

地域評価型斜面崩壊発生確率モデルの解析に向けてのデータセット構築

齋藤 洋介^{1*}・川越清樹²・富樫均³

¹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）

²福島大学共生システム理工学類（〒960-1296福島県福島市金谷川1）

³長野県環境保全研究所（〒381-0075長野市北郷2054-120）

* E-mail: s1770021@ipc.fukushima-u.ac.jp

本研究は、降雨によって引き起こされる斜面崩壊に着目し、斜面崩壊発生確率モデルを用いた地域リスク情報の開発を行った。斜面崩壊発生確率と土砂災害警戒区域を重ね合わせることで、地域に対する具体的な対策を立案できるリスク情報の開発を試みた。結果として、長野県の土砂災害警戒区域内において、降雨量によって変化する動的な斜面崩壊発生確率マップが構築され、地域のリスク情報が強化された。また、将来気候モデルアウトプットを用いて、RCPシナリオごとに降雨可能最大降雨量の推定を試みた。今後は、複数の気候モデルで可能最大降雨量を求め、将来気候における斜面崩壊発生確率のポテンシャルを見積もる意向である。

Key Words : *climate change, slope failure, sediment disaster caution zone, multiple logistic regression*

1. はじめに

土砂災害は短時間で多くの人命を奪い、建物や社会インフラなどに大きな影響を与える現象である。特に、降雨が誘因となって発生する斜面崩壊は、崩壊後に土石流に変化し、川の下流へ一気に流れ出す可能性も含む死傷リスクの高い現象である。平成29年の土砂災害発生件数は1,514件と平成19年から平成28年までの過去10年間で最も多い件数となった¹⁾。特に、平成29年の九州北部豪雨災害では、24時間降水量が朝倉市で545.5mmを記録した。この豪雨により、福岡県、大分県では計275件の土砂災害が発生し、死者・行方不明者は計23名に上った。こうした現状に加え、地球温暖化の影響により、降水の極端化が進行し、現在から将来的に降雨量の増大、豪雨頻度の増加、無降雨期間の長期化が推計されている。国連気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)の特別報告書²⁾によると、特に中緯度の陸域の大部分と湿潤な熱帯域において、極端な降水がより強く、より頻繁となる可能性が非常に高いと予測されている。これ

らのことから今後、降雨によって引き起こされる土砂災害の発生頻度の増加が見込まれ、一層の対策強化、および気候変動を意識したハード・ソフト対策が必要不可欠となる。2001年には土砂災害防止法が施行され、全国でソフト対策強化に向けた土砂災害警戒(特別警戒)区域を指定するための基礎調査が行われている。しかし、この指定は一定の地形条件という素因にのみ着目して施されている。具体的なハード対策や避難計画、防災訓練などの対策を講じるためには、素因だけではなく、土砂災害を引き起こすきっかけとなる誘因も調査・評価対象にすることが望ましい。そこで、本研究では、降雨が誘因となる斜面崩壊リスク評価を行った。

土砂災害の危険度評価に関する研究事例として、Ohlmacher³⁾らは、アメリカのカンザス州北東部において、地形と地質に着目し、統計的な解析手法による発生確率を用いた土砂災害評価モデルを開発した。また、川越ら⁴⁾はこのモデルを基に、水文量として降雨量を導入して、誘因の影響が考慮された動的な土砂災害発生確率モデルを開発した。このモデルを用い気候モデルを用いて日本の将来の土砂災害によ

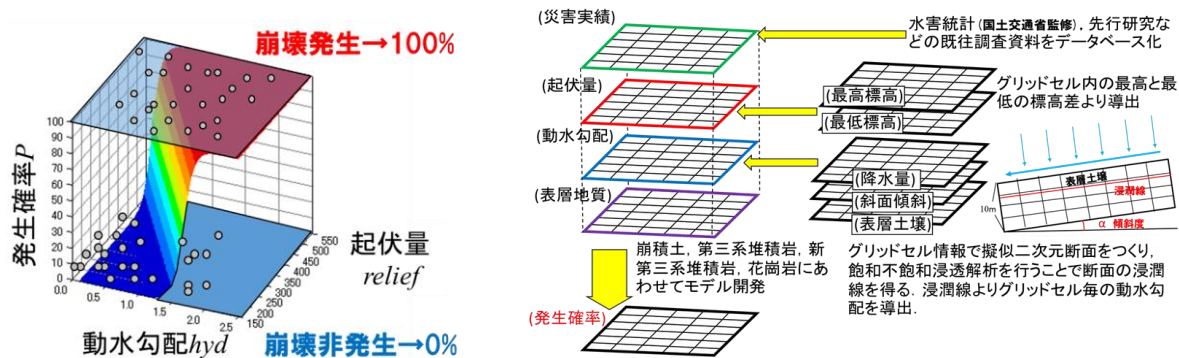


図1 斜面崩壊発生確率モデルの構造イメージ

ってもたらされる被害額を推計し、危険度を評価した。また、齋藤ら⁵⁾は、川越らのモデルを対象地質項目の細分化、空間解像度の高解像度化を行い、地域スケールに適用できるように改良を行った。

本研究では、齋藤らの研究結果を基に、土砂災害警戒区域の斜面崩壊発生確率を求めることで、社会で運用されている地域スケールでのリスク情報の強化を行った。更に、将来気候モデルアウトプットを用いて、将来の可能最大降水量(PMP)の試算を行った。PMPを用いて、将来気候での斜面崩壊発生確率を求め、気候変動による影響を評価する予定である。

2. 対象領域

川越らの土砂災害崩壊発生確率モデルでは日本列島全域を対象としていたが、本研究では、齋藤らが改良した長野県を対象とした地域レベルへ適用できるモデルを使用している。従って、対象領域として、長野県のデータを設定し、リスク情報の強化、将来の評価情報整備を進めた。長野県は中央部を南北方向に糸魚川静岡構造線が縦断しており、東西には中央構造線、更にはフォッサマグナも分布していることから、複雑かつ脆弱な地質が多く分布している。また、地形面積の8割以上が山地であることから、斜面が多数存在しており、降雨が誘因となる斜面崩壊が起こりやすい地域と解釈できる。山岳地に社会が形成され、人口も多く分布していることから、土砂災害発生件数が多くなる可能性を含んだ地域評価においてサンプルになるエリアである。

3. 斜面崩壊発生確率モデル

斜面崩壊発生確率モデルは、過去の災害履歴を用いて、地形・地質条件、水文量から、斜面崩壊の起こりやすさを確率で表すことが可能なモデルである。構造としては、x軸に動水勾配、y軸に起伏量、z軸

に災害履歴をもとにした崩壊の有無(崩壊有：1、崩壊無：0)をとり、多重ロジスティック重回帰分析を行った。これは、災害実績の有無を「1」と「0」に二項分布させ、これをロジスティック曲線で連結し、

$$P = \frac{1}{1 + \exp[-(\alpha + \beta_h x_h + \beta_r x_r)]} \quad (1)$$

重回帰式で解くことでモデル式が導かれる(図1)。式(1)に斜面崩壊発生確率モデル式を示す。

ここで、 P ：崩壊発生確率、 β_0 ：動水勾配係数、 β_h ：起伏量係数、 $hydY_h$ ：動水勾配、 $reliefY_r$ ：起伏量である。起伏量は最高標高と最低標高の差である。動水勾配は、斜面傾斜度と表層土壌データから擬似二次元断面を作成し、不飽和浸透解析を行うことで得られた。これらを用いて地質ごとにモデル式が作成された。データセットは、降雨量にレーダーアメダス解析雨量を用いている。対象イベントは2004年の台風23号を用い、イベント内でも降水量の多かった10月23日の日降水量を使用した。起伏量、斜面傾斜度、表層土壌、土砂災害警戒区域は国土数値情報を、表層地質は長野県デジタル地質図2015を使用した。

4. 研究方法

(1) 斜面崩壊発生確率マップと土砂災害警戒区域の重ね合わせ

土砂災害警戒区域とは、土砂災害によって住民に被害が及ぶ地域を表している。全国で整備済み、または整備中であり、基礎調査を基に指定されている。警戒区域の指定基準は以下の通りである。

- ・傾斜度30度以上かつ高さ5m以上の区域
- ・急傾斜地の上端から水平距離が10m以内の区域
- ・急傾斜地の下端から高さの2倍以内の区域

また、土砂災害警戒区域のうち、建築物に損壊が生じ、住民に著しい危害が生じる恐れがある区域を土砂災害特別警戒区域に指定し、更に開発行為の規制、建築物の規制、建築物の移転勧告が行われる。

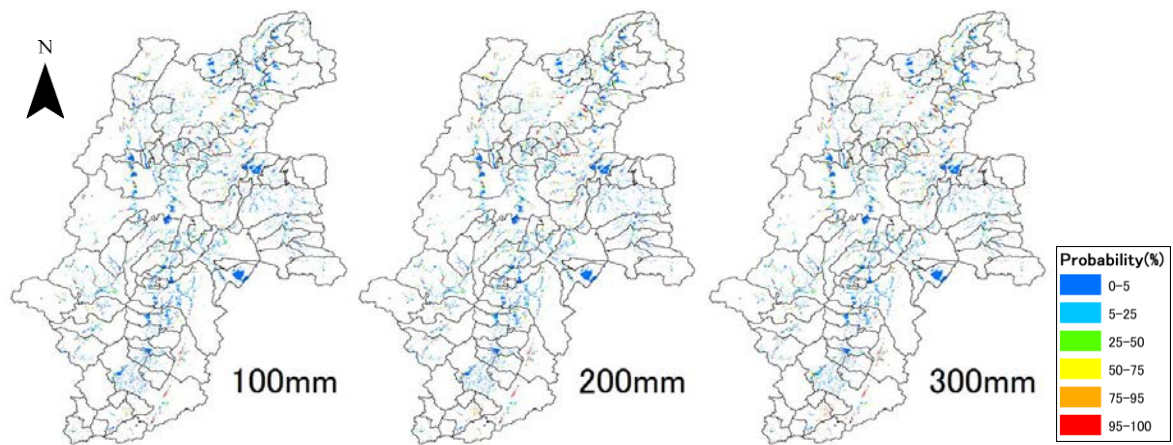


図2 日降雨量ごとの長野県土砂災害警戒区域における斜面崩壊発生確率

国土交通省の報告によると、現在、長野県では土砂災害警戒区域が26,950箇所、特別警戒区域は21,322箇所になる。この数量は全国の都道府県でも上位であり、危険斜面が多い地域特徴を示している。しかし、この指定は地形条件でのみ判定しているため、降雨や地震が起きた場合、実際に崩壊しやすい斜面であるかは定かではない。本研究では、このような社会で実装されている情報を強化し、具体的な対策を計画立案できるツールとすることを目的としている。方法として、GIS上で作成した斜面崩壊発生確率マップと土砂災害警戒区域を重ね合わせ、降雨量を変化させて警戒区域における斜面崩壊発生確率の降雨感度分析を行った。更に、長野県内でも多くの土砂災害が発生した2004年10月23日の台風23号の降雨イベントを用いて、発生確率を導出した。その結果から、発生確率を0%から100%までを5%ごとに区切り度数分布表を作成することで、考察を行った。

(2) 現地踏査

齋藤らの挙げた課題として、過去の災害履歴を用いて構築したモデルで求めた発生確率がどの程度の精度であるのかという不確実性の検証が必要であった。本研究では、不確実性に対するアプローチとして現地踏査を実施した。なお、現地踏査を行うにあたり、長野県および長野県環境保全研究所の協力のもと、長野県の中で代表地域として長野市および小川村を選定し、既存資料を基に土砂災害警戒区域内における現地踏査を実施した。それに合わせて、長野市および小川村における警戒区域の発生確率マップを作成した。現地踏査を行うことで斜面の現状を把握し、斜面崩壊発生確率の高低や対策工の有無などを比較・確認を行った。

(3) Clausius-Clapeyron式による将来気候における可能最大降水量(PMP)の推定

気候変動によって起こる降水の極端化での豪雨頻度の増加を考える場合、空気中の気温と水蒸気量の関係性を表したClausius-Clapeyron式(以下C-C式)がある。気温の上昇に伴って大気中の飽和水蒸気圧は、指数関数的に増加し、気液平衡である場合、その増加率は約 $7\%/^{\circ}\text{C}^{-1}$ であることに基づいたプロセスに基づき式化、および定量化されている。なお、渡辺ら⁶⁾は、日本国内でも多くの観測データの極端降水頻度の変化率が $7\%/^{\circ}\text{C}^{-1}$ に類似することを明らかにした。また、内海ら⁷⁾は、日本を含むアジア圏において、降雨量の99パーセンタイル値の極端降水がC-C式から推定された水蒸気量変化率と類似することが明らかにしている。

本研究においては、長野県内AMeDAS観測における1986年から2015年の30年分の気温と降雨量データを用いて、日降雨量の気温ビン毎に降雨量99パーセンタイル値を抽出した。これを基にC-C式を作成することで降雨量(水蒸気量)の変化率を求めた。また、C-C式の理論値である $7\%/^{\circ}\text{C}^{-1}$ と比較をした。また、求められたC-C式を用いて、可能最大降水量(PMP: Probability Maximum Precipitation)の推定を行った。なお、C-C曲線からPMP計算にあたり、用いた式は以下の通り。

$$PMP = a \cdot \exp(b \cdot t) \quad (2)$$

ここで、 a 、 b : 係数、 t : 気温である。この式に将来気候モデルアウトプットデータを入力することで、現在気候と将来気候における最大可能降水量を推定した。今回、用いた気候モデルは、MIROC5の2050年と2070年における各RCPシナリオ9月分のデータである。ここから、現在気候と将来気候のPMP変化について分析を行った。

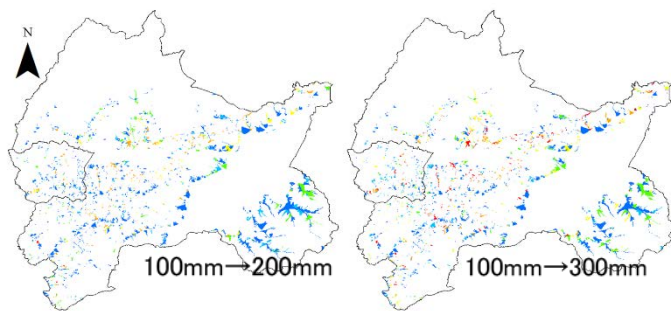


図3 土砂災害警戒区域の斜面崩壊発生確率差

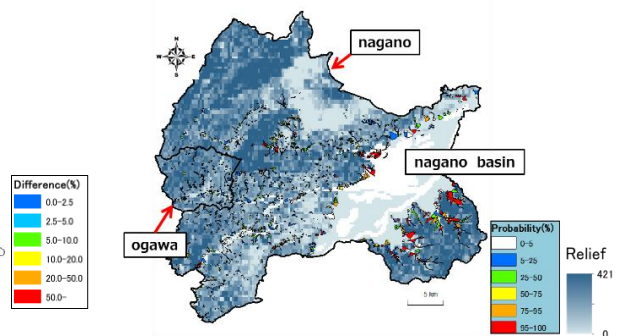


図4 2004年10月23日の降雨量を用いた発生確率

表1 現地踏査結果一覧表(一部抜粋)

	①警戒区域内の最大確率 K25588096 沢沢	②現地踏査の最大確率 K25589091 田越	③警戒区域内の最小確率 K25589075 百瀬	④現地踏査の最小確率 K25589076 城下1
発生確率(%)	99.84	70.39	0.00	0.41
日降雨量(mm)	225.62	233.67	225.42	227.29
起伏量	124.60	117.90	124.6	60.10
地形地質状況等	尾根状地形を呈する右翼斜面で南向きの単一斜面。下端部は急斜面が明瞭。下端延長50m。スズ主体の針葉樹が優勢。粘土・砂質土が混在。	左端の尾根地形と右端の沢状地形に挟まれた平面形状で凹状。下端延長263m。針葉広葉樹の混在林。粘土、砂質土、硬質土混在。	南向き斜面。下端延長76m。上端上方は緩傾斜の山林。下端下方は平坦地に集落及び農地。雑木林で下草が密生。硬質土・砂質土等が混在。	西向き斜面。下端延長336m。斜面左側はスズおよび雑木林。右端は侵食による露岩。硬質土・砂質土混在。
対策施設等状況	なし	一部、豊地の土留工としてブロック積擁壁があるが、充分な侵入力が不十分。施設効果は見えない。	なし	①(土留、井桁ブロック擁壁工。延長、高さ、施設効果有無、備考)

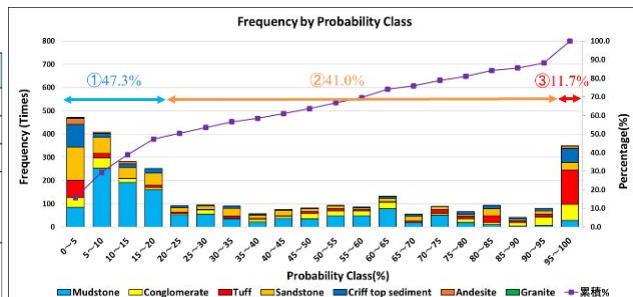


図5 斜面崩壊発生確率の度数分布表

5. 結果と考察

(1) 斜面崩壊発生確率マップと土砂災害警戒区域の重ね合わせ結果

斜面崩壊発生確率と土砂災害警戒区域の重ね合わせ結果を図2～図4に示す。図2より、長野県全体で見ると、いずれの降雨量の場合でも広域の警戒区域が低確率であることが分かる。これは、警戒区域に危険でない斜面が含まれている可能性が示唆される。従って、現地調査や航空写真などの目視による確認が必要である。図3より、降雨量が100mmから200mmよりも100mmから300mmに増加した場合の方が、確率が急激に上昇する結果が得られた。図4では長野市および小川村を例に、2004年の台風23号による降雨イベントを用いて発生確率を計算した。比較的、警戒区域は小起伏から中起伏にかけて存在していることが明らかとなった。また、長野市東側には長野盆地が広がっており、山地と盆地の境界部分に大規模かつ高確率な警戒区域が多く存在していることが判明した。発生確率の高低の基準を設定するために、長野市および小川村における斜面崩壊発生確率の度数分布表を作成した(図5)。ここから、発生確率20%と95%で頻度に大きな差が見られたので、発生確率の高低境界として発生確率を低確率(0～20%)、中確率(20～95%)、高確率(95～100%)の3段階に分類した。これにより、災害対策を行う上で重要となる優先度を導きやすい情報が整備された。

(2) 現地踏査結果

既存資料と現地踏査結果(一部抜粋)をまとめたものを表1に示す。①、③は長野市・小川村の警戒区域にける最大最小確率の地点であり、②、④は踏査を行ったなかでの最大最小確率の地点である。②のように、対策工があり、発生確率が高い斜面では、対策工の老朽化、個人による簡易な対策などが見られたため、早急な対応が必要であることが判明した。また、①と③では日降雨量、起伏量ともにほぼ同値だが、確率が大きく異なっている。原因としては、地質の違い、またはモデルの不備などが考えられるため、今後原因を明らかにしていく必要がある。

今回、モデルの不確実性の検証として実施したが、対策施設の老朽化や住民による私的な対策が多く見られ、効果を期待できない対策も見受けられた。住民からの聞き取りを実施したところ、過去の土砂災害の経験から私的な対策を設置したという回答が得られた。私的な対策がなされていることから、住民の斜面崩壊に対する危機意識がみられた。土砂災害警戒区域指定のために行った基礎調査資料や現場の状況等を踏まえ、対策工の点検や対策の強化を行う必要があると考えられる。その際に、本研究のような発生確率を用いることで、点検や対策の優先度を見積もることが期待できる。

(3) Clausius-Clapeyron式による将来気候における可能最大降水量の推定結果

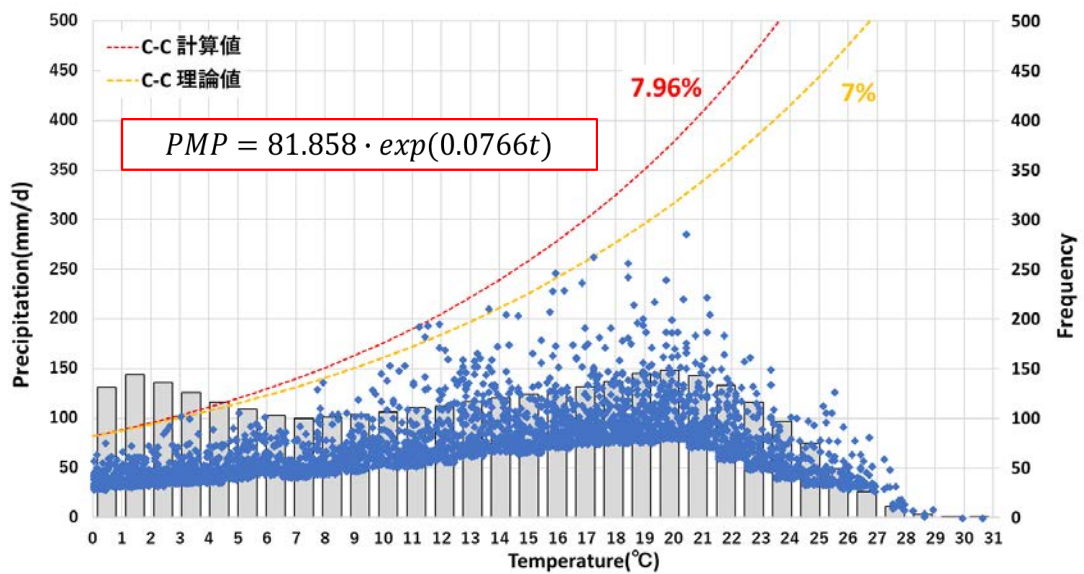


図6 Clausius-Clapeyron 式における気温と降水量の関係

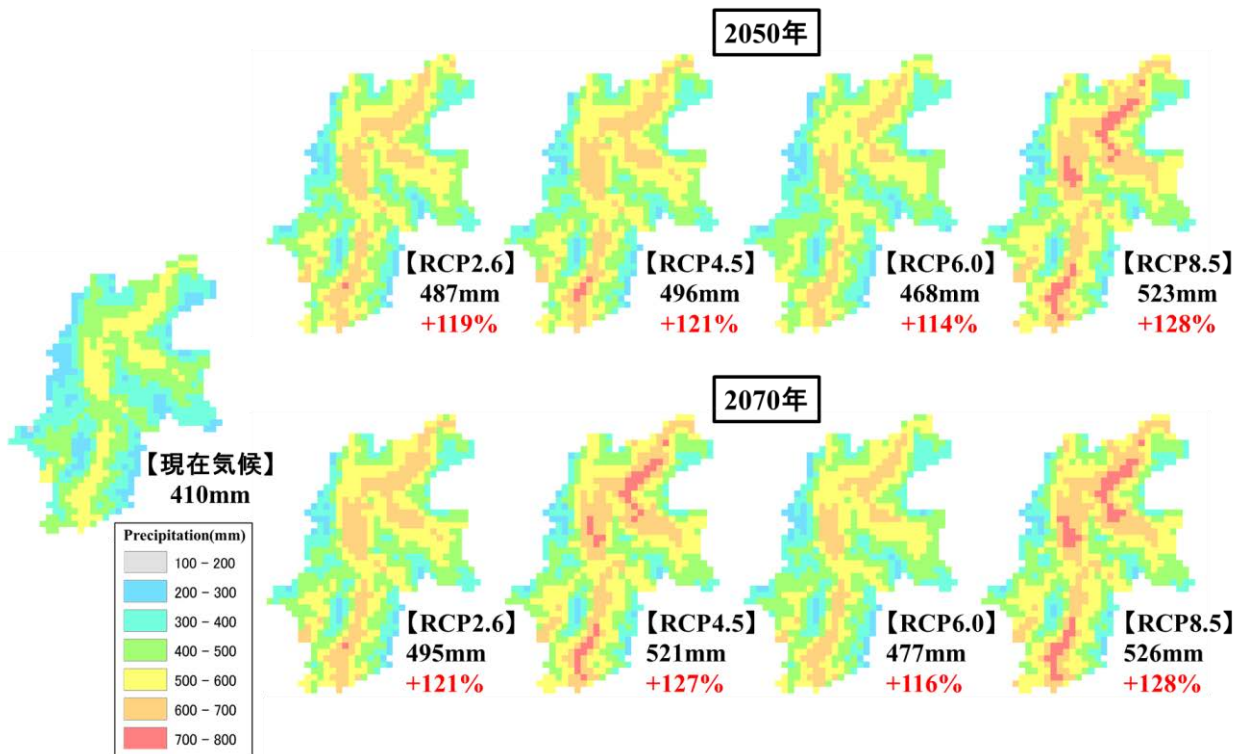


図7 気候モデル MIROC5 を用いた可能最大降水量の試算

長野県の過去30年分の観測値から作成したC-C式を基に気温と日降水量の関係を表したグラフを図6に示す。C-C式の理論値である $7\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ に対し、計算結果は $7.96\%^{\circ}\text{C}^{-1}$ と比較的近い値を示し、渡辺らと同様の結果が得られた。C-C式から求めた(2)式の傾き a および切片 b を用いたPMP推定式は以下の通り。

$$PMP = 81.858 \cdot \exp(0.0766t) \quad (3)$$

次に、この式の気温として、気候モデルMIROC5の2050年9月、2070年9月のRCPシナリオごとのアウトプットデータを代入し、長野県における2050年、2070年のRCPシナリオごとのPMP推定結果を図7に

示す。現在気候と比較して2050年は120.5%、2070年は123%増加する結果となった。2050年から2070年にかけては2.5%と微増である結果が得られた。RCPシナリオ別に見てみると、RCPシナリオが進むにつれて、PMPは増加していくが、RCP6.0では他の計算結果より低い値となった。しかし、降雨量が現在よりも約2割増加することで、斜面崩壊をはじめとする土砂災害発生件数が今以上に増加することは明らかである。将来的に降雨量の増加が見込まれていることから、予測結果を考慮した災害対策を講じていくことが必要である。

6. 結論

斜面崩壊発生確率モデルを用いて作成した斜面崩壊発生確率マップと、土砂災害警戒区域を重ね合わせることで、災害対策の優先度やその計画に利用できるといった、社会で運用されている情報の強化を図ることが可能となった。また、現地踏査によって対策工の老朽化や、住民による斜面对策が行われている現況を踏まえ、対策の優先度を定めるに当たり、発生確率だけの判断ではなく、危険箇所の状態を記録した既存資料や人口、想定被害額などを複合的に考慮していく必要がある。従って、当モデルのみの評価ではなく、評価指標の1つとして扱うのが望ましい。また、本研究では気候変動の影響を見積もるために、気候モデルアウトプットを用いて可能最大降水量の試算を行った。結果として、現在気候よりも極端降雨による記録的な豪雨が発生すると推計されたことから、より一層の土砂災害対策を施していく必要性が示唆された。ただし、本研究では1つの気候モデルの一部のみを用いて行った推計であるため、今後は複数の気候モデルを用いて同様の試算を行い、最終的な目標として、気候モデルアウトプットを用いた、将来機構における斜面崩壊発生確率を推定していく意向である。

謝辞：本研究は、気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)の支援により実施された。また、本研究を進めるにあたり、長野県および長野県環境保全研究所の支援も受けた。ここに謝辞を示す。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 29 年土砂災害
<http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h29dosha/H29dosysaigai.pdf>
- 2) Intergovernmental Panel on Climate Change:Climate Change,2014:ScientificBasis,Summaryfor Policymakers.WGI AR5 report,2013
- 3) 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.
- 4) 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹：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, 自然災害科学, 27-1, pp.69-83, 2008.
- 5) 齋藤洋介, Thuy Thi Thanh LE, 川越清樹：地域への汎用性をふまえた斜面崩壊発生確率のモデルアウトプットの開発, 土木学会論文集 G(環境), Vol.73, no.5, I_229-I_237, 2017.
- 6) 渡辺春樹, 吉川沙耶花, 瀬戸里枝, 鼎信次郎：日本における極端降水頻度の変化率とClausius-Clapeyron式との関係, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, I_145-I_150, 2018.
- 7) 内海信幸, 瀬戸心太, 鼎信次郎, 沖大幹：気候変動に伴う豪雨変化の要因分析における大気湿潤度の考慮, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, I_421-I_426,2012