

斜面崩壊リスク評価に対する気候モデルの適用

EVALUATION OF FUTURE SLOPE FAILURE RISK USING GENERAL CIRCULATION MODEL OUTPUT

川越清樹¹・風間聡²・肱岡靖明³・高橋潔⁴

Seiki KAWAGOE, So KAZAMA, Yasuaki HIJIOKA and Kiyoshi TAKAHASHI

¹正会員 博士(環境科学) 東北大学大学院環境科学研究科 博士研究員(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20)

²正会員 博士(工学) 東北大学大学院環境科学研究科 准教授(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20)

³正会員 博士(工学) 国立環境研究所社会環境システム研究領域 主任研究員(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

⁴正会員 博士(工学) 国立環境研究所地球環境研究センター 主任研究員(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

Increase in intensity and frequency of heavy rain has been forecasted by the climate projection model with considering greenhouse effect. Extremely heavy rain can be a direct cause of slope hazard. It is necessary to make finer resolution rainfall information, and estimate slope hazards risk change. We tried to estimate maps of fine resolution extreme rainfall by using MIROC model output (SRES A1B) and Mesh Climate Value 2000 (JMA). And, we evaluated slope hazard probability in Japan from 1980 to 2050. As results, Hyogo, Nagano, Shizuoka, Niigata, Kanagawa, Gunma and Tochigi prefecture were projected to be newly added to high risk area with slope hazard probability higher over 95% probabilities extended due to climate change.

Key Words : Climate change, miroc, downscaling, extreme rainfall, probability

1. はじめに

近年、日本列島の高温化に伴う異常多雨の頻度増加¹⁾、異常多雨経験の少ない地域の降雨極値更新²⁾が認められている。多くの数値気候モデルでも将来の極端な気象事象の出現が示され、北半球高緯度の降雨強度と異常多雨頻度の増加が推察されている³⁾。これらは、人為起源の温室効果ガスの排出に伴う地球温暖化に起因した異常多雨の頻発、および多雨に伴う災害の発生を危惧させる⁴⁾。これに対し、温室効果ガス排出を規制する緩和策、降雨の影響を予測して事前に対策を講じる適応策の両面から、地球温暖化に伴う未然の災害防止が取り組まれている⁵⁾。

地球温暖化を含む気候変動による異常多雨の影響を把握するため、既往気象観測の結果による将来の降水の類推⁶⁾、過去の温室効果ガス排出実績と将来の排出シナリオを入力条件とした数値気候モデルシミュレーションから、降水情報の時空間分布の再現と予測が取り組まれている。数値気候モデルの出力データは、数値地理情報と重ね合わせた解析に利用できるため、地球環境変化の影響をマップ化する研究に活用できる。影響マップは、環境変化に対して脆弱な地域の抽出を可能にし、適応策に

貢献できる成果となる⁷⁾。しかし、数値気候モデルの空間解像度は0.5°から2.5°程度と粗く、海洋に囲まれた山岳列島を成す日本列島に認められる地形に依存した局地的降水分布⁸⁾の明示が困難である。そのため、災害予報に活用されるレーダーアメダス、ナウキャスト等と同等の解像度1km×1kmの情報が必要になる。この要望に対し、数値気候モデルのダウンスケーリングが取り組まれている。ダウンスケーリング解析手法は、既往気象データを基に統計的空間処理を行う「統計的ダウンスケーリング」、大気水循環を細かな領域気候モデルで計算する「力学的ダウンスケーリング」⁹⁾に分類される。力学的ダウンスケーリングには高性能計算機による解析機能が必要となる。一方、温暖化影響の関心の高まりとともに容易に数値気候モデルのデータを取得できる環境が整備され、海面気圧と比湿を説明変数にした正準相関解析¹⁰⁾、観測値で認められる気温と降水量の関係¹¹⁾等による統計的ダウンスケーリング解析手法の開発が進められている。

本研究では、統計的ダウンスケーリングの解析手法として、現在の気候条件の空間情報を示す「メッシュ気候値2000(監修：気象庁)」を利用し、数値気候モデルの降雨データの空間分布細分化(解像度1km×1km)を試みた。メッシュ気候値2000は、地形条件等を説明変数に重回帰

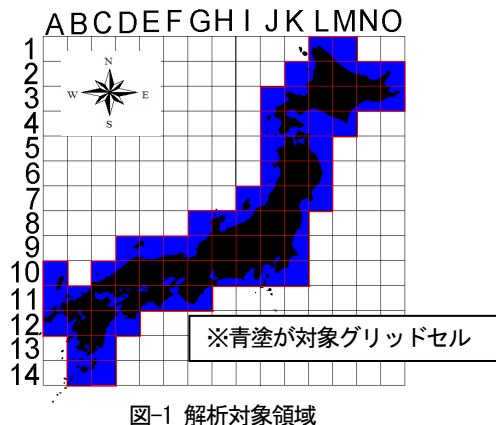


図-1 解析対象領域

式から列島全域の気象平年値を解像度1km×1kmで示している¹²⁾。そのため、このデータをダウンスケーリングのベースに用いることで地形依存度の高い局地的な降雨分布を効率的に細分化できる。メッシュ気候値2000の平年降水量、数値気候モデルの過去、現在、将来の平年降水量と最大日降水量の利用から、1980年から2050年の降雨極値データを作成した。また、降雨による災害情報への活用として、斜面崩壊発生確率モデル¹³⁾による斜面崩壊リスクの評価を試みた。土地利用開発に伴い社会活動域が斜面に接近していること、災害による犠牲者が多いこと¹⁴⁾から斜面崩壊による被害拡大が懸念されている。これに対し、タンクモデルへの降水短期予報の入力により導かれる土壌雨量指数¹⁵⁾、斜面崩壊に対する降雨、地下水の感度から求められる気候変動の危険度¹⁶⁾、斜面の変動履歴と気候変動から推計される危険度¹⁷⁾等の評価が取り組まれている。本研究の特徴として、数値気候モデルを基に過去から将来に至る長期の斜面崩壊のリスクを時空間情報で示したこと、適応策の議論への指標となる経済損失に利用できる発生確率を求めたこと、日本列島という広範領域を対象にしたことが挙げられる。降雨ダウンスケーリングと斜面崩壊リスク評価の取り組みから、気候変動による斜面崩壊の影響をマップ、時系列変化の情報で示した。

2. データセット

数値気候モデル出力データのダウンスケーリングと斜面崩壊発生確率の解析に用いたデータを以下に説明する。

(1) 数値気候モデル出力データのダウンスケーリング

ダウンスケーリングにはメッシュ気候値2000と数値気候モデルから出力された降水量データを利用した。メッシュ気候値2000は1971年から2000年までの30年の平均を示す平年値月降水量を格納したデータである。数値気候モデルには、東京大学気候システム研究センター、国立環境研究所、海洋研究開発機構地球環境フロンティアセンターの共同開発したSRES(Special Report on Emissions Scenarios)-A1B実験の大気海洋陸面結合モデルである

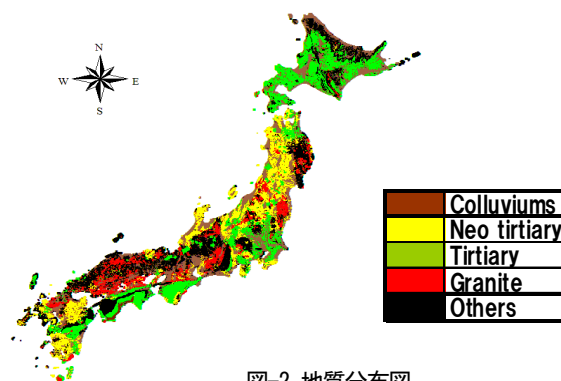


図-2 地質分布図

表-1 土壌の詳細条件

土壌	飽和透水係数 $K_s(\text{cm/s})$	飽和体積含水率 θ_s	残留体積含水率 θ_r	土壌係数 β	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}	0.50	—	5	黒ボクポドソル、森林、湿性森林
粘土	1×10^{-5}	0.60	—	20	泥炭

MIROC(Model for Interdisciplinary Research On Climate)3.2の解像度100km×100kmの出力データを用いた。SEES-A1Bは化石燃料・非化石燃料利用のバランスによる高成長型社会を想定した温室効果ガスの排出シナリオである。解析に用いたデータ期間は1951年から2050年である。日本列島全域を覆う計65個のグリッドセルを解析の対象とした。(図-1参照)

(2) 斜面崩壊発生確率解析

斜面崩壊発生確率は、地質データ、地形データ、水文データから導かれる。各データは解像度1km×1kmの数値地理情報である。

a) 地質データ

地質データは国土数値情報KS-META-G05-54Mから取得した。多雨に伴う斜面崩壊の生じやすい地質である崩積土、新第三系堆積岩、第三系堆積岩、花崗岩を評価の対象にした。図-2に日本列島の各地質の分布を示す。

b) 地形データ

地形データとして起伏量を用いた。起伏量は国土数値情報KS-META-G05-56Mに格納された最高標高と最低標高の差から求められた。

c) 水文データ

水文データとして動水勾配を用いた。国土数値地理情報KS-META-G05-54Mの表層土壌とKS-META-G05-56Mの斜面傾斜度より求められるグリッドセルの2次元の代表斜面(50m×10m)にRichardsの飽和不飽和浸透解析モデルを適用し、動水勾配が求められた。浸透解析に数値気候モデルから得られた降雨条件を入力することで、気候変動の降雨に応じた動水勾配を導くことができる。式(1)は浸透解析式である。

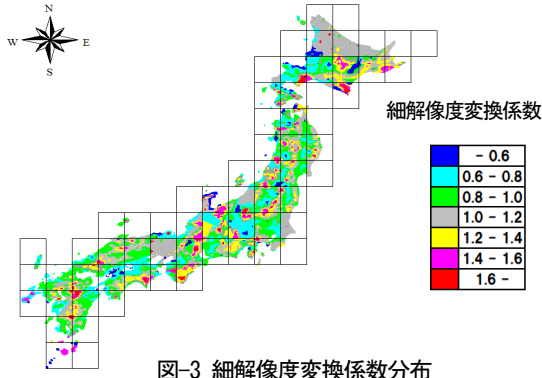


図-3 細解像度変換係数分布

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

ここで C :比水分容量($=\partial \theta / \partial \psi$), θ :体積含水率, ψ :圧力水頭(cm), t :時間(sec), K :不飽和透水係数(cm/sec), α :斜面傾斜度($^\circ$)である. 添え字の x は水平方向, z は水平方向である. 体積含水率 θ は式(2)に示す谷式¹⁸⁾, 不飽和透水係数 K は式(3)に示す一般化Kozeny式¹⁹⁾から求めた. 表層土壌は, 4パターンに分類し, 層厚10mで堆積している条件とした. 表-1に各土壌の詳細条件を示す.

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

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

ここで θ_r :残留体積含水率, θ_s :飽和体積含水率, ψ_0 : C が最大となる ψ , Ks :飽和透水係数, β :土壌係数である.

3. 解析方法

数値気候モデル出力データのダウンスケーリングと斜面崩壊発生確率の解析手法について説明する.

(1) 数値気候モデル出力データのダウンスケーリング

メッシュ気候値2000を基礎データに数値気候モデル出力データのダウンスケーリングを試み, 各年に対する日降雨量極値を解像度1km $\times$ 1kmで明示した. 式(4)は, 数値気候モデルから解像度1km $\times$ 1kmの日降雨量の極値を求める関係を示している.

$$R_{ij} = Bd_{ij} \cdot Bm_j \cdot (\varepsilon_j \cdot m_j + \mu_j) \quad (4)$$

ここで R :最大日雨量(mm), Bd_{ij} :細解像度変換係数, Bm_j :気候モデル補正係数, ε_j :降雨極値変換式係数, μ_j :降雨極値変換式切片, m :MIROCの暖候期(4月から10月)の最大月降雨量平年値(mm)である. i は解像度1km $\times$ 1km, j は解像度100km $\times$ 100kmの要素である. なお, 平年値は過去30年の平均した値と定義する. 以下に各係数の定義, 決定条件について説明する.

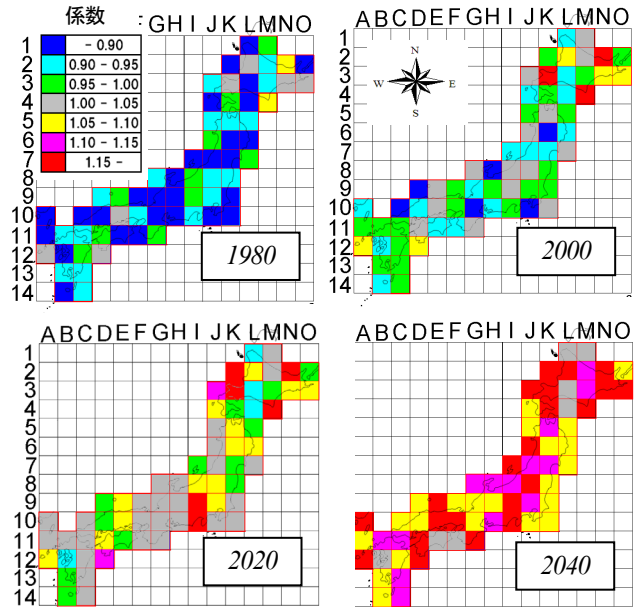


図-4 モデル補正(MIROC/Mesh2000)係数分布 (6月)

a) 細解像度変換係数 Bd_{ij}

細解像度変換係数はMIROCの座標, 解像度と一致するように変換させた解像度100km $\times$ 100kmのメッシュ気候値2000の平年値月降水量(解像度1km $\times$ 1kmのデータを解像度100km $\times$ 100kmで平均した値)に対するメッシュ気候値2000の解像度1km $\times$ 1kmの平年値月降水量比である. この比を係数として設定し, 式に導入することで解像度100km $\times$ 100km中の解像度1km $\times$ 1kmの降雨量の重みを把握できる. この重みは地形的要因による降雨の地域特徴を示す. 図-3は6月の平年値月降水量に対する細解像度変換係数の分布である. 標高の高い地域は高い係数になる傾向を示す. また, 広範に平野の広がる北海道北部は係数変化に乏しいことが示されている. なお, 4月から10月の各月ともに係数の分布傾向は一致している.

b) 気候モデル補正係数 Bm_j

気候モデル補正係数は式(5)より得られるメッシュ気候値2000とMIROCデータの平年値月降水量の比である.

$$Bm_j = a_j / b_j \quad (5)$$

ここで a_j :MIROCデータの平年値月降水量, b_j :メッシュ気候値2000の平年値月降水量を解像度100km $\times$ 100kmで平均した値である. 気候モデル補正係数は1980年から2050年までの各年, 4月から10月に至る各月毎に導かれた. 図-4は1980年, 2000年, 2020年, 2040年の6月の気候モデル補正係数分布である. 1980年は補正係数0.90未満のグリッドセルが日本列島沿岸域, および東北地方南部, 近畿地方に集中する. その他の地域は0.90以上1.00未満の補正係数である. 2000年は北海道沿岸部, 九州南部沿岸域で1.05以上の補正係数を示す. その他の地域は0.95以上1.00未満の補正係数の地域が卓越する. この傾向はメッシュ気候値2000よりもMIROCの平年値月降水量が小さいことを示す. 2020年は, 北海道沿岸部, 東海・甲信越で補正係数1.15以上を示し, 日本アルプスよ

りも北部の補正係数の高まりが認められる。2040年は日本列島の概ねが補正係数1.05以上の地域に変化する。ただし、2020年と同様に列島北部の補正係数の高まりが認められる。数値気候モデルの出力は、気候変動に伴う日本列島北部の降雨の変動しやすさを示している。なお、各月ともに同様の変動傾向を示している。

c) 降雨極値変換式係数 ε_j および切片 μ_j

降雨極値変換係数と切片はMIROCデータにおける暖候期中の最大平年値月降水量と最大日降水量の関係から求められた。なお、暖候期の最大日降水量は過去30年の最大値である。この係数および切片を1980年から2050年に至る各年で導いた。川越ら¹³⁾や牛山ら²⁰⁾はAMeDASにおける降雨の平年値と降雨極値の強い相関から、現在気候に対する降雨の平年値から降雨極値を求める線形の変換式を作成した。本研究では、このアルゴリズムを過去から将来に至る各年に適用した。なお、暖候期を対象にしているため降水量は降雨量と見なせる。図-5は1980年、2000年、2020年、2040年の暖候期の最大日降水量と暖候期中の最大平年値月降水量との関係を示したものである。これらの関係は、2000年の決定係数 $R^2=0.6015$ を最大とし、概ね0.60前後の強い相関で示された。この強い相関から、過去から将来の気候状況に対しても降雨極値を求める変換式の適用が可能であることを示している。

(2) 斜面崩壊発生確率解析¹³⁾

斜面崩壊発生確率モデルは、斜面崩壊の頻発を引き起こした多雨イベント、地域の実績を多重ロジスティック回帰分析に適用することで構築された斜面崩壊リスクの評価手法である。2004年7月12日から13日の「新潟・福島豪雨」に伴う新潟県栃尾市に位置する浅草岳から魚沼丘陵の深層崩壊分布²¹⁾をデータ化し、モデルの構築に用いた。斜面崩壊の有無の関係を100%と0%に設定し、この関係を説明するための変数群をロジスティック曲線で示した。相関行列、モデル式の有意基準5%以内の検討も踏まえ、起伏量、動水勾配を説明変数にする重回帰式でロジスティック曲線を示す斜面崩壊発生確率モデルを開発した。モデルは4つの地質条件毎に作成した。モデル式は式(6)である。

$$P = \frac{1}{1 + \exp[-(\sigma + \sigma_h x_h + \sigma_r x_r)]} \quad (6)$$

ここで、 P :発生確率、 σ :切片、 σ_h :動水勾配係数、 x_h :動水勾配、 σ_r :起伏量係数、 x_r :起伏量である。このモデルから導かれる発生確率は、ある条件を基に現象が生起する条件付確率であり、説明変数の変化に伴い100%から0%の間に存在する発生確率を得ることができる。地質毎の説明変数を表-2に示す。標準化回帰係数から、各斜面崩壊発生確率モデルとともに動水勾配が最大となり、降雨量の増加が斜面崩壊の発生を促すことを示している。なお、このモデルから得られた全国各地におけるダム上流域の

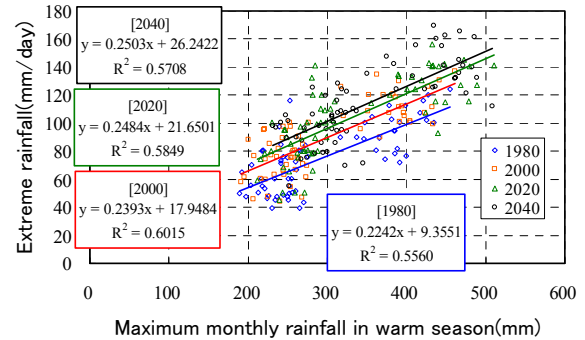


図-5 暖候期の最大平年値月降水量と降雨極値の関係

表-2 土砂崩壊発生確率モデルの係数

地 質	項 目	動水勾配	起伏量	切 片
崩 積 土	係数 σ	25.99	0.16	-15.97
	有意確率 p 値	0.01	0.03	0.03
	標準化回帰係数	3.25	2.96	-
新第三系 堆 積 岩	係数 σ	19.64	0.14	-19.29
	有意確率 p 値	0.01	0.02	0.03
	標準化回帰係数	2.37	1.96	-
古第三系 堆 積 岩	係数 σ	14.31	0.11	-24.97
	有意確率 p 値	0.05	0.03	0.03
	標準化回帰係数	2.15	2.02	-
花 崗 岩	係数 σ	9.31	0.13	-35.99
	有意確率 p 値	0.04	0.04	0.05
	標準化回帰係数	1.37	1.26	-

発生確率とダムの堆砂実績の関係を検証したところ、強い相関が認められた²²⁾。この結果から、斜面崩壊の発生確率は、解像度1km×1km、副流域の巨視的領域において土砂収支を概ね再現でき、日本列島という広範の斜面崩壊の評価の推算できると解釈できる。

4. 数値気候モデルダウンスケーリングの結果

図-6にダウンスケーリング手法により求められた1980年、2000年、2020年、2040年の日降雨量極値の分布を示す。1980年の日降雨量極値分布によると、九州山地山頂部の日雨量200mm以上を最大に、和歌山県から鹿児島に至る日本列島南海地域、日本アルプス、および日本海沿岸に近接する越後山地から出羽山地の山地群が日雨量125mm以上の多雨地域になる。また、以降の年でもこれら地域は相対的に多雨地域になることが示されている。これら多雨地域を除くと、2000年では、中国山地南西部、関東山地から足尾山地、奥羽山脈の山頂部、2020年では、中国山地北部の山陰地方、日高山脈、2040年では、丹沢山地、阿武隈山地と北上山地の東部の日降雨量増大が認められる。また、2040年には北海道北部を除く概ねが日降雨量100mm以上となる。

5. 斜面崩壊リスク分布の結果

図-7に1980年、2000年、2020年、2040年の斜面崩壊発生確率の分布を示す。1980年の斜面崩壊発生確率分布によれば、発生確率95%以上の集中する地域は、和歌山県か

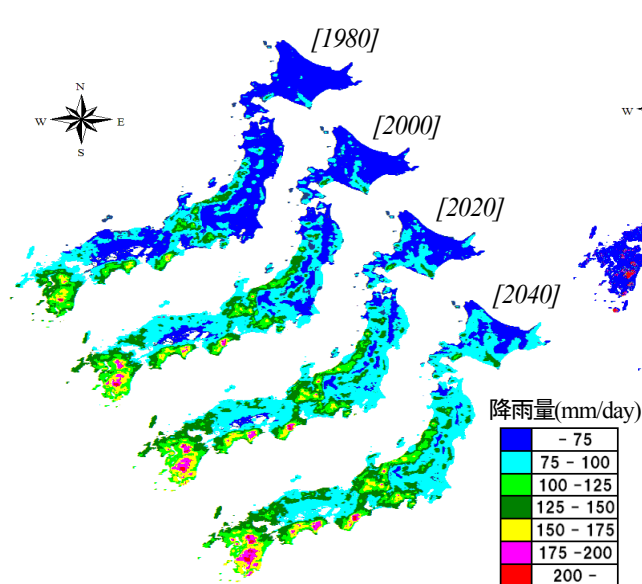


図-6 日降雨量極値分布

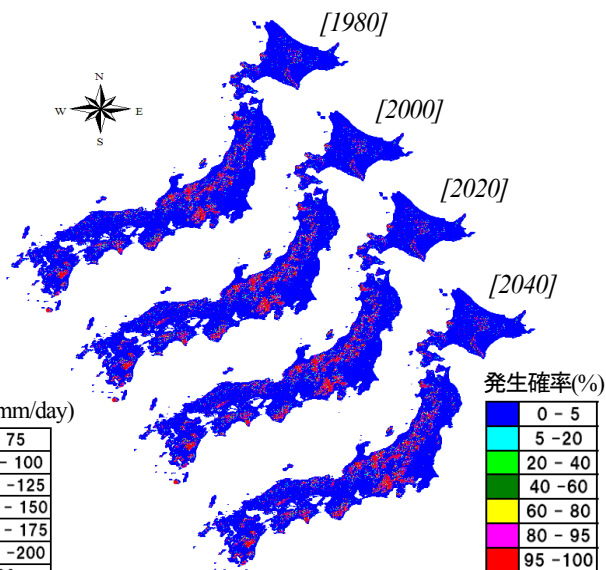


図-7 土砂崩壊発生確率分布

ら鹿児島に至る日本列島南海地域、糸魚川ー静岡構造線沿いの日本アルプス、日本海沿岸に近接する越後山地である。2000年には、中国山地の南側山裾部である広島県、鹿児島県のシラス台地に発生確率95%以上の集中する地域が認められる。これらの地域は、市街地に接し、現在まで斜面崩壊による甚大な被害の頻発を記録している。広島県を参考にすると、大正15年、昭和3年、昭和20年、昭和26年、昭和42年、昭和57年、平成3年、平成5年、平成11年に人的被害を含む斜面災害が認められ、近年の斜面災害の発生頻度の増加が示されている。1980年から2000年の斜面崩壊リスクの増加が災害実績にも示され、対策優先度の高い地域になることを示唆している。2020年には、兵庫県の中国山地東部と丹後山地の境界付近、長野県、静岡県と愛知県の県境である赤石山脈南部、美濃三河高原に発生確率95%以上の集中が認められる。2040年には、新潟県、長野県と群馬県の県境である三国山地、関東平野を囲む足尾山地、関東山地と丹沢山地(神奈川県、群馬県、栃木県)に発生確率95%以上の集中が認められる。2020年、2040年につれて発生確率の高まる地域は、気候変動による影響の大きい地域と推察され、対策もしくは対策検討のための調査が必要と考えられる。

6. 気候変動による斜面崩壊リスク変化

1980年から2050年に至る各年の日降雨量極値、斜面砂崩発生確率(ただし国土数値情報で平均斜面傾斜度が5°以上を示すグリッドセルのみを対象)を日本列島で平均し、図化したものが図-8である。この図から斜面崩壊リスクの高まる時期を特定でき、気候変動に対する斜面崩壊対策計画の目標設定に利用できる。また、図には平均気温変化(MIROCの出力データ)の情報も示した。平均気温変化の情報は、地球温暖化に伴う災害の緩和策となる

温室効果ガス排出規制の目標設定に有用である。

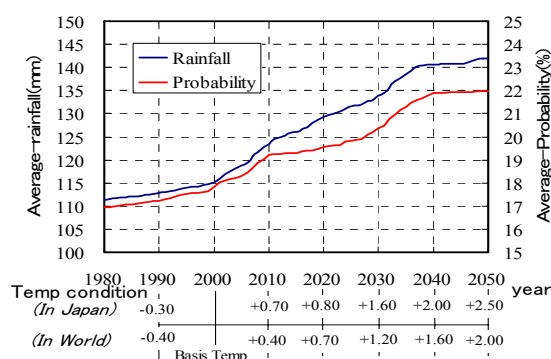


図-8 日本列島の平均日降雨量極値と土砂崩壊リスクの推移

結果として、日降雨量極値の日本列島平均は、1980年から2000年までは微増であるものの、2000年から2037年にかけて急増することを示す。特にこの期間内で激しい増加が認められるのは、2000年から2011年、2028年から2037年である。2037年以降はほぼ同様の日降雨量を示す。斜面崩壊発生確率の急増期間は日降雨量極値の日本列島平均と同様で2000年から2011年、2028年から2037年である。2000年を基準にした気温変化と比較した場合、日本列島では、およそ0.0℃から0.7℃(2000年から2010年)、1.6℃から2.0℃(2030年から2040年)の間に斜面崩壊発生確率が高まることを示している。世界を対象にした場合、およそ0.0℃から0.4℃(2000年から2010年)、1.2℃から1.6℃(2030年から2040年)である。2028年から2037年は現況以上の高いリスクの中で生ずる急激な発生確率の高まりであり、2050年までの気候変動に着目した場合の最も危険な状態を示す。そのため、今回の結果を参考にすれば、この時期に概ねの危険箇所を斜面崩壊対策を完工させること、また、温室効果ガスの排出も日本列島で1.6℃から2.0℃、世界で1.2℃から1.6℃の気温上昇にならぬよう規制することが提案される。

7. おわりに

メッシュ気候値2000を基礎データとして数値気候モデルの降雨ダウンスケーリングに取り組み、1980年から2050年までの斜面崩壊リスクをマップ、時系列変化の情報で示した。本研究の結果を以下に列挙する。

- 1) 1980年から2000年の変化により、中国山地の南側山裾部である広島県、鹿児島県のシラス台地に斜面崩壊発生確率95%の集中する地域が新たに認められた。
- 2) 2000年から2020年の変化により、兵庫県の中国山地東部と丹後山地の境界付近、長野県、静岡県と愛知県の県境である赤石山脈南部、美濃三河高原に斜面崩壊発生確率95%以上の集中が新たに認められた。
- 3) 2020年から2040年の変化により、新潟県、長野県と群馬県の県境である三国山地、関東平野を囲む足尾山地、関東山地と丹沢山地(神奈川県、群馬県、栃木県)に斜面崩壊発生確率95%以上の集中が新たに認められた。
- 4) 日本列島で平均した斜面崩壊発生確率から、2000年から2011年、2028年から2037年にリスクの急増が認められた。

ただし、本研究はMIROCによるSRES-A1B実験のみの解析結果である。そのため、今後、異なる排出量想定による数値気候モデルの結果も検討し、総合的な気候変動による斜面崩壊リスクを評価する意向である。

謝辞：本研究は環境省地球環境研究総合推進費（S-4）と日本大学学術フロンティア推進事業の研究助成によって行われた。数値気候モデルデータ処理でみずほ情報総研株式会社に指導を頂いた。ここに記して謝意を示す次第である。

参考文献

- 1) 気象庁：異常気象レポート2005, http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/climate_change, Cited 2008/09/30.
- 2) 牛山素行：2004年新潟・福島豪雨と”豪雨空白域”，土木学会水工学論文集, No.49, pp.445-450, 2005.
- 3) 例えばShiogama, H., Hasegawa, A., Nozawa, T., and Emori, S.: Changes in mean and extreme precipitation in near-term predictions up to the year 2030. SOLA, Vol.4, pp.17-20, doi:10.2151/sola, 2008.
- 4) 例えば風間聡・沖大幹：温暖化による水資源への影響，地球環境, Vol.11, pp.59-65, 2006.
- 5) 例えばIntergovernmental Panel on Climate Change: Impacts, Adaptation and vulnerability, <http://www.ipcc-wg2.org>, Cited 2007/09/30.
- 6) 例えば篠田昌弘:AMeDASデータを用いた確率雨量マップ，土木学会論文集B, Vol.63, pp.195-205, 2007.
- 7) 例えばRobert Leander. T., Adri Buishand., Bart. J.J.M., Van den

- Hurk., and Marcel. J., M.,: Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output, Journal of Hydrology, Vol.351, pp.331-343, 2008.
- 8) 例えば鈴木善晴・鎌田雅憲・宮田昇平・中北英一・長谷部正彦・池淵周一：降雨-地形関係の時空間変動特性を考慮した山岳域における降雨分布特性の解析，土木学会水工学論文集, No.49, pp.265-270, 2005.
- 9) 例えばMearns, L. O., F. Giorgi., McDaniel., and C. Shields.: Climate scenarios for the southeastern U.S. based on GCM and regional model simulations, Climate Change, Vol.60, pp.7-35, 2003.
- 10) Busuioc. A., Giorgi, X. Bi., and M. Ionia.: Comparison of regional climate model and statistical downscaling simulation of different winter precipitation change scenarios over Romania, Climatology, Vol.86, pp.102-123, 2006.
- 11) Palutikof. J. P., C. M. Goodess., S. J. Watkins., and T. Holt.: Generating rainfall and temperature scenarios at multiple sites; Examples from the, Journal of Climate, Vol. 15, pp.3529-3548, 2002.
- 12) 清野 諭: アメダスデータのメッシュ化について，農業気象, Vol.48, pp.319-383, 1993.
- 13) 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確率モデルの構築，自然災害科学, Vol.27, Issue1, pp.69-83, 2008.
- 14) 牛山素行:2004～2007年の豪雨災害による人的被害の原因分析,土木学会河川技術論文集, Vol.14, pp.175-180, 2008.
- 15) 牧原康隆:気象レーダーを利用した短時間の降水・土砂災害予報と気象業務改善の歩み，天気, Vol.54. Issue1, pp.21-33, 2006.
- 16) Martin Dehn., Gerd Bürger., Jelle Buma., and Paolo Gasparetto: Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling, Engineering Geology, Vol.55, pp.193-204, 2000.
- 17) Mauro Soldati, Alessandro Corsini., and Alessandro Pasuto: Landslides and climate change in the Italian Dolomites since the Late glacial, CATENA, Vol.55, pp.141-161, 2004.
- 18) 谷誠：一次元鉛直不飽和浸透によって生ずる水面上昇の特性，日本林学会誌, Vol.64, Issue11, pp.408-418, 1982.
- 19) Brutsaert. W., F: The permeability of a porous medium determined from certain probability laws for pore size distribution, Water resource research, Vol.4, pp.425-434, 1968.
- 20) 牛山素行・寶馨：AMeDASデータによる暖候期降水量と最大1時間・日降水量の関係，水文・水資源学会誌, Vol.16, pp.368-374, 2003.
- 21) 山岸宏光・アヤレウルルセグド・大谷政敬・加藤晃司：土砂災害の調査法とデータベース化に関する研究-2004年7.13新潟中越地域による同時多発斜面災害-，研究助成事業報告書，日本建設情報総合センター，2004.
- 22) 秋本嗣美・川越清樹・風間 聡・沢本正樹：土砂崩壊によるダム貯水池の影響評価，土木学会水工学論文集, No.49, pp.571-576, 2008.

(2008. 9. 30受付)