

地震時地盤被害予想システムの構築

Construction of Seismic Ground Disaster Assessment System (SGDAS)

地理地殻活動研究センター 神谷泉・小荒井衛¹・乙井康成・中埜貴元

Geography and Crustal Dynamics Research Center

Izumi KAMIYA, Mamoru KOARAI, Kosei OTOI and Takayuki NAKANO

要 旨

地震発生後概ね 15 分で斜面崩壊、地すべり、液状化が発生した可能性（以下「発生可能性」という。）を自動的に予想し、その結果を配信する地震時地盤被害予想システムを開発した。このシステムは、現在、国土地理院内で試験運用中であり、安定して無人で動作している。本稿では、このシステムのアルゴリズムについて報告する。

1. はじめに

大地震が発生した場合、政府レベルでの対応を決定するために、早期に被害の概要を把握することが重要である。しかしながら、1995 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震等、被害の概要が判明するまでに時間を要した事例がある。現在においても、通信回線の不通、夜間、天候不良、あるいは情報の錯綜等により、かならずしも適切な情報を得ることができない場合があると予想される。そのような場合には、震度と、被災地の地理的特性に基づいて想定される被害の予想が判断に役立つと考えられる。そのような発想の下、地盤災害（斜面崩壊、地すべり、液状化）について、推計震度分布図等のリアルタイム情報と、傾斜、地形分類、地質等の既存情報を組み合わせ、それらの災害の発生可能性を予想し、地震後概ね 15 分以内に関係部局に送信するシステム（地震時地盤被害予想システム）を開発した。結果については既に報告済みであるが（神谷，2013），本稿では、アルゴリズムの詳細を報告する。

2. 開発したシステムの概要

地震時地盤被害予想システムは、推計震度分布図と既存の地理空間情報を用いて、地震による地盤被害を予想する。本システムは、常時、推計震度分布図の受信を監視し、その受信をトリガーとして処理を起動し、予想結果の配信までを自動的に行う。

本システムは、地震被害の予想をグリッドベースで行う。通常は、格子間隔 250 m（経緯度に基づくグリッドなので正確に 250 m ではない；以下同様）のグリッドを用いているが、対象地域が広大な場合は、500 m, 1 km, 2 km, あるいは 4 km のグリッドによる処理が自動的に選択される（実際には、ほと

んどの場合は 250 m が選択される）。

既存の地理空間情報は、リアルタイムの運用に適するような加工が施された後、この 5 種の格子間隔のグリッドデータとして保管されている。このグリッドデータを「地域特性データ」という。

推計震度分布図を受信したならば、本システムは、処理を行うか否かの決定、処理範囲の決定及び処理に使用する格子間隔の決定を行った後、以下のアルゴリズムを実行する。

- 1) 計測震度の修正
- 2) 斜面崩壊の予想
- 3) 液状化の予想
- 4) 地すべりの予想

斜面崩壊、液状化、地すべりの発生可能性は、危険度 0 から危険度 4 の 5 段階に分類される。

その後、ユーザーに結果を示すための PDF ファイル等の作成を行い、それらのファイルをネットワーク上の所定の場所にアップロードするとともに、メールを配信する。通常、1 つの地震に対し、推計震度分布図は 2 回発表されるため、上記の処理も 2 回行われ、予想結果も 2 回配信される。

3 計測震度の修正

3.1 震央付近の推計震度分布図の状況

推計震度分布図は、震度観測点で計測された「計測震度」を、地盤条件を考慮して内挿したものである。計測震度は、地震波形から震度を決定するために計算された値であり、例えば、震度 4 は計測震度 3.5~4.4 に対応する（配信される計測震度は、このように 0.1 単位の値である）。

推計震度分布図は、地震発生直後に確実に得られる地震動に関する最善のデータであるが、震央付近に震度観測点がない場合、震央付近の計測震度をしばしば過小評価している（神谷ほか，2012）。その原因は、計測震度は震央付近で最大になると期待されるが、推計震度分布図における内挿では、そのような推計震度の分布モデルを考慮せずに内挿しているためと考えられる。そこで、推計震度分布図に、震源からの距離による計測震度の距離減衰式を併用す

ることにより、震央付近の過小評価を防ぐこととした。

3.2 使用するデータ

計測震度の修正には、推計震度分布図の計測震度のほか、推計震度分布図に記載されている震央の3次元座標、気象庁マグニチュード、推計震度分布図の作成に使用される震度観測点の位置、250 m メッシュの地形分類（若松・松岡，2008）を用いる。

3.3 修正アルゴリズム

計測震度の修正のアルゴリズムは、以下のとおりである。「推計震度分布図の計測震度 I_{JMA} 」が「距離減衰式による計測震度 I_{Att} 」より小さい場合においてのみ、「震度観測点が不足していることによる推計震度分布図の計測震度の誤差の推定値 ΔI_{JMA} 」の範囲内で修正し、「本システムで使用する計測震度 I 」を求めるものである。

$$I = \text{MAX}(I_{JMA}, \text{MIN}(I_{Att}, I_{JMA} + \Delta I_{JMA}))$$

距離減衰式による計測震度 I_{Att} は、森川ほか(2010)の計測震度の距離減衰式を使用した。森川ほか(2010)の距離減衰式は、震源30km以浅の式と30kmより深い式があるが、両者は連続していないことから、計測震度の修正は浅い地震で重要であることから、震源30km以浅の式を使用した。

$$I_{Att} = 2(a M_w + b r + c - 2 \log_{10}(r + d \times 10^{M_w})) + I_{AVS}$$

$$I_{AVS} = -12.6 \log_{10}(V_{AVS}) + 3.10$$

$$a = 0.63 \quad b = -0.0018 \quad c = -0.24 \quad d = 0.0030$$

ここで、 r は震源から計測震度を求める対象セルまでの3次元距離 (km) である。

I_{AVS} は地盤条件による計測震度の補正項、 V_{AVS} は表層30 mの平均S波速度 (AVS30) である。 V_{AVS} の値は、地形分類をもとに、若松・松岡(2008)に従って推定した。

M_w は、モーメントマグニチュードであり、推計震度分布図に添付されている気象庁マグニチュードから、神谷ほか(2012)の方法で求めた。

ところで、推計震度分布に記載されている震源の深さは、地震直後に求められたものであり、誤差が大きい。特に、10 kmより浅い場合は、「10 km」という値が記されている。また、森川ほか(2010)の距離減衰式の係数は、過去の多数の地震から求められた平均的な値であるが、必ずしも当該地震に対して適切な値であるとは限らない。

距離減衰式のパラメーターのうち、 d は、震源の広がり効果を示す係数であり、物理的解釈から非

負であるべきである。また、 d と震源の深さが距離減衰式に及ぼす影響は類似しており、両者を同時に推定することは困難である。パラメーター b は、地震波の伝搬の際のエネルギーの損失を示す係数であるが、その推定のためには震源から数百 km の位置での計測震度が必要であり、本システムで使用するデータでは推定できない。1つの地震のデータでは、 M_w が一定であるため、パラメーター a と c の効果を分離することができない。従って、推定可能な定数は、「 d 又は震源の深さ」と「 a 又は c 」である。

そこで、推計震度分布図における「震度観測点の位置の計測震度の値」をもとに、以下の方法で距離減衰式のパラメーターと震源の深さを求め、残差の2乗和が最小となる方法を採用することにした。

- 1) 森川ほか(2010)によるパラメーターの値と、推計震度分布図に記載された震源の深さをそのまま用いる場合
- 2) d を0として、 c のみを調整する場合
- 3) d 、 c を調整する場合（ただし、 d の値が負となった場合は採用しない）
- 4) 震源の深さを0として、 c のみを調整する場合
- 5) 震源の深さと c を調整する場合

一方、 ΔI_{JMA} の推定には、以下のアルゴリズムを用いた。各震度観測点において、求められた距離減衰式に従った計測震度が観測されたと仮定する。このとき、注目している点の震度を、その点に直近な12点の震度観測点の計測震度を用い、距離の逆2乗の重みで内挿してみる。この内挿結果と、注目点における距離減衰式による計測震度の差を、「震度観測点が不足していることによる推計震度分布図の計測震度の誤差の推定値 ΔI_{JMA} 」とした。なお、注目している点の直近の震度観測点の検索に時間を要するため、近似的かつ技巧的な検索方法が実装されている。

4 斜面崩壊の予想

4.1 使用するデータ

斜面崩壊の予想には、3章で述べた計測震度のほかに、基盤地図情報10 mメッシュ（標高）、20万分の1日本シームレス地質図（脇田ほか，2009；以下「シームレス地質図」という。）等を使用している。この3つ以外のデータは、4.4に記載している。

4.2 修正六甲式

斜面崩壊は、兵庫県南部地震の六甲山地における斜面崩壊の実例をもとに作成された「地震による斜面崩壊危険度判別式」である「六甲式」（内田ほか，2004）を改良した「修正六甲式」により予想されている。その詳細は、神谷ほか(2012)で報告したが、

ここでは、その概要を説明する。

六甲式は、斜面の崩壊、非崩壊を、傾斜、曲率（地表面の2方向の曲率の平均）、加速度（地表最大加速度PGA: peak ground acceleration；ただし、水平成分のみを考慮）で計算する式である。修正六甲式は、六甲式をより広い範囲の傾斜、曲率に適用できるように修正した式である。

$$G=4.38 \log_{10}(s-119c')+3.93 \log_{10} a'-15.27$$

ただし、 G は修正六甲式の値、 s は傾斜（度）、 c' は曲率（ m^{-1} ）、 a' はPGA（Gal）である。このうち、PGAは、計測震度から神谷ほか（2012）の方法で求める。

4.3 部分修正六甲式を用いた計算方法

修正六甲式は、格子間隔約10mのグリッドを使用して計算するが、その計算を全てリアルタイムで行うことは多量の計算を要する。修正六甲式は、PGAに依存する部分（「部分修正六甲式」という。）と依存しない部分の和である。そこで、部分修正六甲式の値を計算し、250m等のセル内の「部分修正六甲式の値」のヒストグラムをあらかじめ計算しておく。このヒストグラムと、地震発生時に得られるPGAを用いると、250m等のセル内の「修正六甲式の値」のヒストグラムを短時間で計算することができる。

崩壊と非崩壊の2値に区分する場合、修正六甲式、あるいは六甲式は、正の場合に崩壊すると予想する式である。そこで、250m等のセル内の「修正六甲式、ただし値が負であれば0」の250m等のセル内の平均値を求める。この値を、等比的に分級した結果が、0から4の5段階の予想結果となる。

4.4 脆弱な地質の考慮

前節で求められた予想結果に対して、脆弱な地質と判断される場所は、予想結果を1段階上げる処理を行っている。より正確には、この修正は、区分前の値に定数を掛けることで実装しているため、「脆弱な地質では必ず危険度1になる」、「危険度が5となる」ということはない。また、システムとしては、「0.5段階上げる」といった修正も可能である。

脆弱な地質は、以下のいずれかに該当する場合である。ただし、複数の項目に該当しても、2段階上げるといった処理は行っていない。

- 1) 超苦鉄質岩
シームレス地質図における超苦鉄質岩。
- 2) 高圧型変成岩
シームレス地質図における高圧型変成岩。ただし、御荷鉾緑色岩類の苦鉄質岩部を除く。
- 3) 火砕流堆積物

シームレス地質図における火砕流

- 4) 新第三紀以降の堆積岩類
シームレス地質図における時代区分N1以降（概ね中新世以降）の堆積岩、堆積物。ただし、石灰質を除く。
- 5) いわゆるグリーンタフ
シームレス地質図において、時代区分N1、N2（概ね中新世）の非アルカリ火山岩類であって、別途指定したグリーンタフエリアに含まれるもの。
- 6) メランジュ
シームレス地質図における付加体の砂岩・泥岩であって、岩相の細分が区分されえないもの。
- 7) 温泉変質
角ほか（1980）に記載されている熱水変質に記載されている熱水変質のうち、面積0.5 km²以上ものを新たに数値化。
- 8) 断層破碎帯
大槻（1975）に記載されている棚倉断層の破碎帯を新たに数値化。
- 9) 強風化岩
20 万分 1 土地分類基本調査（国土庁土地局、1975）等の表層地質図（垂直的分類図）において、概ね風化区分が β 又は γ （風化土厚3 m以上）と分類されているものを新たに数値化。

5 地すべりの予想

5.1 使用するデータ

斜面崩壊の予想には、3章で述べた計測震度のほかに、地すべり地形分布図、シームレス地質図を使用している。

5.2 既存の知見

地震時の地すべりは、概ね震度5強以上、大半は震度6弱以上で発生する（野呂ほか、2011）。また、地震時の地すべりは、既存地すべりの再活動と新規地すべりがあるが、1 km程度のスケールで見ると、新規地すべりも、既存地すべりの近くで発生している。以上を考慮すると、地震時の地すべりは、地すべりの分布密度が高く、かつ震度が大きな場所で発生しやすいと言える。

5.3 地すべり面積率

地すべりの分布を示す資料として、防災科学研究所が作成した「地すべり地形 GIS データ」（<http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/gis-data/>）がある。地すべり地形 GIS データは、作成年代によりデータの品質（例えば、重畳する複数の地すべり地形を1つとして取得するか、個別に取得するか）が異なるため、全国のデータから偏りのない情報を抽出するには、

地すべりの規模を無視して、地すべりが占める面積の割合を用いるしかない。本研究では、「ポリゴンとして囲まれている地すべり土塊が占める面積の割合」（以下「地すべり面積率」という。）を用いた。

ところで、ある点の地すべりの発生可能性は、その周りの地すべり面積率に依存するが、このとき、周囲であっても、同じ地質の地すべり面積率により強く依存すると考えられる。そこで、予想の計算に用いる面積率は、以下のように計算した。

事前に、セル（セルサイズ 250 m 等）ごとの地すべり面積率を求めておく。実行時には、重み $w(r)$ をつけて、注目しているセルの周りのセルの面積率を平均し、計算に用いる面積率としている。ここで、 $w(r)$ は、

$$w(r) = \exp\left(\frac{r^2}{r_0^2}\right)$$

とした。また、 r_0 は、注目しているセルとその周囲のセルの地質が、シームレス地質図上で同じ場合は 1 km、異なる場合は 500 m とした。なお、平均をとる範囲は、緯度方向、経度方向ともに、3 km 以内とした。

5.4 発生可能性の評価

前節で説明した地すべり面積率を S 、震度を I とし、

$$R = \frac{\log_{10} S}{\log_{10} A} + \frac{I - C}{B} + 1$$

を計算し、 R の整数部分（ただし、4 より大きい場合は 4、0 より小さい場合は 0）をとって、発生可能性を危険度 0 から危険度 4 までの 5 段階に分類して

いる。ここで、定数 A , B , C は、5.2 節の知見と、中越地震、能登半島地震、岩手宮城内陸地震、東日本太平洋沖地震の地すべりの発生状況を考慮し、 $A = 2.5$, $B = 0.33$, $C = 5.0$ とした。

6 液状化の予想

6.1 使用するデータ

液状化の予想には、3 章で述べた計測震度のほかに、250 m メッシュの地形分類（若松・松岡, 2008）、基盤地図情報 10 m メッシュ（標高）を使用している。

6.2 アルゴリズム

液状化の発生可能性の評価には、「液状化抵抗比と繰り返しせん断応力をから液状化に対する抵抗率（ F_L 値）を求める」等の物理的な方法（例えば、埼玉県（2014））と、実際の液状化の発生と地形分類等の指標を関係づける経験的な方法がある。物理的な方法では、標準貫入試験の N 値、地下水位等の物理データが必要となるが、全国にわたって、これらを推定する適切な方法がないと判断し、本システムでは、地形分類を用いた経験的な方法を用いることとした。

本システムでは、地形分類と震度を入力とし、表-1 に基づいて液状化の発生を予想している。ここで、扇状地、谷底低地、自然堤防、砂丘については、DEM を用いて、250 m メッシュの地形分類を細分している。

7. 配布用資料の作成とメールの送信

本システムは、予想結果に基づき配布資料を自動的に作成する。配布段階では、斜面崩壊と地すべりは、「斜面災害」にまとめられ、予想する地盤災害の

表-1 液状化の発生を予想に用いる表

地形分類 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 三角洲・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

*3 比高が高い場合（5m 以上）

*2 傾斜が緩い場合（勾配 1/100 未満）

*4 低地に接する砂丘のヘリの場合

種類は、斜面災害と地盤の液状化の2種類となる。斜面災害の発生可能性は、斜面崩壊の発生可能性と地すべりの発生可能性の大きな方である。また、対象地域の居住者人口密度（以下、人口、人口密度は、居住者人口、居住者人口密度の意味で用いる）も付加される。

配布用資料は、PDF ファイル、KMZ ファイル、テキストファイル、CSV ファイル及び画像ファイルからなる。KMZ ファイルは、地理院地図の背景画像を背景とした予想結果と人口密度のファイルであり、Google Earth 等で表示できる。

テキストファイルは、斜面災害の発生可能性、液状化の発生可能性、震度で分級された面積及び人口（以下「集計結果」と総称する。）を示す。この集計結果には、対象地域全域の集計結果と、市区町村

ごとの集計結果があり、市区町村ごとの集計結果は、さまざまな方法でソートされている。CSV ファイルは、これらの集計結果の元となるデータを記載したファイルである。

PDF ファイルは、最も重要な資料であり、全域の集計結果、予想結果、人口密度が表示されている（図-1）。表示範囲と用紙の方向（縦長か横長か）は、ページごとにシステムが自動的に決定する。ただ、このような決定が常に使いやすいとは限らないため、通常、2種類の範囲の図が生成される。図は、地理院地図の背景画像を背景としており、縮尺、凡例も、陸地及び発生可能性等を参考に、なるべく適切な位置に自動的に挿入される。なお、これらのデザインは、定義ファイルに記載されている。

配布用資料が準備できたなら、自動的にメールを

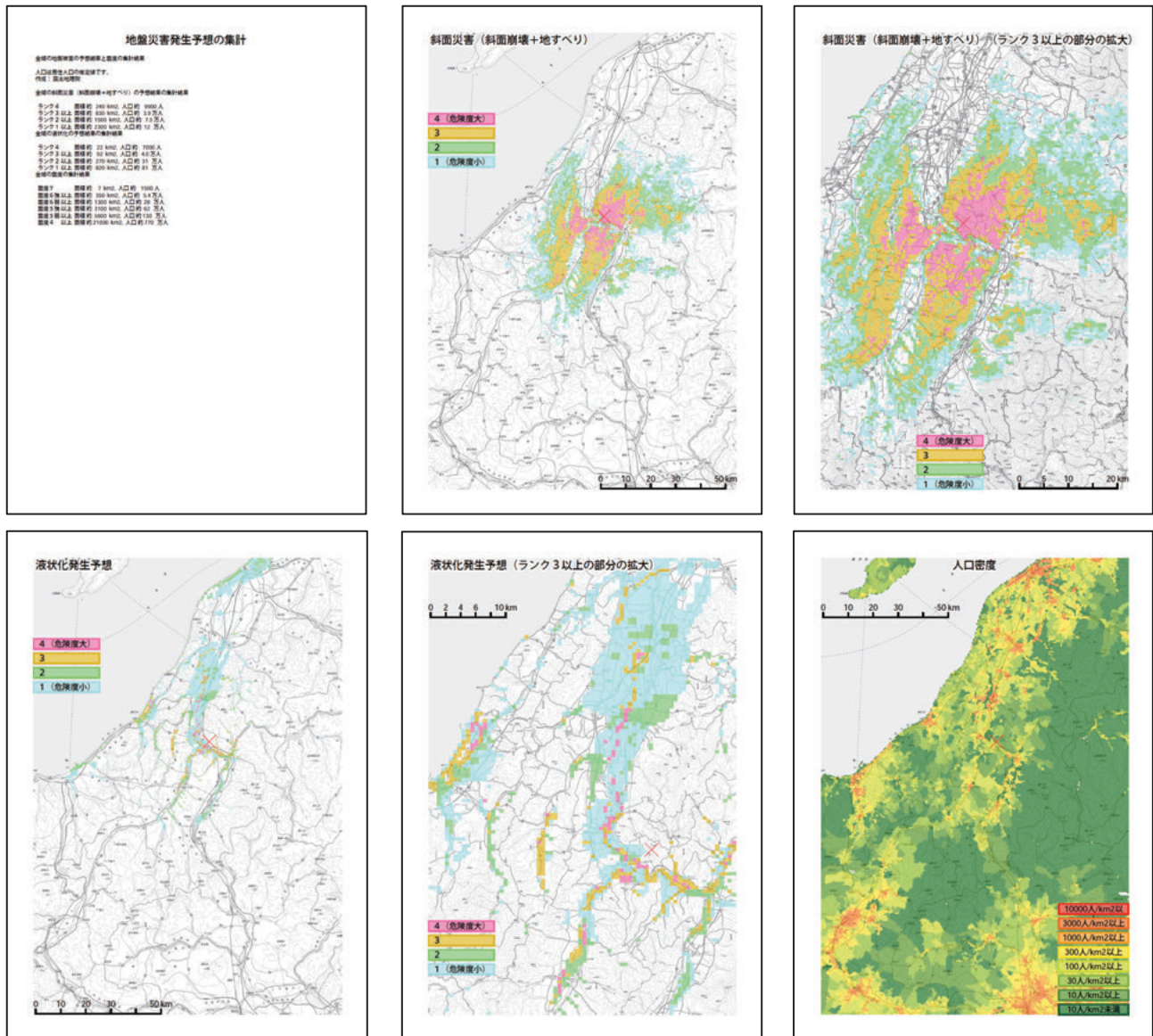


図-1 PDF ファイルの例（中越地震）

送信するとともに、サーバーに配布用資料をアップロードする。本システムは、定義ファイルに基づき、送付先、内容、添付ファイル等が異なる複数のメールを送信することができる。アップロード先とアップロードする内容についても同様である。

8. 過去の地震への適用結果とシステムの運用

本システムの稼働前に発生した地震の推計震度分布図を本システムに入力したところ、おおむね良好な結果が得られた（神谷，2013；神谷ほか，2013）。また、本システム稼働後の2013年4月13日に発生した淡路島の地震においては、実際に国土地理院内で本システムの出力結果が活用された（神谷，2013）。当初は、Windows Updateに伴う再起動等の原因により、意図しないシステムの停止が発生したが、現在では、安定的に無人で運用されている。

9. まとめ

地震発生後概ね15分で斜面崩壊、地すべり、液状化が発生した可能性を自動的に予想し、その結果を配信する地震時地盤被害予想システムを開発した。過去の地震に対して適用したところ、概ね良好な結果が得られた。本システムは、現在、国土地理院内で試験運用中であり、安定して無人で動作している。

謝辞

内閣官房危機管理室、国土交通省大臣官房官庁営繕部、消防研究センター細川直史氏、新井場公德氏からは、防災部局の立場からのアドバイスをいただいた。気象庁地震火山部、気象庁予報部、防災科学技術研究所、産業技術総合研究所、国土交通省国土政策局、国土交通省水管理・国土保全局砂防部、国土技術政策総合研究所、北海道立総合研究機構地質研究所、関東学院大学若松加寿江教授、東京工業大学松岡昌志准教授からは、本システムで使用しているデータを提供していただいた。立命館大学岡田篤正教授、東京工業大学松岡昌志准教授、産業技術総合研究所斎藤眞氏、西岡芳晴氏、宝田晋治氏、山本直孝氏、須藤定久氏、防災科学技術研究所土志田正二氏、内山庄一郎氏、井口隆氏、長坂俊成氏、藤原広行氏、北海道立総合研究機構地質研究所石丸聡氏、気象業務支援センター佐々木昭士氏、軍地達雄氏、国土交通省関克己氏、国土技術政策総合研究所富田陽子氏、小山内信智氏、林真一郎氏、土木研究所山越隆雄氏、横山修氏、丸山清輝氏、野呂智之氏、国土地理院今給黎哲郎氏からは、専門家の立場からアドバイスをいただいた（肩書は当時のもの）。ここに記して謝意を表す。

（公開日：平成26年12月4日）

参考文献

- 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，<http://www.gsi.go.jp/common/000081660.pdf>（accessed 3 Oct. 2014）。
- 神谷泉・小荒井衛・乙井康成・中埜貴元（2013）：地震時地盤被害予想システムの開発，日本写真測量学会平成25年度年次学術講演会発表論文集，45-48。
- 国土庁土地局（1975）：土地分類図（北海道I石狩・後志・胆振支庁）縮尺1:200,000，国土庁。
- 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。
- 大槻憲四郎（1975）：棚倉破碎帯の地質構造，東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告，76，1-71。
- 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。
- 埼玉県（2014）：平成24・25年度埼玉県地震被害想定調査報告書，<http://www.pref.saitama.lg.jp/site/higaisoutei/higaisouteihoukoku.html>（accessed 26 Jun. 2014）。
- 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，1:2,000,000地質編集図19-1日本の熱水変質帯分布図，地質調査所。
- 内田太郎・片岡正次郎・岩男忠明・松尾修・寺田秀樹・中野泰雄・杉浦信夫・小山内信智（2004）：地震による斜面崩壊の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。
- 若松加寿江・松岡昌志（2008）：地形・地盤分類250mメッシュマップ全国版の構築，日本地震工学会大会—2008梗概集，222-223。
- 脇田浩二・井川敏恵・宝田晋治（2009）：20万分の1日本シームレス地質図DVD版，数値地質図G-16，産業技術総合研究所。