

# 地震動による斜面崩壊と侵食速度ポテンシャルの関係 —新潟県中越地震の事例—

## RELATIONSHIPS BETWEEN LANDSLIDE DUE TO EARTHQUAKE AND POTENTIAL EROSION-RATE

### - A CASE STUDY IN 2004 NIIGATA CHUETSU EARTHQUAKE -

長谷川 浩一<sup>1</sup>・末富 岩雄<sup>1</sup>・若松 加寿江<sup>1</sup>

Kouichi HASEGAWA, Iwao SUTOMI and Kazue WAKAMATSU

<sup>1</sup>防災科学技術研究所 川崎ラボラトリー(〒210-0006 川崎市川崎区砂子2-6-2)

E-mail:hasegawa@kedm.bosai.go.jp

*Key Words: erosion rate, landslide, specific sedimentation rate, peak ground velocity, grid slope, GIS*

#### 1. はじめに

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震では、山地、丘陵地において、多くの斜面崩壊が発生した。崩壊発生の一因として、地震動が強かったことに加えて、地すべりが多発している地域であり<sup>1)</sup>、もともと山地が崩れやすい地域であることが知られている。この山地の崩れやすさを何らかの指標によって考慮して、斜面崩壊分布と地震動分布の関係を把握できれば、他の地域の斜面崩壊発生予測に貢献するものと思われる。

筆者ら<sup>2)</sup>は日本全国に適用できる簡便な侵食速度ポテンシャル推定法を提案しており、新潟中越地方の山地の崩れやすさにも適用が可能である。また、筆者ら<sup>3)</sup>は新潟県中越地震においてライフライン被害調査を実施した際に、国土地理院<sup>4)</sup>から斜面崩壊分布のデータを入手している。さらに、筆者ら<sup>5)</sup>は新潟県中越地震での強震観測記録と地盤情報に基づいて地震動分布を推定した。これらのデータはいずれも地理情報システム(GIS)にて重ね合わせて利用することが可能である。

そこで、本研究では、これらの研究成果や収集した各種情報をGISに重ね合わせることで、斜面崩壊の発生要因を流域単位で定量的に分析した結果を報告する。

#### 2. 山地の侵食速度ポテンシャルの推定

##### (1) 全国のダム堆砂量データの構築<sup>2)</sup>

わが国では、山地の侵食の主な原因は崩壊などのマスマーブメントであると考えられている<sup>6)</sup>。山地での侵食量は河川流域から搬出されてダムに堆積する土砂量に等しいとみなされており<sup>7)</sup>、ある程度の規模を有するダムで上流に別のダムがない場合、比堆砂量(単位年、単位面積あたりの堆砂量)が、流域全体の平均的な侵食速度を近似的に表していると考えられている<sup>8)</sup>。つまり、ダムの比堆砂量を近似的に流域の地形量や表層地質などから簡便に推定できれば、その結果は斜面崩壊の発生予測などに利用できる可能性がある。

そこで、筆者らは電力土木<sup>9)</sup>誌上に公開された昭和37年から平成13年までの堆砂データをGISに入力し、芦田ら<sup>10)</sup>の研究を参考にして、他のダムの影響を受けず、土砂の捕捉率が100%に近いダムを選んだ。さらに、宮崎・大西<sup>9)</sup>の研究を参考にして、それらのダムのうち、堆砂の経年グラフにおいて増加傾向が認められるものについて、年平均堆砂量を読み取った。

以上の手順により、全国で72のダムについて、上流域の集水域面積を計測し、その値で年平均堆砂量を除して、比堆砂量を算出した。

表-1 比堆砂量推定のための主な地形量<sup>2)</sup>

単位	地形量	説明	主な文献
流域	起伏量比	流域内の起伏量を本河川の流路距離で除した値	吉松 <sup>14)</sup> 建設省河川局 <sup>15)</sup>
流域	流域面積	ダムの集水域に相当する上流地域の面積	芦田・奥村 <sup>16)</sup> 建設省河川局 <sup>15)</sup>
メッシュ	地貌係数	流域内でのメッシュ単位の標高と起伏量の平均値を互いに乗じた値	田中・石外 <sup>17)</sup>
メッシュ	(基準)高度分散量	メッシュ内に含まれる複数の標高データの標準偏差の流域内での平均値	Ohmori <sup>7)</sup> , 藤原 <sup>18)</sup>
メッシュ	起伏度×平均標高	流域内でのメッシュ単位の起伏量のうち最頻値より大きい階級の値を合計し流域面積で除した値と平均標高の積	岡野 <sup>19)</sup>

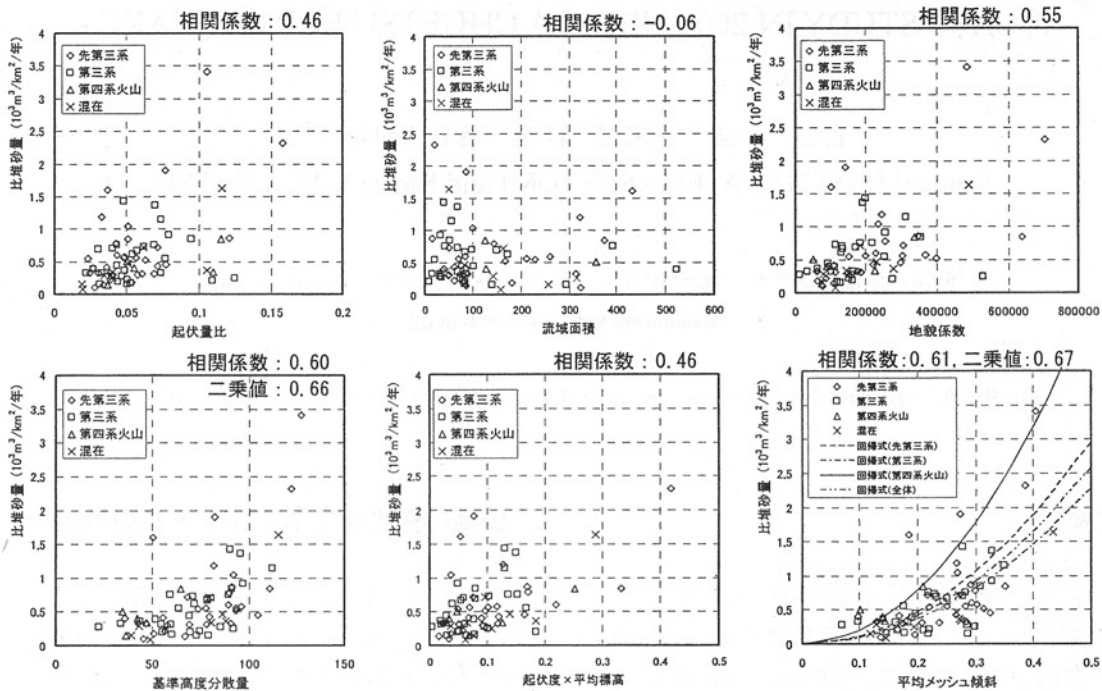


図-1 地質区分ごとの比堆砂量と各種地形量との比較<sup>2)</sup>

(2) 地形量と比堆砂量の比較<sup>2)</sup>

次に、ダムの上流域内に含まれる250mメッシュ標高データ(国土地理院発行)を用いて、比堆砂量の推定を目的として提案された主な地形量を算出した。算出した地形量を表-1に示す。筆者らは、広域を対象としたハザード評価のための基礎情報となる、全国的な地盤特性データベース『日本の地形・地盤デジタルマップ』(以下、JEGM)を構築し<sup>11)</sup>、デジタルデータを出版した<sup>12)</sup>。このマップは、GISにて取り扱うことのできる数値情報で、地形分類、表層地質などに関する基準地域メッシュ(約1kmメッシュ)単位のデータによって全国が網羅されている。その中には、250mメッシュ標高データを用いて、沖村ら<sup>13)</sup>の手法にて計算された基準地域メッシュ単位の平均傾斜(以下、平均メッシュ傾斜)が含まれている。

比堆砂量を推定するために提案された多くの地形量は、起伏量や高度分散量など、斜面の傾斜を間接的に

表現するために用いられてきたものであり、本来の地形変化を表現する物理量としては、傾斜がふさわしい。そこで、本研究ではメッシュ単位で算出された傾斜を比堆砂量の推定のための地形量として用い、従来提案されてきた地形量との比較を行った。その結果を図-1に示す。図中のプロットはJEGMに含まれる表層地質ごとに分けて示しており、各グラフには地形量と比堆砂量の全体での相関係数も示す。基準高度分散量と平均メッシュ傾斜については、藤原<sup>18)</sup>の研究を参考にして、地形量の二乗値との相関係数も示す。相関係数を比較した結果、平均メッシュ傾斜の値がもっとも高く、その二乗値との相関はさらに高いことがわかった。

そこで、表層地質ごとに平均メッシュ傾斜の二乗値を変数とした原点を通る場合の回帰分析を行った。その結果を式(1)および表-2に示す。式(1)を比堆砂量の簡易推定式として、分析に利用した72のダムのうち地質が

明瞭に区分できる65のダムに対して適用した結果、平均的な誤差量は±52m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年であり、岡野ら<sup>19)</sup>の推定結果±150 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年(対象ダム:1000m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/年未満)よりも誤差が小さい。そのほか、砂防ダムに関する既往の研究<sup>15)</sup>での比堆砂量の計算値と実測値のばらつきは最大で8-10倍であるが、本研究での誤差はこの範囲におさまっている。

$$y = ax^2 \pm \sigma \quad (1)$$

ここで、x:流域での平均メッシュ傾斜

y:比堆砂量

表-2 式(1)の係数と標準偏差<sup>2)</sup>

地質区分	a(係数)	σ(標準偏差)
先第三系	11.8	0.53
第三系	9.1	0.29
第四系火山	19.8	0.16
全体	10.3	0.41

### (3) 中越地方での侵食速度ポテンシャルの推定

式(1)を用いた比堆砂量の簡易推定法をJEGMおよび国土数値情報の流域界データ<sup>20)</sup>に適用し、中越地方の山地・丘陵地・火山地を対象として、侵食速度ポテンシャルマップを作成した。図-2にその結果を示す。今回の対象地域は、新潟県中越地震による斜面崩壊分布を含む縦・横50×30kmの範囲である。図中の空白の流域は、山地・丘陵地以外の地域、または、表層地質のうち先第三系、第三系あるいは第四系火山岩類が単独で流域面積の半分以上を占めておらず、式(1)を適用できなかった地域、のいずれかである。本研究では、比堆砂量が推定された191流域を分析対象とする。

### 3. 新潟県中越地震での地震動と斜面崩壊分布

末富ら<sup>5)</sup>は、新潟県中越地震での地震動分布を、強震観測記録を補間することによって250mメッシュ単位で推定している。そこでは、多くのボーリングデータや地形分類図に基づいて平均S波速度分布を作成し地盤の増幅度分布を推定している。ボーリングデータが豊富な地域ではそれらの情報を主体に、乏しい地域では地形分類を主体にして活かすために、距離による重みを付けて各メッシュの平均S波速度を推定している。その分布と距離減衰式、強震観測記録を利用して、計測震度や最大地動速度の面的分布を推定している。その結果は観測値と整合し、かつ距離減衰傾向が表現されており、信頼性が高いものと考えられ、各種構造物の被害と地震

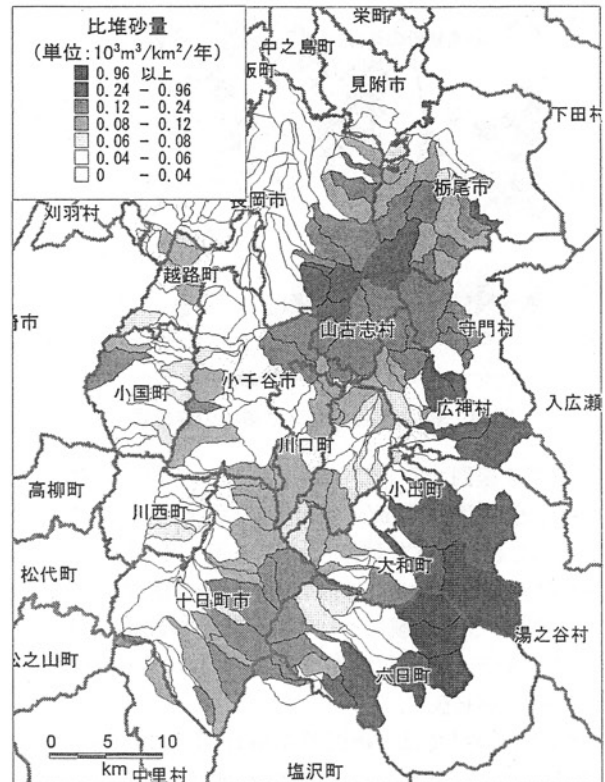


図-2 流域単位の侵食速度ポテンシャルの分布 (灰色線:行政界)

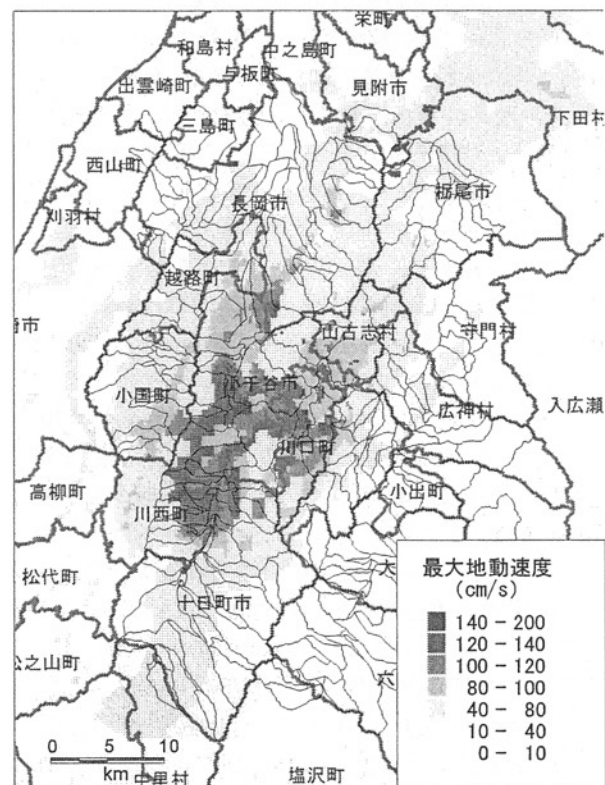


図-3 新潟県中越地震での推定最大地動速度の分布<sup>5)</sup> (黒線:流域界, 灰色線:行政界)

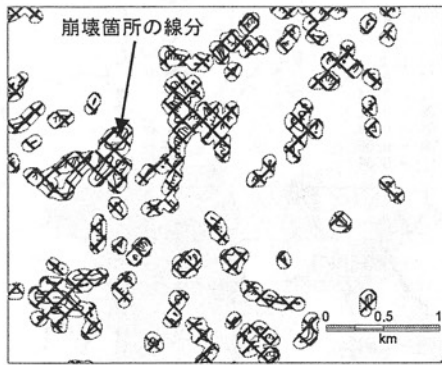


図-4 斜面崩壊バッファ領域の作成例

動の関係を検討する上でも有用と考えられている。図-3に最大地動速度(cm/s)の分布を示す。地震動が120cm/sを超える主な地域は小千谷市、川口町、川西町東部である。旧山古志村は100cm/s未滿が大半を占めているが、この地域については、断層の破壊過程の解明や地盤データの収集が進むことにより、今後改善される可能性がある。

国土地理院<sup>4)</sup>では、新潟県中越地震での斜面崩壊の発生した箇所や河道閉塞箇所の情報などをWeb-GISで公開し、GIS情報の提供が行われた。斜面崩壊の発生規模は大小様々であるため、それらの面積を計測し、流域単位の崩壊発生率を計算する方針をたてた。ところが、崩壊箇所データは線分であったため、そのままでは面積を計算できない。そこで、試みに斜面崩壊発生地区の面積の概算を計測するために、GIS機能を利用し、崩壊箇所データの線分から幅50mのバッファ領域を生成させた。幅50mは仮の値であるが、対象となる斜面崩壊箇所の大半の領域の内側を塗りつぶし、かつ外側へ極端に広がらない距離であることを確認している。図-4に斜面崩壊のバッファ領域の作成例を示す。図中のハッチ領域が崩壊箇所の線分から作成されたバッファ領域を示している。

このバッファ領域の生成では、斜面崩壊の発生規模が小さい箇所ほど過大評価になるが、流域界の面積で崩壊バッファ領域の面積を除することで、流域単位の崩壊発生率を簡便に算出した。この崩壊発生率は、流域界のようにある程度の広域で崩壊発生率を算出する場合には、実際の値との間に大きな開きは生じないものと思われる。図-5には、崩壊バッファ領域の分布および流域単位での斜面崩壊発生率の分布を示す。また、流域単位での崩壊発生率もあわせて示している。崩壊発生率が15%を超える流域は、主に旧山古志村、長岡市南東部および小千谷市東部に分布している。図-2と比較すると、それらの地域での侵食速度ポテンシャルは比較的高い値を示していることがわかる。

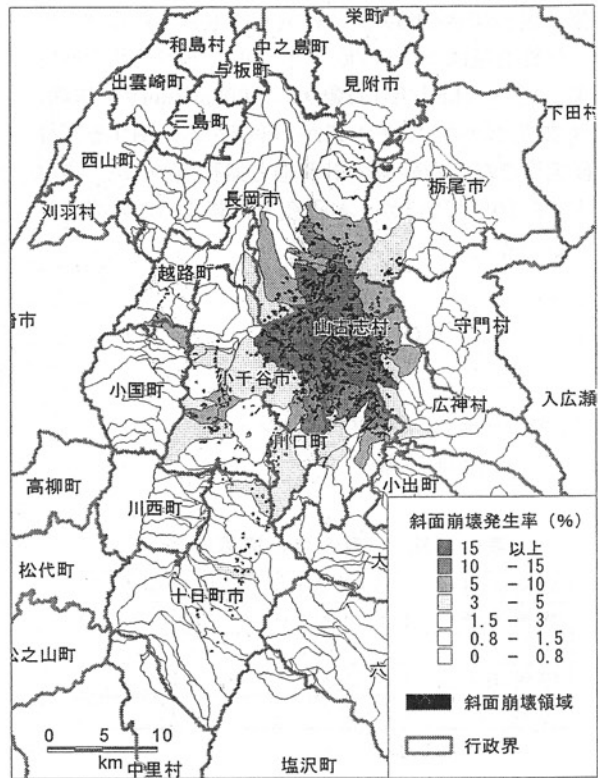


図-5 新潟県中越地震での斜面崩壊箇所の分布

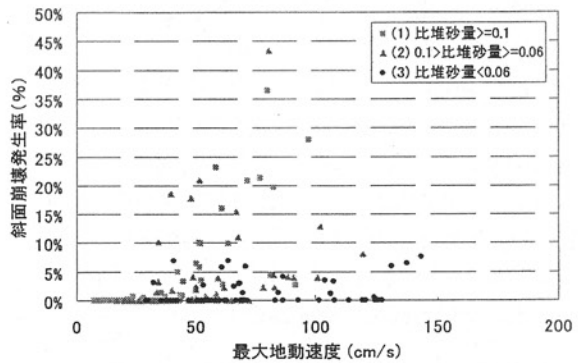


図-6 侵食速度ポテンシャルによる分類別みた流域単位の地震動と斜面崩壊発生率の関係

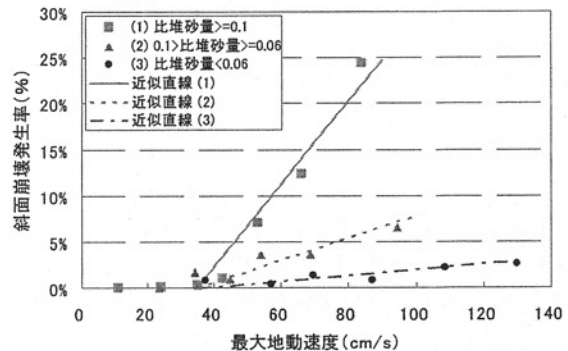


図-7 侵食速度ポテンシャルによる分類別に地震動の階級単位で集計した斜面崩壊発生率と地震動の関係



#### 4. 斜面崩壊発生率と地震動、侵食速度ポテンシャルとの関係

##### (1) 流域単位での比較

前章で示した各情報をGISにて重ね合わせ、流域単位での情報の集計を行った。すなわち、最大地動速度分布からは流域での平均値を算出し、崩壊バッファ領域からは流域内での崩壊面積の合計を集計し、流域面積で除した。その結果を図-6に示す。ここでは、流域数がほぼ等しく分かれるように、比堆砂量の値が0.1と0.06を境界として分類した。これらの分類は、比堆砂量が大きいうちから順に、分類(1)、分類(2)、分類(3)と呼ぶ。

図-6の全体の傾向として、発生率1%を超える斜面崩壊が発生し始める地震動強さは35cm/s付近であり、地震動が35cm/s付近から100cm/s付近の間に斜面崩壊発生率が10%を超える流域が分布している。

各分類を全体的に比較すると、分類(1)、(2)の流域は、地震動が75cm/sを超えると崩壊発生率0%の流域は存在しないが、分類(3)では多く分布している。崩壊が発生した流域についてみると、分類(3)では地震動の大小にかかわらず崩壊発生率は8%を超えないが、分類(1)、(2)ではそれ以上の発生率が多く分布する。分類(1)と(2)を比較すると、50cm/s付近以下では分類(2)の崩壊発生率のいくつかは10%を超えているが、平均的には分類(1)と同程度である。50cm/sを超える範囲では分類(1)の崩壊発生率は分類(2)よりも明らかに高い値に分布していることが読み取れる。

以上より、新潟県中越地震での斜面崩壊は、全体的な傾向として、侵食速度ポテンシャルの分類で(1)>(2)>(3)の順で発生率が高かったといえる。

##### (2) 地震動強さに基づいて階級区分した集計

次に、流域単位のデータを地震動に基づいて階級区分して、斜面崩壊発生率を集計した。具体的には、前節での三分類の流域データに対して、地震動で並べ替えて、地震動が10~20cm/s程度のきざみになるように階級分けを行い、階級ごとに(斜面崩壊面積合計)/(流域面積合計)による崩壊発生率の平均値を算出した。各階級での流域数は5を下回らないようにした。地震動は、流域面積により重みを付けて平均値を算出した。

集計結果を表-3および図-7に示す。図より侵食速度ポテンシャルが大きな分類ほど、崩壊発生率の地震動強さに対する傾きは大きな値を示す傾向がある。分類(1)は、地震動の増大とともに崩壊発生率の増加が明瞭に認められる。分類(2)、(3)についても、崩壊発生率は小さいが、最大地動速度が大きくなるにつれて斜面崩壊発生率も高くなる傾向が認められる。

表-3 侵食速度ポテンシャルによる分類別、地震動の階級区分で集計した斜面崩壊発生率などの数値一覧

##### (1) 比堆砂量 $\geq 0.1$

階級	PGV (cm/s)	崩壊発生率	崩壊面積 (km <sup>2</sup> )	流域面積 (km <sup>2</sup> )	流域数
1	84.0	0.24	13.2	54.4	5
2	66.2	0.12	6.5	53.0	5
3	53.1	0.07	4.1	58.3	8
4	42.5	0.01	0.6	56.7	7
5	35.0	0.00	0.2	67.6	9
6	24.2	0.00	0.1	78.6	15
7	11.2	0.00	0.0	219.0	16
全体	34.6	0.04	24.8	587.5	65

##### (2) 0.1>比堆砂量 $\geq 0.06$

階級	PGV (cm/s)	崩壊発生率	崩壊面積 (km <sup>2</sup> )	流域面積 (km <sup>2</sup> )	流域数
1	94.3	0.07	3.7	56.8	8
2	68.8	0.04	1.4	38.3	9
3	53.9	0.04	1.5	41.5	10
4	44.8	0.01	0.5	52.0	11
5	34.2	0.02	1.0	58.5	15
6	23.6	0.00	0.0	56.6	10
全体	52.3	0.03	8.1	303.8	63

##### (3) 0.06>比堆砂量

階級	PGV (cm/s)	崩壊発生率	崩壊面積 (km <sup>2</sup> )	流域面積 (km <sup>2</sup> )	流域数
1	129.6	0.03	0.4	15.0	8
2	108.3	0.02	1.0	48.4	7
3	87.2	0.01	0.3	34.4	6
4	69.8	0.01	0.4	27.3	10
5	57.1	0.00	0.3	76.9	17
6	37.3	0.01	0.5	58.8	15
全体	71.6	0.01	2.9	260.7	63

PGV：最大地動速度

大雑把ではあるが、各分類の近似直線を図-7に示している。ここでは、仮に地震動が35cm/sで崩壊発生率=0%の条件を与えている。その場合、分類(1)から(3)の係数は、順に $45 \times 10^{-4}$ 、 $12 \times 10^{-4}$ 、 $3 \times 10^{-4}$ であった。

#### 5. おわりに

本研究では、基準地域メッシュ単位での平均メッシュ傾斜と表層地質を用いた簡便な侵食速度ポテンシャル(比堆砂量の推定値)の推定法を用いて、新潟県中越地震での斜面崩壊が発生した地域での流域単位でポテンシャルマップを作成した。そして、新潟県中越地震

の推定地震動と斜面崩壊発生率の関係を、侵食速度ポテンシャルの分類別に流域単位で整理し、地震動の階級区分で崩壊発生率を集計した。その結果、侵食速度ポテンシャルが大きい分類ほど同一地震動での崩壊発生率が高くなる傾向が認められた。

今後、崩壊面積の計測を精度よく行い同様の分析を実施するとともに、他の地震による斜面崩壊の事例においても地震動との分析を行い、それらの結果も考慮して、全国に適用可能な簡便な斜面崩壊予測手法の構築を行うことが課題である。

謝辞:本研究は、科学技術振興調整費『平成16年新潟県中越地震に関する緊急研究』(代表者:笠原敬司)および文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト「震災総合シミュレーションシステムの開発」による研究成果の一部である。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 独立行政法人防災科学技術研究所:地すべり地形分布図第17集「長岡・高田」, 2004.
- 2) 長谷川浩一・若松加寿江・松岡昌志:ダム堆砂データに基づく日本全国の潜在的侵食速度分布, 自然災害科学, 第24巻, 3号, pp.287-301, 2005.
- 3) 長谷川浩一・酒井久和・若松加寿江・佐藤忠信:GISを用いた新潟県中越地震における水道管の被害分析, GIS—理論と応用, 第13巻, 2号, pp.41-49, 2005.
- 4) 国土地理院:平成16年新潟県中越地震災害状況図(電子国土Webシステム), <http://www.cyberjapan.jp/>.
- 5) 末富岩雄・福島康宏・石田栄介・磯山龍二・澤田純男:2004年新潟県中越地震の地震動分布推定における補間計算条件の影響, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集(投稿中).
- 6) 吉川虎雄・杉村新・貝塚爽平・太田陽子・阪口豊:日本地形論, 東京大学出版会, 1973.
- 7) Ohmori, H.: "Relief structure of the Japanese mountains and their stages in geomorphic development", Bull. Dept. Geography Univ. Tokyo, No.10 pp.31-85, 1978.
- 8) 宮崎洋三・大西外明:貯水池堆砂量の経年変化と比堆砂量に関する考察, 土木学会論文集, No.497/II-28, pp.81-90, 1994.
- 9) (社)電力土木技術協会:昭和37年~平成13年度発行発電用貯水池・調整池土砂堆積状況, 電力土木昭和38年度~平成14年度, 1963-2002.
- 10) 芦田和男・高橋保・道上正規:河川の斜面崩壊と対策, 森北出版, 1983.
- 11) 若松加寿江・松岡昌志・久保純子・長谷川浩一・杉浦正美:日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.213-232, 2004.
- 12) 若松加寿江・久保純子・松岡昌志・長谷川浩一・杉浦正美:日本の地形・地盤デジタルマップ, 東京大学出版会, 2005.11.
- 13) 沖村孝・吉永秀一郎・鳥井良一:地形特性値と地形区分, 表土層厚の関係—仙台入菅谷地区を例として—, 土地造成工学研究施設報告, Vol.9, pp.19-39, 1991.
- 14) 吉松弘行:山腹崩壊の予測式について, 新砂防, 102, pp.1-9, 1977.
- 15) 建設省河川局砂防課:砂防ダムの堆砂, 第20回建設省技術研究会報告, pp.369-387, 1966.
- 16) 芦田和男・奥村武信:ダム堆砂に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 17-B, pp.1-16, 1974.
- 17) 田中治雄・石外宏:貯水池の堆砂量と集水区域の地形・地質との関係に就いて, 土木学会誌, Vol.36, No.4, pp.173-177, 1951.
- 18) 藤原治・三箇智二・大森博雄:日本列島における侵食速度の分布, サイクル機構技報, No.5, pp.85-93, 1999.
- 19) 岡野眞久・高柳淳二・藤井隆弘:計画堆砂容量の設定とダム貯水池流入土砂量に基づく貯水池堆砂量推定方法についての考察, 平成14年度ダム水源地環境技術研究所所報, pp.31-37, 2002.
- 20) 国土地理院:国土数値情報流域界・非集水域(面), 1977. (2006. 5. 19受付)