

論文

# 数値地理情報と降雨極値データ を利用した土砂災害発生確率 モデルの構築

川越 清樹\*・風間 聡\*・沢本 正樹\*\*

## A Probability Model of Sediment Hazard Based on Numerical Geographic Information and Extreme Precipitation Data

Seiki KAWAGOE\*, So KAZAMA\* and Masaki SAWAMOTO\*\*

### Abstract

A probability model of sediment hazard was made by multiple logistic regression analysis. Relief energy, hydraulic gradient due to extreme precipitation of return period and geological features are used as parameters in this model. The risk has been analyzed quantitatively by giving a probability through setting the cause of the sediment hazard. The evaluation of the probability distribution in Japan has been performed by using those conditions that are expressible by digital geographic information. The probability distribution is composed of the 1 km× 1 km resolutions that can reflect the social risk and global changes. Dangerous areas could be extracted according to the probability of showing quantitative risk. These results are useful for the decision of the areas for the countermeasure plan. In summary, the results are as follows. (1) The urban area that extends a Chugoku mountainous district is at high risk with sediment hazard by extreme precipitation of 10-year return period. (2) The high risk areas have been extracted from the urban areas in Japan by extreme precipitation of 100-year return period, and an enormous economic loss has been predicted. (3) Probability of the resolutions has been verified to reflect information on probability of 50m×50m resolutions.

キーワード：再現期間，動水勾配，多重ロジスティック回帰分析，ハザードマップ

Key words : return period, hydraulic gradient, multiple logistic regression analysis, hazard map

\* 東北大学大学院環境科学研究科  
Department of Environmental Studies, Tohoku University

\*\* 東北大学大学院工学研究科  
Department of Civil Engineering, Tohoku University

本論文に対する討論は平成20年11月末日まで受け付ける。

## 1. はじめに

地球温暖化に伴う水循環の活発化による降水形態の変化、特に、豪雨の発生頻度の増加が指摘されている<sup>1)</sup>。気象庁・気象研究所の地域気候モデル RCM20による研究成果は、北海道南部、三陸周辺、東北地方南部と関東平野中央の日降雨量25%増加を予測している<sup>2)</sup>。近年の事例を参考にすれば、2004年の豪雨頻度は平年比の約2倍に相当し、災害統計観測史上最多の2537箇所の土砂災害を引き起こした<sup>3)</sup>。また、日本列島は急峻かつ複雑な地形と脆弱な地質から形成されるため土砂災害の発生しやすい地勢を呈する。これら事例や状況を考慮すると、豪雨発生頻度の増加に伴う日本列島の土砂災害の増加が予測される。また、近年の土砂災害による犠牲者の増加が指摘されている<sup>4)</sup>。この動向は、豪雨を考慮した土砂災害評価および対策が安全な国土形成の重要課題になることを示唆する。

災害の軽減にはソフトとハードの対策が必要である。ソフト対策として、危険、非危険の地域を分離し、社会、生活を安全な地域に誘導するハザードマップが有用であり、災害履歴の多い地域を中心に全国各地で整備されている。既往研究でも降雨条件を考慮した土砂災害に関するハザードマップの作成事例が多数存在する。榊原ら<sup>5)</sup>はラフ集合を用い降雨時に警戒すべき崖を抽出した。Temesgenら<sup>6)</sup>は降雨分布と水系網を用いて危険度の高い地域を抽出した。水田と瀬尾<sup>7)</sup>はこれら条件を無限長斜面安定解析に利用し安全率から危険地域を特定した。Iida<sup>8)</sup>は降雨の再現期間と風化を考慮することで土砂崩壊の再現期間を導いた。これらの先行研究は流域や市町村等の数百 km<sup>2</sup>程度を対象にした中小規模領域の土砂災害危険度評価である。中小規模毎の評価は対象地域間の危険度に差異を生じさせる。また、地球温暖化から予測される降水形態の変化を利用した場合、地域間における危険度の差異が増幅する可能性をもつ。この問題に対して、中小規模地域を包括した広域の危険度評価が必要になる。広域を対象にすることで中小規模領域同士の危険度を同一の基準で評価することができる。また、粗解像度である全球

規模の気候変化予測モデルの関連付けも容易になる。また、広域を対象にした成果は対策の意思決定に有用であり、国土政策における対策費用の適地配分に利用できる。

本研究は日本列島全域を対象に再現期間の24時間降雨極値を考慮した土砂災害危険度評価モデルの構築を試みたものである。このモデルは災害実績に対する地形と地質の地域条件および降雨条件から構築される。日本列島の地形、地質、降雨条件の数値地理情報をモデルに導入することでグリッドセル毎の特徴に応じた土砂災害発生確率分布を導く。このモデルから導かれる土砂災害の発生確率は、地形、地質および降雨を含む水文条件の状態変化に応じた土砂災害の発生する確率として定義される。

危険度評価の結果は、高低およびランクにより示される定性的な指標、発生確率および斜面の安全率による定量的な指標に分類される。定量的な指標は地域間の土砂災害危険度の差異を容易に理解させるため、対策工事および将来的な対処の優先度に有用である。安全率は、斜面の滑動力と抵抗力による釣合いを物理的に算定することで得られるものであり、対策工事に直結できる汎用性の高い指標である。しかしながら、安全率を導出させる安定解析では土質条件に慎重な議論が必要になる。活動的な斜面における土質の粘着力と内部摩擦角は著しく変化しやすい、一般的に安定解析に利用される極限平衡法に安定斜面の土質定数を適用するのが困難等の問題をもつ。なぜなら、この問題に対して、多数の現地調査と解析の事例の整理が必要になるからである。一方、統計的な手法を用いると土質条件に関する詳細情報は不要になる。したがって、広域を対象とする場合、物理過程を考慮した解析手法よりも統計的な手法を用いる方が効率的である。Ohlmacher and Davis<sup>9)</sup>は発生確率による土砂災害評価モデルを構築したが、この評価に利用されたデータは地形と地質のみである。降雨条件が考慮されていない、固結度の低い地質よりも高い地質が高い危険度を示す等の問題をもつものの広域に適用しやすいモデルである。本研究では、これらの問題点を改良した広

域の危険度評価に適するモデルの構築を試みた。降雨は土砂災害の誘因であり、短時間の変化を示すことのできる動的な情報である。再現期間毎の降雨極値を利用することで、土砂災害の発生しやすい時間的な情報を得ることも可能になる。本研究は、気候変化の目安として利用される再現期間10年および30年、大規模土木構造物の設計基準として利用される再現期間100年に対する降雨極値を利用し、土砂災害の発生確率を導いた。本研究の成果は、地球温暖化による降雨予測による結果との比較から、将来の土砂災害の影響に関する議論も可能な資料になる。研究の成果は日本列島を対象とした土砂災害の発生確率分布によるハザードマップとなる。図1に本研究の流れを示す。

## 2. データセット

土砂災害発生確率モデルに、地質、地形、降雨情報を用いた水文データ、災害実績のデータを利用する。これらは解像度  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  の数値地理情報である。したがって、土砂災害の発生確率も解像度  $1\text{ km}^2$  の分布図で示される。この解像度には多種の社会基盤情報が用意されている。社会リ

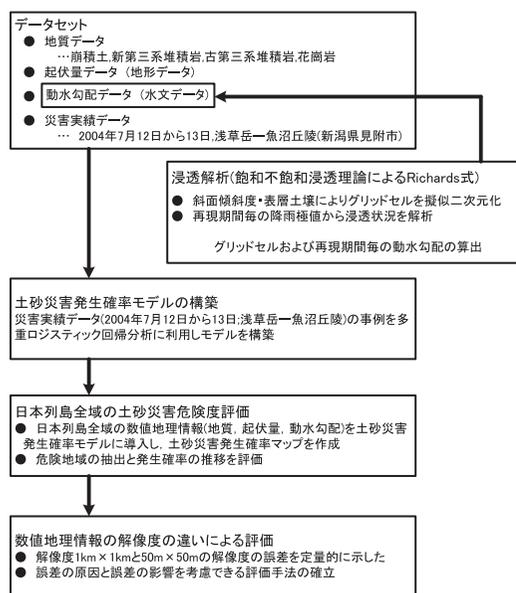


図1 本研究の流れ

スクの算定および国土政策における対策費用の適地配分の検討に適した解像度である。

## 2.1 地質・地形データ

地質データとして国土数値情報のKS-META-G05-54Mを用いる。このうち、未固結状態にある崩積土、続成期間の短い半固結状態にある新第三系堆積岩と古第三系堆積岩、造山鉱物にカオリナイトを含み粘土化しやすい花崗岩の土砂および土砂化しやすい4種類の地質を対象にした。新第三系堆積岩は風化や熱水変質の顕著な地質として知られている。また、新第三系堆積岩に属するグリーンタフの分布する日本海側は土砂災害の発生しやすい地域として認識されている<sup>10)</sup>。そのため、第三系堆積岩を新第三系堆積岩と古第三系堆積岩に分類した。

地形データとして起伏量を用いる。起伏量の大きな地域は、地形開析を助長し、活発に地形発達する。そのため、山地崩壊評価に起伏量が利用されてきた(例えば吉松<sup>11)</sup>)。起伏量は、解像度  $1\text{ km}^2$  のグリッドセル内における地形の高低差と定義され、国土数値情報のKS-META-G05-56Mに格納された最高標高と最低標高の差から求められた。

大分類した地質および起伏量の分布図を図2に示す。

## 2.2 水文データ

水文データとして動水勾配を用いる。急な動水勾配は斜面の有効応力を減少させるため斜面の不安定化を促す。動水勾配の増加は、地下水上昇を表現し、土塊内の間隙水圧を増加させるため抵抗力を減少させる。また、動水勾配の増加した斜面末端部は斜面尻の土砂流出を促すため斜面の滑動力を増加させる。更に、土砂流出はパイピング現象を増長させるため、斜面の滑動力が増加する。動水勾配は、数値地理情報から擬似二次元化した斜面を作成し、浸透解析によって求めた。擬似斜面に利用するデータはKS-META-G05-54Mの表層土壌と、KS-META-G05-56Mの斜面傾斜度、24時間雨量の極値データである。以下に浸透解析方法、降雨極値データについて説明する。

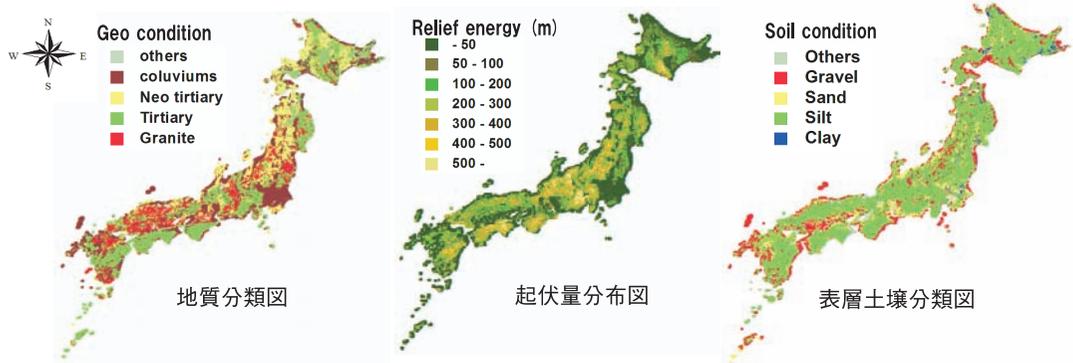


図2 国土数値情報の利用データ

(1) 浸透解析方法

浸透解析に Richards の二次元飽和不飽和浸透解析モデルを用いる<sup>12)</sup>。日本列島は脆弱な地質と森林土壌の発達した地相をなす。このため、地表水から地中水への移動は、主に不飽和状態でおこなわれる。この状態を考慮すると、雨水浸透の再現には不飽和状態も考慮した浸透解析が必要になる。本研究に用いた動水勾配は、地下水および土壌水分のない斜面上に降雨を与え、降水後に最大傾斜を示す浸潤線から求めたものである。この動水勾配は実現現象を再現したものではないものの、再現期間の降雨極値と不飽和から飽和に遷移する過程を踏まえたグリッドセル毎の地下水特性を導く。図3に浸透解析の模式断面を示す。

浸透解析に用いた Richards の方程式は式(1)から式(6)で与えられる。式(1)は飽和不飽和浸透理論に基づいた Richards の方程式である。添え字の  $x$  は水平方向、 $z$  は鉛直方向を示す。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left( \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \quad (1)$$

ここで、 $\theta$ ：体積含水率、 $t$ ：時間、 $V$ ：流速である。流速  $V$  は式(2)のダルシー則の運動方程から求める。

$$\begin{aligned} V_x &= -K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ V_z &= -K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{aligned} \quad (2)$$

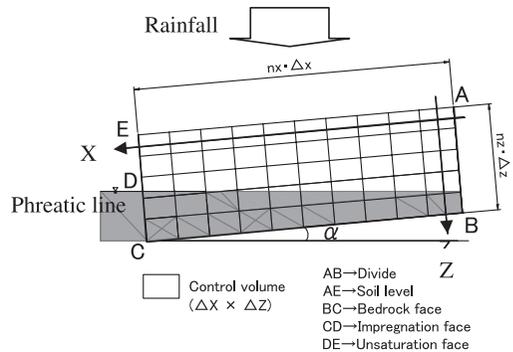


図3 浸透解析モデル断面図

ここで  $K$ ：不飽和透水係数、 $\phi$ ：全水頭である。式(3)に示す全水頭  $\phi$  は圧力水頭と位置水頭の和より求める。

$$\phi = \psi - x \sin \alpha - z \cos \alpha \quad (3)$$

ここで、 $\psi$ ：圧力水頭、 $\alpha$ ：斜面の傾斜度である。式(1)に式(2)を代入し、 $C(\psi) = \partial \theta / \partial \psi$  を導入することで(4)を求める。

$$\begin{aligned} C \frac{\partial \psi}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial \psi}{\partial x} - K_x \sin \alpha \right) \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial \psi}{\partial z} - K_z \cos \alpha \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで  $C$ ：比水分容量である。体積含水率  $\theta$  は式(5)に示す谷式<sup>13)</sup>から求めた。

$$\theta = (\theta_r - \theta_s) \left( \frac{\psi}{\psi_0} + 1 \right) \exp \left( -\frac{\psi}{\psi_0} \right) + \theta_r \quad (5)$$

不飽和透水係数  $K$  の算定に式(6)に示す一般化 Kozeny 式<sup>14)</sup>を用い、体積含水率  $\theta$  と関係から求めた。

$$K_x = Ks_x \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta, K_z = Ks_z \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta \quad (6)$$

ここで、 $\theta_s$  : 飽和体積含水率、 $\theta_r$  : 残留体積含水率、 $\psi_0$  :  $C$  が最大となる  $\psi$ 、 $\beta$  : 土壌固有の定数、 $Ks$  : 飽和透水係数である。

表層土壌は、礫質土、砂質土、シルト、粘土に分類し、浸透解析に用いた。表1に表層土壌の詳細条件を示す。また、図2に大分類した表層土壌を示す。解析は10日間タイムステップ1時間で行い、最初の1日に降雨が生ずるものとした。なお、24時間雨量を時間毎に等分配した。

(2) 再現期間の降雨極値

降雨極値の数値地理情報を AMeDAS 観測所における1980年から2000年の24時間降水量データとメッシュ気候値2000 (発行: 気象庁) を利用して作成する。手順の概要は1)から3)のとおり。

- 1) AMeDAS 観測所毎に経年の最大24時間降雨量を頻度解析し、各再現期間に対する24時間雨量の極値を求める。
- 2) 再現期間毎の降雨極値と AMeDAS 観測所の位置するメッシュ気候値の関係を気候タイプ毎の回帰式で示す。

表1 表層土壌詳細条件

土壌	透水係数 $ks (cm/s)$	飽和体積含水率 $\theta_s$	残留体積含水率 $\theta_r$	比水分量の最大になる水頭 $\psi$	特性値 $\beta$	対応土壌データ
礫質土	$1 \times 10^2$	0.30	0	0	3	岩屑性、褐色低地
砂質土	$1 \times 10^3$	0.40	0	0	3	褐色化、グライ、砂丘
シルト	$1 \times 10^4$	0.45	0	0	5	黒ボク、ポドゾル、森林、湿性森林
粘土	$1 \times 10^5$	0.50	0	0	20	泥炭

- 3) 回帰式にメッシュ気候値を代入することで、再現期間に対する降雨極値の分布データが作成できる。

AMeDAS 観測所に対する降雨極値の頻度解析に、確率分布型として一般化極値分布 GEV (Generalized Extreme Value)、母数推定法として PWM (Probability Weight Moment) 法を用いる。極値分布は、母集団に対する最大値および最小値の漸近分布である。そのため、降雨や洪水流量の最大値抽出に有効な確率分布である。GEV 分布関数は式(7)と式(8)で求められる。

$$F(x) = \exp\{-\exp(-s)\} \quad (7)$$

$$s = \begin{cases} -\frac{1}{k} \ln \left\{ 1 - \frac{k(x-c)}{a} \right\} & (k \neq 0) \\ \frac{x-c}{a} & (k = 0) \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 $S$  : 標準変数、 $F(X)$  : 確率変数  $x$  の分布関数、 $c, a, k$  は母数パラメータである。PWM 法は式(9)から式(12)で求められる。

$$\beta_r = E \left\{ X [F(X)]^r \right\} = \int_0^1 x F^r dF \quad (9)$$

$$\beta_{r1} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{(j)} \left\{ F(x_{(j)}) \right\}^r \quad (r = 0, 1, 2) \quad (10)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = \beta_0 \\ \lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \\ \lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = c + \left( \frac{a}{k} \right) [1 - \Gamma(1+k)] \\ \lambda_2 = \left( \frac{a}{k} \right) (1 - 2^{-k}) \Gamma(1+k) \\ \frac{2\lambda_2}{\lambda_3 + 3\lambda_2} = \frac{1 - 2^{-k}}{1 - 3^{-k}} \end{cases} \quad (12)$$

ここで、 $\beta_r$  : 確率重み付積率 (PWM)、 $E\{\cdot\}$  : 期待値演算子、 $F(X)$  : 確率変数  $X$  の分布関数、 $x_{(j)}$  :  $N$  個の標本を大きさ順に並べ換えたときの小さいほうより  $j$  番目の値、 $\beta_{r1}$  : 標本による PWM の推定値、 $F(x_{(j)})$  :  $x_{(j)}$  のプロットングポディション、 $\lambda_r$  :  $L$  積率、 $r$  : 次数、 $\Gamma(\cdot)$  : ガンマ関数

である。GEV 分布による降雨極値は全国各地の1024箇所の AMeDAS 観測所から求められた。

通常、降雨データを補間する場合、重み付距離平均法や Thiessen 法を用いる。日本列島を対象にする場合、降雨分布は地形の起伏に影響されるため<sup>15,16)</sup>、単純な距離的な重み付けによる補間では表現できない。対して、メッシュ気候値2000は地形因子を説明変数にする重回帰式から導かれた降水の数値地理情報である。牛山ら<sup>17)</sup>は AMeDAS 観測所の暖候期年平均降水量（4月から11月）と日降雨極値の関係を示し、統計的に有意な相関を利用して、回帰式による日降雨極値算定モデルを作成している。このアルゴリズムを参考にすれば、メッシュ気候値に格納された暖候期降水量の利用による降雨極値の分布データの作成が可能である。しかし、牛山らの日降雨量の結果を参考にすると、回帰式と降雨極値に約500mmもの誤差がある AMeDAS 観測所も存在する。この誤差を極力小さくするため、日本列島を気候特性から区分し、複数の回帰式による再現期間毎の24時間降雨極値算定モデルの作成を試みる。気候依存した降雨イベントとして台風を例に説明すると、日本列島の北側ほど勢力が弱まり、降雨分布の地域格差が生じる。本研究に用いる降雨の気候は最大月降水量の該当する季節から分類される。春型は3月から5月、夏型は6月から8月、秋型は9月から11月、冬型は12月から2月と区分した。春と夏型、秋型、冬型毎の暖候期中の最大月降水量と、AMeDAS 観測所の再現期間に対する降雨極値を用い、気候に応じた回帰式を求める。春季に最大降水量を示す地域は、薩南諸島以南のみであること、この地域の夏季と春季はほとんど降雨差がないことの原因から夏型に統合することとした。各気候タイプに対し、暖候期中の月最大降水量と再現期間30年の降雨極値の関係を回帰式で示したものが図4である。回帰式との誤差は、最大でも250mm程度に改善されていることがみてとれる。図5はメッシュ気候値2000から作成された日本列島の気候タイプの分布図である。各メッシュの暖候期中の月最大降水量を各気候タイプに応じた回帰式に導入することで、日本列島全域の降雨極値

分布を作成できる。表2に各気候タイプにおける暖候期中の月最大降水量と降雨極値の関係要素を示す。図6に再現期間5年、30年、100年の降雨極値分布を示す。

### 2.3 災害実績データ

災害実績データは発生確率モデルの構築に利用される。同一の降雨イベントや降雨極値により日本列島全域に土砂災害が頻発した事例はなく、モデル構築に日本列島全域を一律で利用することが困難である。このため、土砂災害が頻発したある地域およびイベントの事例からモデルを構築する。このモデルに日本列島各地の数値地理情報を

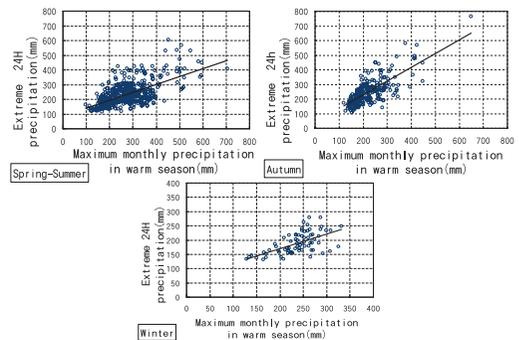


図4 暖候期月最大降水量と再現期間30年の24時間降雨極値の関係



図5 日本列島気候タイプ分布

導入することで発生確率分布を作成する。モデル構築の基礎データは、1) 現在の自然と社会が反映できる最近のデータである、2) 対象とする地質がすべて分布する、3) 災害実績が分布的に示された資料が残っている、の3条件から選定した。

冒頭に示すとおり、2004年は集中降雨頻度の増加により土砂災害が多発した。この背景に台風の上陸が過去最大数であったことと梅雨前線の停滞に伴う豪雨が頻発したことが挙げられる。災害実績の中から、2004年7月12日から13日の新潟・福島豪雨による降雨イベントを基礎条件に用いる。この降雨による土砂災害は、ある特定地域に多数の被害を与えた。新潟県内で崖崩れ、地すべり、土石流を合わせた347箇所の土砂災害が社会基盤

表2 暖候期の月最大降水量と24時間降雨極値の関係要素

再現期間	季節型	相関係数	回帰式	
			係数	切片
10年	春型・夏型	0.66	0.37	53.39
	秋型	0.77	0.60	26.68
	冬型	0.71	0.36	39.91
30年	春型・夏型	0.69	0.53	88.10
	秋型	0.80	0.94	38.42
	冬型	0.67	0.51	67.43
100年	春型・夏型	0.64	0.64	121.37
	秋型	0.70	1.19	52.11
	冬型	0.62	0.64	89.24

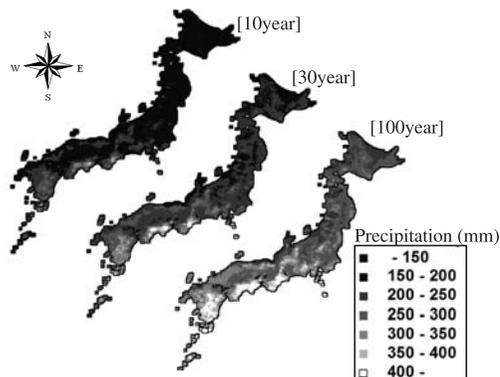


図6 再現期間毎の24時間降雨極値

に被害を与えた<sup>18)</sup>。また、写真判読から3600箇所  
の土砂崩壊が確認された<sup>19)</sup>。この災害実績を空中  
写真による判読結果および土砂災害被害分布図<sup>19)</sup>  
を参考に解像度1 km<sup>2</sup>による土砂災害分布データ  
を作成した。モデルに利用する基礎情報の範囲と  
して土砂災害の集中した新潟県栃尾市に位置する  
浅草岳から魚沼丘陵の範囲を利用する。土砂災害  
分布図を図7に示す。

浅草岳から魚沼丘陵の近辺の周辺に存在する  
AMeDAS観測所は栃尾である。栃尾の2004年7月  
12日から13日における最大24時間降雨量は  
422mmである。経年の最大24時間降雨量を整理  
し、GEV分布の確率分布型、PWM法の母数推定  
法を用いて頻度解析を行うと、422mmの24時間  
降雨量は、再現期間530年の降雨極値になる。こ  
の地域は1979年の24時間降雨量216mmを除くと  
甚大な集中降雨が認められていない。そのため、  
500年を超える長期の再現期間が導かれている。  
この24時間降雨量の再現期間500年を基礎情報  
の降雨条件に利用したこととなる。

### 3. 発生確率モデル

発生確率モデルに多重ロジスティック回帰分析  
を利用する。多重ロジスティック回帰分析は  
Framingham offspring studyにおける心疾患のリ  
スクの算定を目的にTruettらにより開発された解  
析手法である<sup>20)</sup>。この解析手法は正規確率密度の



図7 新潟県土砂災害分布と解析対象エリア

分布になじまない二項分布による発生確率を求める。ここで示される二項分布はある事象に対する生起の1と0の関係であり、本研究では7月12日から13日の新潟県見附市に位置する浅草岳から魚沼丘陵の土砂災害発生を1、土砂災害非発生を0と設定した。1と0の関係とこの関係を説明するための変数群をロジスティック曲線で示し、この曲線を重回帰式で解くことにより多重ロジスティック回帰分析が成立する。本研究では起伏量と動水勾配を説明変数に利用し、土砂災害の実例から多重ロジスティック回帰分析を作成し、発生確率モデルを構築した。また、発生確率モデルは地質別に作成し、地質状況に応じた土砂災害への影響を算定した。地質毎にモデルを作成することで、地質別の相対的な危険度を提供できる。このモデルから導かれる発生確率はある条件を基に現象の生起する条件付確率になる。説明変数の変化に伴い1から0の間に存在する発生確率を導くことができる。土砂災害の発生確率モデルは以下の式(13)～式(16)で示されるが、式(13)はロジット関数を示す。

$$P = \frac{\exp(Z)}{1 + \exp(Z)} = \frac{1}{1 + \exp(-Z)} \quad (13)$$

ここで、 $P$ : 発生確率、 $Z$ :  $r$ 個の説明変数を合わせた合成成分であり、 $Z$ は式(14)の重回帰式で示される。

$$Z = a + b_1x_1 + b_2x_2 \cdots b_r x_r \quad (14)$$

ここで、 $a$ : 切片、 $b$ : 係数、 $x$ : 説明変数である。式(14)を変換することで自然対数による式(15)が作成される。この変換はロジット変換と呼ばれる。なお、ここから合成成分を示す重回帰式の説明変数を解析にあわせ動水勾配  $x_{hydro}$ 、起伏量  $x_{relief}$  にする。

$$\log\left(\frac{P}{1-P}\right) = a + \beta_h x_{hydro} + \beta_r x_{relief} \quad (15)$$

ここで、 $\beta_r$ : 起伏量の係数、 $\beta_h$ : 動水勾配の係数である。これを発生確率  $P$  について変形すると式(16)の土砂災害発生確率モデルが作成される。

表3 発生確率モデルの説明変数 (1 km×1 km)

地質	項目	動水勾配	起伏量	切片
崩積土	係数 $\beta$	25.99	0.16	-15.97
	有意確率 $p$ 値	0.01	0.03	0.03
	標準化回帰係数	3.25	2.96	-
新第三系堆積岩	係数 $\beta$	19.64	0.14	-19.29
	有意確率 $p$ 値	0.01	0.02	0.03
	標準化回帰係数	2.37	1.96	-
古第三系堆積岩	係数 $\beta$	14.31	0.11	-24.97
	有意確率 $p$ 値	0.05	0.03	0.03
	標準化回帰係数	2.15	2.02	-
花崗岩	係数 $\beta$	9.31	0.13	-35.99
	有意確率 $p$ 値	0.04	0.04	0.05
	標準化回帰係数	1.37	1.26	-

$$P = \frac{1}{1 + \exp\left[-\left(a + \beta_h x_{hydro} + \beta_r x_{relief}\right)\right]} \quad (16)$$

表3に各説明変数に対する係数  $\beta$  を含むモデルの詳細をまとめる。説明変数は5%以内の有意確率  $p$  値を示し、有意水準5%を満たす。標準化偏回帰係数の大きさは発生確率に対する説明変数の影響度を示す。各地質における発生確率モデルの標準化回帰係数は、動水勾配が起伏量よりも大きい値であり、降水量の増加が土砂災害の発生を促すことを示している。図8はモデルに用いられた実績データと、地質毎の発生確率モデルを起伏量、動水勾配と発生確率のロジスティック曲線を示したものである。危険度の高い地質は、曲線の傾きが急であり、小さな説明変数値の上昇に伴い発生確率が急上昇する。以上の特徴を比較すると崩積土、新第三系堆積岩、古第三系堆積岩、花崗岩の順で危険度が示される。この結果は地質の硬軟と一致する。崩積土と新第三系堆積岩は、動水勾配の変化に伴い発生確率が急変しており、動水勾配の変化により急激に危険な状態に遷移する地質である。

#### 4. 土砂災害発生確率の解析結果

土砂発生確率の解析結果として、図9に再現期間10年、30年、100年の発生確率分布を示す。

再現期間10年の結果では、急峻な山岳地を中心に発生確率90%以上の地域が広く分布する。図9

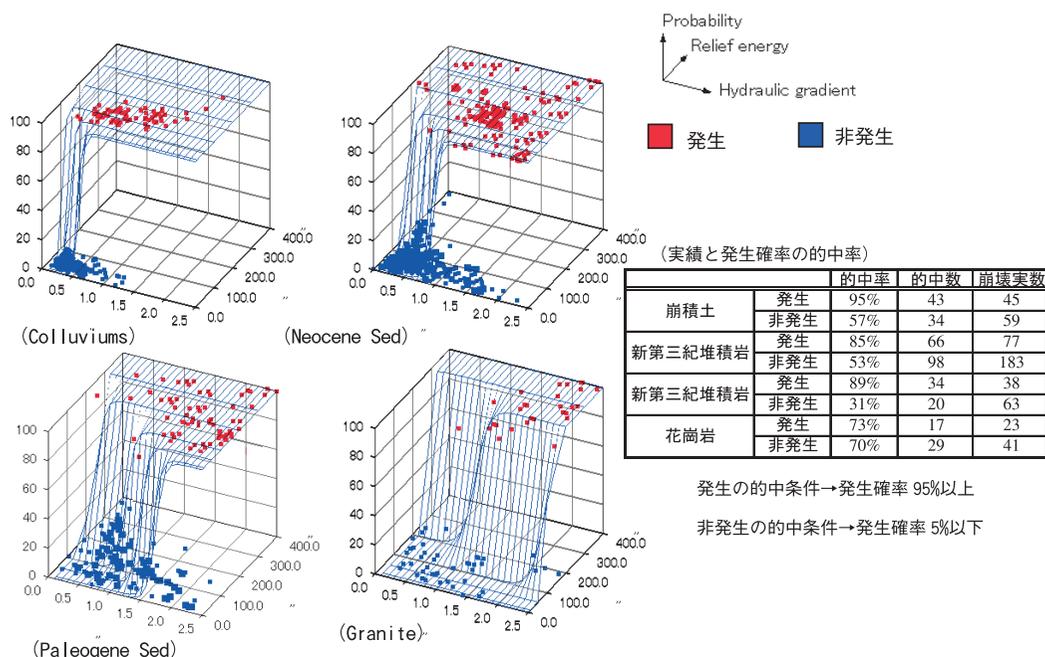


図8 各地質のロジスティック曲線 (解像度 1 km)

の再現期間10年の分布に示すとおり、北海道の石狩山地南麓、恵庭岳南麓、出羽山地の月山北麓から朝日山地、飯豊山地、越後山地、飛騨山地に至る日本海側における山地群、飛騨山脈南部を中心にする日本アルプスと称される地域一体、関東山地南西麓、紀伊山地南麓、四国山地の剣山南麓は広い範囲で発生確率90%以上を示した地域である。これらは、社会基盤が乏しいため施設の損壊および犠牲者などの被害が生じにくい地域である。しかしながら、活発な土砂生産に伴うダム施設の貯水容量の減少、山岳交通路の通行止めなどの被害が懸念される。また、中国山地は山裾側の地域で高い発生確率が集中する。中国山地の山裾は多数の都市域が分布し、短い周期で土砂災害の被害の懸念される危険地域である。この地域に含まれる広島市は犠牲者の認められた多数の災害履歴をもつ。平成11年6月29日から7月3日に土砂災害防止法施行の契機になった梅雨前線の豪雨による災害がよく知られるが、昭和20年、昭和26年、昭和42年、昭和57年、平成3年、平成5年に人的被害を含む土砂災害の発生が記録されてい

る。なお広島県は土砂災害危険箇所が多い有数の都道府県である。

再現期間30年の結果では、再現期間10年の発生確率90%の地域がやや山裾側に拡大する。そのため、社会基盤への危険性が増す。また、再現期間10年で低い発生確率だった山岳地域は再現期間30年に高い発生確率を示す。この地域は広がりをもたずに点在する。図9の再現期間30年の分布に示すとおり、北海道の夕張山地、出羽山地北部域の森吉山周辺、北上山地西麓、阿武隈山地西麓、比良山地から丹波高地、九州山地といった地域は発生確率が50%以上上昇した地域である。

再現期間100年の結果では、多くの山地が高発生確率に変化する。発生確率上昇より土砂災害の予測される市街地、流域を図9のa)からh)に示す。a)の盛岡、遠野、b)の本荘、湯沢、c)の桐生、足利、e)の尾鷲、熊野、h)の大田の市街地は土砂災害が懸念される。また、d)の九頭竜川上流域、f)の吉野川上流域、g)の緑川流域の生産土砂増加が予測される。更に、仙台市に代表される丘陵を多く含む全国各地の都市にも発生確率上

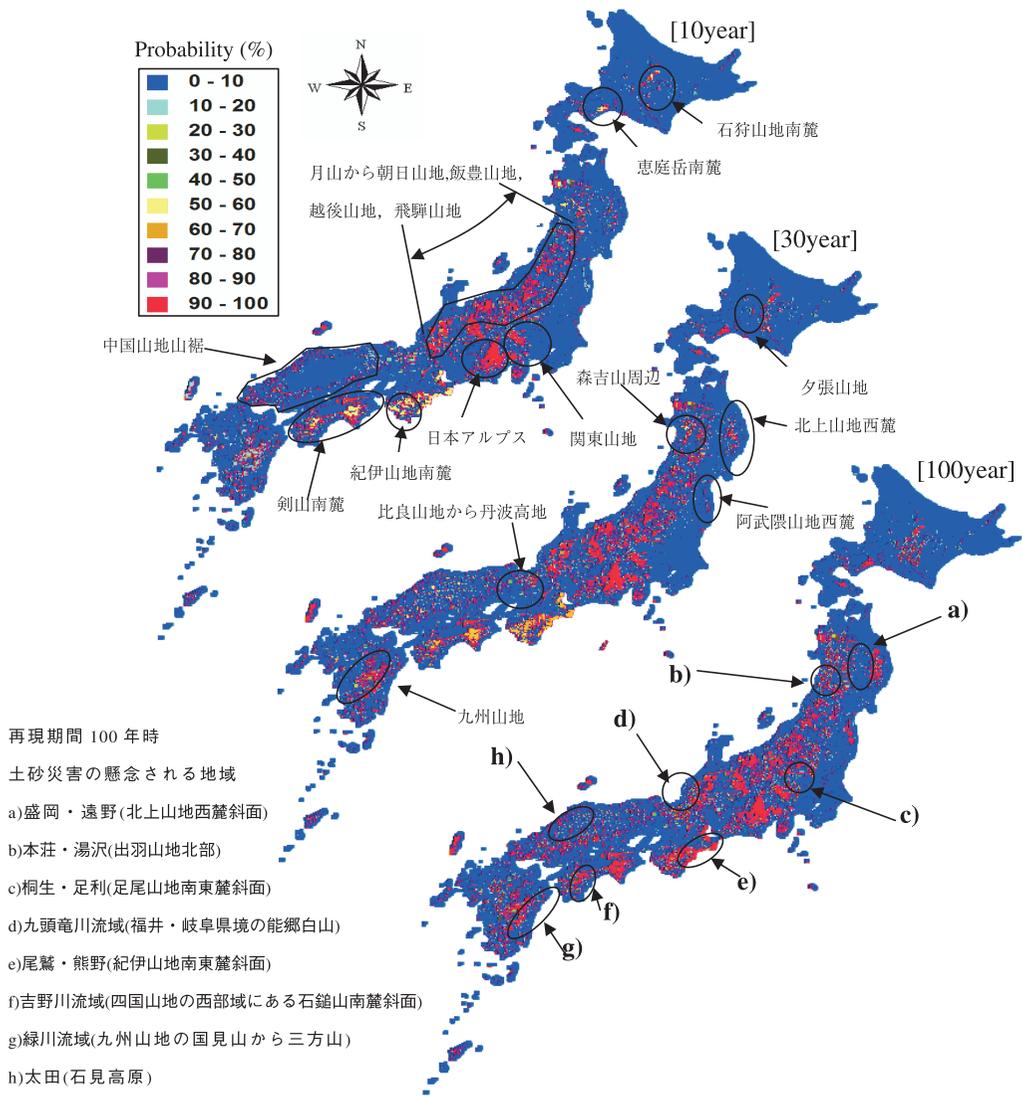


図9 日本列島の再現期間に対する土砂災害発生確率分布

昇地点が認められる。つまり、再現期間100年の土砂災害が経済活動に与える影響が増すことを示している。被害の履歴がなくとも山地に接する市街地には斜面崩壊の監視や避難体制といった危機管理が必要である。

図7に示した浅草岳から魚沼丘陵の災害発生地点の再現期間100年の発生確率を平均化すると85%である。逆に、この地域の災害発生しない地域について、発生確率を平均化すると発生確率

26%である。この結果から、災害発生した地域の発生確率が高くなっており、発生確率の有効性が定性的に示された。図10は、浅草岳から魚沼丘陵における平均発生確率と再現期間の関係を示したものである。2004年の災害時の降雨は再現期間500年であった。図10において再現期間500年の発生確率は95%である。

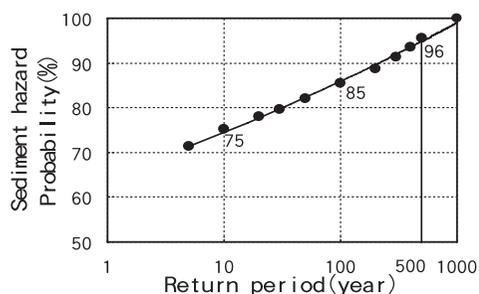


図10 浅草岳から魚沼丘陵における再現期間と平均発生確率の関係

### 5. 解像度の影響評価

解像度 1 km<sup>2</sup>の発生確率分布図は、土地利用や道路密度のような社会基盤の数値地理情報との併用によって、社会リスクの算定を可能にする。そのため、広域の土砂災害対策の意思決定に貢献できる。しかし、実際の対策には、更に詳細の対策位置を議論しなければならない。この議論には現場踏査やミクロの解像度による危険度評価が必要になる。また、将来的な対策計画の展開を考慮すれば、解像度 1 km<sup>2</sup>の評価はミクロ解像度の結果も反映された結果でなければならない。そこで、基礎情報に利用した新潟県を対象に 1 km× 1 km と 50 m× 50 m の解像度による発生確率の関係を調べた。以下、解像度 1 km× 1 km を解像度 1 km、解像度 50 m× 50 m を解像度 50 m とする。解像度 50 m は個別の土砂災害を解読できる地形情報を示した解像度である<sup>21)</sup>。解像度 50 m の発生確率モデルは、解像度 1 km の発生確率モデルの基礎情報として利用した新潟県見附市に位置する浅草岳から魚沼丘陵の範囲の土砂災害情報を解像度 50 m の精度で整理することにより作成された。解像度 50 m の地形データに数値地図 50 m メッシュ（発行：国土院）を利用する。モデル式は 3 章の式 (16) と同様であるが、モデル式における説明変数の係数が異なる。表 4 に解像度 50 m による発生確率モデルの説明変数要素を示す。図 11 に解像度 50 m によるモデルに用いられた実績データと、地質毎の発生確率モデルを起伏量、動水勾配と発生確率のロジスティック曲線を示した。

表 4 発生確率モデルの説明変数 (50 m× 50 m)

地質	項目	動水勾配	起伏量	切片
崩積土	係数 $\beta$	28.69	0.26	-8.21
	有意確率 $p$ 値	0.03	0.04	0.05
	標準化回帰係数	2.16	1.76	-
新第三系堆積岩	係数 $\beta$	23.70	0.14	-10.48
	有意確率 $p$ 値	0.03	0.03	0.05
	標準化回帰係数	1.99	1.24	-
古第三系堆積岩	係数 $\beta$	17.88	0.24	-10.48
	有意確率 $p$ 値	0.05	0.04	0.04
	標準化回帰係数	1.65	1.01	-
花崗岩	係数 $\beta$	11.70	0.08	-30.97
	有意確率 $p$ 値	0.04	0.05	0.04
	標準化回帰係数	0.99	0.89	-

図 12 は、再現期間 100 年に対する新潟県の解像度 50 m と解像度 1 km の土砂災害発生確率分布である。図 12 から、解像度 1 km と解像度 50 m の発生確率の分布は類似する。双方の解像度ともに、発生確率 80% 以上の集中する地域は、朝日山地から飯豊山に至る西麓斜面、魚沼丘陵北西麓斜面、三国山脈北西麓斜面、飛騨山地北麓斜面のいずれも山岳地である。ただし、部分的ではあるが、解像度 1 km で発生確率 40% 程度を示すものの、解像度 50 m では発生確率 70% 以上に上昇する地点が抽出される。抽出された発生確率の著しい上昇を示す地点は、図 12 中に示された A) から D) の地域であり、主に丘陵部に分布する。A) 村上・関川の朝日山地西麓斜面と越後平野の境界の丘陵、B) 阿賀野川沿いに位置する津川の丘陵、C) 日本海沿い巻から弥彦の角田山および弥彦山周辺、D) 妙高高原の笹ヶ峰高原である。これらは、解像度 1 km を対象にすれば起伏の小さな地域になるため、いずれも解像度 1 km の低い発生確率を示した。

図 13 は、解像度 50 m による発生確率を解像度 1 km で平均化したものと、解像度 1 km による発生確率の関係を示したグラフである。この相関係数は  $R = 0.94$  である。また、グラフからみてとれるように、解像度 1 km の発生確率の上昇にあわせて、解像度 50 m を平均化した発生確率も上昇する関係を示す。平均化した解像度 50 m の発生確率は、1 km の解像度と概ね同値で示される線形

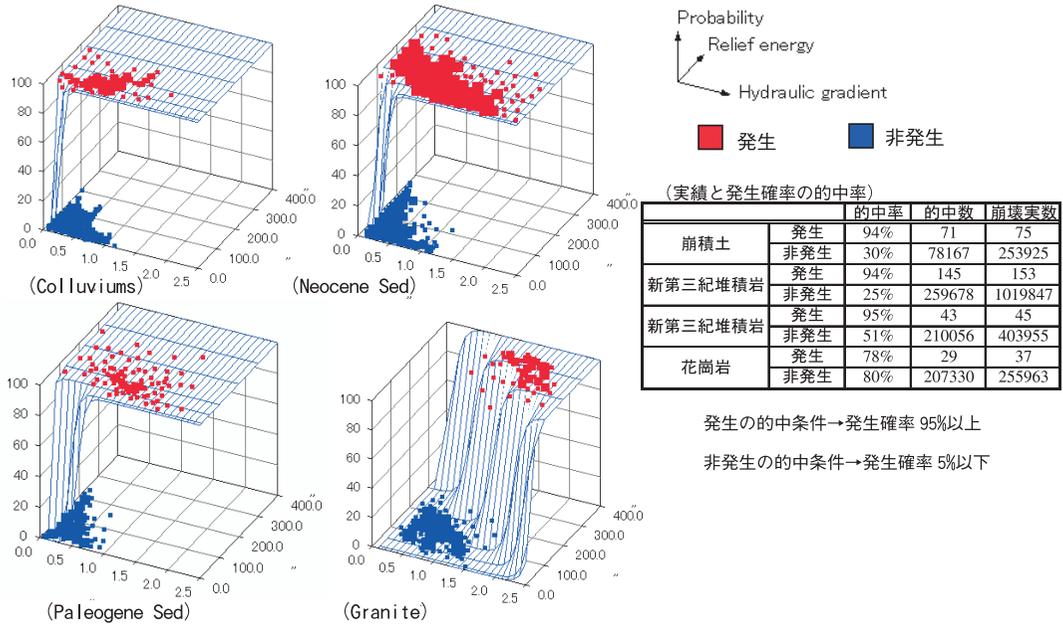


図11 各地質のロジスティック曲線 (解像度50m)

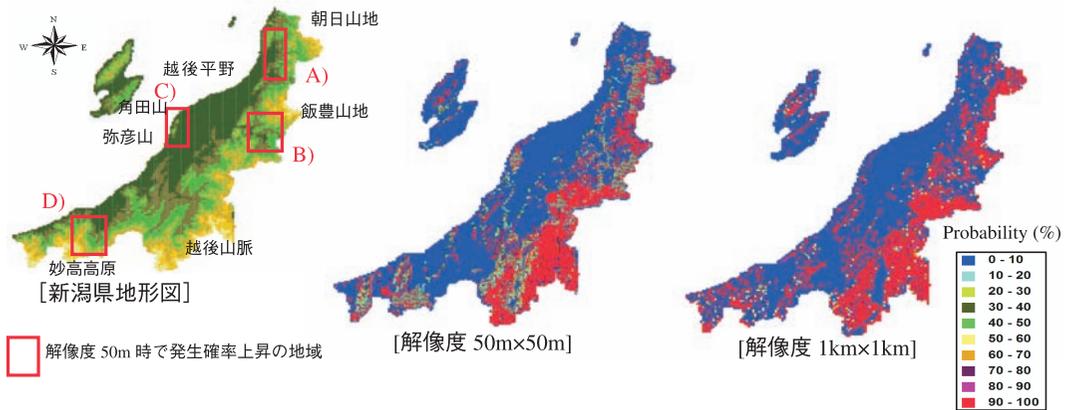


図12 新潟県の解像度50m と解像度 1 km における再現期間100年の発生確率分布

関係をもつ。ただし、この解像度の線形関係は広がりをもち分布し、図13中に示した関係線を境界にする i) と ii) に分類される。領域 i) は解像度 1 km の発生確率に対して解像度50m を平均化した発生確率の方が小さい地域、領域 ii) は50m 解像度の発生確率が著しく大きな地域である。これらの領域 i), ii) と地形の条件を比較すると、i) は山

岳地、ii) は丘陵から平野に分布する。i) の原因は、山岳地の解像度 1 km 中に緩傾斜および小さな起伏を呈する地形を含むため、ii) の原因は、平野から丘陵の解像度 1 km 中に急傾斜および大きな起伏を呈する地形を含むためである。解像度50m は微地形を含むため、解像度 1 km と比較して多少の誤差が生じる。なお、図12の A) から D) の地

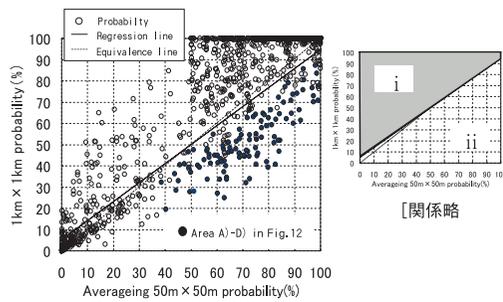


図13 解像度 1km と解像度 50m の 1km 平均の関係

域は、図13の領域 ii) 内に属した関係線と差が大きく、微地形の顕著な地域と評価できる。

図12と図13から、解像度 1km の発生確率は、平均化した解像度50m の危険度も概ねふまえた結果と解釈できる。全球の適用も可能な解像度 1km は、気候モデルの利用も可能であり、危険地域を様々な観点で考察できる。解像度 1km は、解像度50m の発生確率も反映した解像度であることが解釈されたため危険地域の抽出後の土砂災害防止対策の配置計画にも支障のない解像度である。ただし、図12の A) から D) に示す丘陵から平野に代表される解像度 1km の発生確率よりも高い発生確率を示す解像度50m には注視すべきである。これらの検出には、地形分類の付加を考慮する必要がある。国土数値情報の KS-META-G05-54M データの大分類地形を利用すると、A) と B) は山麓地、C) は小起伏丘陵、D) は大起伏丘陵、に属する。図14は、新潟県内の地形分類に対する解像度 1km と平均化した解像度50m の再現期間100年の発生確率の関係図である。解像度 1km において、山麓地は平均16%、小起伏丘陵は平均13%、大起伏丘陵は平均19%、の発生確率を示す。対して、A) から D) は、解像度 1km で40%以上の発生確率であり、地形分類と比較をすれば、約20%から25%も発生確率が上昇していることになる。これら地形の標準偏差は10%程度であるため、地形分類上で A) から D) は発生確率の卓越した危険地域と解釈される。また、これら地形の平均と同等およびそれ以下の発生確率を示す解像度 1km の地域は、解像度50m に著しい高発生確率の地点

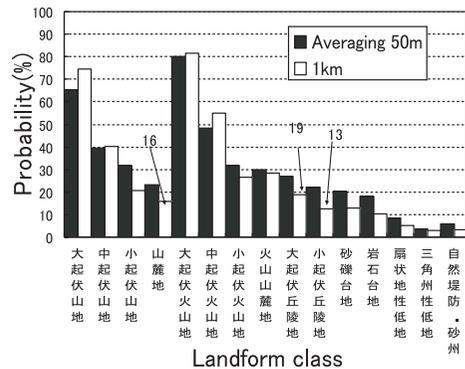


図14 地形分類と発生確率の関係

を含まないことがわかった。地形分類に応じた発生確率の比較は、対象メッシュに対するミクロ情報による潜在的な高発生確率地点の存在を抽出できる。

## 6. おわりに

地形、地質、24時間降雨極値より導かれた動水勾配を条件に日本列島全域に対する土砂災害の発生確率モデルを構築した。その発生確率モデルから、再現期間10年、30年、100年の発生確率分布図を作成し、土砂災害発生確率の時空間的な分布を把握することができた。この発生確率モデルは、広域の危険地域の抽出に優れており、社会リスクの算定、地球温暖化による影響も考慮しやすい解像度 1km で評価した。また、この解像度で構築された発生確率モデルは、個別現象の危険度も反映した評価であり、土砂防止対策の配置に支障のない危険領域を抽出できる。本研究から以下の結論を得た。

- 1) 再現期間10年の土砂災害発生確率では、急峻な山岳地を中心に高い発生確率が認められた。これら地域に存在するダムや道路に被害を与える可能性がある。
- 2) 都市域の集中する中国山地の山裾部は、再現期間10年で高い発生確率を示す地域である。この結果だけでなく、過去の土砂災害履歴からも多数の被災の多く認められる地域であり、短い周期の土砂災害による被害が懸念さ

れる。

- 3) 再現期間10年から30年に変化することで、発生確率90%の地域がやや山裾側に拡大する傾向を示した。社会基盤に対する土砂災害の危険性の増加が懸念される。
- 4) 再現期間100年の結果では、発生確率の上昇地域の拡大が認められた。拡大域には都市や重要河川沿いの地域も含む。更に、仙台市に代表される丘陵を多く含む全国各地の都市にも発生確率上昇地点が分布する。甚大な経済損失が予測される。
- 5) 解像度1kmの発生確率は、解像度50mの発生確率の情報も反映しており、これらの発生確率は概ね同値で示される関係をもつ。
- 6) 平野、丘陵の発生確率は、地形分類別の平均発生確率と比較して危険性を解釈する必要がある。

土砂災害に対する危険地域の位置や範囲は、専門知識によって特定されており、その信頼性は高いものである。しかしながら、発生確率による危険度は定量的であり、社会リスクの算定に利用できるメリットをもつ。また、この発生確率は日本列島全域の地図上に反映できる。したがって、対策を優先して整備すべき地域の抽出に有用である。加えて、降雨分布や地域の状況を精査し、危険性が高くなる降雨量の基準値を地域毎に示すことも可能である。

今後は、広域に対する降雨状況と災害実績の検証をおこなうことと同時に、降雨極値のみでなく融雪などを含む降水現象全般を土砂災害発生確率モデルへ利用する。この結果を用い、現在から将来にかけて予測される土砂災害発生確率の遷移と社会リスクを算定し、土砂災害に対する安全な国土形成の施策について検討する意向である。

## 謝 辞

本研究の一部は「環境省の地球環境研究総合推進費(S-4):温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究」から援助を受けました。ここに記して謝意を示します。

## 参考文献

- 1) 環境省：IPCC 地球温暖化第3次報告－政策者向け要約－, pp. 91, 2001.
- 2) 和田一範・村瀬勝彦・富沢洋介：地域気候モデルを用いた地球温暖化による災害リスク算定の試み, 水工学論文集, No. 48, pp. 457-462, 2004.
- 3) 国土交通省:水害レポート2004(平成16年度版), <http://www.mlit.go.jp/river/saigai/kiroku/suigai2004/right.html>. 2005年5月1日.
- 4) 内閣府：平成16年版防災白書, 国土印刷局, 2004.
- 5) 榊原弘之・倉本和正・菊池英明・中山弘隆・鉄賀博己・古川浩平：ラフ集合を用いたデータマイニングによるがけ崩れ発生要因の抽出に関する研究, 土木学会論文集, No. 658, VI-48, pp. 221-229, 2000.
- 6) Temesgen, B., Mohammed, M.U. and Korme, T.: Natural Hazard Assessment Using GIS and Remote Sensing Methods, with Particular Reference to the Landslides in the Wondogenet Area, Ethiopia, physics and Chemistry of the Earth part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science, Vol.26, Issues 9, pp.665-675, 2001.
- 7) 水田敏彦・瀬尾一大：数値標高モデルに基づく豪雨による斜面崩壊危険予測－長崎市を事例対象にして－, 自然災害科学, Vol. 19, No. 4, pp. 477-491, 2001.
- 8) Iida, T.: A stochastic hydro-geomorphological model for shallow landslide due to rainstorm, CATENA, Vol.34, Issues 3-4, pp.293-313, 1999.
- 9) Ohlmacher, G.C. and Davis, J.T.: Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA, Engineering Geology, Vol.69, Issues 3-4, pp.331-343, 2003.
- 10) 東北地方土木地質図編集委員会：東北地方土木地質図解説書, 1988.
- 11) 吉松弘行：山腹崩壊の予測式について, 新砂防, 102, pp. 1-9, 1977.
- 12) Richards, L. A., Capillary conduction of liquids through porous mediums, physics, Vol.1, pp.318-333, 1931.
- 13) 谷 誠：一次元鉛直不飽和浸透によって生じる水面上昇の特性, 日本林学会誌, 64(11), pp. 409-418, 1982.
- 14) Brutsaert, W.F.: The permeability of a porous medium determined from certain probability

- laws for pore size distribution, *Water Resources Research*, Vol.4, No.2, pp.425-434, 1968.
- 15) 沖 大幹・虫明功臣・小池俊雄：地形と風向による豪雨時の降雨分布の推定, *土木学会論文集*, No. 417, II-13, pp. 199-207, 1985.
  - 16) 鈴木善晴・中北英一・池淵周一：標高依存直線に基づいた降雨分布の地形依存特性の解明, *水工学論文集*, No. 45, pp. 301-306, 2001.
  - 17) 牛山素行・寶 馨：AMeDAS データによる暖候期降水量と最大1時間・日降水量の関係, *水文・水資源学会誌*, Vol. 13, No. 4, pp.368-374, 2004.
  - 18) 国土交通省：平成16年7月新潟・福島豪雨及び平成16年7月福井豪雨による土砂災害状況, <http://www.mlit.go.jp/river/sabo/040726/1.pdf>. 2005年5月1日.
  - 19) 山岸宏光・アヤレウルルセゲド・大谷政敬・加藤晃司：土砂災害の調査法とデータベース化に関する研究－2004年7.13新潟中越地域豪雨による同時多発斜面災害－, 研究助成事業報告書, 日本建設情報総合センター, 2004.
  - 20) Truett, J.J., Cornfield, J. and Kannel, W.B.: A multivariate analysis of the risk of coronary heart disease in Framingham. *J. Chron. Dis.* 20, pp.511-524, 1967.
  - 21) 神谷 泉・黒木貴一・田中耕平：傾斜量図を用いた地形・地質の判読, *情報地質*, Vol. 11, No. 1, pp. 9-22, 2000.

(投稿受理：平成19年5月7日  
訂正稿受理：平成20年1月21日)