

地震地すべりとそれに伴う地すべりダムの  
発生危険度評価手法の開発

Development of susceptibility zonation method  
for earthquake-induced landslide and landslide dam

平成 25 年 3 月

林 一 成



## 要 旨

本研究は、大規模地震時に甚大な被害をもたらす地すべりやそれに伴う地すべりダム（天然ダムや河道閉塞とも呼ばれる）の発生について、過去の発生事例から発生場の地形・地質・地震特性を分析し、広域からこれらの発生危険度の高い斜面を抽出する手法の開発を目指したものである。特に、堆積岩地域において大規模な地震地すべりが層理面に沿って移動するメカニズムに着目し、1/25,000 地形図や 1/50,000 地質図をベースとした広域に一定の精度で得られる地形・地質情報による地震地すべりの発生予測が事前にどの程度可能であったかを検討し、これらの危険度を評価する手法について考察した。

地震地すべりを誘発した過去の地震事例の分析から、地震地すべりの主要な運動形態は発生場の地形・地質特性を反映していることが明らかになった。すなわち、これらは①第三紀-第四紀更新世の堆積岩地域の層理面に沿った並進すべりや完落型すべり、②第四紀の火山噴出物や花崗岩のマサ化した未固結な堆積物による完落型すべりや流動性すべり、③先第三系の変成岩における堆積岩地域における完落型すべりや岩盤崩落、④火山岩分布域の浅層すべりに分類される。このうち、被害がより大きくなる大規模な地震地すべりの発生する典型的なパターンの一つとして、堆積岩地域における層理面に沿った地震地すべりが挙げられる。特に、内陸で発生する直下型地震においては震源付近で多くの地すべりが発生するため、一つの流域に複数の地すべりダムが形成されるなど深刻な被害をもたらすことが多い。本研究で検討した手法は、このような地域における効率的な防災計画の立案などに寄与することを意図している。ここでは第三系堆積岩地域における地震地すべりの典型事例として、2004年新潟県中越地震時に発生した地すべりおよび地すべりダムを分析対象とした。

広域における複数の斜面の中から斜面変動の発生危険度が高い斜面を抽出しようとする試みは1960年代ごろから行われており、これらは既存の崩壊実績を目的変数とした統計的・経験的な解析手法を用いる方法と、斜面の安全率を求める極限平衡法などの力学的な手法を広域に拡張した方法とに大きく分けられる。層理面や地質構造に関する要因を考慮した危険度評価手法はいくつかの研究事例においてみられるが、目的とする現象が層理面に沿った大規模地すべりを特に意識したものではないため、これらの要因があまり重視されない結果となっている。

本研究では、個別の斜面ごとに「斜面の傾斜方向における地層の見かけの傾斜角度 ( $\gamma$ )」を求める手法を提案し、この値と地震応答解析から求められる斜面に生じる最大せん断応力、および実際に発生した地震地すべりの規模との関係を分析した。結果として、 $10^4\text{m}^2$ 以上の面積を持つ大規模な地震地すべりの発生が、① $\gamma \leq 40^\circ$ の流れ盤斜面、および② $40\text{kN/m}^2$ 以上のせん断応力が生じる斜面に集中する傾向を示した。これらの指標を基に広域における斜面の危険度評価を実施し、両方の指標に該当する危険度 A の斜面（全体の 29%）は、大規模な地震地すべりの発生率が最も高く、 $3 \times 10^4\text{m}^2$ クラス以上の特に大規模な地すべりも起こりうる斜面とした。また、どちらかの指標に該当する危険度 B の斜面（全体の 53%）は、A ほど発生率は高くないものの大規模な地震地すべり発生の可能性のある斜面とした。どちらの指標にも該当しない危険度 C の斜面（全体の 18%）は、大規模な地震地すべりの危険性がほとんど無い斜面と評価された。

さらに、地震による地すべりダムの発生危険度が高い斜面を抽出することを目的とした地形解析を実施し、中越地震時に地すべりダムが形成された斜面の地形的特徴を分析した。その結果、大規模な地すべりダム（湛水面積が  $10^4\text{m}^2$ 以上のもの）は、①狭窄度の指標としての元地形の地上開度が  $65^\circ$ 以下、かつ②上流に  $10^6\text{m}^2$ 以上の集水面積を持つ谷において、③移動土塊の面積が  $10^4\text{m}^2$ 以上の地すべりが発生した場合に形成されていることが明らかになった。大規模な地すべりダムの発生危険箇所抽出を目的とする場合、これらの指標によって地震地すべりの発生危険度 A の斜面を解析対象全体の 6% (90/1,421 箇所) に、危険度 B の斜面を含めても全体の 14% (196/1,421 箇所) にまで絞り込むことが出来ることを示した。

今後の課題としては、今回対象とした地震地すべりとは異なるタイプの地震地すべりに関する危険度評価手法の確立、過去に地震地すべりが発生した事例に関する資料が少ない地形・地質条件（変成岩や石灰岩地域など）における研究の進展、中越地震以外の堆積岩地域における地震事例に対する本手法の適用・検証、斜面末端部の被浸食性を考慮した指標の導入、および様々な要因が複雑に関係していると考えられる地震地すべり発生メカニズムの解明の重要性を指摘した。

# 目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.1.1	はじめに	1
1.1.2	地震地すべりと地すべりダム	2
1.2	研究の目的	4
1.3	本論文の構成	4
	引用文献	6
第2章	広域的な斜面危険度評価手法	7
2.1	導入	7
2.2	広域的な危険度評価手法の分類	8
2.2.1	統計的・経験的な手法	8
2.2.2	物理的・力学的な手法	17
	引用文献	21
第3章	事例にみる地震地すべりの運動形態と地質・地形特性との対応	25
3.1	導入	25
3.2	地震地すべり事例の収集・整理	25
3.2.1	日本の事例	28
3.2.2	2011年東北地方太平洋沖地震およびその関連地震による事例	35
3.2.3	海外の事例	36
3.3	考察	37
	引用文献	40

第4章	地形・地質解析と力学的解析の連携による地震時の地すべり危険度評価手法	46
4.1	導入	46
4.2	研究方法	47
4.2.1	対象とする地震地すべり	47
4.2.2	広域に得られる地形・地質情報の整理	48
4.2.3	本研究に用いた既往の地震応答解析	49
4.3	中越地震による地すべり発生場の特徴	50
4.3.1	地震地すべり発生場の地形・地質的特徴	50
4.3.2	地震地すべり発生斜面の動的応答特性	59
4.4	地震地すべりの危険度予測手法の考察	62
4.4.1	地震地すべりが発生しやすい条件	62
4.4.2	地すべりの非発生斜面を考慮した検討	64
4.4.3	危険度評価手法の検討	66
	引用文献	71
第5章	直下型地震による地すべりダム発生危険度のゾーニング法	73
5.1	導入	73
5.2	研究方法	74
5.2.1	分析対象とした地すべりダム	74
5.2.2	地震地すべりの地形解析	76
5.3	地すべりダム発生場の地形的特徴	82
5.4	地すべりダムの発生危険度についての考察	85
5.4.1	潜在的な地すべりダムの危険度	85
5.4.2	地震地すべり危険度評価との重ね合わせ	87
5.5	地すべりダムの堆積高に関する検討	89
	引用文献	91

第6章 結論	93
6.1 本研究で得られた知見	93
6.2 今後の課題	98
引用文献	99
謝辞	i
研究業績	i

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 はじめに

日本列島は北米プレートとユーラシアプレートの2つのプレート上に位置し、海側の太平洋プレートとフィリピン海プレートが沈み込むことによって東西方向に圧縮されている。このため国土は複雑で脆弱な地質、地形条件の上に成り立っており、地震・火山の活動が活発である。また内陸には2,000箇所以上の活断層が存在する（文部科学省，2004）。さらに、国土の大半は温暖湿潤気候帯に属しているため降水量が多く豪雨や台風が発生しやすい。また、国土の7割を山地が占めており、全国のいわゆる中山間地域には多くの集落・農林業地等が存在し国民の生活の場となっている。さらに、戦後の都市の拡大に伴い大都市周辺の丘陵地には斜面に造成された住宅地が多く存在する。

このため、日本では地震や豪雨に伴う斜面災害が毎年多発している。統計によると、2010年（平成22年）の土砂災害発生件数は1,121件であり、東日本大震災や台風12号による集中豪雨など甚大な被害に見舞われた2011年（平成23年）は前年を上回る1,422件の土砂災害が発生している（図1.1）。

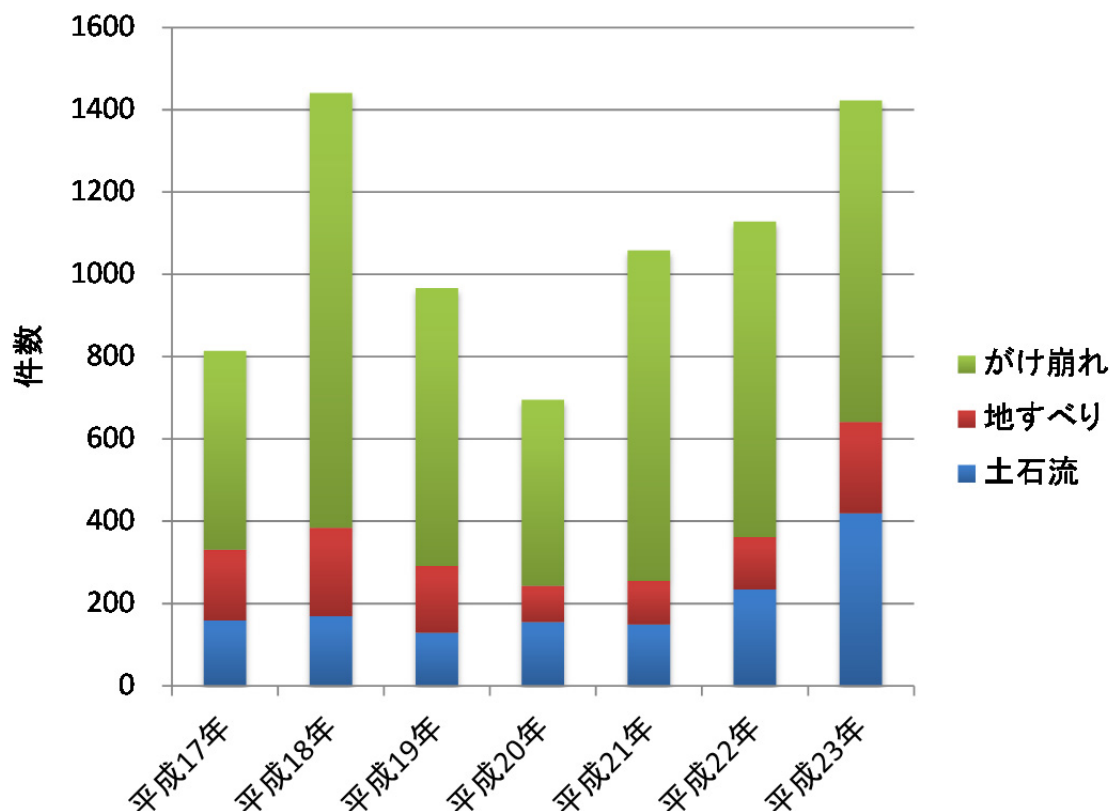


図 1.1 日本の土砂災害発生件数（国土交通省（2012）より作成）



近い将来において、少子高齢化に伴う人口の減少やそれに伴う税収の減少・社会保障費の増加が予測され、従来のようなハード対策を中心とした防災インフラへの投資は減少すると思われる。このため近年の日本の防災対策では、ハード対策に加えて各種災害への監視・情報伝達体制の強化やハザードマップの整備などによるソフト対策を含めた一体的な取り組みによって、被害を最小化するための対策が進められてきた。しかし、2011年3月11日に発生した東日本大震災では想定を大きく上回る規模の地震・津波が発生し、死者・行方不明者数は1万8千人を超え、現在も多くの人々が避難生活を余儀なくされている(2012年11月現在,警察庁,2012)。この震災において、改めて災害の想定のある方、ハード対策の限界、ソフト対策や地域防災力の強化といった課題が浮き彫りになったように思われる。

### 1.1.2 地震地すべりと地すべりダム

日本では1995年の兵庫県南部地震以降、地すべり等の土砂災害を伴う地震災害が多発している。具体的には2003年三陸南地震、同年の宮城県北部地震、2004年新潟県中越地震、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とその後の長野県北部、福島県浜通りにおける誘発地震などである。中越地震や岩手・宮城内陸地震では複数の地すべりダムが発生し大きな被害をもたらした。また海外においても2005年パキスタン北部地震や2008年中国汶川地震で大規模な地すべりダムが発生した。地震に起因するものではないが、2011年の台風12号による集中豪雨でも、紀伊半島で複数の地すべりダムが発生した。近年、これらの災害は深層崩壊とも呼ばれ社会的関心が高まっている。(写真1.1)

地すべりダムの発生は移動土塊による直接の被害のほかに、湛水湖の形成による浸水被害や決壊による洪水・土石流の発生などの二次災害を生じ、山地部の地震災害において最も深刻な被害をもたらすものの一つであるといえる。従来、地震による地すべりの発生は稀であると認識されていたこともあって、地すべり対策は降雨や融雪を誘因とするものを対象として考えられていた。これに加えて、近年地震地すべりの発生機構の解明やそれによる対応策の確立が求められている。一般に、地震地すべりは震央付近で同時多発的に短時間の間に大変位を伴って発生するので、事前に発生箇所を特定することは困難である。個別の斜面における詳細な調査や解析に先立って、広域的に個々の斜面で想定される斜面災害の規模や様式、危険度等のある程度予測することが出来れば、その後の調査計画や対策立案、あるいは緊急時の警戒避難体制の構築や防災計画の立案等において非常に有効であると考えられる。



(a) 2004 年新潟県中越地震時の旧山古志村東竹沢地区の事例

(日本地すべり学会, 2007 ; 新潟大学災害復興科学センター丸井英明教授撮影)



(b) 2011 年台風 12 号による奈良県五條市大塔町赤谷地区の事例 (国土交通省, 2012)

写真 1.1 地すべりダムの発生事例

## 1.2 研究の目的

以上のような背景を踏まえて、本研究では地震地すべりとそれに伴う地すべりダムが発生について、広域的な斜面変動の危険度評価という観点から既往研究の知見を整理し、地震地すべりおよび地すべりダム発生危険度の高い斜面を抽出する手法を検討することを目的とする。

## 1.3 本論文の構成

図 1.2 に本論文の構成フローチャートを示す。

第 1 章では、本研究の背景と目的および論文の構成について述べる。

第 2 章では、広域的な斜面変動の危険度評価についてこれまでに発表されている研究事例を整理して、主な手法の概要を述べる。また、第 3 章では、これまでに発生した地震による斜面変動について、特に発生場の地形・地質条件とそれに対応した地すべりの運動形態について述べる。第 2 章および第 3 章での検討を踏まえて、広域的な地震地すべりの危険度評価を行うに当たっての課題を整理する。

第 4 章では、比較的大規模な地震地すべりや地すべりダムが形成される典型的な事例として第三系堆積岩地域に着目し、代表的事例である中越地震時に発生した地すべりを検討対象として取り上げる。ここでは、個々の斜面において地震地すべりの素因としての地形・地質的特徴および誘因としての地震動とそれによって生じる斜面の応力状態を分析することで、地震地すべり発生斜面の特徴を明らかにする。さらに、それらの特徴を踏まえて地震地すべりの発生危険度をゾーニングする手法について考察する。

第 5 章では、数値標高モデル (Digital Elevation Model, 以下「DEM」と略す) に基づいた地形解析によって地すべりダム発生場の地形的特徴を分析する手法について述べる。さらに、第 4 章での検討結果と併せて、広域中から地震時に地すべりダムが発生する危険度の高い斜面をゾーニングする手法について述べる。

第 6 章では、本研究で得られた主要な知見を取りまとめ今後の展望を述べる。

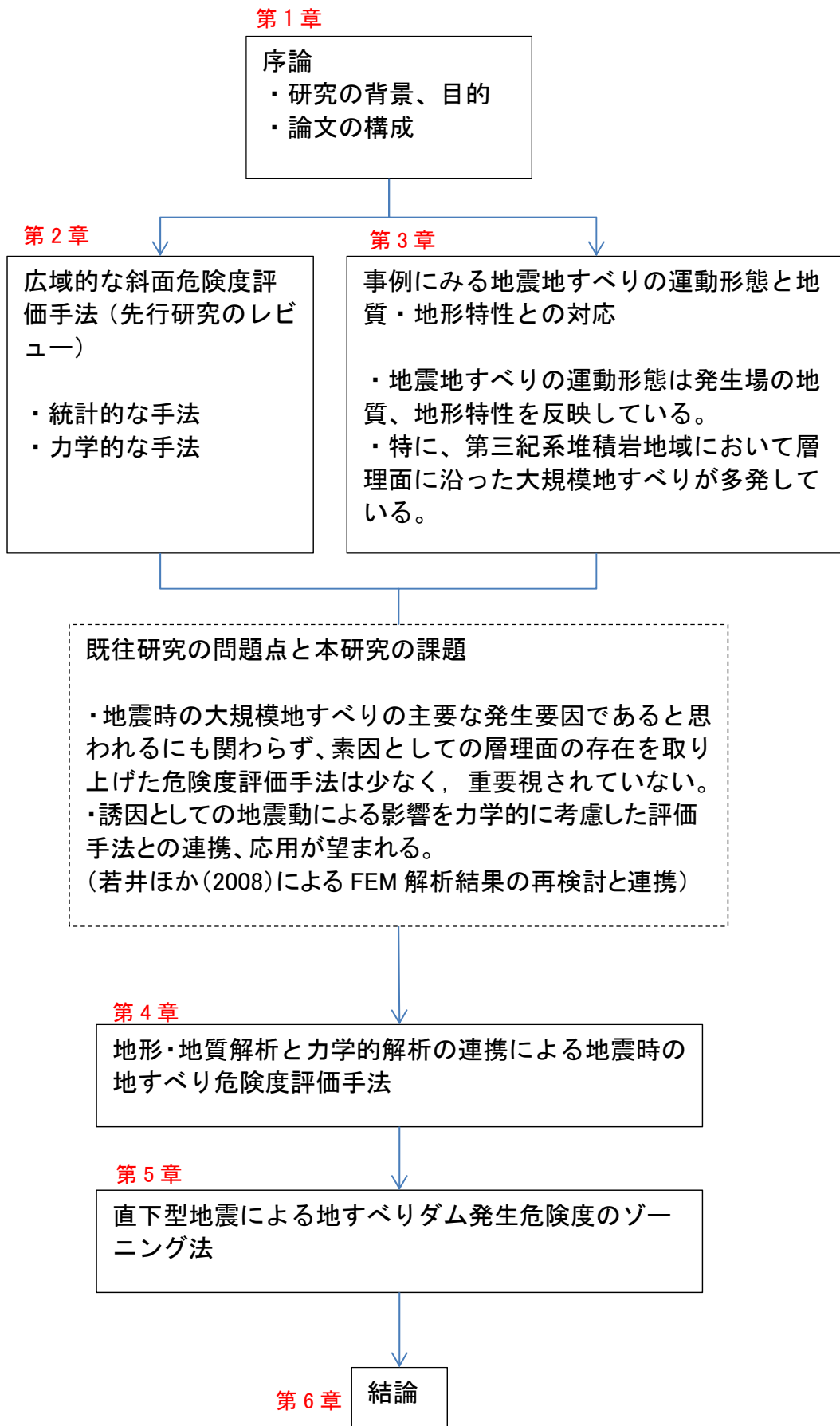


図 1.2 本論文の構成フローチャート

## 引用文献

警察庁（2012）：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置，平成 24 年 11 月 14 日広報資料，<http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo.pdf>（参照日 2012 年 11 月 20 日）

国土交通省（2012）：近年の都道府県別土砂災害発生状況，  
[http://www.mlit.go.jp/river/sabo/taisaku\\_syojoho/dosyasaigai\\_hasseijokyo.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/sabo/taisaku_syojoho/dosyasaigai_hasseijokyo.pdf)（参照日 2012 年 9 月 10 日）

国土交通省（2012）：平成 23 年度に発生した土砂災害，  
[http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h23dosha/h23doshasaigai\\_gaiyo.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h23dosha/h23doshasaigai_gaiyo.pdf)（参照日 2012 年 9 月 10 日）

文部科学省（2004）：日本の地震防災活断層，27ps.

（社）日本地すべり学会（2007）：空撮「芋川流域を中心とした地すべりダム」，中山間地における地震斜面災害－2004 年新潟県中越地震報告（I）－地形・地質編，付録 CD.

若井明彦・田中頼博・阿部真郎・吉松弘行・山邊康晴・渡邊泰介（2008）：中山間地の地震時斜面崩壊リスクを評価するための有限要素法に基づく広域被害予測システム，日本地すべり学会誌，Vol. 45, No. 3, pp. 21－32.

## 第2章 広域的な斜面危険度評価手法

### 2.1 導入

斜面変動に関する問題は、地形学・地質学・砂防工学等の分野で古くから数多くの研究が行われている。このうち、事例分析による斜面変動の量的把握や発生要因の分析に関する研究を踏まえて、将来の斜面崩壊発生予測や危険斜面を抽出しようとする試みは1960年代頃から行われている（羽田野，1974）。例えば、国土地理院（1966）や竹下（1971）は、斜面の傾斜や断面形状等の地形条件と崩壊発生率の関係を調査し、崩壊の発生しやすい地形条件を検討した。これらの発展形として、既存の崩壊実績を目的変数に、地形・地質・植生・降雨・地震動など斜面崩壊にかかわる要因を説明変数に用いる統計的な危険度評価手法が挙げられる。

一方で、極限平衡法をはじめとする力学的な手法を広域に適用して危険度評価を行った事例としては、斜面の傾斜と土層厚および土の強度定数から地震時において安全率が1.0となる臨界加速度を求めるNewmarkの式（Newmark，1965）を応用したWilson and Keefer（1985）の手法が先駆的である。また田中（1982）はWilsonらの手法を1978年伊豆大島近海地震の際に生じた斜面崩壊に適用し、実際の崩壊分布と比較している。

以上のように、広域的な斜面の危険度評価手法は、主に統計的な手法と力学的な手法の2つに分けられるが、どちらもコンピュータの性能向上や地理情報システム（Geographical Information System, 以下「GIS」と略す）の発達によって、1990年代後半から2000年代にかけて飛躍的に発展し、さまざまな手法が提案されている。

## 2.2 広域的な斜面危険度評価手法の分類

### 2.2.1 統計的・経験的な手法

斜面変動の問題について力学的な手法で広域的な解析を試みる場合、地盤の構造や物性の分布を正確に把握することが困難なこと、また計算に膨大なコストを要することなどから、広域的な斜面危険度評価の多くに統計的・経験的な手法が用いられている。これらの手法は、基本的には「過去に斜面変動が生じている場所と類似の条件に該当する斜面は危険度が高い」といった考え方に基づくものである。

#### (1) 多変量解析

多変量解析には、要因となるデータ（説明変数・独立変数）とその要因がもたらす結果のデータ（目的変数・従属変数）を用いて、ある現象の要因となるデータの重みづけを統計的に分析し結果を予測する手法や、目的変数を設定せずに要因間の共通因子や総合的特性を分析する手法がある。多変量解析で扱うデータは、例えば標高や斜面勾配などの数値で表される量的データ（数量データ）と、〇〇層や△△岩といった選択肢で表される質的データ（カテゴリデータ）があり、これらの組み合わせにより表 2.1 に示すような解析手法が挙げられる。

表 2.1 多変量解析の種類（主要なもの）

解析手法	目的変数・従属変数	説明変数・独立変数	概要
重回帰分析	量的データ	量的データ	目的変数に影響を及ぼしている要因の重みづけと目的変数の予測値を分析する手法。
数量化Ⅰ類	量的データ	質的データ	
判別分析	質的データ	量的データ	目的変数の選択肢を識別している要因を分析し、どの選択肢に属するかを予測する手法。
数量化Ⅱ類	質的データ	質的データ	
主成分分析・因子分析	—	量的データ	目的変数を設定せずに要因間の共通因子や総合的特性を分析する手法。
数量化Ⅲ類	—	質的データ	

一般に、斜面の危険度評価に用いられる場合は、斜面変動の発生・非発生を質的データとして目的変数に設定し、素因としての地形量や地質条件等、誘因としての地震加速度や降水量等といった要因を説明変数として解析を行う。このため、目的変数に質的データを用いる判別分析や数量化Ⅱ類が多く用いられる。ただし、説明変数に用いる要因の選定において要因間の関

連性を分析するために数量化Ⅰ類や数量化Ⅲ類を併用する手法（大林ほか，1990；後藤ほか，1996）も見られる。

判別分析による事例として，吉松ら（1979）は地すべり斜面の平面図から得られる勾配や等高線の乱れに関する指標（等高線の変曲点の数や振幅）を数値化し，これらの要因から安定度が最も高いⅠ型地すべり（基盤岩，風化岩型地すべり），安定度が中程度のⅡ型地すべり（風化岩と崩積土の混ざった地すべり）・安定度が最も低いⅢ型地すべり（粘性土が優性な地すべり）を判別する判別関数を求めた。さらに各要因についてⅠ～Ⅲ型地すべりを判別する判別境界値を求め，Ⅰ型地すべりに属する場合は1点，Ⅱ型地すべりに属する場合は2点，Ⅲ型地すべりに属する場合は3点を与え，すべての要因の合計得点をとることで地すべり斜面の危険度評価を試みている。また，内田ら（2004）は1995年兵庫県南部地震時における六甲山地の斜面崩壊データを用いて判別分析による地震時崩壊危険度評価を試みている。ここでは10mメッシュごとに斜面勾配等の地形量および地震動の強度の指標（最大加速度や最大速度）を整理し，要因間の相関分析やいくつかの要因の組み合わせによる判別分析の試行計算を経てもっとも正誤率が高い式として次のような判別式を提案している。

$$F = 0.075I - 8.9c + 0.0056a - 3.2 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2.1)$$

ここに， $F$ は判別得点， $I$ は勾配（°）， $c$ は平均曲率， $a$ は最大加速度（ $\text{cm/s}^2$ ）であり，判別得点が正の時は崩壊，負の時は非崩壊メッシュであると判断される。さらに崩壊発生率の違いにより判別得点を5段階に区別したハザードマップを提案している。小山内ら（2007）は2004年新潟県中越地震時に生じた斜面変動を対象に内田らの手法の適用性を検討している。その結果，①兵庫県南部地震の事例に基づく基礎式（式2.1）による判別得点は中越地震時の斜面崩壊面積率とも相関が高いこと，②中越地震の事例に基づいた中越式と基礎式の相違に顕著な差がないこと，③一方で，基礎式および中越式では中越地震時の地すべり発生危険度を予測できなかったことを示した。このほか，岩橋ら（2008）は10mメッシュごとの地形量に加えて，地質区分や地質構造，斜面方位などの質的データに（例えば，該当する場合1，しない場合0などして）ダミー変数を与えることによって多様な説明変数を用いた判別分析を実施している。ここでは，中越地震時の大崩壊（地すべり）・小崩壊および豪雨時の崩壊といった複数の現象（結果）に対して判別分析を行うことで，誘因や斜面変動の様式の違いによってパラメータの寄与



の度合いが異なることを示した。

数量化Ⅱ類は目的変数と説明変数の両方に質的データを用いる手法で、斜面の危険度評価において多くの研究事例が存在する。小橋（1974）は鉄道沿線の切土法面を対象に複数の地域（路線）において数量化Ⅱ類による解析を行った。ここでは、個々の切土法面を対象に表 2.2 に示すような要因を整理し、崩壊歴のある法面とない法面の相関比が最大となるような要因・水準ごとの判別得点を路線ごとに求めた。さらに、複数の試行線区における分析を通じて、影響の最も大きな要因はのり長、のり肩状況、土質であることが指摘された。また井東ら（1987）は中伊豆地域の斜面調査（1985年7月以来、122地点）に基づいた要因データから、要因間の独立性や崩壊予測への有用性を重回帰分析によって確認したうえで、数量化Ⅱ類による崩壊斜面と未崩壊斜面の判別を試みている。

表 2.2 数量化Ⅱ類による要因・水準の設定と判別得点の分析例（小橋，1974）

水準	1	2	3	4	5	6	7	レンジ	効果	順位
1. のり長	5m> 0.013641	10> 0.006601	15> 0.010391	20> 0.012580	25> 0.010507	25< 0.0		0.013641	8	
2. のり勾配	35°> 0.002701	40> 0.009560	45> 0.010332	50> -0.001321	55> 0.005008	55< 0.0		0.010881	9	
3. のり肩状況	雑木 0.013797	林地 0.023848	平地 0.008873	湿地 0.007871	宅地 0.006364	道路 0.0		0.023848	3	
4. のり肩勾配	10°> -0.015070	30> -0.010508	30< -0.009317	逆傾斜 0.0				0.015070	6	
5. 集水地形	凸 -0.002355	凹 -0.000318	平直 0.008513	片下り 0.0				0.010868	10	
6. 影響圏	30m> 0.014618	100> 0.012210	100< 0.0					0.014618	7	
7. 湧水(平時)	乾燥 -0.003729	湿潤 0.0						0.003729	13	
8. 湧水(降雨時)	湿潤 0.094961	湧水 -0.001207	流水 0.0					0.006158	11	
9. 防護工	裸地 0.008880	被覆地 0.004600	土留 -0.016704	のり面工 0.012096	土・法(3+4) 0.017520	土・法(2+3) -0.006109	土・法・法(2+3+4) 0.0	0.034224	2	
10. 土質	岩 -0.018830	砂利土 -0.003451	砂質土 0.000622	シルト 0.016684	粘性土 -0.010572	粘土 0.0		0.035518	1	
11. 地質	1次地盤 -0.001663	台地・段丘 -0.005152	押し出し 0.0					0.005152	12	
12. 成層タイプ	急変 -0.007573	漸増 -0.012157	深(弱) 0.010201	深(中) 0.010520	貫入不能 0.0			0.022677	4	
13. 層厚	20cm> 0.005615	50> 0.005929	100> -0.001211	200> -0.010970	200< 0.0			0.016899	5	

林地: 人工植栽地  
平地: 畑地など  
湿地: 水田など  
押し出し: 肩状地, 土石流準植地など

効果順位は少数のり面の水準を含む場合

多変量解析においてメッシュ単位の地形量を用いた先駆的な事例として、吉沢・石井（1990）の研究が挙げられる。これは 1/25,000 地形図から得られる 100m および 125m メッシュの地形量を要因データとして、過去 30 年間に発生した地すべりを対象に数量化Ⅱ類による分析を実施したものである。また、田尻ら（1996）は傾斜角などの地形量に加えて地質要因に着目している。ここでは、阿蘇火山を形成する火山岩類からなる阿蘇カルデラ北東部地域において、1/25,000 の表層地質図から得られる小分類の地質区分を用いた数量化Ⅱ類分析を実施して地質学的な立場からの考察を行っている。近年では衛星マルチスペクトルデータによる植生指標や

表層地質分類と地形量を要因とした数量化Ⅱ類分析もみられる（楠見ほか，2006）。

このほか、重回帰分析の一種であるロジスティック回帰分析を地すべりの危険度評価に用いる事例（石丸ほか，2010；ハスパートルほか，2012）もみられる。また Guzzetti et al.(1999)は過去の崩壊実績から地形・地質要因等による判別分析やロジスティック回帰分析など複数の多変量解析を行い単位斜面ごとの崩壊発生率を求めている。Pan et al.（2008）は富山県氷見地区の地すべり地形を対象に線形回帰分析による危険度評価を実施している。

## (2) ソフトコンピューティング

高精度で厳密な解析を行うハードコンピューティングに対して、不確かさやあいまいさを許容した人間の思考プロセスに似た情報処理を行う解析手法をソフトコンピューティングと呼ぶ。斜面の危険度評価に応用される代表的な手法として、あいまいさを扱うファジィ理論や脳の神経細胞（ニューロン）の構造を模したニューラルネットワーク、遺伝の法則によって解を変化させることで最適解を求める遺伝的アルゴリズムなどがある。

このうちニューラルネットワークは、ニューロンが階層構造を持ち入力層から出力層に向かって一方向にのみ信号が伝えられる階層型ネットワークと、階層の概念を持たない相互結合型ネットワークに分けられるが、一般に斜面の危険度評価に用いられているのは階層型ネットワークである（釜井ほか，2004；佐藤ほか，2005；Lee and Eangelista, 2006）。釜井ら（2004）は図 2.1 に示すようなニューラルネットワークによる予測モデルを用いて地震時における盛土斜面の不安定化予測を試みている。ニューロン間の接続には重みが付加されており、正しい解答（教師値）を出力層に与えることで出力値との誤差が最小となるような重みづけを学習するバックプロパゲーション法（誤差逆伝播法）を用いて予測モデルを構築している。また、綱木ら（1990）は複数の専門家によるブレインストーミングから地震時の斜面崩壊に関与する影響因子を定性的に見出し、ファジィ理論を適用して危険度の指標となるファジィ積分値を求め、ファジィ積分値と力学計算による斜面安全率との相関を検討している。大野（1992）は、DEM データから算出される傾斜の大きさと隣接メッシュ間の傾斜方向の変化量（差）を用いて、ファジィ推論により斜面崩壊危険度の予測を試みている。

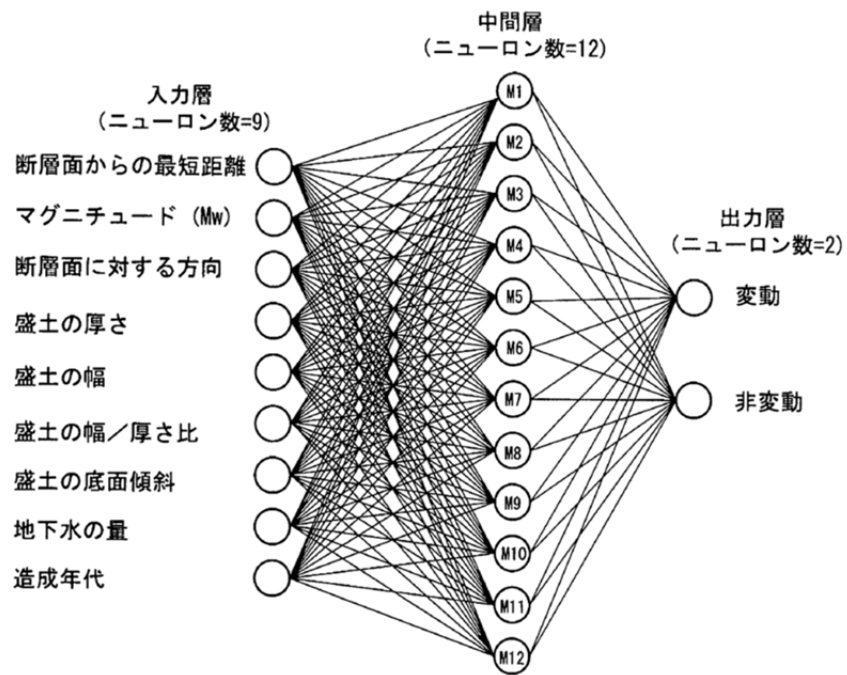


図 2.1 ニューラルネットワークによる盛土斜面変動の予測モデルの構造 (釜井ほか, 2004)

### (3) Decision-tree model

Decision-tree model は、数量化Ⅱ類など他の多変量解析と異なり要因の取捨選択を解析者が行う必要がない手法である。他の多くの統計的手法と同様に、地形・地質データを説明変数、地すべり発生の有無などを目的変数として複数の要因から現象（結果）の予測を行うものであるが、その解析過程を Tree 構造により明示することができる。このため、現象の推定過程を解釈することが可能であり、複数ある説明変数に明確な順位付けをして要因と現象の関係を定量的に示すことができる。また、仮説を必要とせずに大規模なデータから重要なパターンを発見することができる利点がある。（齋藤ほか，2007）

Saito et al. (2009) は赤石山脈南部山岳地域において複数時期の衛星画像を解析し、大規模崩壊の発生地点と山地小流域の地形特徴量および地質データから Decision-tree model による崩壊予測モデルを構築し（図 2.2），解析結果と学習期間と異なる時期の崩壊発生個所との関係を検証している。

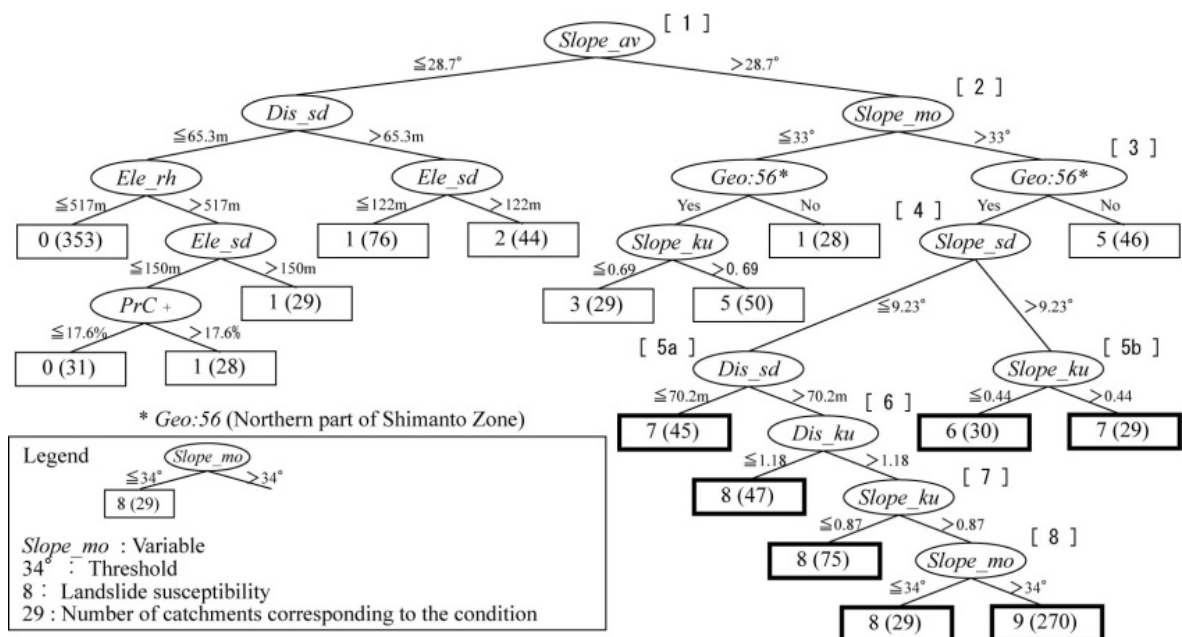


図 2.2 赤石山脈南部山岳地域における崩壊の発生しやすさを推定する Decision-tree model

(Saito et al, 2009)

ただし、変数 (Variable) の記号は Slope=勾配 Dis=浸食高 Ele=標高 \_av=平均 \_sd=標準偏差 \_ku=分布の尖度 \_mo=モード (最頻値) PrC=Profile curvature (鉛直曲率) を示す。

#### (4) AHP (階層型分析) 法

AHP (Analytic Hierarchy Process ; 階層型分析) 法は、人間が意思決定の際に判断している複数の要素を階層構造として捉え、決定の際にどの要素をどれだけ重視しているかを数値で定量的に表現し、複数の選択肢の中から合理的な意思決定を支援するために開発された手法である (図 2.3)。斜面の危険度評価に応用された事例として、従来専門的な知識と経験を持った技術者や専門家が行う空中写真判読による地すべり形の危険度判定について、判断要素とそのプロセスを一般化するとともに判定結果を定量的に表現するために用いられている (濱崎ほか, 2003 ; 八木ほか, 2008)。

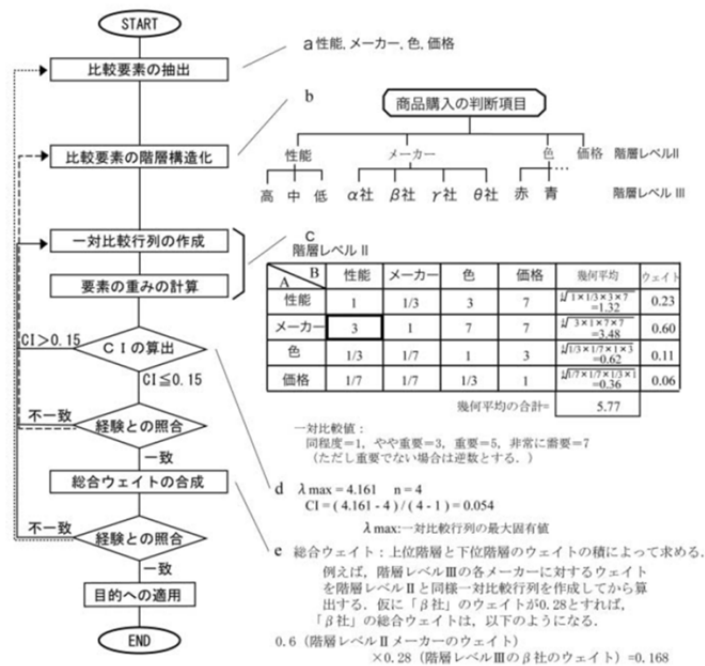


図 2.3 意思決定プロセスの AHP 法によるモデル化 (八木ほか, 2008)

## (5) Weights of Evidence

Weights of Evidence は、統計学におけるベイズの定理を応用した確率による重みづけ法である。対象地域の面積  $A$  において、対象事象（例えば、地すべり）が生じている面積を  $K$  とする。また、ある要因（例えば、地質）のあるカテゴリ（例えば、〇〇層）である範囲の面積を  $B$ 、その条件下において対象事象が生じている面積を  $L$  とすると、 $K/A$  は事前確率、 $L/B$  はある要因のあるカテゴリにおける事後確率となる。これを用いて重みづけ ( $W^+$  と  $W^-$ ) \* を求め、対象事象の発生度や要因の影響度を分析する手法である。

小林・三箇（2005）は富山県全域の地すべり防止区域の面積率を事前確率とした Weights of Evidence 解析を行い、地すべり防止区域の分布と関連が高い地形・地質・植生条件を検討している（表 2.3）。Lee and Choi (2004) は韓国における 1998 年豪雨による地すべりを対象に地形・地質・植生・土壌・土地利用等の要因に関する Weights of Evidence 解析を行い、 $W^+$  と  $W^-$  のコントラストによる地すべり発生危険度マッピングを提案している。

表 2.3 地質区分における地すべり防止区域の面積率を用いた Weights of Evidence 解析結果の例

（小林・三箇，2005）

カテゴリ	全体 指定地			全体の5%のメッシュ数: 214679			
	(メッシュ)	(メッシュ)	事前確率	Weights of evidence			
	4293578	441217	0.1028				
	カテゴリ別事後確率						
	全体	指定地	事後確率	W+	W-	contrast	f(x)
	(メッシュ)	(メッシュ)	事後確率				
沖積層	1352607	11410	0.0084	-2.600	0.402	-3.002	-3.02
洪積層	68150	1858	0.0273	-1.408	0.013	-1.421	-1.44
大桑累層	24731	0.01	0.0000	-12.554	0.006	-12.561	-12.58
藪田層	53401	0.01	0.0000	-13.324	0.014	-13.338	-13.36
稲積赤崎泥岩層	9865	0.01	0.0000	-11.635	0.003	-11.638	-11.66
音川累層	467385	31114	0.0666	-0.474	0.047	-0.521	-0.54
葛葉互層小久米砂岩層	158541	22775	0.1437	0.382	-0.017	0.399	0.38
赤浦三尾砂岩層	419786	66257	0.1578	0.492	-0.066	0.559	0.54
東別所累層	326297	70485	0.2160	0.878	-0.105	0.983	0.96
山田中凝灰岩層	37447	14597	0.3898	1.719	-0.028	1.746	1.73
黒瀬谷累層砂岩泥岩礫岩	544695	166997	0.3066	1.351	-0.372	1.723	1.70
黒瀬谷累層砂岩礫岩	601247	33730	0.0561	-0.656	0.080	-0.736	-0.76
岩稲累層	178268	19840	0.1113	0.089	-0.004	0.093	0.07
深成岩類	26603	2080	0.0782	-0.300	0.002	-0.302	-0.32
変成岩類	24555	74	0.0030	-3.635	0.006	-3.641	-3.66

f(x)の値は、数式(3)のΣ以降  
Value of f(x) is right to the Σ symbol in equation (3)

$$* W^+ = \ln \left[ \frac{(L/K)}{\{(B-L)/(A-K)\}} \right] \quad W^- = \ln \left( \frac{\{(K-L)/K\}}{[A - (B+K-L)/(A-K)]} \right)$$

による。 $W^+$  はある要因のあるカテゴリ内の対象事象の密度が対象地域全体のそれに対してどの程度高いかを示し、 $W^-$  はその逆を示す。 $W^+$  と  $W^-$  の差 (Contrast) が大きいものほど、対象事象との関連が高いと判断される。

## (6) その他

以上に述べたもののほかに、斜面変動に関する経験的事実から発生要因の検討や危険度評価手法の考察を行った事例を記載する。羽田野（1974）は傾斜と集水面積による地形滑動力示数（ $F$  値）を提案し、過去の崩壊実績から  $F$  値と危険度の関係を考察した。沖村（1983a）はこれを六甲山地の花崗岩地域において、DEM を用いた  $F$  値による広域の崩壊発生予知手法に拡張し、さらに沖村（1983b）はこれに潜在崩土層厚を考慮した二次元安定解析による安全率を組み合わせ花崗岩斜面崩壊発生の予知システムを提案した。このほか、過去の斜面変動実績を基に地形・地質・植生などの要因をもとに重みづけから危険度評価を実施している事例として、露木（1990）、前田ほか（2001）、鳥居ほか（2004）、地頭菌ほか（2006）、福本（2008）、Pareek et al.(2010)らの研究が挙げられる。また、Vahidnia et al.(2009)は Weights of Evidence, AHP, ニューラルネットワーク, 線形回帰分析の複数の統計的な手法とそれらの組み合わせによる地すべり危険度マップを作成し、解析結果の比較検討を行っている。

確率論的なアプローチである統計的な手法は、当然のことながら結果が解析対象としたデータに左右される。このため、ある地域・現象を対象とした解析で求めた判別モデルを別の地域・現象に適用するとの的中率が下がる場合が多い。あるいは、解析結果を広く応用することを考慮して解析対象を広げると、一般に判別精度は低下する。これは、斜面変動現象の発生機構が地形・地質などの地域特性を反映したものであるためと考えられる。同様に、表層崩壊を対象とした解析結果を地すべりの発生予測に適用するなど、様式や発生機構の異なる斜面変動現象を一括して扱うことは困難である。





また,  $F_s=1.0$  となる臨界加速度  $a_c$  とすると, 平衡状態は,

$$ma_c = R - L \dots \dots \dots (2.5)$$

$$a_c = (F_s - 1)g \sin\theta \dots \dots \dots (2.6)$$

と示される。土の単位重量を  $\gamma$ , 土層深を  $h$  とすると,  $mg = \gamma ha$  から,

$$F_s = \left( \frac{c}{\gamma h \sin\theta} \right) + \cos\theta \tan\phi \dots \dots \dots (2.7)$$

$$a_c = g \left[ \left( \frac{c}{\gamma h} \right) + (\cos\theta \tan\phi - \sin\theta) \right] \dots \dots \dots (2.8)$$

となる。以上より,  $c, \phi, \gamma, h$  が一様な岩石を仮定すると斜面の傾斜  $\theta$  に応じた臨界加速度  $a_c$  は図 2.5 のように表される。

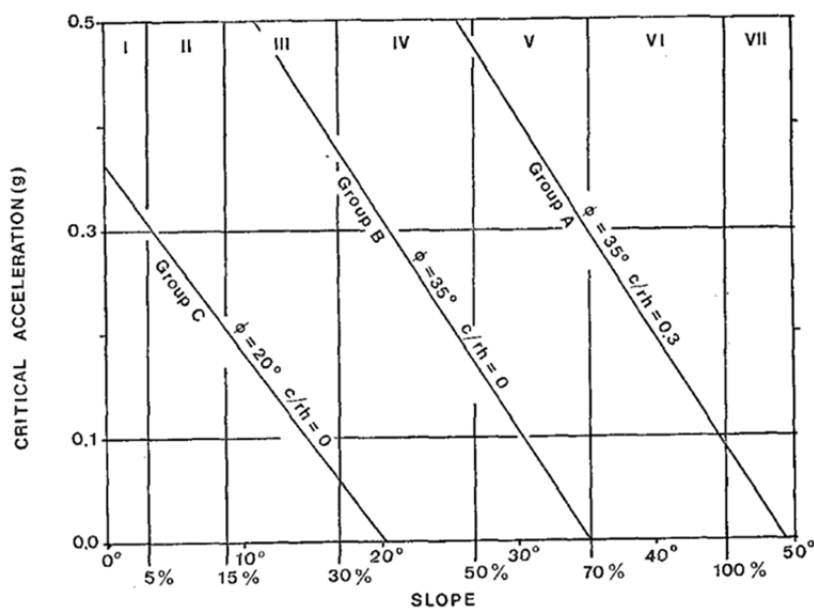


図 2.5 一様な性質持つと仮定した Group A,B,C の岩石の臨界加速度  $a_c$  と傾斜角度  $\theta$  の関係  
(田中, 1982)

ここでは、いくつかの異なる  $c$ ,  $\phi$ ,  $\gamma$ ,  $h$  パターンの区分を地質分類で代用し、地震時の墓石転倒率から求められる加速度  $0.4g$  を用いて斜面崩壊発生危険性が高くなる傾斜を地質帯ごとに求め、その範囲と実際の斜面崩壊発生個所を比較した (図 2.6)。ただし実際には  $c$ ,  $\phi$ ,  $\gamma$ ,  $h$  の値は場所によるバラツキが大きいため、将来的には表層の風化状況を考慮した地質図の必要性を指摘している。

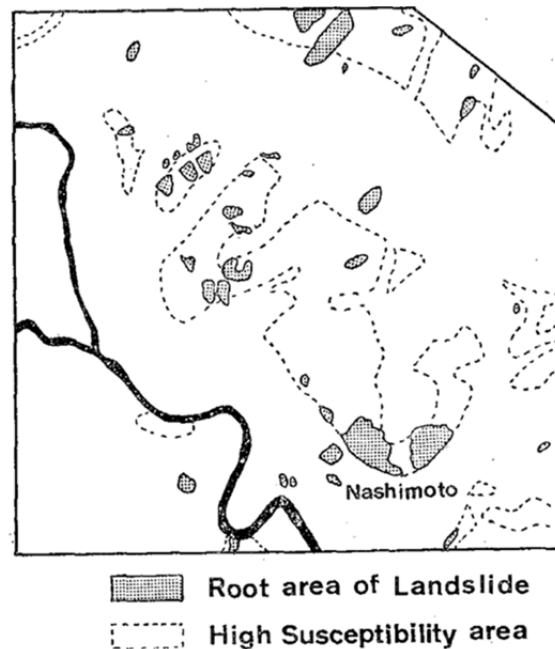


図2.6 1978年伊豆大島近海地震による地すべり発生域と危険度評価結果の比較(田中, 1982)

極限平衡法を応用した同種の事例として、高木・村井 (1994) は四国地方における地すべりの長さや深さの統計データを基に水平長さ 240m、深さ 30m の円弧すべりを仮定し、30m メッシュの DEM データを用いて各メッシュの中心を円弧すべりの中心とした二次元断面の安定計算 (Fellenius 法) を実施した。ここで、すべりの方向は各メッシュの傾斜方向に、粘着力  $C$  と内部摩擦角  $\phi$  は地質帯区分と衛星データによる土地被覆状況を基にそれぞれ仮定した。これにより、得られた安全率と実際の地すべり分布との間に一定の関係があることを示した。また、森脇・佐々木 (2007) は個々の地すべり地形を対象に、斜面長を地すべり地形の頭部・末端部に固定し、頭部と末端部を繋ぐ断面の円弧すべりの半径を変化させて最小安全率を求める方法を示した。この方法で 1:50,000 地形図に記載されたすべての地すべり地形に対して安定計算を行い、広域における地すべり地形の相対的な危険度評価を試みた。

上述のような方法に三次元極限平衡法による安定計算を導入した例として周ら (2005) の研究が挙げられる。ここでは、DEM データから発生させた谷線と尾根線で囲まれる斜面を単位斜

面として、任意の楕球体と地盤の交差面（地層の弱面）をすべり面とした Hovland 法による三次元安定計算を実施する。個々の斜面においてランダムなすべり面形状を発生させることで最小安全率を求めるような仕組みを提案している。さらに、濱崎ほか（2007）は地震時の造成地盛土斜面の危険度評価に三次元形状による側面の拘束力を考慮できる剛体ばねモデル（RBSM）を用いた三次元安定解析手法を応用したシステムを提案した。これはメッシュごとに常時の最小安全率を求められるほか、任意方向の水平震度  $kh$  を X, Y 成分に分解して作用させて地震時の安全率も求めることが出来る。検証結果として 2004 年新潟県中越地震時の造成盛土斜面の崩壊現象と相関が高いことを示した。

このほか、蔣・山上（2006）は二次元断面において安全率が 1.0 となる限界水平震度から、時刻歴加速度を反映した残留変位が得られる Newmark 法を応用し、残留変位をメッシュ単位で求めて広域の危険度評価に用いる方法を示した。

土塊を剛体として扱う極限平衡法や RBSM などの手法に対し、これを弾塑性体として扱い内部の応力関係を解く有限要素法（FEM）などの手法が挙げられる。地震など動的な現象を評価する際にはこの点が重要になると思われるが、現状では地すべりなど斜面変動現象にこれらの手法を適用した事例は、個別の斜面やひとつの山体のみを対象としたものが多い。ただし、若井ほか（2008）は地震時における広域の斜面変動危険度評価を行うことを念頭に、2004 年新潟県中越地震時に斜面崩壊が多発した芋川流域全体を対象とした FEM による地震応答解析を実施している。これは地すべり自体の安定性を評価するものではないが、地震力により斜面に生じる加速度やせん断応力の分布から、地震時に実際に生じた斜面変動の分布をある程度説明しうることを示した。すなわち、大規模な地震地すべりを生じた斜面の尾根部周辺に大きな加速度が、斜面の末端部にはすべり面の形成を促すような大きなせん断応力が生じることを指摘した。

先に述べたように、力学的な手法を広域の斜面変動危険度評価に適用しようとする場合、解析に必要なすべり面や斜面の物性に関する情報を広域的に把握することが困難である。このため、結果に重大な影響を及ぼし本来多様であるはずのパラメータ（広域での表土層（想定崩壊土の厚さ）やすべり面強度定数）を一定とするなど大胆な仮定が必要となる。あるいは、盛土など比較的一様な物性値が得られる限定された斜面を対象とすることなどを余儀なくされる。

## 引用文献

- 福本昌人 (2008) : 標高メッシュデータを用いた斜面崩壊危険度評価手法, カンキツ連年安定生産のための技術マニュアル, 第三部省力化・防災のための園地整備技術第 13 章, 農研機構, 近畿中国四国農業研究センター, pp.1-5.
- 後藤恵之輔・杉山和一・三浦国春・棚橋由彦 (1996) : 人工衛星データによる植物活性を導入した地すべりの発生予測法, 地すべり, Vol.33, No.2, pp.25-34.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P. (1996): Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy, *Geomorphology*, Vol.31, pp.181-216.
- 濱崎英作・戸来竹佐・宮城豊彦 (2003) : AHP を用いた空中写真判読結果からの地すべり危険度評価手法, 第 42 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.227-230.
- 濱崎英作・宮城豊彦・竹内則雄・大西有三 (2007) : 簡易 RBSM 三次元試行球面すべり面法を用いた造成地盛土斜面の地震被害評価法, 日本地すべり学会誌, Vol.43, No.5, pp.251-258.
- ハスバートル・丸山清輝・野呂智之・中村明 (2012) : 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, 日本地すべり学会誌, Vol.49, No.1, pp12-21.
- 羽田野誠一 (1974) : 崩壊性地形,最近の地形学 8, 土と基礎, Vol.22, No.11, pp.85-93.
- 石丸聡・田近淳・佐藤創 (2010) : ロジスティック回帰分析を用いた斜面崩壊危険度マップについて - 恵山古武井地区の例 -, 第 2 回 GIS Landslide 研究集会, P12.
- 井東澄雄・石川重雄・西木敏夫 (1987) : 斜面表層崩壊予知に関する推計学的研究, 地すべり, Vol.24, No.1, pp.10-19.
- 岩橋純子・山岸宏光・神谷泉・佐藤浩 (2008) : 2004 年 7 月新潟豪雨と 10 月新潟県中越地震による斜面崩壊の判別分析, 日本地すべり学会誌, Vol.45, No.1, pp.1 - 12.
- 蔣景彩・山上拓男 (2006) : GIS と NEWMARK 法に基づく地震時広域斜面の不安定性評価, 21 世紀の南海地震と防災, Vol.1, pp.109-118.
- 地頭菌隆・下川悦郎・寺本行芳 (2006) : 深層崩壊発生場予測法の提案-鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして-, 砂防学会誌, Vol.59, No.2, pp.5-12.
- 釜井俊孝・守随治雄・笠原亮一・小林慶之 (2004) : 地震時における大規模宅地盛土斜面の不安定化予測, 日本地すべり学会誌, Vol.40, No.5, pp.389-399.
- 小橋澄治 (1974) : 斜面の崩壊危険度分類の問題点, 地すべり, Vol.10, No.3, pp.8-14.

- 小林裕之・三箇智二 (2005) : GIS と空間統計解析を利用した地すべり危険地のマッピング, 日本地すべり学会誌, Vol.42, No.4, pp.281-292.
- 国土地理院 (1966) : 土地条件調査報告書 (京都・播磨地域)
- 楠見晴重・渡辺宏・森本裕 (2006) : ASTER 画像データを利用した斜面崩壊危険度評価に関する研究, 「材料」 (Journal of the Society of Materials Science, Japan), Vol.56, No.9, pp.833-838.
- Lee, S. and Choi, J. (2004): Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model, International Journal of Geographical Information Science, Vol.18, Issue 8, pp.789-814.
- Lee, S. and Evangelista, D. G. (2006): Earthquake-induced landslide-susceptibility mapping using an artificial neural network, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol.6, pp.687-695.
- 前田寛之・大口伸生・松本尚巳 (2001) : 北海道常呂郡留辺蘂町金華地すべり地域における地すべりハザードマッピング, 日本地すべり学会誌, Vol.38, No.1, pp.61-68.
- 森脇寛・佐々木良宜 (2007) : 斜面安定解析による地すべり地形斜面の危険度評価, 日本地すべり学会誌, Vol.44, No.1, pp.25-32.
- Newmark, N. M. (1965): Effects of earthquakes on Dams and Embankments, Geotechnique, Vol.15, No.2, pp.139-160.
- 大林成行・小島尚人・笠博義 (1990) : 斜面崩壊予測を対象とした衛星マルチスペクトルデータの実利用化について, 土木学会論文集, Vol.415, pp.71-80.
- 大野研 (1992) : 数値地形情報とファジィ理論を用いた斜面崩壊危険域の予測, 小特集・コンピュータの高度利用-3, 農業土木学会誌, Vol.60, No.11, pp.1027-1030.
- 沖村孝 (1983a) : 地形要因からみた山腹崩壊発生危険度評価の一手法, 新砂防, Vol.35, No.3, pp.1-8.
- 沖村孝 (1983b) : 花鬮岩地域における表層崩壊発生予知の一システム, 新砂防, Vol.35, No.4, pp.14-20.
- 小山内信智・内田太郎・野呂智之・山本悟・小野田敏・高山陶子・戸村健太郎 (2007) : 既往崩壊事例から作成した地震時斜面崩壊発生危険度評価手法の新潟県中越地震への適用, 砂防学会誌, Vol.59, No.6, pp.60-65.
- Pan, X., Nakamura, H., Nozaki, T. and Huang, X. (2008): A GIS-based landslide hazard assessment by multivariate analysis, Journal of the Japan Landslide Society, Vol.45, No.3, pp.187-195.

- 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, pp.191-201.
- 齋藤仁・中山大地・松山洋 (2007) : Decision tree による地すべり発生流域の推定とその検証, 日本地すべり学会誌, Vol.44, No.1, pp.1-14.
- Saito, H., Nakayama, D. and Matsuyama, H. (2009): Comparison of landslide susceptibility based on a decision-tree model and actual landslide occurrence: The Akaishi Mountains, Japan. *Geomorphology* 109, 108-121
- 佐藤浩・関口辰夫・神谷泉・本間信一 (2005) : 斜面崩壊の危険度評価におけるニューラルネットワークと最尤法分類の比較, 日本地すべり学会誌, Vol.42, No.4, pp.293-302.
- 田尻要・中山洋・荒牧昭二郎・今泉繁良 (1996) : 火山性地域における斜面崩壊予測のための地質要因の評価-地盤数値情報データベースを用いた解析-, 応用地質, Vol.37, No.5, pp.2-11.
- 高木方隆・村井俊治 (1994) : DTM 及び衛星データを用いた地すべり危険地域の抽出, 地すべり, Vol.30, No.4, pp.28-35.
- 竹下敬司 (1971) : 北九州市門司・小倉地区における山地崩壊の予知とその立地解析, 福岡県林務部・福岡県林業試験場.
- 田中耕平 (1982) : 地震によるランドスライド発生予測図, 地すべり, Vol.19, No.2, pp.12-19.
- 鳥居宣之・沖村孝・杉本和彦・小田聖也 (2004) : 局所地形量を用いた地震後の降雨による崩壊危険斜面の抽出手法, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, Vol.8, pp.23-38.
- 網木亮介・吉松弘行・大浦二郎 (1990) : ファジィ理論による地震時の斜面崩壊予測, 地すべり, Vol.27, No.3, pp.19-25.
- 露木聡 (1990) : ②崩壊危険度評価, 小特集: 林業とリモートセンシング, IV.環境問題, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.10, No.3, pp.443-451.
- 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, No.204.
- Vahidnia, M. H., Alesheikh, A. A., Alimohammadi, A. and Hosseinali, F. (2009): Landslide hazard zonation using quantitative methods in GIS, *International Journal of Civil Engineering*, Vol.7, No.3, pp.176-189.
- 若井明彦・田中頼博・阿部真郎・吉松弘行・山邊康晴・渡邊泰介 (2008) : 中山間地の地震時斜面崩壊リスクを評価するための有限要素法に基づく広域被害予測システム, 日本地すべり

学会誌, Vol.45, No.3, pp.207-218.

Wilson, R.C. and Keefer, D.K. (1985): Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding, U.S.G.S. Professional Paper 1360, pp.317-346.

八木浩司・檜垣大助・(社) 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 (2008) : 空中写真判読と AHP 法を用いた地すべり地形再活動危険度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.

吉松弘行・清水清文・坂元靖秀 (1979) : 地すべり斜面の地形解析による地すべりの判読と危険度判定, 地すべり, Vol.15, No.4, pp.12-19.

吉澤孝和・石井哲 (1990) : 地形図から得られる地形情報を用いた地すべり危険地域の判別に関する基礎的研究, 地すべり, Vol.27, No.3, pp.1-10.

周国云・江崎哲郎・謝漢文・佐々木靖人 (2005) : GIS を用いた山地地形から三次元すべり危険斜面を抽出する方法の開発と適用, 応用地質, Vol.46, No.1, pp.28-37.

## 第3章 事例にみる地震地すべりの運動形態と地質・地形特性との対応

### 3.1 導入

本章では、主として日本において自然災害が科学的に記録されはじめた 1868 年以降の大規模地震に伴う地震地すべりの研究事例をとりまとめ、地震地すべり発生場の地質・地形、地震地すべりの運動形態、および誘因となった地震の規模と震央から地震地すべり発生位置までの距離に着目して分析を行った。結果として、地震地すべりの運動形態は発生場の地質・地形特性を反映していることが確認された。また、地震の規模によって地震地すべりが発生しうる範囲が規制されることも明らかになった。

### 3.2 地震地すべり事例の収集・整理

日本において地すべりを伴って発生した主な地震は、科学的な論文として記録が残る 1872 年の浜田地震以降、2011 年東北地方太平洋沖地震およびその関連地震までの数は 33 回にのぼる（図 3.1, 表 3.1）。その多くがマグニチュード（以下、M と略す）6 以上で、最大は 2011 年東北地方太平洋沖地震の M9.0 である。地震地すべりの発生地点付近の想定震度はほとんどが震度 5 以上で、最大は 1891 年濃尾地震や 1995 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震などでの震度 7 とされる（宇佐美, 1996 ; 気象庁, 2008 など）。地震のタイプは約半数が内陸直下型である。これまでの地震地すべりが発生した地点の地質は、第四紀の未固結な火山噴出物の堆積域、第三紀～第四紀更新世における層理の発達した堆積岩域、花崗岩もしくは火山岩の分布域、先第三紀の変成岩や非変成の堆積岩分布域に発生している。以下、地震地すべりが発生した地域の地質毎にその特徴をまとめる。



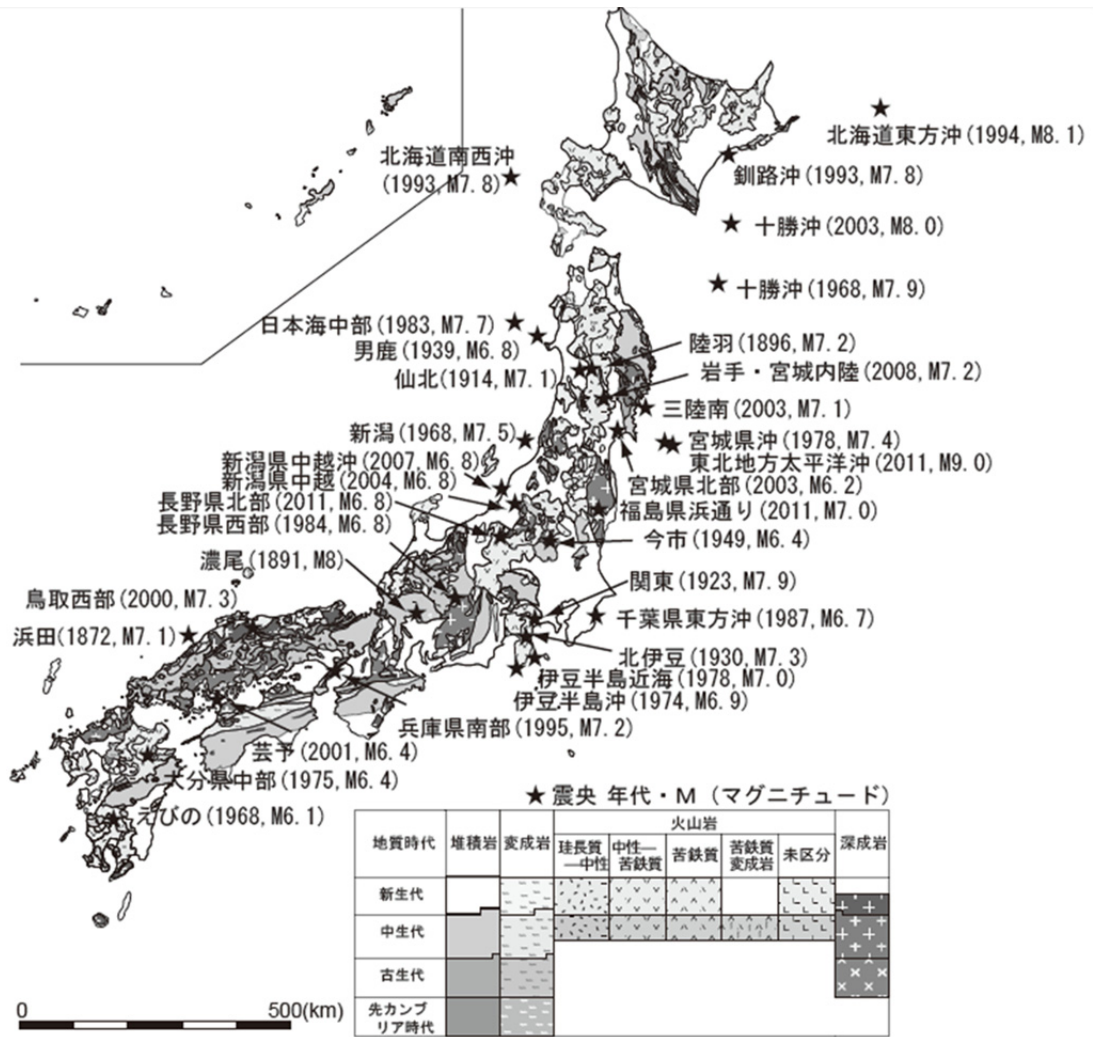


図 3.1 地震地すべりを伴った近代の主な地震と地質分布

表 3.1 日本の地震と地震地すべり (1872 年以降) 1/2

地震名 主な被災 県	発生日月 マグニチュード 震度 (地震発生場)	主な地震地すべり被災 地	地すべり運動形態および特徴	地すべり地およびその周辺 の主な地質	震央から の距離 (km)	主な引用文献
浜田地震 (島根県)	1872.3.14 M7.1 震度 6 (海洋)	大江高山南方	大規模完落型すべり	第三紀層	30	今村 (1913a)
		上柿田・柿田・椿 邑知郡江川付近 (桜江)	完落型浅層すべり	白亜紀流紋岩・凝灰岩	40	藤森ほか (1990)
濃尾地震 (岐阜県)	1891.10.28 M8.0 震度 6~7 (内陸)	根尾谷断層沿い 根尾谷水島村	断層に沿って大小規模の完落 型すべり多発 石灰岩の岩盤崩落あり	中生代の堆積岩・変成岩	ほぼ直 上	中央防災会議 (2006) 大森 (1894) 田畑ほか (1999)
陸羽地震 (秋田県)	1896.8.31 M7.2 震度 6 (内陸)	真昼岳を中心に和賀山 系一帯	尾根部斜面の完落型浅層すべ り多発	中新世前期 安山岩, 流紋岩, 凝灰岩	30	阿部ほか (1997) 阿部ほか (2006) 今村 (1913b)
仙北地震 (秋田県)	1914.3.15 M7.1 震度 6~7 (内陸)	仙北郡大沢郷村	層理面に沿った初生岩盤並進 すべり (8カ所) ケスタ地形・尾根地形に発生	鮮新世シルト岩 (砂岩挟在)	10	阿部・高橋 (1997) 阿部ほか (2006)
関東地震 ( 神奈川県)	1923.9.1 M7.9 震度 6 (相模湾内)	丹沢山系	大小規模完落型すべり	中新世凝灰岩および石	10~15	井上 (2006)
		熱海線根府川駅背後	大規模完落型すべり, 土石流	英閃緑岩 (尾根部マサ化) - 丹沢層群 -	20	須田ほか (2004)
北伊豆地 震 (静岡県)	1930.11.26 M7.3 震度 6 (内陸)	梶山	流動性地すべり (土石流)	梶山: 火山灰	17	田方郡町村会 (1981)
		北狩野村大野地区旭山	大規模完落型すべり		17	
		中大見村梅木	完落型すべり		17	
		上大見村原保	完落型すべり		17	
		錦田村	大規模完落型すべり		8	
男鹿地震 (秋田県)	1939.5.1 M6.8 震度 6 (内陸)	北浦町	層理面に沿った初生岩盤並進 すべり	鮮新世砂岩・泥岩互層	25	阿部ほか (2006)
今市地震 (栃木県)	1949.12.26 M6.4 震度 6 (内陸)	行川 (滑川)・黒川・大 芦川沿い	稜線に近い部分で表土の小規 模表層すべり多い。傾斜 50~ 60° に集中。すべり面深度は 3m 以下。表面の軽石層をすべ り面とするものもある。	風化花崗岩 (マサ) 風化古生層 火山噴出物 (軽石)	2~10	新澤 (1952)
新潟地震 (新潟県)	1968.2.21 M7.5 震度 6 (海洋)	岩船地方山地内 (早 川・大町・普川・桑川・ 勝木川流域) 村上市北 部	小規模浅層すべり多い。 尾根筋, 山麓上腹に多く中腹に 少ない。	花崗岩	40 km 以 内, 70% は 30 km 以 内	鈴木ほか (1967) 尾張・駒村 (1983)
		会津盆地	シラス崩落多い。	火砕泥流堆積物		
えびの地 震 (宮崎県)	1968.2.21 M6.1 震度 6 (内陸)	京町南方の丘陵地帯	丘陵地の砂質堆積物, 尾根状突 出部に小規模完落型すべり多 発 傾斜 40~60° のシラス表層完 落型すべり 二次シラスと泥質部の境界で 縦亀裂に沿って並進すべりが みられる。	火山性堆積物 (加久藤層群) (シラス)	5~10	平尾・大久保 (1971) 安藤 (1971) 黒田 (1971)
十勝沖地 震 (青森県)	1968.5.16 M7.9 震度 5 (海洋)	青森県尻内~五戸間	天狗岳段丘の分布範囲で崩落 や流動性すべり	段丘上の十和田火山灰	185	青森県防災部 (2009)
伊豆半島 沖地震 (静岡県)	1974.5.9 M6.9 震度 5 (伊豆半島南 端)	南伊豆町中木地区	海蝕崖の崩落多い	スコリヤ層	6	中村 (1974)
			尾根部尖端凸部の完落型表層 すべり多い。一部完落型並進す べりが見られる	蛇石火山噴出物の変質部 中新世後期~鮮新世の安山 岩質凝灰岩の変質部 ハロサイト化した白色凝灰 岩にすべり面	15	大八木 (1974)
大分県中 部地震 (大分県)	1975.4.21 M6.4 震度 4 (内陸)	下直野~阿蘇野地域	急崖, オーバーハング部分の崩 落多発	鮮新世の湖沼堆積物 (阿蘇 野層) およびこれを覆う溶 結凝灰岩	10	衣笠・曾屋 (1975)
伊豆大島 近海地震 (静岡県)	1978.1.14 M7.0 震度 5 強 (海洋)	河津町見高入谷地区 東伊豆町稲取	岩層なだれ 流動性すべり	火山性堆積物 浮石質凝灰岩 未固結粗粒の安山岩質 火山礫	20~25	中山・古谷 (1978) 徳山ほか (1978) 千木良 (1995) 大草ほか (1978)
宮城県沖 地震 (宮城県)	1978.6.12 M7.4 震度 5 強 (海洋)	仙台市南部丘陵地 (緑 ヶ丘団地) 仙台市北部丘陵地 (泉)	造成地の回転すべり	鮮新世砂岩・泥岩とこれを 覆う第四紀のローム・礫。 すべり面はその境界。 滝口層泥岩・亀岡層亜炭挟 在の凝灰質砂岩	120	植原ほか (1978)
日本海 中部地震 (秋田県)	1983.5.26 M7.7 震度 5 (男鹿沖)		自然斜面以外の小規模浅層す べり多い		80 ~ 100	秋田県 (1984)
長野県西 部地震 (長野県)	1984.9.14 M6.8 震度 4 (内陸)	御岳山頂	大規模完落型回転すべり (約 12 km 流下して伝上川・濁川・王 滝川) → 岩層なだれ (厚さ最 大 150m, 平均勾配 24~26°, 流下速度 80m/s)	軽石質火山灰	12	植原ほか (1985) 松田・有山 (1985) 井口 (1985)
千葉県東 方沖地震 (千葉県)	1987.12.17 M6.7 震度 5 (海洋)	九十九里低地と下総台 地との境界成東町津辺	ルーズな風化層の浅層すべり	下総層群: 砂・泥・礫	30	釜井 (1989) 田中・森脇 (1988)
		上総丘陵北東部長南町		下総層群: 砂岩・泥岩互層	25	中山 (1988)
釧路沖地 震 (北海道)	1993.1.15 M7.8 震度 6 (海洋)	釧路市緑ヶ丘 標茶町茅沼別荘	谷埋盛土住宅地の流動性すべ り 湿原上の造成 (盛土) のすべり (泥炭層がすべり面の可能性 あり)	盛土 軽石流堆積物	10	井口 (1994)
北海道南 西沖地震 (奥尻島)	1993.7.12 M7.8 震度 5 (海洋)	奥尻島	小規模風化岩回転すべり 一部大規模岩盤並進すべり発 生	鮮新統凝灰質砂岩・凝灰角 礫岩がキャップロック状	70	田中 (1994)

表 3.1 日本の地震と地震地すべり (1872 年以降) 2/2

地震名 主な被災 県	発生日 マグニチュード 震度 (地震発生場)	主な地震地すべり被災 地	地すべり運動形態および特徴	地すべり地およびその周辺 の主な地質	震央から の距離 (km)	主な引用文献
北海道 東 方沖地震 (北海道、 北方四島)	1994.10.4 M8.1 震度 6 (海洋)	色丹島	岩盤崩落、岩屑崩落、表層すべり、初生大規模岩盤並進すべり (3か所)	白亜紀硬質頁岩・細粒砂岩五層 (強風化凝灰岩薄層挟在) 流れ盤	80~90	田近 (2009)
		釧路市中標津	谷埋め盛土住宅地すべり:急勾配斜面のすべり	軽石	250	箕輪ほか (1995)
兵庫県 南 部地震 (兵庫県)	1995.1.17 M7.2 震度 7 (内陸)	六甲山地	小規模表層すべり多い	風化花崗岩	30	沖村 (1995)
		西宮市仁川	大規模流動性すべり	花崗岩 (基盤)、大阪層群、花崗岩礫などの盛土		横山・菊山 (1997)
		宝塚市ゴルフ場	高盛土急斜面の流動性すべり	盛土 (粗粒砂)、すべり面は大阪層群の層理面の可能性あり		日本地すべり学会 (1995)
鳥取県 西 部地震 (鳥取県)	2000.10.6 M7.3 震度 6 強 (内陸)	日野町本郷地区	表層すべり 岩盤崩落 (トップリング) 河岸段丘の完落型浅層すべり 多い	風化花崗岩、粘板岩 玄武岩溶岩	5~10	久保田 (2002) 山下 (2002) 内田ほか (2002)
芸予地震 (広島県)	2001.3.24 M6.4 震度 6 弱 (瀬戸内海)	呉市の場町 広島大学	尾根地形、節理に沿った崩落 盛土斜面の小規模流動性すべり	花崗岩 盛土 (粘土混じり砂質土)	20~50	佐々ほか (2001) 釜井・守随 (2004)
十勝沖地 震 (北海道)	2003.9.26 M8.0 震度 6 弱 (海洋)	端野町協和 (震度 5 弱)	液状化に伴う側方流動	軽石流堆積物	230	田近ほか (2003) 伊藤ほか (2004)
三陸南地 震 (宮城県)	2003.5.26 M7.0 震度 6 弱 (海洋)	栗原市築館	流動性すべり	谷埋め盛土 (軽石質火山灰-シラス)	70	日本地すべり学会調査団ほか (2003) 汪ほか (2003)
宮城県 北 部の地震 (宮城県)	2003.7.26 M6.2 震度 6 強 (内陸)	河南町 (震度 6 弱)	層理面に沿う岩盤並進すべり (尾根突端部)、すべり面は砂岩に挟在する泥質粘土薄層。	中新世中粒砂岩	10	小松ほか (2004)
新潟県 中 越地震 (新潟県)	2004.10.23 M6.8 震度 7 (内陸)	山古志村 (現長岡市)	完落型岩盤並進すべり。再活動地すべりも多発。ケスタ・尾根地形に多く発生。完落型回転すべり多数 (丘陵地尾根部、ケスタ受け盤斜面)	鮮新世砂岩・泥岩五層、風化砂岩、礫岩	5~10	日本地すべり学会 (2007) 木下ほか (2009) ハスパートルほか (2009) 下川・稲垣 (2009)
新潟県 中 越沖地震 (新潟県)	2007.7.16 M6.8 震度 6 強 (海洋)	柏崎市聖ヶ鼻	完落型並進岩盤すべり ケスタ、尾根張り出し地形	中新世砂岩・泥岩五層	30	野崎 (2008)
岩手・宮城 内陸地震 (宮城県、 岩手県)	2008.6.14 M7.2 震度 6 強 (内陸)	栗原市耕英地区	小規模・大規模完落型回転すべり多発	主に第四紀火山堆積物	11	平成 20 年度岩手・宮城内陸地震 4 学共同協会東北合同調査団 (2009) 森屋ほか (2010)
		荒砥沢地すべり	大規模岩盤並進すべり	第四紀更新世、砂岩・泥岩五層および軽石質凝灰岩とこれを覆う溶結凝灰岩	14	
東北地方 太平洋沖 地震 (東北～ 北関東)	2011.3.11 M9.0 震度 7 (海洋)	松島湾周辺	新旧海食崖での崩壊	中新世シルト岩・凝灰岩	150	日本地すべり学会 (2012)
		仙台市	宅地盛土斜面の地すべり	谷埋め盛土、腹付け盛土	180	
		福島県中通り～栃木県北部・東部	流動性の高い地すべり	更新世の火山砕屑物すべり面は厚いローム成層中の弱層	250 ~ 300	
長野県 北 部地震 (長野県、 新潟県)	2011.3.12 M6.8 震度 6 強 (内陸)	長野県栄村・新潟県津南町、十日町市	段丘崖などの受け盤斜面で崩壊、流れ盤斜面では地すべりタイプの変動。	後期中新世～鮮新世の堆積岩を火山岩・火砕岩が覆うキャップブロック構造	10 km 以内	日本地すべり学会 (2012)
福島県 浜 通りの地 震 (福島県)	2011.4.11 M7.0 震度 6 弱 (内陸)	いわき市	大規模な地すべり・崩壊 小規模な崩壊	古第三系砂岩・泥岩五層の流れ盤斜面 変成岩 (結晶片岩)	20 km 以内	日本地すべり学会 (2012)

### 3.2.1 日本の事例

#### (1) 第四紀の未固結な火山噴出物堆積地域

1930 年北伊豆地震、1974 年伊豆半島沖地震、1978 年伊豆大島近海地震、1968 年十勝沖地震、1993 年釧路沖地震、1994 年北海道東方沖地震、2003 年十勝沖地震など伊豆半島周辺や北海道沖合の地震に伴う地震地すべりのほか、1949 年今市地震、1968 年新潟地震、1968 年えびの地震、1984 年長野県西部地震、2003 年三陸南地震、2008 年岩手・宮城沖地震などで、未固結な火山噴出物 (火山灰、シラス、スコリアなど) による浅層の完落型すべり、流動性すべり (大草ほか、1978) が多く発生している (図 3.2, および写真 3.1)。また、火山性噴出物による盛

土部分のすべりも被害を大きくしている（井口，1994）。このほかに，長野県西部地震では御岳の大規模崩壊性すべりによる移動地塊が岩屑なだれとなって 12km 程度流下し，大滝川に流入した（井口，1985）。

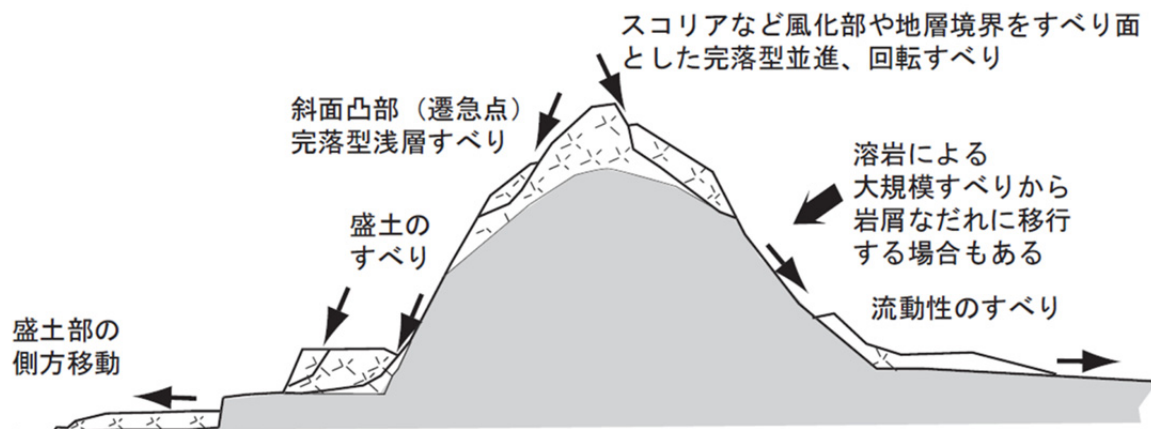


図 3.2 第四紀未固結火山噴出物堆積域の地震地すべりの形状

(火山灰，軽石，スコリア，シラスなど)



写真 3.1 2003 年三陸南地震時の宮城県築館町の流動性すべり

(移動体は軽石質火山灰の盛土部分)

PPG 空撮（2003.5.27）：（有）宮城エンジニアリング

## (2) 第三紀層～第四紀更新世の堆積岩地域

1914年秋田県仙北地震では鮮新世の砂岩薄層を挟在するシルト岩層の分布域で8カ所の初生的な岩盤並進すべりが発生し、一部の小河川で地すべりダムが形成されている（阿部・高橋，1997）。また、ここでの上戸沢地区で発生した尾根を切断するような岩盤並進すべり（写真3.2）と、布又地区で発生したケスタ上での完落型岩盤並進すべり（写真3.3）はいずれも2004年新潟県中越地震時の一ツ峰沢地すべりと横渡地すべりに極めて類似している（阿部ほか，2006；高橋ほか，2005）。1939年秋田県男鹿地震でも鮮新世の砂岩・泥岩・シルト岩の細互層の分布域で初生岩盤並進すべりが発生し、集落の一部が移動地塊とともに海に向かって移動したことが知られている（阿部ほか，2006）。1993年北海道南西沖地震時の奥尻島における鮮新世凝灰質砂岩分布域での大規模な岩盤並進すべりの発生が報告されている（田中，1994）。2004年新潟県中越地震や2007年新潟県中越沖地震では、鮮新世の砂岩・泥岩・シルト岩互層の分布域で岩盤並進地すべりや、完落型回転すべり、浅層すべりが多発したことが知られている。これらの地すべりは初生型もしくは再活動型の双方の形態で発生している（（社）日本地すべり学会，2007など）。2008年の岩手・宮城内陸地震時には、更新世の火山カルデラ起源の砂岩・泥岩・シルト岩互層部分をすべり面とし、溶結凝灰岩をキャップロックとした長さ1,300mにおよぶ大規模な岩盤並進すべり（荒砥沢地すべり）が約300m移動した（森屋ほか，2010など）。これら第三紀層に発生した並進すべりの多くは砂岩・シルト岩・泥岩互層の層理面をすべり面としてケスタ地形や尾根地形に発生している場合が多い（図3.3）。また、概ねマグニチュード7クラスの直下型地震において、震度5程度から小規模な地すべりが局所的に発生し始め（阿部・高橋，1997；阿部ほか，2006），そして表3.2に示されるように震度6程度から岩盤並進すべりの発生が見られるようになる。



写真 3.2 1914 年仙北地震による上戸沢地すべり（尾根を寸断する岩盤並進すべり）

大橋（1915）原図，撮影は 1914 年

阿部ほか（2006）より



Sss: シルト質砂岩

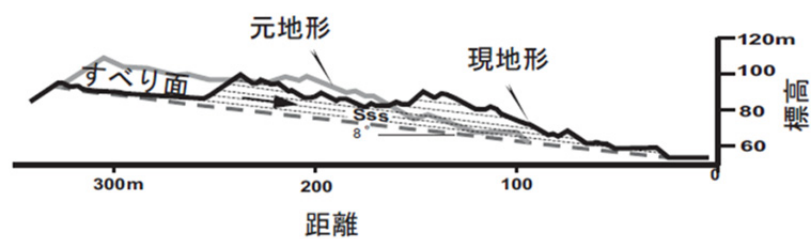


写真 3.3 1914 年仙北地震により布又地区に発生したケスタ上の岩盤並進すべり

写真は秋田県西仙北町大沢郷村（当時）地区公民館所有，撮影は 1914 年

阿部ほか（2006）より

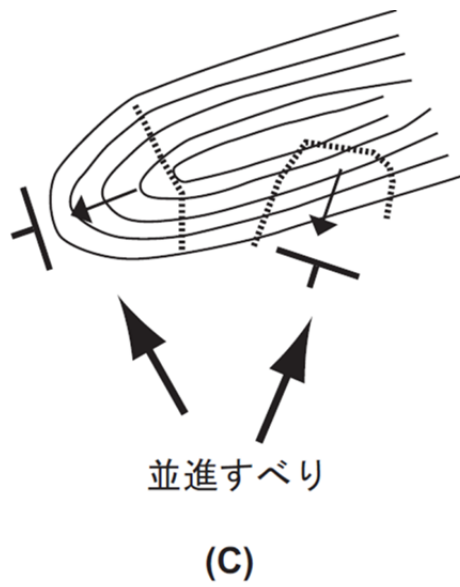
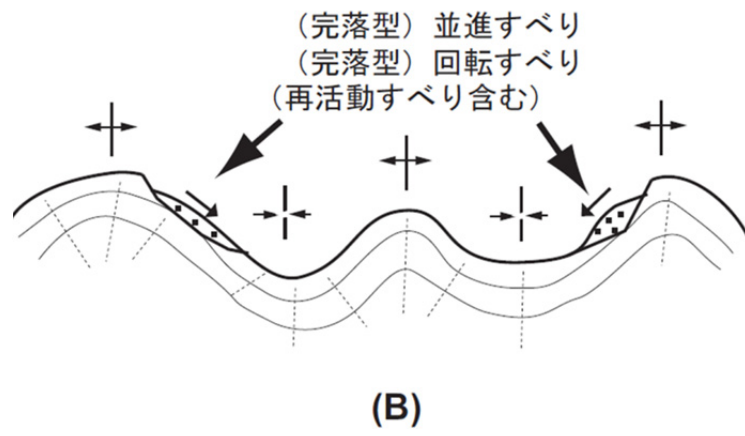
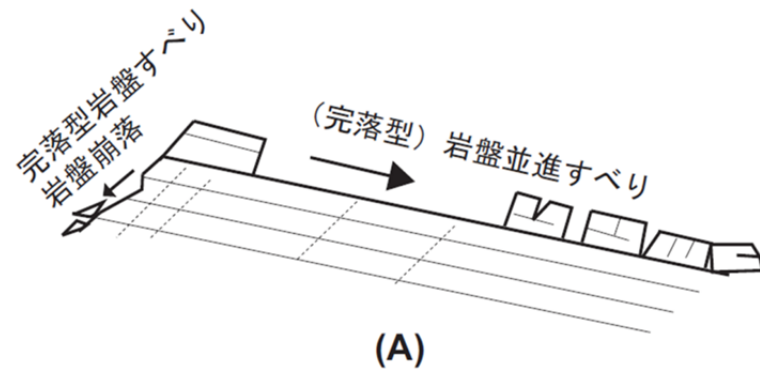


図 3.3 層理の発達する堆積岩分布域の地震地すべりの形状  
 (A) ケスタ地形, (B) 褶曲構造, (C) 尾根地形

表 3.2 第三紀～第四紀の堆積岩に発生した主な地震地すべりの形状

地震名 (発生年)	マグニチュード (最大震度)	地すべりの発生した地区名	すべり面周辺の主な地質 <sup>3)</sup>	すべり面の傾斜角	地形形状	その他
秋田県仙北地震 (1914)	M7.1 (震度 6～7) <sup>1)</sup>	上戸沢	鮮新統/シルト質泥岩・砂岩互層	約 10°	尾根	尾根縦断方向へ移動岩盤並進すべり
		布又	鮮新統/シルト質泥岩・砂岩互層	約 8°	ケスタ	岩盤並進すべり
秋田県男鹿地震 (1939)	M6.7 (震度 6) <sup>2)</sup>	北浦	鮮新統/泥岩・砂岩・凝灰岩の細互層	約 20°	海岸丘陵	岩盤並進すべり
新潟県中越地震 (2004)	M6.8 (震度 7)	一ツ峰沢	鮮新統/泥質シルト岩	0～5°	尾根	尾根縦断方向へ移動岩盤並進すべり
		横渡	鮮新統/泥質シルト岩(砂岩薄層挟む)	約 25°	ケスタ	岩盤並進すべり
新潟県中越沖地震 (2007)	M6.8 (震度 6 強)	聖ヶ鼻	鮮新統/砂岩・泥岩互層	25～30°	尾根側面 ケスタ	岩盤並進すべり
岩手・宮城内陸地震 (2008)	M7.2 (震度 6 強)	荒砥沢	鮮新統/砂岩・シルト質泥岩互層	0～5° (地層傾斜より推測)	尾根側面	岩盤並進すべり (キャップロック)

震度：1996 年以前は 7 階級，以降は 10 階級で表示 1) 阿部・高橋 (1997) より，2) 阿部ほか (2006) より，そのほかは気象庁による最大震度

3) すべり面が正確に把握されていないものが多く，ここでは想定すべり面周辺の地質とした。

### (3) 先第三紀の変成岩，堆積岩域

1868 年以降における先第三系の変成岩，堆積岩の分布域に地震地すべりを発生させた地震は 1891 年濃尾地震，1994 年北海道東方沖地震の報告がある程度である。濃尾地震では地震断層（主に根尾谷断層）に沿う変成岩分布域で山地斜面全体に大小のすべりが多発している。詳細な地質との関連性は不明であるが，震度 6 以上の場で，斜面の頭部から斜面末端部にかけて全体がすべり落ちた表層完落型すべりが多く発生している（田畑ほか，1999）。一部石灰岩の岩盤崩落の記録も見られる（大森，1894）。1994 年北海道東方沖地震では色丹島における白亜紀硬質頁岩・細粒砂岩互層上で 3 カ所の初生大規模岩盤並進すべりの報告がある（田近，2009）。



#### (4) 花崗岩地帯

花崗岩地帯での地震地すべりは1923年関東地震, 1949年今市地震, 1995年兵庫県南部地震, 2000年鳥取西部地震, 2001年芸予地震などに伴って発生している。地震地すべりの多くは砂状のマサによる表層完落型すべりや流動性すべりとして発生している(図3.4)。



図 3.4 花崗岩類分布域における地震地すべりの形状

横山・菊山(1997), 山下(2002), 釜井・守随(2004)を参考に作成

#### (5) 火山岩類分布域

火山岩類の分布地域での地震地すべりの発生記録は少なく, 1872年浜田地震での白亜紀流紋岩分布域(藤森ほか, 1990), および1896年陸羽地震における中新世前期の安山岩, 流紋岩分布域で多発した表層浅層すべりがあげられる(阿部・高橋, 1997)。2000年鳥取県西部地震では玄武岩溶岩のトップリングの報告(山下, 2002)がある。大規模地震時に表層すべりとして数多く発生する傾向が見られる(図3.5)。



図 3.5 火山岩分布域における地震地すべりの形状

### 3.2.2 2011年東北地方太平洋沖地震およびその関連地震による事例

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（以下、本項では本震と記載）は、日本における観測史上はじめて発生したマグニチュード9クラスの地震であったため、従来の事例とは異なり極めて広域の多様な地質条件において地震地すべりを生じさせた。（社）日本地すべり学会（2012）によると、本震および同年3月12日に発生した長野県北部地震（M6.8）や4月11日に発生した福島県浜通りの地震（M7.0）によるものを含めた斜面変動の発生箇所は、岩手県北部～北関東各県および長野・新潟両県に渡って768箇所が確認された。ただし、地質と地すべりの運動形態という視点においては既述した過去の地震地すべり事例と共通した特徴がみられた。

本震で発生した事例についてみると、宮城県の松島湾周辺で多発した新第三系堆積岩の海食崖における崩壊や仙台市の宅地造成地で発生した盛土の地すべりは1978年宮城県沖地震時にも同様の現象がみられた。福島県の中通りから栃木県北部・東部でみられた火山灰質ローム層が堆積する丘陵地や段丘で発生した流動性の高い地すべりは1949年今市地震、1968年十勝沖地震、1978年伊豆大島近海地震、2003年三陸南地震等の事例（3.2.1項の（1）参照）と類似している。

本震の翌日に発生した長野県北部地震では、第三紀～第四紀の堆積岩を火山岩・火砕岩が覆うキャップロック構造を示す地域に深い峡谷が形成された場所で大規模な斜面変動が生じた。また、旧地すべり地形の末端部においても比較的大規模な再活動地すべりを生じた。このような点は2004年新潟県中越地震や2008年岩手・宮城内陸地震、また後述する2005年パキスタン北部地震での事例と類似している。福島県浜通りの関連地震においても古第三紀～第三紀の堆積岩流れ盤斜面で大規模な地すべりが発生した。また、結晶片岩地域の峡谷部で表層崩壊が発生した点は1891年濃尾地震に同様の事例がみられる。

### 3.2.3 海外の事例

海外の地震地すべりの事例では、次のような点で前述した日本の地震地すべりと共通した特徴が見られる。すなわち、第三系の層理の発達する砂岩・泥岩分布域の地震地すべりでは1999年台湾集集地震時（M7.3：CWB， M7.7：USGS）での九份二山地すべり（Wang et al., 2003）や、草嶺地すべり（Chigira et al., 2003）、2005年パキスタン北部の地震（M7.6）でのダンベイ地すべり（The Japan Landslide Society, 2006）、などいずれも層理面に沿う岩盤すべりが発生している。九份二山地すべりと草嶺地すべりはケスタ地形に相当する。2001年 El Salvador 地震（M7.6）では未固結な火山砕屑物による流動性すべりが多く発生したことが報告されている（Orense et al., 2002 など）。また、花崗岩のマサ分布域ではフィリピンで発生した1990年 Luzon 地震（M7.8）時の浅層すべりや岩屑なだれの報告がある（Lee and Evangelista, 2006）。濃尾地震時に一部岩盤崩落の事例が報告されている石灰岩の地すべりの場合は、2008年中国汶川地震（M8.0）（山田ほか，2010）や1985年パプアニューギニア地震（M7.1）における Bairaman 地すべり（千木良，2005）、イランにおける1990年 Manjil 地震（M7.3）の Galdian および Fatlak 地すべりで岩盤並進すべりや岩屑なだれとしての発生が報告されている（Ishihara et al., 1992）。

### 3.3 考察

図 3.6 は表 3.1 のデータをもとに、地震地すべりが発生した地域の地質と、地震地すべりの運動形態、地震地すべり地と震央との距離を示したものである。ここで、地震地すべりと地震発生源との距離は、本来震源あるいは震源断層からの距離で行うのがより適切であるが、1923 年関東地震以前の震源の深さのデータが無いために震央からの距離で統一した。

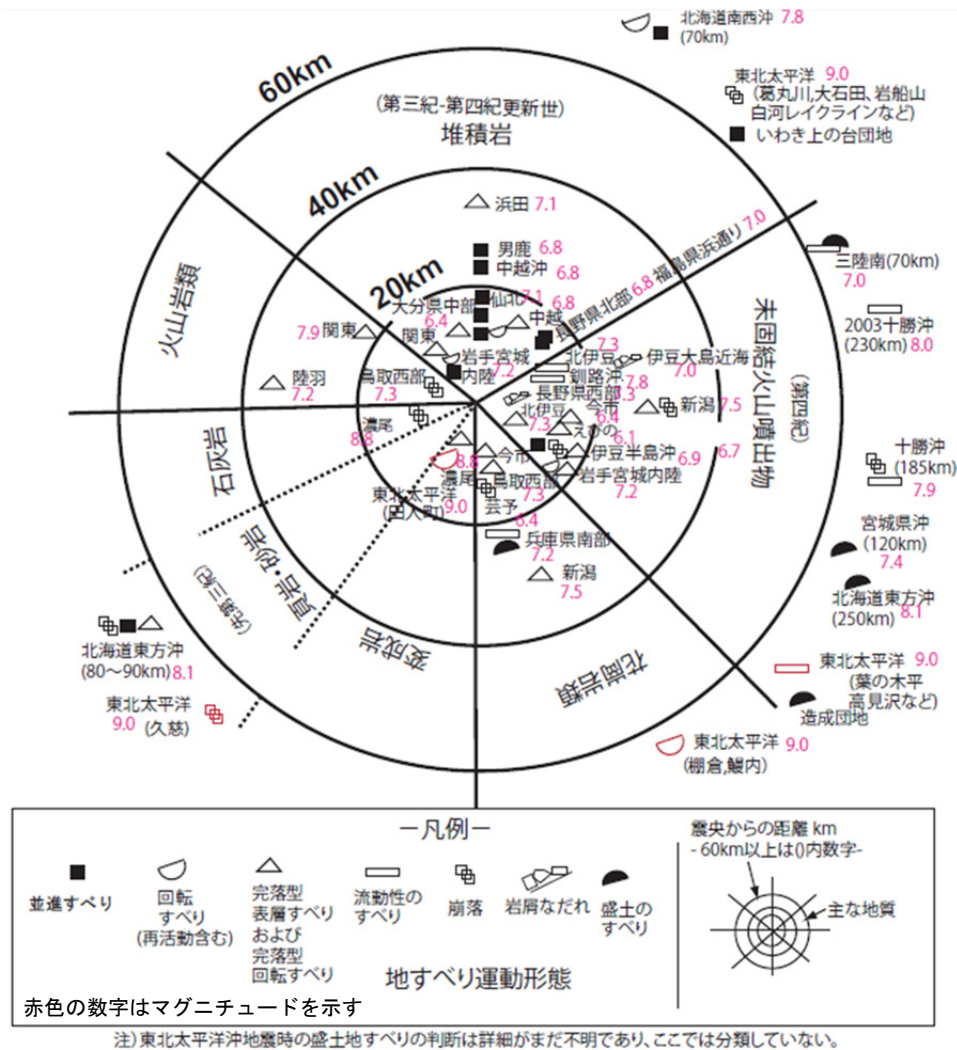


図 3.6 地震地すべり発生時の地質と地すべりの運動形態、および震央からの距離

図 3.6 および 3.2 節で記載したように、地震地すべりの運動形態は明らかに地形・地質に関連して発生していることがわかる。第三紀—第四紀更新世の堆積岩、特に泥岩・砂岩・シルト岩の互層が分布する地域、すなわち層理に発達する地域に岩盤並進すべりの発生が多い。これらの地すべりは地層の不連続面としての層理面や層理面の一部をすべり面とし、地震動の増幅しやすい(若井ほか, 2008 など)尾根やケスタなど凸状地形で発生している(図 3.3, 表 3.2)。流れ盤の地すべりの場合、褶曲構造の発達している地域よりも地層の連続性が良い同斜構造上

の地すべりのほうが地すべり規模が大きい傾向がある（たとえば国内では 2008 年岩手・宮城内陸地震時の荒砥沢地すべりや、海外での 1999 年台湾集集地震における草嶺地すべりや九份二山地すべりなど）。2004 年新潟県中越地震時の地すべりでは、特にケスタ地形での受け盤斜面で完落型すべりや岩盤崩落などが多く発生している（八木，2007；下川・稲垣，2009 など）。

花崗岩地帯でのマサや、軽石などの未固結な火山噴出物の堆積域では尾根部や、斜面途中の凸部分などの遷急線部分、段丘や盛土の端部で浅層の完落型すべりの発生報告が多い。やはり凸部分で地震動が増幅するためと考えられる。ルーズな砂質土が完落型のすべりや、流動性のすべりとして発生していることも多く、発生規模に比較して大きな被害をもたらしている。溶岩起源の碎屑物が大規模な完落型回転すべりとして発生し、その後河川に沿って数キロ流下した 1984 年長野県西部地震時のいわゆる岩屑なだれは短時間で被害が遠方におよぶことより防災上注意が必要である。また、花崗岩の場合は節理やクラックに沿う落石や転倒、崩落の報告も多い（図 3.4）。

先第三系の変成岩帯に発生した内陸直下型地震としての 1891 年濃尾地震（M8.0）では地震断層に沿って大小の完落型すべりが多発している（大森，1894；田畑ほか，1999 など）。詳細な地形・地質との関連性や初生地すべりや再活動地すべりなどの分類は不明である。一部で石灰岩の岩盤崩落があり、前述した海外の石灰岩の大規模な地震地すべりが多いことと関連して興味深い。2011 年東北地方太平洋沖地震の関連地震として発生した福島県浜通りの地震（M7.0）でも地震断層周辺で変成岩の崩壊が多発している（ただし同地震において比較的規模の大きい地すべりは古第三系堆積岩の流れ盤斜面に生じている）。変成岩帯における地震地すべりの発生予測は、近い将来の発生が危惧される南海地震などによる地震地すべりを予測する上でも重要である。しかし、本章で対象とした事例だけでは不明な点が多く、今後歴史地震も含めた詳細な研究が必要であろう。

火山岩分布域での地震地すべりは、1896 年陸羽地震や 1923 年関東地震時に安山岩や流紋岩類のような塊状緻密な火山岩の表層部の完落型すべりとして、地震動が増幅する山頂部周辺の斜面一帯に多発している（図 3.5）

以上の地震地すべりのほとんどが震央から概ね 30km 以内に発生している。しかし、未固結な火山噴出物やマサ化した花崗岩堆積域では、2003 年三陸南地震，2003 年十勝沖地震，1968 年十勝沖地震，1994 年北海道東方沖地震などで震央から 100km～250km 遠方でも盛土のすべりや流動性すべり発生している。また、マグニチュード 8 クラスの地震である 1993 年北海道南

西沖地震（M7.8）や1987年北海道東方沖地震（M8.1）においては、震央から70～90km離れた色丹島や奥尻島で岩盤並進すべりや岩屑流、再活動型の回転すべりが発生している。2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）では震央から150～300 km以上離れた東北地方南部から北関東周辺にかけて、3.2.2に示したように発生場の地質に対応した斜面変動がみられる。これらは震央から30km程度内で発生する他の多くの地震地すべりと異質な点に注意が必要であろう。特に北海道周辺の海洋で発生している地震は、1968年十勝沖、および2003年十勝沖地震も含めていずれもマグニチュードが8クラスであり、マグニチュード7クラスのものとは震央からの距離の点で違いが大きく、地震動と地すべり発生の関連性がかなり異なる可能性がある。この点は、同じくマグニチュード8クラス以上の1891年の濃尾地震（M8.0）や2008年中国汶川地震（M8.0）（山田ほか，2010; Chigira et al., 2010），2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）での地震地すべりが、震央からの距離よりもむしろ地震断層に沿って発生していることでも同様な特徴が見られる。

本章に示した地すべり運動形態は被害や規模などから代表的なものを抽出したもので、当然ながら地震時にはその他にも大小さまざまな運動形式をもった地震地すべりが同時発生していることはいうまでもない。次章以降では、近年発生事例が多く、被害の規模の観点からも防災上特に重要なもののひとつと思われる堆積岩地域における地震地すべりを対象に、これらの発生危険度を予測する手法の検討を進める。

## 引用文献

- 阿部真郎・高橋明久 (1997) : 東北地方・グリーンタフ地域における地震発生時の地すべり挙動  
—主として秋田県・陸羽地震, 仙北地震での検証—, 応用地質学会誌, Vol. 38, No. 5,  
pp. 265—279.
- 阿部真郎・高橋明久・荻田茂・小松順一・森屋洋・吉松弘行 (2006) : 新第三紀層分布域におけ  
る地震の震度と地すべりの地形・地質的特徴, 日本地すべり学会誌, Vol. 43, No. 3, pp.  
27—34.
- 秋田県 (1984) : 昭和 58 年 (1983 年) 日本海中部地震の記録 被災要因と実例, 秋田県生活環  
境部消防防災課, 420p.
- 安藤武 (1971) : えびの・吉松地区地震によるシラスの崩壊について, 防災科学技術総合研究報  
告, 第 26 号, pp. 147—155.
- 青森県防災部 (2009) : [http://www.bousai.pref.aomori.jp/Jisinsouran/okachi/1\\_jisin\\_target.htm](http://www.bousai.pref.aomori.jp/Jisinsouran/okachi/1_jisin_target.htm) (参  
照日: 2009 年 5 月 1 日)
- 千木良雅弘 (1995) : 風化と崩壊, 近未来社, 204p.
- Chigira, M., Wang, W. N., Furuya, T. and Kamai, T. (2003) : Geological causes and geomorphological  
precursors of the Tsaoiling landslide triggered by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan,  
Engineering Geology, 68, pp. 259—273.
- Chigira, M., Wu, X. Y., Inokuchi, T. and Wang, G. (2010) : Landslides induced by the 2008 Wenchun  
Earthquake, Sichuan, China, Geomorphology, 118, pp. 225—238.
- 中央防災会議 (2006) : 1891 濃尾地震報告書, pp. 1—62.
- 藤森孝俊・蒔苗耕司・山口勝・山口隆・大田陽子 (1990) : 島根県浜田地震 (1872) の地形学的  
検討, 地質学雑誌, 99—2, pp. 44—59.
- ハスバートル・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.
- 平成 20 年岩手・宮城内陸地震 4 学協会東北合同調査団 (2009) : 平成 20 年 (2008 年) 岩手・  
宮城内陸地震災害調査報告書, (社) 土木学会東北支部, (社) 地盤工学会東北支部, (社)  
日本地すべり学会東北支部, (社) 東北建設協会, 403p
- 平尾公一・大久保駿 (1971) : えびの・吉松地区地震による山くずれの発生とその拡大に関する  
研究, 防災科学技術総合研究報告, 第 26 号, pp. 157—189.

- 今村明恒 (1913a) : 明治 5 年の浜田地震, 震災予防調査会報告, 第 77 号, pp. 43-77.
- 今村明恒 (1913b) : 明治 29 年の陸羽地震, 震災予防調査会報告, 第 77 号, pp. 78-87.
- 井口隆 (1985) : 伝上川上流の大崩壊と岩屑流, 昭和 59 年 (1984 年) 長野県西部地震災害調査報告, 科学技術庁国立防災科学技術センター, pp. 45-62.
- 井口隆 (1994) : 都市近傍に発生した地震による地盤災害について-1993 年 1 月釧路沖地震の地すべり災害の事例から, 地すべり学会関西支部シンポジウム, 地震による地すべり, pp. 39-52.
- 井上公夫 (2006) : 関東地震による土砂災害, (社) 日本地すべり学会関東支部設立記念シンポジウム, pp. 6-9.
- Ishihara, K., Haeri, S. M., Moinfar, A.A., Towhata, I. and Tsujino, S. (1992) : Geotechnical aspect of the June 20, 1990 Manjil earthquake in Iran, Japanese Society of SoilMechanics and Foundation Engineering, Vol.32, No.3, pp.61-78.
- 伊藤洋司・山下聡・鈴木輝之・平田広昭 (2004) : 2003 年十勝沖地震による北海道端野町協和での液状化と緩斜面の変動, 日本地すべり学会シンポジウム-地震と地すべり-, pp. 50-53.
- 釜井俊孝 (1989) : 1987 年千葉県東方沖地震による上総丘陵の斜面崩壊-崩壊の分類と安定の検討-, 地すべり, Vol. 26, NO. 1, pp. 16-25.
- 釜井俊孝・守随治雄 (2004) : 2001 年芸予地震による呉市都市域の斜面災害, 日本地すべり学会誌, Vol. 40, NO. 5, pp. 78-83.
- 気象庁 (2008) : [http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji\\_200801.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_200801.pdf) (参照日: 2009 年 5 月 1 日)
- 木下篤彦・山口真司・山崎孝成・柴崎達也・小島健・吉松弘行 (2009) : 2004 年新潟県中越地震により大滑動した地すべりのすべり面の土質特性に関する研究, 日本地すべり学会誌, Vol. 45, No. 6, pp6-15.
- 衣笠善博・曾屋龍典 (1975) : 1975 年 4 月大分県中部地震について, 地質調査所, pp. 10-17.
- 小松順一・村岡洋・斉藤啓・阿部真郎 (2004) : 宮城県北部地震による岩盤斜面の変状に関して, 第 39 回地盤工学研究発表会, pp1969-1970.
- 黒田和男 (1971) : えびの・吉松地区地震による地表変動と地質との関係について, 防災科学技術総合研究報告, 第 26 号, pp. 125-146.



- 久保田哲也 (2002) : 2000 年 10 月 6 日の鳥取県西部地震による斜面崩壊・地すべり調査報告, 日本地すべり学会誌, Vol. 38, No. 4, pp. 52-57.
- Lee, S and Evangelista, G. (2006) : earthquake-induced landslide-susceptibility mapping using an artificial neural network, Naturak Hazards and Earth System Science, 6, pp.687-695.
- 松田時彦・有山智雄 (1985) : 1984 長野県西部地震に伴う御岳山の岩屑流堆積物—とくに“岩屑しぶき”について—地質研究所彙報, pp. 281-316.
- 箕輪親宏・井口隆・宮本誠・香川崇章・阿部秋男 (1995) : 1994 年北海道東方沖地震災害調査報告, 主要災害調査第 33 号, 科学技術庁, 63p.
- 森屋洋・阿部真郎・檜垣大助 (2010) : 2008 年岩手・宮城内陸地震に伴って発生した荒砥沢ダム上流大規模地すべりの変動形状および変動履歴, 日本地すべり学会誌, Vol. 47, No. 2, pp. 1-7.
- 中村浩之 (1974) : 伊豆半島沖地震による崩壊について, 地すべり, ニュース 4, Vol. 11, No. 2, pp46-49.
- 中山康・古谷保 (1978) : 伊豆大島近海地震による河津町見高入谷の土石災害, 地すべり, ニュース, Vol. 15, No. 1, pp. 25-27.
- 中山康 (1988) : 千葉県東方沖地震による斜面崩壊, 地すべり, Vol.No. 4, ニュース, pp. 33-35.
- 新澤直治 (1952) : 今市地震による崩壊について, 新砂防, No. 8, pp. 7-9.
- 野崎保 (2008) : 2007 年新潟県中越沖地震による初生的岩盤地すべりと層面すべり, 日本地すべり学会誌, Vol. 45, No. 1, pp72-77.
- 沖村孝 (1995) : 兵庫県南部地震にともなう斜面崩壊の特性, 兵庫県南部地震等に伴う地震・斜面崩壊研究報告書, 地すべり学会, pp. 1-16
- 大橋良一 (1915) : 大正 3 年の秋田地震に於いて, 震災予防調査会 82 号, pp. 1-6.
- 大森房吉 (1894) : 濃尾地震概報, 地質学雑誌, Vol. 1, No. 6, pp. 253-263.
- 大草重・龍岡文夫・谷口栄一・ほか 7 名 (1978) : 1978 年 1 月伊豆大島近海の地震による見高入谷地区斜面崩壊に関する調査, 建設省土木研究所資料, 1432 号, 34p.
- 大八木規夫 (1974) : 伊豆半島沖地震による崩壊について, 主要災害調査第 5 号, 1974 年伊豆半島沖地震現地調査及び観測報告, 科学技術庁, pp. 87-93.

- Orense, R., Monge, W. V. and Cepeda, J. (2002) : Geotechnical Aspects of the January 13, 2001, El Salvador Earthquake, Soil and Foundations, Vol.42, No.5, pp.57-68.
- 尾張安治・駒村富士弥(1983) :新潟地震による岩船地方の山地崩壊について, 新砂防, 40-10, pp. 28-35.
- 佐々恭二・北川隆司・福岡浩・落合博貴・井口隆・藤田崇・小宮山賢太郎・王功輝(2001) :平成13年3月24日芸予地震による斜面災害緊急調査結果(速報), 日本地すべり学会誌, Vol. 38, No. 1, pp. 78-84.
- 下川敏彦・稲垣秀輝(2009) :2004年新潟県中越地震に起因する地すべりと土砂移動, 日本地すべり学会誌, Vol. 45, No. 6, pp. 23-28.
- 須田知誠・若月強・松浦俊也・松倉公憲(2004) :丹沢山地における地震と豪雨による崩壊の地質的・地形的特徴:特に崩壊の規模と斜面傾斜について, 筑波大学陸域環境研究センター, No. 5, pp. 51-61,
- 鈴木敬治・八島隆一・陶山國男(1967) :新潟地震にさいして福島会津地方に発生した災害と地質, 土と基礎, 15-10, pp. 3-9.
- (社)日本地すべり学会調査団・文部科学省科学技術復興調整費APERIF調査団(2003) :三陸南地震時に発生した宮城県築館町の高速長距離運動型の土砂崩れ現象, 日本地すべり学会誌, Vol. 40, No. 2, pp. 45-46.
- (社)日本地すべり学会(1995) : 兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊研究報告書.
- (社)日本地すべり学会(2007) : 中山間地における地震斜面災害—2004年新潟県中越地震報告(1) —地形・地質編, 社団法人日本地すべり学会. 172p
- (社)日本地すべり学会(2012) : 地震による斜面変動の実態把握と特徴の類型化, 国土交通省国土技術政策総合研究所, 227p.
- 田畑茂清・原義文・井上公夫(1999) :濃尾地震(1891)に起因した土砂移動の実態, 砂防学会誌, Vol. 52, No. 3, pp. 24-33.
- 田近淳・石丸聡・廣瀬亘・伊藤陽司・志村一夫(2003) :2003年十勝沖地震により発生したランドスライド, 日本地すべり学会誌, Vol. 40, No. 4, pp79-80.
- 田近淳(2009) :1994年北海道東方沖地震による色丹島の地すべり, 日本地すべり学会誌, Vol. 45, No. 6, pp. 29-32.

- 高橋明久・荻田茂・山田孝雄・森屋洋・阿部真郎・原口強（2005）：2004年新潟県中越地震により一ツ峰沢に発生した地すべり，日本地すべり学会誌，Vol. 42, No. 2, pp. 121-128.
- 田方郡町村会（1981）：昭和5年の北伊豆地震に学ぶ，165p.
- 田中耕平・森脇寛（1988）：千葉県東方沖地震による崩壊調査，千葉県東方沖地震災害調査報告，主要災害調査第29号，科学技術庁，pp. 29-48.
- 田中耕平（1994）：地震による崩壊，北海道南西沖地震による奥尻島の事例を中心にして，地すべり学会関西支部シンポジウム「地震による地すべり」，pp. 27-38.
- The Japan Landslide Society（2006）：Report of the field reconnaissance and inspection on landslides induced by the 2005 Northern Pakistan Earthquake -The third mission of the Japan landslide society-, 27p.
- 徳山明・岩橋徹・木宮一邦・半田孝司・吉田鎮男・大塚健一（1978）：1978年伊豆大島近海の地震に伴う震害の地質学的考察，静岡大学地球科学研究報，3，pp. 45-46
- 内田勉・山田正雄・森正一・藤井優・久保田哲也（2002）：鳥取県西部地震による落石・岩盤崩壊の発生状況と復旧対策事例，日本地すべり学会誌，Vol. 39, No. 1, pp.128-136.
- 植原茂次・大谷圭一・箕輪親宏・片桐一美（1978）：1978年宮城県沖地震による災害現地調査報告，主要災害調査題15号，科学技術庁，60p.
- 植原茂次・木下繁夫・井口隆・海老原文雄・田中耕平・大倉博・幾志新吉（1985），昭和59年長野県西部地震災害調査報告，主要災害調査第25号，科学技術庁，139p.
- 宇佐美龍夫（1996）：新編日本被害地震総覧，東京大学出版会，493p.
- 若井明彦・田中頼博・阿部真郎・吉松弘行・山邊康晴・渡邊泰介（2008）：中山間地の地震時斜面崩壊リスクを評価するための有限要素法に基づく広域被害予測システム，日本地すべり学会誌，Vol. 45, No. 3, pp. 21-32.
- 汪発武・松本樹典・田中康博・藤森学・佐々恭二（2003）：三陸南地震による築館地すべりの運動シミュレーション，第42回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 239-242.
- Wang, W. N., Chigira, M. and Furuya, T.（2003）：Geological and geomorphological precursors of the Chiu-fenerh-shan landslide triggered by the Chi-chi earthquake in central Taiwan, Engineering geology, 69, pp. 1-13.
- 八木浩司（2007）：崩壊斜面の特徴，中山間地における地震斜面災害—2004年新潟県中越地震報告（1）—地形・地質編，社団法人日本地すべり学会，pp. 84-89.

山田正雄・蔡飛・王功輝（2010）：中国をよく知る地すべり研究者の四川大地震と山地災害，理工図書，198p.

山口伊佐夫・川邊洋（1982）：地震による山地災害の特性，新砂防，125，pp. 3-15

山下祐一（2002）：鳥取県西部地震の落石の特徴と落石対策効果，日本地すべり学会誌，Vol39，No. 2，pp. 70-74.

横山俊治・菊山浩喜（1997）：1995年兵庫県南部地震時に発生した六甲花崗岩地域の斜面崩壊の運動様式と機構，地すべり，Vol. 34，No. 3，pp. 17-24.



## 第4章 地形・地質解析と力学的解析の連携による地震時の地すべり危険度評価手法

### 4.1 導入

3章でみたように、地震を誘因とする地すべりは発生場の地質・地形特性に対応した運動形態を示すが、その一つとして堆積岩地域における層理面に沿った並進すべりや完落型すべりが挙げられた。このタイプの地震地すべりは移動距離や規模が大きく、また河道の狭窄部では地すべりダムを誘発することから、その発生を予測することは中山間地の地震防災を考えるうえで極めて重要である。地質構造を考慮した危険度評価手法は2章に示したようにいくつかの事例がみられるが、上記のようなタイプの地震地すべりを意識したものではないため、結果としてこれらの要因があまり重視されない結果となっている。本章ではこのタイプの地震地すべりの代表的な事例として2004年新潟県中越地震時に発生した芋川流域とその周辺の地震地すべりに着目した。

個々の斜面の地形・地質条件は、斜面の向きや傾斜・形状、地下の地層の岩質や地質構造の違いにより様々であり、地震でより不安定化し易い素因をもつ斜面で選択的に地すべりが発生するものと考えられる。このような視点から、広域的に地震時の斜面崩壊の分布特性や発生場の地形・地質的な特徴を分析した研究としては、関口・佐藤(2006)や八木ほか(2007)、ハスパートルほか(2009)による中越地震を研究対象としたものが多く挙げられる。また岩橋ほか(2008)は、素因と誘因に関する各種パラメータを用いた判別分析によって2004年7月新潟豪雨と同年の中越地震による斜面崩壊に寄与した要素を比較している。阿部・高橋(1997)および阿部ほか(2006)は、東北地方を中心とした新第三紀層分布域における複数の地震事例から地震地すべり発生の地形・地質的要因や地震地すべりの挙動、地震強度を指摘している。

一方、地震時の地盤の動的応答や応力状態を予測するには、有限要素法に基づく地震応答解析が有効である。若井ほか(2008)は中山間地の地震時斜面安定性を広域に評価するための簡易な有限要素解析システムを提案しており、中越地震によって大きな被害を被った芋川流域周辺において、観測された強震波形を用いた地震応答解析を実施している。ここで、地震地すべりの素因としての地形・地質条件と、誘因としての地震動およびそれによって生じる斜面の応力状態を併せて検討することは、広域的な地震時の斜面危険度評価を目指す上で重要であると考えられる。

本章では、中越地震により発生した地すべりを対象に、特に重要な発生素因であると思われる三次元的な地質構造に着目して、地震地すべり発生場の地形・地質的特徴を検討した。さら

に、既往の地震応答解析結果（若井ほか，2008）を分析することで地震時の地すべり発生場の動的応答特性を検討した。以上より、大規模な地震地すべりの発生を素因・誘因の両面から合理的に説明できることを明らかにした。これを踏まえて、地震地すべりの発生しやすい条件を整理することや、非発生斜面の存在を考慮した検討によって、地震時に個々の斜面で想定される地すべり災害の規模や危険度をどの程度予測することが出来るか考察した。

## 4.2 研究方法

### 4.2.1 対象とする地震地すべり

本研究では、検討の対象とする地震地すべりを Yagi et al. (2004) が作成した中越地震による斜面崩壊分布図のうち、「地すべり滑落崖」および「地すべり移動体」として示された領域（以下、この領域を「地震地すべり斜面」と記す）とした。これは八木ほか（2007）によると、鉛直変位量 0.5m 以上で幅 20m 以上（1/10,000 空中写真で判読可能かつ 1/5,000 地形図にトレース可能なスケール）の地すべり・崩壊を抽出したもののうち、「比高の大きな滑落崖と移動域そして丘状の高まりを伴うような堆積域から構成される深層地すべりタイプ」と判断されたものである。地すべりダムを生じるなど深刻な被害をもたらした多くの地すべりは、数万 m<sup>2</sup> の規模で発生した比較的大規模なものであり、これに含まれる。

この分布図と、後述する若井ほか（2008）による地震応答解析が実施された領域との共通部分を検討範囲（8.95km×10.30km）とした。中越地震本震の震央と平面投影した地震断層（国土地理院，2005）および地震地すべり分布と検討範囲を図 4.1 に示す。中越地震は 2004 年 10 月 23 日 17 時 56 分発生、マグニチュード（M）6.8、震源の深さは 13km であった。地震断層は北北西－南南東方向に延び、深さ 2.8km の東側から西側に向かって傾斜約 53°で深くなる面に沿って西側地塊が東側地塊に対して隆起した逆断層と推定されている。上盤側でより大きな地震動が発生し斜面崩壊が集中した（関口・佐藤，2006）。

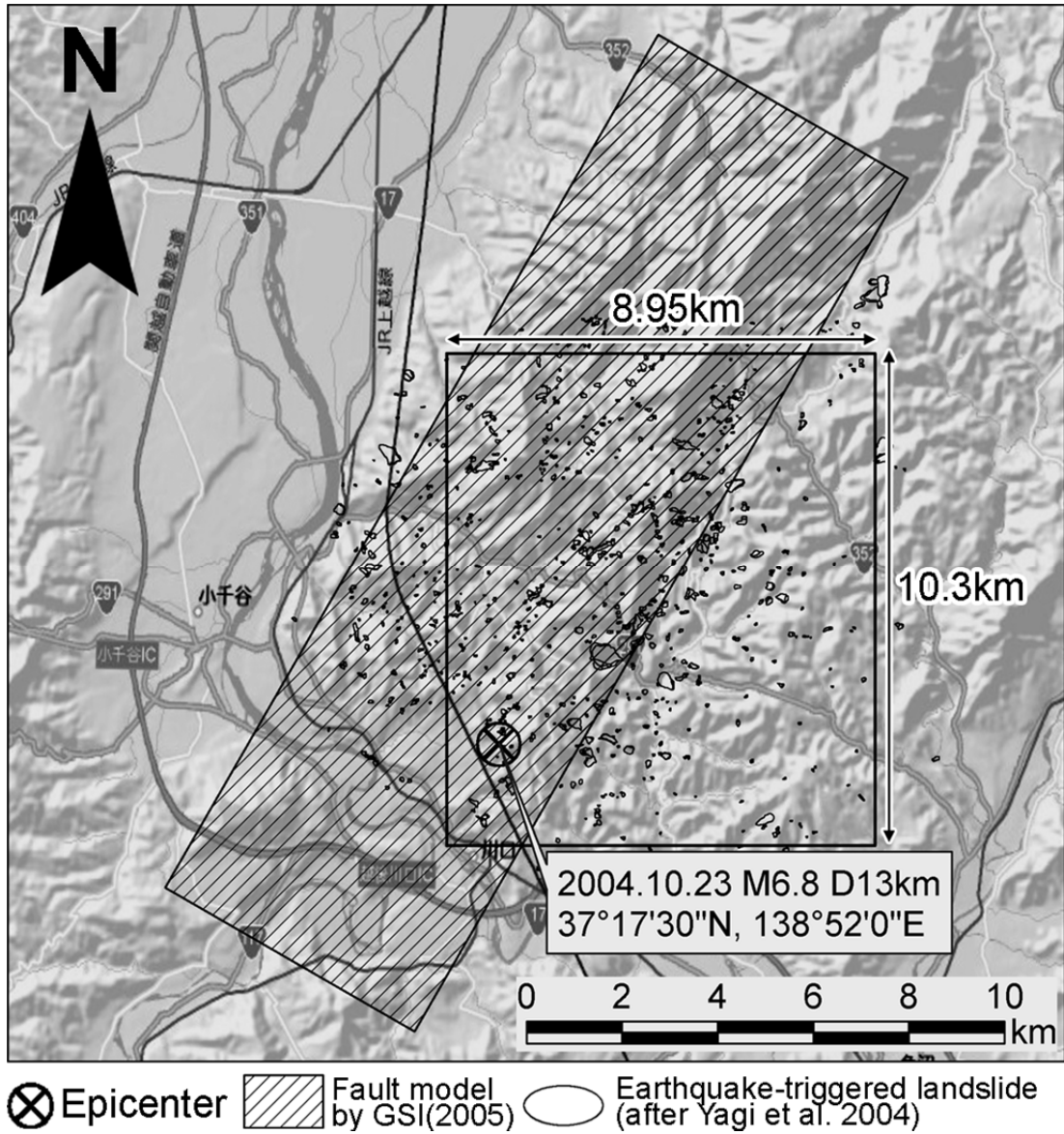


図 4.1 中越地震の震央及び地震断層・地震地すべり斜面の分布と検討範囲

#### 4.2.2 広域に得られる地形・地質情報の整理

本研究は事後解析に留まらず、今後ある地域で地震を想定した際などに予測が行えるような手法を検討することを目的とするため、広域に一定の精度で得られる 1/25,000 地形図および 1/50,000 地質図レベルの地形・地質情報を用いて分析を行った。一連の処理には GIS ソフトウェア ArcView を用いた。

収集したデータははじめに、50m メッシュ毎の局所データとして整理した。地形データは中越地震発生前の 50mDEM データ（国土地理院，1997）を用いた。局所地形量として 50m メッシュ毎の標高に加え、隣接する 8 格子点の標高から勾配の大きさと方向を求める方法 (Burrough and McDonnell, 1998) でメッシュ毎の傾斜角と傾斜方向を求めた。地質区分は 1/50,000 地質



図を基にした竹内ほか（2004）による「中越魚沼地域の5万分の1数値地質図」を50mメッシュ分割して用いた。また地質構造を数値化するために1/50,000地質図「長岡」（小林ほか, 1991）および「小千谷」（柳沢ほか, 1986）に記載された記号から、褶曲軸および断層線、地層の走向と傾斜角を数値化し、内挿補間処理によって50mメッシュ毎の地層の傾斜方向と傾斜角を求めた。補間処理法はInverse distance weighted (IDW) 法 (Watson and Philip, 1985) を用いて、地層の走向傾斜が変化する地質構造上の線をバリアポリラインとして設定した。

次に、50mメッシュの局所データから、地震地すべり斜面や後述する斜面区分といった斜面単位のデータを集計した。傾斜などの連続値は、その斜面と重複するメッシュの平均値や最大値等を代表値として付与した。地質区分のような個別値は、重複するメッシュの最頻値を代表値として付与した。

#### 4.2.3 本研究に用いた既往の地震応答解析

本研究に用いた三次元動的弾塑性有限要素法に基づく地震応答解析の概要と結果を以下に示す。本節の内容は若井ほか（2008）に示された解析の要約である。詳細は文献を参照されたい。

弾塑性構成モデルには、中山間地の斜面を構成する土の力学特性を適切に表現できるモデルとして、土の動的変形特性とせん断強度をともに考慮しうる簡易な繰返し載荷構成モデルであるUWモデル (Wakai and Ugai, 2004) を用いた。解析結果の出力範囲は図4.1に示した検討範囲に一致する。有限要素メッシュの平面分割は50m×50mで行い、深度方向は風化区分ごとに平均的な深度を考慮して表層（第1層：GL-5m以浅）、風化部（第2層：GL-5～-30m）、新鮮部（第3, 4層：GL-30m以深）に分割した。各要素に、既往の地盤調査報告書から整理された標準的な地盤定数（田中ほか, 2006）を付与した。入力地震波形は、NS・EWの2成分について、解析範囲内に位置する地震観測点（気象庁竹沢）で記録された強震波形と、解析結果としての応答加速度波形がほぼ一致するように、試行錯誤的に調整して作成された。そのうち解析では、特に加速度振幅の大きい時間帯を含む10秒間を入力した。

解析結果より、斜面に作用する地震慣性力の指標としての「地表面の最大水平加速度（NSとEWの合成分）分布」と、斜面に生じるせん断応力ないし塑性化の指標としての「表層の最大せん断応力分布」に着目した。なお表層の最大せん断応力は、表層要素のいわゆる八面体せん断応力 $\tau_{oct}$ に着目したもので、斜面に作用する滑動力の代表値を抽出する意図から、便宜的

に表層要素の重心位置におけるせん断応力を Gauss 求積点の応力値の内挿に基づいて求めたものである。

全体的な傾向として、地形的に尖った箇所や尾根付近で加速度の増幅が目立ち、谷筋から斜面下部および傾斜の大きな箇所において大きなせん断応力値すなわち塑性化の進行している傾向がみられた。いくつかの地震地すべりの発生した斜面との対応をみると、地すべりを挟むように隣接して、斜面上部では加速度の大きな箇所が、斜面下部ではせん断応力の大きな箇所の存在する場合が多かった。ここで、地震地すべりが発生する機構として、大きな地震慣性力が斜面に作用し、斜面内にすべり機構の形成を促すようなせん断応力が発生することが推察された。加速度分布およびせん断応力分布と実際の地すべり地点との相関性に関する上記の傾向を利用して、崩壊危険度のより高い斜面を広域中からある程度選別できる可能性が示唆された。

そこで本研究では、4.3.2 項で上記の傾向を定量的に把握するために解析結果を分析し、地震地すべり発生斜面における動的応答特性を検討した。さらに 4.4 節において、地形・地質解析による検討結果と組み合わせることで、素因・誘因の両面から地震地すべりの危険度を予測する手法を考察した。

### 4.3 中越地震による地すべり発生場の特徴

#### 4.3.1 地震地すべり発生場の地形・地質的特徴

中越地震で発生した地すべりについて、八木ほか（2007）によると、震源域の梶金向斜や東山背斜に沿って分布する川口層（砂岩，砂岩泥岩互層），荒谷層および牛ヶ首層（塊状泥岩）で多くの地すべりが発生し、 $10^4\text{m}^2$  を超える大きな地すべりは砂岩・シルト岩（泥岩）互層の流れ盤斜面で多く発生した。また、千木良（2005）は中越地震後いくつかの地すべりを調査し、砂岩とシルト岩の境界や砂岩シルト岩互層の層理面では層理に平行なすべり面が、黒色泥岩地域では酸化フロントに沿うすべり面が、また、シルト岩に挟まれた凝灰岩にすべり面が形成された事例を報告している。これらの層理面やすべり面の傾斜はほぼ水平～ $10^\circ$ 程度のものから、 $42^\circ$ と急傾斜のものまでみられた。さらに、新第三紀堆積岩分布域における複数の地震事例において、地震地すべりの地形・地質的特徴をとりまとめた阿部ほか（2006）によると、既往の地震地すべり事例は尾根の先端部やケスタ地形の緩斜面上で、地層の傾斜方向へ移動する流れ盤地すべりとして発生したものが多い。このような地すべりが発生する理由として、地形の側面が開放されているような形状や、第三系の層理面が連続性に富み直線的なすべり面を形成する

弱面としての性格を持って存在していることが指摘されている。

ここでは、4.2.2 項に示した方法で地震地すべり斜面ごとに集計したデータから、既往研究で明らかになっているような傾向が定量的に再現できるか検討した。

### (1) 地震地すべり斜面の地質

岩相が類似する 1/50,000 地質図の地質区分を表 4.1 のようにまとめて、地震地すべりの分布とともに図 4.2 に示した。検討範囲内の地震地すべり斜面のうち、面積が  $10^4\text{m}^2$  以下の比較的小規模な地すべりが全体の 87% を占める (図 4.3)。また図 4.4 には、地震地すべりの規模毎に発生位置の岩相区分の内訳を示した。検討範囲は主に新第三紀中新世以降の堆積岩からなり、ほとんどの地震地すべりもこの範囲で発生している。特に、 $3 \times 10^4\text{m}^2$  以上の地すべりは全てが堆積岩地域 (魚沼層の礫・砂・シルトの範囲を含む) で発生している。その中での内訳をみると、規模の小さなものは塊状泥岩の割合がやや大きく、規模の大きなものほど砂岩シルト岩、砂岩泥岩互層の割合が大きくなる傾向がある。

表 4.1 図 4.2 の岩相区分と地質図 (竹内ほか, 2004) の地質区分との対応

図 4.2 の岩相区分 Legend of Fig.4.2	地質図の地質区分 (竹内ほか, 2004) Classification by geological map after Takeuchi et al.2004.		
砂岩・シルト岩 Sandstone and siltstone	和南津層	W	砂岩
	白岩層	S	砂質シルト岩及び砂岩シルト岩細互層
	川口層	Ks	砂岩
砂岩・泥岩互層 Alternation of sandstone and mudstone	川口層	Ku	泥岩優勢砂岩泥岩互層
		Kl	砂岩優勢砂岩泥岩互層
塊状泥岩 Massive mudstone	牛ヶ首層	Um	塊状泥岩
	荒谷層	Am	塊状泥岩
礫・砂・シルト Gravel, sand and silt	魚沼層	Ue	海成シルト及び砂
		Ud	シルト・砂及び礫
		Uc	礫・シルト及び砂
その他 Others	氾濫原・段丘堆積物, 火山岩類など		

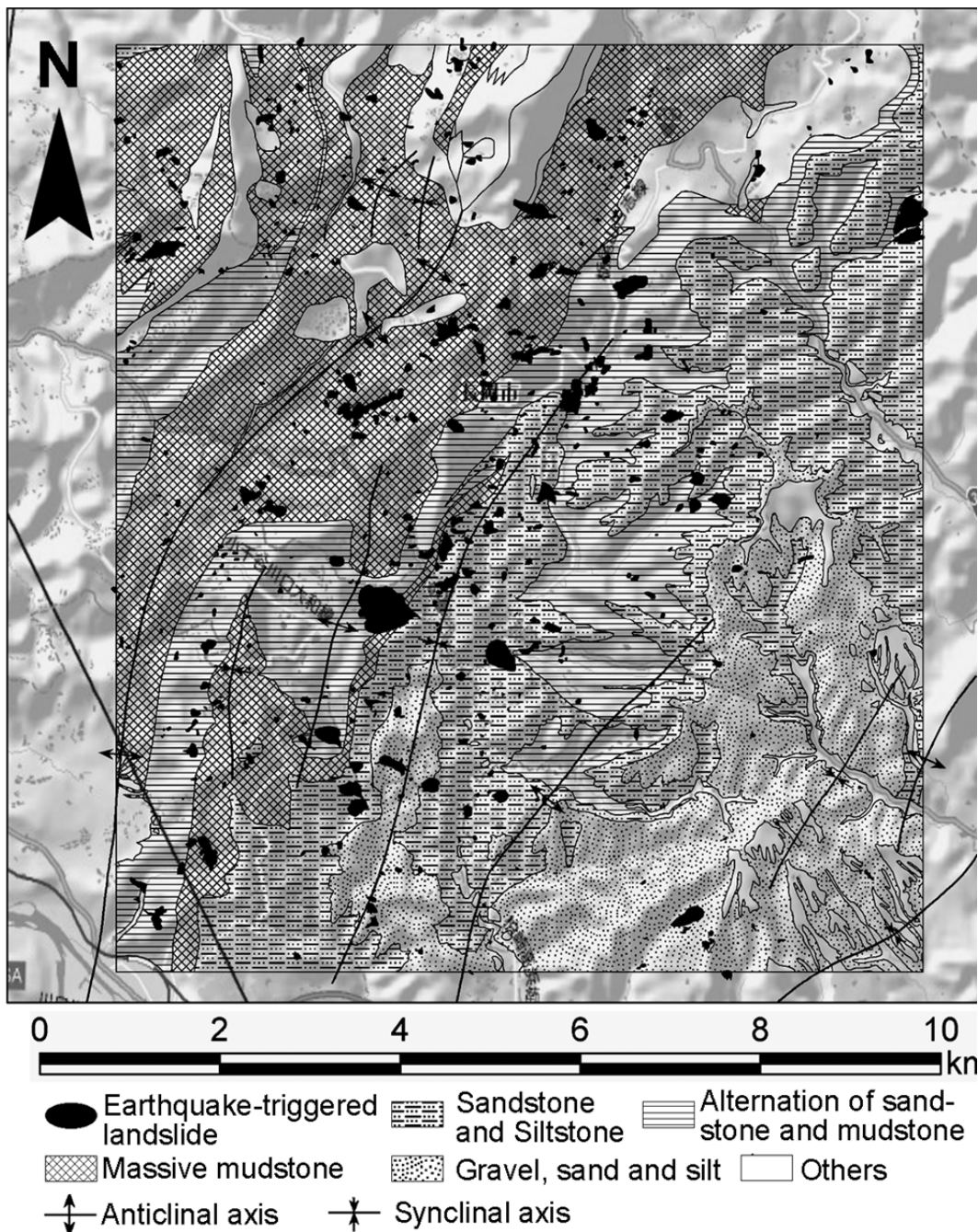


図 4.2 検討範囲の地質（岩相区分）と地震地すべり分布

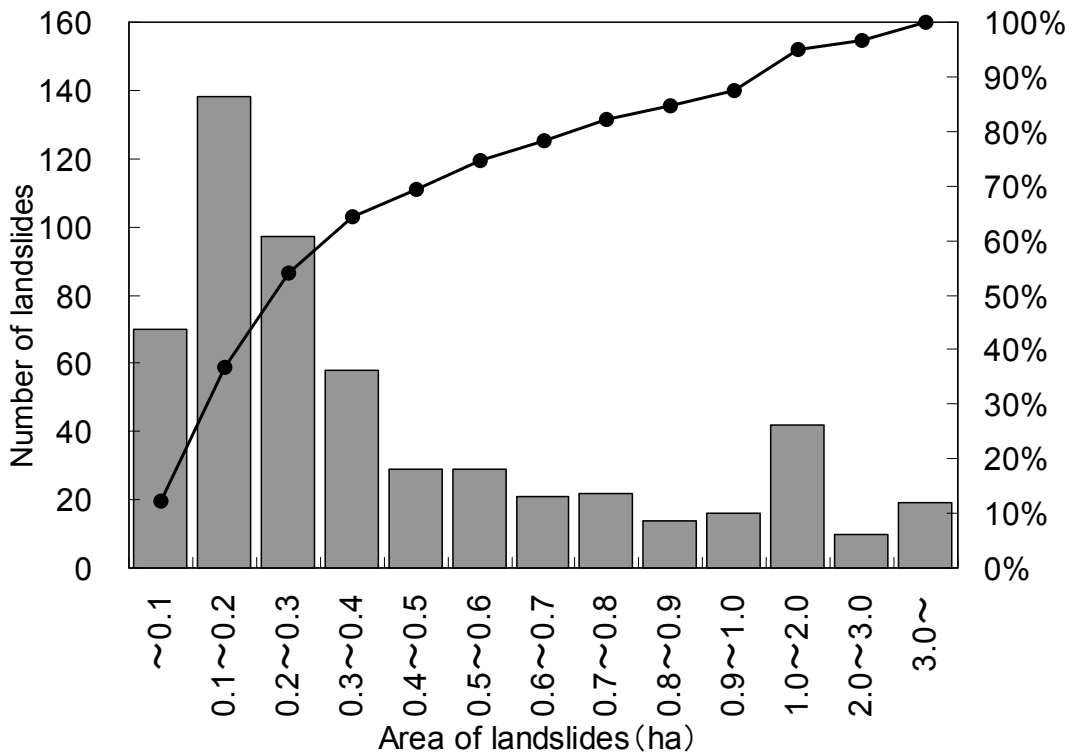


図 4.3 地震地すべりの面積の度数分布と累積曲線

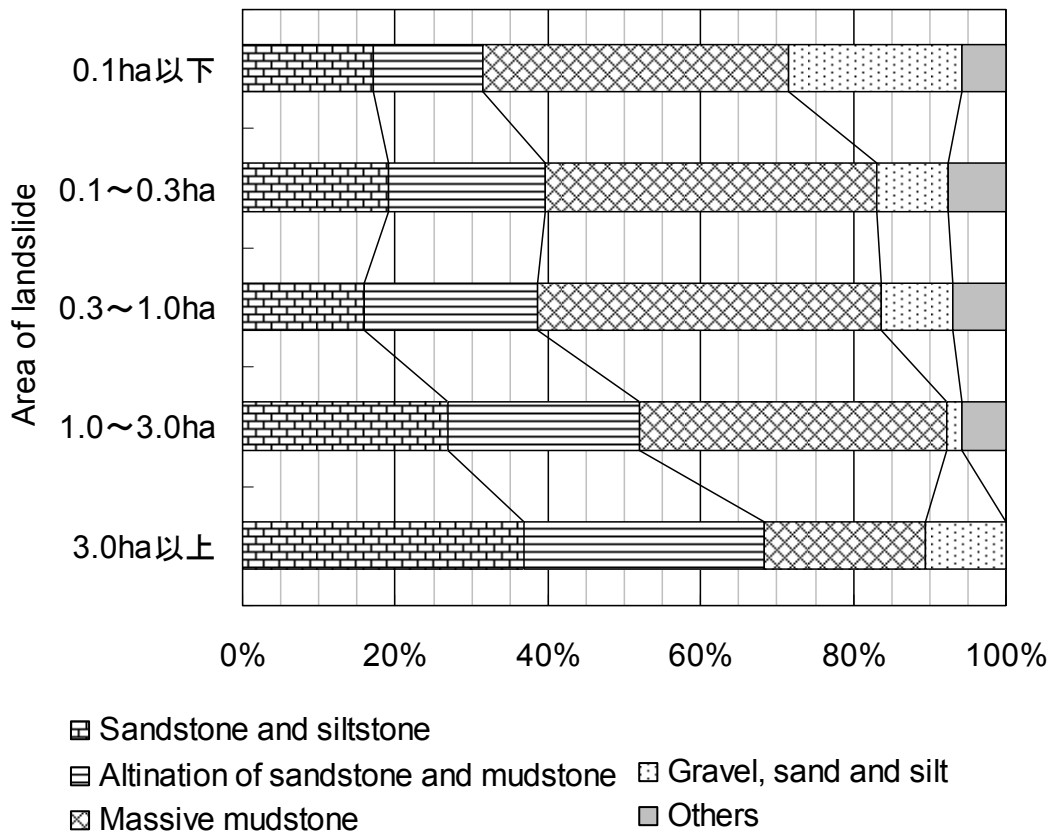


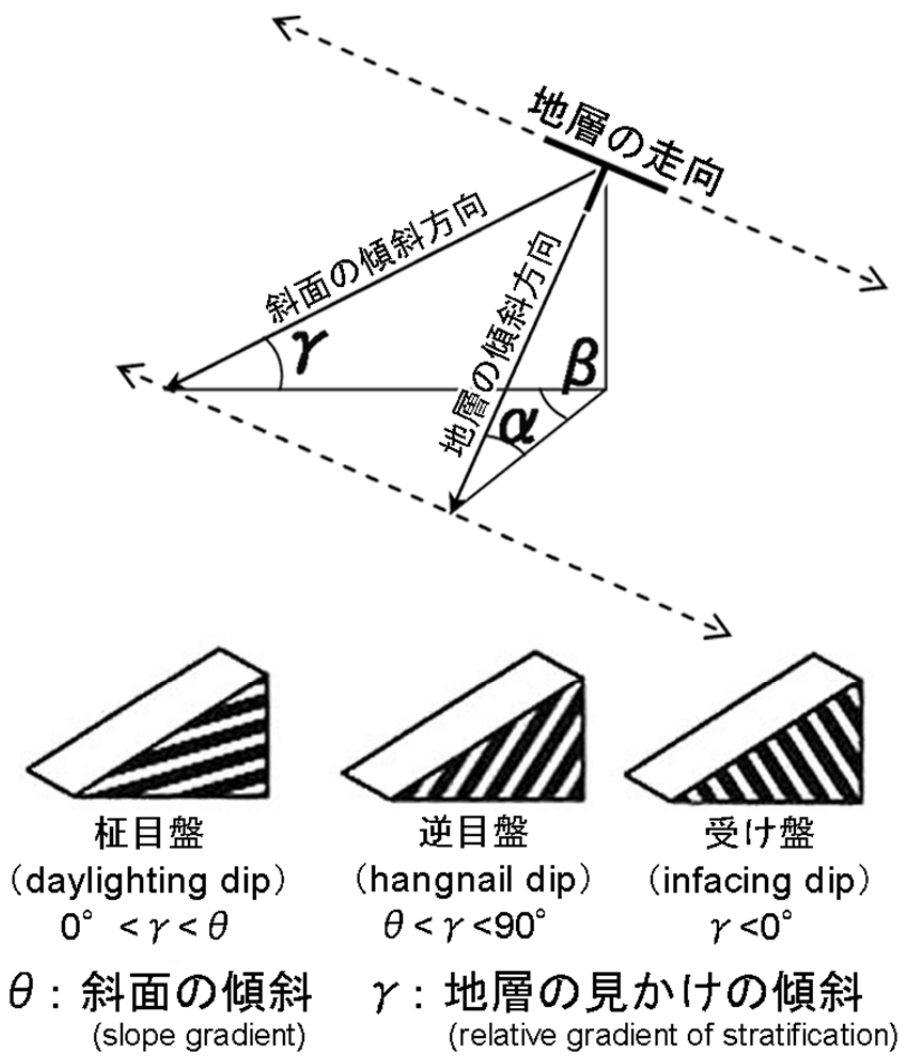
図 4.4 地震地すべり斜面における岩相区分の内訳

## (2) 層理面の見かけの傾斜と地震地すべりの規模との関係

次に、既往研究からケスタ地形の緩斜面側などにおける層理面に沿った流れ盤地すべりが指摘されることから、以下の方法で地震地すべりが発生した斜面における層理面の形状を求めた。各地震地すべり斜面に相当する 50m メッシュ局所データより、地層傾斜角の平均値（地層の平均傾斜角： $\alpha$ ）と、斜面の平均傾斜方向と地層の平均傾斜方向の差（ $\beta$ ）を用いて、斜面の傾斜方向における地層の見かけの傾斜角（ $\gamma$ ）を次式より求めた。

$$\tan \gamma = \tan \alpha \cdot \cos \beta \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.1)$$

さらに、各地震地すべり斜面に相当する 50m メッシュの斜面傾斜角の平均値（斜面の平均傾斜角： $\theta$ ）と  $\gamma$  の差分から、鈴木（2000）の分類に基づいて地震地すべり斜面を柱目盤（地層が斜面に対して寝ているタイプ）、逆目盤（地層が斜面に対して立っているタイプ）、受け盤（地層が斜面と逆方向に傾斜しているタイプ）に分類した（図 4.5）。なお、検討範囲の北西部には荒谷層および牛ヶ首層の塊状泥岩が比較的広範囲に分布している。一般に塊状泥岩は塊状無層理の岩体であるが、1/50,000 地質図（柳沢ほか，1986）には走向傾斜の記号や東山背斜などの地質構造が明確に記載されており、砂岩層の狭在や成層泥岩を伴うことも指摘されている。さらに検討範囲の南東部には魚沼層の礫・砂・シルト層が分布している。これについても同様に走向傾斜記号の記載および層理の存在が指摘されることから、これらの領域においても層理面が存在するものと仮定して、検討範囲全体の地震地すべり斜面で上記のデータを作成した。また、柱目盤、逆目盤、受け盤の区分は  $\beta=0$  またはその近傍で使用されることが一般的であるが、ここでは図 4.5 に示したように  $\beta$  の大きさに関わらず、 $\gamma$  と  $\theta$  の関係により区分した。これは斜面の傾斜方向と地層の傾斜方向が斜交する条件においても、ほぼ斜面の傾斜方向と同方向に移動する層理面に沿った地すべりが発生し得ると考えられるためである。実際に中越地震時にも寺野地すべりでこのような事例（千木良，2005）が報告されている。



- ・ 水平 =  $0^\circ$  よりも受け盤側に傾斜した  $\gamma$  を負とした。
- ・ 一般的に柱目盤、逆目盤、受け盤の区分は  $\beta = 0$  またはその近傍で用いられるが、ここでは  $\beta$  の大きさに関わらず  $\gamma$  と  $\theta$  の関係により区分した。

鈴木 (2000) を改変

図 4.5 地層の見かけの傾斜による斜面の分類

各地すべりの面積を縦軸に、地層の見かけの傾斜角 ( $\gamma$ ) を横軸にとり散布図として示したのが図 4.6 である。これをみると、小規模な地すべりは地層の見かけの傾斜角 ( $\gamma$ ) と関係なく横軸方向に広く分布しているのに対し、 $2 \times 10^4 \text{m}^2$  を超えるような大規模な地震地すべりは大半が柵目盤か逆目盤で発生している。また、受け盤で発生しているものであっても  $\gamma$  が極めて  $0^\circ$  (水平) に近い。さらに、柵目盤の地すべりは  $\gamma < 20^\circ$  となっており、八木ら (2007) が  $2 \times 10^4 \text{m}^2$  以上の地すべりの元斜面勾配は大半が  $13-26^\circ$  であったと報告していることと調和的である。また、逆目盤であっても  $\gamma$  が  $40^\circ$  を超えると  $10^4 \text{m}^2$  以上の地すべりは生じていない。地すべりのすべり面傾斜角と地層の見かけの傾斜角に近似的関係があると仮定すれば、千木良 (2005) が調査した比較的大規模な地震地すべりのすべり面傾斜が、ほぼ水平 $\sim 42^\circ$ であったことと整合する。以上より、比較的大規模な地震地すべりの発生は、素因としての層理面の形状に規制されていると考えられる。

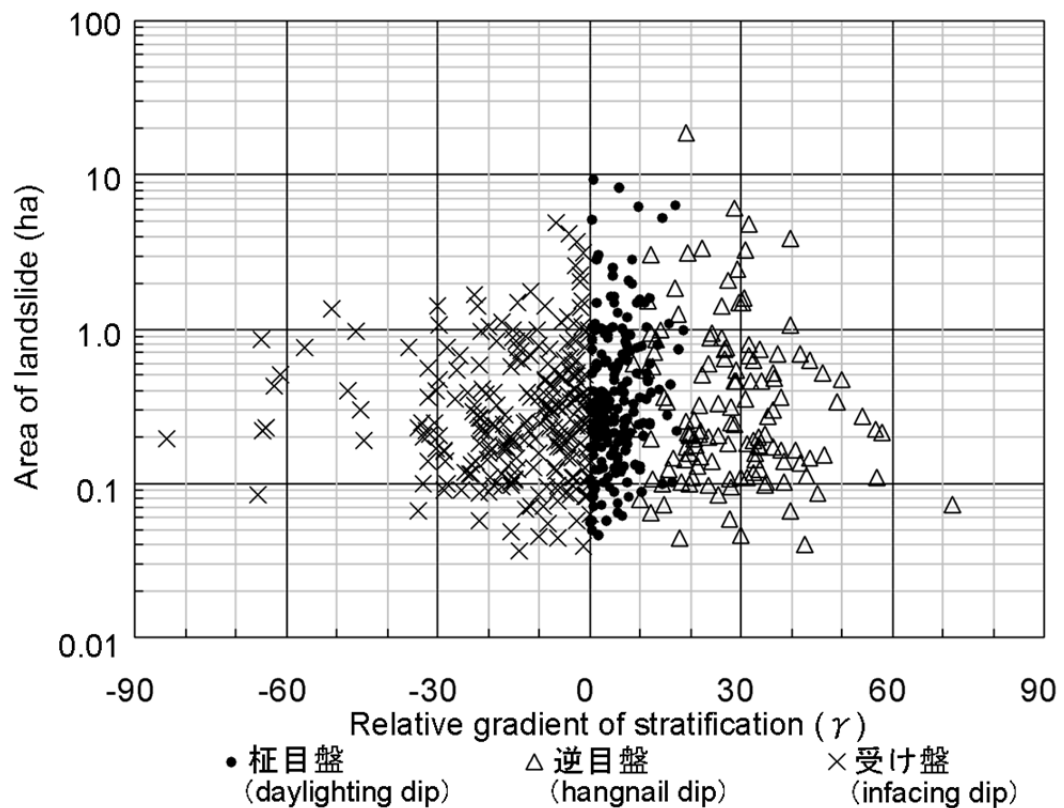


図 4.6 地震地すべりの規模と地層の見かけの傾斜 ( $\gamma$ ) の関係  
(地震地すべり斜面毎に集計した場合)



### (3) 斜面区分単位での評価

前述したように、広域に得られる地形・地質情報から、大規模な地震地すべりの素因となっている地質構造の傾向をある程度再現することが出来た。ここで、事前に地震地すべりの危険度評価を試みる場合、地すべりが発生する領域は不明であるから、一つの考え方として、地形・地質的特徴の同質な斜面を区分して評価単位とすることが考えられる。ここでは、周ほか(2005)の考え方に基づいて 50mDEM データ(中越地震前)から谷線と尾根線を作成し、これを基に斜面区分を作成した。さらに、層理面の傾斜は褶曲軸や断層を境に変化するため、地質図に記載された地質構造上の線も考慮した(図4.7)。地震地すべり斜面での分析と同様に、斜面区分毎に重複する 50m メッシュから 4.2.2 項に示した方法でデータを集計した。また、地震地すべり分布との位置関係から、斜面を地震地すべり発生斜面と非発生斜面に分類した。複数の斜面区分にまたがる地震地すべりは、便宜的に重複する面積が最も大きい斜面区分で発生したものとみなした。以上より、検討範囲内において区分された斜面数は 1,421 箇所、そのうち地震地すべりが発生した斜面は 326 箇所(22.9%)、さらにその中で  $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりが発生した斜面は 61 箇所(4.3%)であった。

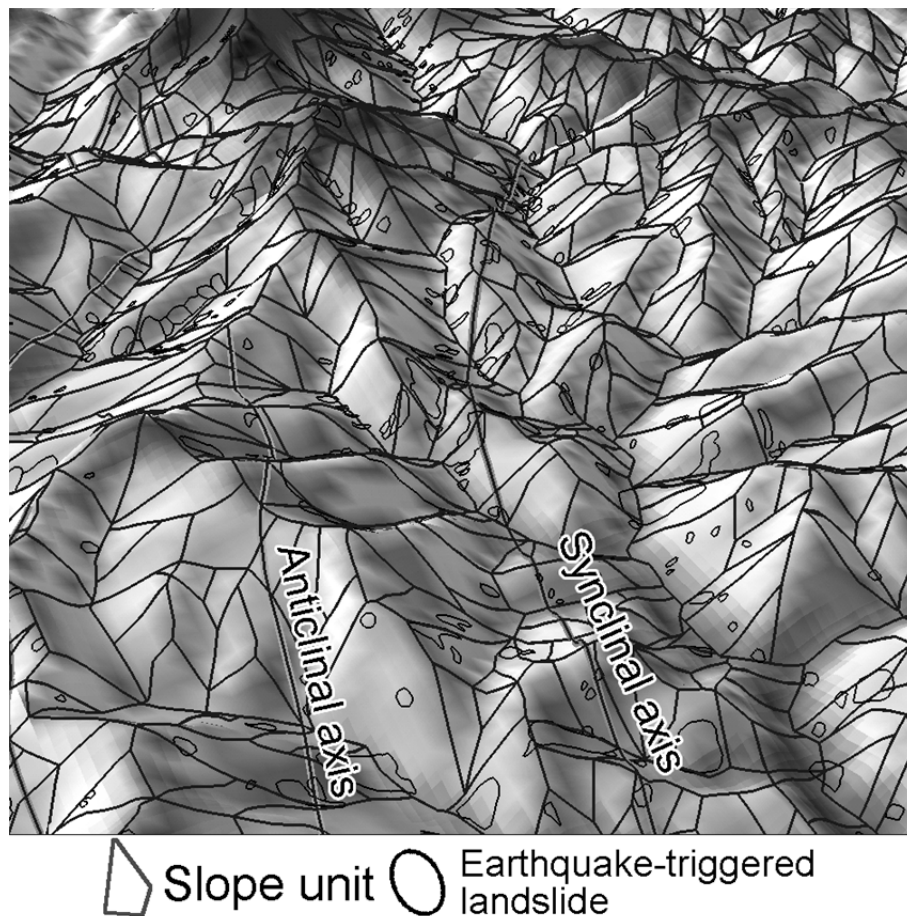


図 4.7 評価単位としての斜面区分

斜面区分毎に集計したデータからも、発生した地震地すべりの規模と地層の見かけの傾斜角 ( $\gamma$ ) の関係を再現できるか確認する。図 4.8 は斜面区分毎に集計した場合の地層の見かけの傾斜角 ( $\gamma$ ) と、その斜面で発生した地震地すべりの規模との散布図である。ひとつの斜面区分で複数の地震地すべりが発生していた場合は、面積が最大のものに代表させた。ここでも、小規模な地すべりは地質構造と関係なく発生すること、および大規模な地すべりの大半が  $\gamma < 40^\circ$  の 榎目盤・逆目盤斜面で発生している傾向が再現される。

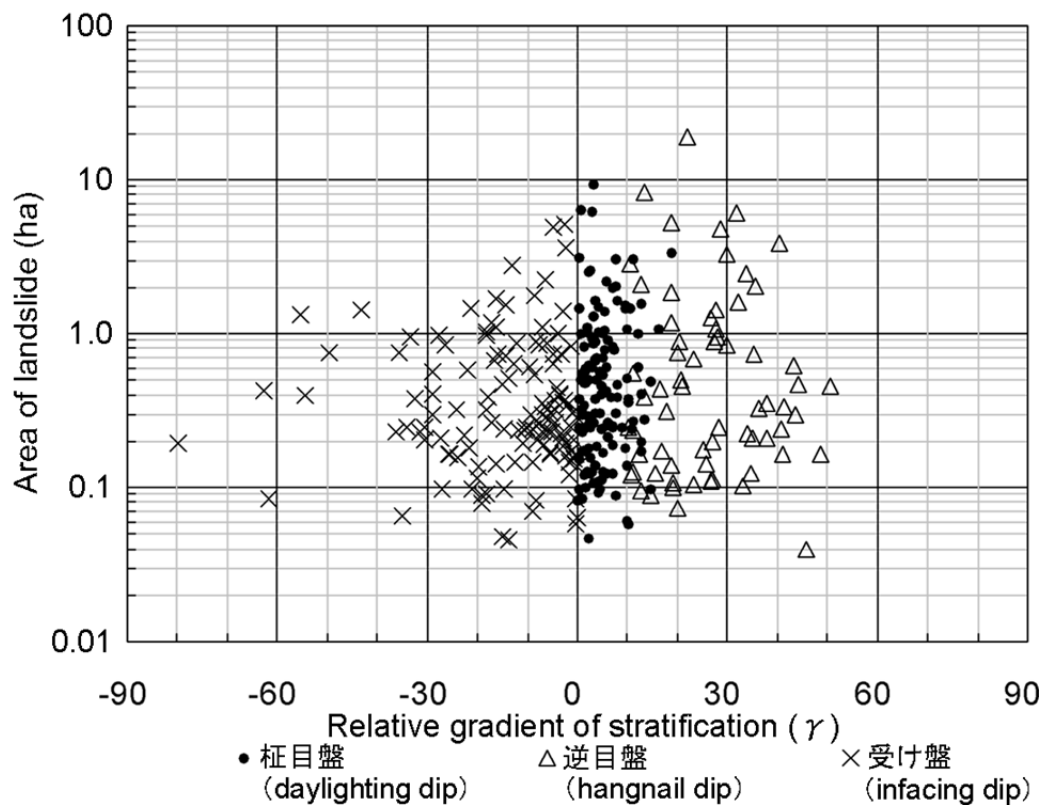


図 4.8 地震地すべりの規模と地層の見かけの傾斜 ( $\gamma$ ) の関係

(図 4.7 に示した斜面区分毎に集計した場合)

#### 4.3.2 地震地すべり発生斜面の動的応答特性

4.2.3 節で示したように、中越地震を対象とした地震応答解析の結果、地震地すべりを生じた斜面上部では加速度の大きな箇所が、斜面下部ではせん断応力の大きな箇所が見られた。図 4.9 は若井ほか（2008）による地震応答解析結果に、地震地すべり斜面と図 4.7 で示した斜面区分をオーバーレイしたものである。ここでは、地震地すべり斜面とその周辺（斜面の上部および下部）で生じた加速度とせん断応力を定量的に把握する意図から、地震地すべりを生じた斜面区分毎に、重複する 50m メッシュの加速度およびせん断応力の最大値を集計した。

個々の斜面中に生じた水平加速度の最大値と、その斜面で発生した地震地すべりの規模を散布図で示した（図 4.10）。地すべりの規模と水平加速度の最大値の間に明瞭な相関関係は見られない。地震動によって 800Gal 程度以上の水平加速度が生じた斜面において比較的大規模な地すべりが発生しているが、必ずしも大きな加速度が生じた斜面ほど大規模な地すべりを生じるとは言えない。

同様に、斜面中に生じた表層のせん断応力の最大値（図 4.11）と、その斜面で発生した地震地すべりの規模を散布図で示した（図 4.12）。これを見ると、35kN/m<sup>2</sup>程度のせん断応力が斜面の表層中に生じる斜面では 10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>以上の地すべりが発生する可能性があり、40kN/m<sup>2</sup>を超えるとより大規模な地すべりが発生している。これらを集計すると、40kN/m<sup>2</sup>以上のせん断応力が生じる斜面では 10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>以上の地すべりの 80%（49/61 箇所）、3×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>以上の 94%（16/17 箇所）が発生している。せん断応力が 40kN/m<sup>2</sup>以下にもかかわらず 10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>以上の地すべりが生じているのは、大半が流れ盤斜面（柎目盤か逆目盤）である。逆に、受け盤斜面の場合はせん断応力が 40kN/m<sup>2</sup>を超えないと 10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>以上の地すべりはほとんど生じていない。

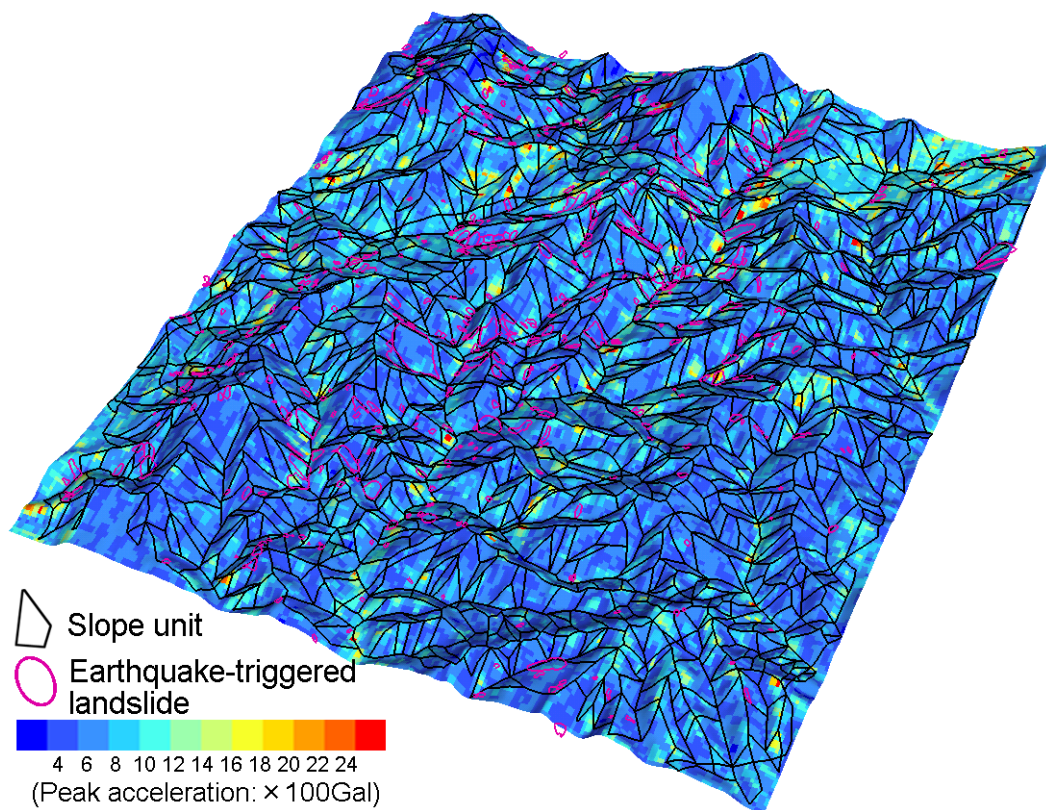


図 4.9 地震応答解析により得られた地表面の最大水平加速度分布

(若井ほか, 2008 に加筆)

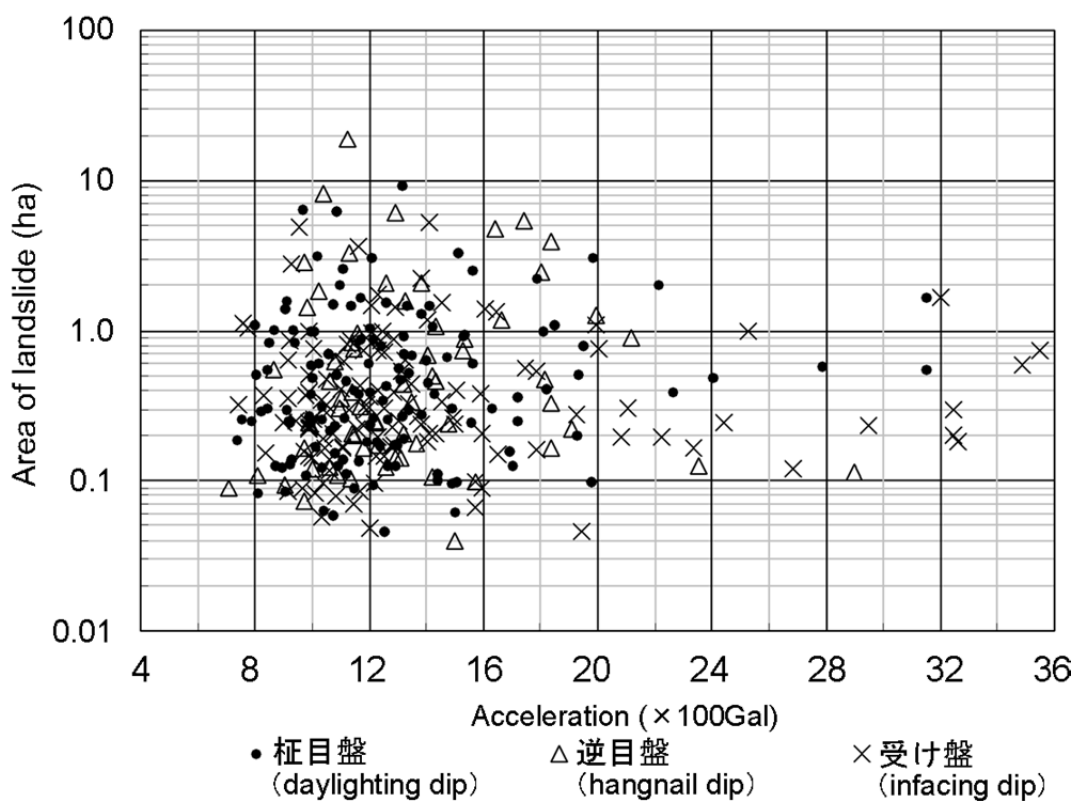


図 4.10 最大水平加速度と地すべり規模との関係

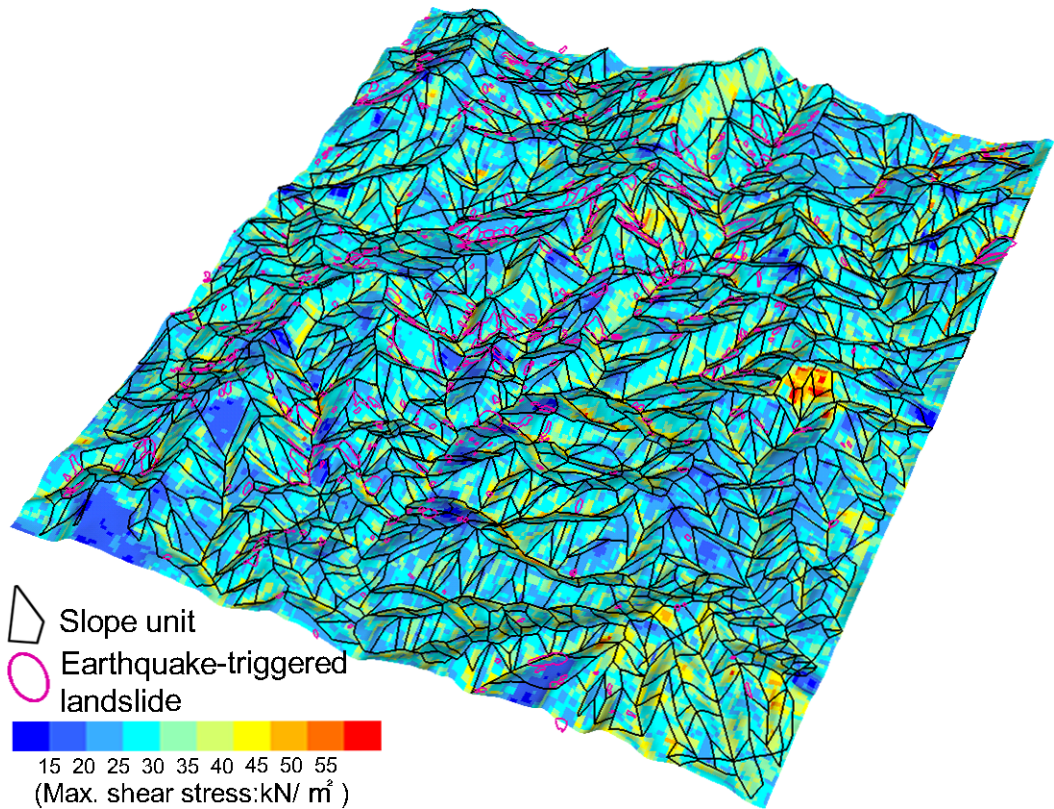


図 4.11 地震応答解析により得られた表層の最大せん断応力分布

(若井ほか, 2008 に加筆)

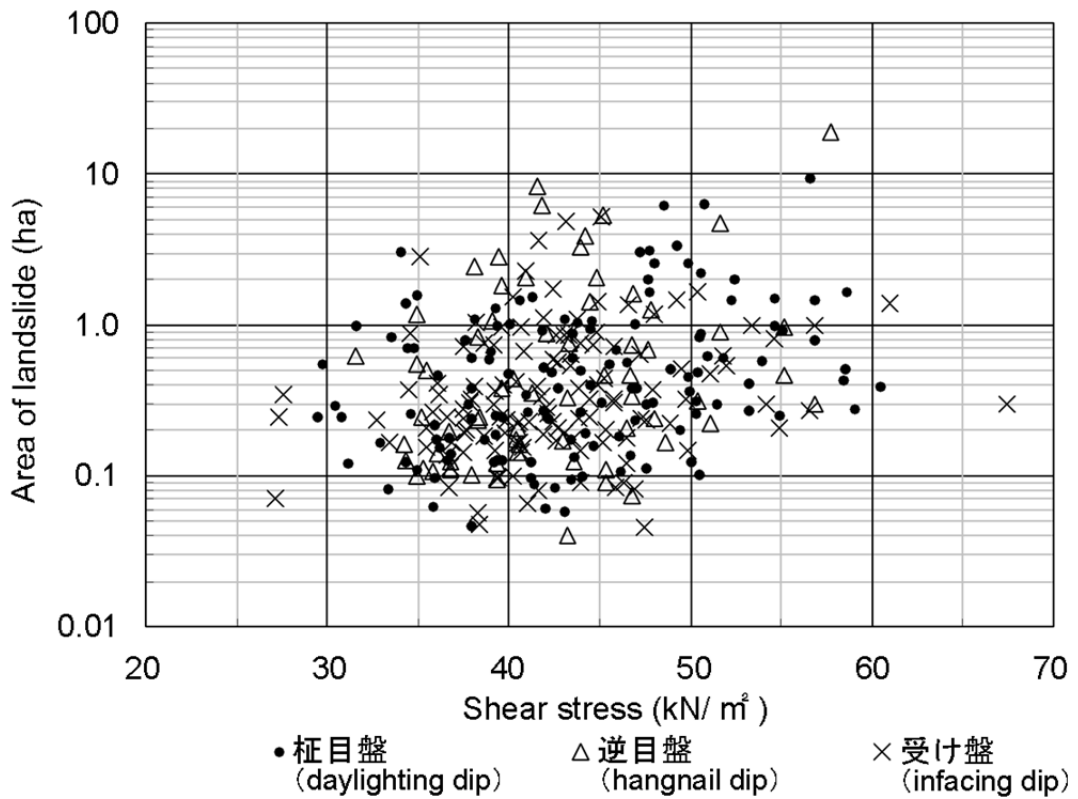


図 4.12 最大せん断応力と地すべり規模との関係

## 4.4 地震地すべりの危険度予測手法の考察

### 4.4.1 地震地すべりが発生しやすい条件

4.3 節での検討から、地震時に深刻な被害をもたらす比較的規模の大きい地震地すべりの素因として、ケスタ地形の緩斜面側など層理が発達し易い堆積岩の分布域における流れ盤斜面が挙げられた。広域の地形・地質情報を用いて個々の斜面における地層の見かけの傾斜 ( $\gamma$ ) を見たときに、多くの大規模な地震地すべりが  $0^\circ < \gamma < 40^\circ$  の条件で発生していることが明らかになった。また、誘因としての地震動と斜面の動的応答特性については、斜面上部で 800Gal 程度以上の水平加速度が生じることを前提として、斜面下部に  $40\text{kN/m}^2$  を超えるせん断力が生じる場合は  $10^4\text{m}^2$  規模の大規模な地すべりが生じていることが明らかになった。

以上の検討より、大規模な地震地すべりの発生しやすい条件を模式的に整理すると図 4.13 のようになる。また図 4.14 は、横軸に地層の見かけの傾斜 ( $\gamma$ )、縦軸にせん断応力の最大値をとり、 $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりが発生した斜面 61 箇所のデータを描画したものである。図 4.14 中の危険度 A 領域にあたる、地層の見かけの傾斜が  $0^\circ < \gamma < 40^\circ$  の条件にあたる斜面において、 $40\text{kN/m}^2$  を超えるせん断応力が斜面下方に生じることが予測される場合が最も危険であり、特に大規模な地すべりもこの条件で発生している。また、 $0^\circ < \gamma < 40^\circ$  の流れ盤斜面では、せん断応力が  $35\text{kN/m}^2$  程度の場合でも  $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりが発生しており、逆に受け盤斜面であっても、 $40\text{kN/m}^2$  を超えるせん断応力が生じる場合は  $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりの発生している。これら危険度 B の領域で発生した地すべりは、多くが  $3 \times 10^4\text{m}^2$  よりも小さい地すべりである。ただし  $\gamma$  が比較的水平に近い ( $-10^\circ < \gamma < 0^\circ$ ) 受け盤斜面で  $3 \times 10^4\text{m}^2$  をこえる地すべりが 3 事例発生している。どちらの条件にも当てはまらないのが危険度 C の領域であるが、例外的に 2 事例の受け盤地すべりがみられた。

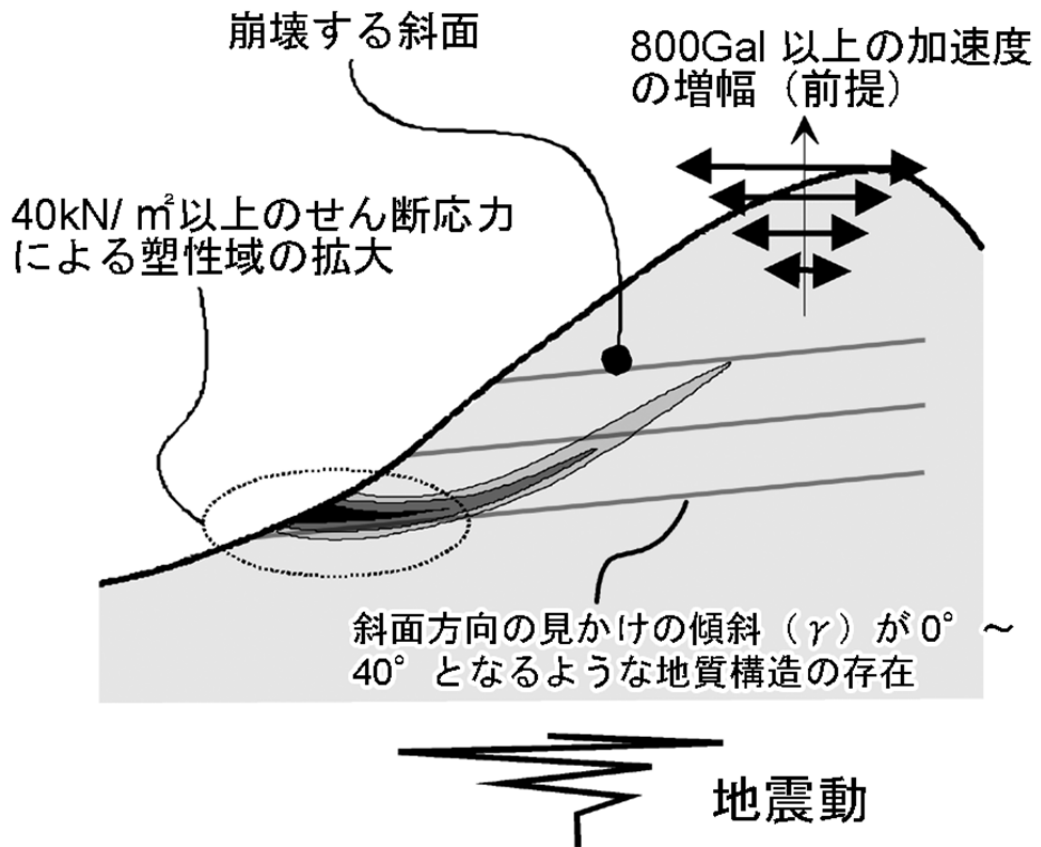


図 4.13 中越地震における大規模な地震地すべりが発生し易い斜面の概念図

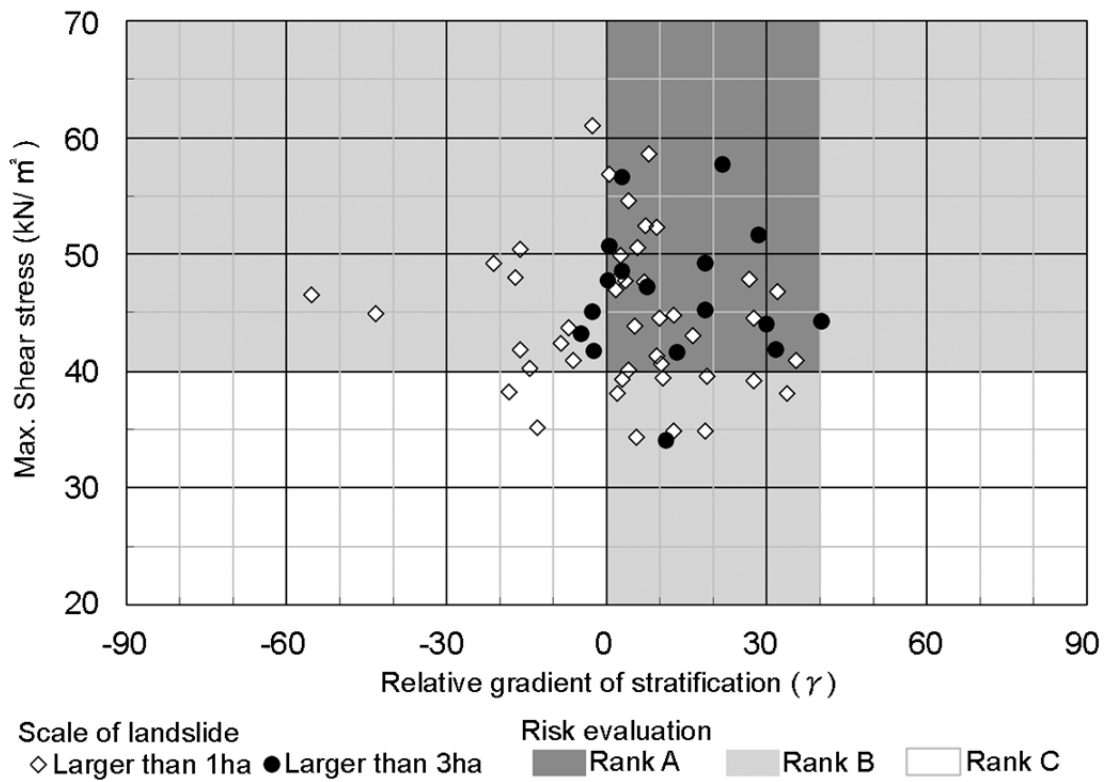


図 4.14 大規模な地震地すべりが発生した斜面における地層の見かけの傾斜とせん断応力の関係およびそれによる危険度評価

一方で  $10^4\text{m}^2$  に満たないような小規模な地すべりは、地質（岩相区分）の違いや地質構造（ $\gamma$  の値）の違い、さらには斜面中で生じるせん断応力の大小に関わらず、様々な条件の斜面で生じた。言い換えれば、堆積岩地域の山間部で M7 クラスの地震に見舞われた場合、尾根部で 800Gal を超えるような加速度の増幅による慣性力が生じ、小規模な地すべりはいたるところで発生する可能性があるといえる。

#### 4.4.2 地すべりの非発生斜面を考慮した検討

地震地すべりが発生しやすい条件の斜面が、そうでない斜面と比べてどの程度発生しやすかったのかを把握するためには、地震地すべりが発生しなかった斜面を含めた検討を行う必要がある。

ここでは、地層の見かけの傾斜が  $0^\circ < \gamma < 40^\circ$  である斜面（これを条件 I とする）と、 $40\text{kN/m}^2$  以上のせん断応力が生じる斜面（これを条件 II とする）について、条件に該当する全斜面に対する地震地すべり発生斜面の比を発生率（ $Q$ ）として求めた。また、同様に条件に該当しない斜面での発生率（ $R$ ）を求めた。さらに、 $Q$  が  $R$  に対してどの程度優位であることを示す指標として確信度（ $P$ ）を次式より求めた。

$$P = \frac{Q - \bar{x}}{\bar{x}} \dots \dots \dots (4.2)$$

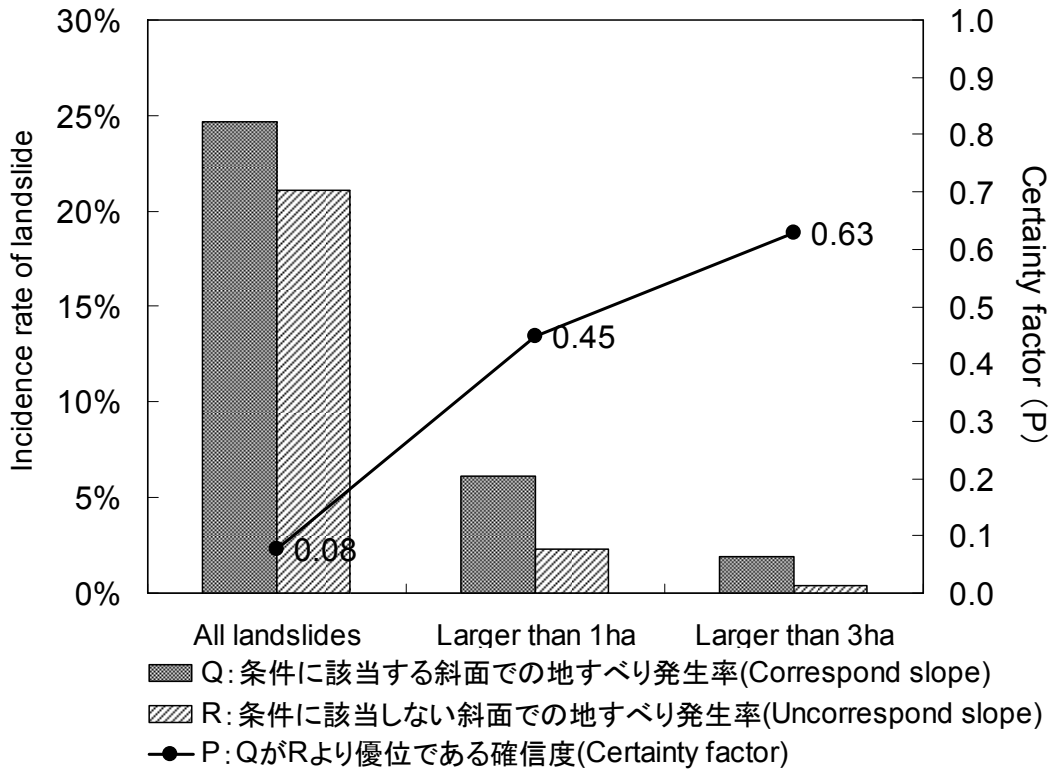
ここに、 $\bar{x}$  :  $Q$  と  $R$  の算術平均である。

すなわち、条件に該当する斜面で全ての地震地すべりが発生していた場合は  $P=1.0$ 、 $Q$  と  $R$  の発生率が同一のときは  $P=0.0$ 、条件に該当する斜面で地震地すべりが発生していない場合は  $P=-1.0$  となる。従って、 $P=1.0$  に近いほど地すべりが発生しやすい条件、 $P=0.0$  に近いほど地すべりの発生（あるいは非発生）に関係の無い条件、 $P=-1.0$  に近いほど地すべりが発生しにくい条件であるといえる。結果を図 4.15 に示した。

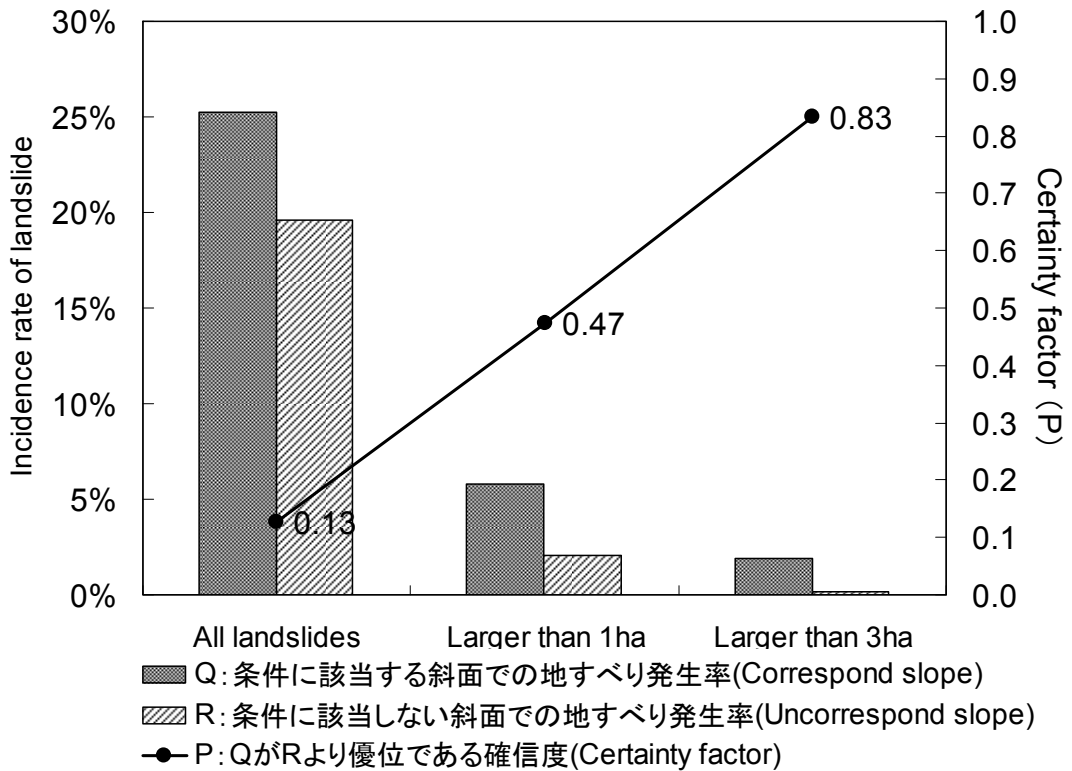
全地すべりを対象とすると、条件 I のとき  $P=0.08$ 、条件 II のとき  $P=0.13$  となる。これに対し、 $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりでは条件 I のとき  $P=0.45$ 、条件 II のとき  $P=0.47$ 、さらに  $3 \times 10^4\text{m}^2$  以上の地すべりでは条件 I のとき  $P=0.63$ 、条件 II のとき  $P=0.83$  となった。ここでも、大規模



な地すべりほど設定した条件において発生しやすかったことが確認される。



(a) 条件 I : 地層の見かけの傾斜が  $0^\circ < \gamma < 40^\circ$  となる斜面



(b) 条件 II : 40kN/m<sup>2</sup>以上のせん断応力が生じる斜面

図 4.15 各条件における地震地すべりの発生率の比較

#### 4.4.3 危険度評価手法の検討

これまで把握した地震地すべり発生斜面の特徴および大規模な地震地すべりの発生しやすい斜面の条件を踏まえて、事前の広域的な地震地すべり危険度予測がどの程度可能か考察を進める。大規模な地震地すべりの発生しやすい条件ⅠおよびⅡを用いて、両方に該当する最も危険な斜面を危険度 A、どちらかに該当する斜面を危険度 B、どちらにも該当しない斜面を危険度 C とすると、図 4.16 に示すような分布図ができる。これらの危険度の意味について、実際に生じた地震地すべり分布との関係から次のようなことが言える。

- ① 危険度 A：素因・誘因両方の条件に該当する、発生する地すべりの規模および発生率の両面において地震地すべりの危険性が最も高い斜面である。 $10^4\text{m}^2$  規模以上の特に大規模な地すべりが発生する可能性があり、主要な河道に接する斜面では地すべりダム形成が危惧される。危険度 A の斜面における  $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりの発生率は 8.5% (35/414 箇所)、 $3 \times 10^4\text{m}^2\text{ha}$  以上の地すべりの発生率は 3.1% (13/414 箇所) であった。
- ② 危険度 B：素因・誘因のどちらかの条件に該当しており、危険度 A よりも規模および発生率の両面で危険性は低いものの、 $3 \times 10^4\text{m}^2$  程度以下の地すべり発生に注意する必要がある斜面である。 $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりの発生率は 3.2% (24/750 箇所)、 $3 \times 10^4\text{m}^2$  以上の地すべりの発生率は 0.5% (4/750 箇所) である。
- ③ 危険度 C：素因・誘因の両面から大規模な地震地すべりの危険性がほとんど無いと予測される斜面である。これらの斜面においては、 $10^4\text{m}^2$  以下の小規模な地すべりを想定していれば十分であるといえる。 $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりの発生率は 0.8% (2/257 箇所)、 $3 \times 10^4\text{m}^2$  以上の地すべりの発生率は 0.0% (0/257 箇所) である。

また、図 4.17 は検討範囲内の全斜面 (1,421 箇所) と、そのうちの  $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりが発生した斜面 (61 箇所) および  $3 \times 10^4\text{m}^2\text{ha}$  以上の地すべりが発生した斜面 (17 箇所) について、危険度 A~C の内訳を示したものである。これを見ると、全体の 29%にあたる危険度 A の斜面に  $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりの 57%、また  $3 \times 10^4\text{m}^2$  以上の地すべりの 76%が含まれることがわかる。これを危険度 B 以上まで広げると、 $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりの 97%を含むことから、残りの危険度 C にあたる斜面 (全体の 18%) は大規模な地すべりの危険性がほぼ無いといえる。

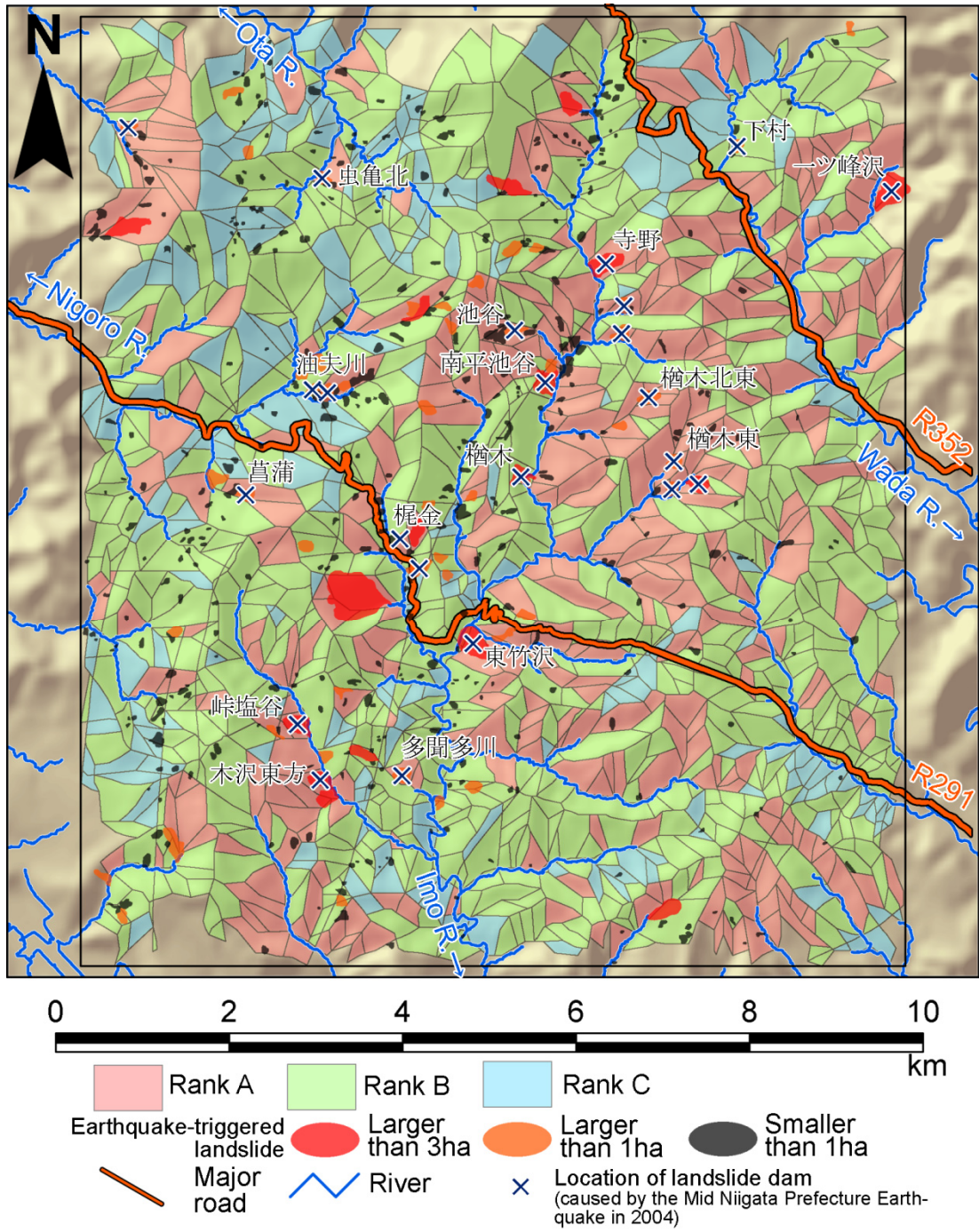


図 4.16 斜面区分ごとの危険度評価結果

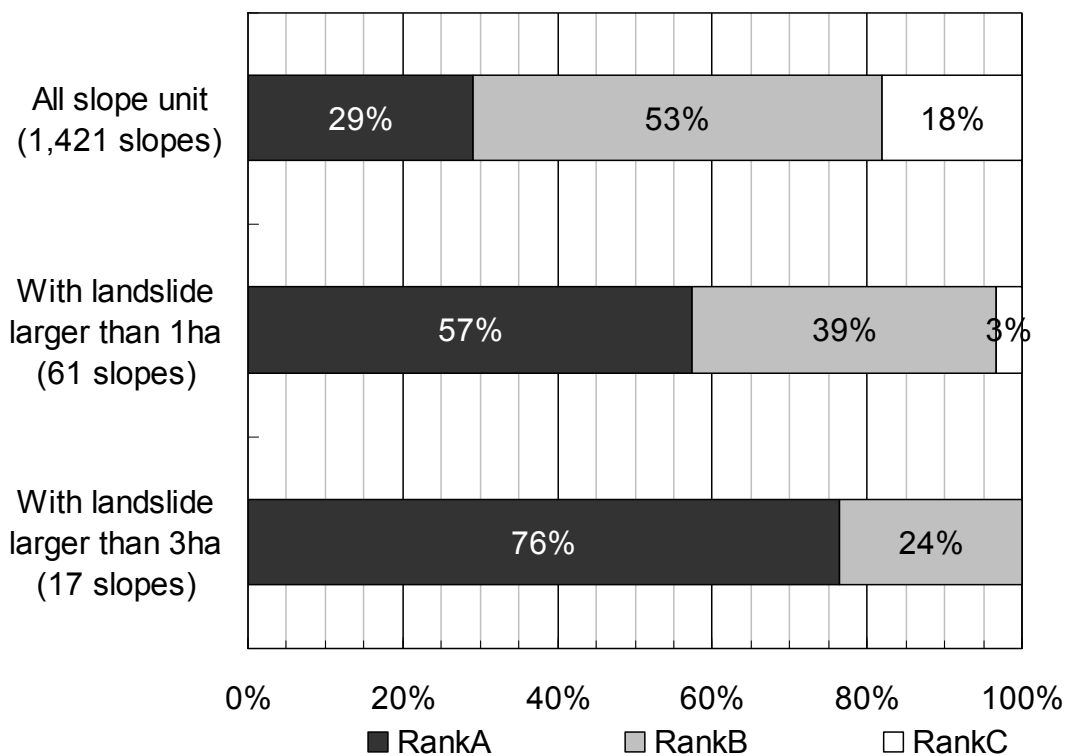


図 4.17 各斜面における危険度 A,B,C の内訳

大規模な地震地すべりの具体的な事例として、表 4.2 に検討範囲内において被害が報告されている地震地すべりを面積の大きい順に示した。地すべりダムが形成されるかどうかは、閉塞される河道や上流の集水域の規模にもよるが、 $10^4\text{m}^2$  を越える地震地すべりの多くで地すべりダムが発生している。芋川流域において深刻な被害をもたらした大規模な地すべりダムもこれらに含まれ、今回の手法でこのような地すべりを評価対象とできたといえる。なお、 $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりによる河道閉塞は、表 4.2 に記載されたものを含め 23 箇所みられ、このうち 18 箇所（78%）が今回の評価で危険度 A と判定された斜面で発生した（図 4.16）。

表 4.2 検討範囲内における代表的な地震地すべり

名称	地質	岩相	規模 (ha)	地すべりダ ムの有無	危険度評 価結果
塩谷神沢川	川口層	砂岩・シルト岩互層 *2	19.0		A
一ツ峰沢	白岩層	砂質泥岩・砂岩互層 *4	9.3	○	A
東竹沢	和南津層	砂岩*2	8.3	○	A
寺野	川口層	砂岩・シルト岩互層 *2	6.2	○	A
小栗山	牛ヶ首層	砂岩・泥岩互層*5	6.1		A
風口峠*2	荒谷層	泥岩, 凝灰質泥岩, 火山礫凝灰岩及び岩 層*2	5.3		A
南平池谷	川口層	砂岩・シルト岩互層 *2	5.2	○	B
峠塩谷	川口層	砂岩・シルト岩互層 *2	4.7	○	A
尼谷地	荒谷層	塊状泥岩*5	3.9		A
檜木	川口層	砂岩・泥岩互層	3.6	○	B
木沢東方*2	白岩層	砂岩*2	3.3	○	A
三石川	荒谷層	塊状泥岩	3.0		A
多聞多川	和南津層～魚沼層	砂岩・シルト岩～ 礫・砂・シルト	2.6	○	A
檜木北東*3	白岩層～川口層	砂岩・シルト岩	2.5	○	A
山古志中学校	荒谷層	塊状泥岩	2.2		B
油夫川	荒谷層	塊状泥岩	2.1	○	A
下塩谷	魚沼層	礫・砂・シルト	2.1		B
大久保地藏	川口層	砂岩・泥岩互層	2.1		A
檜木東*3	白岩層～川口層	砂岩・シルト岩	2.0	○	A
菖蒲	荒谷層	塊状泥岩	2.0	○	A
間内平南	荒谷層	塊状泥岩	1.5		B
池谷	川口層	砂岩及び砂岩・シル ト岩*1	1.5	○	A
虫亀北*3	荒谷層	塊状泥岩	1.5	○	A
木沢尻川	牛ヶ首層～白岩層	砂岩・シルト岩	1.5		B
下村	更新世崩積土	-	1.4	○	B
大日山南	牛ヶ首層～白岩層	砂岩・シルト岩	1.1		A
梶金	川口層	砂岩・泥岩互層	1.1	○	A

出典:\*1 (社) 日本地すべり学会 (2007), \*2 千木良 (2005), \*3 大八木 (2005), \*4 八木ほか (2007), \*5 花岡ほか (2007)

「名称」及び「地質」のうち, 記号のないものは\*1 及び 1/50,000 地質図を参照した。

「規模」は, Yagi et al.(2004)より算出し, 最大ブロックの平面面積を記載した。

「地すべりダムの有無」は, 上記文献のほか空中写真(国土地理院, 2007)及び国土地理院(2004)より判断した。

また、図 4.16 の危険度評価結果をみると、危険度 A, B, C の斜面が検討範囲全体に渡ってパッチ状に分布しているが、すでに述べたように、中越地震時には地震断層の上盤側で斜面崩壊が多発したことが指摘されている（図 4.18）。すなわち、危険度評価結果は検討範囲の南東部において相対的に危険度を過大評価したような結果となっている。これは、今回検討に用いた地震応答解析が地震断層の上盤側で観測された地震波形を対象として基盤入力地震波を想定し、解析範囲全体に与える手法をとっていることが一因となっている可能性がある（4.2.3 項参照）。ただ事前に地震断層の形状等を把握することは一般に困難であり、このような点を克服するとより精度の良い解析と危険度評価が可能であると考えられる。

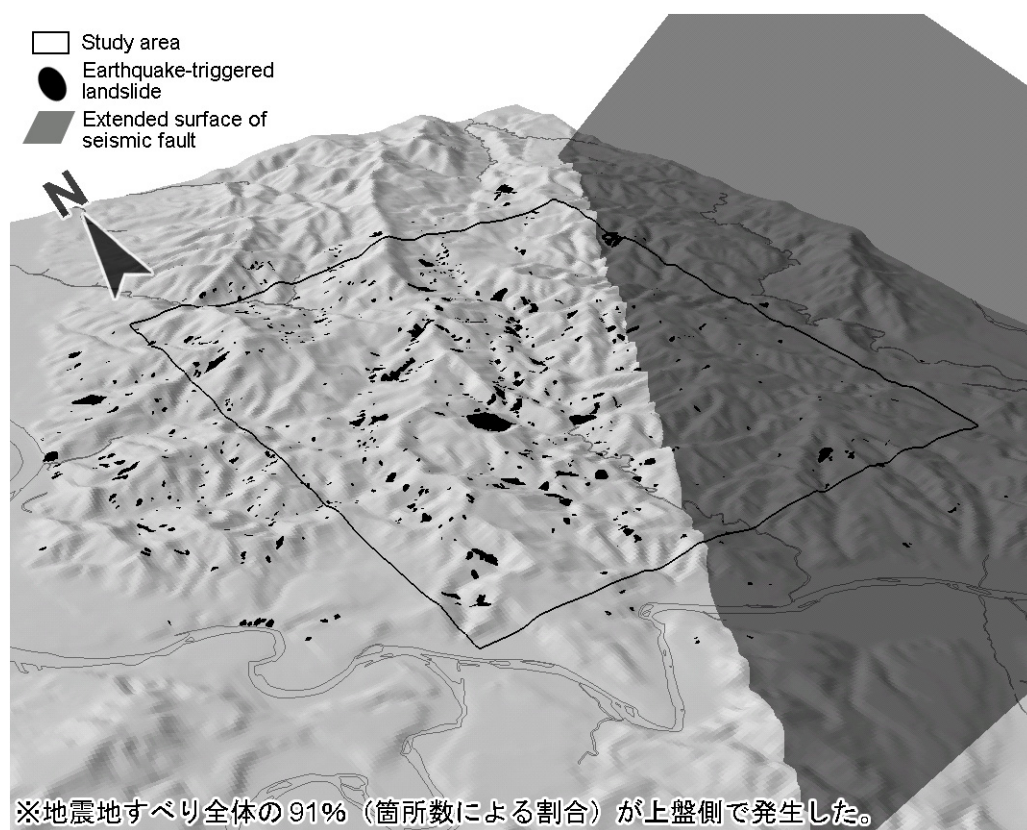


図 4.18 地震断層の上・下盤の境界と地震地すべりの分布

（図 4.1 に示した地震断層を地表まで延長したものが半透明で示した面となる）

次章では、ここで述べた地震地すべり危険度評価手法を踏まえて、地すべりダムの発生危険度をゾーニングする方法について検討を行う。

## 引用文献

- 阿部真郎・高橋明久 (1997) : 東北地方・グリーンタフ地域における地震発生時の地すべり挙動, 応用地質, Vol.38, No.4, pp.265-279.
- 阿部真郎・高橋明久・荻田茂・小松順一・森屋洋・吉松弘行 (2006) : 新第三紀層分布域における地震の震度と地すべりの地形・地質的特徴, 日本地すべり学会誌, Vol.43, No.3, pp.27-34.
- Burrough, P. A. and McDonell, R.A. (1998) : Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press, New York, 356p.
- 千木良雅弘 (2005) : 2004 年新潟県中越地震による斜面災害の地質・地形的特徴, 応用地質, 第 46 巻, 第 3 号, pp.115-124.
- 花岡正明・丸山清輝・ハスバートル・鈴木滋・村中亮太 (2007) : 2004 年新潟県中越地震により再滑動した地すべりの特徴, 土木技術資料, 49-9, pp.26-31.
- ハスバートル・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.428-434.
- 岩橋純子・山岸宏光・神谷泉・佐藤浩 (2008) : 2004 年 7 月新潟豪雨と 10 月新潟県中越地震による斜面崩壊の判別分析, 日本地すべり学会誌, Vol.45, No.1, pp.1-12.
- 小林巖雄・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 地質図幅), 地質調査所, 132p.
- 国土地理院 (1997) : 数値地図 50m メッシュ (標高), 日本Ⅱ CD-ROM 版.
- 国土地理院 (2004) : 平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震災害状況図, <http://zgate.gsi.go.jp/niigatajishin/index.htm> (参照日 2010 年 6 月 8 日)
- 国土地理院 (2005) : 北陸地方の地殻変動.地震予知連絡会会報, 第 73 巻, pp.269-317.
- 国土地理院 (2007) : 簡易正射変換画像, 2m メッシュ標高データ (中越) DVD 版.
- 日本地すべり学会 (2007) : 土砂災害写真集, 中山間地における地震斜面災害-2004 年新潟県中越地震報告 (I) -地形・地質編 付録 CD.
- 大八木規夫 (2005) : 2004 年新潟県中越地震により発生した地すべりのタイプと特徴, 深田地質研究所年報, No.6, pp.167-190.

- 関口辰夫・佐藤浩 (2006) : 新潟県中越地震における斜面崩壊の特徴と分布, 日本地すべり学会誌, Vol.43, No.3, pp.142-154.
- 鈴木隆介 (2000) : 建設技術者のための地形図読図入門第3巻, 古今書院, 256p.
- 竹内圭史・柳沢幸夫・宮崎純一・尾崎正紀 (2004) : 中越魚沼地域の5万分の1数値地質図 (Ver.1), 地質調査総合センター資料集, no. 412.
- 田中頼博・若井明彦・神藤健一・伊藤和広 (2006) : 中越地域の震度予測のための土質定数とその感度分析, 第45回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.293-296.
- Wakai, A. and Ugai, K. (2004) : A simple constitutive model for the seismic analysis of slopes and its applications, Soil and Foundations, Vol.44, No.4, pp.83-97.
- 若井明彦・鶴飼恵三・尾上篤生・樋口邦弘・黒田清一郎 (2007) : 層理面のひずみ軟化挙動に起因する流れ盤斜面の地震時崩壊の有限要素シミュレーション, 日本地すべり学会誌, Vol.44, No.3, pp.145-155.
- 若井明彦・田中頼博・阿部真郎・吉松弘行・山邊康晴・渡邊泰介 (2008) : 中山間地の地震時斜面崩壊リスクを評価するための有限要素法に基づく広域被害予測システム, 日本地すべり学会誌, Vol.45, No.3, pp.207-218.
- Watson, D.F. and Philip, G.M. (1985) : A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. Geoprocessing 2, pp.315-327.
- Yagi, H. Yamasaki, T. Moriiwa, T. Yamashina, S. and Atsumi, M. (2004) : Landslide Distribution Map-1 Triggered by Mid Niigata Earthquake in 2004 Occurred on October 23.
- 八木浩司・山崎孝成・渥美賢拓 (2007) : 2004年新潟県中越地震にともなう地すべり・崩壊発生場の地形・地質的特徴のGIS解析と土質特性の検討, 日本地すべり学会誌, Vol.43, No.5, pp.44-56.
- 柳沢幸夫・小林巖雄・竹内圭史・立石雅昭・茅原一也・加藤碩一 (1986) : 小千谷地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所, 177p.
- 周国云・江崎哲郎・謝漢文・佐々木靖人 (2005) : GISを用いた山地地形から三次元すべり危険斜面を抽出する方法の開発と適用, 応用地質, Vol.46, No.1, pp.28-37.





## 第5章 直下型地震による地すべりダム発生危険度のゾーニング法

### 5.1 導入

2004年新潟県中越地震（以下「中越地震」と略す）や2008年岩手・宮城内陸地震など大規模な内陸直下型地震に伴って、地震断層周辺の山地部において複数の地すべりダムが同時に発生する事例が多くみられる。移動土塊による直接の被害のほかに、湛水湖の形成による浸水被害や決壊による洪水・土石流の発生などの二次災害を生じる地すべりダムの発生は、山地部の地震災害において最も深刻な被害をもたらすものの一つであるといえる。広域の斜面について、地震時にどこで地すべりダムの発生する可能性が高いかを予測することができれば、緊急時の警戒避難体制の構築や防災計画の立案等をより効率的に行うことができると考えられる。

地震を誘因とするものに限らず、従来から地すべりダムに関する研究は多数みられる。例えば、洪水による被害規模を想定するための決壊時のピーク流量予測（Costa, 1998 や田畑ほか, 2001 など）や統計解析から地すべりダムの形状や安定度を検討した事例（Ermini and Casagli, 2003）、パターン識別解析により決壊時期の予測を行った事例（吉松ほか, 2011）など、地すべりダム形成後の決壊に対する安定性や危険度予測に関する研究が多くみられる。また、地震による地すべりダムに特化した研究としては、常田（2009）による2008年岩手・宮城内陸地震等の日本国内の既往地震による地すべりダムを対象とした形成要因および規模特性に関する研究が挙げられる。一方で、地震時における地すべりダムの発生について、広域に多数存在する斜面から危険な場所を予測する研究は少ない。

本章では、中越地震時に発生した地震地すべりを対象に地形解析を行い、地すべりダム発生場の地形的特徴を検討した。さらに4章で論じた地震地すべりの発生予測に関する検討から得られた知見を応用して、直下型地震時の山地斜面における地すべりダムの発生危険度をゾーニングする方法について考察した。

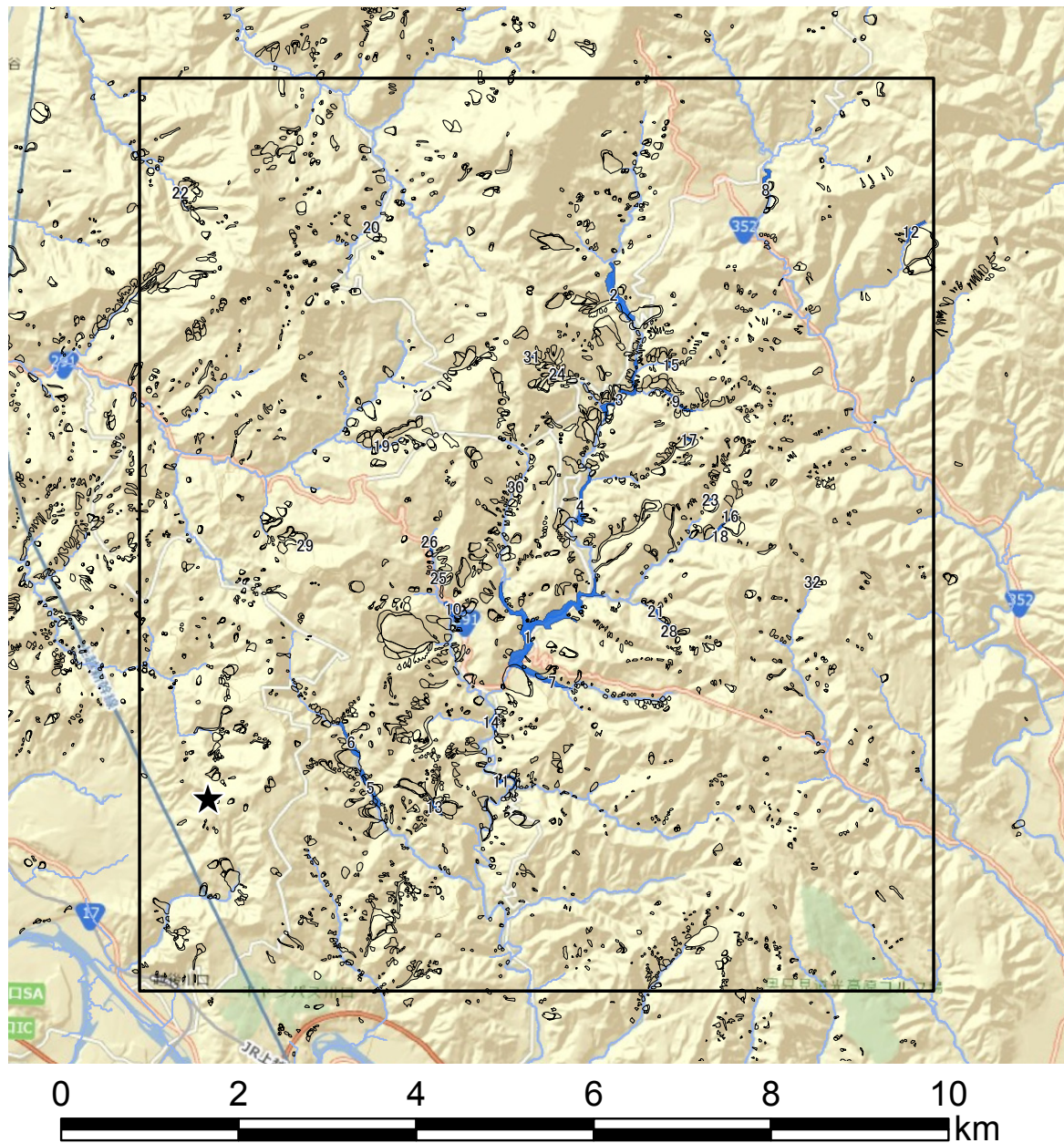
## 5.2 研究方法

### 5.2.1 分析対象とした地すべりダム

分析対象としたのは、中越地震時に土砂災害が多発した新潟県の旧山古志村（現長岡市）の芋川流域を中心とした約 9 km×10 km の範囲に含まれる地震地すべりおよび地すべりダムである（図 5.1）。地震地すべりの分布データとして、八木ら（2007）による中越地震時の斜面変動分布図\*を用いた。地すべりダムの湛水域は、「平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震災害状況図」（国土地理院, 2004）に記載された「河道閉塞（天然ダムの形成）に伴う湛水域」より最大の湛水範囲を抽出した。これに加えて「2m メッシュ標高データ（中越）」（国土地理院, 2007）に収録された空中写真からも湛水範囲を抽出した。これにより、分析範囲内で 32 箇所の地すべりダムを抽出した（表 5.1）。

---

\*引用元では発生様式により凡例分けされているが、ここではこれらをまとめて単に「地すべり」と記載する。



- N
- 1 Submerged area by landslide dam(after GSI 2004, 2007)  
(No. of landslide dam in Table1)
  - Earthquake-induced landslide(after Yagi et al.2007)
  - Study area
  - ★ Epicenter

図 5.1 分析対象とした地震地すべりと地すべりダムの位置図

表 5.1 分析範囲内の地すべりダム一覧

湛水面積は国土地理院(2004, 2007)による災害状況図およびオルソ画像より算出した。

No.	Landslide name	Submerged area (m <sup>2</sup> )	No.	Landslide name	Submerged area (m <sup>2</sup> )
1	東竹沢	185,522	17	檜木北東	3,520
2	寺野	53,408	18	—	3,355
3	南平池谷	35,361	19	油夫川	2,623
4	檜木	25,631	20	虫亀北	2,564
5	木沢東方	22,384	21	—	2,554
6	峠塩谷	19,699	22	—	1,918
7	—	13,052	23	檜木東	1,712
8	下村	12,684	24	池谷	1,619
9	—	10,240	25	梶金	1,071
10	下の沢	9,216	26	—	1,034
11	十二平南	9,090	27	—	898
12	一ツ峰沢	8,179	28	—	866
13	多聞多川	7,555	29	菖蒲	854
14	十二平	7,096	30	—	572
15	—	4,224	31	—	445
16	—	3,642	32	—	323

### 5.2.2 地震地すべりの地形解析

ある斜面で地すべりが発生することを前提として、地すべりダムが形成される可能性は以下のような地形・立地条件によって高まると考えられる。

- ① より大規模な地すべりが発生し、斜面末端に多量の土砂が堆積すること。
- ② 移動土塊が、より狭窄した谷部に堆積すること。
- ③ 湛水湖を形成するために十分な流量がある河川を閉塞すること。

これらを踏まえて、本研究で検討する地すべりダム形成特性の概念図を図 5.2 に示す。ここでは、以下に示す指標を各地すべりについて集計し、地すべりダムを生じた地すべりとそれ以外の地すべりの比較を試みた。

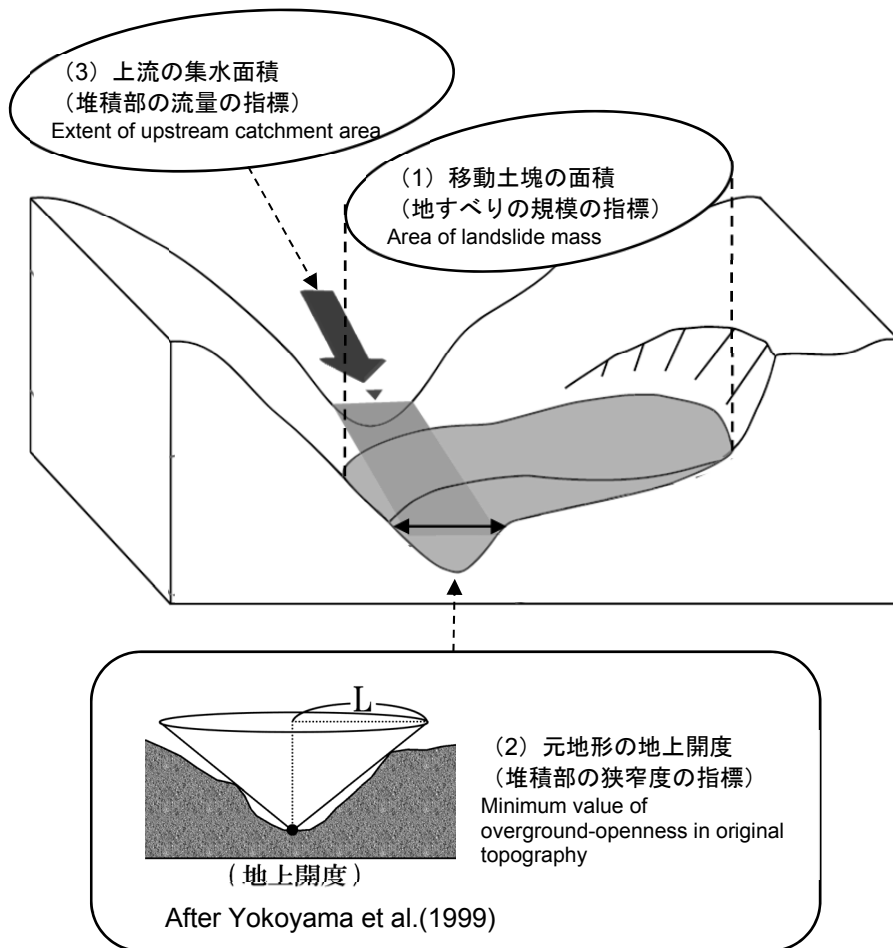


図 5.2 本研究で検討した指標の概念図

### (1) 地すべりの規模の指標

地すべりの規模の指標としては、厳密には地すべりの土量を用いるのが適当であると思われるが、すべての地すべりについて正確に移動土量を求めることは困難である。ここでは斜面変動分布図に記載された地すべりの面積を集計し、地すべりの規模の指標とした。ただし、流動性の高い地すべりの場合、その土量を過大評価することになる。そのため、八木ほか (2007) による原図のうち、移動土塊の幅に対して長さが極端に大きくなる土石流に分類される現象については検討対象から除外した。

### (2) 堆積部の狭窄度の指標

堆積部の狭窄度の指標としては、地震発生前の DEM データから求められる地上開度 (横山ほか, 1999) を用いることとした。地上開度は、格子状の DEM において対象とする格子点から任意の距離  $L$  の範囲内における 8 方位の地上角の平均値として求められる値であり、地上角は  $90^\circ$  から仰角の最大値を引いた値と定義される (太田・八戸, 2006)。すなわち、地上開度は  $V$

字谷のようなより狭窄した谷部において、より小さな値を示す。

分析に用いる DEM の格子サイズは 10m とした。これは、地すべりダム発生箇所の元地形を十分な精度で再現すること、および近年日本全国の DEM データが 10m メッシュ精度で国土地理院より公開されている現状（国土地理院, 2011）から、将来他の地域においても同一の精度で予測・分析を行うことを考慮したためである。ただし、中越地震以前の 10mDEM データは公開されていない。ここでは地震前の 2 万 5 千分の 1 地形図（「片貝」・「半蔵金」・「小千谷」・「小平尾」図幅）の等高線をトレースし、TIN データを作成することで 10mDEM データを作成した。また、距離 L は調査地の谷地形を十分抱合する大きさとして  $L=500\text{m}$  とした。

以上より作成した地上開度図を図 5.3 に示す。狭窄度の指標として、各地すべりの堆積域における地上開度の最小値を集計した。

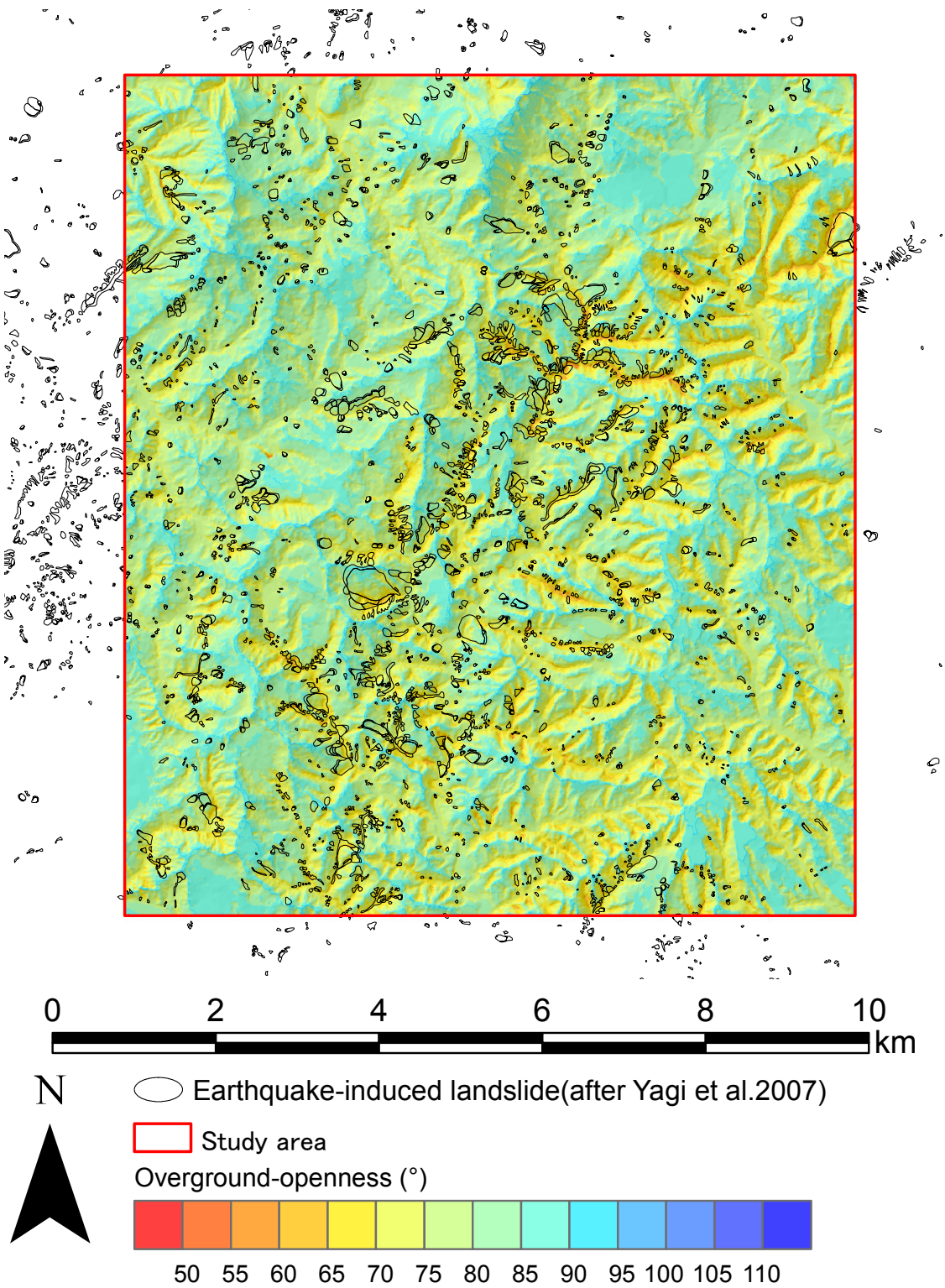


図 5.3 分析範囲内の地上開度図



### (3) 堆積部の流量の指標

ここでは、DEM による累積流量計算から求められる集水面積を地すべり堆積域における流量の指標に用いた。一般に、DEM による水文解析では、解析の支障となる窪地を除去し、メッシュごとの流向計算とそれによる累積流量の計算を行う（片谷, 2010）。ここでは、中心格子点と隣接する 8 方位の格子点からなる三角形要素の最急勾配の方向（流向）を全方位で求めて、角度の比率による重み付けから累積流量を求める Tarboton (1997) の方法を用いた。さらに、上流からの累積メッシュ数と単位格子面積との積より、各メッシュから上流の集水面積を算出した（図 5.4）。なお、累積流量計算の一連の処理には地形解析ツール TauDEM5.0 (Tarboton, 2010) を用いた。

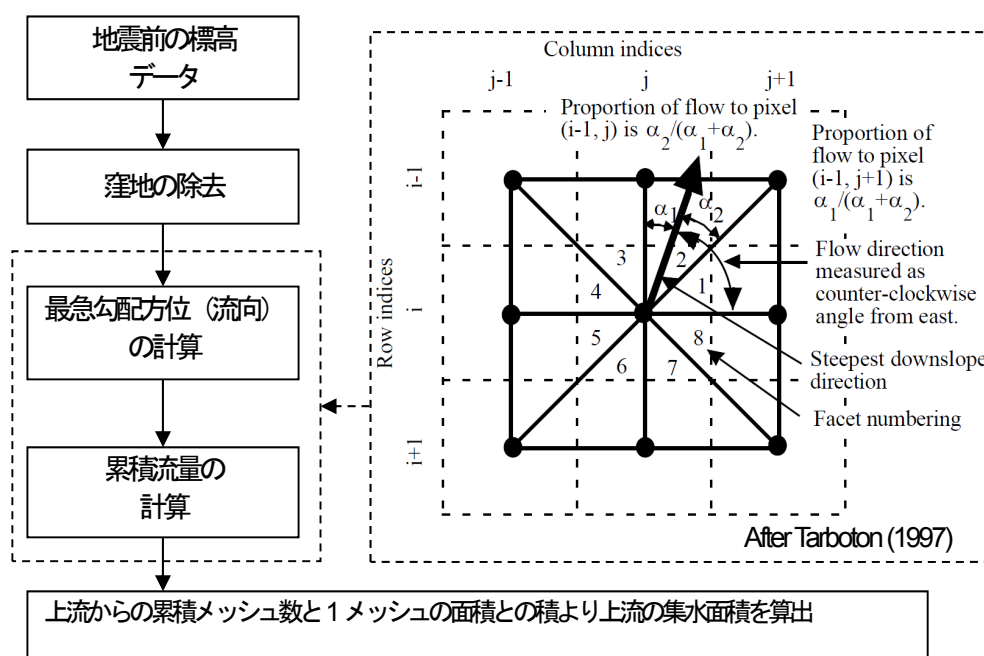


図 5.4 上流の集水面積の算出方法

後述するように、地すべりダムが形成されるような下流部において集水面積のオーダーを検討する限りにおいては、メッシュの精度による誤差は少ないこと、また、分析範囲に関連する集水域が広域に渡ることから、ここでは地震発生前の地形データとして 50m メッシュの DEM（国土地理院, 1997）を用いた。計算結果を図 5.5 に示す。各地すべりの堆積域に相当するメッシュの累積流量の最大値を集計して、堆積部の流量の指標とした。

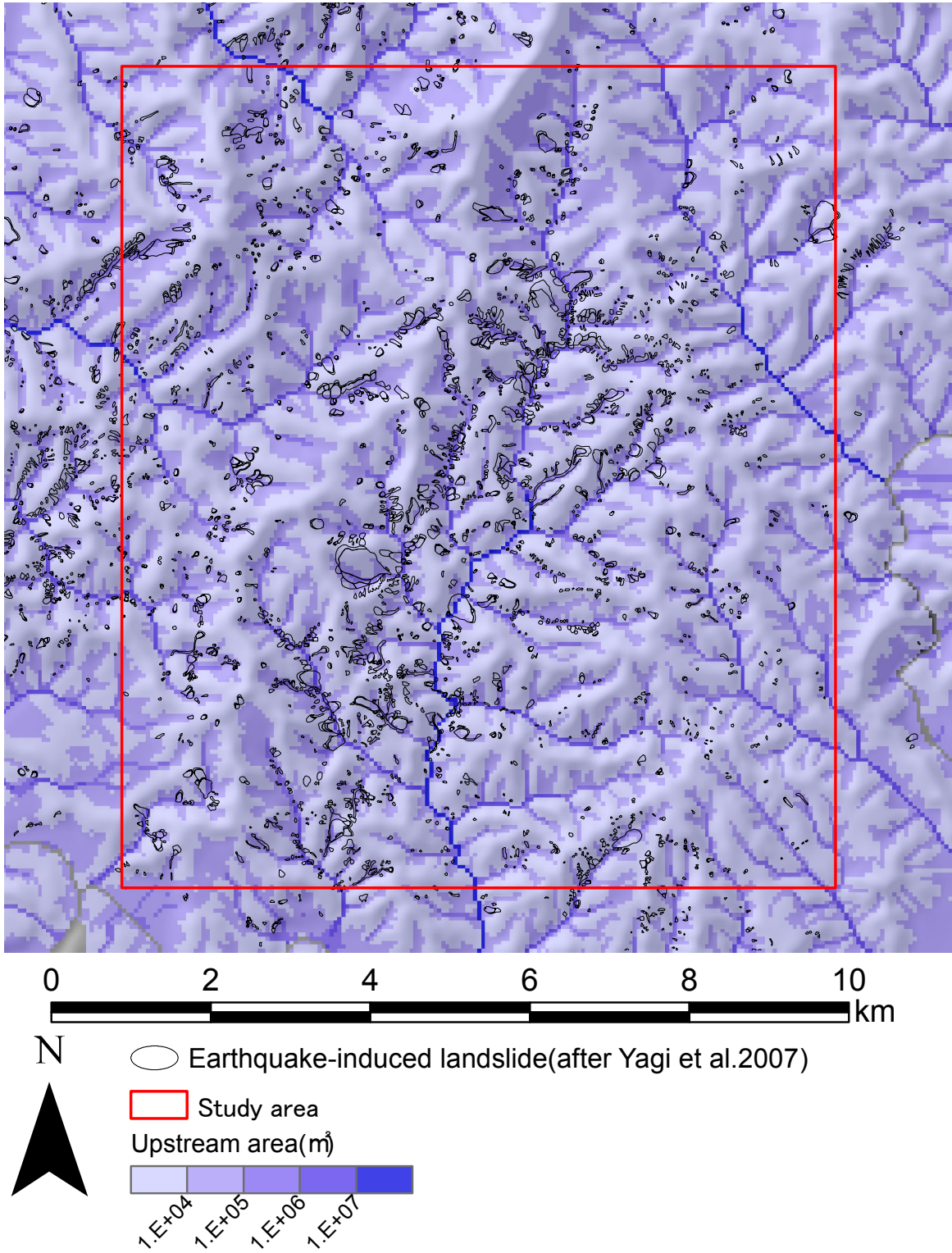


図 5.5 上流の集水面積の計算結果

### 5.3 地すべりダム発生場の地形的特徴

5.2 節に示した方法で集計したデータから、縦軸を地すべりの面積、横軸を地上開度として各地すべりをプロットした散布図が図 5.6 である。地上開度は値が小さいほど狭窄度が高いため、横軸は値を反転させている。ここで、表 5.1 に示したように中越地震時に発生した地すべりダムの規模は、湛水面積で  $10^2\text{m}^2$  オーダーの小さなものから、東竹沢地すべりのような  $10^5\text{m}^2$  以上のものまで様々であり、これらを同一に扱うことは合理的ではない。ここでは、東竹沢・寺野・南平池谷等の主要な地すべりダムが含まれる  $10^4\text{m}^2$  以上の湛水湖を形成したものを「大規模な地すべりダム」として区別して、「その他の地すべりダム」および「地すべりダムを生じなかった地すべり」とともに凡例を分けて図中に示した。同様に、縦軸を地すべりの面積、横軸を累積流量から求めた集水面積とした散布図を図 5.7 に示した。

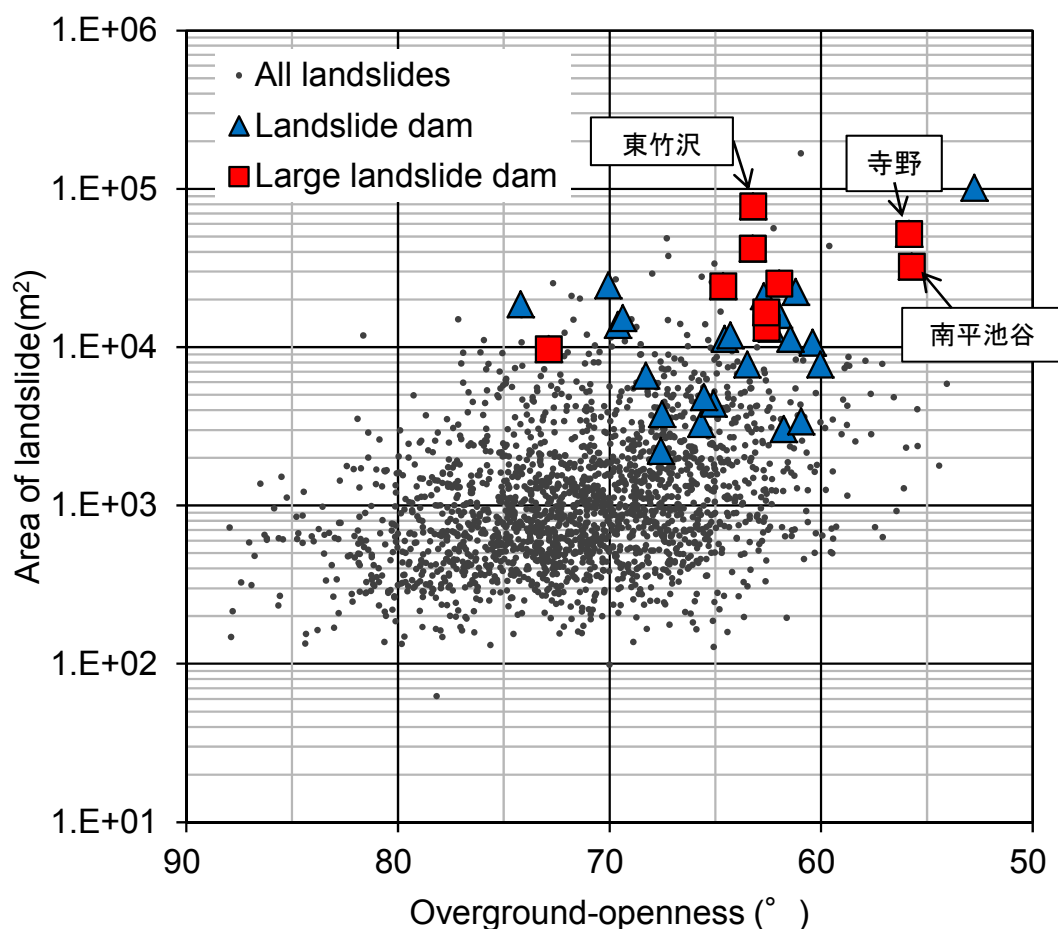


図 5.6 中越地震により発生した地すべりの面積と元地形の地上開度による分布  
湛水面積が  $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりダム (表 5.1) を Large landslide dam とした。

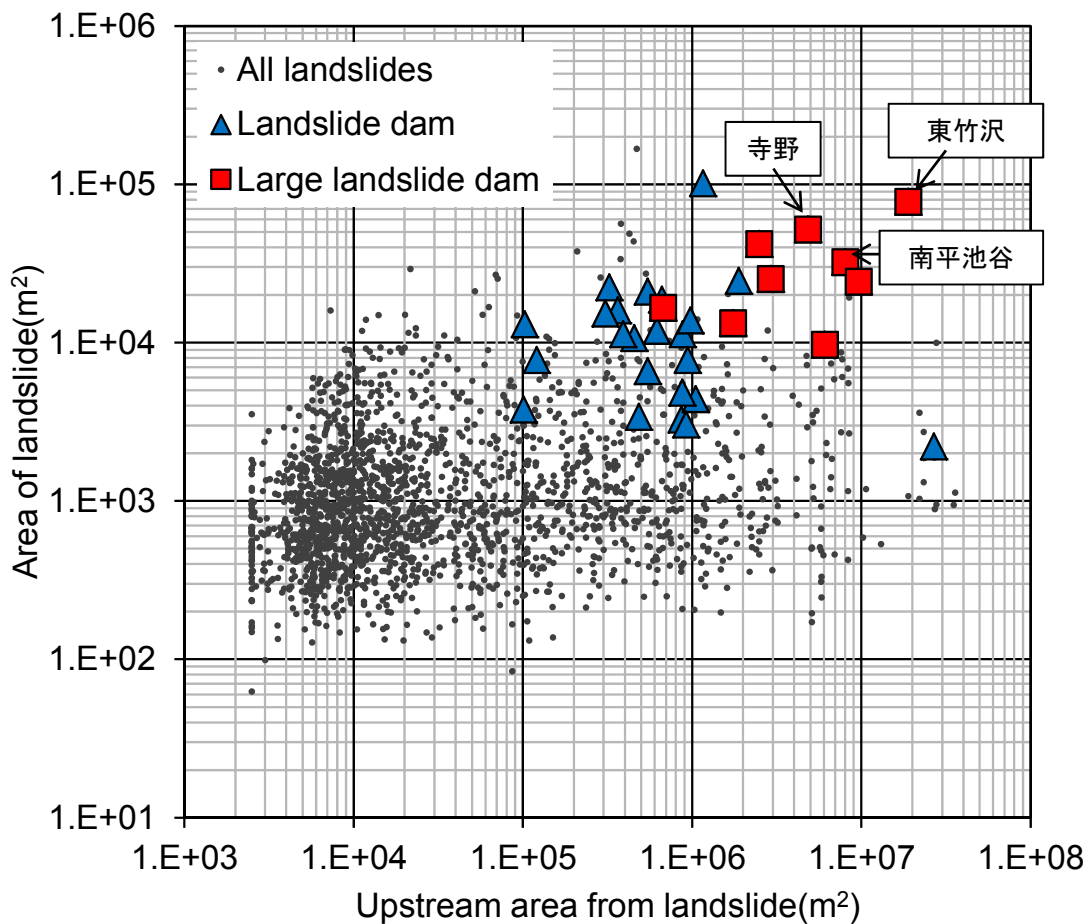


図 5.7 中越地震により発生した地すべりの面積と上流の集水面積による分布  
 集水面積が  $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりダム (表 5.1) を Large landslide dam とした。

図 5.6 および図 5.7 をみると、全体の分布と比較して地すべりダムを形成した地すべりは明らかに規模が大きく、堆積域の狭窄度が高く、流量が大である傾向がみられる。大規模な地すべりダムを形成した地すべりは特にその傾向が顕著である。地すべりダムを形成した地すべりの値に着目すると、①移動土塊の面積は  $10^3\text{m}^2$  以上、②堆積域の地上開度は  $75^\circ$  以下、③堆積域の集水面積は  $10^5\text{m}^2$  以上である。ただし、この条件に該当する地すべり 345 箇所のうち地すべりダムを形成したものは 32 箇所であり、地すべりダムの発生率は 9%、発生の確信度\*は 0.81 である。すなわち、上記の条件に該当する地すべりでは地すべりダム発生のあるもの

\* ある条件に該当する斜面のうち、地すべりダムが発生した斜面数を  $Q$ 、地すべりダムを発生しなかった斜面数を  $R$  としたとき、その条件における地すべりダム発生の確信度  $P$  を次式より求めた。

$$P = \frac{Q - \bar{x}}{\bar{x}} \quad \text{ただし、} \bar{x} : Q \text{ と } R \text{ の算術平均である。}$$

の、その確率は低いといえる。

一方、大規模な地すべりダム分布に着目すると、ほとんどが①移動土塊の面積が  $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりによって、②地上開度が  $65^\circ$  以下の狭窄部が埋積され、③その上流に  $10^6\text{m}^2$  以上の集水域がある、という条件のもとで発生している。この条件に該当する地すべりは全部で 9 箇所あり、そのうち大規模な地すべりダムを形成したものは 7 箇所であった。この条件における大規模な地すべりダムの発生率は 78%、発生の確信度は 0.55 である。なお、例外的に上記の条件から外れる大規模な地すべりダムは、図-1 および表-1 に示した No.8 および No.9 の地すべりダムであり、 $10^4\text{m}^2$  以上の湛水湖を形成した地すべりダム 9 事例のうち最も規模の小さいものと 2 番目に規模の小さいものである。すなわち、より規模の大きい 7 事例はすべて上記の条件のもとで発生している。

## 5.4 地すべりダムが発生危険度についての考察

### 5.4.1 潜在的な地すべりダムの危険度

地すべりダムの形成という視点に立つと、本章で着目した地すべりに埋積される谷部の狭窄度や流量の大きさは「素因」であり、地すべりの発生は「誘因」であるといえる。また、地震時に発生する地すべりの規模を事前に予測することは困難であるが、地上開度や累積流量の計算は DEM データがあれば比較的容易に行うことができる。以上より、ここでは素因に関する指標に基づく潜在的な地すべりダムの発生危険度について検討を行った。

5.3 節での分析結果から、地上開度および上流の集水面積と地すべりダムの発生危険度について、次のような3段階の分類が可能である。

- ① 地上開度が  $75^\circ$  以上もしくは集水面積が  $10^5\text{m}^2$  以下の場所では、地すべりダム形成の危険性はない。
- ② 地上開度が  $65^\circ$  以下かつ上流に  $10^6\text{m}^2$  以上の集水面積をもつ谷に面した斜面では、移動土塊の面積が  $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりが発生した場合に大規模な地すべりダムが形成される危険性がある。
- ③ 両者に該当しない斜面では、移動土塊の面積が  $10^3\text{m}^2$  以上の地すべりが発生した場合に地すべりダムが形成される可能性があるものの、②の条件と比較して確率は低く、大規模な地すべりダムが形成される危険性も少ない。

ただし、これらは最大でも  $10^5\text{m}^2$  程度以下の地すべりにより河道の閉塞された現象を基にした分析であるため、その前提を考慮して解釈するべきものである。また、河川の流量は降水状況により常に変動するものであり、例えば一定以上の降雨の後には地下水水位が上昇し、結果としてより上流部においても地すべりダムが形成される可能性がある。5.3 節に示した分析結果も中越地震発生当時の気象条件を反映したものであると考えられる。なお、分析範囲から最寄りの観測点（気象庁アメダス「小出」）における地震直前の24時間雨量は23 mm、地震1週間前からの累積雨量は132 mmであった（気象庁, 2011）。

以上の検討を踏まえて、潜在的な地すべりダムの発生危険度を示す地図を作成した。危険度の評価単位は4章での検討に用いた Slope unit を利用した。これは、DEM データから得られる谷・尾根線と地質図上の褶曲軸等により斜面分割を行ったもので、地形・地質的に同質な斜面をひとつの評価単位としたものである。個別の Slope unit に相当するメッシュから地上開度の最小値および累積流量の最大値を抽出して、上記の条件②に当てはまる斜面を地すべりダムの

潜在的な危険度” High” とした。同様に①に該当する斜面を “Low” , ③に該当する斜面を” Middle” とした。結果を図 5.8 に示す。中越地震時に主要な地すべりダムが形成された芋川流域や塩谷川流域の狭窄部に面した斜面が危険度” High” として抽出されている。

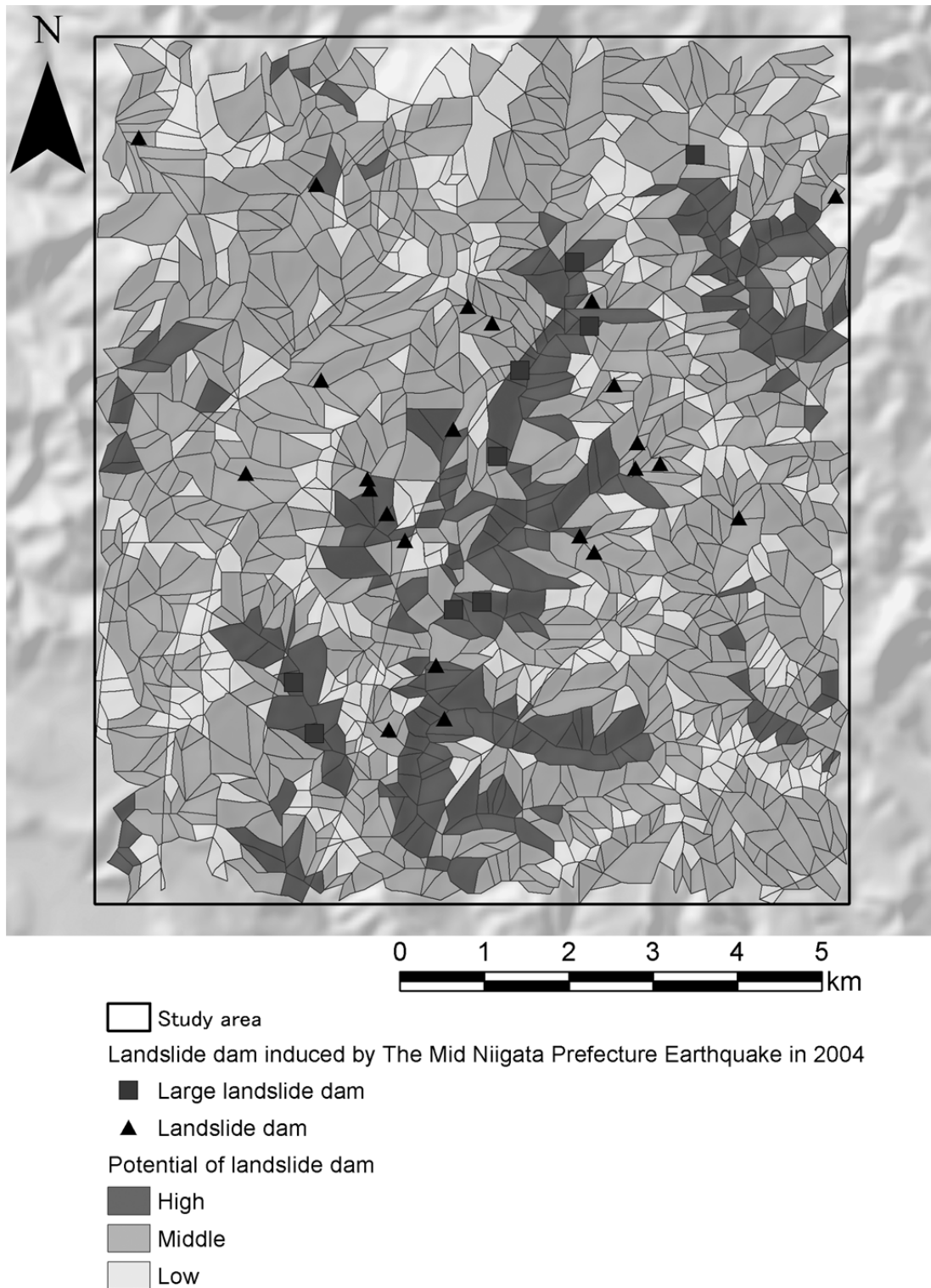


図 5.8 地上開度と上流の集水面積による潜在的な地すべりダムの危険度評価

#### 5.4.2 地震地すべり危険度評価との重ね合わせ

4 章では地形・地質解析と有限要素法による地震応答解析を組み合わせて地震地すべりの危険度評価手法を検討し、地震地すべりの発生危険度を以下のように分類した。

- ① 危険度 A：面積が  $10^4\sim 10^5\text{m}^2$  オーダーのより大規模な地すべりが起こりうる斜面。
- ② 危険度 B：危険度 A よりも発生率は低いものの、 $3\times 10^4\text{m}^2$  程度以下の地すべりが発生する可能性のある斜面。
- ③ 危険度 C： $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりの可能性がほとんどない斜面。

また、5.3 節での検討で、大規模な地すべりダムを生じた地すべりの面積は  $10^4\text{m}^2$  以上のオーダーであることが判っている。

以上より、大規模な地すべりダムの発生する恐れのある斜面を絞り込む意図から、地震地すべりの発生危険度 A および B の斜面に、図 5.8 に示した潜在的な地すべりダムの危険度”High”の分布を重ね合わせたのが図 5.9 である。地震地すべりの危険度評価のみをみると、危険度 A の斜面が全体の 29% (414/1,421 箇所)、危険度 B を含めると全体の 82% (1,164/1,421 箇所) を占める。これに対し、対象を大規模な地すべりダムに限定すると、危険度 A の斜面を全体の 6% (90/1,421 箇所)、危険度 B を含めても 14% (196/1,421 箇所) にまで絞り込むことが可能である。なお、実際に中越地震時に生じた湛水面積が  $10^4\text{m}^2$  を超える大規模な地すべりダム 9 カ所 (表 5.1 参照) のうち 8 カ所は、潜在的な地すべりダムの発生危険度が”High”かつ地震地すべりの危険度 B 以上の斜面で発生している。さらにそのうちの 6 カ所は、地震地すべりの危険度 A の斜面で発生している。



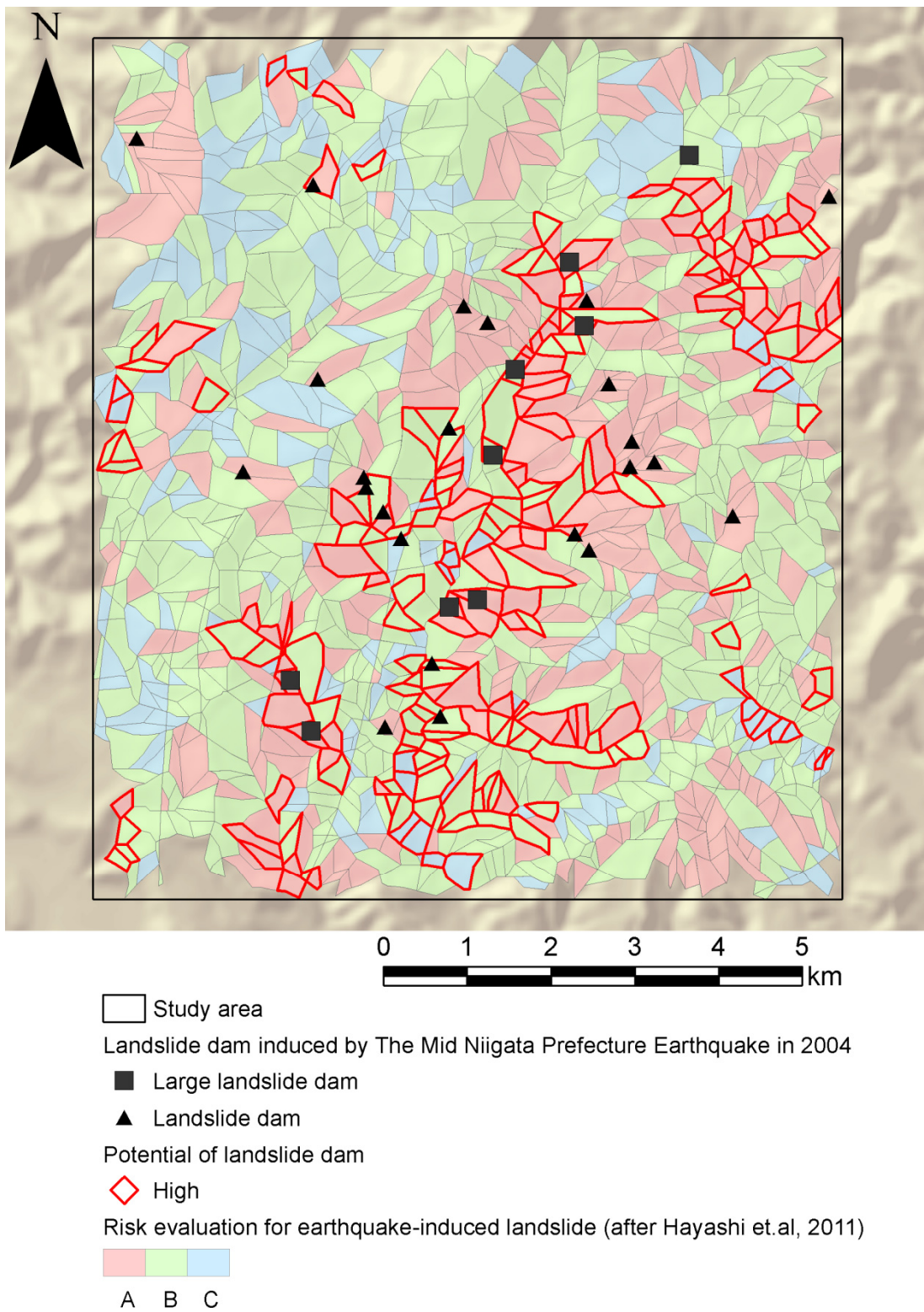


図 5.9 地震地すべりの危険度評価と地すべりダムの潜在的な危険度評価との重ね合わせ

## 5.5 地すべりダム の 堆積高 に関する 検討

地すべりダムが発生した場合、5.1 節に記載したような決壊時のピーク流量予測や決壊に対する安定度の検討が行われるが、その際に重要となるパラメータの一つとして地すべりダムの堤高（堆積高）が挙げられる。地すべり土塊が谷部を埋積した時の堆積高は、移動土塊の物性や土量、谷の狭窄度等に依存すると思われる。本研究では移動土塊の物性については議論していないが、地すべりの規模や堆積域の狭窄度について集計したデータが堆積高の推定に有用な可能性があるため、ここでは地すべりの堆積高についての検討を行った。

検討範囲内の各地震地すべりの堆積高を把握するために、地震前後の DEM の差分（地震発生後の標高から地震発生前の標高を引いた値）から各地すべりの堆積域における最大値を集計した。DEM の差分は標高の変化量を示し、必ずしも移動土塊の堆積高と一致するものではないが、下記に示す比較的規模の大きな地すべりの堆積域における DEM の差分の最大値を、その地すべりの最大堆積高とみなした。なお、地震発生前の地形データとして 5.2.2 項 (2) に示した 10m メッシュの DEM を、地震後の地形データとして「2m メッシュ標高データ（中越）」（国土地理院, 2007）を 10m メッシュに変換した DEM をそれぞれ用いた。

大規模な地すべりダムは移動土塊の面積が  $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりによって発生している（図 5.6 および図 5.7）ことから、この条件に該当する地すべりについて元地形の地上開度の最小値と最大堆積高との関係を図 5.10 に示した。最大堆積高の上限に着目すると、地上開度が  $65^\circ \sim 85^\circ$  の区間で最大堆積高と地上開度との間に一定の関係がみられるが、地上開度  $65^\circ$  以下の谷部を埋積した場合には、堆積高がさらに大きな値をとる可能性があるといえる。

以上より、ある斜面において地すべりダムの発生を前提とした時に、地形の狭窄度を分析することで想定される最大の堆積高（堤高）を予測できる可能性が示唆される。

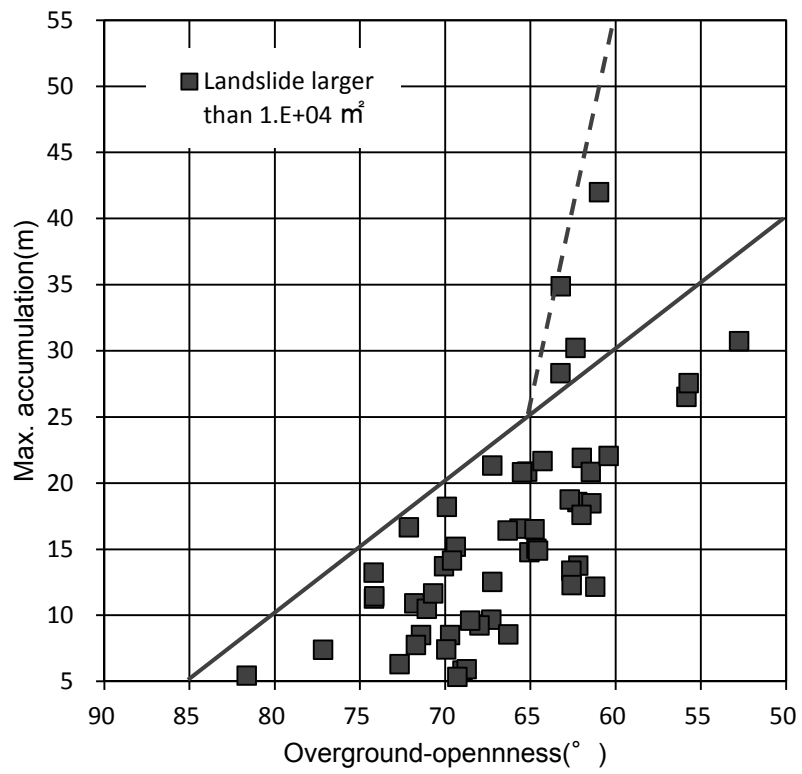


図 5.10 地すべり堆積域の元地形の地上開度と最大堆積高の関係

## 引用文献

- 阿部真郎・高橋明久（1997）：東北地方・グリーンタフ地域における地震発生時の地すべり挙動-主として秋田県・陸羽地震, 仙北地震での検証-, 応用地質学会誌, Vol.38, No.5, pp.265-279.
- 阿部真郎・林一成（2011）：近年の大規模地震に伴う地震地すべりの運動形態と地形・地質的発生の場合, 日本地すべり学会誌, Vol.48, No.1, pp52-61.
- J.Costa (1998): Floods from dam failure, *Floods geomorphology*, pp.436-439.
- L.Ermini and N.Casagli (2003): Prediction of the behavior of landslide dams using a geomorphological dimensionless index, *Earth surface processes and landforms*, 28, pp.31-47.
- 林一成・若井明彦・田中頼博・阿部真郎（2011）：地形・地質解析と有限要素法の連携による地震時の地すべり危険度評価手法, 日本地すべり学会誌, Vol.48, No.1, pp.1-11.
- 片谷信治（2010）：実務に効く！ArcGISでの解析手法と便利なツールのご紹介, 第2回 GIS Landslide 研究集会資料,  
[http://lswb1.ess.bosai.go.jp/gis-landslide/workshop2010-2nd/files/2ndGLM\\_O15KatayaP.pdf](http://lswb1.ess.bosai.go.jp/gis-landslide/workshop2010-2nd/files/2ndGLM_O15KatayaP.pdf)（参照日 2011年7月8日）.
- 気象庁（2011）：気象統計情報, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>（参照日 2011年7月8日）.
- 国土地理院（1997）：数値地図 50m メッシュ（標高）, 日本-II CD-ROM 版.
- 国土地理院（2004）：平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震災害状況図.
- 国土地理院（2007）：2m メッシュ標高データ（中越）DVD 版.
- 国土地理院（2011）：基盤地図情報サイト, <http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html>（参照日 2011年7月8日）.
- 太田岳洋・八戸昭一（2006）：数値標高モデルによる地形計測の現状と応用例, 応用地質, Vol.46, No.6, pp.347-360.
- 田畑茂清・池島剛・井上公夫・水山高久（2001）：天然ダム決壊による洪水のピーク流量の簡易予測に関する研究, 砂防学会誌, Vol.54, No.4, pp.73-76.
- D.G.Tarboton(1997):A new methtdod for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, *Water Resources Research*, Vol.33, No.2, pp.309-319.

D.G.Tarboton(2010):Hydrology Research Group-Terain Analysis Using Digital Elevation Models

(TauDEM) Version 5, <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5.0/index.html> (参照日 2011 年 7 月 8 日) .

常田賢一 (2009) : 地震時の天然ダムおよび土石流の発生特性に関する考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) , Vol.65, No.1 (地震工学論文集第 30 巻) , pp.811-820.

若井明彦・田中頼博・阿部真郎・吉松弘行・山邊康晴・渡邊泰介 (2008) : 中山間地の地震時斜面崩壊リスクを評価するための有限要素法に基づく広域被害予測システム, 日本地すべり学会誌, Vol.45, No.3, pp207-218.

八木浩司・山崎孝成・渥美賢拓 (2007) : 2004 年新潟県中越地震に伴う地すべり・崩壊発生場の地形・地質的特徴の GIS 解析と土質特性の検討, 日本地すべり学会誌, Vol.43, No.5, pp.294-306.

横山隆三・白沢道生・菊池祐 (1999) : 開度による地形特徴の表示, 写真測量とリモートセンシング, Vol.38, No.4, pp26.-34.

吉松弘行・阿部真郎・丸井英明・菅野孝美 (2011) : パターン識別解析による地すべりダムの決壊予測. 日本地すべり学会誌, Vol.48, No.6, pp.326-333.

## 第6章 結論

### 6.1 本研究で得られた知見

本研究は、大規模地震時に甚大な被害をもたらす地震地すべりとそれに伴う地すべりダムの発生について、過去の発生事例から発生場の特性を分析し、広域から発生危険度の高い斜面を抽出する手法の開発を目指したものである。特に、堆積岩地域において大規模な地震地すべりが層理面に沿って移動するメカニズムに着目し、広域に一定の精度で得られる地形・地質情報から地震地すべりの発生予測が事前にどの程度可能であったかを検討し、これらの危険度を評価する手法について考察した。

第3章でみたように、被害がより大きくなる大規模な地震地すべりの発生する典型的なパターンの一つとして、堆積岩地域における層理面に沿った地震地すべりが挙げられる。内陸で発生する直下型地震においては震源付近で多くの地すべりが発生するため、一つの流域に複数の地すべりダムが形成されるなど深刻な被害をもたらすことが多い。本研究で検討した手法は、このような地域における効率的な防災計画の立案などに寄与することを意図している。

各章において検討した内容と得られた結論を以下に示す。

第1章では、日本列島を取り巻く環境と土砂災害の概要、特に近年その発生が大きな社会問題となっている地震地すべりと地すべりダムによる被害の特徴について述べた。その上で、広域の斜面中からこれらの発生する危険度が高い斜面を予測することが防災上重要であることを指摘し、本研究の目的と本論文の構成について述べた。

第2章では、広域における複数の斜面の中から斜面変動の発生危険度が高い斜面を抽出するという観点から、これまでに行われてきた研究事例を整理し、これらを統計的な手法と力学的な手法に分類して概要を示した。また、統計的な手法と力学的な手法のそれぞれについて問題点を述べた。

第3章では、過去に発生した地すべりを伴った地震事例を収集し、地震地すべりを発生させた地震の特徴と発生場の地形・地質に焦点をあてて分析を行った。結果として、地震地すべりの運動形態は発生場の地形・地質特性を反映しており、その発生は地震の規模や震度、震央からの距離に規制されていることが明らかになった。結果は以下のようにまとめられる。

## ① 地形・地質と地震地すべりの運動形態

- ・ 第三紀―第四紀更新世の堆積岩，特に泥岩・砂岩・シルト岩の互層が分布する地域，すなわち層理の発達する地震地すべりは，ケスタ地形，尾根地形，さらに既存の地すべり地形上で，並進すべりや完落型すべりの形状で，初生岩盤すべり，もしくは再活動すべりとして発生していることが多い。並進地すべりの場合，流れ盤としての層理の連続性に地すべり規模が規制される傾向が見られる。また，1993年北海道南西沖地震時の奥尻島の地すべりや2008年岩手・宮城内陸地震時の荒砥沢地すべり（森屋ほか，2010）に見られるようにキャップロック状の地すべりとして変動している場合もある。
- ・ 第四紀の火山噴出物（火山灰，シラス，軽石，スコリアなど）や花崗岩のマサ化した未固結で砂質な堆積物の分布域では，尾根部，斜面凸部，遷急線部，段丘縁辺部，盛土端部および火山の斜面で，完落型すべり，流動性すべり，岩屑なだれとして発生している場合が多い。いずれも移動距離が長いことと，運動速度が速いために被害が増大する傾向がある。また，これらの材料による盛土部分のすべりも多発しており，防災上注意が必要である。
- ・ 先第三紀の変成岩や石灰岩の分布域においては資料が少なく，今後の解明が待たれる。1891年濃尾地震の場合には完落型すべりや岩盤崩落が地震断層沿いの山地斜面に多発している。
- ・ 火山岩分布域では山頂，尾根部分における表層の浅層すべりが多発している。

## ② 地震規模と地震地すべり

- ・ 地すべりを生じた地震事例の多くはマグニチュード7クラスの特に関内陸直下型地震である。
- ・ 多くの地震地すべりは概ね震度5以上で発生し，震度6以上になると発生件数が増加する。層理の発達する堆積岩上では震度6程度から初生岩盤地すべりや再活動型回転地すべりなどの発生が見られる。
- ・ ほとんどの地震地すべりは，震央から30km以内で発生している。ただし，未固結な火山噴出物の場合は震央から200km以上離れた場合でも流動性のすべりとして発生していることに防災上注意が必要である。
- ・ マグニチュード8～9クラスの地震の場合は，震央から100km以上離れた地点でも岩盤並進すべりや再活動すべりが発生している。これはマグニチュード7クラスの地震の震源断層の長さが数10km程度であるのに対し，マグニチュード8～9クラスの地震は100～500kmに及ぶためであると考えられる。

第4章では、近年発生した堆積岩地域における地震の代表事例として2004年新潟県中越地震を取り上げた。実際に発生した地震地すべりの分布と、広域に一定の精度で得られる地形・地質情報、および地震時の斜面の動的応答特性を把握できる有限要素解析システムを用いて、個々の斜面における地震地すべりの危険度を評価するための手法を検討した。結果は以下のようにまとめられる。

- ① 深刻な被害をもたらす大規模な地震地すべりは、堆積岩地域の流れ盤斜面に多く発生していることから、広域的な地形・地質データから斜面の傾斜方向における地層の見かけの傾斜( $\gamma$ )を求める手法を提案した。その結果、 $10^4\text{m}^2$ 未満の小規模な地すべりは地質構造と関係なく発生しているのに対して、 $10^4\text{m}^2$ 以上の地すべりは、大規模なものほど $0^\circ < \gamma < 40^\circ$ となる流れ盤斜面で発生している傾向がみられた。大規模な地震地すべりの発生が、素因としての層理面の形状に規制されていることが示唆される。
- ② 中越地震を対象とした地震応答解析結果(若井ほか, 2008)から、地震地すべり発生斜面における地表面の最大水平加速度と表層における最大せん断応力を把握した。 $10^4\text{m}^2$ を超える大規模な地すべりの多くは、斜面上部において800Gal程度以上の水平加速度が生じることを前提として、斜面下部で $40\text{kN/m}^2$ を超えるようなせん断応力が生じる斜面で発生していた。地震によって、すべり機構の形成を促すような大きなせん断応力が発生する斜面において、大規模な地すべりが生じたと考えられる。
- ③ 中越地震のように、堆積岩地域でM7クラスの直下型地震が発生し、斜面上部において800Gal程度以上の水平加速度が生じるような場合、 $10^4\text{m}^2$ 以下の小規模な地震地すべりは、上記のような条件に関わらず様々な斜面で発生するものと考えられる。
- ④ 大規模な地震地すべりの発生を規制する素因としての条件Ⅰ(地層の見かけの傾斜が $0^\circ < \gamma < 40^\circ$ となる斜面)および発生を促す誘因としての条件Ⅱ( $40\text{kN/m}^2$ を超えるせん断応力が生じる斜面)を用いて、地震時における斜面の地すべり危険度を、危険度が大きい順にA, B, Cに分類した。また、実際に中越地震時に生じた地すべり分布からそれぞれの危険度の意味を考察した。その結果、解析対象全体の29%にあたる危険度Aは、 $10^4\text{m}^2$ 以上の大規模な地震地すべりの発生率が最も高く、 $2\sim 3 \times 10^4\text{m}^2$ クラスの特に大規模な地すべりも起こりうる斜面とした。53%を占める中間的な危険度Bの斜面は、Aほど発生率は高くはないものの $3 \times 10^4\text{m}^2$ 以内の地すべり発生の可能性がある斜面といえる。残りの18%の危険度Cは、大規模な地震地すべりの危険性がほとんど無い斜面と評価できた。



第 5 章では、前章で取り上げた中越地震時に発生した地すべりを対象に地形解析を行い、地すべり発生場における地形的特徴から、地すべりダムが発生した斜面とそうでない斜面の違いを検討した。さらに、地震地すべりの発生危険度評価結果と組み合わせて地すべりダムの発生危険度をゾーニングする手法について考察を加えた。結果は以下のようにまとめられる。

- ① 発生した地震地すべりの規模の指標として移動土塊の面積を、地すべり堆積域の狭窄度の指標として元地形の地上開度を、地すべり堆積域の流量の指標として上流の集水面積をそれぞれ用いて、地すべりダムを形成した地すべりとそれ以外の地すべりを比較した。その結果、潜在的な地すべりダムの発生危険度とその指標について、以下のように整理した。
  - ・ 地上開度が  $75^\circ$  以上もしくは集水面積が  $10^5\text{m}^2$  以下の場所では、地すべりダム形成の危険性はない。(潜在的な地すべりダムの発生危険度” Low”)
  - ・ 地上開度が  $65^\circ$  以下かつ上流に  $10^6\text{m}^2$  以上の集水面積をもつ谷に面した斜面では、移動土塊の面積が  $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりが発生した場合に大規模な地すべりダムが形成される危険性がある。(潜在的な地すべりダムの発生危険度” High”)
  - ・ 両者に該当しない斜面では、移動土塊の面積が  $10^3\text{m}^2$  以上の地すべりが発生した場合に地すべりダムが形成される可能性があるものの、②の条件と比較して確率は低く、大規模な地すべりダムが形成される危険性も少ない。(潜在的な地すべりダムの発生危険度” Middle”)
- ② 目的を「大規模な地すべりダムの発生予測」に限定し、4 章で検討した地震地すべりの危険度評価結果に、「潜在的な地すべりダムの発生危険度 “High”」となる斜面の分布を重ね合わせることで、地震地すべりの発生危険度 A の斜面を解析対象全体の 6% (90/1,421 箇所) に、危険度 B の斜面を含めても全体の 14% (196/1,421 箇所) にまで絞り込むことができることを示した。また、中越地震時に湛水面積が  $10^4\text{m}^2$  を超える大規模な地すべりダムを生じた地すべり 9 箇所のうち 8 箇所が上記の危険度 B 以上の斜面で、6 か所が危険度 A の斜面で発生していることを示した。
- ③ さらに、大規模な地すべりダムを形成しうる移動土塊が  $10^4\text{m}^2$  以上の地すべりについて、中越地震発生前後の DEM の差分から各地すべりの最大堆積高を見積もり、最大堆積高の上限と堆積域の元地形の地上開度との間に一定の関係があることを示した。地上開度を指標として地形の狭窄度を分析することで、地すべりダムが発生した場合の最大の堤高を予測できる可能性がある。

地震地すべりの発生予測において、現地調査や現地試料の室内試験等による詳細な斜面の現況把握、あるいはそれらに基づいた数値解析を行うことが有効であることは言うまでもない。ただし、このような詳細な検討を流域全体などで広域的に行うことは多大な労力と費用を要するために困難である。従って、何らかの方法によって広域中から相対的に危険度の高い斜面を事前に抽出することで、効率的な斜面防災の調査計画立案に役立てようと考えたことが本研究の出発点である。

広域の防災計画の策定においては他にもいくつかの課題がある。本研究で提案したような規模の大きな地すべりや地すべりダムが発生危険箇所を予測する手法が、これらの解決に寄与できる可能性がある。

例えば、地震や台風などによって山間地域に地すべりや地すべりダムが多発した場合、斜面災害により交通が遮断されるケースが多い。このため、事後対応としてはまず航空レーザー測量やヘリコプターによる投下型水位観測用ブイ装置などによる現況把握や観測が行われる。ただし、人命救助や孤立集落の解消、二次災害防止のための緊急避難、地すべりダムの応急対応等の実質的な対応に当たっては地上からのアプローチが主体となり、特に交通網の迅速な復旧が不可欠である。この場合、事前対応として危険度予測を踏まえた迂回路の設定などにより、より合理的な住民の避難計画を検討しておくことや、交通網復旧のための重機などの機材を含めた人・物の計画的な配置を検討しておくことなどが考えられる。また、一つの流域で複数の地すべりダムが発生した場合は、上流側の地すべりダムからの排出物が下流の地すべりダムの安定性に影響を与えるため、流域全体の状況を踏まえた総合的な排水計画・土砂管理等に伴う判断が求められる。本研究で提案したように、流域単位で規模の大きな地すべりダムの発生危険度の高い場所を事前に複数箇所予測することが出来れば、これを踏まえた地すべりダムの形成・決壊シミュレーションなども駆使して、より実効的な検討を事前に行うことが出来ると考えられる。

## 6.2 今後の課題

今後の課題としては、今回対象とした地震地すべりとは異なるタイプの地すべりに関する危険度評価手法の確立が挙げられる。特に、被害の大きくなる地震地すべりのもう一つの典型例として、移動体が流動化して長距離移動するタイプの地すべりが挙げられる。これは第四系の未固結火山噴出物地域において事例が多くみられ(例えば, 2011年東北地方太平洋沖地震, 2003年十勝沖地震, 1978年伊豆大島近海地震など), 地震地すべりの被害軽減を図る上で重要な問題である。これらの要因としては斜面に平行な構造をもつ火山灰起源の弱層の存在が指摘されている(Chigira et al., 2012; 日本地すべり学会, 2012)。また, 過去に地震地すべりが発生した事例に関する資料の少ない変成岩や石灰岩地域の地震地すべりなどに関して, 歴史地震も含めた分析が望まれる。

また, 第4章や第5章で示した分析結果は, 第三系堆積岩の中山間地域という地形・地質条件の下, M7クラスの地震を想定した場合という条件つきで解釈すべきものである。すなわち, 危険度評価に用いたしきい値は絶対的な値ではなく, 例えば, 表層のせん断応力などは性質の異なる岩や解析モデルに与える物性値によって大きく変化する。今後は, 事例研究を蓄積しより汎用性の高い危険度評価手法を検討することが望まれる。

さらに, 地震地すべりの素因として, 今回主要な要因として着目した層理面の形状以外にもより詳細なスケールの地形・地質的素因\*が指摘されている。特に斜面末端部の浸食状況は地すべり発生の重要な要因と考えられ, これらの評価には, 斜面末端部の被浸食性(例えば攻撃斜面の度合いなど)を定量化するアルゴリズムの構築などが有効である。

地震地すべりが発生する際のメカニズムについては, 地震動の繰返し载荷による過剰間隙水圧に伴うすべり面液状化現象(佐々ほか, 2007)や, 繰返し载荷による堆積構造の劣化によるすべり面のひずみ軟化(若井ほか, 2007)などが指摘されている。流れ盤斜面における大規模な地震地すべりの発生には, 個々の層理面の性質や地下水の挙動など様々な要因が複雑に関係していると考えられる。これらの解明も今後の課題である。

---

\*例えば, 地震地すべりを生じた多くの斜面の末端は下部谷壁斜面の浸食などで応力が開放された状態にあり不安定な形状を呈していたことなど。(下河・稲垣, 2009)

## 引用文献

- Chigira, M., Nakasuji, A., Fujiwara, S. and Sakagami, M. (2012): Catastrophic Landslides of Pyroclastics Induced by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Earthquake-Induced Landslides, Proceedings of the International Symposium on Earthquake-Induced Landslides, Kiryu, Japan, 2012, pp.139-147.
- 森屋洋・阿部真郎・檜垣大助（2010）：2008年岩手・宮城内陸地震に伴って発生した荒砥沢ダム上流大規模地すべりの変動形状および変動履歴，日本地すべり学会誌，Vol. 47, No. 2, pp. 1-7.
- （社）日本地すべり学会（2012）：地震による斜面変動の実態把握と特徴の類型化，国土交通省国土技術政策総合研究所，227p.
- 佐々恭二・福岡浩・汪発武・王功輝（2007）：平成16年新潟県中越地震により発生した再活動地すべり地における高速地すべり発生・運動機構，日本地すべり学会誌.Vol.44, No.2, pp.71-78.
- 下河敏彦・稲垣秀輝（2009）：2004年新潟県中越地震に起因する地すべりと土砂移動，日本地すべり学会誌，Vol.45, No.6, pp.23-28.
- 若井明彦・鶴飼恵三・尾上篤生・樋口邦弘・黒田清一郎（2007）：層理面のひずみ軟化挙動に起因する流れ盤斜面の地震時崩壊の有限要素シミュレーション，日本地すべり学会誌，Vol.44, No.3, pp.145-155.
- 若井明彦・田中頼博・阿部真郎・吉松弘行・山邊康晴・渡邊泰介（2008）：中山間地の地震時斜面崩壊リスクを評価するための有限要素法に基づく広域被害予測システム，日本地すべり学会誌，Vol.45, No.3, pp.207-218.

## 謝 辞

本論文は、群馬大学大学院工学研究科社会環境デザイン工学専攻教授 若井明彦先生のご指導のもと、筆者が奥山ボーリング株式会社と群馬大学大学院工学研究科博士後期課程在籍中に行った一連の研究成果をとりまとめたものです。研究過程において多くの場面で様々な有益なご助言を与えて下さり、多大なご支援を賜った若井先生に心からの感謝の意を表します。

また、本研究の審査委員を務めて下さった同大学院の清水義彦教授、鵜飼恵三教授、鵜崎賢一准教授、金井昌信准教授の各先生からは、本論文の審査過程において適切なお指摘と今後の発展に有益な様々なアドバイスを賜りました。さらに、3年間所属した同大学院の地盤工学研究室の大学院生・学部生諸氏からも多大なるご支援を賜りました。厚く御礼申し上げます。

本研究は、筆者が在籍する奥山ボーリング株式会社と群馬大学との長年に渡る共同研究において蓄積された成果の上に行われたものです。社内における研究活動を支え、また、筆者が入社以来業務・研究の両面において様々なご助言とご指導を賜った同社の阿部真郎氏、森屋洋氏、小松順一氏、田中頼博氏をはじめとする諸先輩方、また、研究に必要な具体的な作業等の面でご協力を頂いた高堂陶子氏ら社員の皆様方にも深く感謝いたします。

川崎地質株式会社の吉松弘行氏からは、本研究に直接的に有益なアドバイスを多数頂いたのみならず、日頃より地すべり現象全般から数値解析の理論、プログラミングの具体的なテクニックに至るまで幅広くご指導を賜り、学位取得に当たっても親身なご助言を賜りました。振り返って、吉松氏のご支援を無くしては本研究の完成もあり得なかったと言えます。ここに深く感謝の意を表します。

筆者は、本研究を進める過程と平行して社団法人（現 公益社団法人）日本地すべり学会による「地震地すべりプロジェクト特別委員会」に参画する機会を得ました。多くの研究者の方々と地震時の地すべり現象について議論する機会を得たことが、本研究の進展に極めて有益であったことは言うまでもありません。他にも、地すべり学会を通して知り合った様々な研究者・技術者の方々からのご指導・ご支援によって現在の自分が在ることに深く感謝する次第ですが、特に、筆者が学部生の頃からご指導下さっている現会長の檜垣大助先生（弘前大学農学生命科学部教授）、八木浩司先生（山形大学地域教育文化学部教授）、千葉則行先生（東北工業大学工学部教授）、濱崎英作氏（株式会社アドバンテクノロジー代表取締役）、佐藤剛先生（帝京平成大学現代ライフ学部准教授）らの諸先生方に心より御礼申し上げます。また、八木先生からは本研究で使用した地震地すべりの分布データの使用を快諾していただきました。ここに記して

厚く御礼申し上げます。

東北学院大学教養学部の宮城豊彦教授は、筆者の学部から修士課程在籍時の指導教員であり、日頃の業務や研究も含めた広義の「仕事」に対する考え方や取り組み方、その面白さを一から指導して下さった恩師であります。この機に学生時から宮城先生のご指導の下で共に仕事をさせて頂いたことに改めて感謝し、厚く御礼を申し上げます。また、内山庄一郎氏（現 独立行政法人防災科学技術研究所）をはじめ、宮城先生の研究室に在籍していた当時の諸先輩、同級生、後輩の諸氏にも心より感謝申し上げます。

最後に、学位取得にあたって様々な面で筆者を支えて下さった家族（妻 歩，長男 元気）に心から感謝申し上げる次第です。

平成 25 年 2 月

林 一成

## 研究業績

### 関連論文

- 1) 林一成・若井明彦・田中頼博・阿部真郎・吉松弘行 (2012) : 直下型地震による地すべりダム発生危険度のゾーニング法, 日本地すべり学会誌, Vol.49, No.5, pp.259-266.
- 2) 林一成・若井明彦・田中頼博・阿部真郎 (2011) : 地形・地質解析と有限要素解析の連携による地震時の地すべり危険度評価手法, 日本地すべり学会誌, Vol.48, No.1, pp.1-11.
- 3) 阿部真郎・林一成 (2011) : 近年の大規模地震に伴う地震地すべりの運動形態と地形・地質的発生の場合, 日本地すべり学会誌, Vol.48, No.1, pp.52-61.

### 参考論文

- 1) Tabata, A., Wakai, A., Hayashi, K., Tanaka, N. and Abe, S.(2012): Landslide risk evaluation in a suffered inland area in Tochigi Prefecture due to the Great East Japan Earthquake, Proc. International Symposium on Earthquake-induced Landslides, pp.555-563.
- 2) Sato, G., Hayashi, K., Yagi, H. and Higaki, D. (2012): Distribution of Landslides Induced in Iwaki City, Japan, by Two Large-scale Earthquakes in 2011, Earthquake-induced landslide, Proceedings of the International Symposium on Earthquake-Induced Landslides, pp. 763-767.
- 3) 吉松弘行・大塚政伸・牧野孝久・山邊康晴・林一成 (2010) : Element-by-element GPBi-CG法の準三次元有限要素法による地すべり地下水排除工の効果評価, 日本地すべり学会誌, Vol.47, No.3, pp.41-46.
- 4) Miyagi, T., Hatakeyama, M., Hamasaki, E., Uchiyama, S., Hayashi, K. and Ono, Y.(2008): Reflection of micro landforms to the characteristics of landslide materials and the mechanism - a case study of the Ohkamizawa landslide area, Northeastern Japan, Proceedings of the International Conference on Management of Landslide Hazard in the Asia-Pacific Region Satellite symposium of the First World Landslide Forum, Tokyo., pp. 323-328.
- 5) 柳澤英明・越村俊一・後藤和久・今村文彦・宮城豊彦・林一成 (2006) : マングローブ林内を遡上した津波の挙動と樹木の破壊条件 -2004 年インド洋大津波によるタイ Khao Lakでの被害調査 -, 海岸工学論文集, Vol.53, No.1, pp.231-235.

## 書籍

- 1) 佐藤浩・土志田正二・齋藤仁・林一成 (2012) : 4.4 地形地質情報の取得処理, 地震地すべり-地震地すべりプロジェクト特別委員会の総括編-, 社団法人日本地すべり学会編, pp.114-127.
- 2) 林一成 (2012) : 6.2.7 地形・地質データおよび地震応答解析に基づく危険度評価, 地震地すべり-地震地すべりプロジェクト特別委員会の総括編-, 社団法人日本地すべり学会編, pp.194-196.

## 講演集等

- 1) 林一成 (2011) : 地すべりダム発生危険箇所を予測するための DEM データによる地形解析, 第 3 回 GIS Landslide 研究集会要旨集, p.23.
- 2) 林一成・田中頼博・阿部真郎・若井明彦 (2011) : 地震時における天然ダム発生場の特徴について, 砂防学会研究発表会概要集, Vol.2011, pp.154-155.
- 3) 林一成、若井明彦、田中頼博、阿部真郎 (2010) : 地形・地質解析と地震応答解析による地震地すべりの危険度評価, 第 2 回 GIS Landslide 研究集会要旨集, O12.
- 4) 林一成・阿部真郎・田中頼博・若井明彦 (2010) : 2004 年新潟県中越地震における地すべり発生場としての地形・地質的特徴, 日本地すべり学会研究発表会講演集, Vol.49, pp.35-36.
- 5) 林一成・阿部真郎 (2009) : 第三系地すべり多発地域の地すべりと地震地すべりとの比較, 日本地すべり学会研究発表会講演集, Vol.48, pp.220-221.
- 6) 林一成・宮城豊彦・濱崎英作・内山庄一郎・小倉薫 (2005) : 地震時における人工造成地盤の危険度評価に関する GIS 分析, 地理情報システム学会講演論文集, Vol.14, pp.507-510.



# Development of susceptibility zonation method for earthquake-induced landslide and landslide dam

## Abstract

This study aims to develop a methodology to extract high risk slopes of earthquake-induced landslide and landslide dam by the analysis of characteristics of topography, geology and earthquake intensity in past earthquake-induced landslide occurrence sites. Major earthquake with earthquake-induced landslide in Japan have occurred 33 times after 1872. The analysis of past earthquake-induced landslide shown that major movement styles of earthquake-induced landslide are depending on topographical and geological condition of its occurrence site.

The landslides and landslide dams that occurred in associations with the Mid Niigata Earthquake in 2004 were chosen for the study as a good example of the incidents that occur in the Tertiary sedimentary rock region where a number of multiple landslides are identified. Topographical and geological data that are extensively obtainable in combination with result of seismic analysis response data derived from finite element method were scrutinized for distinctive features of the subjected area. Further considerations were given in addition, as to what extent organizing these available data of conditions that would predispose each recognized location to seismic slope disaster may facilitate prognostication of the size and magnitude of the danger.

And then, the geomorphological features for the occurrence of landslide dams are examined based on digital elevation models (DEM) and the actual landslide distribution map. Found quantitatively shown that larger landslides along a narrower valley with a larger amount of river discharge have a tendency to induce landslide dams that cause river blockage. Accordingly, a new map showing the potential risk of landslide dams based on the overground-openness and the catchment area is proposed in this study. The combinational use of this map with the landslide risk map can be useful for the exact prediction of landslide dams that can be induced by a strong earthquake. In addition, the relationships between the accumulation height of the landslide mass and the local overground-openness in the original topography are examined for use in prediction of the height of a possible landslide dam.

From this study, a considerable additions were gained to the knowledge that would lead to the extensive prediction of seismically induced multiple slope disaster.