地域への適用性をふまえた斜面崩壊発生確率のモデルとアウトプットの開発

齋藤 洋介¹・Thuy Thi Thanh LE¹・川越 清樹²

¹学生会員 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正会員 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)

E-mail: kawagoe@sss.fukushima-u.ac.jp

本研究は、地域のニーズに応じた気候変動に対する適応策の誘導に利用できる土砂災害リスク情報のアウトプットの開発を試みたものである。リスク情報のアウトプットの開発は、山岳地域で多くの社会開発のなされている長野県を対象に取り組んだ。アウトプットの基盤となる解析を進めるため、従来開発された斜面崩壊発生確率を高度化(空間解像度、地質情報)したモデルを改良した。このモデルより求められた斜面崩壊発生確率を土砂災害警戒区域(特別警戒区域を含む)と重複させ、地域への適応策の実装化に向けた土砂災害リスク情報のアウトプットの開発を試みた。結果として、長野県の土砂災害警戒区域の降雨量変化に応じた発生確率マップが整備された。また、指定区域毎に降雨量の変化に応じた斜面崩壊発生確率の応答図を求めた。これら成果の開発より地域適用性の高い適応策誘導ツールの体系化が図られた。

Key Words : *Climate change, rainfall condition, slope failure risk and sediment disaster caution zone*

1. はじめに

気候システムの温暖化に起因した中緯度の湿潤帯における降雨量の増大、豪雨頻度の増加が推計され¹⁾、該当する領域の水・土砂災害の将来への動向に関心が寄せられている。これに対し、安全安心な生活の実現を図るため、数値気候モデルのアウトプットを利用した様々な災害予測研究が進められ^{2,3)}、温暖化に対する災害対策の必要性を示唆する結果も得られている。IPCC 第5次報告書では、「緩和策と適応策は気候変動への対処に役立ちうるが、単一の選択肢だけでは十分ではなく、双方と他の社会的目標を組み合わせる統合的対応をとる必要がある事」が記載され⁴⁾、パリ協定では、適応の長期目標の設定、および各国の適応計画プロセスと行動の実施が明記された。日本でも2015年に気候変動の影響への適応計画が閣議決定された。これらの背景より、気候変動に対する適応策も加速すると推測される。しかしながら、災害の防止、軽減のために現行まで整備されてきたインフラ計画や設計基準との比較、財政の予算投資、温暖化に起因した自然現象に最前線に対応することを余儀なくされる地方自治体の適応能力など議論しなければならない様々な課題が残されている。多岐にわたる防災上の適応策の課題の中で、今後、地域に応えることのできる気候影響のアウトプットを開発して自治体へ提供し、防災活

動を強化するアプローチも強化しなければならない。以上の課題を踏まえ、本論では、斜面崩壊に焦点を当て、自治体という地域のカテゴリーでも適用できる気候変動の評価モデル、および適応策計画に資することのできるアウトプットの開発を意識した研究を展開した。

斜面崩壊に対する地域空間の評価に関しては、従来より地形発達、地質分布に主眼においた調査、判読、観察より危険領域の抽出と危険度の導出が進められてきた⁵⁾。また、2001年より施行された土砂災害防止法よりソフト対策を重点化するために設定されている土砂災害警戒区域・特別警戒区域の基礎調査も素因となる地形、地質を重視している。しかしながら、これらは斜面崩壊の素因に特化した評価である。避難等の危機回避行動につながる防災活動も含めた強化を進めるのであれば、動的なリスク変化に連動できる誘因も評価条件に加える必要がある。これに対応して、降雨や水文量の条件も含めた斜面崩壊の危険度評価手法の研究も進められている。Chen *et al*による限界土中水分量に応じた崩壊指標⁶⁾等の斜面上の動的な水文量変化に応じた解析等、様々なアプローチで研究が展開されている。これらの研究で直接的な斜面の安定性関連付けたリスク値が示され、現在も依然として活用されているものが沖村ら⁷⁾による無限長斜面安定解析と地下水の集水性をあわせた物理的な斜面へのプロセスの解析である。この研究をベースにした成果は、崩

壊発生時刻を予測するレベルまでの展開が図られている⁷⁸⁾。ただし、これらの解析は、単位堆積重量、粘着力、内部摩擦角に示される土質定数のデータ値を必要とする。地質変化の少ない限定された地域を対象にするリスク評価に対して優位な解析手法である一方で、自治体という都道府県等のある程度の広範領域となる評価と適用には、慎重な検討とデータ集積を必要とする。これに対して、数値地理情報を駆使し、崩壊の実績に応じた最小限の諸条件の情報も加えながら比較的広範囲を統計的な要素も含めて解析するアプローチの研究も進められている。

Kawagoe et al は、日本列島全域を対象に斜面崩壊の誘因となる降雨に伴う水文量も含めた発生確率モデルを開発し⁹⁾、広範囲に対しての地形、地質、水文量の条件を含めたリスク評価を行った。また、このリスク評価は、気象変化、気候変動に従う動的な発生確率の推移を見積もるための解析も先駆的に実施したものである^{10, 11)}。この解析の特徴として、地形、地質、水文量を含めた条件の中で、広範囲に対しての気候変動に対するリスク差も比較検討できる優位性が含まれている。しかし、*Kawagoe et al* の評価は日本列島を対象にした空間解像度1km×1kmを単位としており、個別現象よりも巨視的な地域のリスクに主眼を当てたものである。今後、防災の実践的な検討まで発展させるためには、自治体規模を包括して捉えることのできる範囲に対して細かな空間解像度のリスク情報を求める課題が残されている。

本研究では、*Kawagoe et al* の評価方法を基に、気候変動を含めた評価法を実践的な適応策に反映させる緻密な空間解像度に変換したモデルの改良を進めた。また、適応策を具体的に体系化するためのアウトプットの開発を提案した。具体的には、*Kawagoe et al* により開発された斜面崩壊発生確率モデルの空間解像度を250m×250mまでダウンサイジングし、評価対象の地質を増やして情報の緻密化を図った。空間解像度は、国土交通省の統計値¹²⁾および先行の調査研究の実績¹³⁾に基づく一般的ながけ崩れの現象規模よりもやや大きい、警戒区域等の指定に用いられる集落規模にフィット可能なサイズである。また、地域カテゴリーの適応策計画への適用性を考慮して、地形、地質を重視、および保全対象も考慮した土砂災害警戒区域・特別警戒区域と、気候変動の影響を含めることのできる評価結果を重ね合わせたアウトプットの開発を試みた。空間解像度250m×250mのみの情報の場合、万遍ない範囲でリスクの高低を把握できるため多くの用途が期待できる。しかしながら、生命と資産による社会的インパクトの推計、適応策の展開を考慮した場合、土砂災害警戒区域・特別警戒区域に情報を集約させて安全安心な生活の実現を図るための検討を優先する必要がある。現在進行中の警戒区域・特別警戒区域への自治体の具体的な防災対策の対応の中で、気候変動に対する適応

策も包括して強化できる可能性を含んでいる。以上をまとめると、本研究では、地域への適用性を高める目的に以下の①、②を取り組み組んでいる。

- ① 緻密化情報を用いることのできる斜面崩壊発生確率モデルの開発
- ② 適応策計画を実装しやすい土砂災害警戒区域・特別警戒区域との重ね合わせのアウトプットの開発

2. 対象領域とデータセット

従来型の斜面崩壊発生確率モデルは日本列島全域を対象とした。対して、本研究では、自治体での防災活動の経路を求めるアプローチでモデル、およびアウトプットの開発を進めることを目的としている。今後の成果として列島全域への研究展開も期待されるが、その前にダウンサイジングした個別現象との検証と列島全域へのモデルの調整を行わなければならない。本論では、自治体の地域解析ケースを整備するための一環として長野県を対象領域に設定して検討を進めた。長野県は列島の地帯構造を規制するフォッサマグナ地帯と中央構造線の交差する領域に位置し、脆弱になりうる複雑な地質が分布する。また、地形的に山地(火山地を含む)と盆地(台地・低地)の対照が著しい特徴を示し、山地の占拠率が総面積の84%を占める。これら地形地質の背景をもつ地域に社会が発達しているため、豪雨に敏感に反応して土砂災害が発生しうる地域と解釈される。また、気候変動に伴う豪雨による斜面崩壊の適応策重点化を図る必要の大きな地域ともいえる。この検討をベースに、今後、自治体の地域解析ケースも増やして比較し、列島全域への適用の可否まで展開したい意向である。

解析のデータセットには、基本的に国土数値情報(国土交通省国土政策局国土情報課：<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>)より取得された数値地理情報を用いた。解析に使用されたデータの詳細を表1のデータセット一覧表に示す。

表1 データセット一覧表

項 目	用 途	データの詳細緒元
(1)標 高	発生確率モデルの地形要素(起伏量)導出	国土数値情報: G04-c-11_5237,5238,5337,5338,5437,5438,5537,5538-jgdL
(2)斜面傾斜度	発生確率モデルの水文量要素(動水勾配)導出	ElevationAndSlopeAngleFourthMesh.shp (2011年)
(3)表層地質	発生確率モデルのモデル式分類	長野県デジタル地質図2015 ¹⁴⁾
(4)表層土壌	発生確率モデルの水文量要素(動水勾配)導出	国土数値情報: KSMETA-G05-54M (1979年)
(5)降水量	発生確率モデルの水文量要素(動水勾配)導出	AMeDAS、およびレーダーAMeDAS解析雨量
(6)土砂災害警戒区域	発生確率モデルのアウトプットとの重ね合わせ領域	国土数値情報: A33-15_20Polygon.shp (2014年10月データ)

表中の項目(1)から(5)までが斜面崩壊発生確率モデルの開発、(6)が土砂災害警戒区域・特別警戒区域の重ね合わせアウトプットに利用したデータとなる。なお、重ね

合わせアウトプットのデータには、斜面崩壊発生確率モデルより取得された発生確率のアウトプットも利用している。

3. 斜面崩壊発生確率モデルの開発方法

(1) 従来型の斜面崩壊発生確率モデル

Kawagoe *et al*により開発された斜面崩壊発生確率モデル⁹⁾は、Ohlmacherより開発された斜面崩壊発生確率モデル¹⁵⁾に水文量の要素を加えて動的なリスクを導出できるように改良したものである。モデルは二項分布による多重ロジスティック回帰分析より構成されている。斜面崩壊モデルに利用した二項分布とは、ある事象に対する災害発生の有無であり、有を「1」、無を「0」に設定している。従来型のモデルでは、開発ときに認められた極限状態の降雨量、甚大な斜面崩壊を頻発させた2004年7月12日から13日の新潟県枳尾周辺の降雨量、斜面崩壊の実績を事象として利用した。災害有無の二項分布をロジスティック曲線で連結させることで0から1の連続的な線形を成立させた。ロジスティック曲線を重回帰式で解くことでモデルは構築される。モデルより得られる結果は0から1で推移するまでの発生確率となり、ある条件下を基にして現象が生起する条件付確率として定義される。したがって、この研究より求められた斜面崩壊発生確率は、斜面崩壊の素因である地形、地質条件、誘因である降雨量を含む水文量の条件下で多重ロジスティック回帰分析より求められた条件付のリスク値になることを意味する。式(1)に斜面崩壊発生確率モデル式を示す。

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

ここに、 P : 斜面崩壊発生確率、 α : 動水勾配係数、 β_h : 動水勾配係数、 x_h : 動水勾配、 β_r : 起伏量係数、 x_r : 起伏量である。動水勾配が水文量、起伏量が地形条件となる。なお、このモデル式は地質毎に作成されており、崩積土、新第三系堆積岩、第三系堆積岩、花崗岩を対象にしてモデル開発された。解析に利用されたデータは数値地理情報をベースとする。水文量として設定された動水勾配は、グリッドセル毎の表層土壌、斜面傾斜度の情報を基に擬似的に二次化した斜面をベースに、降雨発生に伴う不飽和浸透解析を行ったことで求められている。なお、モデルに利用した動水勾配は、24時間の降雨発生中で最大の値になる動水勾配を用いている。降雨量に応じて動水勾配も変化するため、豪雨イベントに応じた発生確率の動的な情報を取得できる構造となっている。

(2) 緻密化情報化に向けたモデルの条件

長野県を対象にした緻密化情報のモデル開発を進める

図1 豪雨イベントに伴う土砂災害発生データの空間分布情報

図2 近年の長野県土砂災害と最大日降雨量の関係図

ため、長野県における災害実績データを収集し、モデルに適用する事象を抽出した。災害実績データは水害統計(国土交通省: http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/suigaitoukei/, および刊行図書)、長野県の協力を得て入手した。入手された1999年～2013年に至る最近25年間の災害実績からモデルに適用できる複数個所で土砂災害の発生した豪雨イベントを抽出した。入手した豪雨イベントに伴う土砂災害発生データの空間分布情報(図1 参照)と土砂災害イベントと、近接したAMeDASポイントを基に作成した近年の長野県土砂災害と最大日降雨量の関係図(図2 参照)を示す。図中に示されるとおり、長野県では、13イベント(①～⑬)の複数個所以上の土砂災害が挙げられた。この中で、特に複数個所で土砂災害の認められた豪雨イベントが③(2000/9/8-12:11箇所)、⑤(2004/8/9-17:20箇所)、⑥(2005/9/9-17:19箇所)、⑦(2006/6/30-7/25:20箇所)である。図2を参考にすれば、これらの豪雨イベントは抽出された13イベント中で相対的に最大日降雨量の多いイベントであることを把握できる。イベント⑥を除くと近接したAMeDASで150mm/day以上の最大日降雨量が記録され、この値が概ね複数個所で土砂災害の発生しうる降雨基準になりうることを示唆する。なお、イベント⑥は、地形、地質等の条件が関与して、日降雨量150mm/dayに満たなくても多くの土砂災害が認められた

表2 モデルに適用された土砂災害の条件の一覧表

エリア	地質	土壌	起伏量 (m)	傾斜度 (°)	降水量 (mm)	地点数	エリア	地質	土壌	起伏量 (m)	傾斜度 (°)	降水量 (mm)	地点数				
A1	花崗岩	褐色森林	53-202 (0-228)	85-322 (00-338)	174-232 (109-249)	9/1466	A3	安山岩	褐色森林	54-311 (25-405)	110-438 (49-490)	51-162 (39-183)	9/1205				
		乾性褐色森林				1/266			湿性褐色森林				3/674				
		灰色低地				1/113			乾性ボソソル				1/240				
A2	花崗岩	褐色森林	79-206 (0-301)	147-381 (00-535)	284-318 (163-385)	5/2261			砂・礫				黒ボク	18-90 (17-274)	36-167 (32-376)	98-182 (87-182)	3/429
		乾性ボソソル				1/981											黒ボク
	流紋岩	黄色土壌	21 (4-119)	33 (08-312)	278 (241-278)	1/8	砂・礫	黒ボク		18-90 (17-274)	36-167 (32-376)	98-182 (87-182)					2/207
																	褐色森林
	凝灰岩	褐色森林	70-133 (0-209)	152-229 (00-329)	236-278 (236-301)	4/217	A4	花崗岩	褐色森林	82-100 (33-145)	115-186 (70-289)	183-196 (77-252)	1/97				
									多湿黒ボク				1/3				
	黒ボク	1/22															
	泥 岩	褐色森林	90-166 (15-235)	203-229 (32-380)	236-246 (228-309)	2/299		砂岩泥岩 互層	褐色森林	115-172 (12-336)	218-296 (23-432)	181-195 (106-297)	2/1076				
		湿性褐色森林							1/197								
	砂岩泥岩 互層	森林褐色	125 (15-350)	227 (22-482)	241-292 (232-313)	1/13		砂岩泥岩 互層	褐色森林	63-129 (4-217)	109-243 (08-346)	177-198 (176-273)	4/793				
		黒ボク							厚層黒ボク				3/38				
	砂岩礫岩 互層	残積性未熟土	76-94 (30-230)	152-196 (59-355)	238-246 (228-292)	1/56		集塊岩・凝 灰角礫岩	褐色森林	5-85 (0-237)	1-159 (00-370)	176-206 (171-206)	3/204				
									1/43								
	礫・砂・泥	褐色森林	7-294 (3-294)	13-435 (0-435)	281-284 (228-315)	1/230		礫・砂・泥	灰色褐色	97 (9-139)	192 (17-237)	200 (153-233)	1/133				
						1/87											
						1/389											

※ 表中数値 〇外は斜面崩壊の値、〇内は全体の値

と推測される。以上の結果を踏まえてイベント③(A1エリア)、⑤(A2エリア)、⑥(A3エリア)、⑦(A4エリア)を斜面崩壊発生確率モデル開発に利用する事象として設定した。この事象のエリアに対する災害発生期間中の最大24時間雨量の分布をレーダAMeDAS解析雨量のデータから抽出してモデル開発の解析に利用した(図3 モデル適用した土砂災害イベントの分布情報 参照)。降雨量の他、各条件に関わる数値地理情報より取得され、モデルに適用された土砂災害の条件を表2の一覧表に整理した。長野県における東西南北の限ない領域がモデルに適用されたことで、多岐にわたる地質、表層土壌を対象にモデル開発のできる条件が整備された。従来型の発生確率モデルに考慮できなかった安山岩、また、堆積岩に関しても凝灰岩、砂岩、泥岩など緻密な分類で土砂災害リスクを求めることのできる情報が収集された。

(3) モデル開発緒元と地質に応じた発生確率の感度分析

長野県を対象にした斜面崩壊発生確率の緻密化した情報を整備するため、本解析では、多重ロジスティック回帰分析に長野県におけるA1からA4エリアの災害実績により取得された地質毎の起伏量、動水勾配、データを適用させてモデルを改良した。多重ロジスティック回帰分析の開発において求められた各地質のモデル係数値は表3の一覧表に示すとおりである。係数値の特徴として、従来型モデルでは、全ての地質で動水勾配の標準化偏回帰係数が大きく、水文的变化量に大きく依存して発生確率増加する結果を得ていた⁹⁾。対して、空間解像度を250m×250mまでダウンサイジングされた開発モデルでは起伏量の方が標準化偏回帰係数の大きくなる地質が認められている。総じて、空間解像度の細分化により地形的要因の影響度が高まる傾向が認められている。なお、

図3 モデル適用した土砂災害イベントの分布情報

表3 各地質のモデル係数値一覧表

モデル 地質	崖錘 堆積物	安山岩	花崗岩	砂岩	泥岩 (互層含)	礫岩 (互層含)	凝灰岩
起伏量 係数 β	0.08 (1.93)	0.09 (0.49)	0.08 (0.48)	0.08 (0.29)	0.02 (0.43)	0.11 (0.84)	0.06 (0.80)
動水勾配 係数 β	1.52 (0.16)	0.81 (0.18)	1.00 (1.17)	1.33 (0.08)	0.73 (0.02)	1.52 (3.65)	1.26 (1.24)
切片 α	-8.58	-1294	-10.85	-11.21	-4.08	-13.74	-8.21

※ 〇は標準化偏回帰係数

崖錘堆積物、礫岩、凝灰岩は1以上の標準化偏回帰係数となる変数が存在することに留意しなければならない。変数間の相関係数は0.2以下であり多重共線性の可能性は低いものの、これらの地質では、更にモデルを精緻にする検討の余地が含まれている。本解析では、各地質を同列の条件で捉えることに着目することとし、地質毎モデルを更に精緻にさせることは、長野県以外のサンプルエリアも含めて検討することとし、今後の課題にする。

ここでモデル構築より得られた地質毎のモデル係数値

より、相対的な特徴、脆弱性を把握するために試行的に変数の変化に応じた感度を求めた。図4は各地質における発生確率の感度分析結果である。この結果は、降雨変化による影響を把握するため、起伏量を100mの条件に固定し、動水勾配変化を与えて得られた発生確率の推移を示したものである。動水勾配が0の場合、発生確率の高い地質の序列は、崖錘堆積物、凝灰岩、泥岩、花崗岩、礫岩、砂岩、安山岩となる。泥岩を除くと大局的に粒径の粗い組織で構成される地質ほど発生確率が高まる傾向が示されている。また、未固結の地層である崖錘堆積物は際立って発生確率の高い結果が得られている。各地質ともに動水勾配の上昇に応じて発生確率は高まるが、泥岩を除き発生確率の序列は変化しないことが明らかにされた。泥岩は、動水勾配の上昇に対して鈍感な発生確率上昇を示し、動水勾配上昇時に安山岩に次いで低い発生確率の序列になる地質となる。モデルにおける地質別の動水勾配と発生確率の関係より、基本的に組織を形成する粒径の粗い地質ほど雨水浸透しやすく水文学の影響を受けやすいプロセスと整合した傾向が得られた。したがって、理論的に問題のないモデル係数が求められたと解釈することができる。

4. 土砂災害警戒区域・特別警戒区域との重ね合わせ分析アウトプットの開発方法

長野県の土砂災害警戒区域・特別警戒区域に対する降雨に応じた斜面崩壊の発生確率推移を求め、素因と誘因の双方を含めたリスク情報のアウトプットの整備を進めた。誘因となる降雨量を含む水文学を加えることにより、気候変動に対する土砂災害警戒区域・特別警戒区域の将来像も捉えることが可能になる。現在、警戒区域・特別警戒区域への自治体の具体的な防災対策の対応が取り組まれているが、こうした情報を補足することで、現在進行中の対策と将来に対する気候変動の適応策も包括して強化できる効果が期待できる。

素因と誘因の双方を含めたリスク情報のアウトプットは、土砂災害警戒区域・特別警戒区域の数値地理情報に降雨量に応じた斜面崩壊発生確率モデルのアウトプットを重ね合わせすることで整備された。重ね合わせした情報は、土砂災害警戒区域・特別警戒区域内の緩傾斜斜面(傾斜度5°以下)を除いた平均発生確率で整備された。重ね合わせする斜面崩壊のリスク情報は、平均発生確率以外に高発生確率のグリッドセル分布率、区域内の保全対象の位置関係に基づいた発生確率分布形状等と様々な導出が想定される。しかしながら、こうしたリスク情報を整備するためには発生確率と区域内の実情の関係に基づいた基準を設定することで構築できる情報となる。そのため、区域内における斜面の危険度の全体像をトレ

図4 各地質における斜面崩壊発生確率の感度分析結果

ドとして明らかにすること、区域間の相対的な差異を求めることを進めることが前提として必要である。以上を踏まえて本研究では平均発生確率をアウトプットとして求めることにした。また、崩壊現象は斜面で連続性を持ち波及する可能性の大きいものであり、実質的に現象の規模は計算上のグリッドセル情報で規制されない側面も有する。したがって、平均値として包括的な面積規模の情報を提供することにも大きな意義を有している。

なお、国土交通省の報告によれば¹⁶⁾、長野県の警戒区域の基礎調査は平成27年度に完了している。長野県の報告によると¹⁷⁾、平成28年9月9日現在の土砂災害警戒区域は26,869箇所、土砂災害特別警戒区域は21,327箇所指定されている。本研究では、これらの区域に対しての降雨量に応じた区域内の平均斜面崩壊発生確率がアウトプットとして作成されている。

5. 斜面崩壊発生確率モデルの結果と考察

長野県の災害実績を基に開発された緻密化情報の斜面崩壊発生確率モデルを用いて長野県の斜面崩壊危険度を求めるが、本論では、100mm/24hour, 200mm/24hour, 300mm/24hour(以下 Case-100mm, 200mm, 300mm)の降雨条件による結果を示す。この降雨条件は、表2に示された長野県の複数個所で土砂災害の発生した豪雨イベントの実績に基づき設定したものである。図5は各降雨条件に応じた長野県の斜面崩壊発生確率マップ、図6は100mm/24hour から 200mm/24hour, 100mm/24hour から 300mm/24hour(以下 Case-100→200mm, 100→300mm)に降雨量変化した場合の斜面崩壊発生確率差のマップである。

図5のCase-100mmより、各降雨量ともに飛騨山脈、木曽山脈、赤石山脈、三国山脈、関東山地の山岳地群の急峻な地形を中心に発生確率95%~100%に近い領域が集中する。この山地から挟在する盆地に移行するに従って発生確率は低下する傾向を示す。地形分類としては、盆地等を含む砂礫台地、三角州性低地、扇状地性低地で概ね0%に近い発生確率を示すが、盆地と山岳地の境界に位

図5 各降雨条件に応じた長野県の斜面崩壊発生確率マップ

図6 降雨量変化した場合の長野県の斜面崩壊発生確率差マップ

置した小起伏山地、中起伏山地で高低にばらついた発生確率が認められる。これらの結果より、中山間部では地域によりリスクの大小が明瞭に分離する結果が得られたと解釈できる。Case-200mm、およびCase-300mmもCase-100mmと類似する斜面崩壊発生確率の分布となるため、大局的に似通ったリスク情報が示されている。ただし、各雨量のケースに応じて中山間部の発生確率の分布には差異が認められ、降雨量増加に応じて発生確率の上昇する地域が存在している。

図6に示される雨量に対する斜面崩壊発生確率差より、中山間部の明瞭な地域的な特徴が把握できる。降雨に応じて発生確率差の大きな地域は図6中の発生確率上昇区域図中に示された(a)から(f)のエリアとなる。降雨量に敏感に反応し著しい発生確率の上昇を示すエリアは、(b)赤石山脈西側、(e)長野盆地周辺の山麓裾部であり、この地域には礫岩と砂岩の分布する領域が多く認められている。モデルの感度分析に示された地質の特性が分布図に反映されていることが示されている。各々の発生確率差のケースを比較すれば、特にCase-100→300mmで急激な発生確率の上昇が著しい結果を示す。この結果は、24時間当たり200mmから300mmの降雨量の発生で危険度の高まる

領域が広がることを示唆している。なお、発生確率差の上昇は認められるものの比較的に降雨量に対して鈍感な傾向を示す地域は、長野県北部の(d)飛騨山脈東部側に位置する長野盆地に接した丘陵部の西側、(f)三国山地西側の山麓裾部である。これらのエリアは、泥岩、安山岩に示される降雨量に対して感度の鈍い地質分布が認められている。

図5、図6の斜面崩壊発生確率の結果より、長野県の大域的な発生確率による危険度の分布が分類され、特に、中山間部で降雨による地域差が明瞭になることが求められた。また、この地域差は地質分布に依存している可能性が明らかにされた。加えて、24時間当たり200mmから300mmの降雨量の発生で危険度の高まる領域が拡大する傾向が示され、200mmから300mmの降雨量の発生より、もともと危険度の低い地域もリスク増大する結果を得た。

6. 土砂災害警戒区域・特別警戒区域との重ね合わせ分析の結果と考察

土砂災害警戒区域・特別警戒区域の指定区域と斜面崩壊発生確率を重ね合わせた平均斜面崩壊発生確率による

図7 土砂災害警戒区域・特別警戒区域の指定区域と斜面崩壊発生確率を重ね合わせた平均斜面崩壊発生確率マップ

結果を図7に示す。また、図8は指定区域の降雨量変化による斜面崩壊発生確率差のマップである(図5と図6と同様に雨量に応じたケースを呼称する)。傾向として、面積の大きな指定区域は低い斜面崩壊発生確率となり、面積の小規模の斜面は高低差の明瞭な斜面崩壊発生確率が示される。降雨量変化により面積の小規模な区域の発生確率では、図5、6より得られた結果と同じ傾向が示され、図6のエリアに示される(a)から(f)に相当する区域は相対的に発生確率が高く、Case-100→300mmで急激な発生確率上昇の傾向を示す。したがって、面積の小規模領域な指定区域に関しては、比較的降雨変化に応じて発生確率をリンクで適用的に活用できる実践的な情報が整備された可能性が高いといえる。その一方で、面積の大規模な区域に関しては、危険になる斜面以外の斜面も加えられている可能性があるため、包括区域に対する危険度として評価した場合、発生確率が低下する可能性を有する。また、規模の大きさより、活動的になりにくく、複雑な構造を呈する深層崩壊、地すべりの現象を内在している可能性もあり、モデルとしての評価まで捉えきいていないことも推測される。こうした、課題も踏まえて現地検証をすすめて、空間領域としての危険度の解釈にむけた情報整備を進めなければならない。

本研究の目的となる適応策を具体的に体系化するアウトプットの開発について検討するため、小領域を可視化できる情報を示す。図9は長野市周辺の指定区域の平均斜面崩壊発生確率マップ、図10は指定区域の降雨量に応じた発生確率応答図である。図9では、小規模領域のみに特化されるが、降雨量に応じて各指定区域で発生確率の差が分離された結果が示されている。また、図10では、土砂災害警戒区域・特別警戒区域に応じた降雨に対する斜面崩壊発生確率の応答が把握できる。今後の気候変動に対する適応策を考慮した場合、図9の情報からは、土砂災害警戒区域・特別警戒区域そのものの降雨量変化に

図8 指定区域の降雨変化による斜面崩壊差発生確率マップ

図9 長野市周辺の指定区域の平均斜面崩壊発生確率マップ

応じた斜面崩壊発生確率によるリスク情報の他に、近傍の区域とのリスク変動の関係性を捕らえることが可能になる。そのため、自治体における避難経路や避難場所の計画へ資することのできる空間情報が提供できる。今後の気候変動に関する降雨情報のモデル入力により、優先的に防災に対するインフラを整備すべきエリアや、強制

的に移転する必要なエリア等にも言及できる可能性もある。図10の情報では、土砂災害警戒区域・特別警戒区域内の斜面崩壊の危険になりうる降雨量の基準化も設定できる可能性が示される。今後、平均発生確率以外に高発生確率のグリッドセル分布率、区域内の保全対象の位置関係に基づいた発生確率分布形状等の精査も必要になるが、降雨量の基準化に関しては自治体による避難勧告、指示前の準備情報にも有用になりうる。また、今後の気候変動に関する降雨情報のモデル入力により、将来への区域に応じたリスクも把握しやすくなるため、防災インフラ整備、移転等の選択肢を事前に推計できる情報としての活用も期待できる。図9、図10とも再度細部を検討する必要性もあるが、土砂災害警戒区域・特別警戒区域に対して自治体の行政関連者が対策をより具体的に計画できる利点に発展できる可能性も含んだ基盤のアウトプット情報になりうる。

7. 結 論

長野県を対象に進めた緻密化情報を用いることのできる斜面崩壊発生確率モデルの開発と、対策に実装しやすい土砂災害警戒区域・特別警戒区域の空間情報との重ね合わせのアウトプットの開発の取り組みにより、具体的な適応策計画に利用できる可能性も含んだ結果を得ることができた。本研究の取り組みにより、緻密な空間情報に基づいたリスクの地域性が明瞭に示され、警戒区域・特別警戒区域とリンクしたアウトプットを開発することで地域に対する防災情報の強化に向けたデータが整備された。こうした結果より、地域への適用性の向上を高めたアウトプットへの体系化が図られたと思われる。

ただし、文中に示すとおり、面積の大きな指定区域に対する発生確率の適用性に関しては更に議論する必要がある。また、今後の気候変動影響評価までの研究発展に向けて、発生確率に示す定量的な値に対しての危険の基準値設定、被害まで考慮した評価への拡張を検討することも必要である。今後は、現地調査による情報収集の分析と、数値気候モデルのアウトプットとの比較の両面より、気候変動リスクを精度高く導出できる改良を進め、適応策の誘導まで円滑に進めることのできるモデルまで発展させることに取り組む意向である。

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、本研究を遂行するにあたり、長野県、および長野県環境保全研究所の支援を受けた。ここに謝辞を示す。

参考文献

1) Intergovernmental Panel on Climate Change : Climate

図 10 指定区域の降雨量に応じた発生確率応答図

※ 各名称区域の名称は仮定で、長野市から不特定に抜粋

Change 2014: Scientific Basis, Summary for Policymakers. WGI AR5 Report, 2013.

- 2) 例えば秋間将宏, 風間聡, 峠嘉哉, 小森大輔, 川越清樹, 多田毅 : 年最小気圧を用いた複合水災害潜在被害額の将来推定, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, I_139 - I_144, 2017.
- 3) 例えば渡部哲史, 鼎信次郎, 平林由希子 : クオインタイルマッピング型補正を用いた気候変化影響評価に関する考察, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, I_121 - I_126, 2017.
- 4) 例えば熊谷樹一郎, 大林成行, 川井田実, 斉藤元也 : シラス地帯における計画路線の事前評価を目的とした崩壊影響評価アルゴリズムの開発, 土木学会論文集, No.623, VI-43, pp.247-257, 1999.
- 5) Chen-Yu CHEN, Masaharu Fujita: A Method For Predicting Landslides on a Basin Scale Using Water Content Indicator, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 70, No.4, pp.I_13-I_18, 2014.
- 6) 沖村孝, 市川龍平 : 数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法, Vol.358, pp.69-75, 1985.
- 7) 例えば秋山怜子, 木下篤彦, 内田太郎, 高原晃宙, 石塚忠範 : 簡易な水文モデルを用いた崩壊発生時刻予測手法, Vol.68, p.3-13, 2015.
- 8) 例えば Guilherme J.C.Gomesa, Jasper A.Vrugth, Eurípedes A. Vargas Jra, Julia T.Camargod, Raquel Q.Vellosoa and Martinus Th.van Genuchtene : The role of uncertainty in bedrock depth and hydraulic properties on the stability of a variably-saturated slope, Computers and Geotechnics, Vol.88, pp.222-241, 2017.
- 9) S. Kawagoe, S. Kazama, and P. R. Sarukkalgie : Probabilistic modeling of rainfall induced landslide hazard assessment, Hydrology and Earth System Sciences, Vol.14, pp.1047-1061, 2010.
- 10) 川越 清樹, 江坂 悠里 : 気候システムの温暖化による斜面崩壊と影響人口の関係に関する推計, 土木学会論文集 G(環境), Vol. 68, No.5, I_287-I_296, 2012.
- 11) 川越 清樹, 江坂 悠里, 伊藤 圭祐, 脇岡 靖明 : 気候モデルを用いた将来の土砂災害被害額推計, 土木学会論文集 G(環境), Vol. 70, I_167-I_175, No.5, 2014.
- 12) 国土交通省 : 平成 25 年土砂災害対策の強化に向けた検討会 資料, https://www.mlit.go.jp/river/sabo/dosya_kyouka.html, Site viewed 2017/03/31.

- 13) 高橋博, 大八木規夫, 大滝俊夫, 安江朝光: 斜面災害の予知と防災, pp.526, 白亜書房, 1986.
- 14) 長野県地質図活用普及事業研究会: 長野県デジタル地質図 2015, CD-ROM, 2015.
- 15) Ohlmacher, G.C. and Davis, J. C.: Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. Engineering Geology, pp.331-343, Vol.69, 2003.
- 16) 国土交通省: 土砂災害防止法(土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律) 基礎調査の実施目標 基礎調査の完了予定年度(平成 28 年 3 月 31 日現在), http://www.mlit.go.jp/river/sabo/pdf/map_160331.pdf, Site viewed 2017/03/31.
- 17) 長野県: 土砂災害のおそれのある場所 土砂災害警戒区域・特別警戒区域 平成 28 年 9 月 9 日現在の指定状況, <http://www.pref.nagano.lg.jp/sabo/infra/sabo/dosha/documents/280909shiteijokyo.pdf>, Site viewed 2017/03/31.

(2017.4.7 受付)

DEVELOPMENT OF SLOPE FAILURE MODEL AND OUTPUT BASE ON REGIONAL GENERAL PURPOSE PROPERTIES

Yosuke SAITO, Thuy Thi Thanh LE and Seiki KAWAGOE

This study is development of slope failure risk information output to support regional government using adaptation counter measure due to climate change. As study aim, we tried to pursue the sophistication of traditional approach slope failure probability model (pay attend: spatial resolution, geological condition). And we tried to develop slope failure risk information output to make overlap slope failure probability data and sediment disaster caution zone data. We were able to prepare sediment disaster caution zone probability map respond to rainfall variation in Nagano prefecture. And we developed probability response line in sediment disaster caution zones. Leading sediment disaster adaptation tool was planned as support regional government in this study