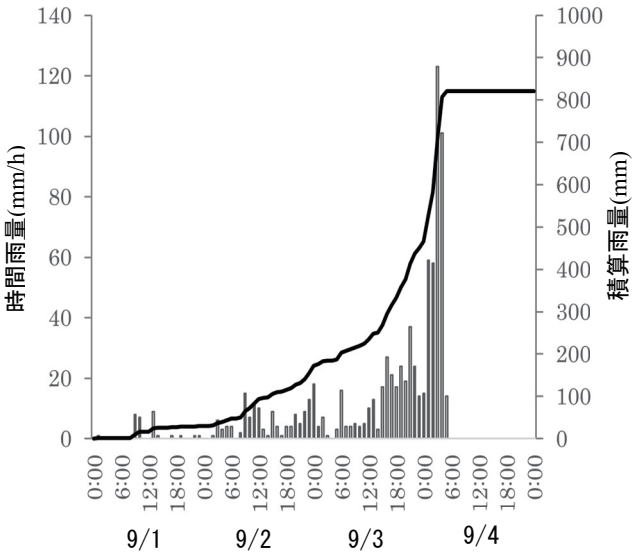


図-2 災害時の時間雨量と積算雨量

囲で氾濫被害が発生したが，一方，那智川流域では，花崗斑岩と堆積岩との境界付近で大規模な表層崩壊とそれに伴う土石流が発生し，支川からの土砂の流入による河川氾濫により多くの人的被害が発生した（死者 28 人，行方不明者 1 人）．那智勝浦町，那智川・太田川の流域の位置を**図-1** に示す．9 月 4 日の未明には，和歌山県が設置する同流域内の市野々観測所において最大 123 mm，0 時から 4 時の間に 341 mm の降雨を観測した．時間雨量と積算雨量の時系列を**図-2** に示す．気象情報等の発表状況は，9 月 1 日 13 時 50 分に大雨注意報，9 月 2 日 4 時 15 分に大雨・洪水警報，9 月 2 日 21 時 50 分に土砂災害警戒情報が発表されている．

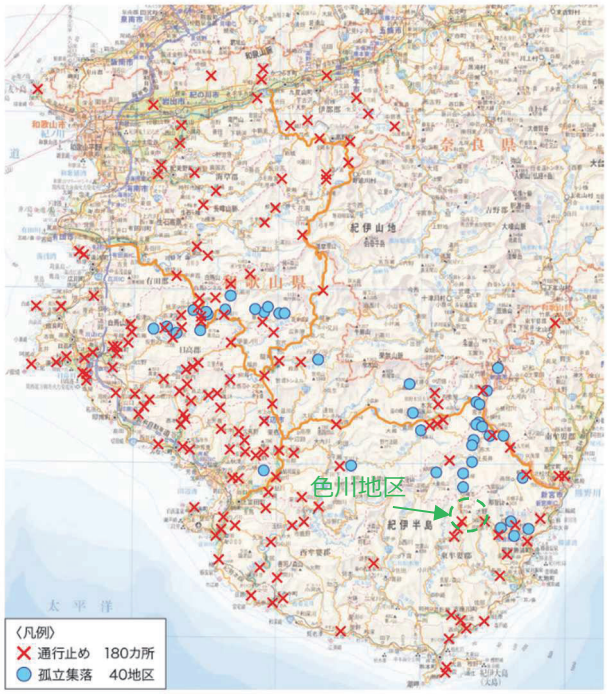


図-3 和歌山県内での被害状況[9)]

(2) 孤立集落の発生状況

紀伊半島大水害では，降雨により，県内で多数の道路や河川等の土木に被害が発生した．また，それに伴って，孤立集落も発生している．和歌山県の調査[9)]では，通行止めが 180 箇所，孤立集落が 40 地区発生したとされている（**図-3**）．また，那智勝浦町内では，太田川流域の上流にある色川地区では，集落が孤立状態にあったとの証言が記録されている[10)]．

3. 調査手法と結果

地形・地質情報に基づく斜面の危険度評価手法として濱崎ら[11)]はバッファ移動解析と過誤確率分析法を提案している．GIS を用いて広域的な斜面崩壊リスクを定量的に評価する手法である．本手法では，解析対象地点を中心とした一定半径の「バッファ」を設定し，その範囲内の地形・地質的素因（地質，起伏度，地上開度，斜面勾配等）を統計的に集積・処理する．さらに，過去の災害実績データに基づき，崩壊地と非崩壊地を最も精度よく識別できるよう各項目の計算ウェイトを最適化する過誤確率分析を導入している．これにより，解析者の主観を排し，地形的特性を反映した客観的な評価指標（AHP 値）を導出することが可能となる．高い再現性を有する点が特長である．なお，AHP 値は土砂移動の発生しやすさを表す指標ではあるが，ある値以上で発生するなどの絶対的な指標でないことに注意が必要である．

本研究では国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル（DEM）の 10 m メッシュデータおよび産業技術総合研究所の 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2 データを利用し，紀伊半島南東部の主に那智川および太田川流域を対象に斜面の崩壊危険度（AHP）の評価を行った．目的変数の地すべり，崩壊地分布は 2011 年紀伊半島大水害の判読データを和歌山県より提供を受け，それを採用した．

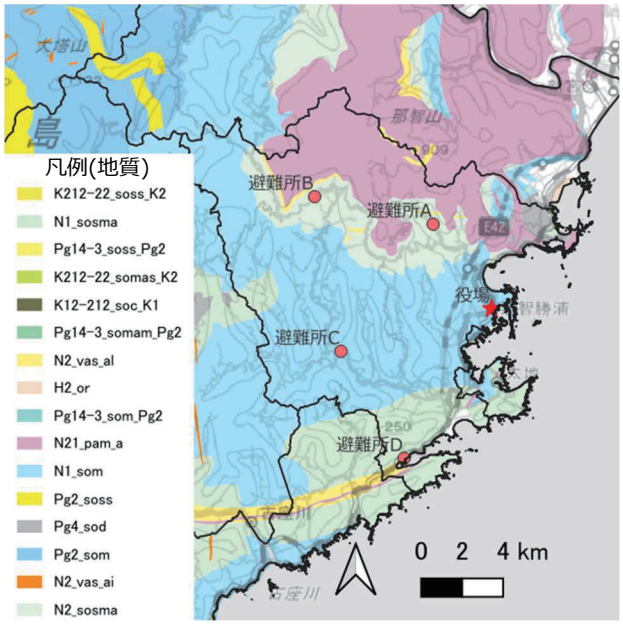


図-4 対象地域の地形と地質および避難所等の位置
（国土地理院地図・シームレス地質図を参照）

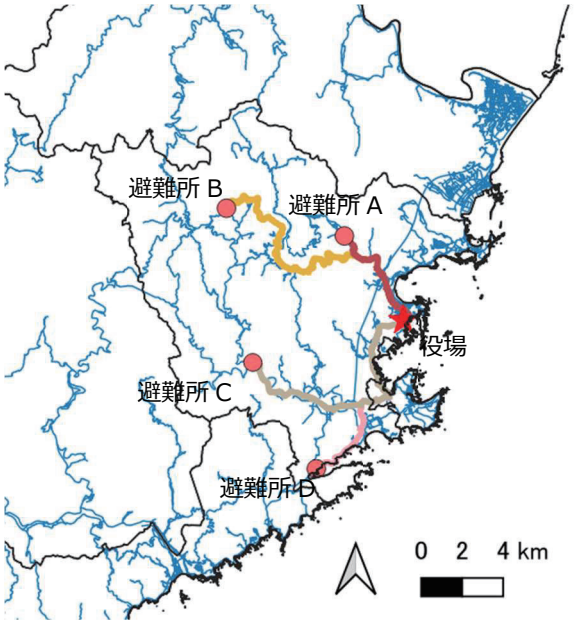


図-5 道路ネットワークと各避難所から
役場庁舎までの最短経路

対象地域の道路ネットワークのデータ（OpenStreetMap[12)]）を，Python ライブラリの OSMnx を使ってダウンロードした（**図-4**）．これらのデータを用いて，那智勝浦町内の 4 つの指定避難所と役場

表-1 評価基準と計算ウェイト

評価基準	バッファ集積法	計算ウェイト
地質（岩相）	最頻値の地質	18
起伏度	（最高点－最低点）／２点間距離	16
地上開度	各セル地上開度の平均値	22
谷次数	谷次数の最大値	22
地すべり土塊	バッファ内面積率	22

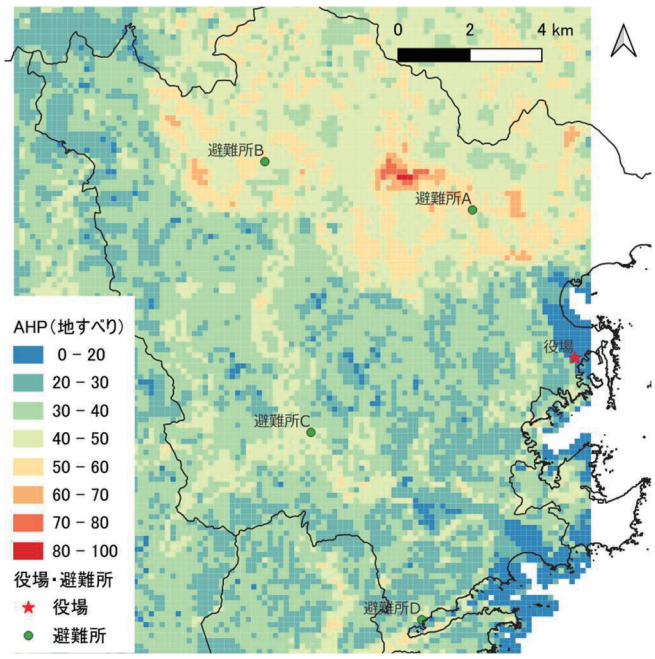


図-6　地すべりを対象にした危険度分布

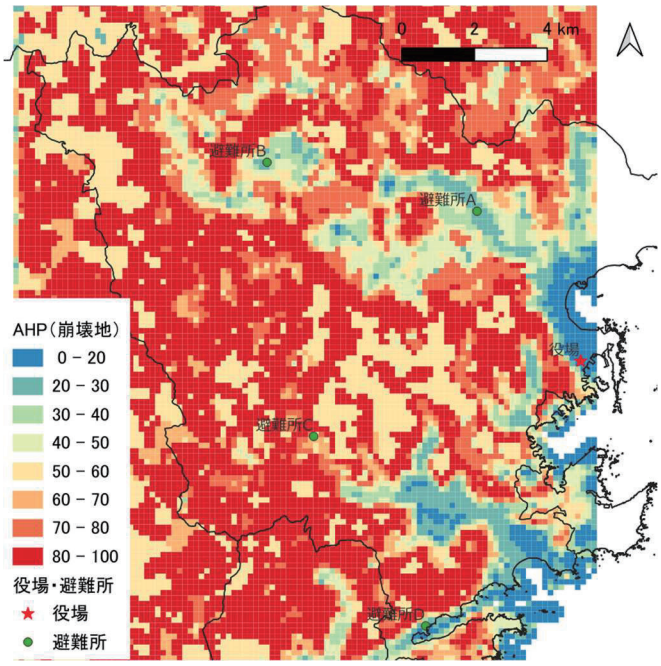


図-7　崩壊地を対象にした危険度分布

の最短経路を求めた（**図-5**）．地すべりを対象に**表-1** に示す評価基準と計算ウェイトを用いて，濱崎らが提供するプログラム[13]を用いて，250 m のバッファ半径，スキップ距離 150 m で 1000 回の繰り返し計算により求めた．また，同様に評価基準と計算ウェイトを変えて，崩壊地を対象に危険度分布も求めた．得られた危険度の分布を**図-6**，**7** に示す．

4. 考察

(1) 避難所の孤立可能性の検討

地すべりを対象にして得られた危険評価分布から指定避難所への最短経路上の危険度を抽出した．避難所 B からの経路上には危険度が高い斜面が多く分布していることが分かる（**図-8**）．平均の AHP は 42.3 で，最大の AHP は 64.2 であった．各避難所から役場までの最短経路上の危険度評価結果を**表-2** に整理した．

経路上の危険度と，2011 年紀伊半島大水害時の実際の被害実績と比較すると，同災害において孤立状態にあったと証言されている色川地区（避難所 B の周辺地域）に至る経路（19.7 km）は，4 経路の中で最も高いリスクを示している．色川地区は前述のとおり孤立しており，また経路上では，地すべりが 2 箇所（南平野地区），土石流が多数発生している．

ここで各経路のリスク構造に着目すると，避難所 A と避難所 B はともに最大 AHP が 64.2 と等しい値を示す一方で，平均 AHP は避難所 A が 32.3，避難所 B は 42.3 を示した．避難所 A は最短経路の距離が 6.2 km と短いものの，一部に危険性の高い場所があり，避難所 B の場合は経路上に比較的危険性の高い場所が分布する傾向を示すと考えられる．行政が限られた予算内で法面保護等のハード対策を講じる場合，避難所 A のような一部に危険性が高い場合には，ピンポイントで対策することが投資対効果の面で効果的と考えらえる．逆に，避難所 B のように危険性が広く分布する場合には，ハード対策のみでの孤立防止は困難であり，資機材の備蓄や早めの避難

表-2 各避難所からの最短経路上の危険度の統計（評価対象：地すべり）

起点	終点	距離	平均 AHP	AHP 中央値	最大 AHP
避難所 A	役場	6.2 km	32.3	26.8	64.2
避難所 B	役場	19.7 km	42.3	46.8	64.2
避難所 C	役場	14.1 km	34.3	35.6	53.4
避難所 D	役場	11.7 km	31.9	35.6	47.0

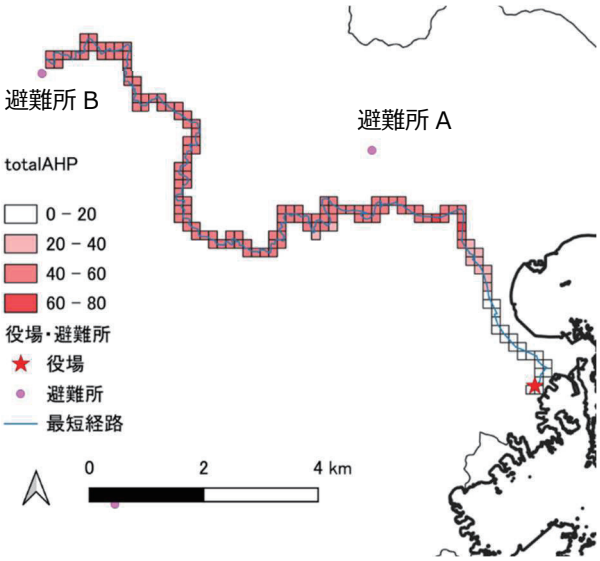


図-8 避難所 B からの最短経路上の危険度分布
（評価対象：地すべり）



図-9 紀伊半島大水害時の道路被害例

等のソフト対策の併用が必要と考えられる．孤立が考えられる地域の対策検討にあたり，アクセス道路沿いの危険性を定量的に評価する本稿のような手法が用いられることを期待する．

なお，本稿では初期的な取り組みとして，各避難所からの最短経路上の危険性を評価した．他の経路からのアクセスも可能であり，その考慮も当然すべきであるが，今後の課題として取り組みたい．

(2) 土砂移動形態による危険度分布の特性

地すべりと斜面崩壊（表層崩壊）の２つの土砂移動形態を対象に危険度を算出した（**図-6**，**7**）．これらを経路解析に重ね合わせた結果，土砂移動の移動形態の違いが避難経路の脆弱性に異なる影響を与える可能性を示唆している．地すべりを対象とした AHP 分布では，特定の地質境界や過去の変動地形（地すべり土塊のバッファー内の面積率など）に依存するため，危険度の高まりは局所的であった．これに対し，崩壊地を対象とした危険度分布では，起伏度や地上開度といった微地形の急変部に反応し，山間部に高い危険度が広く分布する傾向が見られた．このため，地すべりを対象にした場合に比べて，崩壊を対象とした場合の孤立発生の可能性評価については過大に評価した結果となったため，パラメータの見直し等適正な危険度の評価について，今後の課題として取り組みたい．

一方で，孤立集落の発生要因となった道路施設への被害状況を検証すると，道路の路側構造物が河川流によって侵食した事例（**図-9a**）や，土石流による路体自体が流出した事例（**図-9b**）が確認できた．本稿で対象とした地すべりや表層崩壊による道路の途絶も発生したものの，道路の被災要因は多様であり，局所的な現象に大きく依存する．本研究での検討では，それら全ての要因を包含することはできないが，一定の成果を示すことができたと考える．

5. 終わりに

本研究では，地形・地質情報に基づく斜面危険度評価（AHP 値）と道路ネットワーク解析を統合し，中山間地域の指定避難所における土砂移動に伴う孤立発生可能性を事前に客観評価する手法の構築を試

みた．2011 年紀伊半島大水害で甚大な被害を受けた和歌山県那智勝浦町を対象とした検証の結果，得られた地すべりを対象とした主な知見を以下にまとめる．

1） 濱崎ら [11]によるバッファ移動解析および過誤確率分析法を適用することで，過去の土砂災害実績に基づいた地形・地質的脆弱性を反映した斜面危険度の空間分布を定量化できた．これにより，従来の広域的・一律的なハザード評価から進んで，個別経路の沿道リスク評価への展開の可能性を示すことができた．

2） 各避難所への最短経路上に分布する危険度を統計的に抽出・比較した結果，実際に孤立が発生した避難所 B（色川地区周辺）について，平均 AHP が高い結果を得た．AHP 値の分布状況を評価することで，行政がハード対策（法面補強等）とソフト対策（備蓄計画等）のいずれを優先すべきかを検討する資料となりうる．

3） 本研究で提示した事前リスク評価手法は発災後のマルチセンシングデータを用いた動的推定手法に対し，平時からの備蓄拠点の選定や避難所の適正配置を支援するリスクマネジメントのツールとしての有用性を有することが示唆された．

今後の課題として，本稿では主に地すべりを対象とした解析を中心に論じたが，崩壊地を対象とした場合の評価やパラメータの見直しが必要である．また，経路上の橋梁やトンネル等の道路構造物自体の脆弱性・経年劣化評価を組み合わせることで，より多角的な道路ネットワークの連結性評価へと進展させたい．さらに，主要な最短経路が遮断された場合を想定し，代替経路（迂回路）を含めた冗長性の評価手法についても検討を進めたい．

謝辞：和歌山県砂防課および東牟婁振興局新宮建設部には紀伊半島大水害時の土砂移動に関する資料を提供いただきました．ここに記し感謝申し上げます．

参考文献

1） 内閣府政策統括官（防災担当）：中山間地等の集落散在地域における孤立集落発生の可能性に関する状況フォローアップ調査（平成 26 年 10 月調査結果），https://www.bousai.go.jp/jishin/chihou/pdf/20141022-koritsuhoukokusyo.pdf，2014.

2） 吉田貢士，塩沢昌，田中幸夫，星川和俊：50m メッシュ標高を用いた集落の孤立可能性評価，農業農村工学会誌，75 巻，11 号， pp. 967-970，2007.

3） 小野祐輔，本郷俊介：地震時の斜面崩壊確率に基づく中山間地の孤立可能性の定量化の試み，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），74 巻，4 号， pp. I_313-I_319，2018.

4） 小野祐輔，日比慧慎：地震時斜面崩壊による道路閉塞を考慮した中山間地の孤立リスク評価：2004 年新潟県中越地震と 2016 年熊本地震への適用，日本地震工学会論文集，19 巻，6 号（特集号）， pp. 6_232-6_243，2019.

5） 日比慧慎，小野祐輔：中山間地の地震時孤立リスク低減のための重要道路区間の抽出法，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），76 巻，4 号， pp. I_454-I_460，2020.

6） 種平一成，後根裕樹，田中健貴，山越隆雄，西脇彩人：地形・地質情報に基づく地震時斜面崩壊面積率推定式の検討，令和 6 年度砂防学会研究発表会概要集，pp. 587-588，2024.

7） 穂積克樹，酒井久和，梶谷義雄：防災カルテ・安定度調査表を用いた斜面崩壊確率に基づく孤立性評価法，土木学会論文集，79 巻，13 号，22-13005，2023.

8） Fujita, S., Kimijima, S., Borjigin, H., Hanashima, M., Toride, S. and Taguchi H.: Multi-Sensing Data-Based Estimation of Isolated Settlements During Disasters: A Case Study Using the 2024 Noto Peninsula Earthquake, Journal of Disaster Research, Vol.20, No.5, pp. 598-607, 2025

9） 和歌山県：平成 23 年紀伊半島大水害復興 10 年の軌跡，2021.

10） 那智勝浦町：第 28 回全国棚田（千枚田）サミット in 那智勝浦町報告書，2012.

11） 濱崎栄作，檜垣大助，林一成：GIS に基づく斜面変動予測評価のためのバッファ移動解析と過誤確率分析法，日本地すべり学会誌，52 巻，2 号，pp. 51-59，2015.

12） OpenStreetMap， https://www.openstreetmap.org/，(2026/5/16 閲覧).

13） 斜面防災危険度評価ガイドブック，朝倉書店.

（2026.5.29　受付）