

8. 気候変動によるタイ国の斜面崩壊影響評価

小森 大輔^{1*}・井上 尚達²・小野 桂介³・渡部 哲史⁴・風間 聰⁵

¹東北大学大学院環境科学研究科（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区青葉6-6-06）

²日揮株式会社 シビル建築部（〒220-6001 神奈川県横浜市西区みなとみらい2-3-1）

³建設技術研究株式会社 水システム部（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1）

⁴東京大学大学院工学系研究科（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）

⁵東北大学大学院工学研究科（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区青葉6-6-06）

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

本研究では、10種類のGlobal Climate Models (GCM) による将来降雨予測値から将来降雨極値分布を推定し、多重ロジスティック解析を用いて将来の気候変化によるタイ全域の斜面崩壊発生確率の将来展望を明示した。斜面崩壊発生確率の分布図を比較する事で、タイ全域における斜面崩壊発生確率をシナリオ毎、解析期間毎、再現期間毎に明らかにした。再現期間100年の斜面崩壊発生確率では全域の8割以上が96%以上の斜面崩壊発生確率を示した。

Key Words : Global Climate Models; Landslide hazard map; Return period; Thailand

1. はじめに

近年、地球温暖化に伴う気候変化が指摘されており、豪雨頻度の増加が危惧されている¹⁾。豪雨頻度と斜面災害の関係は密接であり、豪雨時には急傾斜面において斜面崩壊が多く発生し社会的に大きな問題となる²⁾。発展途上国や中進国では、近年の急速な経済発展や人口増加により生活範囲が急拡大しているにも関わらず、未だ社会基盤の未整備な地域が多いため、斜面災害が深刻である⁴⁾。特にモンスーンアジア域では、アジアモンスーンによる多雨から少雨にわたる気候条件より山間部での耕作が可能なため古くから多様な人間活動があり、その傾向は顕著である。このような地域の斜面災害を未然に防ぐためには、定量的な解析による将来の斜面災害リスク分布を明示することが重要である。

過去、様々な評価モデルを用いて斜面災害危険度が評価された。Kawagoeら⁶⁾は、水文条件の変数として再現期間における日最大降雨量（以後、降雨極値と呼ぶ）から導かれる動水勾配、地形条件の変数として起伏量を用い、多重ロジスティック回帰分析を用いて日本全土における斜面崩壊ハザードを明示した。GISの発展および普及により、この手法は汎用性が高く、広域における危険度を推定できる方法とされる。一方、動水勾配の算定のため

に降雨分布が必要であり、特に降雨観測密度の小さい途上国への適用には検証が必要である。またOnoら⁷⁾は、メコン川流域の降雨極値の空間解析を行い⁸⁾、物理過程に基づく数値モデル（SLIPモデル）を用いて、斜面崩壊発生確率を明示した。一方、この手法は崩壊する時と場所を動的に推定できる点で理想的な方法であるが、多種の土質データを必要とするため、広域への適用はまだ検証されていない。

そこで本研究では、斜面災害を未然に防ぐための対策整備の必要な地域を抽出することを目的とし、モンスーンアジア域で比較的各種データが豊富にあるタイを対象に、Onoら⁸⁾に基づき10種類のGCMによる将来降雨予測値から将来降雨極値分布を推定し、Kawagoeら⁶⁾の手法を用いて将来の気候変化によるタイ全域の斜面崩壊発生確率の将来展望を明示した。

2. データセット

(1) 降雨データ

現在気候値として、アジア全域の日降水量グリッドデータ（APHRODITEプロダクト）⁹⁾を利用した。使用したデータは東経60度から150度、南緯15度から北緯60度

表-1 GCM の諸元

開発センター名	モデル名	略名
MIROC	MIROC5	mir5
NOAA GFDL	GFDL-ESM2M	ge2m
CCCma	CanESM2	cae2
CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0	cs36
INM	INM-CM4	inc4
CNRM-CERFACS	CNRM-CM5	cnc5
IPSL-CM5A-LR	IPSL	ip5l
BCC-CSM1.1M	BCC	bclm
MRI-CGCM3	MRI	mrc3
NorESM1-M	NCC	noem

あり、空間解像度は緯度経度0.25度格子である。1987年から2006年（20年間）のデータを利用した。標高補正是Onoら⁸⁾に基づいて行い、線形補間により緯度経度0.05度格子に細分化して使用した。

将来予測値として、10種類のGCMによる出力値を利用した（表-1）。最新の気候変動予測シナリオ（RCP）のうち、は温室効果ガス濃度・放射強制力が最も増加するシナリオであるRCP8.5と、中間を示すRCP4.5を利用した。21世紀再現実験による近未来（2040年から2059年）および遠未来（2080年から2099年）の2期間をデータ解析に使用した。各GCMの解像度は緯度経度0.5度格子である。バイアス補正是Watanabeら¹⁰⁾に基づいて行い、線形補間により緯度経度0.05度格子に細分化して使用した。

② 地形データ

斜面崩壊発生確率モデルの入力値である起伏量と動水勾配は、米国地質調査所（USGS）の作成した標高データであるHYDRO1kから求めた。HYDRO1kの水平解像度は1 km×1 km、鉛直解像度は1 mである。起伏量は、グリッドセル内における地形の高低差と定義し、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、地形発達が活発に進行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し、土砂崩壊の発生のしやすさを示す。動水勾配は、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を用い、浸透解析にて推定した。これら起伏量および斜面傾斜度は緯度経度0.05度格子に変換して利用した。

③ 土壤データ

動水勾配推定のための浸透解析を使う土壤データとして、U.S. Department of Agriculture（USDA）のNatural Resources Conservation Serviceが公開している土壤データを緯度経度0.05度格子に変換して利用した。浸透解析への土壤条件の設定には、各土質に応じたパラメータを設定する必要がある。本研究では、山本¹¹⁾に基づき、土壤をタイの土質の代表的性状である砂質土、シルト、粘土の

3種に分類し、パラメータを設定した。飽和体積含水率とは、飽和状態と判定される土の間隙に含まれる水分の比率である。また、残留体積含水率とは、飽和から不飽和へ遷移したときに最終的に残留する土の間隙に含まれる水分の比率である。土壤水分特性値とは土壤固有の値であり、飽和透水係数と不飽和放水係数の関係を示す経験的なパラメータである。

④ 崩落実績データ

Yumuang¹²⁾が作成した土砂崩壊および堆積の位置情報を使用した。この情報は、水平解像度1 m×1 mのIKONOS衛星画像、水平解像度0.5 m×0.5 mの航空写真、LANDSAT ETM+から求めたNDVI、実地調査により作成された空間解像度25 mの分布データである。本研究では解像度25 m×25 mのデータを30 m、90 m、150 mに粗解像度化して解析に利用した。現地調査から得られた知見に従い、標高800 mを閾値として、上側を崩壊、下側を堆積と判断した⁹⁾。また、斜面勾配15度を閾値として、急勾配側を崩壊、緩勾配側を堆積と判断した。

3. 解析方法

① 頻度解析による降雨極値の推定

本研究の最終的な目標は、降雨の将来予測値から求めた将来の降雨極値を入力データとしてタイの将来の斜面崩壊ハザードを求めることがある。そこで、Onoら⁸⁾に基づき、確率分布型としてGEV、母数推定法としてPMW法を用いた頻度解析により、APHRODITEとGCMの日降雨グリッドデータを基にした頻度解析により推定した再現期間5年および50年の日降雨極値を算定した。

② 浸透解析による動水勾配の推定

動水勾配はHYDRO1kから擬似二次元化した斜面を作成し、浸透解析により求めた。タイのように、山地地形を成し、森林土壤が発達し、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、地表面付近の水の移動は概ね不飽和状態において行われるためRichardsの方程式が有効であることより、浸透解析にはRichardsの二次元不飽和浸透解析モデルを用いた。浸透解析に用いたデータは土壤データ、斜面傾斜度データ、日降雨極値データである。

③ 多重ロジスティック回帰分析

本研究では、ロジスティック回帰分析により導かれた斜面崩壊発生確率モデルから斜面崩壊のハザードを導いた。ロジスティックモデルは斜面崩壊危険度を発生確率

により定量的に明示することができるため、広域を対象とした斜面崩壊研究において用いられる⁶。また、Ohら¹³⁾により2001年ペチャブーン県での斜面災害の解析に用いられており、本研究で用いる統計的手法として適当であると考えた。

2001年ペチャブーン県での斜面災害実績にて、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を設定し、そのグリッドセル情報をロジスティック曲線により回帰した。回帰分析から得られたモデル式を対象領域に適用し、メッシュ単位の発生確率を明示した。Kawagoeら⁹⁾に従い、回帰分析の説明変数は起伏量と動水勾配とした。以下に、斜面崩壊発生確率モデル式Pを示す。

$$P = \frac{1}{1 + \exp[-(a + \beta_h \text{hydro} + \beta_r \text{relief})]} \quad (\text{式1})$$

ここで、 a ：回帰分析における切片 (-17.494)、 β ：回帰分析における回帰係数 ($\beta_h = 1179.25$, $\beta_r = 0.0097$)、 hydro ：動水勾配、 relief ：起伏量 (m) である。回帰分析により、崩壊減少と起伏量、動水勾配の間に有意な関係が認められた（有意確率p値0.02以下）。発生確率に対する寄与度を示す標準化回帰係数は、起伏量において0.51、動水勾配において0.54となり、発生確率において起伏量と動水勾配の寄与は同程度であった。

4. 結果

(1) 豪雨分布の将来展望

図-1に現在気候と比べた場合の近気候と遠未来におけるすべてのGCMの5年降雨極値の変化率のアンサンブル平均を示す（紙面の都合上、各GCMの5年降雨極値の変化率は割愛する）。以下にシナリオ毎の詳細を述べる。

(a) RCP4.5

GCM毎に変化率の分布は異なるが、inc4以外の全てのGCMで変化率の増加が認められた。cae2では、北緯7度から13度の地域で、現在気候に比べ40%程度の豪雨減少が近未来と遠未来で認められた。しかし、それ以外の地域では10%から160%の豪雨の増加が見て取れ、北部や中央部では大きな豪雨の増加傾向を示す。cnc5では、タイ全域で50%以上の豪雨の増加が認められた。cs36では、北緯13度以南以外の地域で豪雨の増加傾向が示され、南部の一部で豪雨の60%以上の減少傾向が示された。近未来から遠未来の変化に伴い、北部で著しい豪雨の増加が認められた。ge2mでは、南部の一部で30%の豪雨の減少が見られたが、それ以外の地域では豪雨の大きな増加傾向は示されなかった。中央部では近未来から遠未来の変

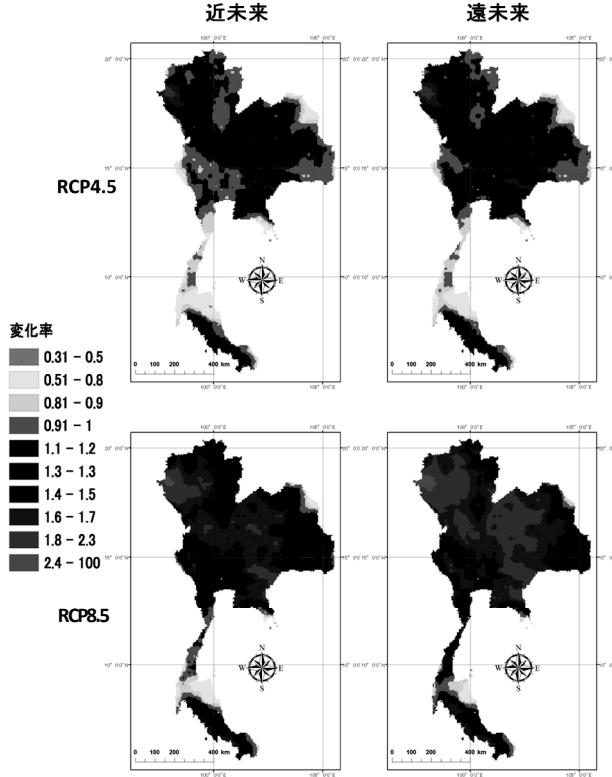


図-1 全てのGCMの5年降雨極値の変化率のアンサンブル平均

化に伴い100%以上の豪雨の増加が確認できた。また、近未来から遠未来にかけて豪雨の増加を示す地域の面積が拡大した。inc4では、GCMの中で唯一タイ全域において、豪雨の減少傾向を示した。全域で45%から87%の豪雨の減少傾向を示した。ipslでは、他のGCMと異なり、南部だけではなく中央部や東部の広い地域で減少傾向が示された。遠未来の北部では60%程度の豪雨の増加傾向を示した。mir5では、中央部で10%から30%の豪雨の増加傾向が確認できる。遠未来の北部では、60%程度の増加傾向を示した。近未来から遠未来への変化に伴い、西部から中央部への豪雨の減少地域の拡大が認められる。mrc3は全てのGCMの中で最も大きな豪雨の変化率を示した。全域で60%以上の豪雨の増加を示し、特に中央部の一部では150%以上の増加率を示す地域が認められた。noemは南部以外の地域では増加傾向を示し、特に北部では150%の増加を示す地域が認められた。南部の一部で60%の減少を示した。

(b) RCP8.5

bc1mは全域で150%以上の豪雨の増加を示した。cae2は北部と中部で90%以上の豪雨の増加傾向を示した。近未来から遠未来の変化に伴い、豪雨も増加傾向を示した。cnc5はタイ全域で80%以上の豪雨の増加を示した。近未来から遠未来への変化に伴い、豪雨の増加が認められた。cs36では、南部の一部の地域で豪雨は60%程度の減少を示した。南部以外の地域では80%程度の豪雨の増加が見

られた。inc4は、ほぼ全域で50%以上の減少を示した。RCP4.5と同じ傾向を示したが、RCP4.5と比べて豪雨の増加傾向が認められた。ge2mは中央部で80%から160%の大きな豪雨の増加を示した。南部の一部の地域で30%の減少を示したが、それ以外の地域では豪雨の増加傾向を示した。ip5lは南部、東部、西部の地域で豪雨の減少傾向を示した。特に東部では50%程度の大きな豪雨の減少を示した。近未来から遠未来の変化に伴い、北部と南部で豪雨の増加が認められた。mir5は中央部と北部で10%から40%の豪雨の増加を示した。北部の一部の地域で80%程度の豪雨の増加を示した。近未来から遠未来の変化に伴い、20%以上の豪雨の減少を示した地域の拡大が認められた。mrc3はタイ全域で100%以上の豪雨の増加を示した。遠未来では近未来に比べてさらに顕著な豪雨の増加を示した。noemは北部の一部の地域で80%以上の大きい豪雨の増加を示した。しかし、南部から中央部にかけて40%程度の豪雨の減少を示した。近未来から遠未来の変化に伴い、豪雨の増加が認められた。

図-1よりRCP8.5では、ほぼ全域で豪雨の50%以上の増加傾向を示した。RCP4.5とRCP8.5共に、南部の同じ地域で30%程度の豪雨の減少が認められた。また、どのGCMでも、豪雨の減少と増加が顕著な地域はほぼ一致していることが図からわかった。

図-2に10種類のGCMにより推定される5年降雨極値のアンサンブルをシナリオ毎に示す。RCP4.5では東部及び南部で200mm以上の降雨量が認められた。RCP8.5では領域の大部分において変化率は1以上の値を示したため、近未来と遠未来では降雨量が増加した。特に、現在気候における降雨量と増加率の大きい北西部、東部および南部においては200mm以上の降雨量が認められた。

(2) モデルの他地域への適用にかかる考察

図-3および図-4に、現在気候における再現期間5年と50年の斜面崩壊発生確率の分布および斜面災害記録を示す。北部のチェンマイ県で発生した斜面災害は示した記録の中で2番目に死者数が多かった。斜面崩壊発生確率は、再現期間5年では認められなかったが、再現期間50年では63%以上の発生確率を示す危険地域であったと認められた。南部のナコンシータマラート県の斜面災害記録では220人の死者数を記録し、最も死者数が多かった。この地域では再現期間5年の斜面崩壊発生確率分布図でも23%から88%の斜面崩壊発生確率を示す地域が存在し、再現期間50年では96%以上の斜面崩壊発生確率を示す危険地域が認められた。南部のクラビ県では死者数3人と上の2つの事例に比べては小規模であったが、再現期間50年の斜面崩壊発生確率分布図では50%程度の斜面崩壊発生確率を示す危険地域として推定された。

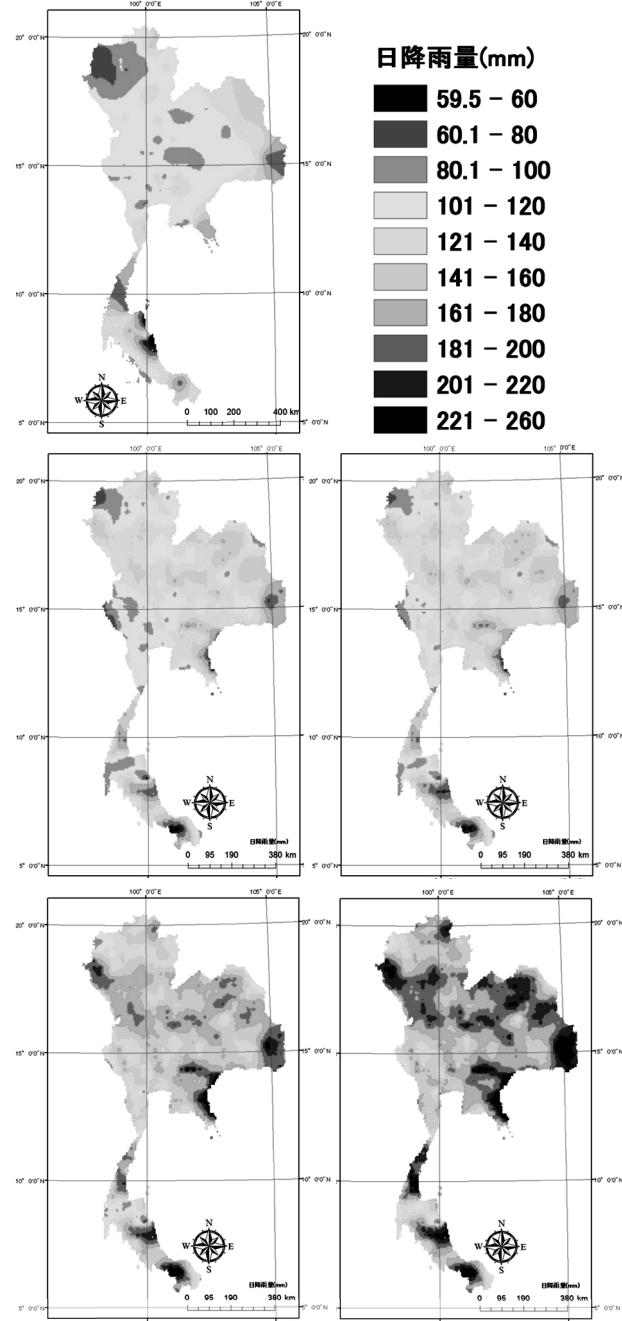


図-2 現在気候（上図）、RCP4.5（中図）、RCP8.5（下図）の再現期間5年の日降雨極値（左：近未来、右：遠未来）

Suttisak¹⁵⁾によるとタイの斜面災害は山地および山地に隣接する地域で生じており、崩壊斜面に隣接する集落が崩壊現象に巻き込まれるケース、もしくは上流において生じた斜面崩壊に起因する土石流により渓谷部や扇状地に位置する集落が被害を受けるケースの2つに分類できる。また、平地部においても斜面災害が発生する場合が確認されたが、大縮尺の地図においては確認できない小地形において発生したケースであり、本研究においては評価できていない箇所もあったことが認められた。

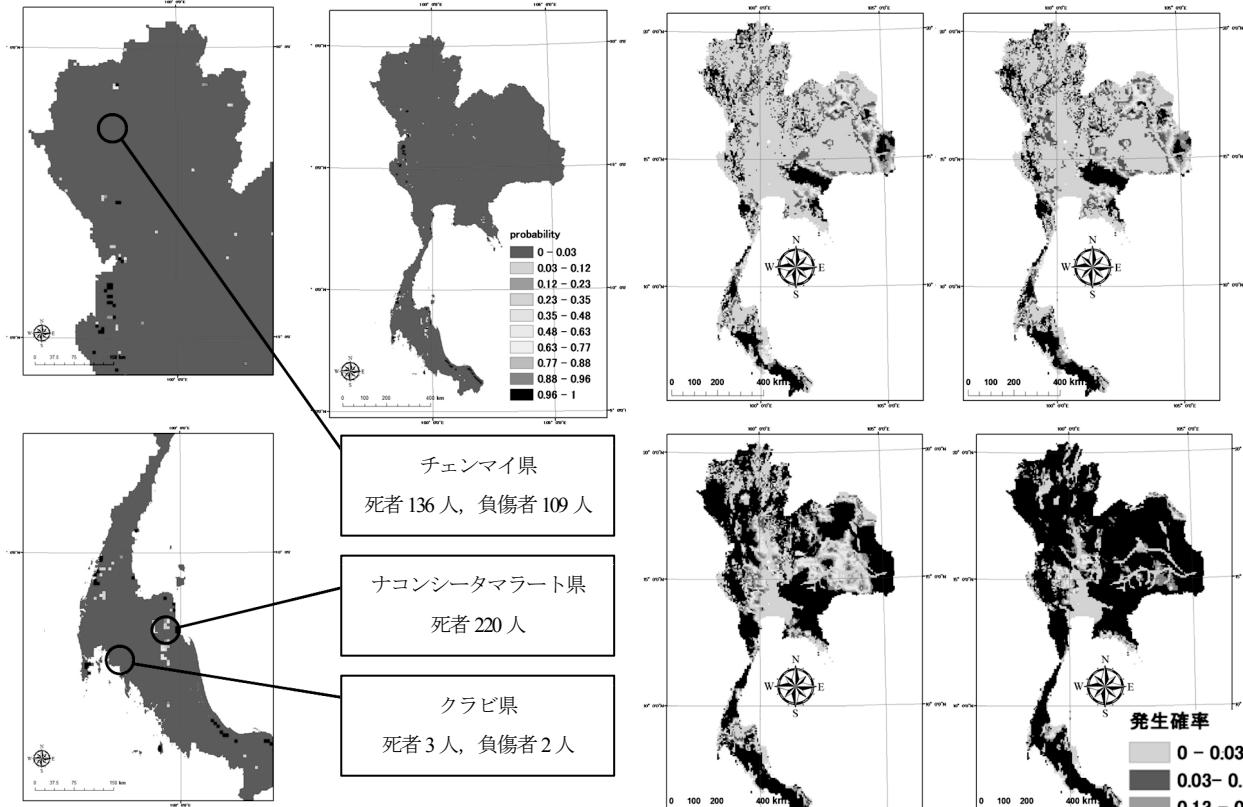


図-3 現在気候における再現期間5年の斜面崩壊発生確率分布と斜面災害歴の比較

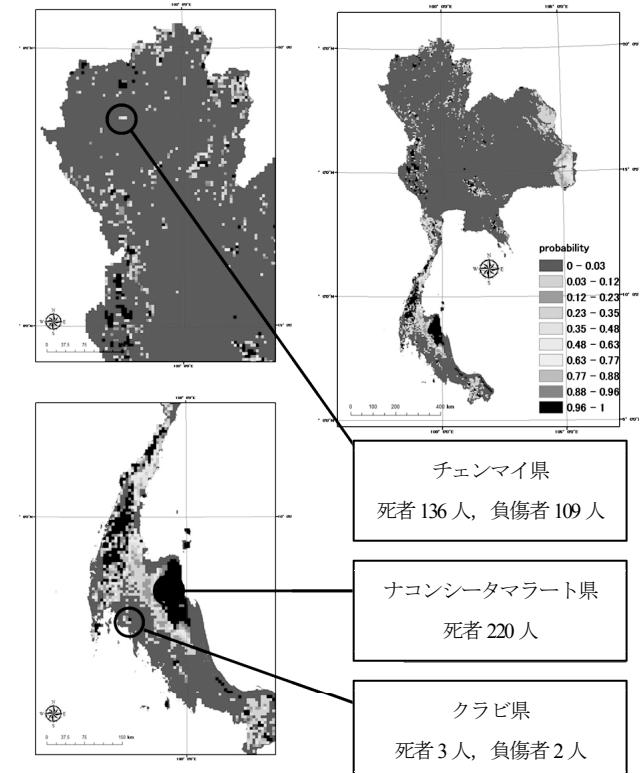
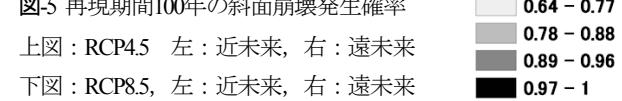


図-4 現在気候における再現期間50年の斜面崩壊発生確率分布と斜面災害歴の比較

(3) 斜面崩壊発生確率の将来展望

図-5に10種類のGCMのアンサンブルにより推定される



再現期間100年の斜面崩壊発生確率を示す（紙面の都合上、再現期間5年および50年の斜面崩壊発生確率は割愛する）。以下にシナリオ毎の結果をまとめると。

(a) RCP4.5

再現期間5年の斜面崩壊発生確率では、現在気候に比べ、近未来、遠未来の両方の期間で斜面崩壊発生確率の増加を示した。特に、北部の地域では20%以上の斜面崩壊発生確率を示すグリッドが出現し、現在気候で70%程度の斜面崩壊発生確率を示していたグリッドが95%以上の斜面崩壊発生確率を示すグリッドに変化した。現在気候で高い斜面崩壊発生確率を示した地域においても周辺で高い斜面崩壊発生確率を示すグリッドが増加した。

再現期間50年の斜面崩壊発生確率では、現在気候で80%以上の斜面崩壊発生確率を示していた、北部と南部のマレー半島中央部でさらに危険な斜面崩壊発生確率を示すグリッドが増加した。また、東部では新たに、20%から90%の斜面崩壊発生確率を示すグリッドが増加した。東南部の海岸から中央部にかけても50%から100%の斜面崩壊発生確率を示すグリッドが増加した。近未来から遠未来にかけては斜面崩壊発生確率の増加が認められた。

再現期間100年の斜面崩壊発生確率(図-5)では、再現期間50年の斜面崩壊発生確率で90%以上を示したグリッドを中心としてさらに90%以上の斜面崩壊発生確率を示すグリッドが増加した。遠未来においてはタイ全土の40%程度が90%以上の斜面崩壊発生確率を示していることが認められた。

(b) RCP8.5

再現期間5年の斜面崩壊発生確率では、現在気候に比べ北部で35%から90%の斜面崩壊発生確率を示すグリッドが増加しており、遠未来においてはその変化がより顕著であった。東南部でも50%から90%を示す斜面崩壊発生確率のグリッドが急増し、近未来から遠未来にかけてタイ全土で斜面崩壊発生確率は増加した。またRCP4.5と比べても危険なグリッドの増加が認められた。

再現期間50年の斜面崩壊発生確率では、RCP4.5で80%以上の斜面崩壊発生確率を示すグリッドを中心としてさらに80%以上の斜面崩壊発生確率を示すグリッドが増加した。遠未来ではその増加はさらに顕著であり、タイ全土の半分以上のエリアで90%以上の斜面崩壊発生確率を示した。一方、バンコクを中心としたエリアでは斜面崩壊発生確率は依然として低く推定された。

再現期間100年の斜面崩壊発生確率(図-5)では、50年の斜面崩壊発生確率に比べ、さらに90%以上の斜面崩壊発生確率を示すグリッドが増加した。遠未来においてはバンコクを含む標高の低い地域以外は90%以上の斜面崩壊発生確率を示した。

6.まとめ

Onoら⁸の手法に基づき10種類のGCMによる将来降雨予測値から将来降雨極値分布を推定し、Kawagoeら⁶の手法を用いて将来の気候変化によるタイ全域の斜面崩壊発生確率の将来展望を明示した。斜面崩壊発生確率の分布図を比較する事で、タイ全域における斜面崩壊発生確率をシナリオ毎、解析期間毎、再現期間毎に明らかにし、斜面災害歴と斜面崩壊発生確率分布図を比較する事で、規模の大きな斜面災害は評価できていることが確認できた。再現期間100年の斜面崩壊発生確率では全域の8割以上が90%以上の斜面崩壊発生確率を示した。

本研究の斜面災害の将来展望手法は他の地域においても広く応用が可能であり、斜面災害対策への貢献が期待できる。特にグローバルスケールの降雨グリッドを用いて行う斜面崩壊の影響手法は、雨量データの観測が難しい地域の斜面災害対策に有用である。今後、土地利用毎に定量的な被害額を算出する事で人々が生活する上で最

優先に対策が必要な地域の抽出が可能であろう。

謝辞：本研究は、地球規模課題対応国際科学技術協力事業「気候変動に対する水分野の適応策立案・実施支援システムの構築」の下で行われたものである。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change: 第5次報告書, 2012.
- 2) Kirschbaum D., Adler R., Adler D., Peters-Lidard C. and Huffman G.: Global Distribution of Extreme Precipitation and High-Impact Landslides in 2010 Relative to Previous Years, *J. Hydrometeorol.*, 13(5), 1536–1551, 2012.
- 3) Petley D.: Global patterns of loss of life from landslides, *Geology*, 40(10), 927–930, 2012.
- 4) Aleotti P. and Chowdhury R.: Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 58(1), 21–44, 1999.
- 5) Dykes A. P.: Weathering-limited rainfall-triggered shallow mass movements in undisturbed steepland tropical rainforest, *Geomorphology*, 46(1-2), 73–93, 2002.
- 6) Kawagoe S., Kazama S., and Sarukkalige P. R.: Probabilistic modelling of rainfall induced landslide hazard assessment, *Hydrolog. Earth Syst. Sci.*, 14, 1047–1061, 2010.
- 7) Ono K., Kazama S., and Chaiwat E.: Assessment of rainfall-induced shallow landslides in Phetchabun and Krabi provinces, Thailand, *Natural Hazards*, 74, 2089–2107, 2014.
- 8) Ono K., Kazama S., Luminda N. G., and Kuraji K.: An investigation of extreme daily rainfall in the Mekong River Basin using a gridded precipitation dataset, Thailand, *Hydrological Research Letters*, 7(3), 66–72, 2013.
- 9) Yatagai A., Kamiguchi K., Arakawa O., Hamada A., Yasutomi N., Kitoh A.: APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1401–1415, 2012.
- 10) Watanabe S., S. Kanae, S. Seto, P. J.-F. Yeh, Y. Hirabayashi, and T. Oki: Intercomparison of bias-correction methods for monthly temperature and precipitation simulated by multiple climate models, *J. Geophys. Res.*, 117, D23114, 2012.
- 11) 山本庄毅: 陸水, 共立出版, 1968.
- 12) Yumuang S.: 2001 debris flow and debris flood in Nam Ko area, Phetchabun province, central Thailand. *Environ Geol.*, 51:545–564, 2006.
- 13) H.-J. Oh, S. Lee, W. Chotikasathien, C. H. Kim, and J. H. Kwon: Predictive Landslide Susceptibility Mapping using Spatial Information in the Pechabun area of Thailand, *Environmental Geology*, 57, 641–651, 2009.
- 14) Suttisak Solalump: Rainfall-Triggered Landslide: from research to mitigation practice in Thailand, *Geotech. Eng. J. SEAGS&AGSSE4*, 41(1), 2010.