

4. 1 地震時における再滑動地すべり地の危険度評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 22

担当チーム：雪崩・地すべり研究センター

研究担当者：野呂智之、丸山清輝、ハスバートル
中村 明

【要旨】

近年、新潟県中越地震などの激甚な逆断層型地震が相次いで発生し、中山間地域に大きな被害を及ぼしている。そこで、H20 年度から 3 年計画で地震による既存地すべりの再滑動危険度評価法を提案するために本研究を開始した。本研究の達成目標は、①第三紀層地帯における地震による既存地すべりの再滑動危険箇所マップ作成手法、②モデル地域（新潟県上越地域など）における地震による既存地すべりの再滑動危険箇所マップ試案、③地震による既存地すべりの再滑動危険箇所予測に必要な要因に関わる基礎的情報整備体制などの提案である。①については、新潟県中越地震、能登半島地震など 5 つの激甚な地震における震源断層からの距離と地すべり発生との関係から、地震時の地すべり発生危険度評価範囲を明らかにした。また、新潟県中越地震と岩手・宮城内陸地震の事例をもとに、地震による既存地すべりの再滑動危険度評価要因を求め、危険度評価法を提案した。②については、新潟県上越地域における地震による既存地すべりの再滑動危険箇所マップ試案を作成した。③については、地震による既存地すべりの再滑動危険箇所予測に必要な要因が、地形図から容易に求められる地すべり斜面の縁辺侵食率と地すべり斜面の標高偏差の 2 要因であることが分かり、要因を求めるための基礎的情報整備体制について提案する必要はなくなった。

キーワード：地震、地すべり、危険度評価

1. はじめに

近年、平成 16 年 10 月の新潟県中越地震、平成 19 年 3 月の能登半島地震、同年 7 月の新潟県中越沖地震、平成 20 年の岩手・宮城内陸地震などの激甚な逆断層型地震が頻発し、地震による地すべり災害が多発した。これらの地すべりは、道路及びライフラインの寸断、河道閉塞などを引き起こし、長期にわたり集落を孤立させるなど中山間地に深刻な影響をもたらした。

そこで、本研究では、前述の 4 つの地震の他、善光寺地震などの既往の地震により発生した地すべり災害の実態把握を行い、地震時の既存地すべりの再滑動（以後、再滑動とする）危険度評価手法を作成し、第三紀層地すべり地帯における再滑動危険箇所マップ作成手法の提案を目指した。

H20～21 年度は、既往の地震時における地すべり災害の実態把握と、再滑動危険度評価法について検討した。前者については前述の 4 つの地震の他、善光寺地震で発生した地すべりについて分析し、後者については震源断層と地震により発生した地すべりとの関係及び再滑動危険度評価要因について検討した。H22 年

度は、H21 年度に引き続き再滑動危険度評価要因と危険度評価法について検討し、それらの結果をもとに新潟県上越地域における再滑動危険箇所マップ試案を作成した。

2. 研究目的

本研究の達成目標は、①第三紀層地帯における再滑動危険箇所マップ作成手法、②モデル地域（新潟県上越地域など）における再滑動危険箇所マップ試案、③再滑動危険箇所予測に必要な要因に関わる基礎的情報整備体制などの提案である。

3. 研究方法

本研究は、地すべり地形を呈する箇所で、地震時に大規模な土砂移動現象が発生する危険度を評価し、地震による地すべりのソフト・ハード対策に資することを目的とする。そのため、ここでいう地すべりとは、既存の地すべり地形内で発生する社会的影響の大きい大規模な斜面の移動と定義する。また、危険度評価は既存の地すべり地形を評価単位とした。

危険度評価手法の構築には、①危険度評価範囲の設定手法、②危険度評価要因、③危険度評価法が必要と

なる。①については、新潟県中越地震、能登半島地震、新潟県中越沖地震、岩手・宮城内陸地震などの地震を対象に、震源断層と地震による地すべりの分布、規模の特徴、地すべりの分布と震度、地表最大加速度分布との関係を調査した。また、地震による地すべりは、震央と震源断層のいずれとの関連性が高いかを明らかにするため、地すべりの分布と震央、震源断層からの距離との関係を検討した。②、③については、縁辺侵食率などの要因を用いた危険度評価法について検討した。

4. 研究結果

4.1 第三紀層地帯における再滑動危険所マップ作成手法

4.1.1 逆断層型地震による地すべり発生危険度評価範囲の設定手法

(1) 検討範囲と方法

地すべり発生危険度評価範囲は、図-1 に示す中越地震、中越沖地震、能登半島地震、岩手・宮城内陸地震の震源域及びその周辺地域における各地震発生直後の空中写真が撮影された範囲をもとに検討した。

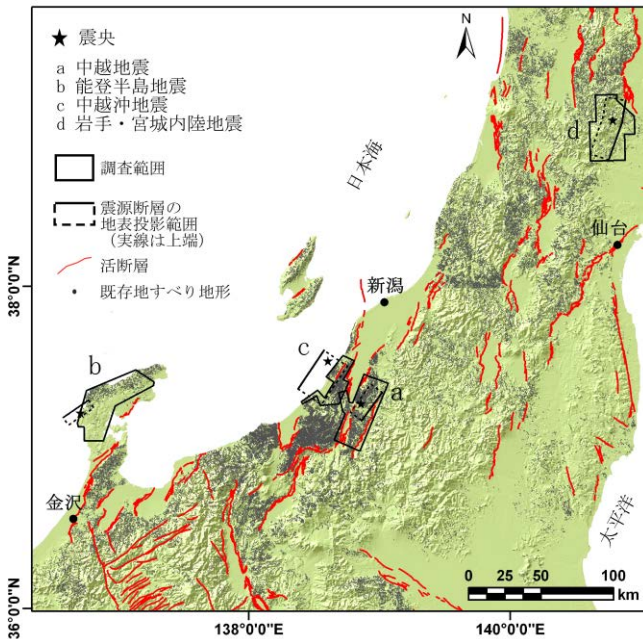


図-1 検討した範囲

地震による地すべりの分布、規模の特徴の解明については、震源断層モデルを用いて調べた。また、地震動と地すべり発生との関係解明については、地すべりが発生した範囲の包絡線と震度¹⁾、地表最大加速度²⁾との各関係、震央や震源断層と発生した地すべりの面積との関係を調べた。なお、最大加速度は三成分の合成値を用いた。また、地震による地すべりの分布図は、地震発生後の空中写真の判読と現地調査

を行い作成した。なお、中越地震による地すべりの分布は、国土交通省の判読結果³⁾を用いた。また、ここで扱う「地すべり」は、移動体の層厚が比較的厚く、移動後も移動体の原型がある程度保持されているもので、縮尺1:20,000程度の空中写真で判読できるものとし、明らかな表層崩壊や土石流は調査対象外とした。

(2) 検討に用いた震源断層モデル

地すべりと震源断層との位置関係は、図-2に基づいて検討した。震源断層から地すべりまでの距離は、地すべりの重心と震源断層モデル上端の地表投影線との最短距離とした。また、震源断層モデルの地表面投影範囲を断層面投影範囲とし、その内外の地すべり発生状況についても比較した。なお、震源断層から地すべりまでの距離は、2次元での距離計算を簡単に行うことができるGISを用いて求めた。また、今回対象とした地震については公表されている断層モデルの傾斜角は一定であるため、断層面上端の地表投影線から地すべりまでの距離と断層面から地すべりまでの距離は比例関係となる。表-1には、ここで用いた震源断層モデル^{4), 5), 6), 7)}を示した。

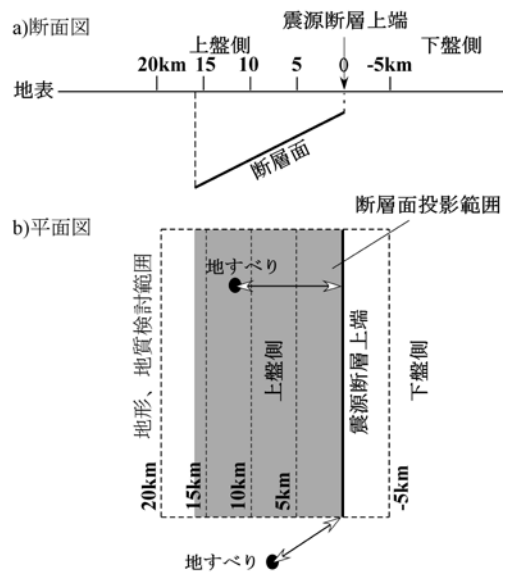


図-2 震源断層と地すべりの位置関係の模式図

表-1 震源断層モデル一覧表

地震名	長さ (km)	幅 (km)	走向 (°)	傾斜 (°)	断層型	出典
中越地震	24	16	N36E	53NW	北西向き逆断層	Hikima and Koketsu(2005)
能登半島地震	21.2	13.9	N55E	63SE	南東向き逆断層	国土地理院(2007)
中越沖地震	30	18	N38E	34SE	南東向き逆断層	引間・嶺嶺(2008)
岩手・宮城内陸地震	42	18	N21E-N11E	41NW	北西向き逆断層	Hikima et al., 2008

(3) 震源断層と地震による地すべりの分布との関係

表-2 には各地震で発生した地すべりの判読結果を、図-3~6 には各地震で発生した地すべりの分布を示した。

表-2 地震による地すべりの判読結果

対象地震	全箇所数	断層面投影範囲内		断層面投影範囲外		断層上盤側		断層下盤側	
		箇所数	割合 (%)	箇所数	割合 (%)	箇所数	割合 (%)	箇所数	割合 (%)
中越地震	362	200	55.2	162	44.8	350	96.7	12	3.3
能登半島地震	15	2	13.3	13	86.7	13	86.7	2	13.3
中越沖地震	18	9	50.0	9	50.0	18	100	-	-
岩手・宮城内陸地震	136	121	89.0	15	11	127	93.4	9	6.6

図-3に示した中越地震では、地すべりは362箇所が発生した。その中で、断層面投影範囲内で発生した地すべりは200箇所であり、全体の55.2%を占めた。また、既存地すべり地形内で発生した地すべりは180箇所であり、全体の約50%を占めた。断層面投影範囲外で発生した地すべりは、南西側に41箇所（全体の11.3%、図-3中のA）、北東側に15箇所（全体の4.1%、図-3

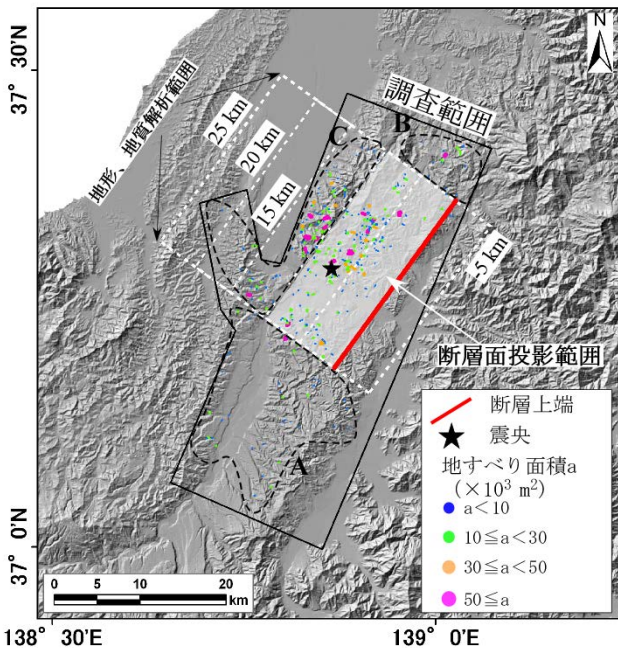


図-3 中越地震による地すべりの分布

- A: 断層面投影範囲の南西延長の地すべり包絡範囲
- B: 断層面投影範囲の北東延長の地すべり包絡範囲
- C: 断層面投影範囲の北西延長の地すべり包絡範囲

中の B) 分布している。また、断層面投影範囲で発生した地すべりは、北西側に 105 箇所（全体の 29.0%、図-3 中の C) 分布している。この他、震源断層の上盤側で発生した地すべりは 350 箇所（全体の 96.7%）であるのに対し、下盤側で発生した地すべりは 12 箇

所（全体の 3.3%）と少なく、地すべりは上盤側に多く分布している傾向が認められる。

図-4 に示す能登半島地震では、断層面投影範囲内で発生した地すべりは 2 箇所であり、全体の 13.3%を占めた。震源断層の大部分は海底に位置し、下盤側の海域部分の地すべり発生状況は不明である。検討した範囲内で発生した地すべりは 13 箇所が上盤側に位置し、全体の 86.7%を占めた。一方、下盤側で発生した地すべりは 2 箇所であった。また、既存地すべり地形内で発生した地すべりは 3 箇所であり、全体の 20%を占めた。

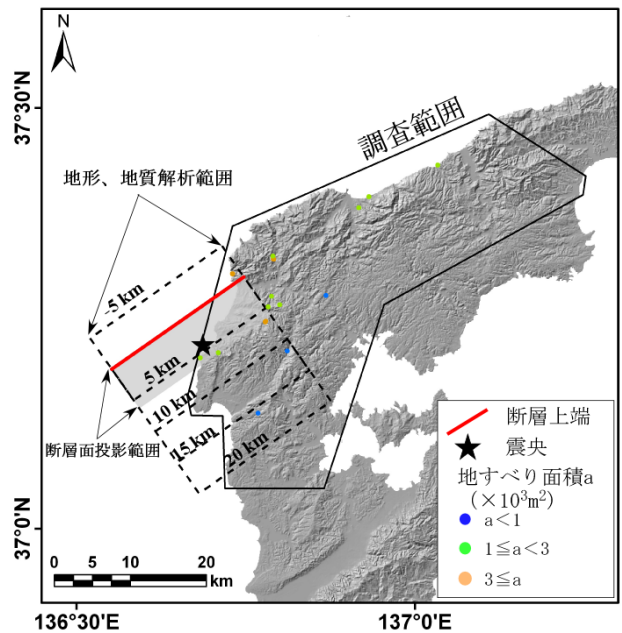


図-4 能登半島地震による地すべりの分布

図-5 に示した中越沖地震では、断層面投影範囲内で発生した地すべりは 9 箇所であり、全体の 50.0%を占めた。断層面投影範囲外では、南西側に 7 箇所の地すべり（図-5 中の A) が分布し、全体の 38.9%を占めた。一方、北東側では、地震で発生した地すべりの分布が認められなかった。調査範囲内で発生した地すべりは、18 箇所全てが震源断層の上盤側に分布している。なお、海域となる震源断層下盤側の地すべり発生状況は不明である。また、既存地すべり地形内で発生した地すべりは 2 箇所のみであった。

図-6に示した岩手・宮城内陸地震では、地すべりは136箇所が発生した。この中で、断層面投影範囲内で発生した地すべりは121箇所であり、全体の89.0%を占めた。また、面積10,000m²以上の地すべり（全体の97.3%）が断層面投影範囲内に含まれた。断層面投影範囲外では、地すべりが上盤側の北西延長上に6箇所（全体の4.4%）分布している。震源断層の上盤側で発

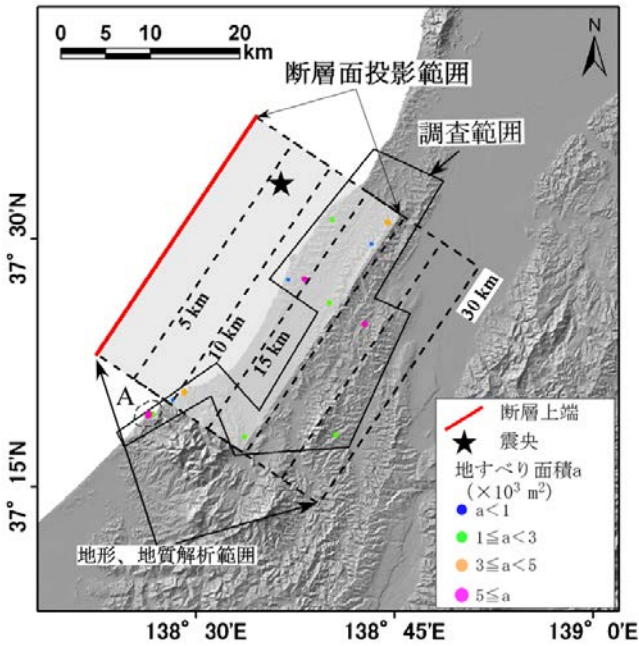


図-5 中越沖地震による地すべりの分布

A: 断層面投影範囲の南西延長の地すべり包絡範囲
 生じた地すべりは、127箇所(全体の93.4%)であるのに対し、下盤側で発生した地すべりは9箇所であった。また、既存地すべり地形内で発生した地すべりは35箇所あり、全体の約26%を占めた。

以上のことから、各地震による地すべりは震源断層

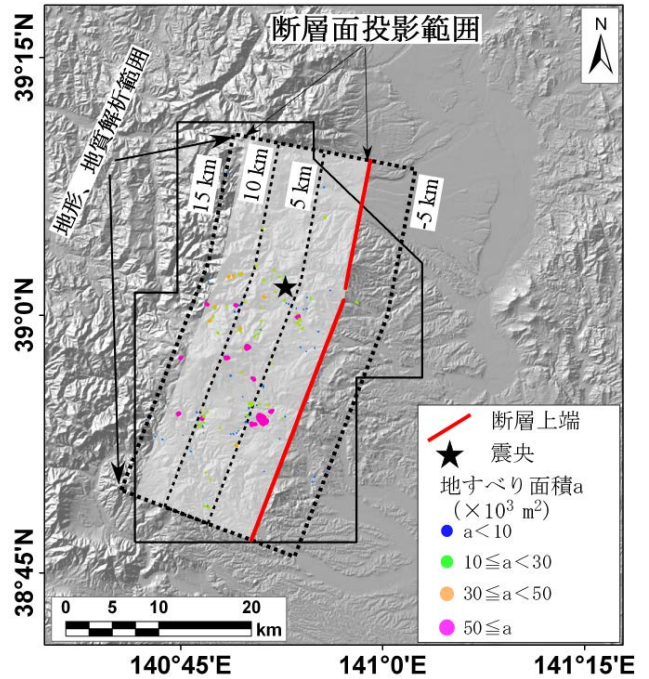


図-6 岩手・宮城内陸地震による地すべりの分布
 の上盤側で数多く発生し、全体の86.7%以上を占めることが示された。また、既存地すべり地形内で発生した地すべりの箇所数の割合は、中越地震が全体の約50%であったのに対し、その他の地震が全体の10~25%程度であった。

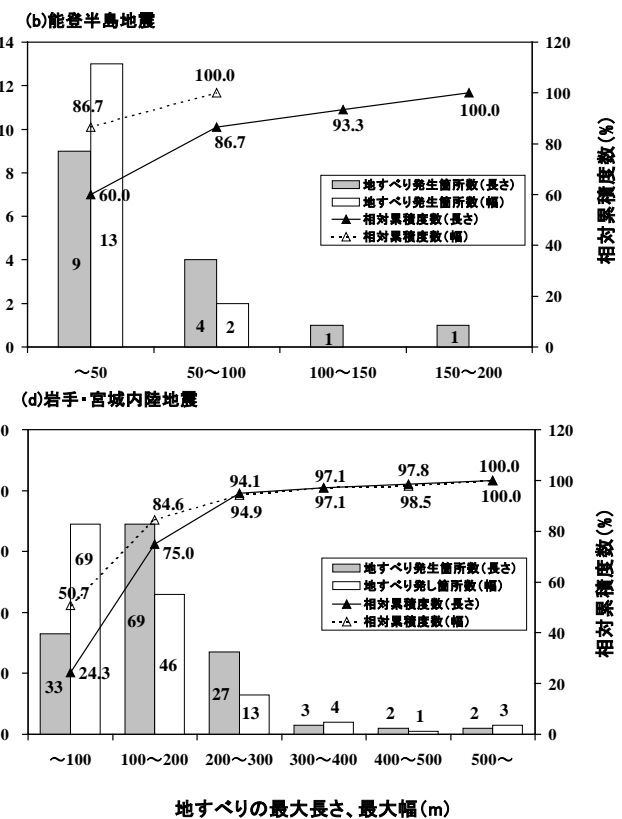
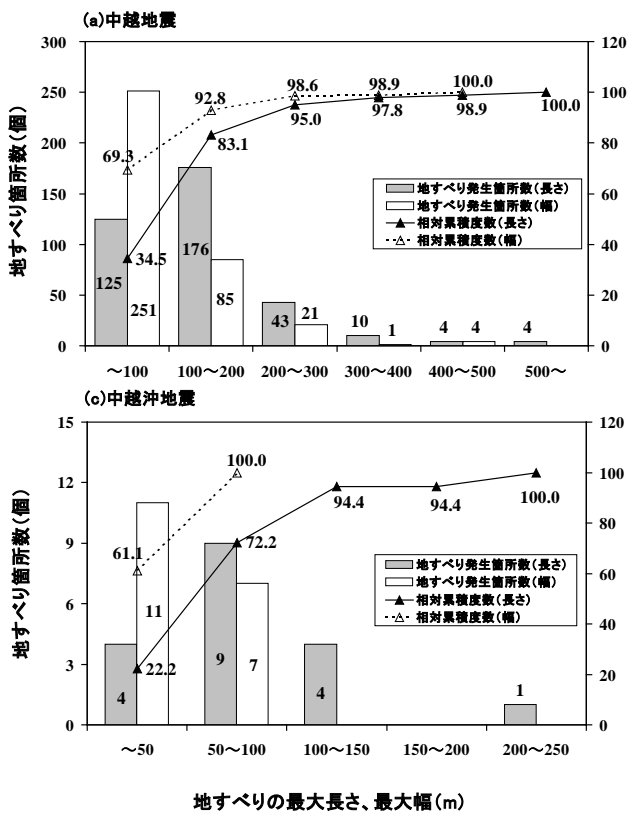


図-7 地震による地すべりの最大長さ、最大幅と発生箇所数

(4)地震による地すべりの規模

図-7は、各地震による地すべりの最大長さ、最大幅の頻度分布を示したものである。中越地震と岩手・宮城内陸地震では最大長さ100~200mの地すべりが最も多い。最大長さ200m以下のものは中越地震が全体の83.1%を占め、岩手・宮城内陸地震が全体の75.0%を占めた(図-7a, d)。また、最大幅については、100m以下のものが最も多かった。

一方、能登半島地震と中越沖地震では最大長さ100m以下の地すべりがそれぞれ全体の86.7%、72.2%を占めた(図-7b, c)。また、最大幅については、全ての地すべりが幅100m以下であった。

これらのことから、中越地震と岩手・宮城内陸地震では、中越沖地震と能登半島地震と比べて、規模が大きい地すべりが発生していたことが分かった。

(5)震度、最大加速度と地すべりの分布との関係

各地震の本震の震度、地表3成分合成最大加速度と発生した地すべりの分布状況を調べた結果を以下に示す。

図-8~11には、震度、最大加速度分布と地すべりが発生した範囲の包絡線を示した。なお、震度は気象庁、加速度は防災科学技術研究所のデータによる。

中越地震では、地すべりは震度5強以上の分布域(図-8a)、最大加速度500gal以上の分布域(図-8b)で発生した。能登半島地震では地すべりは震度5強以上の分布域で発生し(図-9a)、最大加速度200~500galの分布域で1箇所(全体の6.7%)、500gal以上の分布域では14箇所(全体の93.3%)で発生した(図-9b)。中越沖地震では地震による地すべりは、震度6弱以上の分布域で発生し(図-10a)、図-10bに示すように最大加速度200~500galの分布域において1箇所(全体の5.5%)、500gal以上の分布域において17箇所(全体の約94.5%)でそれぞれ発生した。岩手・宮城内陸地震では、全ての地すべりは震度5強の分布域で発生している(図-11a)。また、地すべりは最大加速度500gal以上の分布域で発生した(図-11b)。

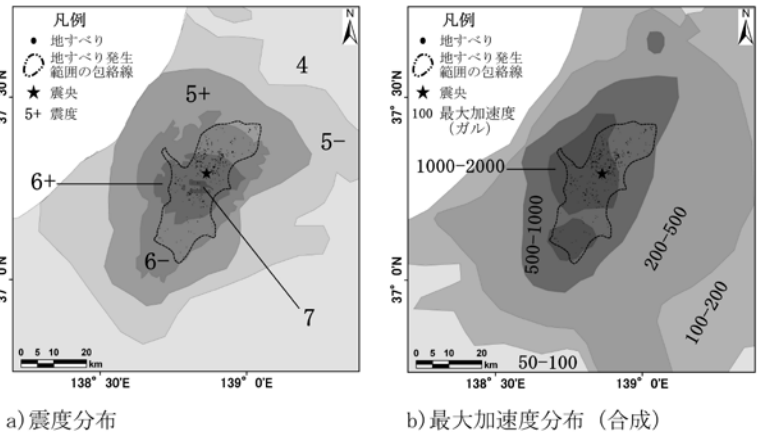


図-8 中越地震の震度、加速度と地震による地すべりの分布との関係

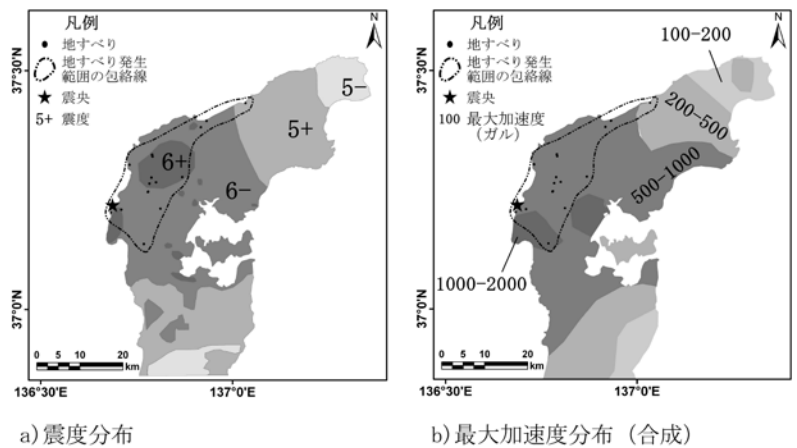


図-9 能登半島地震の震度、加速度と地震による地すべりの分布との関係

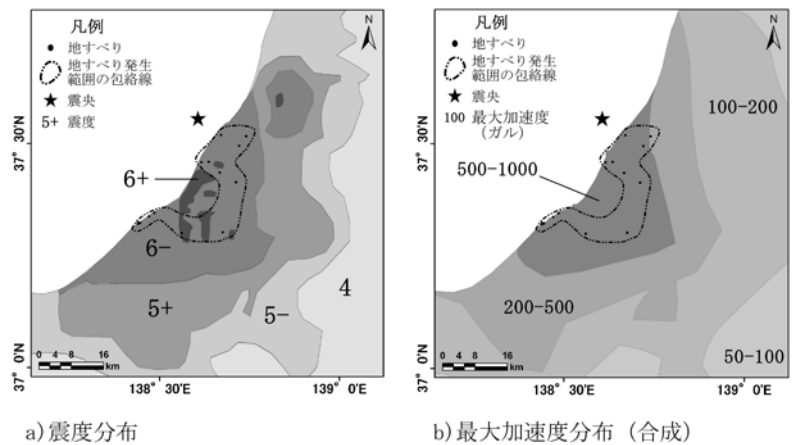


図-10 中越沖地震の震度、加速度と地震による地すべりの分布との関係

以上のことから、4つの地震により発生した地すべりは震度5強以上の分布域に位置し、最大加速度500gal以上の分布域に93.3%以上の地すべりが含まれることが分かった。

(6)震央からの距離と地すべりの面積との関係

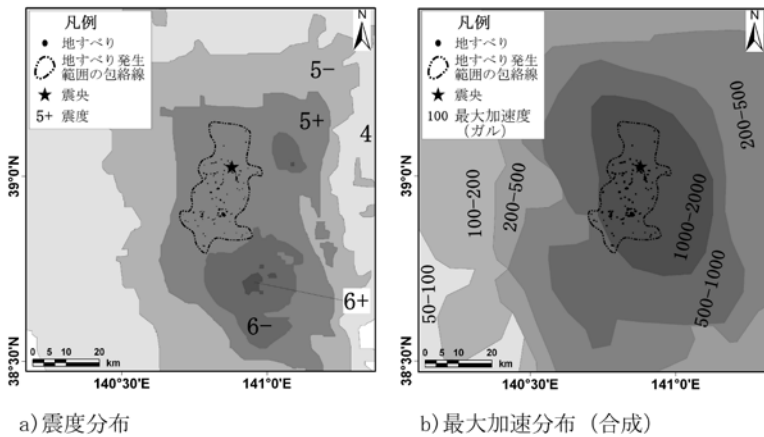


図-11 岩手・宮城内陸地震の震度、加速度と地震による地すべりの分布との関係

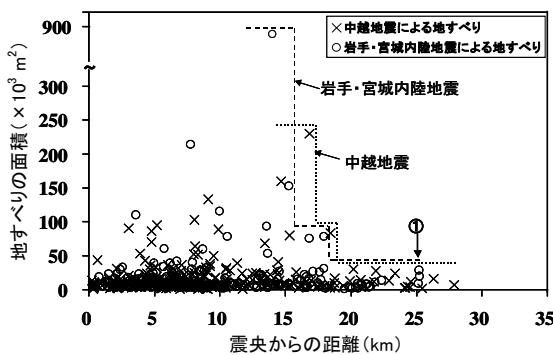
30 km 以内の範囲で発生し、震央から遠く離れた位置に面積の大きな地すべりが存在し、震央から離れるほど地すべりの面積が小さくなる傾向は認められない。

これらのことから、地すべりは震央から26~39 km 以内の範囲で発生するものの、地すべりの面積は地震によっては震央から離れるほど小さくなるとは言えない結果となった。

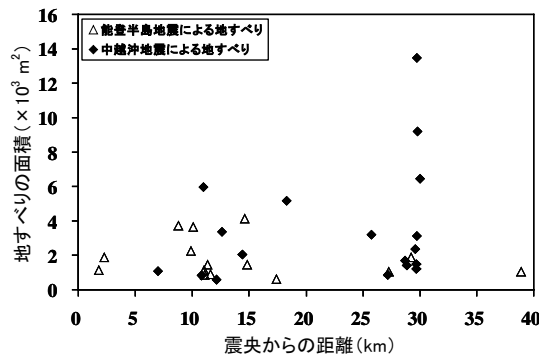
(7) 震源断層と地すべり発生位置

図-13は、震源断層からの距離と発生した地すべりの面積との関係を示したものである。

図-13(a)に示す中越地震については、地すべりは

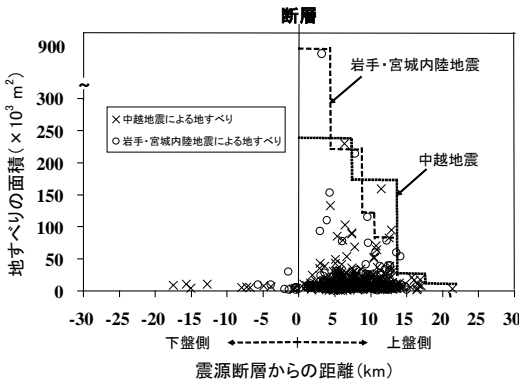


a) 中越地震、岩手・宮城内陸地震

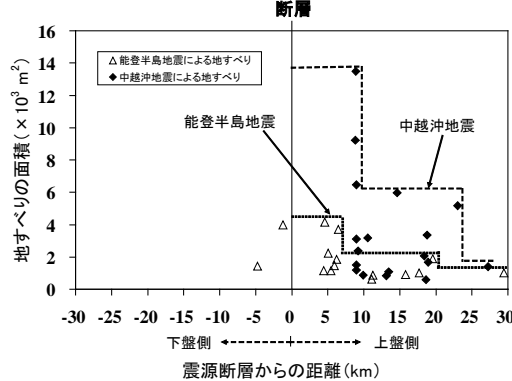


b) 能登半島地震、中越沖地震

図-12 震央からの距離と地すべり面積との関係



(a) 中越地震、岩手・宮城内陸地震



(b) 能登半島地震、中越沖地震

図-13 震源断層からの距離と地すべり面積との関係

図-12には、震央からの距離と地すべりの面積との関係を示した。中越地震については、地すべりは震央から28 km 以内で発生し、震央から離れるほど地すべりの規模が小さくなる傾向が認められる。岩手・宮城内陸地震については、地すべりは震央より約25 km 以内で発生し、震央から離れるほど地すべりの面積が小さくなる傾向が認められる。能登半島地震については、地すべりは震央から39 km の範囲で発生した。地すべりの面積は、震央から離れるほど小さくなる傾向がある。中越沖地震については、地すべりは震央から

震源断層から約22 km の範囲内で発生している。最も大きな面積の地すべりは震源断層から約6.3 km の位置で発生し、6.3 km 以上では震源断層から離れるほど発生した地すべり面積の最大値は小さくなる傾向がある。また、震源断層の下盤側で発生した地すべりの面積は、上盤側で発生したものに比べて小さい。

図-13(a)に示す岩手・宮城内陸地震については、地すべりは震源断層から約15 km の範囲で発生している。最も大きな面積の地すべりは震源断層から3.5 km の位置で発生し、3.5 km 以上については震源断層から離れるほど発生した地すべりの面積の最大値は小さくなる傾向がある。また、中越地震と同様に、震源断層の下盤側で発生した地すべりの面積は、上盤側で発生したものに比べて小さい。

図-13b)に示す能登半島地震については、地すべりは震源断層から30 km以内の範囲で発生している。また、最も大きな面積の地すべりは、震源断層から約4.5 kmの位置で発生し、4.5 km以上では震源断層から離れるほど発生した地すべりの面積の最大値が小さくなる傾向がある。また、震源断層の下盤側で発生した地すべりの面積は、上盤側で発生したものとはほぼ同じである。

図-13(b)に示す中越沖地震については、地すべりは震源断層から約28 kmの範囲内で発生している。最も大きな面積の地すべりは震源断層から8.9 kmの位置で発生し、8.9 km以上では震源断層から離れるほど発生した地すべりの面積の最大値は小さくなる傾向がある。

これらのことから、4つの地震では、最も大きな面積の地すべりは震源断層からの距離が3.5~9.0 kmの位置で発生し、それ以遠で発生した地すべり面積の最大値は徐々に小さくなる傾向が認められた。また、地すべりは震源断層の

上盤側で多発し、その面積は能登半島地震を除き、下盤側で発生したものに比べて大きい傾向が認められた。また、上記の傾向は、震央からの距離を用いて整理した場合に比べて、震源断層からの距離を用いて整理した場合の方が明確になることが分かった。

(8) 逆断層周辺における地すべり多発範囲

表-3には、地震に関する項目と地震による地すべり発生状況との関係を示した。地震による地すべりは、震度では5強以上、最大加速度分布では200gal以上、震央からの距離26~39 km内で発生している。また、震源断層からの距離では、20 kmの範囲内に4つの地震で発生した地すべりの88.9%以上の地すべりが発生している。4つの地震による地すべりの全てが震度5強以上、93.3%以上が最大加速度500gal以上の分布域で発生する結果となったことは、阿部ほか(2006)が

表-3 地震に関する項目と地震による地すべり発生状況との関係

地震に関する項目	中越地震	能登半島地震	中越沖地震	岩手・宮城内陸地震
推計震度	6弱以上で97.2%、5強以上で100%の地すべりが発生	6弱以上で93.3%、5強以上で100%の地すべりが発生	6弱以上で100%の地すべりが発生	5強の範囲で100%の地すべりが発生
加速度	500gal以上の範囲で全ての地すべりが発生	500gal以上の範囲で93.3%の地すべりが発生	500gal以上の範囲で94.4%の地すべりが発生	500gal以上の範囲で全ての地すべりが発生
震央からの距離	28km以内で発生	39km以内で発生	30km以内で発生	26km以内で発生
震源断層からの距離	20km以内に99.7%の地すべりが発生	20km以内に93.3%の地すべりが発生	20km以内に88.9%の地すべりが発生	全て15km以内に発生

示した新第三紀層分布域における地震による岩盤すべりが震度5程度から発生し、震度6以上で多くなることや加速度が500gal程度で発生していることと整合する。

地震による地すべりは震源断層の上盤側で数多く発生していることから、震源断層から上盤側方向への距離毎の地すべり発生状況を調べ、地震による地すべりの多発範囲の設定手法を検討した。

図-14は、逆断層地震による地すべり多発範囲を示したものである。なお、図中の数値は、中越地震による地すべり箇所(割合)を示す。図-14a)に示す震源断層から上盤側の10 kmの範囲Aには、205箇所(56.6%)

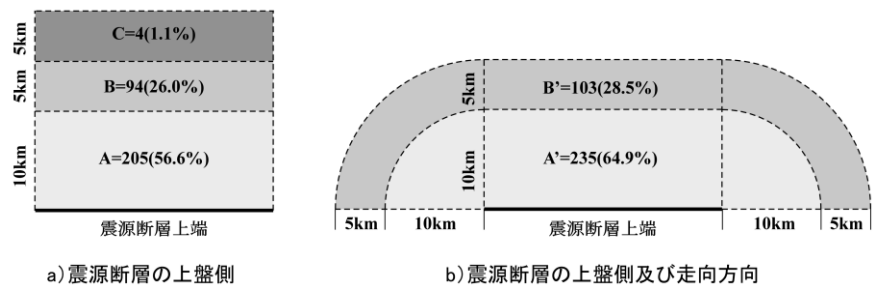


図-14 逆断層地震による地すべり多発範囲

の地すべりが発生し、15 kmの範囲(A+B)には299箇所(82.6%)、20 kmの範囲(A+B+C)には303箇所(83.7%)が発生している。また、岩手・宮城内陸地震では、上盤側の全ての地すべりが15 kmの範囲で発生していた。一方、能登半島地震では、発生した地すべりの箇所数は20 kmの範囲に全体の33.3%、中越沖地震では20 kmの範囲に同じく50.0%の地すべりが発生し、中越地震及び岩手・宮城内陸地震に比べて小さい値を示した。

地すべりは震源断層の走向方向の延長上にも発生していることから、地すべり多発範囲は震源断層からの距離に加えて断層走向方向に適当な距離を取った範囲とする必要がある。

図-14b)には、震源断層の上盤側及び走向方向における地すべり発生範囲を示した。今回対象とした4つの地震による地すべりの分布を概観し、震源断層の走向方向に5 kmの距離を取り、中越地震を事例として試算した場合、発生した地すべりはA'+B'の範囲に全体の93.4%含まれた。

図-14a)に示す範囲を設定すると、面積10,000m²以上の地すべりは全体の88.1%が含まれるのに対し、図-14b)のA'+B'のように設定すると94.8%が含まれるようになった。この方法を他の地震に適用すると、能登半島地震では60.0%、中越沖地震では66.7%、岩手・宮城内陸地震では全ての地すべりが含まれた。

能登半島地震と中越沖地震の値が他の地震の値に比べて小さいのは、震源断層の位置が海域であることが影響していると考えられる。

図-15には、Keefer(1984)⁸⁾による地震のマグニチュードと地震で発生した地すべりの断層からの最大距離との関係を示した。今回検討した地震はマグニチュード6.8~7.2のものであるが、地震の規模が大きくなると、その影響範囲も大きくなることが考えられる。Keefer(1984)は、地震のマグニチュードと地震により発

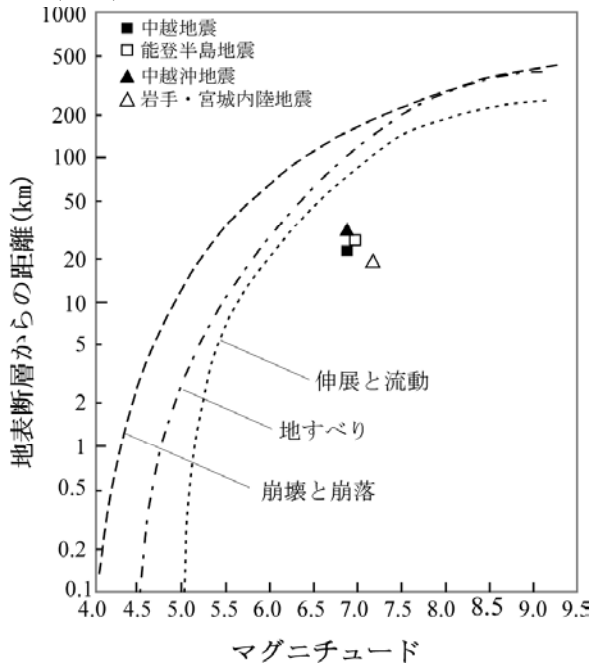


図-15 地震のマグニチュードと地震で発生した地すべりの断層からの最大距離との関係

Keefer(1984)の図に加筆 マグニチュードは7.5までがMs, ≥ 7.5 はMw

生した地すべりの断層からの最大距離の関係を、マグニチュードが大きくなるにつれ、震源断層から発生する地すべりまでの最大距離が大きくなると述べている。したがって、地震による地すべりが多発する範囲を設定する際には、想定される地震のマグニチュードに応じ、その範囲を検討する必要がある。

今後、日本で地震により発生する地すべりについても同様に検討することでマグニチュードと発生する地すべりの震源断層からの最大距離との関係を明らかにすることも可能になると考えられる。今回検討した4つの地震による地すべりは概ね15~28 kmの範囲で発生し、図-15にプロットしたようにKeefer (1984)の包絡線の範囲に含まれる結果となった。

以上のことから、地震 (M7.0 前後) による逆断層周辺における地すべり発生危険度評価範囲は、震源断層

上盤側における震源断層上端からの距離 15km と震源断層両端を走向方向に各々15km延長してできた範囲として設定することを提案する。

4. 1. 2 危険度評価要因及び危険度評価

H20~21年度は、地震による地すべり発生危険度評価法として、地すべり地形に点数付けを行う手法について検討してきた。しかしながら、地すべり発生の危険度評価は定量的に行う必要があり、その評価法の導入に苦慮していた。

ある現象が発生する確率を、その現象の出現を説明する変数群により求める分析法としてロジスティック回帰分析法がある。この分析法は、地震により地すべりが発生する確率を、地すべりの発生を説明する要因により求める方法に適していると考えられる。そこで、新潟県中越地震と岩手・宮城内陸地震において地すべり地形内で発生した地すべりを対象に、ロジスティック回帰分析法を用いて、危険度評価要因の選定と危険度評価法の検討を行った。なお、検討範囲は、中越地震については芋川流域とその周辺の地すべりとし、地震前 (1975、1976年撮影) と直後の空中写真と地形データ (DEM) をもとに判読できる範囲とした。また、岩手・宮城内陸地震については国土地理院技術資料D・1-No.541「平成20年(2008)岩手・宮城内陸地震1:25,000 詳細活断層図(活断層・地形分類及び地形の変状)」⁹⁾に示された範囲とし、地すべり地形は資料に示されたものを用いた。

表-4には、検討に用いたデータについて示した。検討に用いた既存地すべり地

表-4 検討に用いたデータ

	地すべり非発生箇所数	地すべり発生箇所数	合計
中越地震	963	87	1,050
岩手・宮城内陸地震	944	29	973
合計	1,907	116	2,023

形は、図-14b)に示した逆断層地震による地すべり多発範囲内に位置する 2,023 箇所であり、中越地震が 1,050 箇所 (地すべり非発生箇所数 963、地すべり発生箇所数 87)、岩手・宮城内陸中越地震が 973 箇所 (地すべり非発生箇所数 944、地すべり発生箇所数 29) である。

(1) 危険度評価要因

地すべり発生の危険度評価要因は H22 年度再度検討し、縁辺侵食率、地すべり地形の標高偏差 (既存地すべり地形内地表面標高の標準偏差値)、斜面勾配、地質構造 (断層、褶曲軸からの距離)、稜線からの距離、河川からの距離、既存地すべり地形から震源断層までの距離などを取りあげた。この中で、縁辺侵食率

以外は、GIS ソフトによりデータを容易に作成できるものである。この他、地質要因も地すべりの危険度評価要因になると考えられるが、地域性があるため一般的な要因にはならないと考え、地形要因のみに注目した。

縁辺侵食率は、地すべり地形の縁辺長に対する侵食地形長の割合と定義し、(1)式により求めた。

$$E = \ell / L \times 100 (\%) \quad (1)$$

ここで、E：縁辺侵食率(%)

ℓ：侵食地形長(m)

L：地すべり縁辺長(m)

である。

図-16には、侵食地形長と地すべり縁辺長を示した。侵食地形長は、地すべり斜面末端が河川や谷に面する部分の縁辺長と、側部が侵食谷などの谷地形を呈する谷線の長さを合計したものである。な

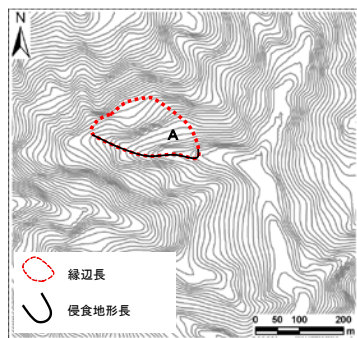


図-16 侵食地形長と縁辺長
お、谷線の長さは、1次谷の判定基準と同様に間口より奥行きの方が大きくなっている範囲とした。

(2) 危険度評価法

ロジスティック回帰分析による再滑動危険度評価法の検討では、多変量解析ソフト SPSS Statistics Ver.19 (SPSS Inc.)の二項ロジスティック回帰分析を用いた。危険度評価要因の選定と地震による地すべりの発生確率を求める式の作成は、中越地震により地すべりが発生した既存地すべり地形 87 箇所とランダムに抽出した地すべり非発生既存地すべり地形 87 箇所のデータを用意し、その中から各々ランダムに 65 箇所のデータを用いて行った。なお、残り各 22 箇所のデータは、作成した式の検証に用いた。

検討の結果、地形要因(縁辺侵食率、30m メッシュで求めた地すべり地形の標高偏差、地質構造(断層、褶曲軸からの距離)、稜線からの距離、河川からの距離)の選定ではステップワイズ法により標高偏差と縁辺侵食率が選定され、この2つの要因が地すべりの発生に最も寄与することが分かった。なお、標高偏差は斜面勾配と地すべり地形の面積に関係し、標高偏差が大きくなるほど勾配が急になるか、または面積が大きくなることを表す。このことにより、勾配が急になる

ほど地震により斜面安全率の低下が起こる確率が高くなることや、面積が大きくなるほど地すべり斜面の一部が移動する確率が高くなることが考えられる。

地震による地すべり発生確率を求める式として、(2)式が得られた。

$$p = 1 / [1 + \exp \{-(0.060 x_1 + 0.035 x_2 - 2.630)\}] \quad (2)$$

ここで、p：地震による地すべり発生確率

x₁：標高偏差(m)

x₂：縁辺侵食率(%)

である。

表-5は、(2)式的的中率を示したものである。なお、地すべりの発生・非発生はp>0.50を発生、p≤0.50を非発生としている。地すべり発生に対する的中率は78%、地すべり非発生に対する的中率は71%、全体の的中率は75%であった。

表-5 (2)式による的中率

	データ件数	的中件数	外れ件数	的中率(%)
発生	65	51	14	78
非発生	65	46	19	71
発生+非発生	130	97	33	75

表-6は、用意したデータの残りをを用いた(2)式の検証結果を示したものである。地すべり発生に対する的中率は73%、地すべり非発生に対する的中率は77%、全体の的中率は75%であり、(2)式の妥当性が確認された。

表-6 (2)式の検証結果

	データ件数	的中件数	外れ件数	的中率(%)
発生	22	16	6	73
非発生	22	17	5	77
発生+非発生	44	33	11	75

(2)式作成時のデータによる地すべり発生率と全データによる地すべり発生率が異なることから、ロジスティック回帰式の調整¹⁰⁾を(3)、(4)式により行い、(5)式を得た。

$$q_1 / q_2 = \{s(1-r)\} / \{r(1-s)\} \quad (3)$$

ここで、r：全データによる地すべり発生率

s：(2)式作成時データの地すべり発生率

$$p_m = 1 / [1 + \exp \{-(\log q_1 / q_2 + 0.060 x_1 + 0.035 x_2 - 2.630)\}]$$

(4) る。

$$p_m = 1 / [1 + \exp \{-(0.060 x_1 + 0.035 x_2 - 5.032)\}] \quad (5)$$

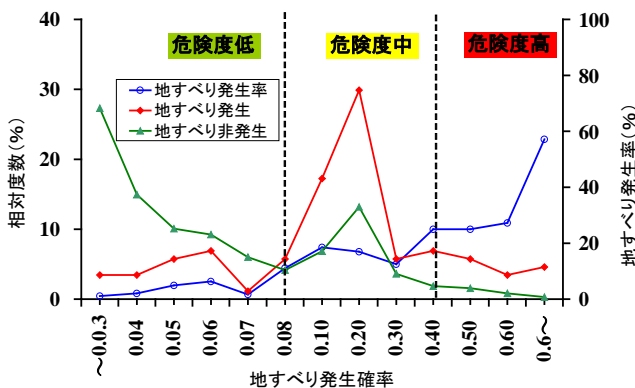
表一七には、(5)式による岩手・宮城内陸地震の地すべり発生予測的中率を示した。なお、地すべりの発生・非発生は、(2)式を求めた中越地震における地すべり発生率0.08をもとに、 $p_m > 0.08$ を発生、 $p_m \leq 0.08$ を非発生としている。地すべり発生に対する的中率は76%、地すべり非発生に対する的中率は75%、全体の的中率は75%であった。

表一七 (5)式による岩手・宮城内陸地震地すべり発生予測的中率

	データ件数	的中件数	外れ件数	的中率(%)
発生	29	22	7	76
非発生	944	710	236	75
発生+非発生	973	732	243	75

これらのことから、中越地震のデータから得られた(2)式により、岩手・宮城内陸地震による地すべりの発生が概ね予測できることが分かった。

図一七には、(5)式により中越地震の全データについて求めた地すべり発生確率 p_m の区間毎における発生・非発生別の相対度数分布と地すべり発生率を示した。地すべり発生率は p_m の上昇とともに増大しており、 p_m が 0.40 以上では更に増大している。そこで、地震による地すべり発生の危険度は、 $p_m \leq 0.08$ 危険度低、 $0.08 < p_m < 0.40$ を危険度中、 $p_m \geq 0.40$ を危険度高とした。



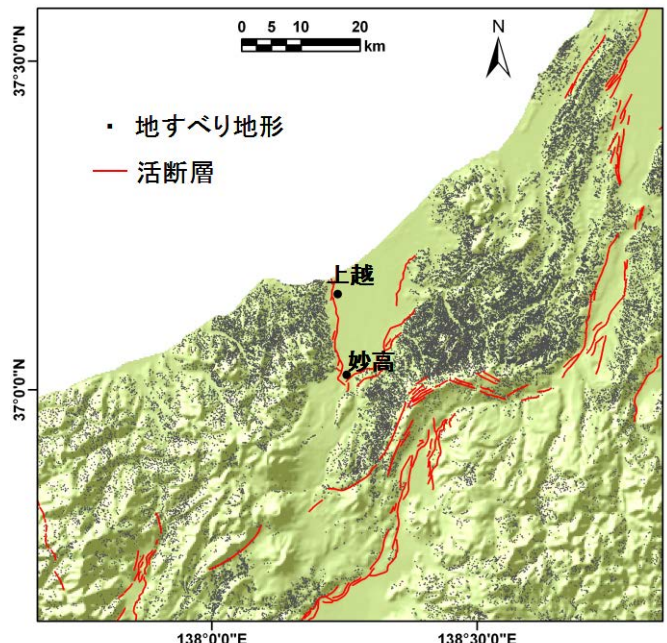
図一七 (5)式による地すべり発生確率に対する相対度数分布と地すべり発生率

以上のことから、既存の地すべり地形内における地震による地すべりの発生危険度評価法として、危険度評価要因に地すべり斜面の標高偏差と縁辺侵食率を用いたロジスティック回帰分析による方法を提案す

4.2 モデル地域における再滑動危険箇所マップ試案の作成

提案した既存の地すべり地形内における地震による地すべりの発生危険度評価法を用いて、新潟県上越地域における地震による既存地すべりの再滑動危険箇所マップ試案の作成を行った。

図一八は上信越地方における活断層と地すべり地形の分布を、図一九は高田平野の断層帯をそれぞれ示したものである。今回のマップ作成範囲は、高田平野西縁断層帯を対象にした。この断層帯は長さ約 30km の西傾斜の逆断層（今後 30 年以内の地震発生確率：ほぼ 0% 地震調査研究推進本部による）であり、断層帯の西側には数多くの地すべりが分布している。



図一八 上信越地方における活断層と地すべり地形の分布（活断層：産総研 地すべり地形：防災科研）

図一二十には、マップ作成範囲と再滑動危険箇所の評価結果を示した。マップ作成範囲の南東部には火砕流堆積物が、北側には砂岩泥岩互層がそれぞれ分布している。また、マップ作成範囲内の地すべり地形は 3,718 箇所であり、北～南西側に分布する砂岩泥岩互層域に数多く分布している。歴史地震である高田地震時の災害記録¹¹⁾には、この範囲での地すべり多発の記録が残されている。この他、地すべり地形の規模は北側では比較的小規模であるが、南側では大規模なものが分布している。



1：青野地点 2：宮内地点 3：小出雲地点
A：反射法弾性波探査測線（文献5）

地震による再滑動危険箇所の評価結果については、**図-19** 高田平野の断層帯（地震調査研究推進本部）地すべりの規模が小さいものに危険度低の数が多く、規模の大きいものは危険度中及び高の数が多くなっている。また、断層から離れた所に規模の大きな地すべりが位置しているが、これらが危険度高になっている。

図-21 は、地すべり発生確率 p_m の区間毎における相対度数分布を示したものである。危険度低の相対度数については p_m の 0.02~0.04 が一番大きく、 p_m の値が大きくなるほど小さくなる傾向がある。また、危険度中及び高の相対度数については、危険度低のものより小さくなっている。

以上のことから、大部分の地すべり地形、特に小規模な地すべり地形については危険度低であることが示された。また、規模の大きな地すべり地形については数が少ないが、危険度中及び高であることが示された。

4.3 地震による地すべり発生危険箇所予測に必要な要因に関わる基礎的情報整備体制などの提案

地震による既存地すべりの再滑動危険箇所予測に必要な要因については、容易に取得できる地形データから得られるもので間に合うことが分かった。したがっ

て、特に基礎的情報の整備体制について提案する必要

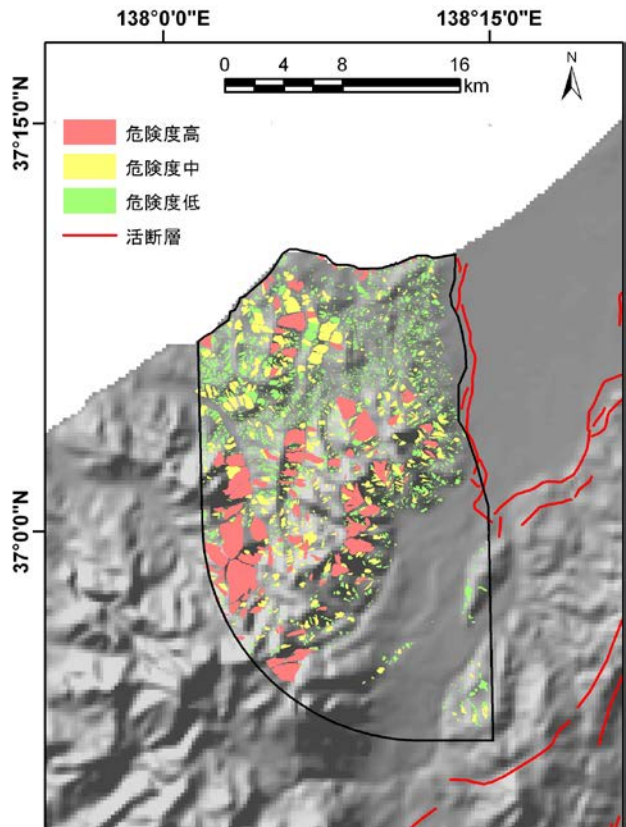


図-20 マップ作成範囲と再滑動危険箇所評価結果

地すべり地形：防災科学技術研究所のデータを修正

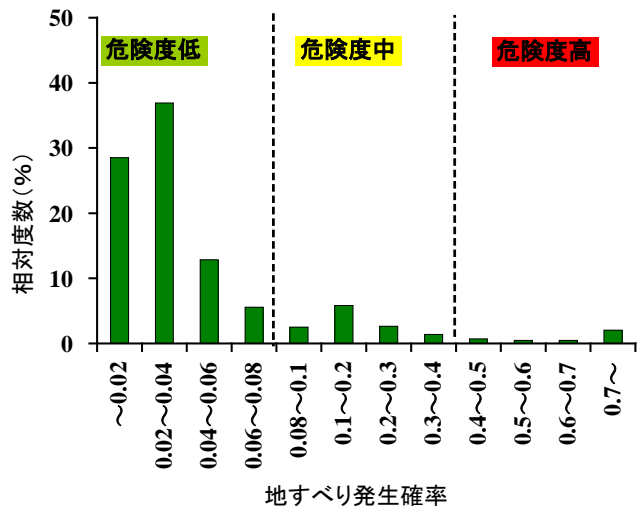


図-21 地すべり発生確率の相対度数分布

はなくなった。

5. まとめ

本研究では、地すべり地形を呈する箇所、地震時に大規模な土砂移動現象が発生する危険度を評価し、地震による地すべりのソフト・ハード対策に資することを目的として研究を進めてきた。以下に、達成目標毎に研究結果を示す。

5.1 第三紀層地帯における再滑動危険箇所マップ作成手法

(1) 地震による逆断層周辺における地すべり発生危険度評価範囲

中越地震、能登半島地震、中越沖地震、岩手・宮城内陸地震における地震による地すべり発生状況について検討した結果、地震（M7.0 前後）による逆断層周辺における地すべり発生危険度評価範囲は、震源断層上盤側における震源断層上端からの距離 15km と震源断層両端を走向方向に各々15km 延長してできた範囲として設定することを提案する。

(2) 危険度評価要因

地すべり発生の危険度評価要因として、縁辺侵食率、地すべり地形の標高偏差、斜面勾配、地質構造（断層、褶曲軸からの距離）、稜線からの距離、河川からの距離、既存地すべり地形から震源断層までの距離などを取りあげ検討した結果、標高偏差と縁辺侵食率が地すべりの発生に最も寄与することが分かった。

(3) 危険度評価法

再滑動危険度評価手法として、危険度評価要因に地すべり斜面の標高偏差と縁辺侵食率を用いたロジスティック回帰分析による方法を提案する。

5.2 モデル地域における再滑動危険箇所マップ試案の作成

提案した手法を用いて、新潟県上越地域における再滑動危険箇所マップ試案の作成を行った。その結果、大部分の地すべり地形、特に小規模な地すべり地形については危険度低であることが示された。また、規模の大きな地すべり地形については数が少ないが、危険度中及び高であることが示された。

5.3 再滑動危険箇所予測に必要な要因に関わる基礎的情報整備体制などの提案

再滑動危険箇所予測に必要な要因については、容易に取得できる地形データから得られるもので間に合うことが分かった。したがって、特に基礎的情報の整備体制について提案する必要はなくなった。

6. 今後の課題

本研究により、再滑動危険度評価法を提案することができた。しかしながら、地震時には、既存地すべり地形外でも数多くの地すべりが発生している。今後は、地震による初生地すべりの発生危険度評価法についても研究を進めてゆく必要がある。

<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/index.html#data>
(2009年8月3日閲覧)

- 2) 防災科学研究所 (2009) : 防災科学研究所強震観測網 (K-NET, KiK-net) ホームページ : <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/quick/> (2009年9月28日閲覧)
- 3) 国土交通省湯沢砂防事務所 (2005) : 平成16年 (2004年) 新潟県中越地震による土砂災害と対応, 国土交通省北陸整備局湯沢砂防事務所ホームページ <http://www.hrr.mlit.go.jp/yuzawa/sabo/chuetsu/pamphlet/pamphlet01.pdf> (2009年8月3日閲覧)
- 4) Hikima K. and Koketsu K. (2005): Rupture processes of the 2004 Chuetsu (mid-Niigata prefecture) earthquake, Japan: A series of events in a complex fault system, *GRL*, Vol.32, L18303, pp.1-5.
- 5) 額額一起 (2008) : 2007年新潟県中越沖地震の震源断層面, サイスマ, 12, 2, pp. 6-7.
- 6) 国土地理院 (2007) : 平成19年能登半島地震断層モデルの概念図、国土地理院ホームページ、<http://www.gsi.go.jp/common/000040796.pdf>
- 7) Hikima, K., Miyazaki, S. and Koketsu, K. (2008): Rupture process of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake (Mj7.2), Japan, inferred from strong motion and geodetic data, *Eos Trans. AGU*, **89**(53), Fall Meet. Suppl., Abstract S51D1789.
- 8) Keefer, D. (1984): Landslides caused by earthquakes *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 95, pp.406-421.
- 9) 国土地理院技術資料D・1-No.541 「平成20年 (2008) 岩手・宮城内陸地震 1:25,000 詳細活断層図 (活断層・地形分類及び地形の変状)」
- 10) 高田直樹 (2007) : ロジスティック回帰分析結果の解釈・利用のための新手法—信用リスク・スコアリングモデルを例に—, IBMプロフェッショナル論文3, pp. 71-77, ProVISION No.53/spring 2007
- 11) 井上公夫、今村隆正 (1999) : 高田地震 (1751) と上越海岸の土砂災害、平成11年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 290-291

参考文献

- 1) 気象庁 (2009) : 気象庁ホームページ :

RESEARCH ON RISK ASSESSEMENT FOR RE-ACTIVATING LANDSLIDE TRIGGERED BY EARTHQUAKE

Budged : Grants for operating expenses
General account

Research Period : FY2008-2010

Research Team : Erosion and Sediment Control
Research Group (Snow Avalanche
and Landslide Research Center)

Author : Tomoyuki NORO

Kiyoteru MARUYAMA

HASIBATEER

Akira NAKAMURA

Abstract : A serious of strong reverse-fault earthquakes, such as Chuetsu earthquake, successively struck Japan, caused serious damage to the involved mountainous areas. To propose a risk evaluation for landslides triggered by earthquake, we started this 3-year research project from 2008.

The results of the project are:

- (1) In the cases of M7 reverse-fault earthquakes, the landslide risk evaluating area should be setting on the hanging-wall, an area of 15 km from the source fault and 15 km extension along the strike of the source fault.
- (2) We proposed a risk evaluation method for pre-existing landslide topographies, by using logistic regression model based on causative factors of surface roughness and marginal erosion ratio of the landslide topographies.
- (3) Based on the logistic regression model, we conducted the susceptibility map of pre-existing landslides topographies around the area of the Jyoetsu region, Niigata Prefecture.

Key words : earthquake, landslide, risk assessment