

SGDAS の斜面災害発生可能性推計手法の改良 Proposed Improvements to the Method for Estimating the Probability of Landslides in SGDAS

地理地殻活動研究センター 岩橋 純子・遠藤 涼
Geography and Crustal Dynamics Research Center
IWAHASHI Junko and ENDO Ryo

要 旨

地震時地盤災害推計装置 (SGDAS) の斜面災害発生可能性推計手法の改良を目的として、A) 2026 年 5 月現在運用中の SGDAS の推計手法を保持した上で静的データを変更する案、B) 全く新しい斜面崩壊推計手法に変更する案の 2 案について、250 m メッシュ推計震度分布図を用いた精度検証を行った。A 案に関しては、地震時の斜面崩壊に対する脆弱性を考慮したゾーニングマップに基づく新たな脆弱地質マップへの差し替えは、精度向上の効果があることを確認した。一方、1 km メッシュ推計震度分布図を用いた過去の検証では、地すべり推計スキームを組み込まない方が、精度が向上することが示唆されていたが、250 m メッシュ推計震度分布図を用いた事例では明らかではなかった。B 案に関しては、既往地震の事例の集計結果を基に、ゾーニングマップの各ゾーンに対応する震度階/傾斜帯-発生可能性ランクのマトリックス表を作成した。このマトリックス表による推計結果は、検証した 7 地震の大半について、現在の SGDAS の推計手法あるいはそれを改良した A 案と比較しておおむね精度が向上し、最良ではないケースでも最適例との精度の差は小さいことがわかった。従って、B 案の採用が適当と考えられるが、将来的な B 案の実装時期については今後、検討を進めていく。その他、事前降雨に関する分析で、現時点では、事前降雨を重み付けとして取り入れるほどの明確な結果は得られなかった。

1. はじめに

国土地理院では、地震発災直後の情報の空白を埋め迅速な応急対応に資することを目的として、地震時地盤災害推計装置 (SGDAS) を 2019 年 6 月から運用している。SGDAS は、強い地震の発生後に配信される気象庁の推計震度分布図を受信し、斜面災害及び液状化の発生可能性に関する推計レポートを自動的に作成し、サーバにアップロードして、行政機関の防災関係者に、閲覧先の URL をメール配信する装置である。推計手法の開発時期が 10 年以上前 (2010~2012 年) であるため、令和 3 (2021) 年度~7 (2025) 年度の 5 年間の計画で、近年の地震の被害に基づく定量的な検証を行い、SGDAS の推計精度

向上に関する研究を行ってきた。本論文では、斜面災害の発生可能性推計手法の改良案について取り上げる。

2. 研究の概要

2026 年 5 月現在運用中の SGDAS (以下「現 SGDAS」という。) での「斜面災害」の発生可能性ランクの推計手法については岩橋・遠藤 (2023) にて詳述しているが、この手法は、斜面崩壊と地すべりの発生可能性をそれぞれ推計し 0~4 の 5 段階にランク分け後、合成して発生可能性大 (ランク 4)・中 (ランク 3)・小 (ランク 1 及び 2) に取りまとめるものである。なおランク 0 は発生可能性が無視できる程度である。斜面崩壊の発生可能性は、傾斜・曲率と最大加速度 (推計震度・モーメントマグニチュードから変換) から修正六甲式 (神谷ほか, 2012) を基に計算した危険度計算値を、脆弱地質マップを用いて一部かさ上げ補正したものである。地すべりの発生可能性は、地すべり地形分布図・地質図を基に計算した地すべり密度と震度により求められている (神谷ほか, 2014)。

1 km メッシュ推計震度分布図と既往地震による斜面崩壊・地すべりのインベントリを用いた検証 (岩橋・遠藤, 2023) では、斜面災害の発生可能性の推計に関して、次の①~③のような要改善点が明らかとなっていた。

- ①基盤地図情報 (数値標高モデル) DEM10B をソースとする地形量 (傾斜等の地形に関する物理量) ではなく、同 DEM5A 等を取り入れたより高精度な DEM から計算した地形量を用いる方が良好な結果が得られる。ただし、現状では精度が均一な DEM が得られないため、将来的には、曲率 (DEM の精度むらに反映されやすい) を使う現在の修正六甲式の手法は再考が望ましい。
 - ②現在の地すべりの推計スキームは、推計精度が低い方を用いる方がよい。代替としては、斜面崩壊の推計スキームとの統合が考えられる。
 - ③脆弱地質マップを用いた補正によりかえって推計精度が下がる事例が見られ、より適切なマップに変更する必要がある。
- これらのうち、①の高精度な DEM から計算した

地形量については既に対応済で、2022年にDEM5Aを優先にTIN補間したDEM(岩橋・速藤(2023)の「再構成DEM」)を用いた地形量データを作成し、2023年に実装している。

②については、2023年2月から250mメッシュの推計震度分布図の配信が開始されたため、250mメッシュ推計震度分布図と既往地震による斜面崩壊・地すべりのインベントリを用いた検証を改めて実施する必要がある。1kmメッシュ推計震度分布図と250mメッシュ推計震度分布図は、作成手法及び揺れの増幅に使う地盤データが異なっているため、解像度の違いに留まらず、震度分布のパターンがかなり異なっている(後述)。(なおここで言う1kmメッシュ・250mメッシュは、正確には総務省が定めた基準地域メッシュ及び4分の1地域メッシュであり緯度経度間隔30秒×45秒・7.5秒×11.25秒であるが、便宜上、本論文では1kmメッシュ、250mメッシュと呼ぶ。)

③については、次章で解説する地形・地質ゾーニングマップ(岩橋ほか, 2026; 以下「ゾーニングマップ」という。)から作成が可能と考えられる。取り入れる方法は二つあり、A)現在の推計手法を保持した上で脆弱地質マップを差し替える等に留めるか、B)全く新たな推計手法とするかである。B案については、震度階/傾斜帯ごとに、ゾーニングマップのゾーンに応じて発生可能性ランクを与える簡易な方法(以下「ゾーニングマップ方式」という。)を考案した。本論文では、2026年5月現在運用中のSGDAS、A案として地すべりの推計を外したケース、脆弱地質マップを更新したケース(+地すべりの推計を外す/外さない)、さらにB案のゾーニングマップ方式の計5ケースについて、250mメッシュ推計震度分布図及び既往地震による斜面崩壊・地すべりのインベントリを用いて精度検証を行った。

その他の残された課題として、地震時斜面崩壊・地すべりに対する事前降雨の影響の有無がある。事前降雨による飽和状態が地震時の崩壊に寄与した事例は2004年新潟県中越地震の際に発見されている(亀谷ほか, 2010)ほか、谷頭凹地での表層崩壊について事前降雨の影響がよく指摘されるが、広域での影響は分かっていない。Endo and Iwahashi (2024)は、2004年新潟県中越地震を対象として、3日間~60日間事前降雨量の寄与度の分析を行い、先行降雨の影響は限定的である可能性があること、また大型の斜面崩壊・地すべりが小型の斜面崩壊よりも降雨の影響が大きく、比較的長期の降雨(30日間雨量)の寄与が大きい可能性を指摘した。しかし雨の影響を入れないケースとの比較が行われていないほか、他の地震について分析が行われておらず、一般化できるかどうか明らかではなかった。本論文では、事

前降雨の加重により発生可能性ランクの推計が向上するか否かについても補足的に検証を行った。

3. 精度検証に用いるデータ

3.1 250mメッシュ推計震度分布図

250mメッシュ推計震度分布図(気象庁地震火山部, 2022)は、2023年2月1日から気象業務支援センターを通じてオンライン提供が開始され、2025年1月からSGDASでも地震動の入力データとして使用している。250mメッシュ推計震度分布図の作成では、震源が150km以浅の場合、つまりほとんどの大地震の場合、震度データは緊急地震速報の震源・マグニチュードと司・翠川(1999)の距離減衰式で計算した推計最大速度から変換して求められている。地震動増幅率計算のための地盤データも、250mメッシュ(G空間情報センターの全国震度増分データ; 若松・松岡(2011)の微地形区分を基にしたデータで国土数値情報とは中身が異なる)へ変更されている。図-1は2024年1月1日の能登半島地震の本震のデータであるが、1kmメッシュ推計震度分布図と250mメッシュ推計震度分布図は、震度分布のパターンが異なっていることが分かる。本論文の精度検証では、地震動の入力データとして、新たに、気象庁から提供された既往地震の250mメッシュ推計震度分布図を用いて行うこととした。

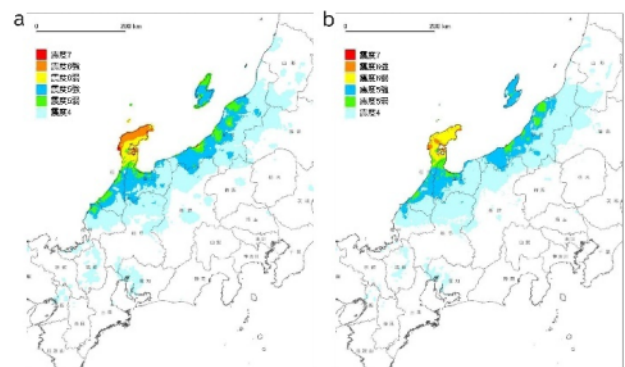


図-1 2024年1月1日の能登半島地震の本震による気象庁の1kmメッシュ推計震度分布図(a)、250mメッシュ推計震度分布図(b)

3.2 斜面崩壊・地すべりの250mメッシュインベントリ

正解データとなる地震時地盤災害の分布図(災害実績図)には、空中写真判読による紙地図から、高解像度の航空レーザ測量DEMによる画像処理図を判読したポリゴンデータまで、様々な規格のデータが存在する。本論文では、岩橋ほか(2022)の手法で、地震時の斜面崩壊・地すべりを、250mメッシュ単位に集計したインベントリを用いた。これは、災害実績図のポリゴンデータについて、50m間隔の

ランダムポイントを、GIS を用いて派生させるとともに、ポリゴン面積が 2,500 m² に満たない場合も 1 点派生させて小型の表層崩壊が多発した地域も考慮し、集計したものである。崩壊地がケバの場合はバッファをポリゴン化して用いる、ポリゴンが流走部・堆積部を含む場合は編集して削除する、凡例として分かれている場合は崩壊部あるいはすべり面を含むと考えられるポリゴンのみ抽出する、などの前処理を必要に応じて行っている。メッシュ内の集計用の点の数、集計用の点があるかないか (existence)、1 km² 当たりの点数 (density) 等を属性として格納した GIS データで、一部はウェブサイト (SGDAS 特研データ公開サイト) から公開している。小さなポリゴンからも 1 点派生させて集計しているため、単純な崩壊面積率より表層崩壊のウェイトが大きくなっていると考えられるが、50 m ごとのサンプリングという操作によって、作成方法や作成者が異なる災害実績図をなるべく比較可能としようとして工夫したものである。各地震の諸元及び災害実績図のソース情報、精度検証に使用する地震動データの種別や、本論文での用途を表-1 に示す。

3.3 ゾーニングマップ及び脆弱地質マップ

現 SGDAS では、シームレス地質図 V1 (産総研地質調査総合センター, 2015) 等を集成・要約した地質データを用いて、脆弱/非脆弱の 2 区分に整理して脆弱地質マップを作成し、修正六甲式による斜面崩壊の発生可能性のかさ上げに使っている (神谷ほか, 2014)。この脆弱地質マップを用いたかさ上げにより、かえって推計精度が下がる事例が見られ、より適切なマップに変更する必要があることが明らかとなっていた (岩橋・遠藤, 2023)。

岩橋ほか (2026) は、地形地質や土壌等、斜面崩壊の危険度やタイプに影響を及ぼすと考えられる因子によって斜面を区分したマップをゾーニングマップと位置付け、作成し、ウェブサイト (SGDAS 特研

データ公開サイト) から公開した。具体的には、日本全国のシームレス地質図 V2 (産総研地質調査総合センター, 2023) を取りまとめて DEM 地形分類図 (Iwahashi, 2025) と組み合わせ、さらに土壌 (テフラ) など近年の地震で見られたプロセスに対応する因子も含めて、地震時の斜面崩壊に対する脆弱性を考慮したゾーニングマップの作成を行った。解像度は、地質データが 20 万分の 1 レベルであることを考慮し、SGDAS の地域特性データの粒度と同じ 250 m メッシュとした。凡例は Zone0~6 の 7 種類である (表-2)。このゾーニングマップを用いて脆弱地質マップを更新することとした。

表-2 に、一般的に斜面崩壊の頻発域である傾斜 15 度~40 度、さらに地震時斜面崩壊が頻発し、なおかつ表-1 のインベントリデータが得られた震度 6 弱の範囲について、ゾーンごとの平均 density を求めて記載した。同条件下では、未固結層 (テフラ含む) の崩壊発生域をイメージした Zone2 及び層状の軟質岩をイメージした Zone4 の崩壊率が非常に高く、Zone0・1・3・5 の崩壊率は中間的で、Zone6 は更にその半分以下の崩壊率であることがわかる。記載は省略するが、表-1 の個別の地震の平均 density については、1995 年兵庫県南部地震 (ほぼ Zone6 のみが急斜面を形成する地域で発生) を除き、Zone6 及びその他のゾーンが分布する地域では全て Zone6 の崩壊率が最低だった。したがって、脆弱/非脆弱に 2 区分する場合、Zone6 と、それ以外で分けることが適当と考えられる。

図-2 は、現 SGDAS で用いられているマップによる脆弱地質範囲と、岩橋ほか (2026) のゾーニングマップのうち Zone6 を非脆弱、その他を脆弱として新たに作成した脆弱地質マップを示したものである。下に 2016 年熊本地震についての拡大図を示す。

表-1 精度検証及びモデル構築に利用した各地震の諸元及び推計震度分布図・災害実績図・地震動データのソース情報
及び本論文での用途（A：ゾーニングマップ方式モデル構築，B：精度検証）

発生年月日	地震名又は気象庁による震央地名※1	最大震度/マグニチュード	地震のタイプ	斜面崩壊・地すべりの災害実績図	インベントリのメッシュ数(崩壊/非崩壊)	地震動データ	用途
2024-01-01	令和6年能登半島地震	7/Mj7.6	内陸断層型・逆断層	吉田(2025)※2	26,748 (9,974/16,774)	250 mメッシュ推計震度分布図(気象業務支援センター配信)	A, B
2018-09-06	平成30年北海道胆振東部地震	7/Mj6.7	内陸断層型・逆断層	山岸・岩橋(2020)※3	11,903 (3,317/8,586)	250 mメッシュ推計震度分布図(気象庁から提供)	A, B
2016-04-16	平成28年熊本地震	7/Mj7.3	内陸断層型・横ずれ断層	Sakai et al. (2022)(カルデラ内)※4, 防災科学技術研究所(2016)(カルデラ外)	80,533 (1,268/79,265)	250 mメッシュ推計震度分布図(気象庁から提供)	A, B
2011-03-12	長野県北部	6強/Mj6.7	内陸断層型・逆断層	国土技術政策総合研究所土砂災害研究部より提供	1,111 (123/988)	気象庁1 kmメッシュ推計震度分布図(気象業務支援センター配信)	A
2011-03-11	平成23年東北地方太平洋沖地震	7/Mj9	海溝型・逆断層	国土技術政策総合研究所土砂災害研究部より提供(栗駒山麓のみ)	6,159 (266/5,893)	1 kmメッシュ推計震度分布図(気象業務支援センター配信)	A
2008-06-14	平成20年岩手・宮城内陸地震	6強/Mj7.2	内陸断層型・逆断層	国土地理院(2009)	7,070 (1,477/5,593)	250 mメッシュ推計震度分布図(気象庁から提供)	A, B
2007-07-16	平成19年新潟県中越沖地震	6強/Mj6.8	内陸断層型・逆断層	国土地理院(2007)	3,886 (122/3,764)	250 mメッシュ推計震度分布図(気象庁から提供)	A, B
2007-03-25	平成19年能登半島地震	6強/Mj6.9	内陸断層型・逆断層	国土技術政策総合研究所土砂災害研究部より提供	4,713 (66/4,647)	250 mメッシュ推計震度分布図(気象庁から提供)	A, B
2004-10-23	平成16年新潟県中越地震	7/Mj6.8	内陸断層型・逆断層	国土地理院(2005)	13,662 (4,052/9,610)	250 mメッシュ推計震度分布図(気象庁から提供)	A, B
1995-01-17	兵庫県南部地震	7/Mj7.3	内陸断層型・横ずれ断層	国土交通省(2013・2014), 国土庁土地局(1999)	2,852 (638/2,214)	USGS Shakemapから換算した震度	A

※1 本論では簡易表記として、西暦で揃えて2007年能登半島地震等と記す。

※2 オルソ空中写真と解像度0.5 mの航空レーザ測量DEMの画像処理図が判読に利用された。

※3 判読は山岸による。空中写真（地理院地図）のほか、北海道水産林務部による発災後の解像度2 mの航空レーザ測量DEMを基にした地貌図(CBZ（株）シン技術コンサル変換・作成）の判読により作成された。

※4 オルソ空中写真と解像度1 mの航空レーザ測量DEMの画像処理図が判読に利用された。なお、2024年能登半島地震・2018年北海道胆振東部地震・2016年熊本地震以外の災害実績図は、基本的に空中写真判読によって作成されたと考えられる。

災害実績図はいずれも岩橋ほか(2022)の手法により250 mメッシュインベントリに集約して使用した。

表-2 ゾーニングマップ（岩橋ほか，2025）の凡例

Zone	概要	地震時斜面崩壊・地すべりの 平均 density※
0	沖積平野・段丘面・沖積扇状地等の緩勾配な領域が過半，なおかつ令和5年度時点の土砂災害特別警戒区域をセル（250 m メッシュ）に含まない斜面	5.8
1	Zone0 同様緩勾配な領域が過半であるが，令和5年度時点の土砂災害特別警戒区域をセルに含む斜面	6.0
2	未固結層による山地・丘陵性山地～丘陵化した段丘，あるいは比較的新期のテフラ起源の土壌が山地・丘陵等にかかる斜面	22.0
3	軟質岩による丘陵化した段丘・開析谷等	4.6
4	層状岩盤の軟質岩による丘陵性山地	12.7
5	塊状岩盤の軟質岩による山地・丘陵性山地（テフラの影響が少ないもの），あるいは層状岩盤の軟質岩による山地	5.2
6	硬質岩・中硬質岩による山地・丘陵性山地および丘陵化した段丘・開析谷等	2.2

※表-1の10地震の250 m メッシュインベントリを用い，傾斜15度～40度・震度6弱の範囲について求めたもの。単位は集計用ポイント数/km²。

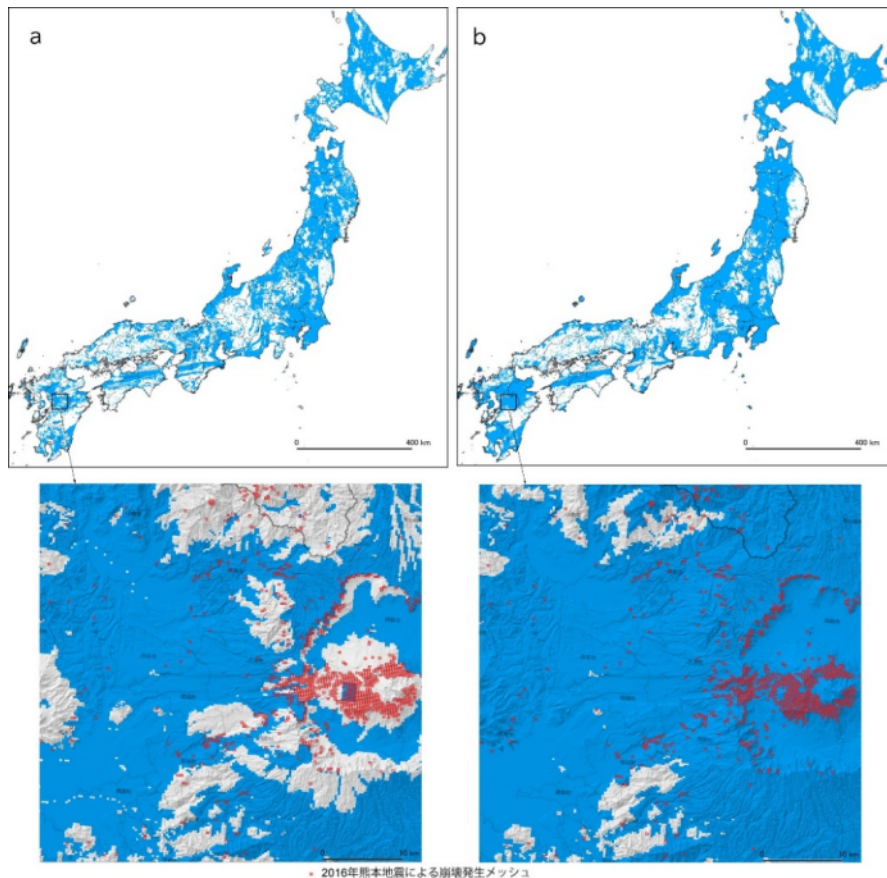


図-2 現 SGDAS で用いられているマップによる脆弱地質範囲（水色）(a)，ゾーニングマップ（岩橋ほか，2026）の Zone6 以外の脆弱地質と区分した範囲(b)(島しょ部は表示省略)．赤は2016年熊本地震で斜面崩壊が発生したメッシュ。

4. ゾーニングマップ方式の開発

図-2で，現 SGDAS の形式に合わせて脆弱/非脆弱に2値化した脆弱地質マップを示したが，4章では，全く新たな手法（B 案）として考案した，ゾーニン

グマップ（岩橋ほか，2026）の各ゾーンに対して斜面崩壊・地すべりの発生可能性ランクを震度/傾斜帯ごとに与える簡易な方法について述べる。

地形・地質のゾーンごとに傾斜と地震動に合わせ

て異なる推計式を当てはめる手法のアイデアには、地震時斜面崩壊における斜面勾配と崩壊面積率の対数値がおおむね比例関係にあることを指摘した内田ほか（2017）・Sakai et al.（2022）、地形・地質の類似する範囲ごとにその係数や切片が変化することを指摘した種平ほか（2023, 2024）、さらに地質ごとに卓越する地震時斜面変動の運動タイプを整理した檜垣ほか（2015）が影響を与えている。ただし、本ゾーニングマップ方式の推計式自体は、マトリックス表を用いるごく簡易化したモデルである。以下に手法を述べる。

4.1 震度階/傾斜帯-崩壊密度の実績値の集計

表-1 で示した 10 ケースの地震について、傾斜、震度分布を用いて、ゾーニングマップのゾーンごとに、既往地震のインベントリ（250 m メッシュ）の density の平均値をセル面積でウェイトを掛けて集計し、全データ及びゾーンごとの震度階/傾斜帯ごとの平均 density の実績表を作成した（表-3）。また、平均 density を対数軸とした折れ線グラフを作成した（図-3）。

震度分布は、基本的には気象庁から提供/配信された 250 m メッシュ推計震度分布図（表-1）を用いたが、被災地域のゾーンに偏りが見られたため、事例を増やすために、1995 年兵庫県南部地震（大半が Zone6 である珍しいケース）のように 250 m メッシュ推計震度分布図がない地震を一部含めている。傾斜は、2 章で述べた再構成 DEM（岩橋・遠藤, 2023）から求めた傾斜角度の 250 m メッシュ平均値であり、内田ほか（2017）に倣い、5 度刻みで集計した。なお一般的には地震動が大きくなるにつれて平均崩壊率は上がっていくと考えられるが、本論文の集計結果では、震度 7 の平均 density が震度 6 強を下回る特徴があった。極端に大きい地震動で斜面崩壊面積率が増大しないという事例は、2004 年新潟県中越地震の PGA のケースでも報告されているが（内田ほか, 2017）、詳細は不明である。本論文では、汎用性を考慮し、震度については震度 6 強・7 をまとめて震度 6 強以上として集計した。

表-3 震度帯/傾斜帯ごとの平均 density の実績表。表-1 の 10 地震の集計。平均 density の単位は 1 km² 当たりの集計用ポイント数 (pt/km²)。傾斜の単位は度。有効なサンプル数は 5 セル以上とした。下線付きはサンプル数 10 未満。

全データ	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-
6 強以上	0.105	1.874	4.311	7.931	14.573	23.232	29.386	29.595	42.519		
6 弱	0.047	0.858	2.571	6.122	13.349	24.640	34.165	33.466	48.436	47.358	17.279
5 強	0.004	0.049	0.168	0.364	0.810	1.414	2.155	1.896	2.976	2.482	9.426
5 弱	0.000	0.020	0.040	0.029	0.077	0.217	0.216	0.282	0.540	0.909	
4 以下	0.000	0.042	0.028	0.061	0.026	0.055	0.115	0.245	0.160		

Zone0	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-
6 強以上	0.084	2.513	7.530	<u>22.705</u>							
6 弱	0.009	1.174	2.852	10.458							
5 強	0.000	0.470	0.000								
5 弱	0.000	0.000	0.000								
4 以下	0.000	0.000	<u>0.000</u>								

Zone1	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-
6 強以上	0.509	3.858	10.782								
6 弱	0.458	0.936	4.450	12.428							
5 強	0.000	0.000	0.000								
5 弱	0.000	0.000	0.000								
4 以下	0.000	0.000	<u>0.000</u>								

Zone2	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-
6 強以上	0.223	2.025	4.955	7.430	13.407	29.227	22.517	6.288			
6 弱	0.067	0.922	3.259	8.900	25.094	41.455	30.750	39.023	77.847	42.563	
5 強	0.036	0.018	0.124	0.316	0.868	1.128	0.953	0.901	1.306	2.776	
5 弱	0.000	0.000	0.111	0.175	0.000	0.000	<u>0.000</u>	<u>0.000</u>			
4 以下	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	<u>0.000</u>				

Zone3	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-
6 強以上	0.000	1.057	3.715	6.390	23.590	40.581					
6 弱	0.125	0.378	1.873	5.956	11.096	24.913	<u>59.483</u>				
5 強	0.000	0.028	0.226	0.564	0.427	1.200	5.662				
5 弱	0.000	0.000	0.023	0.000	0.000	0.000					
4 以下	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000						

Zone4	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-
6 強以上	<u>9.416</u>	3.039	6.108	13.460	22.206	30.021	41.204	34.175			
6 弱	<u>0.000</u>	2.632	4.412	9.987	19.968	30.331	40.918	40.019	46.539		
5 強		0.000	0.196	1.520	2.521	3.323	8.209	5.826			
5 弱		0.000	0.000	0.000	0.146	0.518	0.000				
4 以下			0.000	0.132	0.000	0.058	0.000	<u>0.000</u>			

Zone5	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-
6 強以上	0.000	1.010	2.525	4.936	8.925	18.221	27.120	46.590	85.315		
6 弱	6.089	2.031	2.083	4.049	8.717	20.523	35.080	32.750	38.041	55.453	<u>107.624</u>
5 強	0.000	0.071	0.157	0.229	0.612	1.282	1.959	2.701	5.433	4.070	<u>12.974</u>
5 弱	<u>0.000</u>	0.000	0.000	0.015	0.096	0.229	0.377	0.437	1.349	<u>4.324</u>	
4 以下		<u>0.000</u>	0.000	0.251	0.000	0.098	0.146	0.000	<u>0.000</u>		

Zone6	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-
6 強以上	0.000	0.447	0.837	1.641	6.143	8.790	19.908	19.390	29.290		
6 弱	0.000	0.145	0.612	1.282	2.503	3.176	4.422	11.801	28.698		
5 強	0.000	0.000	0.060	0.000	0.126	0.000	0.156	0.414	0.493	0.000	
5 弱	0.000	0.282	0.094	0.000	0.028	0.176	0.039	0.201	0.356	0.000	
4 以下	<u>0.000</u>	0.140	0.068	0.000	0.037	0.045	0.114	0.284	0.173		

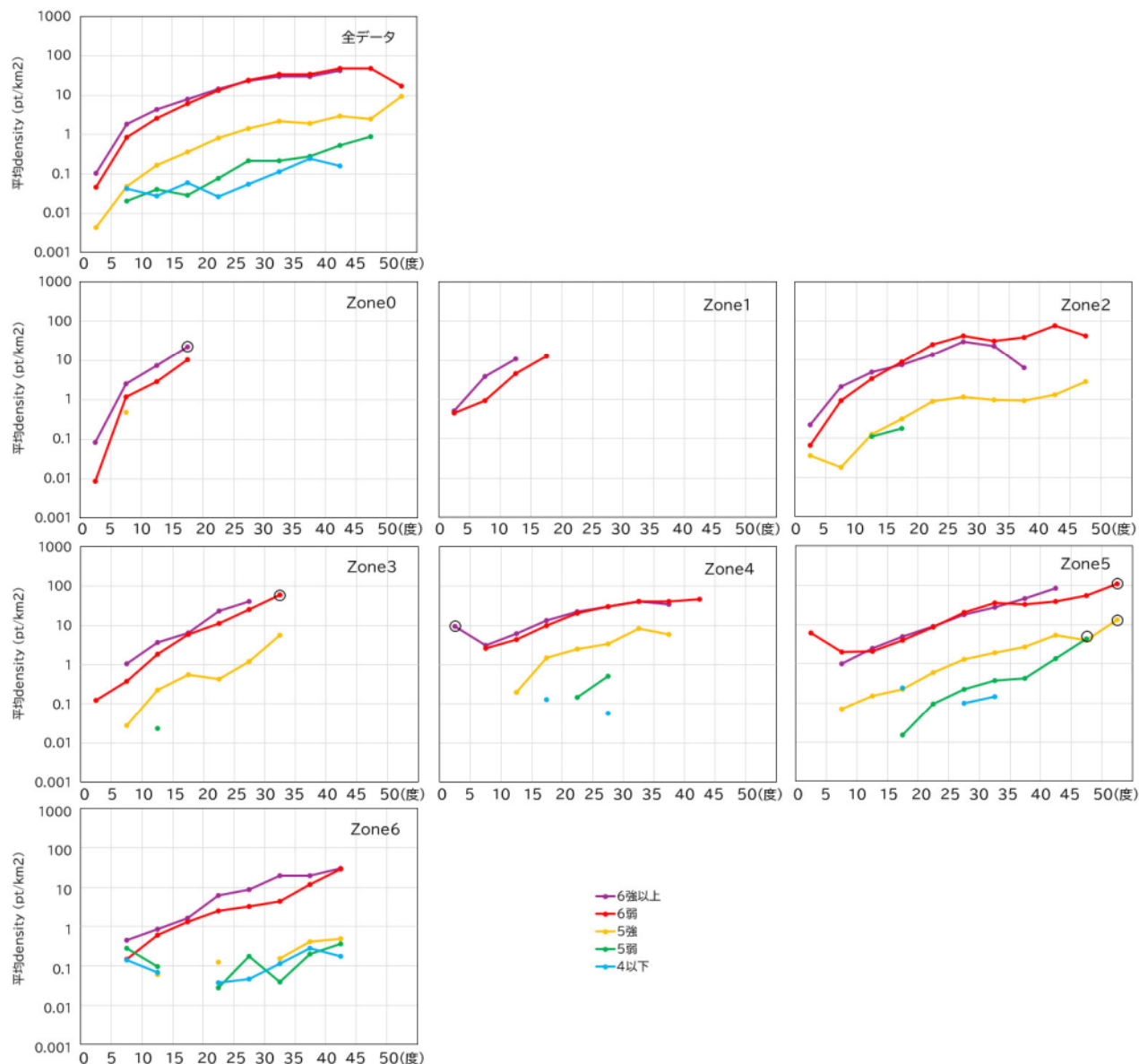


図-3 ゾーンごとの震度階/傾斜帯ごとの平均 density の実績表（表-3）の折れ線グラフ。縦軸は対数目盛のため、平均 density0 の点は表示されていない。有効なサンプル数は5セル以上とした。○で囲んでいる点はサンプル数10未満。

4.2 発生可能性ランクの閾値の決定

地震時斜面崩壊に影響を及ぼす要素は、地下の構造を含めて多岐にわたり、現在全国整備できる説明変数のデータから、崩壊密度そのものを正確に見積もることは困難である。推計結果は、閾値でだまかにランク分けし、地震発生直後の情報の空白を埋めるための定性的な地図として用いることが適当と考えられる。それがSGDASのコンセプトでもある。

そこで density の値から発生可能性ランクを設定するための閾値を求めた。この閾値は、なるべく現SGDASの出力図に似せるため、SGDAS推計結果の各ランク（発生可能性大中小に取りまとめる前の発生可能性ランク1～4及び発生可能性ランク0）に対

する既往地震の平均 density から求めた。将来的な利用を考え、既往地震のデータはインベントリが最新の手法で作成されている2024年能登半島地震の結果（吉田，2025）を用いた。SGDASでの推計には図-2bの新たな脆弱地質マップを用いている。SGDAS推計結果の発生可能性ランクごとの平均 density を求め、近似曲線を描画した（図-4）。2024年能登半島地震の崩壊密度は傾斜を主体とする現SGDASの推計手法に良くフィットしており、近似曲線は指数関数で近似される。発生可能性ランクの中間に相当する density を、平均 density の閾値として採用した。すなわち、発生可能性ランク0は平均 density 2.08 (pt/km²) 未満、発生可能性ランク1は2.08以上5.23

未満, 発生可能性ランク 2 は 5.23 以上 13.16 未満, 発生可能性ランク 3 は 13.16 以上 33.11 未満, 発生可能性ランク 4 は 33.11 以上とした。

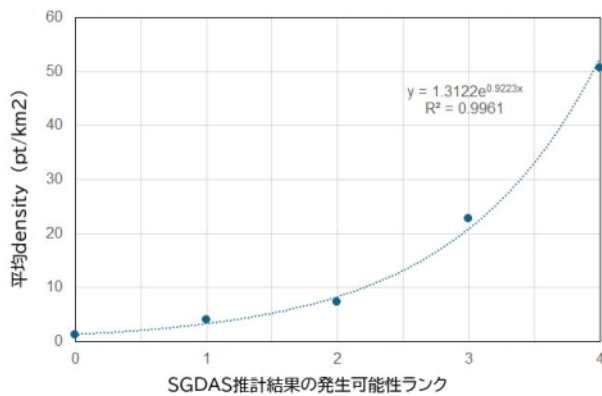


図-4 2024 年能登半島地震の SGDAS 推計結果の発生可能性ランクごとの平均 density. SGDAS 推計結果はゾーニングマップを用いた新しい脆弱地質マップを利用している。平均 density は吉田 (2025) を基にしたインベントリを利用。

4.3 震度階/傾斜帯-発生可能性ランクのマトリックス表の構築

前項で設定した閾値により, 表-3 を震度階/傾斜帯-発生可能性ランクのマトリックス表に変換することができるが, 未来の地震に対して汎用性を高めるため, 空欄を埋めることが必要である。しかし, 僅か 10 地震の統計に基づくため, 表-3 のとおり取得できた平均 density の値は多くない。また, 実績値は, ある程度は平均化されているが, 個別の外れ値の影響は残っている。0~5 度の範囲で例外的に高い平均 density を示す事例 (図-3 の Zone4 の震度 6 強以上, Zone5 の震度 6 弱) は, いずれも, 広い平坦地と狭い急斜面が混在した 1 セルにおいて, 急斜面部分で崩壊が発生したが 250 m メッシュ単位では平均傾斜が低く見積もられた影響である。さらに, 2008 年岩手・宮城内陸地震の荒砥沢周辺の岩盤地すべりのように, 統計的にまれではあるが重要な事象も存在する。モデルの設定については「安全寄りに」という声もある。したがって, モデル作成には空欄を埋め外れ値を補間するための思想が必要である。

マトリックス表作成については, 機械学習による推定 density の集約から手動まで, 様々な手法が考えられる。既往地震の density を可能な限り忠実に再現するには全インベントリデータを用いた機械学習が適当であるが, 限られたケース数や説明変数で学習したモデルが既往地震に良くフィットしたとしても, 未来の地震に適合するか不明である。傾斜・震度の増大に沿って崩壊率が增大していく汎用的なモデル設計とした上で安全寄りに構築することを考慮する

と, いずれにせよ, 手動による調整を行わざるを得ない。そこで本論文では, 集計結果の近似曲線を基に, 震度階ごとに個別に調整する方法を採った。

まず, 何か共通した関数で近似して空欄を埋められるかという点を考察した。内田ほか (2017)・Sakai et al. (2022) は, 地震動/傾斜と崩壊面積率の関係式として指数関数 (logP 式) を提案しているが, 図-3 から, 少なくとも岩盤 (Zone3-6) の震度 6 領域では, 平均 density は外れ値を除き指数関数 (logP 式) に従っている傾向が見られる。一方, 未固結層 (Zone0-2) は, 緩斜面から崩壊率が急上昇し急斜面では頭打ちになる傾向が見られる。合成した全データのグラフでは, 緩斜面で急上昇し, その後一定の指数的な増大をした後, 極急斜面では頭打ちになるという特徴が見られ, 土砂災害分野でもよく取り上げられるロジスティック関数 (Ayalew and Yamagishi, 2005) を想起させる。そこで, ロジスティック関数の一部を各ゾーンで見ている可能性を検討したが, 各ゾーンの連続性が良い震度階を取り出して, 傾斜-density の元データに対し関数フィッティングのアプリ (Easy Fit (Math wave)) を用い調査したところ, ロジスティック関数含め一つの関数への近似を強く示唆する結果は得られなかった。そこで本論文では, 共通した関数は設定せず, 汎用の Excel (Microsoft) で対応している一般的な簡易な関数を集計表に対して個別に試し, それぞれ最も当てはまりが良い近似曲線を用いて空白を埋めることとした。

マトリックス表作成のルールセットは下記のとおりとした。

(1)表-3 で集計データが得られた傾斜帯について

傾斜・震度の増大に沿って崩壊率が增大していくという傾向に従っている限りは, 閾値によって発生可能性ランク (0~4) を決める。ただし, 次の 3 ケースは例外として発生可能性ランクの修正を行う。

- ①連続的にデータがある震度階において, 例外的な値の上下があり, 下位の震度階や傾斜帯より小さい発生可能性ランクとなった場合, あるいは緩斜面で上位の震度階や傾斜帯より大きい発生可能性ランクとなった場合には修正を行う。
- ②発生可能性ランク 1 の閾値の半分 (1.04) 以上の平均 density で, かつサンプル数が 10 以上の場合, 安全寄りとするため, 発生可能性ランクを 0 ではなく 1 とする。さらに, 閾値により発生可能性ランク 0 となる場合でも, 平均 density が 0 ではない枠に限り, まれな重要な事象 (本論文では荒砥沢周辺の岩盤地すべり) が発生したカテゴリについて 1 とする。
- ③集計表の中で上下左右の隣り合う値について, 発生可能性ランクの差が 2 までは許すが, 3 以上と

なる場合は修正するルールとする。これは震度 6 弱と震度 5 強の領域の境界などで、極端に発生可能性ランクが落ちず、グラデーション的に変化するように補正するためである。

(2)表-3 で集計データが得られなかった傾斜帯について

データの無い傾斜帯については、平均 density の近似曲線を自然に延長させるか、上下の震度階から補間的に推定する形で発生可能性ランクを決める。その際、(1)③に従う。近似曲線は、density が 0 のデー

タを除き 4 点以上データがある震度階について、一般的な簡易な関数（累乗，指数，多項式（一次，二次））を用いて作成する。なお，関数近似に当たって，グラフに例外的な値の上下がある場合，平均 density が高い方に振れているケースは，サンプル数が 10 未満のデータ及び緩斜面（0～5 度）は外して考えることとし，低い方に振れているケースは，サンプル数によらず外して考えることとする（信頼度の低いデータに引きずられたり，過小評価となったりしないための操作）。作成した各ゾーンのマトリックス表は表-4 のとおりである。

表-4 震度階/傾斜帯-発生可能性ランクのマトリックス表. 傾斜の単位は度. 灰色の部分は近似曲線等により空白を埋めた部分. 色の付いた文字は上記(1)のルールセットによって補正した発生可能性ランク. 赤字: (1)①, 緑字: (1)②, 桃字: (1)③

[illegible][illegible][illegible]

Zone3	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-
6 強以上	0	1	1	2	3	4	4	4	4	4	4
6 弱	0	0	1	2	2	3	4	4	4	4	4
5 強	0	0	0	0	0	1	2	2	2	3	3
5 弱	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
4 以下	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Zone4	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-
6 強以上	1	1	2	3	3	3	4	4	4	4	4
6 弱	0	1	1	2	3	3	4	4	4	4	4
5 強	0	0	0	1	1	1	2	2	3	3	3
5 弱	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
4 以下	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Zone5	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-
6 強以上	0	1	1	1	2	3	4	4	4	4	4
6 弱	0	1	1	1	2	3	4	4	4	4	4
5 強	0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	2
5 弱	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
4 以下	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Zone6	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-
6 強以上	0	0	0	1	2	2	3	3	3	4	4
6 弱	0	0	0	1	1	1	1	2	3	4	4
5 強	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2
5 弱	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 以下	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5. 事前降雨

気象庁の解析雨量のデータを用いて、表-1 において用途 B と記した 7 地震について地震発生前 3 日・7 日・15 日・30 日間解析雨量の GIS データを作成した。このデータは、気象レーダーとアメダス等の雨量計の観測データを用いて、30 分ごとに解析した 1 時間雨量データである。メッシュサイズは、2004 年中越地震は約 2.5 km、それ以降の地震については約 1 km であり、斜面崩壊・地すべりの 250 m メッシュインベントリより粗いため、インベントリの各セルの中心点の位置の値を共一次内挿補間して用いた。

6. 精度検証

6.1 推計方法の変更による精度の変化

気象庁の 250 m メッシュ推計震度分布図を入力データとして、7 地震（表-1 の用途 B）について精度検証を行った（表-5）。検証の対象は、以下の 5 ケースで推計した斜面災害の発生可能性ランクである。

①現 SGDAS

②①についてゾーニングマップを用いた新しい脆弱地質マップに差し替えて推計したケース

③①について地すべりの推計結果を加算しないケース

④①について地すべりの推計結果を加算せず、さら

に新しい脆弱地質マップに差し替えて推計したケース

⑤ゾーニングマップ方式

指標としては、岩橋・遠藤(2023)で用いた ROC-AUC と PR-AUC, Spearman の順位相関係数 (Rs) を用いた。ROC-AUC と PR-AUC は機械学習分野で画像分類の精度評価に一般的に用いられる指標であり、True (崩壊セル) と False (非崩壊セル) の空間分布を示す正解画像と、True の確率に関する推計結果の空間分布について、セルごとに比較して当たり具合を算出するものである (Davis and Goadrich, 2006)。本論文の場合、インベントリの existence と発生可能性ランクを用いて算出し、ROC-AUC は崩壊/非崩壊セル双方の当たり具合、PR-AUC は崩壊セルのみの当たり具合を示す。なお岩橋・遠藤(2023)では、斜面災害の推計結果の AUC の算出に、発生可能性ランクにまとめる前の生の危険度計算値を用いたが、今回は、ゾーニングマップ方式の結果と比較するため、いずれも発生可能性ランク 0~4 の 5 段階のデータを用いて算出した。Spearman の順位相関係数 (Rs) は、予測値と正解値の相関について増分が線形であるかどうかに関わらず診断するノンパラメトリックな指標であり (Spearman, 1904)、個別セルについて、インベントリの density の増加に従って発生可能性ランクが増加しているかどうかを検証できる。前述のとおり現在全国整備できる説明変数のデータから density を正確に見積もることは困難であるが、多寡の相関が高いことによって発生可能性大中小のパターンがより現実的になると考えられるため、この指標を評価に加えることとした。

ROC-AUC はランダム (でたらめ) な予測の場合 0.5 となり、1 に近いほどモデルの予測性能が良く、

一般的には 0.7 以上で良好、0.8 以上であれば精度が高いとされる。ROC-AUC は不均衡なデータ (本論文の場合は崩壊セルの割合が極端に低いデータ) では値の信頼性が低くなることが知られているため、崩壊セルが 1,000 以上の地震のみ算出した。PR-AUC は正解データの True の比率 (ベースライン (BL)) と比較して評価する数値であり、ランダムな予測の場合 BL となり、BL を大きく上回るほど良好とされる。崩壊の発生可能性が高いセルの見落としに着目できる重要な指標である。なお崩壊セルの比率には約 1%~60%までのばらつきがあるため、本論文では、BL の何倍かを調べ、改善案の良否の比較に用いることとした。相関係数については、検定が有意か否かとその水準によって、発生可能性ランクと density の相関の有無を検証することができる。一般的には 1%水準で有意であれば相関が確実といえる。本論文では他に、発生可能性ランクごとの平均 density の棒グラフも作成して表-5 に添えた。棒グラフの解釈は参考情報ではあるが、発生可能性ランクが大きくなるほど明確に上昇し、サンプルサイズが十分に大きい事例ではエラーバー (95%信頼区間) が重ならないことが良い分類の条件と考えられる。

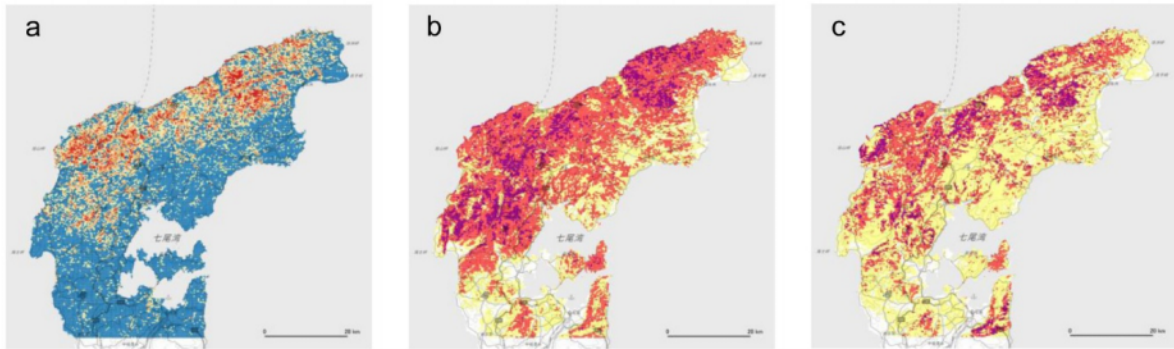
図-5 は、2024 年能登半島地震、2018 年北海道胆振東部地震、2016 年熊本地震、2008 年岩手・宮城内陸地震、2004 年新潟県中越地震について、インベントリの範囲の斜面崩壊・地すべりの density の分布図、及び現 SGDAS による出力図 (①) とゾーニングマップ方式による出力図 (⑤) を、SGDAS のレポートに合わせて発生可能性大 (ランク 4)・中 (ランク 3)・小 (ランク 2・1) で色分けして地図表示したものである。

表-5 現 SGDAS (①) 及び条件を変えた推計結果 (②~④)、ゾーニングマップ方式 (⑤) による推計結果の精度検証。各指標の最大値右側に●を表示。PR-AUCにはBL (崩壊セル数の割合) の何倍であるかカッコ内に記している。Spearman の順位相関係数 (Rs) が 1%水準で有意なものは**、5%水準で有意なものは*を記している。

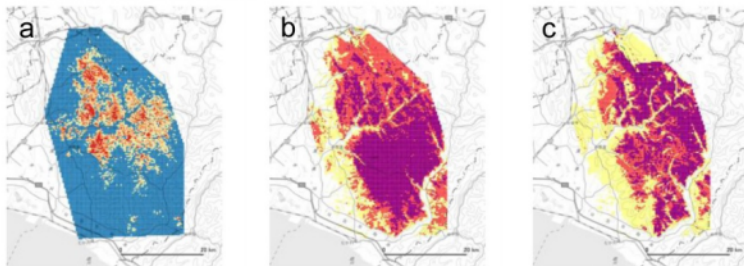
地震名	①現SGDAS	②(①の脆弱地質マップ差し替え)	③(①の地すべり推計を削除)	④(①の地すべり推計を削除+脆弱地質マップ差し替え)	⑤ゾーニングマップ方式
2024年 能登半島地震	ROC-AUC=0.75 PR-AUC=0.636 (BL x 1.71) Rs=0.463** 	ROC-AUC=0.75 PR-AUC=0.643 (BL x 1.72) Rs=0.475** 	ROC-AUC=0.75 PR-AUC=0.638 (BL x 1.71) Rs=0.460** 	ROC-AUC=0.75 PR-AUC=0.646 (BL x 1.73) Rs=0.476** 	ROC-AUC=0.77 ● PR-AUC=0.653 (BL x 1.75) ● Rs=0.497** ●
2018年 北海道胆振東部地震	ROC-AUC=0.76 PR-AUC=0.465 (BL x 1.67) Rs=0.408** 	ROC-AUC=0.76 PR-AUC=0.465 (BL x 1.67) Rs=0.409** 	ROC-AUC=0.76 PR-AUC=0.465 (BL x 1.67) Rs=0.408** 	ROC-AUC=0.75 PR-AUC=0.465 (BL x 1.67) Rs=0.409** 	ROC-AUC=0.77 ● PR-AUC=0.487 (BL x 1.75) ● Rs=0.434** ●
2016年 熊本地震	ROC-AUC=0.83 PR-AUC=0.078 (BL x 4.88) Rs=0.168** 	ROC-AUC=0.86 ● PR-AUC=0.155 (BL x 9.69) Rs=0.182** 	ROC-AUC=0.83 PR-AUC=0.080 (BL x 5.00) Rs=0.169** 	ROC-AUC=0.86 ● PR-AUC=0.157 (BL x 9.81) Rs=0.183** 	ROC-AUC=0.86 ● PR-AUC=0.218 (BL x 13.63) ● Rs=0.184** ●

2008 年 岩手・ 宮城内 陸地震	ROC-AUC=0.75 PR-AUC=0.399 (BL x 1.91) RS=0.365**	ROC-AUC=0.73 PR-AUC=0.371 (BL x 1.78) RS=0.340**	ROC-AUC=0.78 PR-AUC=0.467 (BL x 2.23) RS=0.408**	ROC-AUC=0.75 PR-AUC=0.395 (BL x 1.89) RS=0.361**	ROC-AUC=0.76 PR-AUC=0.502 (BL x 2.40) RS=0.391**
2007 年 新潟県 中越沖 地震	PR-AUC=0.067 (BL x 2.16) RS=0.121**	PR-AUC=0.064 (BL x 2.06) RS=0.117**	PR-AUC=0.066 (BL x 2.13) RS=0.121**	PR-AUC=0.062 (BL x 2.00) RS=0.115**	PR-AUC=0.083 (BL x 2.68) RS=0.134**
2007 年 能登半 島地震	PR-AUC=0.010 (BL x 0.71) RS= -0.033*	PR-AUC=0.017 (BL x 1.21) RS= 0.025	PR-AUC=0.011 (BL x 0.79) RS= -0.026	PR-AUC=0.018 (BL x 1.29) RS=0.034*	PR-AUC=0.030 (BL x 2.14) RS=0.054**
2004 年 新潟県 中越地 震	ROC-AUC=0.80 PR-AUC=0.587 (BL x 1.98) RS=0.498**	ROC-AUC=0.81 PR-AUC=0.593 (BL x 2.00) RS=0.513**	ROC-AUC=0.80 PR-AUC=0.584 (BL x 1.97) RS=0.492**	ROC-AUC=0.81 PR-AUC=0.595 (BL x 2.00) RS=0.514**	ROC-AUC=0.80 PR-AUC=0.566 (BL x 1.91) RS=0.493**

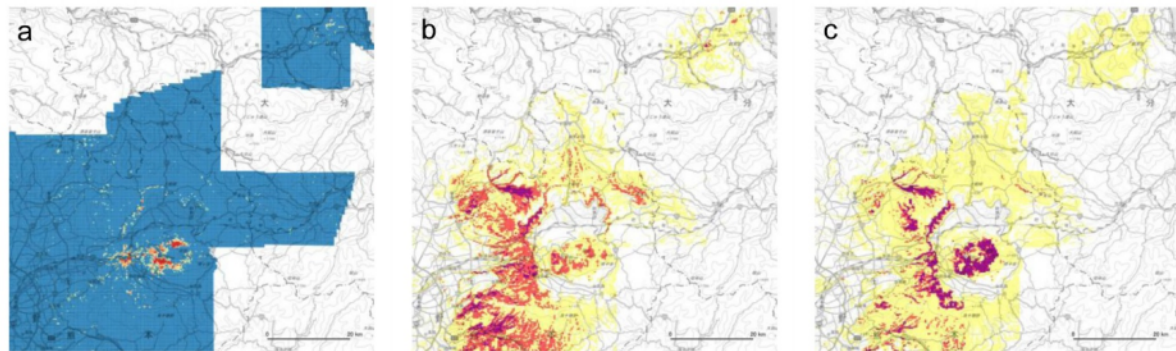
2024年能登半島地震



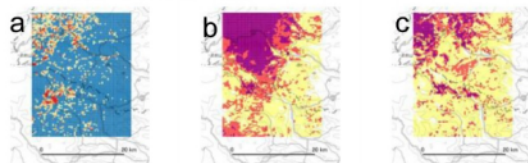
2018年北海道胆振東部地震



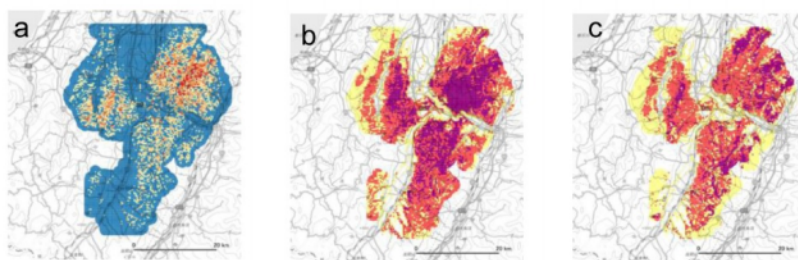
2016年熊本地震（インベントリの主要部のみ表示）



2008年岩手・宮城内陸地震

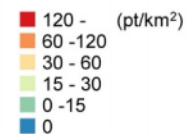


2004年新潟県中越地震



凡例

a. 斜面崩壊・地すべり
インベントリ(正解データ)



b. 令和8年5月現在運用中の
SGDASによる推計結果

c. ゾーニングマップ方式に
よる推計結果

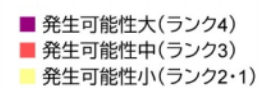


図-5 各地震における斜面崩壊・地すべりの density 及び推計結果. インベントリのソースデータは表-1 に記載.

6.2 事前降雨量の影響の加算による精度の変化

先行降雨の影響の有無を調べるため、5 章のとおり 7 地震について地震発生前 3 日・7 日・15 日・30 日間降雨量の GIS データを作成した。インベントリ領域内の降雨量の最小値、最大値、平均値は表-6 に記載した。

事前降雨と地震時斜面崩壊・地すべりの定量的な関係は、地形地質はじめ他にも影響する因子が交錯することと、ケースが少ないためまだ分かっていない。本論文では、降水量のデータを重み付けに使う

ことによって発生可能性ランクの相関係数 (Rs) が向上するか否かを調べることにした。発生可能性ランクは、どの地震についても比較的良好な結果を示しているゾーニングマップ方式を用いた。ゾーニングマップ方式の発生可能性ランク (0~4) に降雨量を乗算し、その結果と density との Rs を算出した (表-6)。雨量を加えない Rs (表-5) についても参考に記載した。

表-6 解析雨量の概要と発生可能性ランクに解析雨量で加重したデータによる相関係数。解析雨量はメッシュデータから内挿補間した値。Spearman の順位相関係数 (Rs) が 1%水準で有意なものは**、5%水準で有意なものは*を記している。Rs の最大値右側に●を表示。

地震名	3 日間雨量 最小-最大 (平均) (mm) 加重 Rs	7 日間雨量 最小-最大 (平均) (mm) 加重 Rs	15 日間雨量 最小-最大 (平均) (mm) 加重 Rs	30 日間雨量 最小-最大 (平均) (mm) 加重 Rs	雨量を加えない Rs
2024 年能登半島地震	23 - 55 (37) 0.510**	41 - 87 (61) 0.515**	153 - 327 (208) 0.539** ●	276 - 509 (362) 0.537**	0.497**
2018 年北海道胆振東部地震	15 - 77 (23) 0.454**	26 - 95 (43) 0.458**	64 - 192 (99) 0.473** ●	191 - 373 (256) 0.471**	0.434**
2016 年熊本地震	0 - 21 (6) 0.178**	1 - 24 (7) 0.180**	48 - 156 (82) 0.189** ●	71 - 202 (112) 0.189** ●	0.184**
2008 年岩手・宮城内陸地震	0 - 7 (1) 0.309**	0 - 27 (5) 0.102**	43 - 118 (84) 0.345**	156 - 584 (206) 0.396** ●	0.391**
2007 年新潟県中越沖地震	24 - 40 (29) 0.143** ●	54 - 90 (68) 0.136**	77 - 133 (101) 0.137**	253 - 405 (321) 0.128**	0.134**
2007 年能登半島地震	18 - 49 (33) -0.002	28 - 63 (47) 0.016	51 - 92 (73) 0.018	94 - 149 (123) 0.020	0.054** ●
2004 年新潟県中越地震	43 - 101 (69) 0.453**	86 - 168 (124) 0.468**	163 - 273 (207) 0.476**	277 - 467 (334) 0.485**	0.493** ●

7. 考察

7.1 現 SGDAS 及びその設定変更版 (A 案) の比較

現 SGDAS の出力 (表-5 ①) 及びその設定変更版 (表-5 ②~④) の比較であるが、まず脆弱地質マップの差し替えの効果 (①と②の比較) は、指標を総合的に見て 5 地震でプラスとなっており、全体として効果が高いと考えられる。例外は 2008 年岩手・宮城内陸地震と 2007 年中越沖地震であった。一方、地すべりの推計結果を外す効果 (①と③の比較) は、2008 年岩手・宮城内陸地震の結果で明らかにプラスとなっている以外は曖昧なものとなっており、2007 年新潟県中越沖地震のように少しマイナスになっているケースも見られ、1 km メッシュ推計震度分布図を利用した検証結果 (岩橋・遠藤, 2023) とは異なる結果となった。脆弱地質マップの差し替えに合わせて地すべりの推計を外したケース (①と④の比較)

は、脆弱地質マップの差し替えの効果を主に反映した結果となっている。

2008 年岩手・宮城内陸地震の結果で脆弱地質マップの差し替えが逆効果となっている理由は、次のとおりである。当該インベントリの範囲内は Zone6 の分布が僅かであり、新たな脆弱地質マップでは、ほとんどの領域が「脆弱」となる。一方、現在の脆弱地質マップでは、中新世の大規模火砕流の台地を中心に半分程度が「非脆弱」となっているが、その領域に荒砥沢地区のような大規模な岩盤地すべりがたまたま含まれないため、density の濃淡パターンをより良く反映しているように見える。このことが、差し替えが逆効果となった原因と考えられる。2007 年新潟県中越沖地震は被災範囲が狭く、崩壊地は海岸沿いの極急斜面に多く分布しており、新旧脆弱地質マップの変化の影響があるセルでの崩壊が元々僅か

である。

したがって、大規模な岩盤地すべりを主体としない一般的な事例では、脆弱地質マップの差し替えは精度向上の効果があると考えられる。一方、地すべりの推計スキームを外す効果は明瞭ではない。

7.2 現 SGDAS とゾーニングマップ方式 (B 案) の比較

ゾーニングマップ方式は、単純な統計モデルではないものの、集計表が土台であり、検証対象の地震も素材にモデルを構築している。したがって、サンプル数が多い地震については精度が高く出ると予想される。ただし、個別の地震時崩壊の統計結果そのものではなく 10 地震の結果を平均化しているほか、集計表の空白部は大まかな近似曲線を用いて発生可能性ランクを推定している。また、ルールセットを基に、汎用性を確保しつつ安全側となるよう考慮して補正したマトリックス表を用いているため、指標値が低下するはずである。しかし、検証した 7 地震の大半について、おおむね良好な結果を返しており、ゾーニングマップ方式が最良ではないケースでも最適例との精度の差は小さい。土壌図でカバーできていないテフラ層すべりの発生可能性範囲（実際は起きなかったケースを含め）や、大規模な岩盤地すべりの推計に弱さがあるが、崩壊サンプル数の少ない 2007 年能登半島地震・新潟県中越沖地震を除いて ROC-AUC が 0.8 前後となっているほか、全例で R_s が 1%水準で有意となっており、総合的に見て汎用性があるモデルと言えよう。図-5 の解釈は定性的な印象になるが、正解データが 0 pt/km^2 以外の部分と、発生可能性大・中の比較から、ゾーニングマップ方式は、現在運用中の SGDAS による推計結果と比較して、全体的に、発生可能性ランク大・中の領域について過大評価を軽減していることがわかる。

ゾーニングマップ方式の長所として、セルごとの場合分けであるため、システムに依存せず、震度分布図・ゾーニングマップ・傾斜の GIS データがあれば、汎用 GIS 等でも容易に推計が可能であることが挙げられる。これはシミュレーション利用が容易になることを示している。また、推計モデルすなわちマトリックス表の更新も容易である。

残された課題として、「統計的にはまれで、さらに現在全国的に得られるマップでは発生領域を絞り込めないが、重要な事象」の取り扱いがある。本論文では、2008 年岩手・宮城内陸地震の大規模な岩盤地すべりの発生実績に沿って、表-4 の Zone5・震度 5 強・傾斜 15~25 度の枠を、本来の発生可能性ランク 0 ではなく 1 としている。そのため 2016 年熊本地震など一部のケースで発生可能性小（ランク 1・2）と図示される領域が大幅に増えている。これは、発生

可能性ランク 0 をどの程度まで安全寄りに考えるのかという思想の問題とも言えるが、将来的には、研究の進展によるゾーニングマップの改良によって、発生領域の絞り込みが改善される可能性もある。

7.3 事前降雨量による重み付けの影響について

ゾーニングマップ方式による推計結果について、解析雨量により加重した発生可能性ランクと density の相関係数 (R_s) を、雨量を加えないものと比較した (表-6)。解析雨量の加重により発生可能性の推計結果が向上するケースもあるが、向上しないケースも見られた。解析雨量を加えたことにより向上している事例では、崩壊セルのサンプル数が少ない 2007 年新潟県中越沖地震を除くと、3 日間又は 7 日間雨量より、15 日間又は 30 日間雨量の加重により R_s の上昇が見られる。

2004 年新潟県中越地震について解析した Endo and Iwahashi (2024) は、先行降雨の寄与が限定的である可能性があること、大規模な崩壊や地すべりには比較的長期の先行降雨 (30 日間降雨) がより寄与する可能性があることを指摘しているが、本論文の結果と調和的な傾向を示しているといえる。しかしその程度は、2024 年能登半島地震・2018 年北海道胆振東部地震を除き、僅かである。2004 年新潟県中越沖地震の事例においては、雨量日数の増加に従い R_s の増大が見られるが、事前降雨を加えないケースを上回るほどの効果ではなかった。また、テフラの分布する斜面での崩壊は必ずしも先行降雨の多寡と対応しないという指摘もあり (千木良, 2023)、 R_s の比較的大きな向上が見られた 2 地震の事例のみをもって、先行降雨の影響が有意であると判断することは困難である。総合すると、現時点では、改修コストと天秤にかけて、事前降雨を重み付けとして取り入れるほどの明確なモチベーションは得られなかった。

8. 補遺：機械学習による推計の可能性

ゾーニングマップ方式による推計では、5 度刻みの傾斜や震度階ごとの平均値を使ってモデルを作成した。Iwahashi and Endo (2026) は、ランダムフォレスト (Breiman, 2001) を用いて、ゾーニングマップ・傾斜 (1 度単位)・震度階に変換される前の計測震度 (二桁のデータ) から density を予測するモデルを試作した。ランダムフォレストとは決定木とアンサンブル学習を組み合わせた機械学習で、斜面崩壊の予測によく使われている (Ado et al., 2022)。しかし density そのものを正確に予測する性能は現状得られる説明変数ではなく、閾値によってランク分けし定性的な説明を加えることが適当であることは変わらない。マトリックス表の作成に機械学習モデルを利用することも可能であるが、学習データの前処理

を行わない場合、4.3 で述べたように、モデルには「傾斜・震度の増大に伴って崩壊率が増大していく」という傾向に合わない学習データも含まれ、そのまま反映されることになる。

機械学習の Python コーディングは、ユーザの多さから生成 AI と相性が良く、入出力データの仕様や分析の方向性を作文すれば、対話式でコーディング・予測・精度検証等が可能で、試行の敷居は非常に低くなっている。しかし本事例の場合、従来のモデリング同様、正解データ（インベントリ）の足りないケース数や、限られた説明変数（受け盤・流れ盤、地震動の特徴、正確な土層厚等は含まれない）を基にした推計であること等を考慮し、限界を認識することが必要である。

9. まとめ

地震時地盤災害推計装置（SGDAS）の斜面災害発生可能性推計手法の改良を目的として、A）現在の SGDAS の推計手法を保持した上で静的データを変更する案、B）全く新しい斜面崩壊推計手法に変更する案の 2 案について検討した。

A 案では、地震時の斜面崩壊に対する脆弱性を考慮したゾーニングマップ（岩橋ほか、2026）に基づく新たな脆弱地質マップ（図-2b）への差替えが精度を向上させることが示唆された。なお、岩橋・遠藤（2023）で検討された地すべり推計スキームの削除は、250 m メッシュ推計震度分布図を用いた検証結果からは明確な改善が見られなかった。

B 案として、ゾーニングマップのゾーンごとに震

度階/傾斜帯-発生可能性ランクのマトリックス表を設定し推定するゾーニングマップ方式を開発した。現在の推計手法とは全く異なり、システム依存性のない簡便な方式である。検証した地震でおおむね良好な結果を返しており、ゾーニングマップ方式を実装したシステムを令和 7 年度に別途構築した。なおゾーニングマップ・傾斜マップ・マトリックス表はプログラム外に置いて参照する形であり、ゾーニングマップの凡例数、傾斜の刻み、マトリックス表の行数・列数は、本論文のものよりも更に細かい場合分けであっても動作するように設計している。将来的な B 案の実装時期については今後、検討を進めていく。

その他、事前降雨の重み付けの導入の効果には、地震ごとにばらつきがあり、明確な結論が得られなかった。

謝辞

本論文で精度検証に利用したデータについて、表-1 のとおり、気象庁から 250 m メッシュ推計震度分布図の提供を受けた。国土技術政策総合研究所土砂災害研究部から一部の崩壊地のポリゴンデータの提供を受けたほか、地震動/傾斜ごとの崩壊率についてご示唆いただいた。ゾーニングマップ方式の基盤となったゾーニングマップの共著者である産業技術総合研究所地質調査総合センターの川畑大作氏・宮地良典氏、明治大学の佐々木夏来氏との議論が本論文についても参考になった。ここで厚く御礼申し上げます。

（公開日：令和 8 年 9 月 9 日）

参 考 文 献

- Ado, M., Amitab, K., Maji, A. K., Jasińska, E., Gono, R., Leonowicz, Z., and Jasiński, M. (2022) : Landslide Susceptibility Mapping Using Machine Learning: A Literature Survey, *Remote Sensing*, 14(13), 3029. doi:10.3390/rs14133029
- Ayalew, L., Yamagishi, H. (2005) : The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, Volume 65, Issue 1-2, 5-31. doi:10.1016/j.geomorph.2004.06.010
- 防災科学技術研究所 (2016) : 熊本地震による土砂移動分布図 (2016.6.27 更新), <https://www.bosai.go.jp/mizu/dosha.html> (accessed 9 February 2023).
- Breiman, L. (2001) : Random Forests, *Machine Learning*, 45, 5-32. doi:10.1023/A:1010933404324
- 千木良雅弘 (2023) : 震生湖を作った地すべりとその他のテフラの地震時地すべり, 地盤工学会災害調査論文報告集, 1 (2), 276-284. doi:10.11512/jgsdr.1.2_276
- Davis, J., Goadrich, M. (2006) : The relationship between Precision-Recall and ROC curves, *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning*, June 2006, 233-240. doi:10.1145/1143844.1143874
- Endo, R., Iwahashi, J. (2024) : Estimation of Effect of Antecedent Rainfall on Coseismic Landslides, *Natural Geo-Disasters and Resiliency (IC-CREST 2023)*, *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 445, 301-311. doi:10.1007/978-981-99-9223-2_26
- 檜垣大助, 林一成, 濱崎英作, (公社) 日本地すべり学会河川砂防技術研究開発実施チーム, 蒲原潤一 (2015) : 日本地すべり学会による国土交通省河川砂防技術研究開発課題の実施—地震による斜面変動発生危険地域評価手法の開発—. *日本地すべり学会誌*, 52 (2), 37-44. doi: 10.3313/jls.52.85
- 岩橋純子, 遠藤涼, 中埜貴元 (2022) 過去の地震時地盤災害発生箇所の 4 分の 1 地域メッシュデータ化. *国土地理院時報*, 135, 69-74. doi:10.57499/JOURNAL_135_06
- 岩橋純子, 遠藤涼 (2023) : 地震時地盤災害推計装置 (SGDAS) の推計結果の定量的検証について. *国土地理院時報*, 136, 33-43. doi:10.57499/JOURNAL_136_03
- Iwahashi, J. (2025) : Depth to bedrock in Japan: insights from borehole data and terrain analysis using digital elevation models. *Prog Earth Planet Sci* 12, 23. doi:10.1186/s40645-025-00698-3
- 岩橋純子, 川畑大作, 宮地良典, 佐々木夏来, 遠藤涼 (2026) : 地震時の斜面崩壊に対する脆弱性を考慮したゾーニングマップの構築, *日本地すべり学会誌*, 63 (3), 127-137. doi: 10.3313/jls.63.127
- Iwahashi, J., Endo, R. (2026) : Evaluation of a Random Forest model for co-seismic landslide susceptibility prediction using a topographic-geologic zoning map. *INTERPRAEVENT 2026* (in press).
- 亀谷裕志, 金井哲男, Jianliang DENG, 堤千花, 古関潤一 (2010) : 地震時の自然斜面崩壊に関する調査と解析—中越地震の 2 つの斜面崩壊を例として—, *応用地質*, 51 (1), 19-30. doi: 10.5110/jjseg.51.19
- 神谷泉, 乙井康成, 中埜貴元, 小荒井衛 (2012) : 地震による斜面崩壊危険度評価判別式「六甲式」の改良と実時間運用, *写真測量とリモートセンシング*, 51 (6), 381-386. doi: 10.4287/jsprs.51.381
- 神谷泉, 小荒井衛, 乙井康成, 中埜貴元 (2014) : 地震時地盤被害予想システムの構築, *国土地理院時報*, 126, 61-66. doi: 10.57499/JOURNAL_126_10
- 気象庁地震火山部 (2004) : 配信資料に関する技術情報 (地震火山編) 第 172 号, 平成 16 年 10 月 1 日, 17p.
- 気象庁地震火山部 (2022) : 配信資料に関する技術情報第 591 号, 令和 4 年 7 月 15 日 (令和 4 年 11 月 10 日訂正), 17p.
- 国土庁土地局 (1999) : 阪神・淡路地域地形変動図 1:50,000 (平成 11 年 3 月).
- 国土地理院 (2005) : 平成 16 年新潟県中越地震 1:25,000 災害状況図, 国土地理院技術資料 D-1 No.451.
- 国土地理院 (2007) : 平成 19 年 (2007 年) 新潟県中越沖地震 情報集約マップ, <https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H19-nigata-index.html> (accessed 9 February 2023).
- 国土地理院 (2009) : 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震 1:25,000 詳細活断層図 (活断層・地形分類及び地形の変状), 国土地理院技術資料 D-1 No.541.
- 国土地理院 (2026) : SGDAS 特研データ公開サイト, https://gisstar.gsi.go.jp/research_SGDAS/ (accessed 17 Jun. 2026).
- 国土交通省 (2013) : 土地分類基本調査図 (土地履歴調査) 災害履歴図 (地震災害その 2) 1:50,000 「大阪西北

部」。

国土交通省 (2014) : 土地分類基本調査図 (土地履歴調査) 災害履歴図 (地震災害その 2) 1:50,000 「神戸・明石」。

森川信之, 神野達夫, 成田章, 藤原広行, 福島美光 (2010) : 近年の強震動記録に基づく計測震度の距離減衰式, 北海道大学地球物理学研究報告, 73, 149–158. doi: 10.14943/gbhu.73.149

Sakai, Y., Uchida, T., Hirata, I., Tanehira, K., Fujiwara, Y. (2022) : Interrelated impacts of seismic ground motion and topography on coseismic landslide occurrence using high-resolution displacement SAR data, Landslides. doi:10.1007/s10346-022-01909-4

産総研地質調査総合センター (2015) : 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V1, <https://gbank.gsj.jp/seamless/v1/download.html> (accessed 9 February 2023).

産総研地質調査総合センター (2023) : 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2, オリジナル版(地質図更新日: 2023 年 5 月 11 日), <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (accessed 22 May 2023).

Spearman, C. (1904) : The proof and measurement of association between two things, The American Journal of Psychology, 15(1), 72–101. doi:10.2307/1412159

種平一成, 後根裕樹, 田中健貴, 山越隆雄, 西脇彩人 (2024) : 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, 126p.

種平一成, 坂井佑介, 山越隆雄 (2023) : 地震時土砂移動の発生場及び発生規模の広域的・定量的評価に関する研究—地形・地質の類似性を考慮した評価制度と他地域への適用性の向上—, 砂防学会誌, 76 (4), 3–14. doi: 10.11475/sabo.76.4_3

司宏俊, 翠川三郎 (1999) : 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 64 (523), 63–70. doi:10.3130/aijs.64.63_2

内田太郎, 桜井亘, 松田昌之, 高山陶子, 田中健貴 (2017) : 地震による斜面崩壊危険度評価手法について, 防災科学技術研究所研究資料, 411, 119–122.

若松加寿江, 松岡昌志 (2011) : 世界測地系に準拠した地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築, 日本地震工学会大会-2011 梗概集, 84–85.

山岸宏光, 岩橋純子 (2020) : 地震による斜面災害の GIS を用いた地形・地質解析, in 地震による地すべり災害 — 2018 年北海道胆振東部地震, 「地震による地すべり災害」刊行委員会編, 北海道大学出版会, 370p.

吉田一希 (2025) : DEM 地形判読・PIV 解析による令和 6 年能登半島地震に伴う地表変状分布図データ, 国土地理院地理地殻活動研究センター公開データウェブサイト. doi:10.57499/RESEARCH_2025_082