

6. GISを用いた熱帯モンスーン域の 土砂崩壊リスク評価

小野 桂介^{1*}・川越 清樹²・風間 聡¹

¹東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

²福島大学大学院共生システム理工学研究科 (〒960-1296福島県福島市金谷川1)

* E-mail: ono@kaigan.civil.tohoku.ac.jp

土砂崩壊の危険度を発生確率により示す方法を提案した。タイの土砂災害リスクマップを基に、地質、起伏量、動水勾配を変数とした多重ロジスティック回帰分析により土砂崩壊発生確率モデルを構築した。発生確率は5km×5kmのメッシュサイズのハザードマップとして地図化された。結果を以下に示す。1)再現期間5年の降雨極値において北部・北西部・中央部山地地域が80%以上の発生確率を示す。2)土砂崩壊発生において起伏量の寄与が動水勾配の寄与より優越する。3)既往のリスクマップにおいて危険度が示されていない東部高原地域において、本研究で作成したリスクマップでは5年確率降雨時に30%程度の発生確率を示す。4)豪雨頻度の増加により南部半島の盆地地域において土砂崩壊リスクの上昇が顕著である。

Key Words : slope hazard, return period, extreme rainfall, probability, risk map

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分布の変化、特に豪雨の発生頻度の増加が指摘されている¹⁾。異常気象と土砂災害の関わりは密接であり、タイにおいて降水変化による土砂崩壊リスクへの影響が懸念される。土砂崩壊リスク軽減に向け、豪雨の頻発を予測して対策を講じる適応策が必要とされる。その適応策の整備には、整備が必要な地域の抽出を可能にするリスク分布情報が有用である。以上を背景に数値地理情報を利用した土砂崩壊リスクのマップ化を試みた。

136名が死亡した土砂崩壊を発生させた平成13年のタイ北部豪雨の事例²⁾に示されるとおり、土砂崩壊は豪雨を主な誘因とする。そこで本研究では、川越らが開発した降雨条件を考慮できる土砂崩壊発生確率モデル³⁾を用いて土砂崩壊リスク評価を試みた。このモデルの特徴は危険の高低を示す従来の評価モデル⁴⁾と異なり、定量的なリスクを導出できることである。リスクの分布図は対策優先度の決定にも利用できる。また、流域や市町村等の数十から数百km²程度の中小規模領域に着目した研究⁵⁾と異なりタイ国全域を対象領域にしている。再現期間における降雨極値を利用することにより、地球温暖化に伴

い豪雨の発生頻度が増加した際の土砂崩壊リスクの変化を理解できる。それにより、地域間のリスクの差異を明らかにし、国家規模の対策優先度を示すことができることも本研究の特徴である。

一方、地盤工学で用いられる土砂崩壊の定量的なリスク指標として安全率がある。安全率は、抵抗力と滑動力の差分から移動土塊の必要抑止力を導くことができるため、対策計画に利用される指標である。しかし、現地調査および土質実験等の解析を通じて土質条件を慎重に議論する必要があり、数値地理情報等を利用した広範囲に対するリスク評価への適応は困難である。そのため、数値地理情報による分布評価によって危険地域を抽出した後、詳細な調査結果を基に安全率を導く解析を行うことが望ましいと考える。

2. データセット

リスク評価に解像度5km×5kmの数値地理情報を用いた。土砂崩壊発生確率モデルに降雨を含む水文データ、地形・地質データ、災害実績データを利用した。これらは解像度5km×5kmの分布により示される。以下に各データを説明する。

(1) 地質・土壌データ

地質データとして地質分布画像⁹⁾を数値化したものを用いた。タイの斜面崩壊に係る地質の研究⁹⁾をふまえ、土砂崩壊が生じる地質は崖錐性堆積物、変成岩、堆積岩、火成岩の4種類に大別した。また、土壌データは植生分布画像⁹⁾から推定された。熱帯雨林・熱帯常緑樹が分布する地域の土壌を砂、熱帯落葉樹が広がる地域の土壌をシルト、それ以外の堆積物からなる地域の土壌を粘土、と推定し3種類に大別し解析に利用した。本研究において、土壌データは動水勾配の算定に利用された。

(2) 地形データ

地形データとして斜面傾斜度および起伏量を土砂崩壊の発生確率モデルに導入した。斜面傾斜度と起伏量は土砂崩壊との関連が強く、かつ、定量的な数値情報として利用できるものである⁹⁾。起伏量は、解像度5km×5kmのグリッドセル内における地形の高低差と定義され、米国地質調査所(USGS)の作成した解像度1km×1kmの標高データであるHYDRO1kの最高標高と最低標高の差から求めた。起伏量が大きい場合、地形発達が発達していることおよび地表浸食の影響が大きいことを示唆する。したがって、土砂崩壊の発生のしやすさを示す。斜面傾斜度は、HYDRO1kの標高データを基に隣り合うメッシュとの標高差から、最も急になる角度を抜き出すことにより求めた。斜面傾斜度は、斜面の安定性を物理的に解析する場合、安定度に大きな影響を及ぼす。ただし、本研究において斜面傾斜度は、動水勾配の算定に用いられた。動水勾配において、斜面傾斜度は浸透流出の速度および地下水の飽和状態の維持に関わる。

(3) 水文データ

水文データとして動水勾配を用いた。動水勾配の上昇は斜面の有効応力の減少を促し、不安定化を助長するため、土砂崩壊の評価に有効なデータである。数値地理情報からグリッドセル毎の擬似的な二次元斜面を再現し、浸透解析を行なうことで動水勾配を求めた。浸透解析には植生分布画像から推定された土壌データ、HYDRO1kから求めた斜面傾斜度データ、再現期間における降雨極値データを利用した。以下に浸透解析方法、再現期間における降雨極値データについて説明する。

a) 浸透解析方法

タイのように、山地地形を成し、森林土壌が発達し、基岩の風化劣化が顕著かつ進行しやすい特徴を有する国土では、地表面の水の移動は概ね不飽和状態で行われる。そのため、不飽和を考慮し、Richardsの飽和不飽和浸透解析モデル⁹⁾を用いて浸透解析を行なった。動水勾配は浸透解析の結果から得られる浸潤線より決定する。浸透

表-1 表層土壌詳細条件

土壌	透水係数 $K_s(m/s)$	飽和体積 含水率 θ_s	残留体積 含水率 θ_r	土壌 特性値 β	(参考) 植生分類
砂質土	1×10^5	0.40	—	3	熱帯雨林、熱帯常緑樹
シルト	1×10^6	0.45	0.05	5	熱帯落葉樹
粘土	1×10^7	0.50	0.10	20	上記以外 (田畑、草原など)

解析式は式(1)から式(3)に示すとおりである。式(1)はRichards式にダルシー則と比水分容量 $C(\psi) = \partial\theta/\partial\psi$ を代入することで導かれる。水頭と体積含水率 θ の係数に式(2)に示す谷式¹⁰⁾、不飽和透水係数 K と透水係数 K_s と体積含水率 θ の係数に式(3)に示す一般Kozeny式¹¹⁾を用いた。地盤工学会の提言¹²⁾に従い、表層土壌は砂質土、シルト、粘土に大別し、土質に応じたパラメータを設定した。表層土壌の詳細を表-1に示す。降雨は日降雨量とし毎分の等分配で浸透する条件とした。

$$C \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \psi}{\partial x} - K_x \sin \alpha \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \psi}{\partial z} - K_z \cos \alpha \right) \quad (1)$$

$$\theta = (\theta_r - \theta_s) \left(\frac{\psi'}{\psi} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\psi'}{\psi} \right) + \theta_s \quad (2)$$

$$K_x = K_{s,x} \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta, K_z = K_{s,z} \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta \quad (3)$$

ここで、 θ :体積含水率、 t :時間、 K :不飽和透水係数、 T :単位時間当たりの蒸発散、 θ_s :飽和体積含水率、 θ_r :残留体積含水率(ψ が非常に小さくなったときの含水率)、 C :比水分容量、 ψ :圧力水頭、 ψ' : $\psi < 0$ のとき ψ かつ $\psi \geq 0$ のとき0、 β :土壌固有の特性値、 K_s :飽和透水係数である。なお、添字の x 、 z は水平、鉛直の方向を示す。

b) 再現期間における降雨極値データ

浸透解析に再現期間における降雨極値データを利用した。このデータは日降雨量である。発生確率モデルに導入するためには再現期間における極値を算出すること、解像度5km×5kmの空間補間データを作成することが必要である。

極値は既往の気象観測所¹³⁾の日降雨極値を頻度解析することにより求められた。頻度解析には確率分布型と母数推定法を採用した。本研究では、観測所に対する降雨極値の頻度解析に、確率分布型として極値分布であるGEV(Generalized Extreme Value)分布、母数推定法としてPWM(Probability Weight Moment)法を用いた。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(4)から式(6)でもとめられる。PWM 法は式(7)から式(10)で示される。GEV 分布による降雨極値は全国各地の観測所190箇所のデータから求められた。なお、本研究では再現期間5年、10年、30年、50年、100年を対象とした。

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[1 - \frac{k(x-c)}{a}\right]^{\frac{1}{k}}\right\} & (k \neq 0) \\ \exp\left\{-\exp\left[-\frac{x-c}{a}\right]\right\} & (k = 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$F(x) = \exp\{-\exp(-s)\} \quad (5)$$

$$s = \begin{cases} -\frac{1}{k} \ln\left[1 - \frac{k(x-c)}{a}\right] & (k \neq 0) \\ \frac{x-c}{a} & (k = 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta_r = E\{X[F(X)]\} = \int_0^1 xF^r dF \quad (7)$$

$$\beta_{r1} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{(j)} \{F(x_{(j)})\}^r \quad (r=0, 1, 2) \quad (8)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = \beta_0 \\ \lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \\ \lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = c + \left(\frac{a}{k}\right) [1 - \Gamma(1+k)] \\ \lambda_2 = \left(\frac{a}{k}\right) (1 - 2^{-k}) \Gamma(1+k) \\ \frac{2\lambda_2}{\lambda_3 + 3\lambda_2} = \frac{1 - 2^{-k}}{1 - 3^{-k}} \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 s :標準変数、 β_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替えたときの小さいほうより j 番目の値、 β_{r1} :標本によるPWMの推定値、 $F(x_{(j)})$: $x_{(j)}$ のプロットティングポディション、 λ_i :L積率、 $\Gamma(\cdot)$:ガンマ関数、 c, a, k は母数パラメータである。

空間補間方法として重回帰式を用いた。頻度解析により求めた再現期間における降雨極値を目的変数、標高および緯度データを説明変数とし回帰分析を行なった。回帰分析によって得られた式(11)を下に示す。

$$R = \beta_{Ele} \times Ele + \beta_{Lat} \times Lat + \beta_0 \quad (11)$$

ここで、 R :再現期間における降雨極値(mm/h)、 Ele :標高(m)、 Lat :緯度(度)、 β_{Ele} :標高の係数、 β_{Lat} :緯度の係数、 β_0 :切片(mm/h)である。また、再現期間5年と100年における降雨極値の分布を図-1、回帰分析により得られた係数および切片を表-2に示す。図-1に示すように、再現期間5年と100年を比べると南部半島地域で200mm、

表-2 重回帰分析の説明変数

再現期間	項目	標高	緯度	切片
5年	係数 β	0.051	-5.569	195.167
	有意確率P値	0.004	0.000	
	標準化回帰係数	0.251	-0.646	
100年	係数 β	0.103	-14.173	436.346
	有意確率P値	0.071	0.000	
	標準化回帰係数	0.167	-0.534	

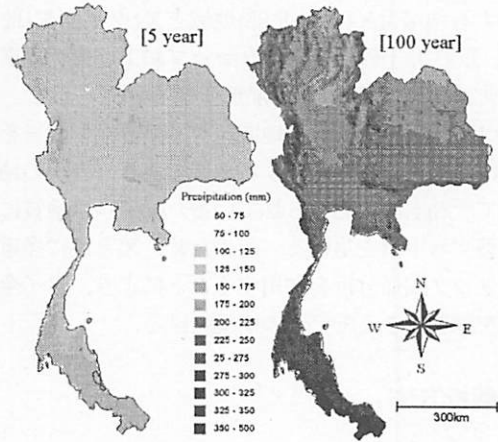


図-1 再現期間における降雨極値分布(左:5年, 右:100年)

その他地域で150mm程度の降雨極値の増加が認められる。

(4) 災害実績データ

多重ロジスティック回帰分析は、ある事象における生起を基に発生確率を導く方法である。そのため、多重ロジスティック回帰分析に基づくモデル構築に向けて、土砂崩壊の有無を示す実績データが必要である。加えて、実績データに利用できる条件として、モデル構築が可能なある程度の数の崩壊実績が必要とされる。しかし、近年になり土砂災害が増加したタイでは、モデル作成に利用できる過去の崩壊実績データは十分に整備されていない状態である。そこで、本研究では、既往の土砂崩壊実績データの代替データとして、タイ土地開発局が作成した土砂災害リスクマップ¹⁴⁾を利用した。このリスクマップは、タイ全土の土砂災害危険度を、High, Middle, Lowの定性的な危険度の指標で示したものである。このリスクマップは地形条件と崩壊実績のみを考慮して作成されており降雨の影響は加味されていないこと、山岳地域を主な対象として作成されていること、という課題をもつ。豪雨に伴い土砂崩壊が頻発する現状を考慮した場合、リスク評価に土砂崩壊の誘因となる降雨を含むべきである。また、被害拡大の懸念される市街地に接する丘陵地も評価の対象にすべきである。この改善点をふまえ、本研究では、タイ土地開発局による土砂崩壊発生の経験的な見解により定性的に作成されたマップに、地質、降雨量と分布情報を付加することで発生確率という定量的な情報のリスクマップの作成を目指した。また、タイ全土に対

する降雨変動に従うリスクマップの作成を目指した。解析では、このマップのHighに該当する地点を、再現期間5年における降雨極値により土砂崩壊する地点と考え、「崩壊有」のデータに反映した。なお、5年確率を採用した理由として、5年周期で土砂災害が頻発する実績²⁾を用いている。この実績によると、タイにおいて土砂災害の集中する地域は X_1 (タイ北部)地域と X_2 (タイ南部)地域である。既往の土砂災害リスクマップおよびモデル構築に用いた X_1 、 X_2 地域の土砂崩壊実績を図-2に示す。タイ北部は変成岩の分布する地域、タイ南部は変成岩を除く多岐にわたる地質の分布する地域であり、各々の地質において土砂崩壊が認められている。モデルは地質に応じて構築する手法を用いる。そのため、 X_1 と X_2 に多重ロジスティック回帰分析を利用することにより、タイ全体の地質を網羅できるモデルの構築を図る。

3. 解析方法

発生確率モデルから土砂崩壊のリスクを導く。以下にモデル構築について説明する。

土砂崩壊発生確率モデルは崩壊実績データ、起伏量、地質、再現期間における降雨極値を含む動水勾配を多重ロジスティック回帰分析に利用することで構築された。土砂崩壊発生セルを1、非発生セルを0とコード化し二項分布に設定する。そのグリッドセル情報をロジスティック曲線で回帰させる。ロジスティック曲線を動水勾配と起伏量を説明変数とする重回帰式で導き発生確率モデルを構築した。モデル式は4つの地質に応じて作成された。モデル式はサンプルエリアを設けて再現期間ごとに構築する。モデル式をタイ全土に適用させ、メッシュ単位の発生確率を明示する。式(12)に土砂崩壊発生確率モデル式、表-3に地質毎のモデル式の係数を示す。

$$P = \frac{1}{1 + \exp[-(\beta_0 + \beta_h \text{hyd}Y_h + \beta_r \text{relief}Y_r)]} \quad (12)$$

ここで、 P :発生確率、 β_0 :切片、 β_h :動水勾配係数、 β_r :起伏量係数、 $\text{hyd}Y_h$:動水勾配、 $\text{relief}Y_r$:起伏量(m)である。土砂崩壊発生に対する寄与率を表す標準化回帰係数に着目すると、変成岩を除く全地質において、起伏量の値が動水勾配の値の2倍以上である。これはタイの土砂崩壊発生において、起伏量が大きな影響を持つことを意味する。対して、川越らの日本を対象とした土砂崩壊発生確率モデル³⁾では、対象とする全ての地質において動水勾配の標準化回帰係数が起伏量のそれを上回っており、日本の土砂崩壊発生においては動水勾配が大きな影響をもつ。この違いは、地質、土壌および崩壊実績データによると考えられ、今後の研究において検討な

表-3 発生確率モデルの説明変数

地質	項目	動水勾配	起伏量	切片
崖錐性堆積物	係数 β	14.79	0.13	-10.26
	有意確率P値	0.78	0.34	0.10
	標準化回帰係数	0.76	1.99	-
変成岩	係数 β	4.63	-0.01	-3.31
	有意確率P値	0.51	0.35	0.00
	標準化回帰係数	0.23	-0.53	-
堆積岩	係数 β	8.99	0.03	-3.92
	有意確率P値	0.02	0.00	0.00
	標準化回帰係数	0.58	1.38	-
火成岩	係数 β	4.68	0.04	-3.60
	有意確率P値	0.01	0.00	0.00
	標準化回帰係数	0.30	0.82	-

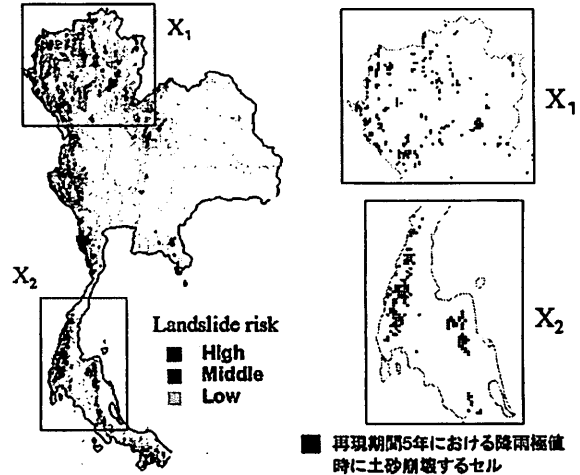


図-2 既往の土砂災害リスクマップと土砂崩壊実績

らびに検証が必要である。また、発生確率モデルの有意確率 P は5%以内が望ましいが、本研究では堆積岩および火成岩のみこの範囲の値である。しかし、タイにおいて起伏が激しく土砂崩壊リスクの高い地域は丘陵地も含めほぼこの2つの地質に位置する。よってこの多重ロジスティック回帰分析の結果を、土砂崩壊リスク評価に適用できると判断する。

4. 土砂崩壊発生確率解析結果および考察

本研究では個別現象ではなく、地域単位で土砂崩壊のリスクの高まる地域の抽出を試みた。モデルのベースとなるタイ土地開発局が作成した土砂災害リスクマップは5km×5kmの解像度で危険度が区別できる精度であったため、解像度5km×5kmで土砂崩壊のリスクを求めた。解析結果の適否や個別現象の集中度に示される解析精度については、現地調査やタイ専門家との議論を交えて結論付ける意向である。

再現期間5年における降雨極値を基に発生確率の時空間的な広がりを考慮する。また、再現期間100年の降雨極値に対する発生確率を検討する。

タイ全土を網羅する5km×5kmのメッシュにおける

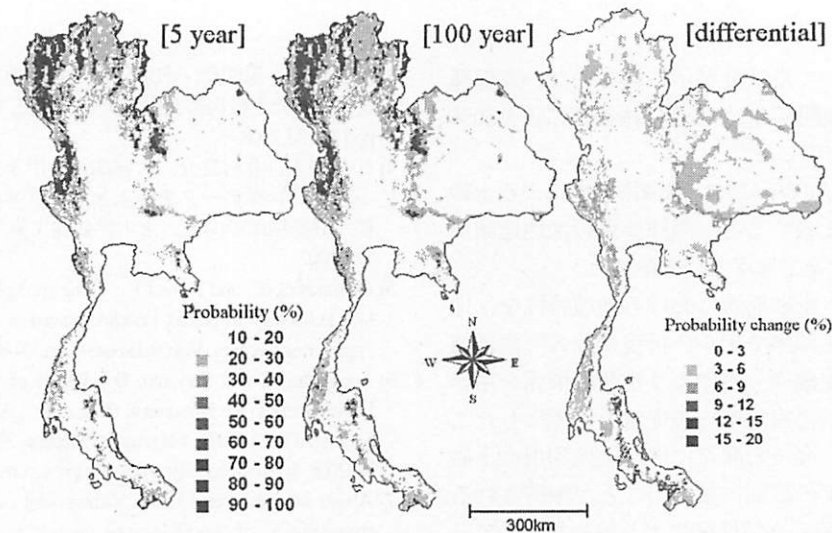


図-3 再現期間における土砂崩壊発生確率分布(左:5年, 中:100年, 右:5年と100年の差)

土砂崩壊発生確率を求めた結果が図-3である。5年確率の場合、北部山地、北西部山地、中央部山地地域は発生確率80%以上を示すタイにおいて最も土砂崩壊リスクの高い地域と評価できる。これらはすべて主要な地質が火成岩であることに加えて、起伏量が大きな地域である。火成岩自体は、相対的に硬質であること、発生確率モデルの結果でもリスクの高まりにくい地質であることから、土砂崩壊リスクが上昇しにくい地質と評価できる。しかしながら、この地域は、タイ国内でも起伏量が大きな地域であるため、地形的な要因が発生確率の上昇を生じさせている。その他の山地および丘陵地の地域については概ね20%以下の発生確率を示す。

再現期間5年における降雨極値による発生確率の分布を巨視的にとらえると、発生確率の高低差が著しく、リスクの高い地域を顕在化させた結果であることが分かる。次に、発生確率と降雨極値を比較する。これら2つの関連性は、発生確率と起伏量と関連性に比べ、比較的薄いことが分かる。これは、多重ロジスティック回帰分析の標準化回帰係数が示すとおり、起伏量が発生確率に大きく寄与することに対し、降雨極値から求める動水勾配と発生確率の相関が低いためである。3章において述べたように、この結果は川越らの日本を対象とした研究の結果と異なる。土砂崩壊において降雨の影響が大きい日本のような造山地帯と、起伏量の影響が大きいタイのような非造山地帯の土砂崩壊特徴により、回帰分析における差異が生じたと考えられる。

タイ土地開発局が作成した土砂災害リスクマップと発生確率を比較する。発生確率が大きい地域と、リスクマップにおいて危険度が示されている地域は、概ね一致する。また、既往のリスクマップにおいて危険度が表示されていない東北部高原地域やその他の一部の地域において発生確率を示すことができた。この地域における5年発生確率は20%から30%と小さいものの、

土砂災害リスクが存在することが明らかにされた。そのため、東北部高原地域の土砂災害対策計画に貢献できる成果となった。

再現期間5年及び100年における降雨極値による土砂崩壊の発生確率を図-3を利用し比較する。発生確率の上昇が10%と顕著な地域は、南部半島地域の盆地地域である。これはこの地域の地質が崖錐性堆積物および堆積岩であることに影響されている。この2つの地質が降雨による動水勾配の上昇に敏感に反応することは表-3の係数 β によって示したとおりである。同様に、堆積岩の地質である東北部高原地域において、5%程度の比較的大きな発生確率の上昇が示されている。つまり、堆積岩の分布域は豪雨による土砂崩壊要注意地域となることが示され、今後、より詳細なリスク評価を要する。一方、火成岩については降雨に比較的に影響されにくい土砂崩壊における性質が係数 β により示されている。これにより、再現期間5年における降雨極値により80%以上の発生確率が示された北部、北西部、中央部山地地域の発生確率の上昇は微動である。

5. おわりに

本研究により、川越らの手法を用いてタイの土砂崩壊発生確率モデルを構築し、土砂災害リスクを明らかにした。得られた結果を以下に示す。

- 1)再現期間5年における降雨極値により、北部山地と北西部山地、中央部山地地域は土砂崩壊発生確率80%を示し、タイにおいて最も土砂崩壊リスクが高い地域である。
- 2)タイの土砂崩壊発生には、動水勾配よりも起伏量が大きく寄与する。
- 3)発生確率が大きい地域と既往のリスクマップにおいて危険度が示された地域は概ね一致するが、既往のリ

スクマップにおいて危険度が示されていない東部高原地域は、再現期間5年における降雨極値により30%程度の発生確率を示した。

- 4) 再現期間5年および100年における降雨極値による土砂崩壊発生確率を比較すると、南部半島の盆地地域が10%程度の顕著な発生確率上昇を示した。

本研究の成果は、土砂崩壊における地域特性を、地質毎の土砂崩壊発生確率モデル、再現期間の降雨極値による土砂崩壊発生確率分布により定量的な情報を用いて明らかにし、土砂災害対策への提言を可能にしたことである。例えば、今後の開発に伴う土地利用や土砂対策における優先度の識別に役立つことが期待される。今後は、1km×1km等の高解像度による解析を通じて、エリアからブロックという社会基盤に身近に関与するものを対象とする意向である。また、タイ同様に熱帯モンスーン気候に属するその他の東南アジアの国において、モデルの適用を目指す予定である。

謝辞：本研究はChaiwat Ekkawatpanit博士(モンクット王工科大学)に現地調査およびデータ提供の援助を受けた。ここに謝意を表します。

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) Charitchai Tanavud : Management of landslide hazard in Thailand, International Conference on Management of Landslide Hazard in the Asian-Pacific Region, pp.109-123, 2008.
- 3) 川越清樹・風間聡・沢本正樹：数値地理情報と降雨データを利用した土砂災害発生モデルの構築, 自然災害科学, Vol.14, pp.175-180, 2008.
- 4) 小島尚人, 北村良介, 大林成行, 伊予田尚志：衛星リモートセンシングデータを導入したシラス自然斜面の崩壊危険箇所評価精度の向上, 土木学会論文集, No.707, VI-55, pp.165-175, 2002.
- 5) 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.
- 6) Supamitra, C and Suryanto, D : Report of Geology and Petroleum Development in the Phitsanulok Basin. In Asia Oceania Geosciences Society(AOGS) 2007 - 4th Annual Meeting, 2007. Retrieved November 30, 2008, from <http://doddys.files.wordpress.com>.
- 7) Apinitti Jotisankasa and Hansa Vathanamukij : Investigation of moisture characteristics of landslide-prone slopes in Thailand, International Conference on Management of Landslide Hazard in the Asian-Pacific Region, pp.383-394, 2008.
- 8) 吉松弘行：山腹崩壊の予測式について, 新砂防, Vol.102, pp.1-9, 1977.
- 9) Richards, L. A, Capillary conduction of liquids through porous mediums, physics, Vol.1, pp.318-333, 1931.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 地盤工学会 土の試験実用書編集委員会：土質試験, 地盤工学会, 2001.
- 13) Thailand Royal Irrigation Department. Retrieved November 30, 2008, from <http://www.rid.go.th/index.php>.
- 14) Thailand Land Development Department. Retrieved November 30, 2008, from http://www.ldd.go.th/web_irw/landslide/images.

(2009. 3. 4 受付)

(2009. 7. 8 受理)

Analysis on the Distribution of Slope Hazard in Thailand Using GIS Data

Keisuke ONO¹, Seiki KAWAGOE², So KAZAMA¹

¹Dept. of Civil Engineering, Tohoku University

²Fuculty of Symbiotic Science Systems, Fukushima University

The probability distribution of slope hazard in Thailand was made by a model developed by multiple logistic regression analysis. Relief energy, hydraulic gradient due to extreme precipitation with a couple of return periods and geological features are used as parameters in this model. The probability distribution is composed by 5 km × 5 km cells that can reflect the risk management of landslide and global changes. Hazard area was extracted according to the probability of quantitative risk. These results are useful to assess prevention measures. In summary, our findings are: 1) Mountain-ringed region in the northern part of Thailand has high risk of slope hazard by extreme precipitation for each return period. 2) Identification of high risk areas could be clarified by the use of extreme precipitation other than only past anamnestic risk map of landslide in Thailand. 3) Relief energy is the more predominant factor of slope failure in Thailand rather than hydraulic gradient. 4) Areas prone to possible changes in terms of the probability of occurrence of extreme rainfall were revealed.