

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

Quantitative Verification of Estimation Results of the Seismic Ground Disaster Assessment System (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, ENDO Ryo

要 旨

地震時地盤災害推計装置 (SGDAS) における斜面崩壊・地すべり、液状化の危険度推計結果について、過去の地震時地盤災害発生箇所のメッシュデータを用いて定量的検証を行い、推計精度向上に向けた要件の整理を行った。

1. はじめに

国土地理院では2010～2012年度の特別研究で地震時地盤災害推計装置 (SGDAS) を開発し、2013年から試験運用、2019年6月から運用している。SGDASは、気象庁の推計震度分布図（震度5以上の地震発生から概ね15分以内に配信）と地形・地質等の地理的特性から、地盤災害の発生地域と発生可能性を1～2分で自動的に推計して公的機関の災害対応関係者に配信している。推計結果は、稀な巨大地震を除き概ね250～500m程度の地域メッシュ（「統計に用いる標準地域メッシュ及び標準地域メッシュ・コード（昭和48年行政管理庁告示第143号）」で定められた基準地域メッシュ）に対応したグリッドサイズで作成され（神谷ほか、2012）、PDFのレポートに取りまとめている。

現SGDASは2012年頃までの知見・データで開発され、平成28年（2016年）熊本地震（本論では簡易表記として以後、他の地震名称についても西暦で揃えて「2016年熊本地震」等と記す。）の検証例（中埜・大野、2018）では斜面崩壊の過大評価や液状化の推計漏れが見られることが分かっている。そのため地理地殻活動研究センターでは、SGDASの推計精度向上のための研究開発を行うことで、大地震発生時における初動対応に必要な情報をさらに高精度化することを目的として「SGDASの推計精度向上に関する研究（2021～2025年度）」を実施している。精度向上には、まず、現SGDASの推計性能の定量的な検証が必要であるが、最大震度6弱程度までの多くの地震では、認知された地盤災害の発生件数が少ないため統計的な検証が難しく、従来、発生箇所と推計結果のマップの目視比較による定性的評価や、災害発生件数の多いごく一部の地震で危険度ランク毎の統計を取るに留まっていた（神谷、2013；中埜・大野、2018）。その後、SGDAS運用前を含む様々な地震

で起きた斜面崩壊・地すべり・液状化について、それらの位置を記載した正解データとなるInventory Map（以下「インベントリ」という。）を、SGDASの推計グリッドサイズに合わせて4分の1地域メッシュ（約250mグリッド）で取りまとめる手法を開発し（岩橋ほか、2022）、正解データの収集を進めた。本論は、グリッド単位でSGDAS推計結果の定量的な検証を行い、結果を取りまとめ、改善手法について要件を整理したものである。

2. SGDASの地盤災害推計手法

SGDASの地盤災害推計手法は開発時の文献や中埜・大野（2018）にまとめられているが、プログラム及びコメント欄を閲覧しないと細部が分からない部分も多い。検証の前に、ここに現SGDAS（2023年2月時点）の推計手法を改めて解説する。本章の解説は、神谷ほか（2012）、神谷（2013）、神谷ほか（2014）、SGDASソースプログラム及び開発時の資料を取りまとめたものである。

2.1 入力データ

2.1.1 誘因（推計震度、PGA）

SGDASでは、（一財）気象業務支援センターから配信される気象庁の推計震度分布図を、誘因に関する入力データとして用いる。しかし推計震度分布図そのものではなく、森川ほか（2010）の距離減衰式を元に工夫されたアルゴリズムを用いて、地震観測点位置の震度値から別途推計震度分布図を作成し、元の推計震度分布図と比較する。グリッド毎に値が大きい方を採用し合成して、後述のグリッドサイズのラスタデータに整え、入力データとしている。これは、震央付近に計測点が無いときなどの、過小評価を防ぐために入れている機能である。距離減衰式を用いる推計震度分布図のアルゴリズムは、森川ほか（2010）の3種の式のうち震源の深さが30km未満の場合の式を使用し、式をそのまま用いる場合と、係数を独自に調整した場合（4パターン）の5種類の計算を行い、残差二乗和が最小になるものを採用する形を採っている。さらに、斜面崩壊の推計に後述のとおりPGA（Peak Ground Acceleration：地表最大加速度）を用いるため、独自式も使いながら、藤本・翠川（2010）の式に基づきPGAを下記の手法で推計

している。

PGAを a としてその常用対数 la を式1により計算する。

$$la = \frac{S+0.122-0.114Mw}{0.841+\sqrt{0.715699+0.069S-0.007866Mw}} \quad \dots \text{式1}$$

したがって $a = 10^{la}$

なお $Mw = 1.3Mj - 2.37$

S : 震度, Mw : モーメントマグニチュード, Mj : 気象庁マグニチュード。

計算の際は、震度4以上の揺れの範囲の面積に応じて、地域メッシュの250m, 500m, 1km, 2km, 4kmメッシュのグリッドサイズが選択される。これが推計や出力されるGISデータの解像度になる。なお、グリッドは地域メッシュの経緯度グリッドなので、正確に250m等ではない。実効上は、大部分は250m（4分の1地域メッシュ）、2016年熊本地震のような少し広域な地震で500m、2011年東北地方太平洋沖地震では1kmが選択され、これまで2km以上のグリッドサイズが選択された事例はない。

2.1.2 素因（地域特性データ）

SGDASで素因として用いるデータについては、後述の推計手法の中で解説するが、DEM10B（国土地理院基盤地図情報数値標高モデル）、地すべり地形GISデータ（防災科学技術研究所）、20万分の1日本シームレス地質図V1（産業技術総合研究所（産総研）地質調査総合センター）、地形・地盤分類250mメッシュマップ（若松・松岡，2009）等を原データとして調製したラスターデータを用いている。地域特性データはあらかじめ前述の250m～4kmのグリッドサイズで5セット作成されており、地震の規模に応じて選択グリッドサイズのデータが推計に使用される。

2.2 推計手法

2.2.1 斜面崩壊

SGDASにおける斜面崩壊の推計式は、多くの地震で検証されている六甲式（内田ほか，2004）がベースとなっている。六甲式は、1995年兵庫県南部地震の斜面崩壊に対する経験式として、10mDEMによる斜面勾配・曲率、そしてPGAから求められた判別式である。ただ、六甲式では、震度6強以上又は傾斜43度以上では常に崩壊の判定となる短所があるため、SGDASでは実効上、対数変形した「修正六甲式」（式2）が使用されている。

$$G = Gp + Ga \quad \dots \text{式2}$$

なお $Gp = 4.38\log_{10}(I - 119C) - 15.27$

$$Ga = 3.93\log_{10}(a)$$

I : 傾斜（度）, C : 曲率（ m^{-1} ）, a : PGA（gal）

地震発生時は、配信された推計震度分布図から2.1.1の方法でPGAを求め、 Ga を計算する。一方、 Gp

は地震時の揺れに依らない項で、現SGDASにおいては、次のラスターデータをあらかじめ用意しておくことによってグリッド単位の計算の高速化が行われている。まずDEM10Bから計算された傾斜・曲率を用いて Gp を求め、各グリッド内の Gp の値が特定の階級（-14.5～-7まで0.5刻みの17階級）に含まれる割合（%）を取りまとめた17バンドのラスターデータ（以下「RokkoH」という。）を地域特性データとして事前に用意する。地震発生時に、まずバンドごとに、 G' （= Ga +各階級の Gp の代表値）を計算する。その際、非崩壊を表す $G' < 0$ のグリッド値は0に置き換えておく。さらに、各グリッドで、バンド毎に G' とRokkoHをそれぞれ乗算し、乗算した全バンドを加算することによって、グリッド内の G の平均値を近似的・高速に求める。これが斜面崩壊のオリジナルな危険度計算値（以下「Houkai_noGeo」という。）である。

現SGDASではHoukai_noGeoに対してさらに、脆弱地質のゾーニングマップを用いた補正が行われている。脆弱地質とされているのは下記の領域である。
1)超苦鉄質岩, 2)高压型変成岩（御荷銕緑色岩類の苦鉄質岩部を除く）, 3)火砕流堆積物, 4)新第三紀以降の堆積岩類（凡例が「堆積岩類」であるもの。石灰質を除く）, 5)グリーンタフ（グリーンタフ地域内の前期中新世～中期中新世（N1）, 中期中新世～後期中新世（N2）の非アルカリ火山岩類）, 6)メラングジュ, 7)温泉変質帯, 8)断層破碎帯, 9)強風化岩。

これらの領域のマップのうち1)～6)は20万分の1シームレス地質図V1（産総研地質調査総合センター，2015；ダウンロードは2010年3月）を用いて作成されたが、5)のグリーンタフ地域はThe Japan Society of Landslide National Conference of Landslide Control（1988）に掲載されている黒田による土木地質図から推測した範囲としている。7)～9)は文献から採用した地域限定的なものであり、温泉変質帯は角ほか（1980）を基にした矩形範囲、断層破碎帯は大槻（1975）による棚倉断層の破碎帯、強風化岩は土地保全図表層地質図（垂直的分類図）による岩手・宮城・新潟・長野の各県のデータである。

補正は、1)～9)の領域に対応するグリッドのHoukai_noGeoを2倍することによって行われる。この値が最終的な危険度計算値である（以下「Houkai_geo」という。）。レポートの図に表示される最終的な危険度ランクは、Houkai_geoを等比的な閾値（3.2, 1.6, 0.8, 0.4）を用いて分級し、0～4までの5段階とする（以下「Houkai_rank」という。）。

2.2.2 地すべり

地すべりの推計は、元々地すべりが多い地域かつ、大半は震度6弱以上の領域で発生、という既存の知見（野呂ほか，2011）に基づいている。「元々地すべり

が多い地域」については、1:50,000地すべり地形分布図がデジタル化された地すべり地形GISデータ（防災科学技術研究所，2015）の地すべり土塊ポリゴンのGISデータを元に、凡例から知ることができる地すべりの確からしさのウェイトをかけた上で、地すべり面積率のラスターデータを作成している。地すべり面積率と震度を用いて、下記の式3で地すべりの危険度計算値「Jisuberi_org」を推計する。つまり、現SGDASでの地すべり危険度の推計は、地すべり地の分布と地質のみから行われ、地形のデータは使われていない。

$$Jisuberi_org = \frac{\log_{10}(A)}{\log_{10}(2.5)} + \frac{(I-5.0)}{0.33} + 1 \quad \dots \text{式3}$$

A：地すべり面積率，I：震度

地すべり面積率を求める際は、ガウスフィルタが用いられ、地質を考慮してフィルタの大きさ（σ）をグリッド毎に変える（周囲のグリッドと同一地質の場合は1km，異なる場合は500m）。フィルタの大きさは2008年岩手・宮城内陸地震の事例を参考に決め

られた。式3の定数（2.5，5.0，0.33）は、2011年東北地方太平洋沖地震までの知見から経験的に決められた数値である。地すべりの危険度ランク「Jisuberi_rank」は、Jisuberi_orgの整数部分を採用して0～4（ただし、4より大きい場合は4，0より小さい場合は0）に分級する。

2.2.3 液状化

液状化の危険度計算値（Ekijoka_org；危険度ランクEkijoka_rankと同一）は、地形分類図と揺れの強さの対応表（表-1）から決定している。ここで用いられている地形分類図は、J-SHIS Map（防災科学技術研究所）の微地形区分2009年版として公開されている4分の1地域メッシュの地形分類図（若松・松岡，2009）を、DEMから求めた比高や傾向面傾斜、砂丘の縁との関係を用いて一部細分したものである。埋立地など脆弱な地盤の所は震度に応じて危険度が高くなる。

表-1 液状化の発生予測に用いる表

震度	山地 丘陵 火山地 火山性丘陵 礫・岩礁 水域 ^{※1}	山麓地 火山山麓地 岩石台地 ローム台地	扇状地 砂礫質台地	扇状地 ^{※2} 砂丘	自然堤防 ^{※3} 砂州・砂礫洲 後背湿地 谷底低地	干拓地 三角州・海岸低地 自然堤防 谷底低地 ^{※2}	砂丘 ^{※4} 砂州・砂丘間低地 埋立地 旧河道 河原
7	0	1	2	3	4	4	4
6強	0	0	1	2	3	4	4
6弱	0	0	0	1	2	3	4
5強	0	0	0	0	1	2	3
5弱	0	0	0	0	0	1	2

※1河道、湖沼、沿岸海域

※2勾配1/100未満

※3比高5m以上

※4低地に接する砂丘のへりの場合

2.3 補足

レポートの図の作成に当たり、Houkai_rankとJisuberi_rankは「斜面災害」として合成する（グリッド毎に危険度が大きいランク値を採用）。SGDAS試験運用中は、斜面災害ランク、Ekijoka_rankの各4段階の危険度をそのまま可視化してレポートしていたが、分かりにくいなどの意見があり、2019年5月から、危険度4を発生可能性大、危険度3を発生可能性中、危険度2・1を発生可能性小としてまとめて可視化・レポート配信している。

3. 検証に使用したデータ

検証には、推計震度分布図を入力してSGDASでシミュレーション出力したオリジナルな危険度計算値Houkai_noGeo，Jisuberi_org，Ekijoka_orgを用いる。

脆弱地質マップによる補正が行われる斜面崩壊については、補正後のSGDAS危険度計算値であるHoukai_geo（Houkai_rankに用いられる最終的な危険度計算値）も用いる。正解データとなる地震時地盤災害の分布図（災害実績図）には様々な規格のデータが存在するが、岩橋ほか（2022）の手法で4分の1地域メッシュデータに集計しインベントリとして用いた。これは、災害実績図がポリゴンデータの場合50m間隔のランダムポイントでサンプリングし（ポイントデータの場合はそのまま、紙地図でケバの場合はポリゴン化して用いる）、メッシュ内の集計用の点の数、集計用の点があるか無いか（existence）、1平方キロメートル当たりの点数（density）等を属性として格納したGISデータである。各地震の諸元及び災害実績図のソース情報を表-2に記す。

表-2 検証に利用した各地震の諸元及び災害実績図のソース情報（「-」はデータ無し）

発生日	地震名又は気象庁による震央地名※1	地震の規模（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	液状化の災害実績図
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	-
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）	国土地理院（2007）
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）	-
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）	-
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	-
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）※2, 防災科学技術研究所（2016）（カルデラ外）	若松ほか（2017）※4
2016-10-21	鳥取県中部	6弱/Mj6.6	内陸断層型・横ずれ断層	-	先名・小澤（2019）, 先名ほか（2021）※4
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	先名・小澤（2019）, 先名ほか（2021）※4

※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、2016年鳥取県中部地震等と記す。なお2011年3月12日の長野県北部の地震は長野県・新潟県県境付近の地震とも呼ばれるが、本論では長野県北部地震という。

※2 オルソ空中写真と解像度1m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）の他、北海道水産林務部による発災後の解像度2m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。なお、※2※3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。

※4 防災科学技術研究所からJ-SHIS Labsにて公開されている液状化履歴地図（<https://www.j-shis.bosai.go.jp/labs/liqmap/>）として4分の1地域メッシュ単位で取りまとめられたGISデータを利用した。判読範囲については、判読に使用された地理院地図のオルソ画像等の範囲や、地域メッシュの領域から推測した。

・災害実績図はいずれも岩橋ほか(2022)の手法により4分の1地域メッシュ（約250m四方）インベントリに集約して使用した。

危険度の推計に用いられるRokkoH, 比高, 傾向面傾斜等の地形に関するデータは、現SGDASで用いられている基盤地図情報数値標高モデルDEM10Bをソースとするデータと、DEM5A等を取り入れた10mDEM（以下「再構成DEM」という。）をソースとするデータを用いた。これは、整備が進む高精度DEMを取り入れることによって推計精度の向上が見られるか実験するためである。再構成DEMの作成は次のように行った。国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル(2022年8月に公開サイトからダウンロード；以下のカッコ内はデータソース)について、DEM5A（航空レーザ測量）、DEM5B（写真測量（地上画素寸法20cm））、DEM5C（写真測量（地上画素寸

法40cm））、DEM10A（1/5千～1/1万分1火山基本図）、DEM10B（1/2.5万分1地形図）の優先順位で標高点を取りまとめ、構成したポイントデータからTIN（triangulated irregular network）を作成して10mグリッドDEMを内挿補間した。2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年東北地方太平洋沖地震（栗駒）の分析範囲は全域DEM5Aがあり、他の地区も過半が置き換わっている。なお再構成DEMは、TINを用いた都合上、海岸線には実際と一致しない箇所が散見されるが推計には影響無い。

4. 検証方法

定量的な検証は、まず、インベントリデータの

existenceと崩壊危険度の比較で行った。インベントリデータのexistenceがTrue/Falseを表す二値画像であり、危険度計算値は確からしさを表す指標であることから、True/Falseの予測手法の評価に一般的に使われるPR-AUC (PR曲線 (Precision-Recall Curve) の下の面積) 及びROC-AUC (ROC曲線 (Receiver Operating Characteristic Curve) の下の面積) (Davis and Goadrich, 2006) を検証に用いることとした。PR-AUCは、Trueの推計が当たったかどうかに着目して評価する指標である。ROC-AUCは、True・False, 双方の当たり外れを用いて評価する指標であるが、適用する条件として、True・Falseのケース数に偏りがなく、さらにFalseかどうかも確実なとき (災害実績図作成の際に高解像度のLiDARのDEM画像処理図が判読に用いられて非崩壊も確実である場合など) が挙げられる。斜面崩壊のような事例の場合、Falseにケース数 (4分の1メッシュインベントリのグリッド数) が大きく偏っていることから、そのような場合でも有効なPR-AUCを主に用いた。斜面崩壊・液状化についてはTrueのケース数が多い地震が複数あるため、Trueが1,000を超えたインベントリについてFalseを同数ランダムサンプリングし、ROC-AUCも参考値として算出した。サンプリング位置は、DEM10B・再構成DEMいずれがソースのデータでも同じグリッドとした。なお、ランダムすなわち推計がでたらめである場合 (ベースライン (BL)) は、PR-AUCは崩壊グリッドのパーセンテージ、ROC-AUCは0.5となる。PR-AUCとBLの差を正規化したz-scoreも求めた。

他に、インベントリデータのdensityと崩壊危険度の相関分析を行った。相関分析では、データが正規分布ではないためSpearmanの順位相関係数Rs (Spearman, 1904) を求めた。これはdensityの増加に従って危険度計算値が増加しているかを、増分が線形であるかどうかに関わらず見るノンパラメトリッ

クな指標である。

まとめると、PR-AUCを用いて斜面崩壊・地すべり・液状化の発生箇所の推計の可否を調査し、ROC-AUCを用いて斜面崩壊・液状化の発生/非発生箇所の推計の可否を調査し、順位相関係数Rsを用いて危険度の強弱の可否を調査する。なお、これらの指標の計算には主にSPSS ver.26 (IBM), 補助的にExcel (Microsoft) を用いた。

5. 検証結果

5.1 斜面崩壊

表-3-1で示すとおり、斜面崩壊の発生グリッドに対するオリジナルの危険度計算値Houkai_noGeoは、PR-AUCのz-scoreから、2008年岩手・宮城内陸地震、2016年熊本地震、2018年北海道胆振東部地震の順に良好であるが、2016年熊本地震は脆弱地質による補正後のHoukai_geoでは順位が下がる。一方、2007年能登半島地震のPR-AUCはBLを少し超える程度であり、推計結果が最も良くない。その他、2008年岩手・宮城内陸地震と2011年東北地方太平洋沖地震 (栗駒) のインベントリの範囲は半分程度重複しているが、推計精度にはかなり違いが見られる。ROC-AUCが計算できたのは3地震だけだが、いずれも0.8前後の比較的高い値となっている。Rsは、2008年岩手・宮城内陸地震や2018年北海道胆振東部地震のように中程度の相関が見られるものもあるが、わずかな相関に留まっているケースが多く、2007年能登半島地震のケースではHoukai_geoはほぼ無相関となっている。一方、能登半島地震ほど相関が低いケースを除けば、弱い相関でも、危険度ランク毎のdensityの平均値はランクが高いほど上昇している (図-1)。すなわち、グリッド毎に崩壊密度を当てるほどの精度は無いものの、危険度ランクのゾーン毎に見れば、統計的な有意性は見られることが多いと言える。

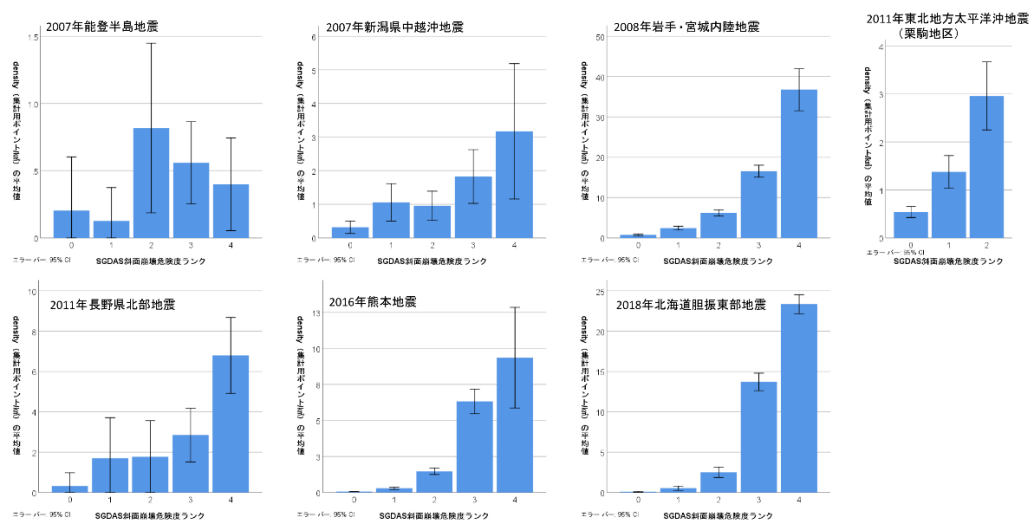


図-1 SGDASによる斜面崩壊の危険度ランク (Houkai_rank) と斜面崩壊インベントリのdensityの平均値

表-3 斜面崩壊の検証結果（「—」はデータ無し）
 1. DEM10Bを用いた危険度計算値（このうちHoukai_geoが弱SGDASの危険度計算値、Houkai_noGeoは脆弱地質マップ補正前のオリジナルの危険度計算値。（カッコ内はz-score））

地震の発生年と名称	崩壊グリッド数	総グリッド数			PR-AUC (vs existence)			ROC-AUC (vs existence)			Rs (vs density)		
		BL	Houkai_geo	Houkai_noGeo	Houkai_geo	Houkai_noGeo	Houkai_geo	Houkai_noGeo	Houkai_geo	Houkai_noGeo	Houkai_geo	Houkai_noGeo	
2007年能登半島地震	66	4713	0.014	0.016(-1.07)	0.037(-1.06)	—	—	-0.022	0.064**				
2007年新潟県中越沖地震	122	3892	0.031	0.180(0.31)	0.147(0.05)	—	—	0.113**	0.095**				
2008年岩手・宮城内陸地震	1273	7070	0.180	0.510(2.02)	0.439(1.76)	0.814	0.782	0.420**	0.374**				
2011年東北地方太平洋沖地震(栗駒)	266	6159	0.043	0.102(-0.54)	0.094(-0.73)	—	—	0.157**	0.137**				
2011年長野県北部地震	113	1111	0.102	0.158(-0.56)	0.142(-0.85)	—	—	0.186**	0.065*				
2016年熊本地震	1238	80541	0.015	0.101(-0.28)	0.187(0.72)	0.844	0.854	0.152**	0.156**				
2018年北海道胆振東部地震	2753	11903	0.231	0.360(0.12)	0.353(0.12)	0.752	0.746	0.362**	0.351**				

2. 再構成DEMを用いた危険度計算値 (Houkai_geo, Houkai_noGeoは1と同じ計算式による。(カッコ内はz-score))

地震の発生年と名称	崩壊グリッド数	総グリッド数			PR-AUC (vs existence)			ROC-AUC (vs existence)			Rs (vs density)		
		BL	Houkai_geo	Houkai_noGeo	Houkai_geo	Houkai_noGeo	Houkai_geo	Houkai_noGeo	Houkai_geo	Houkai_noGeo			
2007年能登半島地震			0.022(-1.12)	0.130(-0.76)	—	—	-0.032**	0.071**					
2007年新潟県中越沖地震			0.185(-0.33)	0.195(-0.47)	—	—	0.105**	0.116**					
2008年岩手・宮城内陸地震			0.763(2.00)	0.736(1.90)	0.815	0.806	0.423**	0.405**					
2011年東北地方太平洋沖地震(栗駒)			0.121(-0.74)	0.123(-0.97)	—	—	0.159**	0.158**					
2011年長野県北部地震			0.330(0.07)	0.269(-0.45)	—	—	0.197**	0.088*					
2016年熊本地震			0.213(-0.09)	0.365(0.66)	0.839	0.864	0.150**	0.159**					
2018年北海道胆振東部地震			0.486(0.22)	0.486(0.08)	0.757	0.756	0.371**	0.370**					

*相関係数は5%水準で有意 (両側) **相関係数は1%水準で有意 (両側) (*無しは有意でないもの)

3. 脆弱地質マップによる危険度計算値の改善 (○：改善, ×：悪化, △：変わらず)

地震の発生年と名称	DEM10Bを用いた危険度計算値			再構成DEMを用いた危険度計算値		
	PR-AUC	ROC-AUC	Rs	PR-AUC	ROC-AUC	Rs
2007年能登半島地震	×	—	×	×	—	×
2007年新潟県中越沖地震	○	—	○	×	—	×
2008年岩手・宮城内陸地震	○	○	○	○	○	○
2011年東北地方太平洋沖地震(栗駒)	○	—	○	×	—	○
2011年長野県北部地震	○	—	○	○	—	○
2016年熊本地震	×	×	×	×	×	×
2018年北海道胆振東部地震	○	○	○	△	○	○

斜面崩壊については、オリジナルの危険度計算値 (Houkai_noGeo) と、脆弱地質マップを用いた補正後の危険度計算値 (Houkai_geo ; 現SGDASのレポートに使用) の比較も行った (表-3-1)。過半数は補正によってPR-AUCが上昇しているものの、2007年能登半島地震と2016年熊本地震のケースでは、地質補正後のPR-AUCの方が小さくなる逆転現象が起きている。2016年熊本地震では、ROC-AUCも同様に地質補正後の方が低下している。また、2007年能登半島地震については、地質補正後のRsがマイナスあるいは無相関となっている。

DEM10Bを用いたRokkoHによる現SGDASの推計結果 (表-3-1) と、再構成DEMを用いた推計結果 (表-3-2) の比較では、PR-AUCは全例で明確に上昇している。一方z-scoreから、改善度合いには地域差あるいは地震による差がありそうである。PR-AUCは崩壊グリッドしか対象としないため、より過大評価になった場合でも上昇が考えられるが、ROC-AUCも、2016年熊本地震での地質補正後のケースを除き全例で値が上昇している。

脆弱地質マップによる補正の効果については、DEMの粗さの問題と交差した評価も行った (表-3-3)。その結果、2007年能登半島地震・2016年熊本地震についてはDEMの問題を差し引いても地質補正が不適切であり、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年長野県北部地震及び2018年北海道胆振東部地震では地質補正が改善方向に機能したと言える。

5.2 地すべり

地すべりの発生グリッドに対するSGDAS推計結果のPR-AUCのz-scoreは、2018年北海道胆振東部地震で最も高く、続いて2008年岩手・宮城内陸地震だが、いずれのPR-AUCもBLを少し超える程度である (表-4)。地すべりインベントリのdensityとSGDASによる推計計算値Jisuberi_orgのRsは全体的に低く、2018年北海道胆振東部地震のケースを除き、無相関あるいはわずかな相関となっている。さらに、Jisuberi_orgとの比較だけでなくHoukai_noGeoとの比較も表-4に示すが、全てのケースでHoukai_noGeoの方がJisuberi_orgとのRsより高い。

表-4 地すべりの検証結果 (このうちJisuberi_orgが現SGDASの危険度計算値 (カッコ内はz-score))

地震の発生年と名称	地すべりグリッド数	総グリッド数	PR-AUC (vs existence)		Rs (vs density)	
			BL	Jisuberi_org	Jisuberi_org	Houkai_noGeo
2007年新潟県中越沖地震	22	3892	0.006	0.008(-0.65)	0.017	0.042**
2008年岩手・宮城内陸地震	333	7070	0.047	0.059(-0.18)	0.093**	0.125**
2011年長野県北部地震	14	1111	0.013	0.019(-0.45)	0.063*	0.124**
2016年熊本地震	98	80541	0.001	0.007(-0.48)	0.037**	0.053**
2018年北海道胆振東部地震	1472	11903	0.124	0.175(1.76)	0.134**	0.230**

*相関係数は5%水準で有意 (両側) **相関係数は1%水準で有意 (両側) (*無しは有意でないもの)

5.3 液状化

液状化の発生グリッドに対するSGDAS推計結果のPR-AUCのz-scoreは、2007年新潟県中越沖地震で最も高く、続いて2016年鳥取県中部地震だが、他のPR-AUCはBLを少し超える程度である (表-5)。2016年熊本地震・2018年北海道胆振東部地震についてはROC-AUCを計算できたが、斜面崩壊よりは低い値と

なっている。液状化の推計では、表-1のとおり一部の凡例の再分類に傾向面傾斜・比高のデータを利用している。そこでDEM10Bを用いた現SGDASの推計結果と、再構成DEMを用いた推計結果の比較も行ったが、PR-AUC・ROC-AUCともに、ほとんど変化が見られなかった。

表-5 液状化の検証結果 (「—」はデータ無し)

(このうちDEM10Bを用いたEki_joka_orgが現SGDASの危険度計算値 (カッコ内はz-score))

地震の発生年と名称	液状化グリッド数	総グリッド数	PR-AUC (vs existence)			ROC-AUC (vs existence)	
			BL	DEM10Bを用いたEki_joka_org	再構成DEMを用いたEki_joka_org	DEM10Bを用いたEki_joka_org	再構成DEMを用いたEki_joka_org
2007年新潟県中越沖地震	134	3892	0.034	0.113(1.33)	0.115	—	—
2016年熊本地震	1898	27442	0.069	0.107(-0.13)	0.107	0.751	0.753
2016年鳥取県中部地震	78	5460	0.014	0.053(-0.10)	0.054	—	—
2018年北海道胆振東部地震	1171	68836	0.017	0.028(-1.10)	0.028	0.644	0.644

6. 考察

斜面崩壊については、まず、オリジナルの危険度計算値 (Houkai_noGeo) と、脆弱地質マップを用いた補正後の危険度計算値 (Houkai_geo ; 現SGDASのレポートに使用) の比較から、現在の脆弱地質マップが一部の地域 (2007年能登半島地震, 2016年熊本地震の被災域) では適切でなかったことが明らかとなった。2007年能登半島地震については崩壊グリッド数が少ないため一義的な見解には至らないが、脆弱地質としなかった「N1の海成または非海成の砂岩層」(シームレス地質図V1) で、脆弱地質とした周囲の「N1の海成または非海成堆積岩類」等より多く崩壊が発生したことが低相関の原因である (図-2a)。2016年熊本地震については、中埜・大野 (2018) でも既に指摘されたように、テフラ層すべりによる表層崩壊が多発した第四紀火山の斜面を脆弱地質としなかった影響、付加体・広域変成岩類・超苦鉄質岩類を一律に脆弱地質としたが益城山地や九州山地南部北縁では急勾配にもかかわらずほとんど崩壊が発生しなかった影響が考えられる (図-2b)。後者については地震断層との距離などテクトニックな要因も影響しているかもしれない、やはり一義的には述べら

れないが、火山地を中心とした脆弱地質の見直しと再構成は最低限必要である。インベントリがかなり重複した領域でも推計精度に違いが見られたケース (2008年岩手・宮城内陸地震と2011年東北地方太平洋沖地震 (栗駒)) は、地震のタイプの違いが影響している可能性があるが詳細は不明である。

斜面崩壊についてはさらに、多くのケースで、再構成DEMを用いた地形データへの差し替えによって推計精度の向上が見込まれる事が明らかとなった。注意点としては、全国均一な品質を擁するDEM10Bと異なり、再構成DEMでは、二次微分に相当し微細な凹凸の増幅効果が高い曲率で、DEMソースの品質の違いが顕在化する現象が見られる (図-3)。なお本研究の分析範囲でもこのように不均一な地域もあるが、修正六甲式では曲率の寄与が傾斜と比較して小さいため、傾斜の高精度化によるメリットが大きく、全体として推計精度の向上につながったと考えられる。しかし、曲率のようなDEMのスケール問題を増幅するパラメータの使用は、精度不均一なDEMを利用する場合、本来は避けた方が良く考えられ、危険度計算手法について将来的な課題は残る。

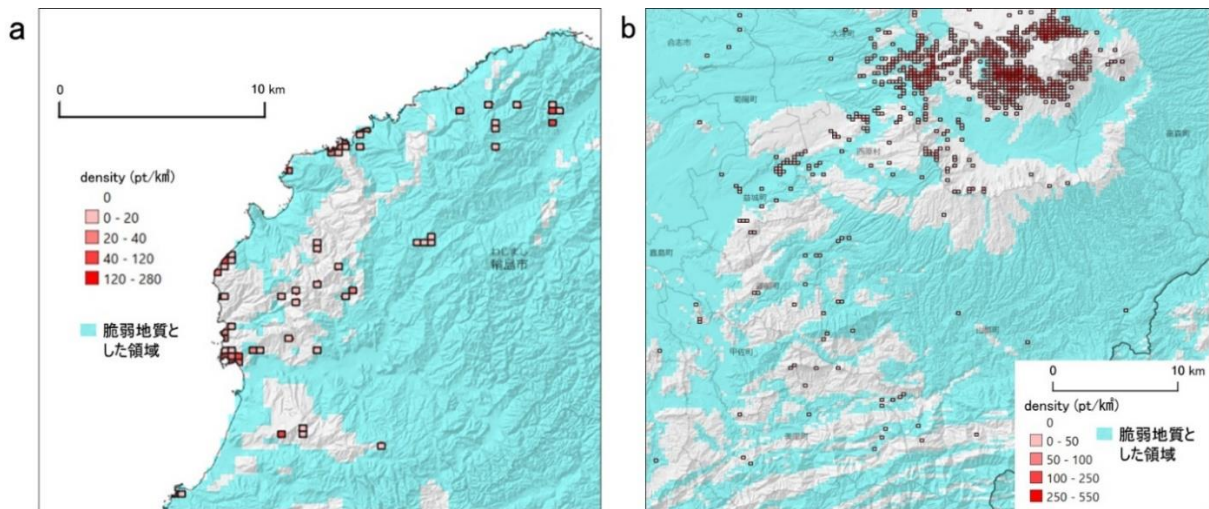


図-2 2007年能登半島地震 (a) 及び2016年熊本地震 (b) による斜面崩壊の4分の1メッシュインベントリ (一部) と現SGDASにおける「脆弱地質」領域の位置関係

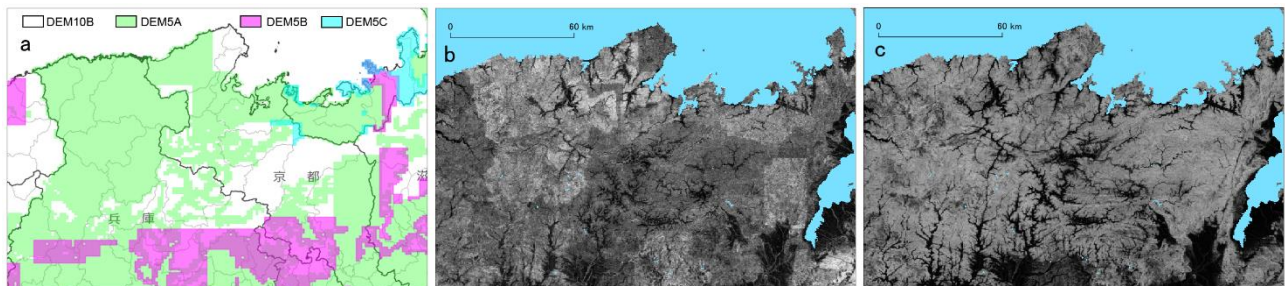


図-3 基盤地図情報のソース (本稿の時点) (a), 再構成DEMを用いて計算した曲率 (b) と傾斜 (c) (黒 (最小値) - 白 (画像内の最大値) として線形ストレッチ)

地すべりについては、 R_s が0.1を超えた2018年北海道胆振東部地震のインベントリのみ、現地調査を含む個別の調査で地すべり型とその他が分けられている（他は、一部文献を参考に分けたものもあるが、大部分は岩橋ほか（2022）の基準に基づき面積1ha以上又は斜面崩壊地（大）の凡例を一律に地すべりとした）。したがって、地すべりの推計精度の悪さにインベントリの品質が影響している可能性も少し残っている。しかし、2018年北海道胆振東部地震のケースも含め全例でHoukai_noGeoとの R_s の方が高いという事実から、現在の地すべりの推計スキームを独立して用いる意義は、おそらく無いと考えられる。

液状化の危険度の推計には対応表（表-1）のベースとなる地形分類図が重要であるが、改善の余地がある。例えば2016年熊本地震では、熊本平野の自然堤防や旧河道上での液状化が顕著であったが、現SGDASで利用されている地形分類図（若松・松岡，2009）では平野部の微高地や旧河道の表現が不十分である（図-4a）。後発を含めた他の地形分類図（例えばJ-SHIS（防災科学技術研究所）の2020年版以降の

微地形区分、国土地理院の土地条件図やベクトルタイル「地形分類」（図-4b）ではそれらの表現がより詳細であり、SGDASで処理するグリッドサイズの問題はあるものの、中埜・大野（2018）も指摘しており、地形分類図の差し替えにより推計精度の改善は可能ではないかと考えられる。加えて、ROC-AUCの低い2018年北海道胆振東部地震では、札幌市清田区の火山灰質土の大規模盛土で液状化が発生し地盤災害が生じたが（山下ほか，2019）、大規模盛土は地形分類図に反映されていない。地形分類図プラスアルファのマップの必要性も考えられる。

一方、再構成DEMを用いた地形データへの差し替えは、液状化の推計結果向上にはあまり影響が見られなかった。まず傾向面傾斜と比高を用いた再分類の対象となる領域（扇状地と自然堤防）が狭いこと、さらに、DEMの差し替えにより傾向面傾斜は改善したが、比高については土手など人工的なノイズをかえって拾うようになったことで、効果が相殺されたのではないかと考えられる。

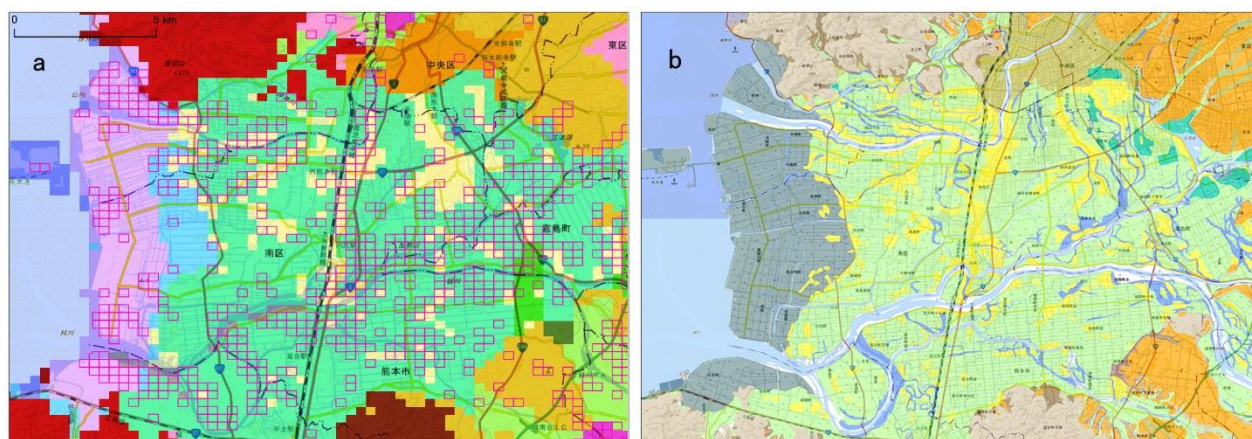


図-4 熊本平野の2016年熊本地震による液状化発生グリッド（ピンクの矩形；若松ほか，2017）とSGDASで利用されている地形分類図（若松・松岡，2009）(a)、ベクトルタイル「地形分類（自然地形）」（地理院地図）(b)
(a)の薄黄色の部分自然堤防、灰色が旧河道に相当するグリッド。(b)の黄色が自然堤防、青色が旧河道。

7. まとめ

本研究の結果から、現SGDASの推計手法を基本的に踏襲するという想定の下では、下記の方法で推計精度の向上が見込まれる。

- 1) 高精度なDEMから計算した地形量を用いる。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、精度が低いため用いない。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) 脆弱地質マップをより適切なものに変更する。
- 4) 液状化のための地形分類図をより適切なものに

変更する。

謝辞

国土技術政策総合研究所には2007年能登半島地震、2011年東北地方太平洋沖地震（栗駒地区）、2011年長野県北部地震の斜面崩壊・地すべりのポリゴンデータを御提供いただいた。防災科学技術研究所には2016年熊本地震、2016年鳥取県中部地震、2018年北海道胆振東部地震の液状化の地域メッシュデータを御提供いただいた。記して謝意を表します。

（公開日：令和5年6月23日）

参考文献

- 防災科学技術研究所 (2015) : 地すべり地形GISデータ : 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 地すべり地形分布図, https://dil-opac.bosai.go.jp/publication/nied_tech_note/landslidemap/gis.html (accessed 9 February 2023).
- 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)
- 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.
- 藤本一雄, 翠川三郎 (2010) : マグニチュードの影響を考慮した計測震度と地震動強さ指標の関係式, 日本地震工学会論文集, 10 (2), 1-11
- 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への4分の1地域メッシュデータ化, 国土地理院時報, No.135, 69-74. doi: 10.57499/JOURNAL_135_06.
- 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.
- 神谷泉 (2013) : 地震時の地盤災害のリアルタイムの予想, 第42回国土地理院報告会, <https://www.gsi.go.jp/common/000081660.pdf> (accessed 9 February 2023).
- 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, No.126, 61-66.
- 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) : 国土地理院技術資料 D・1 -No541 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).
- 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.
- 中埜貴元・大野裕幸 (2018) : 地震時地盤災害推計システム (SGDAS) の妥当性の検証, 国土地理院時報, No.130, 51-68.
- 野呂智之・丸山清輝・ハスバートル・中村明 (2011) : 既存地すべり地形における地震時地すべり発生危険度評価に関する研究, 土木研究所資料, 4204.
- 大槻憲四郎 (1975) : 棚倉破砕帯の地質構造, 東北大学理学部地質学古生物学教室研究報文報告, 76, 1-71.
- 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).
- 先名重樹, 小澤京子, 杉本純也 (2021) : 近年の地震における液状化地点情報に基づく液状化危険率推定式の提案, 日本地震工学会論文集, 21(2), 90-108. doi: 10.5610/jaee.21.2_90.
- 先名重樹, 小澤京子 (2019) : 平成30年北海道胆振東部地震の液状化地点分布と近年の地震による液状化被害率の検討について, 日本地震学会2019年度秋季大会, S15P-05.
- 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.
- 角清愛・金原啓司・高島勲 (1980) : 日本の鮮新世後期から完新世の熱水変質帯・温泉沈殿物一覧, 地質調査所, 84p.
- The Japan Society of Landslide National Conference of Landslide Control (1988) : Landslides in Japan (4th revision), 54p, <https://japan.landslide-soc.org/wp19/wp-content/uploads/2019/05/1988.pdf> (accessed 9 February 2023).
- 内田太郎, 片岡正次郎, 岩男忠明, 松尾修, 寺田秀樹, 中野泰雄, 杉浦信男, 小山内信智 (2004) : 地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, 第204号, 91p.
- 若松加寿江, 松岡昌志 (2009) : 全国を網羅した地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築, 第3回シンポジウム「統合化地下構造データベースの構築」予稿集, 15-20.

- 若松加寿江, 先名重樹, 小澤京子 (2017) : 平成28年 (2016年) 熊本地震による液状化発生の特性, 日本地震工学会論文集, 17(4), 81-100. doi: 10.5610/jace.17.4_81.
- 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.
- 山下聡, 小川かける, 川尻峻三, 川口貴之, 渡邊達也 (2019) : 平成30年北海道胆振東部地震で被災した火山灰造成宅地の液状化特性 — 2003年十勝沖地震で被災した火山灰造成農地との比較 —, 地盤工学ジャーナル, 14(4), 353-361. doi: 10.3208/jgs.14.353.