ロジスティック回帰分析を用いた既存地すべり地形の地震時の危険度評価

An approach of susceptibility analysis for deep-seated landslide induced by earthquake within pre-existing landslide topography using logistic regression

ハスパートル^{a), b) *}, 丸山清輝^{a)}, 野呂智之^{a)}, 中村 明^{a)}

Bateer HASI, Kiyoteru MARUYAMA, Tomoyuki NORO and Akira NAKAMURA

Abstract

This paper conducted logistic regression analysis for landslides induced by earthquake within pre-existing landslide topographies. The logistic regression model constructed by using the landslides data set from the Chuetsu earthquake. The results showed that surface roughness and marginal erosion ratio are the most influential factors for the landslide occurrence. The model was validated by the landslides data set of the Chuetsu earthquake and the Iwate-Miyagi inland earthquake. Based on ROC curves, the AUC is larger than 0.8, showed good prediction accuracy and suggested the method is useful.

Key words : landslide, earthquake, pre-existing landslide topography, logistic regression

和文要旨

地震による地すべりの発生危険度を評価するため、既存地すべり地形を対象にロジスティック回帰分析を行った。この分析では、中越地震で地すべりが多発した範囲の既存地すべり地形と地震による地すべりデータを用いて、ロジスティック回帰モデルを構築し、標高偏差と地すべり地形の縁辺侵食率が、地震による地すべりの発生に最も影響していることを明らかにした。また、構築したモデルを用いて、中越地震による地すべりの一部と岩手・宮城内陸地震による地すべりの各発生を予測した結果、その精度はROC解析によればAUC（予測能）が0.8以上で、モデルの有効性が確認された。

キーワード：地すべり、地震、既存地すべり地形、ロジスティック回帰分析

1. はじめに

地震による災害では、地すべりや崩壊などの斜面災害の占める割合が大きい。特に、日本のような国土の大部分が山地からなる地域では、地震による地すべりがライフラインの破壊や河道閉塞などを発生させ、その被害は深刻である。近年、日本では2004年新潟県中越地震（国土交通省砂防部，2005）や2008年岩手・宮城内陸地震（国土交通省砂防部，2008）、日本以外のアジア地域でも、例えばパキスタン北部地震（丸井ほか，2006）、中国四川地震（Chigira *et al.*, 2010）などに伴い数多くの地すべりが発生し、甚大な被害をもたらした。地震に伴う被害を軽減するためには、地すべり発生の危険度を評価することが一つの重要な取り組みとなる。

地すべりの発生危険度評価に関する研究は数多くあり、その研究手法は主に定性的な手法と定量的な手法に分けられる（Soeters and van Westen, 1996）。定性的な手法（Anbalagan, 1992；Yoshimatsu and Abe, 2006；八木ほか，2009）は専門家の経験に基づき地すべりの危険度マップを作成する方法であり、研究者のスキルに頼るため専門的な知識が要求される。一方、定量的な手法には確定手法（Pack *et al.*, 1998；Zhou *et al.*, 2003）と統計学的な手法がある。確定手法は物理的なメカニズムを数学モデル化するものであり、斜面構成物の物性値が必要になるが、その取得は困難な場合が多い。これに対し、

統計学的な手法は、地すべりの空間分布と発生要因との関係を分析するものである。統計学的な手法として、判別分析（Lee *et al.*, 2008；Dong *et al.*, 2009）とロジスティック回帰分析（Guzzetti *et al.*, 1999；Ayalew and Yamagishi, 2005；Chang *et al.*, 2007；Garcia-Rodriguez *et al.*, 2008）が用いられている。判別分析ではデータの正規分布が要求される（Dong *et al.*, 2009）制限があるのに対し、ロジスティック回帰分析にはこのような制限はなく、地すべり発生予測に適しているとされる（Chauhan, *et al.*, 2010）。

これらの統計学的な手法は、斜面をグリッドに分け、グリッド単位で分析を行っている場合が多い。しかし、地すべり対策に着目した場合、危険度評価されたグリッドを、現実的にどのように対応するかが課題となる。地すべり対策は一般に地すべり地形（ブロック単位）を対象としている。地震による地すべりにおいても、既存地すべり地形内で数多くの地すべりが発生していることが報告されている（例えばハスパートルほか，2009）。このため、既存地すべり地形の把握から、地震による地すべりの危険度評価が重要である。また、地形特徴に基づく既存地すべり地形の判読など定性的な評価は比較的容易であり、その判読結果は日本では容易に入手できる（防災科学技術研究所，2010）。これらのことを踏まえ、本研究では今後の地すべり斜面の対策を考慮し、既存地すべり地形を対象に、定性的な手法（地すべり地形判読）と客観性の高い統計手法（ロジスティック回帰分析）を組み合わせ、地震による地すべりの発生危険度評価手法について検討した。

* 連絡著者／corresponding author

a) (独)土木研究所 雪崩・地すべり研究センター

Public Works Research Institute, Japan

b) アジア航測株式会社 社会基盤システム開発センター

Asia Air Survey, Co., Ltd.

〒215-0004 神奈川県川崎市麻生区万福寺1-2-2

1-2-2, Manpukuji, Asao district, Kawasaki, Kanagawa Prefecture

本研究では、まず中越地震で発生した地すべりと既存地すべり地形のデータセットを作成し、その一部を用いてロジスティック回帰モデルを構築した。次に、構築したモデルを、モデル構築に使わなかった中越地震の残りのデータと岩手・宮城内陸地震による地すべりデータに適用し、モデルの有効性についての交差検定を行った。その後、このモデルを用いて、上述の二つの地震による地すべりの危険度評価図を作成した。

2. 調査範囲とその概要

調査地は中越地震と岩手・宮城内陸地震の震源域である。図-1に調査位置を示した。調査地1は、中越地震によって地すべりが数多く発生した芋川流域及びその周辺約127km²の範囲である。調査地2は、岩手・宮城内陸地震で地すべりが多発した約459km²の範囲である。

調査地1の中越地震(M6.8)は、2004年10月23日に新潟県中部に位置する東山丘陵の南部で発生した。中越地震による直接的な犠牲者は16名であり、その内6名が地すべりによって被災している(新潟県, 2009)。調査

地1は、東山丘陵の中部から南部に位置し、稜線の標高が300~700mの丘陵地帯である。地質は主に新第三紀から第四紀の地層からなり、砂岩、泥岩、砂岩・泥岩互層、シルト岩及び未固結の礫、砂、泥が分布する。地質構造は北北東-南南西方向の軸を持つ活褶曲によって特徴付けられ、それらは約1kmの間隔で分布する(柳沢ほか, 1986; 小林ほか, 1991)。

調査地2の岩手・宮城内陸地震(M7.2)は、2008年6月14日に奥羽脊梁山地の中部で発生した。この地震によって17名が死亡し、6名が行方不明になっている。死亡・行方不明者のほとんどは地すべりなどの土砂災害によるとされている(牛山・太田, 2009)。調査地2は奥羽脊梁山地の東麓に位置し、稜線の標高が400~600mで、幾つかの河川によって深く下刻されている。地質は主に中新世中期から鮮新世の火山岩類、浅海性凝灰質堆積物からなる(大沢・滝沢, 1992)。また、調査地の西側に第四紀火山である栗駒山があり、その周辺には第四紀の火山噴出物が広く分布する。

図-1 調査対象範囲

実線は活断層(産業技術総合研究所, 2009)を、星印は調査地1では中越地震の震央、調査地2では岩手・宮城内陸地震の震央を示す。

Fig. 1 Location of the study areas

Solid lines indicate active faults based on AIST (2009). The star marks indicate epicenters of the Chuetsu earthquake in study area 1 and Iwate-Miyagi inland earthquake in study area 2.

3. データソースと地すべり発生要因

調査地1,2において, 既存地すべり地形と地震による地すべりのデータセットを作成した。地すべりの判読は, 地震発生前後の空中写真判読及び, 一部現地調査によって実施した。判読に用いた空中写真や解析に使用したDEMのデータソースを表-1に示した。なお, 調査地2における既存地すべり地形は, 国土地理院(2009)の判読結果を使用した。ここでは, 地震による地すべりとは地すべり移動体が発生域に一部残留しているものであり, 明らかに表層崩壊や土石流等により移動したと判断されるものは含まれない。また, ここでは既存地すべり地形は, 滑落崖を含まない土砂移動体の範囲を指す。

図-2には, 調査地1と調査地2の既存地すべり地形と地震による地すべりの分布を示した。調査地1(図-2のa)では, 既存地すべり地形が1,050箇所判読され(ハスパートルほか, 2009), この内, 87箇所が中越地震時

に滑動した。調査地2(図-2のb)には, 既存地すべり地形が973箇所判読され, その内29箇所が岩手・宮城内陸地震により滑動した。

本研究では, 地震による地すべりの発生要因として地形データに注目し, 既存地すべり地形内の凹凸度を示す標高偏差, 地すべり地形周辺の侵食状況を示す縁辺侵食率と稜線や河川から地すべり地形までの距離を用いた。この他に, 地すべり地形の斜面勾配, 下端勾配(ハスパートルほか, 2009), 曲率なども, 危険度評価の有効な指標として考えられる。しかし, 斜面勾配の取得には地すべり地形の測線設定や下端勾配の場合は遷急点を同定するなど, 経験と労力が必要である。曲率はGISソフトの機能を用いて計算できるが, セル単位の凹凸を表現できるものの地すべり地形全体の凹凸を表現するものではない。これらのことを考慮し, 本研究では, 取得が容易な地形データを用いることとし, 斜面勾配, 下端勾配や曲

表-1 データソース一覧表
Table 1 A list of data sources

地震	データ	縮尺・解像度		撮影・作成年	撮影・作成機関
中越地震	空中写真	地震前	1:10,000	1975年11月, 1976年11月	国土地理院
			1:25,000	1999年6月	国土地理院
		地震後	1:10,000~12,000	2004年10月24~29日	国土地理院
	DEM	地震前	10m	1993年	北海道地図(株)
岩手・宮城内陸地震	空中写真	地震前	1:30,000	2006年10月	国土地理院
		地震後	1:10,000	2008年6月16, 18日	国土地理院
			1:10,000	2008年6月16, 18日	アジア航測(株)
	DEM	地震前	10m	1993年	北海道地図(株)

図-2 調査地の地すべり分布図

a) 中越地震; b) 岩手・宮城内陸地震(既存地すべり地形は国土地理院, 2009による)。

Fig. 2 Landslide distribution map of study areas

a) Chuetsu earthquake; b) Iwate-Miyagi inland earthquake (pre-existing landslide topographies are from GSI, 2009).

率などは考慮しなかった。また、これら以外に地質要因も考えられるが、地域性があるため用いなかった。

分析に用いたデータは次の通りである。なお、下記の項目(2)～(4)は既存の数値標高モデル (DEM) を基に ArcGISを用いて算出したもので、項目(5)は筆者らが判読して取得したデータである。

(1) 数値標高モデル (DEM): 数値標高モデルは地形の空間分布を表現できることから、地すべり発生に寄与する標高偏差、河川や稜線データの作成に用いた。本論文で使用したDEMは、北海道地図(株)による地震発生前の10mメッシュデータである。分析では、このデータを30mメッシュのラスタデータにして使用した。図-3

aに調査地1の標高値を示した。

(2) 河川から地すべりまでの距離: これは上述のDEMを用いて河川ベクターを作成し (図-3 b), ArcGISの機能を用いて河川線から既存地すべり地形の重心までの距離を求めたものである。河川ベクターは、上流域内に入るセル数を300として計算した。地すべり斜面が河川から近いほどその末端部が侵食を受けると考え、河川から地すべり地形までの距離を地すべり発生の要因とした。

(3) 稜線から地すべりまでの距離: これは上記のDEMから稜線ベクターデータを作成し (図-3 b), 稜線から既存地すべり地形の重心までの最短距離を求めたものである。稜線ベクターは、DEMの値をマイナスにし、河

図-3 調査地1の標高 (a), 稜線と河川 (b), 標高偏差 (c) 及び縁辺侵食率 (d) 分布図。

Fig. 3 Elevation (a), ridge and channel lines (b), surface roughness (c) and marginal erosion ratio map (d) of the study area1.

川ベクターと同じ方法で算出した。地震では、稜線に近いほど揺れが大きいとされる (Meunier *et al.*, 2008) ことから、稜線からの距離を地すべり発生の要因と考えた。(4) 標高偏差: 標高偏差は、既存地すべり地形内に含まれる標高メッシュの地表面標高の標準偏差値である。図-4 にその概念を示した。標高偏差は、斜面勾配と地すべり地形の面積に関係し、標高偏差が大きくなるほど勾配が急になるか、または面積が大きくなることを表す。このことにより、勾配が急になるほど地震により斜面安全率の低下が起こる確率が高くなることや、面積が大きくなるほど地すべり斜面の一部が移動する確率が高くなることが考えられる。この指標は、DEMデータにより ArcGIS の機能を用いて容易に算出できる。

(5) 縁辺侵食率: 地すべり地形の周辺長 (L) に対する侵食地形長の割合である (Suzuki *et al.*, 2010)。図-5 に縁辺侵食率の算出方法を示した。侵食地形長 (l) は、地すべり斜面末端が河川や谷に面する部分の長さ、側部が侵食谷などの谷地形を呈する谷線の長さを合計したものである。この谷線の長さは、土石流危険渓流抽出の際の 1 次谷の判定基準 (建設省河川局砂防部砂防課, 1999) と同様に、開口幅より奥行きの方が大きくなっている範囲とした。また、既存地すべり地形の周辺長は地すべり地形ポリゴンデータから ArcGIS 上で自動計算して取得し、侵食地形長は判読者の地形図や空中写真判読結果を ArcGIS 上にポリゴン化して、その長さを自動計算した。既存地すべり地形では、侵食地形長が長いほど、地すべり地形周辺の侵食が進み、地すべり斜面が不安定な状態にあると考えられる。この指標に用いる地すべり地形の侵食長は、地形図や空中写真判読で容易に抽出できる。これらのことを考慮し、縁辺侵食率を地すべり発生の要因としてモデル構築に用いた。

図-4 標高偏差の概念図

標高偏差は、地すべりブロック内に含まれる標高メッシュ (黒丸) の標高値の標準偏差値である。

Fig. 4 Image of surface relief.

It is calculated as the standard deviation of elevation mesh (solid dots) inside the pre-existing landslide topography.

4. ロジスティック回帰分析

ロジスティック回帰分析は、目的変数がカテゴリーデータで、説明変数が数量データ、カテゴリーデータおよびその混合の時に用いられる多変量解析手法である。この手法は、地震による地すべりのような発生・非発生に分けられる自然現象の発生予測に適している。

あるイベント (ここでは地震による地すべりの発生) の発生確率を P とすると、発生確率 P は次のように表せる。

$$P = 1 / (1 + e^{-Y}) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 Y はロジットと呼ばれ、オッズ $P / (1 - P)$ の自然対数であり、次の式で表せる。

$$Y = \text{Log}[P / (1 - P)] = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_n X_n \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $X_1, X_2, \dots, X_n$ は地すべりの発生に影響する説明変数である。 B_0 はロジスティック回帰モデルの定数、 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 偏回帰係数であり、 Y の値は、 $-\infty$ から ∞ に変化し、これらの説明変数と線形関係になる。発生確率 P は、地すべり発生の予測において $0 \sim 1$ で示される。説明変数の係数 B は、最尤法によって推定される。係数 B_n の有意性は、Wald 検定により 0.01 以下の場合であれば 0.01 レベルで有意であることを示す。

5. ロジスティック回帰モデルの構築と検証

5.1 モデルの構築

ロジスティック回帰分析には、SPSS (IBM) の統計処理ソフト SPSS Statistics V.19 を用いた。分析ではステップワイズ法 (forward Wald) を用いて、調査地 1 で得られたデータを元に説明変数を選定し、その偏回帰係数を求めた。目的変数は、既存地すべり地形における地震による地すべりの発生・非発生である。説明変数

図-5 縁辺侵食率の計算方法

地すべり地形の周辺長に占める侵食地形長の割合 ($l / L * 100$)。

Fig. 5 Calculating method of marginal erosion ratio.

It is calculated as the erode valley length divided by the marginal length of pre-existing landslide topography.

は, 3章に述べた河川及び稜線からの距離, 標高偏差, 地すべり地形縁辺侵食率の各項目である。

ロジスティック回帰分析では, 地すべり発生・非発生のデータ数が異なる場合, 同数のサンプルで解析する例が多い (Dai and Lee, 2002; Suzen and Doyuran, 2004; Chang *et al.*, 2007; Mathew *et al.*, 2009; Chauhan *et al.*, 2010)。本研究でも, 調査地 1 の地すべり発生箇所数が全既存地すべり地形数の約 8.0% (87/1050×100) であり, 地すべり発生数が地すべり非発生数よりはるかに少ない。このため, 分析では地すべり発生・非発生のデータ数を同数にして行った。ここで, 分析に用いられたデータとして, 調査地 1 における地震で地すべりが発生した既存地すべり地形 87 箇所と, 地すべり非発生の 963 箇所からランダムに選んだ 87 箇所を合わせた 174 箇所のサブデータセットを用意した。また, ロジスティック回帰モデルの有効性を検証するため, このサブデータセット (発生 87, 非発生 87) の中からランダムに約 75% である 130 箇所 (発生 65, 非発生 65) を抽出し, それをモデル構築に用いた。残りの約 25% のデータである 44 箇所 (発生 22, 非発生 22) は, モデルの検証に用いた。

地すべり発生要因の各項目を用いて, ロジスティック回帰分析を行った。ここでは, 変数選択にステップワイズ法の変数増加法を用いて, 自動的に有意な変数を選択した。この方法では, 有意確率 P 値が最も小さいものからモデルに投入し, 尤度比検定量の減少が有意であれば次に P 値が小さいものを投入していく。尤度比検定量の変化が有意ではなかったり, 残った変数の P 値が一定以上になると終了する。分析の結果, 標高偏差と縁辺侵食率が, 既存地すべり地形の地震時における地すべり発生に影響していることが示され, モデルに残った。これら以外の項目は, モデルから排除された。モデルに残った項目とその係数を, 表-2 に示した。得られたモデルを

式(3)に示す。

$$P = 1 / [1 + \exp\{-(0.060SR + 0.035MER - 2.630)\}] \quad (3)$$

ここで, SR は標高偏差, MER は縁辺侵食率である。

式(3)による地すべり発生予測の的中率を表-3 に示した。ここで, 地すべりの発生予測確率は, $P > 0.50$ を地すべり発生, $P \leq 0.50$ を地すべり非発生としている。地すべり発生に対する的中率は 70.8%, 地すべり非発生に対する的中率は 78.5%, 全体の的中率は 74.6% であった。

5.2 ロジスティック回帰モデルの検証

5.2.1 検証 1

式(3)の有効性を検証するため, モデル構築に使用しなかった残りのデータ (発生 22, 非発生 22) を用いて, 地すべりの発生予測を行った。予測の結果を表-4 に示す。予測の的中率は, 地すべり発生は 77.3%, 非発生は 72.7%, 全体は 75.0% であり, 式(3)の妥当性が検証された。

予測モデルの検証には ROC 曲線が用いられることが多い (Zweig and Campbell, 1993; Mathew *et al.*, 2009)。ROC は, Receiver Operating Characteristic の略称で, 第 2 次大戦のときに米国のレーダーの研究から生まれた概念である。受信者操作特性あるいは受信者動作特性などと訳されることがあるが, ここでは ROC 曲線とする。

ロジスティック回帰分析のように, 2 値の分類予測を行った場合, その観察に対し予測結果を表-5 のように示すことができる。地すべり発生の的中率が感度と呼ばれ, 全地すべり発生数に占める的中した地すべり発生数の割合で表される。また, 地すべり非発生の的中率は特異度と呼ばれ, 全地すべり非発生数に占める的中した地すべり非発生数の割合である。ROC 曲線は, 各分離値

表-2 ロジスティック回帰モデルに用いられた説明変数とその係数

Table 2 The predictors remained in the final logistic regression model and their coefficients

説明変数	B	SE	$Wald$	df	$Sig.$	$Exp(B)$
標高偏差	0.060	0.019	9.631	1	0.002	1.061
縁辺侵食率	0.035	0.010	13.336	1	0.000	1.036
定数	-2.630	0.579	20.607	1	0.000	0.072

B : 係数; SE : 標準誤差; $Wald$: カイ 2 乗; df : 自由度; $Sig.$: 有意確率; $Exp(B)$: B の指数

表-3 ロジスティック回帰モデルの的中率

Table 3 Classification summary of the logistic regression model

		予測		的中率 (%)
		地すべり発生	地すべり非発生	
観測	地すべり発生	51	14	78.5
	地すべり非発生	19	46	70.8
全体				74.6

分類値は 0.50

表-4 検証 1 中越地震の的中率

Table 4 Classification summary of validation 1 for the Chuetsu earthquake

		予測		的中率 (%)
		地すべり発生	地すべり非発生	
観測	地すべり発生	17	5	77.3
	地すべり非発生	6	16	72.7
全体				75.0

分類値は 0.50

(ここではロジスティック回帰モデルにより計算した確率値)の高い順から横軸に1-特異度(空振り率:全地すべり非発生数に占める地すべり発生予測のはずれ数の割合)を、縦軸に感度をプロットして作成したものである。ROC曲線の下部面積が大きいほどモデルの精度が良く、一般的に0.9-1.0が「優」、0.8-0.9が「良」で、0.7-0.8が「可」とされる(Craig *et al.*, 2007)。上述44の地すべり地形を対象に、ROC曲線を図-6に示した。曲線の下部の面積(AUC: Area under the curve)が精度を表す。AUCが0.804で、予測精度が「良」であることを示す。

5.2.2 補正と検証2

上述の式(3)作成時のデータによる地すべり発生率と全データによる地すべり発生率が異なることから、ロジスティック回帰式の定数の補正(高田, 2007)を行った。補正は(4)、(5)式により行い、(6)式を得た。

$$q_1/q_2 = \{s(1-r)\} / \{r(1-s)\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 r は全データによる地すべり発生率(87/1050 $\div$ 0.08)

s は式(3)作成時データの地すべり発生率(65/130 = 0.50)

$$P_m = 1 / [1 + \exp \{ -(-\text{Log}(q_1/q_2) + 0.060SR + 0.035MER - 2.630)) \}] \quad \dots\dots (5)$$

$$P_m = 1 / [1 + \exp \{ -(0.060SR + 0.035MER - 5.032) \}] \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(5)は、定数補正後のロジスティック回帰モデルである。

この補正したモデルを用いて、調査地2の地すべり発生予測を行い、その有効性を検証した。予測的中率を表-6に示す。的中率は、地すべり発生75.9%、非発生及び全体は75.0%であった。なお、ここでは、地すべりの発生・非発生は、(2)式を求めた中越地震における地すべり発生率0.08をもとに、 $P_m > 0.08$ を発生、 $P_m \leq 0.08$

を非発生としている。岩手・宮城内陸地震のデータを用いたROC曲線を図-6に示す。曲線の下部の面積AUCが0.835であり、式(6)の予測能は「良」であることが示された。これにより、補正後のロジスティック回帰モデルの有効性が確認された。

5.3 既存地すべり地形の危険度評価

上述補正後のロジスティック回帰モデルの有効性が確認されたことから、それを用いて中越地震と岩手・宮城内陸地震の調査地のデータを用いて、既存地すべり地形の地震時における地すべり発生危険度評価について検討した。

中越地震による全データを用いて、ロジスティック回帰モデル(式5)により、各地すべり地形の地震による地すべり発生確率 P_m を求めた。図-7には、地すべりの発生、非発生の相対度数及び地すべり発生率を示した。地すべり発生率は、 P_m の上昇に伴い増大しており、 P_m が0.40以上では更に増大している。そこで、地震による地すべり発生の危険度を、 $P_m \leq 0.08$ を危険度低、 $0.08 < P_m \leq 0.4$ を危険度中、 $P_m > 0.4$ を危険度高としてラン

図-6 検証1と検証2のROC曲線

Fig. 6 ROC curves of validation 1 and validation2.

表-5 予測結果、感度及び特異度

Table 5 Outcomes, sensitivity and specificity of prediction

		予測	
		Positive 地すべり発生と予測	Negative 地すべり非発生と予測
観測	True 地すべり発生	true positive(TP) 地すべり発生の的中数	false negative(FN) 地すべり非発生のはずれ数
	False 地すべり非発生	false positive(FP) 地すべり発生のはずれ数	true negative(TN) 地すべり非発生の的中数
Sensitivity 感度		TP/(TP+FN) 地すべり発生の的中数/全地すべり発生数	
Specificity 特異度		TN/(TN+FP) 地すべり非発生の的中数/全地すべり非発生数	

ク分けした。

調査地1, 2における危険度評価の結果を図-8に示した。また, 危険度評価ランクと地すべりの数, 面積などを表-7に示した。調査地1においては, 危険度高の地すべりは全体の3.6%を占め, 危険度中は27.6%であった。しかし, 面積の割合では危険度高は20.9%, 危険度

中は47.0%であり, 危険度が高いほど地すべりの規模が大きい傾向を示した。この傾向は, 岩手・宮城内陸地震の場合も同様であった。

なお, 中越地震では, 塩谷神沢川地すべり(図-8の①), 東竹沢地すべり(図-8の②)や寺野(図-8の③)などの地すべりは危険度高と予測された。

表-6 検証2 岩手・宮城内陸地震の的中率

Table 6 Classification summary of validation 2 for the Iwate-Miyagi inland earthquake

観測		予測		的中率(%)
		地すべり発生	地すべり非発生	
地すべり発生	地すべり発生	22	7	75.9
	地すべり非発生	236	708	75.0
全体				75.0

分類値は0.08

図-7 中越地震による地すべりの危険度評価ランク

Fig.7 Susceptibility rank of landslides induced by the Chuetsu earthquake

図-8 調査地の危険度評価図

Fig.8 Susceptibility map of the study areas

表ー7 調査地の地震による地すべりの危険度評価結果
Table 7 Susceptibility of landslide of the two study areas

地震	危険度	危険度高	危険度中	危険度低	合計
調査地 1	箇所数	38	290	722	1050
	全箇所に占める割合 %	3.6	27.6	68.8	100
	総面積 ha	1237.8	2782.5	1899.1	5919.4
	平均面積 ha	32.6	9.6	2.6	44.8
	全面積に占める割合 %	20.9	47.0	32.1	100
調査地 2	箇所数	21	236	716	973
	全箇所に占める割合 %	2.2	24.3	73.6	100
	総面積 ha	942.7	2798.9	1625.0	5366.6
	平均面積 ha	44.9	11.9	2.3	59.0
	全面積に占める割合 %	17.6	52.2	30.3	100

であるため、既存地すべり地形内の標高のばらつきの指標となり、結果的に地形の凹凸の程度を示すものと考えられる。縁辺侵食率は、地すべり地形の周辺の侵食の程度を定量的に表すために考えられた指標（Suzuki *et al.*, 2010）であり、今回はその有効性が確認された。既存地すべり地形縁辺の侵食が進むことにより、地すべり移動体がより不安定な状態を示していると推定される。一方、河川と稜線から地すべりまでの距離データは、モデルに採用されなかった。その理由として、稜線からの距離が近いほど地震の揺れが大きいことが期待されるものの、調査地では、距離データに有意な差がなかったことによる可能性がある。また、河川からの距離は、縁辺侵食率の効果に含まれている可能性がある。

地形のみに注目した今回の危険度評価法は、筆者らの先行研究の点数付け方法（ハスパートルほか, 2009）より定量的な評価手法になり、構築したモデルが検証され、モデルを構築した地域以外でも適用可能であることが示された。本論文の結果は、マグニチュード7前後の逆断層地震による地すべりデータから得られたものである。今後は、筆者らの先行研究結果（ハスパートルほか, 2011）の逆断層地震による地すべりの多発範囲の設定と合わせて、活断層（逆断層）周辺における既存地すべり地形を対象にした地震時の地すべり発生危険度評価が期待される。日本の主要な活断層は、長期評価されている（地震調査研究推進本部, 2011）。今後、内陸型地震の予測精度が向上し、活断層周辺の既存地すべり地形の地すべり発生危険度評価を行うことで、その結果が地すべり対策の優先順位決定の一つの指標になると期待される。

本論文では、地形要因のみを用いて、既存地すべり地形の地震による地すべり発生危険度評価を行った。しかし、地震時には既存地すべり地形以外で、初生地すべりも発生している。今後は、初生地すべりについて、地震による地すべり発生危険度評価手法を検討していく予定である。

7. まとめ

既存地すべり地形を対象に、ロジスティック回帰分析を用いて地震時の地すべり発生危険度評価を行った。その結果、地形要因として標高偏差、縁辺侵食率が地すべり発生に影響していることが明らかになった。また、中越地震による地すべりデータをもとに作成したロジスティック回帰モデルの検証を、中越地震による地すべりのデータの残りと岩手・宮城内陸地震のデータによりを行った。その結果、地すべり発生予測の精度はROC解析によればAUC（予測能）で0.8以上であり、モデルの有効性が確認された。以上の結果、今後既存地すべり地形の標高偏差と縁辺侵食率の地形データを用いて、活断層周辺の既存地すべり地形における地震時の地すべり発生危険度評価が可能であることが示唆された。

謝 辞

匿名の査読者2名の方から建設的なコメントをいただきました。記して、謝意を示す。

参考文献

- Anbalagan, R.(1992) : Landslide susceptibility evaluation and zonation mapping in mountainous terrain, *Engineering Geology*, Vol. 32, Issue 4, pp. 269 – 277.
- Ayalew, L. and Yamagishi, H.(2005) : The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan, *Geomorphology*, Vol. 65, Issues 1 – 2, pp. 15 – 31.
- 防災科学技術研究所 (2010) : 地すべり地形分布図データベース, <http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/index.html> (2010年10月28日参照) .
- Chang, K. T., Chiang, S. H. and Hsu, M. L.(2007) : Modeling typhoon-and earthquake-induced landslides in a mountainous watershed using logistic regression, *Geomorphology*, Vol. 89, Issues 3 – 4, pp. 335 – 347.
- Chauhan, S., Sharma, M. and Arora, M. K.(2010) : Landslide susceptibility zonation of the Chamoli region, Garhwal Himalayas, using logistic regression model, *Landslides*, Vol. 7, No. 4, pp. 411 – 423.
- Chigira, M., Wu, X. Y., Inokuchi, T. and Wang, G. H.(2010) : Landslides induced by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China, *Geomorphology*, Vol. 118, Issues 3 – 4, pp. 225

- 235.
- Craig, L. A., Beech, A. R. and Brown, K. D.(2007) : Methodological considerations when estimating actuarial sexual recidivism risk, *Forensic Update*, 91 (Autumn 2007), pp. 32-39.
- Dai, F. C. and Lee, C. F.(2002) : Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong, *Geomorphology*, Vol. 42, Issues 3-4, pp. 213-228.
- Dong, J. J., Tung, Y. H., Chen, C. C., Liao, J. J. and Pan, Y. W. (2009) : Discriminant analysis of the geomorphic characteristics and stability of landslide dams, *Geomorphology*, Vol. 110, Issues 3-4, pp. 162-171.
- Garcia-Rodriguez, M. J., Malpica, J. A., Benito, B. and Diaz, M. (2008) : Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression, *Geomorphology*, Vol. 95, Issues 3-4, pp. 172-191.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P. (1999) : Landslide hazard evolution: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy, *Geomorphology*, Vol. 31, Issues 1-4, pp. 181-216.
- ハスパートル・村中亮太・丸山清輝・花岡正明 (2009) : 新潟県中越地震による地すべりの発生条件の検討, *日本地すべり学会誌*, Vol. 45, No. 6, pp. 16-22.
- ハスパートル・石井靖雄・丸山清輝・寺田秀樹・鈴木聡樹・中村明 (2011) : 最近の逆断層地震により発生した地すべりの分布と規模の特徴, *日本地すべり学会誌*, Vol. 48, No. 1, pp. 23-38.
- 地震調査研究推進本部 (2011) : 活断層の長期評価, 地震調査研究推進本部ホームページ : <http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/katsu.htm> (2011年3月22日閲覧)
- Kamp, U., Growley, B. J., Khattak, G. A. and Owen, L. A.(2008) : GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region, *Geomorphology*, Vol. 101, Issue 4, pp. 631-642.
- 建設省河川局砂防部砂防課 (1999) : 土石流危険渓流及び土石流危険区域調査要領 (案), 17p.
- 小林厳雄・立石雅昭・吉岡敏和・島津光夫 (1991) : 長岡地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 132p.
- 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・地形分類及び地形変状), 国土地理院技術資料D.1-No.541.
- 国土交通省砂防部 (2005) : 平成16年新潟県中越地震に伴う斜面崩壊の発生状況について (続報), 国土交通省ホームページ : http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/05/050113_.html (2011年3月10日閲覧)
- 国土交通省砂防部 (2008) : 平成20年岩手・宮城内陸地震河道閉塞に対する調査と緊急対策の計画の概要, 砂防と治水, Vol. 41, No. 4, pp. 23-24.
- Lee, C. T., Huang, C. C., Lee, J. F., Pan, K. L., Lin, M. L. and Dong, J. J.(2008) : Statistical approach to earthquake-induced landslide susceptibility, *Engineering Geology*, Vol. 100, Issues 1-2, pp. 43-58.
- 丸井英明・八木浩司・吉松弘行・千木良雅弘・阿部真郎 (2006) : パキスタン北部地震による地すべり災害に関する調査報告, *日本地すべり学会誌*, Vol. 43, No. 2, pp. 48-51.
- Mathew J., Jha, V. K. and Rawat, G. S.(2009) : Landslide susceptibility zonation mapping and its validation in part of Garhwal Lesser Himalaya, India, using binary logistic regression analysis and receiver operating characteristics curve method, *Landslides*, Vol. 6, No. 1, pp. 17-26.
- Meunier, P., Hovius, N. and Haines, J.(2008) : Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides, *Earth and Planetary Science Letters*, doi : 10.1016/j.epsl.2008.07.020.
- 新潟県 (2009) : 平成16年新潟県中越地震による被害状況について (最終報), 新潟県報道資料, 4p.
- 大沢あつし・滝沢文教 (1992) : 日本地質図大系東北地方, 朝倉書店, 135p.
- Pack, R. T., Tarboton, D. G. and Goodwin, C. N.(1998) : The SINMAP approach to terrain stability mapping, 8th congress of the international association of engineering geology, Vancouver, British Columbia, Canada, 21-25, September.
- Pareek, N., Sharma, M. L. and Arora, M. K.(2010) : Impact of seismic factors on landslide susceptibility zonation: a case study in part of Indian Himalayas, *Landslides*, Vol. 7, No. 2, pp. 191-201.
- 産業技術総合研究所 (2009) : 活断層データベース2009年7月23日版, 産業技術総合研究所研究情報公開データベースDB095. <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index.html> (2011年3月10日参照)
- Soeters, R. and van Westen C. J.(1996) : Slope instability recognition analysis and zonation. In : Turner, K. T. and Schuster, R. L.(eds) *Landslides: investigation and mitigation*, Transportation Research Board National Research Council, Special Report, Washington, DC, pp. 129-177.
- Suzen, M. L. and Doyuran, V.(2004) : A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment method: multivariate versus bivariate, *Environmental Geology*, Vol. 45, No. 5, pp. 665-679.
- Suzuki, S., Has, B., Maruyama, K. and Ishii, Y.(2010), Risk evaluation of earthquake-induced landslide based on analysis of erosion condition on landslide marginal part, Chen Su-Chin ed. *Interpraevent2010-Symposium proceedings*, pp. 898-901.
- 高田直樹 (2007) : ロジスティック回帰分析結果の解釈・利用のための新手法 - 信用リスク・スコアリングモデルを例に -, IBMプロフェッショナル論文3, pp.71-77, ProVISION No.53/spring 2007
- 牛山素行・太田好乃 (2009) : 平成20年 (2008年) 岩手・宮城内陸地震による死者・行方不明者の特徴, *自然災害科学*, Vol. 28, No. 1, pp. 59-66.
- 八木浩司・檜垣大助・日本地すべり学会平成14年度第三系分布域の地すべり危険箇所調査手法に関する検討委員会 (2009) : 空中写真判読とAHP法を用いた地すべり地形再滑動評価手法の開発と阿賀野川中流域への適用, *日本地すべり学会誌*, Vol. 45, No. 5, pp. 358-366.
- 柳沢幸夫・小林厳雄・竹内圭史・立石雅昭・茅原一也 (1986) : 小千谷地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 177p.
- Yoshimatsu, H. and Abe, S.(2006) : A review of landslide hazards in Japan and assessment of their susceptibility using an analytical hierarchic process (AHP) method, *Landslides*, Vol. 3, No. 2, pp. 149-158. DOI : 10.1007/s10346-005-0031-y.
- Zhou, G., Esaki, T., Mitani, Y., Xie, M. and Mori, J.(2003) : Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach, *Engineering Geology*, Vol. 68, Issues 3-4, pp. 373-386.
- Zweig, M. H. and Campbell, G.(1993) Receiver-operating characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine, *Clinical Chemistry*, Vol. 39, No. 4, pp. 561-577. (原稿受付2011年3月31日, 原稿受理2011年10月17日)