

融雪に起因する土砂災害のリスクモデル

RISK MODEL OF SEDIMENT HAZARD DUE TO SNOWMELT

川越清樹¹・風間聡²・沢本正樹³

Seiki KAWAGOE, So KAZAMA and Masaki SAWAMOTO

1 学生会員 修(環境科学) 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荒巻字青葉6-6-20)

2 正会員 博(工) 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荒巻字青葉6-6-20)

3 正会員 工博 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

The Probability and the road damage due to sediment hazard caused by snowmelt were analyzed by use of the risk model. The risk model was applied by a multiple logistic regression analysis based on past hazard conditions. We set conditions of geology, relief energy and hydraulic gradient as the necessary variables. Hydraulic gradient was analyzed by infiltration analysis with consideration of snowmelt. Snowmelt conditions were obtained by SWE (Snow Water Equivalent) model. The Probability and the road damage in the Tohoku region are shown in map with 1km² resolutions. This map shows spatial-temporal risk distribution of sediment hazard.

Key Words : heavy snow year, probability, road damage, global warming

1. 序 論

日本列島で記録された2006年の豪雪は、交通、構造物、人的に甚大な被害を与えた¹⁾。地球温暖化に伴う積雪量減少²⁾³⁾の一方で、北海道、北東北の突発的な積雪量の増大が予測されている⁴⁾。積雪量変化に伴い増加の予測される災害が土砂災害である。融雪の加速⁴⁾⁵⁾に伴う急激な地下水供給、積雪量減少に伴う雨滴の浸食によるガリの過剰な発達⁶⁾を原因に土砂災害の発生が懸念される。

降雨に起因する土砂災害の危険度の空間分布を示すモデルが構築されている⁷⁾⁸⁾⁹⁾。融雪に関する土砂災害の研究は、積雪状況と災害の関係から雪害危険度を示す²⁾、個別現象の危険度評価モデルの構築¹⁰⁾¹¹⁾、災害事例とその考察¹²⁾等を中心にし、危険度の空間分布を示すモデルが構築されていない。原因として、積雪情報を取得できる観測所の不足が挙げられる。融雪現象は天候条件に依存し、この条件は地形特性等で変化するため、広域に対し緻密にデータ取得する必要がある。データ不足により危険度の空間分布を示すモデルが構築できなかつたと推測される。一方、衛星画像の利用により積雪水当量と融雪量の分布を推定するモデルが構築され¹³⁾、この成果が土砂災害危険度の空間分布を示すモデルの構築に有用と考えられる。本研究では、土砂災害の発生、非発生の実績に対する融雪を含む水文条件、地質と地形条件を考慮した土砂災害リスクモデルの構築を試みた。数値地図データと融雪量分布を利用し、発生確率と社会基盤の経済損失をセル解像度1km×1kmのマップに図化した。モ

デルは、地球温暖化に伴う降水変化による水文条件の変化、地形発達および人為的な地形改変による地形条件の変化といった将来予測される地球環境の変化も評価できる。本論文では、土砂災害による被害事例の多い道路について経済被害損失を解析した。土砂災害リスクの空間分布の明示は、追跡調査、対策整備の必要な地域の抽出に有用である。対象地域は、多積雪地帯で、融雪に伴う土砂災害が頻繁に認められる東北地方全域とした。

2. データセット

融雪を含む水文条件、地質と地形条件、土砂災害の実績、道路密度の数値地図データを土砂災害リスクモデルに利用する。各データを以下に説明する。

(1) 水文データ

水文データに動水勾配を用いる。動水勾配の上昇は、パイピング現象に伴う斜面尻の土塊流出を促し、斜面不安定化を助長させる¹⁴⁾。数値地図データから擬似的な二次元斜面を再現し、浸透解析を行い動水勾配が求められる。浸透解析に国土数値情報KS-META-G05-54Mデータの表層土壌、KS-META-G05-56Mデータの斜面傾斜度、日融雪量分布データを利用する。以下に浸透解析方法、融雪データの算定法を説明する。

a) 浸透解析方法

解析にRichardsの飽和不飽和浸透解析モデルを用いる。地質の風化劣化の著しい日本列島は、地表面下の水が不飽和状態で移動するため、不飽和を考慮した浸透解析が

表-1 浸透解析土壌パラメータ

	透水係数 Ks (cm/s)	飽和体積 含水率 s	残留体積 含水率 r	土壌 特性値	対応土壌 データ
礫質土	1×10 ⁻²	0.30	-	3	岩屑性褐色低地
砂質土	1×10 ⁻³	0.40	-	3	褐色化グライ砂丘
シルト	1×10 ⁻⁴	0.45	0.05	5	黒ボクポドゾル森林湿性森林
粘土	1×10 ⁻⁵	0.50	0.10	20	泥炭

適する．浸透解析により得られる浸潤線から動水勾配が求められる．浸透解析式は式(1)から式(3)に示す．式(1)はダルシー則と比水分容量 $C(\psi) = \partial\theta / \partial\psi$ をRichards式に代入して導かれる．水頭 ψ と体積含水率 θ の関係に式(2)に示す谷式¹⁵⁾，不飽和透水係数 K と透水係数 K_s と体積含水率 θ の関係に式(3)に示す一般Kozeny式¹⁶⁾を用いる．表層土壌は礫質土，砂質土，シルト，粘性土に大別する．表層土壌条件は表-1に示す．日融雪量は毎分の等分配で浸透する条件を仮定した．この設定は実現現象を再現しないものの浸透による地域毎の特徴を区別できる．

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

$$\theta = (\theta_r - \theta_s) \left(\frac{\psi'}{\psi_0} + 1 \right) \exp \left(- \frac{\psi'}{\psi_0} \right) + \theta_r \quad (2)$$

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

ここで， θ : 体積含水率， t : 時間， V : 流速， K : 不飽和透水係数， T : 単位時間蒸発量， ϕ : 全水頭， θ_s : 飽和体積含水率， θ_r : 残留体積含水率， C : 比水分容量， ψ_0 : C が最大となる圧力水頭 ψ ， ψ' : $\psi < 0$ の時 ψ かつ $\psi \geq 0$ の時， β : 土壌固有定数， K_s : 飽和透水係数である．添字は x ， z 方向を示す．
b) 融雪量データ

本研究で用いた積雪水当量推定モデル¹³⁾は，従来のモデル¹⁷⁾と比較すると，広域かつ時系列の積雪情報を把握できる特徴をもつ．積雪水当量は1.1km×1.1kmのセル解像度で示されるため，解像度100m×100mに細分化し，緯度経度情報をあてはめることでセル解像度1km×1kmに補正した．積雪水当量は日当たりの降雪量 SF と融雪量 SM から算定される．融雪量の推定に式(4)に示す degree-day法を用いる．融雪量は，気温の他に日射量等の気候因子も考慮し，熱収支計算で求めることが望ましい．しかし，広域に対するこれらの気象データは不足しており，適用が困難である．ここでは，日毎の積雪水当量をNOAA/AVHRRの衛星画像データで検証し，合理的に degree-day法の融雪係数を導いた．日降雪量の推定には，AMeDASデータの日平均気温と降水量を利用した．日平均気温は，国土数値情報KS-META-G05-56Mデータ

に格納された標高データを利用し，気温減率0.6 /100mの補正と重み付距離平均法から数値地図データに補間された．降水量は降雪判別気温を2 とし，気温2 以上を降雨，2 以下を降雪として，重み付距離平均法と式(5)に示す近藤らの標高補正¹⁸⁾を用いて数値地図データに補間された．積雪水量の算定式は式(6)に示す．

$$SM = Kd \times T \quad (4)$$

$$SF = SF' \times \{ 1 + 0.001 \times (E_m - E_p) \} \quad (5)$$

$$d / dt(SWE) = SF - SM \quad (6)$$

ここで， Kd : 融雪係数， T : 日平均気温， SF : 標高補正の降雪量， SF' : AMeDAS観測地点の降雪量， E_m : メッシュ標高値， E_p : 観測地点の標高全水当， SWE : 積雪水当量である．本論文ではNOAA/AVHRRの衛星画像を利用し1990年から2005年の融雪データをもとめた．

(2) 地質・地形データ

地質データに国土数値情報KS-META-G05-54Mデータを利用する．土砂災害実績¹⁹⁾から崩積土，第三系と新第三系の堆積岩，花崗岩を評価対象の地質にする．

地形データに起伏量を用いる．起伏量データは国土数値情報KS-META-G05-56Mデータに格納されたセル内の最高標高と最低標高の差である，起伏量が大きき場合，地形開析も著しくなり，活発に地形が発達する．このため，起伏量は土砂崩壊の危険度評価のパラメータとして利用されている²⁰⁾．

(3) 災害実績データ

災害実績データに国土交通省監修の水害統計を利用する．資料には災害位置と日時が記載され，融雪に起因した災害を把握できる．土砂災害の頻発した融雪イベントと地域を抽出する．イベントおよび地域を土砂災害発生確率モデル式に利用するため，この地域をセル解像度1km×1kmのデータに整理する．

(4) 道路データ

道路データに国土数値情報のKS-META-N05-15Mデータを利用する．このデータはセル解像度1m×1km内の幅員毎の道路延長を格納する．リスク算定には幅員よりも道路種別の区別が望ましく，幅員 $W=13$ m を高速道路国道相当， $W=3.0$ m以上13m未満を一般道相当と仮定する．

3. 融雪と土砂災害の関係

経年の融雪量と土砂災害の実績の関係から，土砂災害の発生しやすい条件を年単位で評価する．この結果から，発生確率モデルの構築に利用できる融雪イベントを抽出する．対象地域全体を利用した場合，気候差異から融雪現象の地域差が生じ，誤差の大きなモデルになる．そこで，土砂災害の多発した地域の融雪現象からモデルを構

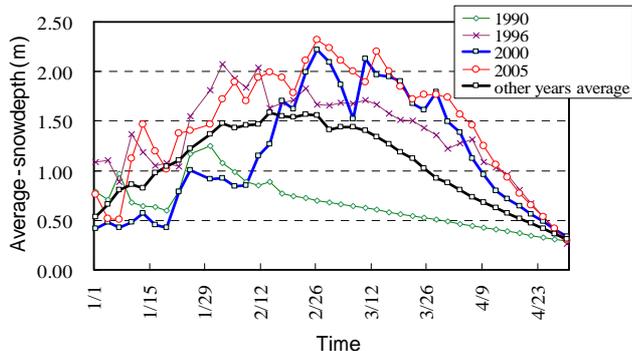


図-1 セル平均 (総積雪水当量/セル数)の積雪水当量

表-2 経年の最大週間融雪量と発生期間

年	最大融雪量期間 (1週間)		最大融雪期間 日平均融雪量 (m)
	自	至	
1990	2月9日	2月14日	0.34
1991	3月28日	4月3日	0.61
1992	3月9日	3月15日	0.66
1993	3月31日	4月6日	0.65
1994	4月8日	4月14日	0.68
1995	3月25日	3月31日	0.47
1996	4月18日	4月24日	0.76
1997	3月7日	3月13日	0.66
1998	2月27日	3月5日	0.56
1999	4月12日	4月17日	0.53
2000	3月23日	3月28日	0.99
2001	3月21日	3月26日	0.84
2002	2月15日	2月21日	0.63
2003	2月15日	2月21日	0.67
2004	3月18日	3月24日	0.84
2005	3月27日	4月2日	0.90

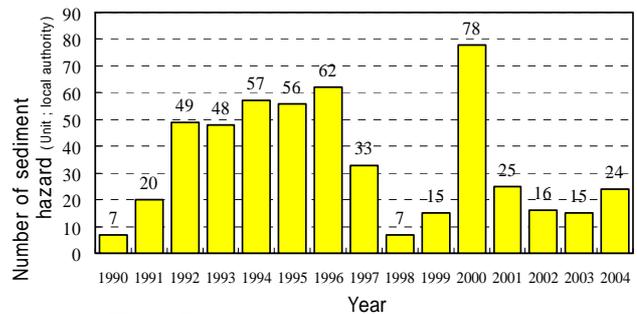


図-2 経年における東北地方の土砂災害数(市町村)



図-3 会津地方の土砂災害分布(2000年/3月21日から3月28日)

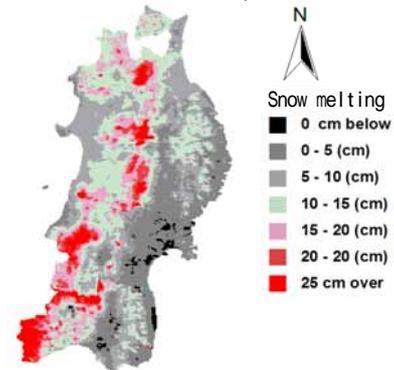


図-4 2000年3月21日から3月28日の融雪分布

築し、そのモデルを東北全域に適用する。年単位の積雪を把握するため、積雪水当量推定モデルを用い1990年から2005年の東北地方の積雪水当量を比較した。図-1に積雪水当量の変動を示す。また、表-2に各年の1週間当たりの最大融雪量を示した期間、期間中の東北全域の融雪量を示す。これらから、1996年、2000年、2005年が多雪年であること、多雪年は融雪量が多いことを把握した。多雪年は、1月に平年並だが、2月、3月に多大な積雪が認められた。2月、3月の降雪に伴う積雪は、圧密付加されにくく、気温等の外的要因により融雪が促進されやすい。このため、急速な地下水供給が生じ、土砂災害の発生しやすい状態になると推測される。図-2に1990年から2005年に発生した融雪による土砂災害を市町村単位の数量で示す。表より多雪年である1996年、2000年の災害発生数の多さが示されている。2005年の水害統計は発刊されてないため災害数を把握できなかった。しかし、死傷者を出した青森県黒石市の土砂災害等の甚大な被害が多発している。これらの結果から、土砂災害を促しやすい多雪年を融雪イベントとして利用すべきである。また、積雪水当量変化から、2月、3月に最大積雪水当量を示す年は、土砂災害の発生が懸念される。晩冬の高積雪は土砂災害への警戒が必要である。多雪年の災害を検証すると、2000年の融雪期は、北陸地方、東北地方南部で土砂災害が頻発し、内閣府より「平成12年における特定地域に係る激甚災害の指定及びこれに対し適用すべき措置の指定に関する政令」が発令された。福島県会津若松建設

事務所管内では2000年3月21日から28日に61箇所の土砂災害が発生し、会津地方全域が激甚災害区域に指定された。この会津地方は、地質分布に偏りが少なく、モデル式の作成に適した地域である。そこで、2000年の会津地方における土砂災害の有無を対象にモデル式を構築する。図-3は2000年融雪期の会津地方の土砂災害分布図である。

4. 土砂災害リスクモデルの構築

土砂災害リスクモデルは、土砂災害の発生確率と経済損失のモデルから構成される。発生確率と土砂災害に伴う被害額を示すことで、適切な調査、対策の優先度の意思決定に利用できる。以下に各モデルを説明する。

(1) 土砂災害発生確率モデル

筆者は、再現期間における降雨極値データを利用し多重ロジスティック回帰分析による土砂災害発生確率モデルを構築した⁷⁾。本研究の土砂災害発生確率モデルもアルゴリズムは同様だが、動水勾配を求める条件の対象が降雨と融雪で異なる。このモデルで示される発生確率は、ある融雪状況が与えられた場合の土砂災害発生に対する確率を示す。図-3に示された会津地域の土砂災害実績をモデル式に利用する。図-4に2000年3月23日から28日の

融雪分布状況を示す。モデルは、災害発生を100%、非発生を0%とした二項分布の関係をロジスティック曲線で連結させることで線形推定を可能にさせる。ロジスティック曲線を動水勾配と起伏量の説明変数による重回帰曲線で示すことでモデルが構築される。モデル式は地質毎に作成される。地質別のモデル作成から地質の危険性を序列化できる。発生確率モデル式は式(7)、地質別のモデル条件は表-3に示す。標準化回帰係数は発生確率への寄与の大きさを示し、動水勾配がいずれの地質で最も大きい標準化回帰係数で示されている。動水勾配変化の起因である融雪量は災害発生を促し、融雪量が災害の予警報に有用であることを示している。また、動水勾配は融雪量により変化する動的データであるため、積雪の多雪年と少雪年で土砂災害の発生確率は異なることになる。

$$P = \frac{1}{1 + \exp[-(\beta_0 + \beta_h \text{hyd}Y_h + \beta_r \text{roll}Y_r)]} \quad (7)$$

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、 $\text{roll}Y_r$:起伏量である。

図-5に発生確率と起伏量、動水勾配の関係を示した地質別のロジスティック曲線を示す。曲線の傾き、説明変数に対するロジスティック曲線の上昇位置により相対的な地質の危険性を評価できる。地質別の危険度は、崩積土、第三系と新第三系の堆積岩、花崗岩の順になる。この結果は、地質の硬軟と一致し、降雨極値にて構築されたモデル⁷⁾の傾向と一致する。

(2) 経済損失モデル

土砂災害に対する道路リスク R は経済損失モデルから導かれる被害額である。発生確率を被害の生ずる可能性、道路延長と経済価値を損害規模とし、土砂災害の発生確率とセル解像度1km×1km内の道路の経済損失費を乗じてリスクを算定する²²⁾。交通条件として詳細情報が記載されている交通センサス等の路線別調査結果の利用が望ましいが、広域を網羅していない。そこで、経済損失費に国土交通省監修の費用便益分析マニュアルと東北地方整備局の道路交通調査結果の代表値を用いる。道路復旧費 M_R 、式(8)に示す時間損失費 T_R と式(9)に示す距離損失費 L_R の和で示される被害額から、式(10)を用いてセル内の経済損失費を求める。

$$T_R = \sum_{\text{Link}} \sum_{\text{Car}} T_{i_m} \times (T_{m1} \times S - T_{m2} \times S) \quad (8)$$

$$L_R = \sum_{\text{Link}} \sum_{\text{Car}} T_{i_m} \times (V_{m1} \times L_1 \times S - V_{m2} \times L_2 \times S) \quad (9)$$

$$R = T_R + L_R + \sum_{\text{Link}} L \times M_R \quad (10)$$

ここで T_R : 時間損失費(円セル内)、 T_{i_m} : 時間価値原単位(乗用7245円分・台 貨物19.74円分・台)、 T_{m1} : 迂回所要時間(平時所用時間の2倍に仮定)、 S : 車両数(平成11年度平均; 高速自動車国道15,801台24h 一般道路5,401台24h、割合; 乗用車61%、貨物39%)、 T_{m2} : 平時所要時間延長(40km/h)、 L_R :

表-3 発生確率モデルの地質別パラメータ

地質	項目	動水勾配	起伏量	切片
崩積土	係数	41.27	0.01	-12.72
	有意確率P値	0.02	0.02	0.01
	標準化回帰係数	4.25	1.05	-
新第三系堆積岩	係数	31.48	0.01	-13.18
	有意確率P値	0.02	0.04	0.02
	標準化回帰係数	1.24	1.12	-
第三系堆積岩	係数	29.87	0.01	-12.59
	有意確率P値	0.04	0.04	0.01
	標準化回帰係数	1.03	0.56	-
花崗岩	係数	14.26	0.02	-12.37
	有意確率P値	0.05	0.03	0.03
	標準化回帰係数	0.62	0.58	-

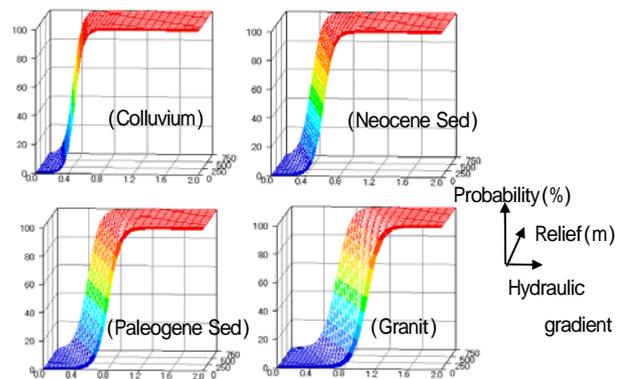


図-5 各地質のロジスティック曲線

距離損失費(円セル内)、 V_{m1} : 迂回時走行経費原単位(平時走行の2倍に仮定)、 L_1 : 迂回時走行距離延長の2倍、 V_{m2} : 平時走行原単位(高速自動車国道; 乗用6.30円台・km 貨物27.91円台、一般道路; 乗用15.04円台・km 貨物5.03円台・km)、 L_2 : 平時走行距離延長、 M_R : 道路復旧費(国道・主要地方道103(千円/m)、市町村道77(千円/m))、 R : セル内の被害額(円)である。

5. 解析結果

多雪年の土砂災害の発生確率、道路の経済損失の評価結果を分布図に示す。また、調査と対策に必要な危険地の抽出には時系列のリスク変動の把握も必要である。そこで、多雪年のモデルを利用して、1)少雪年(1990年)、2)通常年(1999年)の土砂災害リスクも評価する。また、地球温暖化に伴う気温上昇を考慮し、3)多雪年の積雪状態で日平均気温が1 上昇した場合の融雪量のケースも評価する。温暖化による降雪量減少も推測されるが、突発的な積雪量増大の予測⁹⁾や近年の突発的降水現象の記録から、このケースを検討した。1)から3)の検討から融雪による土砂災害の時系列的な地域特性を示す。

(1) 多雪年の土砂災害発生確率

図-6に土砂災害発生確率分布を示す。秋田県、山形県、福島県会津地域に80%以上の発生確率地域が分布し、特に、会津、山形県肘折、秋田県の出羽山地東麓の由利本荘から秋田市、出羽山地に属する森吉と阿仁合は高発生確率が集中する。太平洋側の発生確率80%以上の地域は、

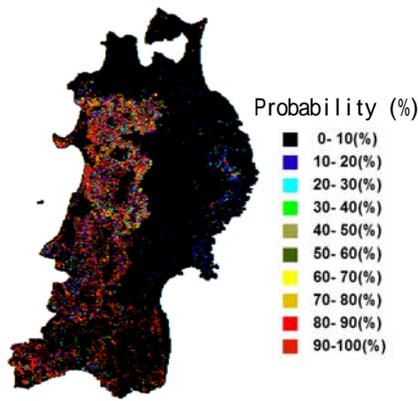


図-6 土砂災害発生確率分布(2000)

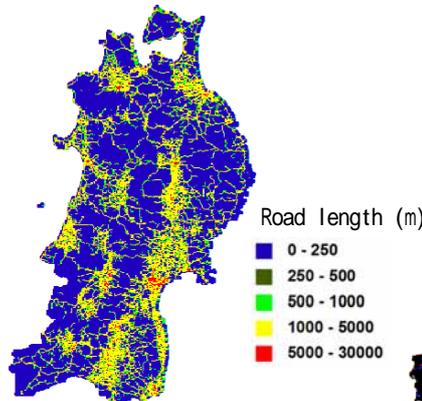


図-7 道路密度分布(幅員5.5~13m)

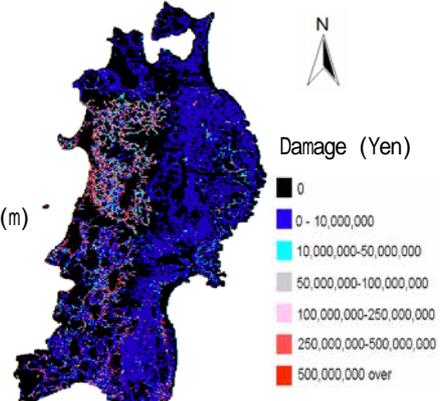


図-8 道路経済損失分布

北上山地東麓の部分的な地域、阿武隈山地である。また、白神山地の北麓と南麓、奥羽山脈の西麓と東麓の発生確率分布の差異が特徴的である。この原因として、融雪量の差以外に、北南および西東で斜面起伏が異なることが挙げられる。白神山地は北麓、奥羽山脈は岩手山南麓、焼石岳、栗駒山、蔵王山を除いた東麓が低い発生確率を示す。なお、2000年融雪期の災害実績と比較すると、災害地域は平均83.5% (標準偏差8.6%)、災害の非発生地域は平均18.57% (標準偏差13.3%)である。災害地域は高い発生確率で示されている。

(2) 多雪年の道路の経済損失

図-7に一般道相当の道路密度分布、図-8に多雪年の2000年の道路経済損失分布を示す。秋田県は総じて道路経済損失が高く、山岳地に接する道路で1千万以上の被害額を示す。経済損失費の連続的分布から予測される危険度の高い道路区間は、秋田県本荘由利地区周辺の国道7, 107号線、鳥海エコーライン、秋田県と山形県の県境の国道13号線、山形県温海町の国道7号線、山形県朝日村の国道112号線、山形県高畠町から福島県境までの国道13号線、山形県と福島県の国道121号線、福島県西会津町の国道49号線、磐梯吾妻スカイラインである。これらはセル単位で5億円以上の経済損失を示す。位置的に出羽山地内、もしくは、接する国道および地方主要道という共通点をもち、出羽山地内の道路における土砂災害の脆弱性が示され、土砂災害対策と監視体制の重点的な整備の必要性が示唆される。近年の対策状況を比較し、更に、経済損失の高い地域の抽出が今後の課題である。

(3) 土砂災害の時系列変化

図-9に少雪年、通常年の土砂災害発生確率分布、図-10に道路経済損失分布を示す。少雪年の発生確率結果から、秋田、山形、福島県会津の出羽山地周辺が発生確率を示す地域である。発生確率80%以上の地域は日本海側地域に点在する程度である。通常年の結果では、多雪年とほぼ同地域に発生確率が認められる。出羽山地に発生確率80%程度の地域が集中する。なお、北上、阿武隈山地の発生確率は0%である。少雪年の道路経済損失の結果より、秋田県全域に道路区間で1千万円から5千万未満の道路経済損失が点在する。山形県、会津、福島県いわき市の阿武隈山地内で1千万円より大きい道路経済損失

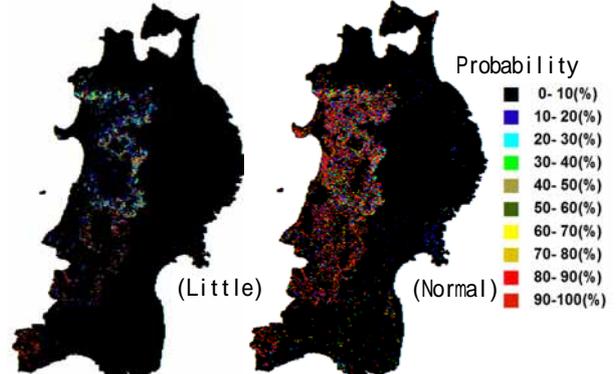


図-9 土砂災害発生確率分布(少雪年,通常年)

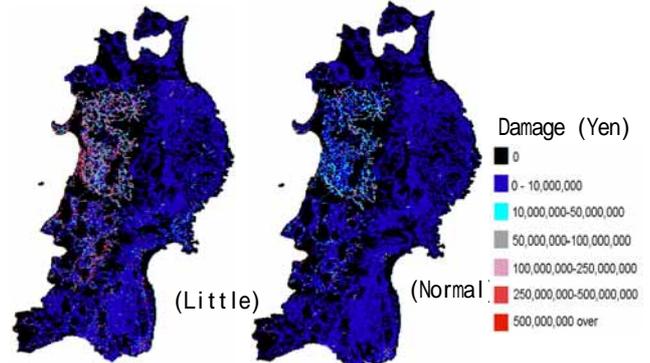


図-10 道路経済損失分布(少雪年,通常年)

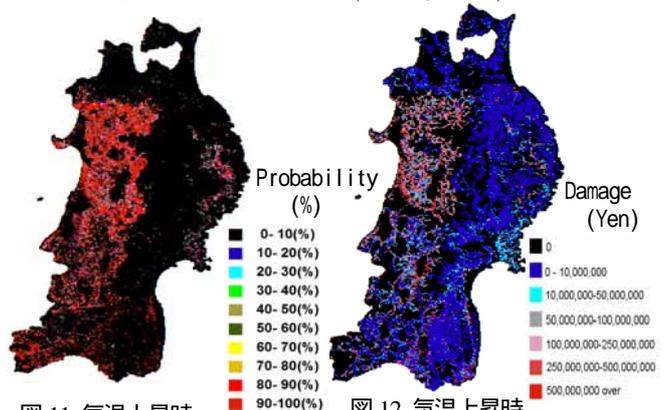


図-11 気温上昇時
土砂災害発生確率分布

図-12 気温上昇時
道路経済損失分布

が点在する。通常年の結果により、秋田県、山形県に5億円以上の道路経済損失を示すセルが分布し、秋田県本荘由利地区周辺の国道7, 107号線および鳥海エコーライン、秋田と山形の県境の国道13号線、山形県朝日村の国道112号線、山形県高畠町から福島県の県境付近の国道

13号線は連続で示されている。これらは、通年で土砂災害の危険性が高い至急対策の必要な地域と評価できる。

図-11に日平均気温1度上昇時の融雪による土砂災害発生確率、図-12に道路経済損失分布を示す。発生確率結果より、秋田県、山形県、福島県会津地方の山岳地が発生確率80%以上に变化する。福島県、宮城県丘陵地域の発生確率が上昇し、多雪年の北上山地東山麓の発生確率80%以上の領域が拡大化する。気温上昇の影響から、日本海側の山岳地全体、太平洋側の丘陵地における土砂災害の増加が予測される。道路の経済損失の結果より、経済損失は全域で概ね上昇し、秋田県内の道路は経済損失1千万円以上になる。また、太平洋側の道路経済損失の上昇が著しく、牡鹿半島一体、国道6号線に並行する相馬、原町の県道が高い経済損失を示す。現在、太平洋側地域の融雪による土砂災害は想定外だが、気温上昇に伴う融雪加速が生じた場合、太平洋側の道路も監視が必要である。なお、気温上昇に伴う融雪が発生した場合、多雪年の約2.5倍の道路経済損失となる。

6. 結論

土砂災害実績を利用して融雪に起因する土砂災害の発生確率モデルと経済損失モデルを構築し、結果を分布図に示した。以下に本研究の成果を列挙する。

- 1) 土砂災害の発生確率は、出羽山地周辺、阿武隈山地山裾、北上山地の東山麓が高い発生確率を示す。これらは多雪年で発生確率80%以上を示す。
- 2) 多雪年に山岳地に接する国道7, 13, 49, 108, 121号で概ね5億円以上の経済損失が連続に認められる。
- 3) 少雪、通常年は、経済損失、発生確率の高い地域が狭まるが、出羽山地で発生確率80%以上、経済損失5億円以上の地域が点在する。
- 4) 1の気温上昇により、日本海側のほとんどの山地は発生確率80%以上を示す。太平洋側は、北上山地、福島県と宮城県の丘陵で発生確率の上昇領域が存在し、発生確率80%以上になる。温暖化に伴う太平洋側の道路管理の重要性を示す結果が得られた。

今後の課題として、1997年5月に発生した八幡平の土石流の事例に示される、豪雨が著しい融雪現象を発生させることにより発生した土砂災害も解析する意向である。

謝辞：災害関連データを国土交通省東北整備局、福島県土木部より提供して頂いた。本研究は「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」の援助を受けた。謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤篤司：平成18年豪雪，自然災害科学，Vol.25，No.1，pp.71-

81, 2006.

- 2) 伊藤駿：積雪寒冷地帯における気象変動と地盤災害の変動、土と基礎，Vol.49，No.1，pp.5-8，2001.
- 3) Groisman, P.Y., T.R. Karl and R. W. Knight：Changes of snow cover, temperature and radiative heat balance over the Northern Hemisphere, J. Climate, Vol.7, pp.1633-1656, 1994.
- 4) 井上聡, 横山広太郎：地球環境変化時における降積雪の変動予測，雪氷，Vol.60，pp.367-378，1998.
- 5) 赤澤悠子, 沼口敦, 江守正多：地球温暖化に伴う積雪量変化の地域特性，水文水資源学会誌，Vol.18，No.5，pp.510-520，2005.
- 6) 風間聡, 沖大幹：温暖化による水資源への影響，地球環境，Vol.11，No.1，pp.59-65，2006.
- 7) 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹：降雨極値の再現期間を用いた斜面災害の発生確率，水工学論文集，Vol.50，pp.619-624，2006.
- 8) 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.
- 9) Iida, T.：A stochastic hydro-geomorphological model for shallow landslide due to rainstorm, CATENA, Vol.34, Issues 3-4, pp.293-313, 1999.
- 10) 丸山清輝, 武士俊哉：積雪地域地すべり防止のための地表面に達する日積雪内浸透量簡易推定式に関する検討，日本地すべり学会誌，Vol.41，No.4，pp.85-90，2004.
- 11) 植村昌一, 平松晋也, 井良沢道也：融雪に起因した表層崩壊発生予測モデル，日本地すべり学会誌，Vol.36，No.3，pp.76-84，1999.
- 12) 浅野志穂, 朴三奎, 松浦純生, 岡本隆：大規模地すべり地における融雪期の地下水流動解析，日本地すべり学会誌，Vol.36，No.4，pp.70-76，1999.
- 13) 泉宏和, 風間聡, 戸塚岳大, 沢本正樹：全日本の積雪水量，積雪深，全層積雪密度分布推定，水工学論文集，Vol.49，pp.301-306，2005.
- 14) 森脇寛, 矢崎忍, 黄文峰：降雨浸透に伴う地下水流の発達・減水過程と斜面崩壊に及ぼす影響に関する考察，日本地すべり学会誌，Vol.43，No.1，pp.9-19，2006.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 小池俊雄, 高橋裕, 吉野昭一：積雪面積情報による流域積雪水量の推定，土木学会論文集, No.357, - 3, pp.159-165, 1985.
- 18) 近藤純正, 本谷研, 松島大：新バケツモデルを用いた流域の土壌水分量，流出量，積雪水当量，及び河川水温の研究，天気，Vol.42，pp.821-831，1995.
- 19) 地盤学会東北支部：東北の地盤工学，pp.366，1997.
- 20) 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.
- 21) 水谷守, 阿部清治：確率論的リスク評価における不確実性分離に関する考察，JCOSSAR'95 論文集，pp.319-324，1995.

(2006.9.30 受付)