

## 4. 温暖化政策支援モデルを用いた 気候変動に対する斜面崩壊影響評価

川越 清樹<sup>1\*</sup>・肱岡 靖明<sup>2</sup>・高橋 潔<sup>3</sup>

<sup>1</sup>福島大学大学院共生システム理工学研究科 准教授 (〒960-1296 福島県福島市金谷川1)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>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)

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

複数のSRESおよび数値気候シナリオを斜面崩壊発生確率モデルに入力し、SRESシナリオ別の今世紀中頃(2046年から2065年)、今世紀末(2081年から2100年)の気候変動に対する都道府県別斜面崩壊発生リスクを推計した。さらに、同モデルにより求められた影響関数を温暖化政策支援モデルAIM/Impact[Policy]に実装することで、GHG濃度安定化レベル別の災害リスク軽減効果を推計した。結果として、1)日本列島北部は斜面崩壊発生確率増加が著しく増加する。2)現在も高発生確率の新潟県、富山県、静岡県、徳島県、高知県、宮崎県は、更に発生確率上昇が見込まれる。3)GHG濃度安定化の評価より、緩和策だけで温暖化による発生確率増加を十分に低減できないことが見込まれる。

**Key Words :** General Circulation Models, heavy rainfall, probability, greenhouse gases

### 1. はじめに

人為起源の温室効果ガス(以下 GHG)濃度増加に従う気候システムの温暖化、および温暖化による地球環境への影響は、安全かつ持続可能な社会を目指すうえでの重要な関心事である。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第4次評価報告書(以下 IPCC AR4)では、SRES(Special Report on Emissions Scenarios)排出シナリオを想定した様々な研究機関の数値気候モデルの出力結果が評価され、資源や災害に係るリスクの増大が指摘された。リスク低減への対策として「緩和策」と「適応策」を補完的に用いることが必要とされており、低炭素・循環型社会への順次的移行、温暖化に適応できる社会形成が取り組まれようとしている。これに対して、具現化した対策を提案するために数値気候モデルの精度向上<sup>1)</sup>、リスク変化のメカニズムの解明とモデル化<sup>2)</sup>、リスクを低減させるための対策を誘導しやすい時空間的な影響評価<sup>3)</sup>等の多角的なアプローチから気候システムの温暖化に対する研究が進められている。これらの研究の取り組みの中で、温暖化政策支援モデルAIM/Impact[Policy](以下 AIP)は、GHG濃度、気温上昇に応じた地球環境に対する影

響解析を目的に開発されたものである<sup>4)</sup>。GHG濃度や全球平均気温の目標値を設定すると、その目標を費用最小に達成させるための排出経路、ならびにその削減経路の下での気候変化量が計算され、さらに同モデルに実装された各種の影響関数を用いることで、気候安定化目標達成による被害軽減効果を時間軸に応じて把握することができる。そのため、緩和策と適応策を講じるべき時間的な目標設定に有用な成果となる。

環太平洋造山地域に属し急峻な地形と脆弱な地質を成す日本列島において、気候システムの変動に従う土砂災害リスクの増加は重点的な懸案事項である。多くの数値気候モデルの出力結果は、気温上昇だけでなく、極端な気象事象出現の増加を示し、北半球における降雨強度と多雨頻度等の異常降雨現象の増加を推計している<sup>5)</sup>。異常降雨現象は、間隙水圧上昇に伴う斜面土塊の抵抗力低下を促し、斜面の不安定化を生じさせる。日本列島では、梅雨の停滞、台風の接近により斜面崩壊の頻発に起因した土砂災害が数多く認められてきた<sup>6)</sup>。この経験は、気候システムの温暖化による異常降雨増加に伴う日本列島の土砂災害リスク増大の脅威を示唆する。これに対し、筆者らは、数値気候モデルより推計される降雨出力デー

表-1 解析利用の数値気候モデル

| Models name     | Country   | SRES |    |    | Output<br>Grid cells | Atmospheric resolution | Oceanic resolution         |
|-----------------|-----------|------|----|----|----------------------|------------------------|----------------------------|
|                 |           | A1B  | A2 | B1 |                      |                        |                            |
| CCCma-t47       | Canada    | ○    | ○  | ○  | 48×96                | T47, L31               | 1.8lon×1.8lat, L29         |
| MRI-CGCM2.3.2   | Japan     | ○    | ○  | ○  | 64×128               | T42, L30               | 2.5lon×2.0-0.5lat          |
| SIRO-Mark3.5    | Australia | ○    | ○  | ○  | 96×192               | T63, L18               |                            |
| CNRM-cm3.0      | France    | ○    | ○  | ○  | 64×128               | T63, L45               | 183×152grids               |
| ECHAM5          | Germany   | ○    | ○  | ○  | 96×192               | T63, L31               | 1.5lon×1.5lat              |
| GFDL-cm2.0      | USA       | ○    | ○  | ○  | 90×144               | 2.5lon×2.0lat, L24     | 1.0lon×1.0lat              |
| GFDL-cm2.1      | USA       | ○    | ○  | ○  | 90×144               | 2.5lon×2.0lat, L24     | 1.0lon×1.0lat              |
| INM-cm3.0       | Russia    | ○    | ○  | ○  | 45×72                | 5.0lon×4.0lat, L21     | 2.5lon×2.0lat, L33         |
| MIROC3.2-medres | Japan     | ○    | ○  | ○  | 64×128               | T42, L20               | 1.4lon×0.5-1.4lat, L43     |
| NCAR-ccsm3      | USA/Japan | ○    | ○  | ○  | 128×256              | T85, L26               | 1.125lon×0.27-1.00lat, L40 |

タと数値化された日本列島の斜面崩壊履歴，地形地質情報に関連付けることで，気候システムの温暖化に従う降雨極値変動に応じた斜面崩壊リスク評価モデルを開発した<sup>7)</sup>。また，このモデルを利用し斜面崩壊の影響評価に取り組み，これまでMIROCやMRI-RCM Ver.2の気候シナリオを用いて温暖化による将来の影響評価を実施した<sup>8)</sup>。

本研究では，環境重視と経済重視，地域化とグローバル化の対極的な社会発展を想定した複数のSRES排出シナリオ，および気候システムを異なる形式で定式化した各研究機関の数値気候モデルの気候シナリオを用いた影響評価を実施し，将来に生じうる影響の不確実性を評価した。さらに，温暖化政策支援モデルAIPを用い，複数の気候モデルを用いてパターンスケリングの不確実性を考慮しながら，GHG安定化レベルの違いによる温暖化に伴う斜面崩壊発生確率の影響を地域毎に評価した。対象領域は日本列島全域である。この成果は，緩和策による斜面崩壊リスク軽減効果を定量化したものである。

## 2. 解析方法

本研究の流れは(a)から(c)に示すとおりである。

- 複数の数値気候モデルによる気候シナリオから，ダウンスケーリング手法を用いて，3次メッシュの日別降雨量シナリオを作成した(第3章 参照)。
- 斜面崩壊発生確率モデルに10つの数値気候モデル，3つのSRESのシナリオを入力し，地域別の斜面崩壊発生確率を評価した。
- 斜面崩壊発生確率モデルから求められる日降雨極値変化に応じた斜面崩壊発生確率の「影響関数」をモデルの影響モジュールとして，AIPに実装し，2つのGHG濃度安定化シナリオを用いた影響評価を実施した。

なお，AIPに実装した影響関数は，斜面崩壊発生確率モデルから得られた結果を国土数値情報の都道府県コードを用いて都道府県毎に平均値で集計したものである。よって，AIPより求められる影響は都道府県単位で把握することができる。以下に，日降水量シナリオ，斜面崩

壊発生確率モデル，AIPの詳細を説明する。

### (1) 日降水量シナリオ

AIPに利用した数値気候モデルの出力データを表-1に示す。利用された数値気候モデルは，SRES-A1B(化石・非化石燃料バランスによる高成長型社会)，SRES-A2(多元社会)，SRES-B1(持続発展型社会)のマルチシナリオに対応できる出力データを含むものである。

いずれの数値気候モデルの出力データともに数100km×数100kmの粗い解像度であるため，都道府県の領域にあわせた気候値の抽出が困難である。本研究では，メッシュ気候値2000(監修：気象庁)のデータを基に3次メッシュにダウンスケーリングを試みた<sup>11)</sup>。また，国土数値情報の都道府県コードを利用し，3次メッシュデータを都道府県別に平均値で集計した。数値気候モデルの気候値を都道府県別に集計するまでの過程を以下の(a)から(d)に示す。

- 数値気候モデルの解像度に平均化したメッシュ気候値2000の気候値と数値気候モデルの1971年から2000年の月気候値の比(モデル補正係数 $Bm_j$ )を求める。
- 数値気候モデルの解像度に平均化したメッシュ気候値2000の月気候値とこのメッシュ内のメッシュ気候値2000の月気候値の比(細解像度変換係数 $Bd_{ij}$ )を月毎，および3次メッシュ毎に求める。
- モデル補正係数 $Bm_j$ ，細解像度変換係数 $Bd_{ij}$ を数値気候モデルの日毎の気象値 $m_j$ に乗じて3次メッシュ毎の気象値 $R_{ij}$ を求める。以下(2)に変換式を示す。

$$R_{ij} = m_j \cdot Bm_j \cdot Bd_{ij} \quad (2)$$

- 3次メッシュの気象値を国土数値情報の都道府県コード毎に集計し，平均することにより都道府県の日気象値を求める

### (2) 斜面崩壊発生確率モデル<sup>7)</sup>

斜面崩壊発生確率モデルは，多重ロジスティック回帰分析による統計理論を用いて開発された。ある事象に対する

発生の有無を示す「1」，「0」の二項分布をロジスティック曲線で連結し，連続的な関数を成立させる．ロジスティック曲線を重回帰式で解くことでモデルが構築された．ここで得られる成果は，従属条件の変化に応じて0から1の間で推移する発生確率であり，ある条件下を基に現象が生起する条件付確率として定義される．斜面崩壊発生確率モデルは，日本全域に分布する一般的な地質が満遍なく分布する地域であること，降雨に起因して同時多発的に斜面崩壊が発生した降雨イベントであること，斜面崩壊が広範領域に対して分布的に明らかにされていることの条件をふまえて2004年7月12日から13日の新潟・福島豪雨による新潟県栃尾市の斜面崩壊事例<sup>9)</sup>を基に開発している．斜面崩壊の素因，誘因を考慮するため，モデル式は，地質に応じて構築され，モデルに用いられる説明変数として，地形条件である起伏量と水文量条件である動水勾配を用いている．地質条件を崩積土，新第三系堆積岩，その他の堆積岩，火成岩に分類し，これらの地質に応じてモデルが開発された．地質，起伏量のデータには，国土数値情報(監修：国土交通省国土計画局)を利用した．動水勾配は，国土数値情報の表層土壌，斜面傾斜度から復元された擬似二次元斜面上に再現期間50年の日降雨量極値を与え，飽和・不飽和浸透解析を行うことにより取得される解析データである．日降雨量極値は，日本列島各地の1024ヶ所に分布するAMeDAS各地の再現期間50年の日降雨量極値と暖候期(4月から11月)中の最大月降雨量の強い関係から求められた変換式を利用して求めることができる．メッシュ気候値2000(監修：気象庁)の暖候期(4月から11月)中の最大月降雨量を利用することで解像度1km×1kmの日本列島全域に対する再現期間50年の日降雨量極値分布情報を取得した(図-1 参照)<sup>7)</sup>．メッシュ気候値2000は，1971年から2000年まで観測されたAMeDASの平年値を平均高度や陸度，海度等の地形要素を説明変数にした重回帰式で補間することで，日本列島全域を3次メッシュ化(解像度1km×1km)した気候データである<sup>10)</sup>．なお，再現期間50年の降雨極値を求める頻度解析手法として，確率分布型として一般化極値分布GEV(Generalized Extreme Value)，母数推定法としてPWM(Probability Weight Moment)法を利用した．極値分布法は，母集団に対する最大値，最小値の漸近分布である．そのため，降雨や洪水流量の最大値抽出に有効な確率分布である．動水勾配は，降雨に反応して変化する動的データとして位置付けられ，浸透解析に25%毎に変化させた日降雨量極値を入力することで，変化に応じた動水勾配，および斜面崩壊発生確率の推計が可能になる．

式(1)は斜面崩壊発生確率モデル式である．

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

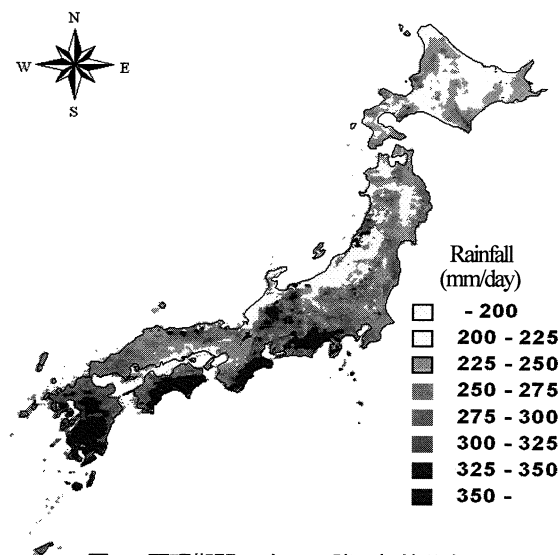


図-1 再現期間 50 年の日降雨極値分布

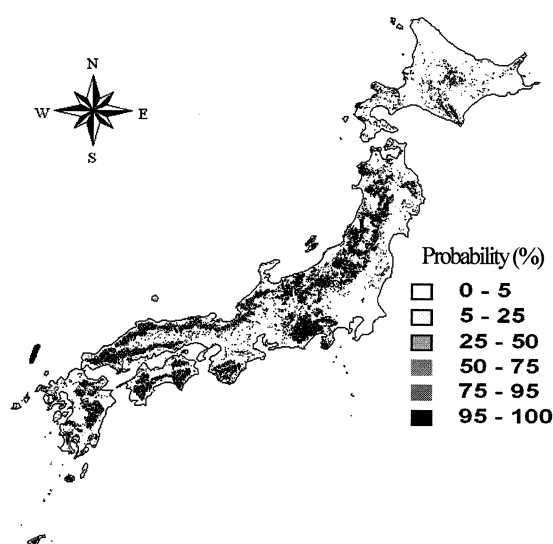


図-2 再現期間 50 年の斜面崩壊発生確率分布

ここで， $P$ ：斜面崩壊発生確率， $\alpha$ ：切片， $\sigma_h$ ：動水勾配係数， $x_h$ ：動水勾配， $\sigma_r$ ：起伏量係数， $x_r$ ：起伏量である．

解析に用いられる地形，地質および水文量は，3次メッシュ(解像度1km×1km)による数値地理情報であり，斜面崩壊の発生確率のアウトプットも同じ解像度の空間情報で示される(図-2 参照)．本研究では，国土数値情報の都道府県コードを用い，都道府県毎に斜面崩壊発生確率の平均値を集計した．なお，国土数値情報の土地地形分類を参考に低地に属さない山地地形のみで集計した．

### (3) 温暖化政策支援モデルAIP<sup>4)</sup>

AIPは，気候変動の抑制目標を達成するために必要な排出経路とその排出経路の下で生ずる気候変動ならびに分野別の温暖化影響について分析することを目的として開発されたモデルである．抑制目標下での温室効果ガス排出に関して推計する3つのモデル(エネルギー・経済モデル，バーデンシェアリングモデル：各国の温室効果ガス排出量削減の負担を推計，世界経済モデル：温室効果

抑制政策を実施した場合の経済損失を推計)と、抑制目標の下で温暖化の発生を推計する影響評価・適応モデルから構成されている。本研究では、斜面崩壊発生確率モデルを用いて以下に示す手順で「影響関数」を作成し、影響評価・適応モデルの一部として組み込んだ。影響関数として、気候変動による影響評価モデルの気候因子を感度解析的に変化させることで作成される都道府県、もしくは分野別の集計値を利用した。本研究では、水害対策の目安として用いられる再現期間50年の日降雨量極値を基準に、75%から200%の間で25%毎の降雨量変化を与えることで求められた斜面崩壊発生確率の影響関数を開発した。これにより、任意降雨量における斜面崩壊発生確率が求められる。参考として、各地域で高発生確率を示す都道府県の日降雨量極値変動比と発生確率の関係(影響関数)を図-3に示す。

斜面崩壊発生確率の影響関数と、数値気候モデルの出力データは、AIPの中で「年最大日降水量」で関連付けられる。結果として、AIPを基に気候システムの温暖化に従う都道府県、および地域別の斜面崩壊発生確率の推計が可能になる。しかしながら、数値気候モデルの出力データから求められる日降雨量極値には、気候モデル解析過程において生ずる時空間的なバイアスも存在しているためデータ値に誤差を含むこととなる。この場合、数値気候モデルの出力を実測値で補正しなくてはならない。本研究では、実測値に相当するデータとして1971年から2000年に至る30年平年値の気候情報を格納したメッシュ気候値2000をベースのデータベースとして利用し、数値気候モデルより取得される1971年から2000年の30年平年値をメッシュ気候値に掛け合わせることで、気候に応じた年最大日降雨量シナリオを開発した。なお、斜面崩壊発生の閾値として、2000年から2004年に至る計5年間の土砂災害発生と最大日降雨量の実績検証<sup>12)</sup>(図-4参照)から、50mm/dayと設定し、この閾値を越えた場合のみ斜面崩壊が発生すると仮定した。

気候システムの温暖化の影響は、2050年(2046年から2065年 以下 今世紀中頃)、2100年(2081年から2100年 以下 今世紀末)の2時期について検討した。また、GHG安定化シナリオ別の空間的降雨パターンは表-1に示す全ての数値気候モデルの出力データを用いることで推計された斜面崩壊発生確率の平均値を示した。

### 3. 数値気候モデルによる最大日降水量変化

斜面崩壊発生確率の変化に直接関与する数値気候モデルの出力データは日降水量である。本章では、斜面崩壊の影響因子となる数値気候モデルより推計された日降水

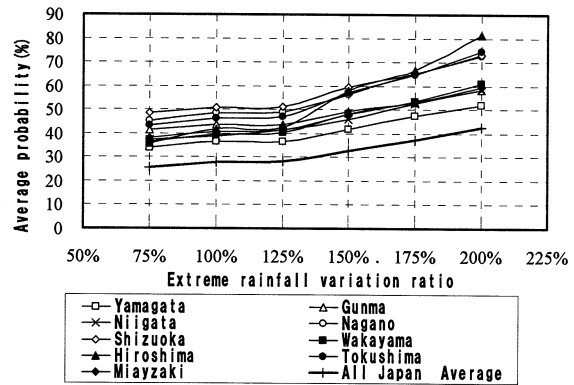


図-3 日降雨極値変動比と斜面崩壊発生確率の関係

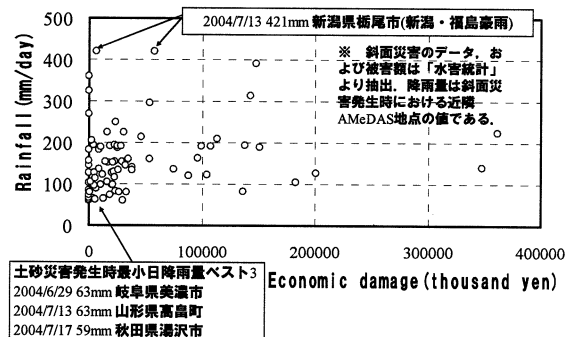


図-4 近年(2000-2004年)の土砂災害と日降雨量の関係

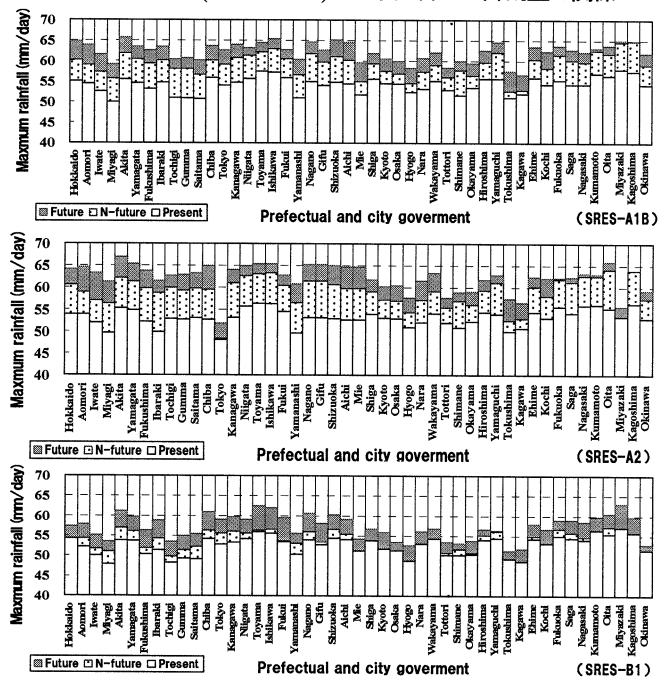


図-5 都道府県別の平均日最大降雨量

量の傾向について説明する。なお、斜面崩壊発生確率に関して、排出シナリオ毎の平均値を用いて評価を行うこととしている。しかしながら、この場合、各モデルの出力差まで議論することができず、モデル間の不確実性を考慮しないこととなる。そこで、SRES毎のデータの偏差も考慮し、数値気候モデルの日降水量の傾向を検討した。図-5に各SRESに応じた都道府県毎の平均化された最大日降雨量を示す。また、図-6は各SRESに応じた都道府県毎の最大日降雨量の偏差を示している。

図-5に示された各SRESの最大日雨量の推計より、今

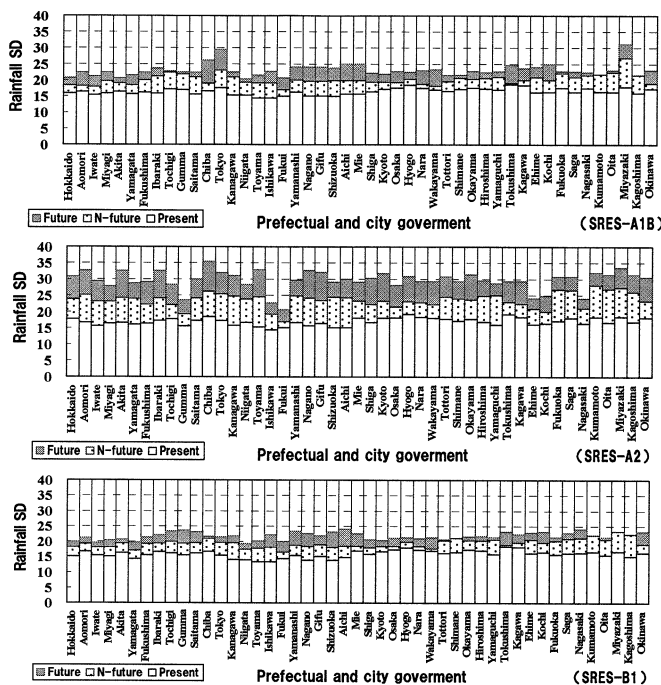


図-6 都道府県別の平均日最大降雨量偏差

世紀中頃、今世紀末に移行することにつれて最大日降雨量の増加傾向が見てとれる。SRES-A1B, A2にすれば、九州を除く日本列島全体が気候変動に応じ順次的、かつ概ね均等の増加幅で変動する。また、SRES-A2に関して今世紀末における都道府県毎の最大日降雨量が概ね65mm/day付近に止まるものの、SRES-A1Bは最大日降雨量の地域差が明らかに認められている。SRES-B1は、現在気候と今世紀中頃の降雨量増加幅が小さく、今世紀末になることで増加幅が広がる傾向を示す。また、空間的な変動幅の差異として、北海道、東北、関東、東海で比較的に気候変動に応じて順次、かつ概ね均等の増加を示すものの、それ以外の地域で現在気候、今世紀中頃から今世紀末の移行により著しく最大日降雨量が増加する。なお、降雨の量的には、多いほうからSRES-A2, A1B, B1の順で示されている。

図-6 に示された各SRESの最大日雨量偏差より、量的に多いほうからSRES-A2, A1B, B1の順で示されている。SRES-A2では、気候変動に応じ順次的、かつ概ね均等に日本列島全域で偏差が大きくなる。SRES-A1B, B1では、総じて九州を除き順次的に偏差の大きくなる傾向が示されている。これらSRESの九州地方では、一部地域で今世紀末よりも今世紀中頃の偏差が大きくなる、もしくは、今世紀末と今世紀中頃の偏差が概ね同等である傾向を示している。また、近畿も比較的に今世紀末と今世紀中頃の偏差が概ね似かよった傾向を示す。

図-5,6の結果を総括すると、排出シナリオに応じて影響の大小を隔てる境界に差異はあるものの、基本的に日本列島北部で日降雨量増加が著しくなることが示唆される。また、列島南部、特に九州地方では、日降雨量増加幅が小さいものの、相対的に北部よりも降雨量は大きな

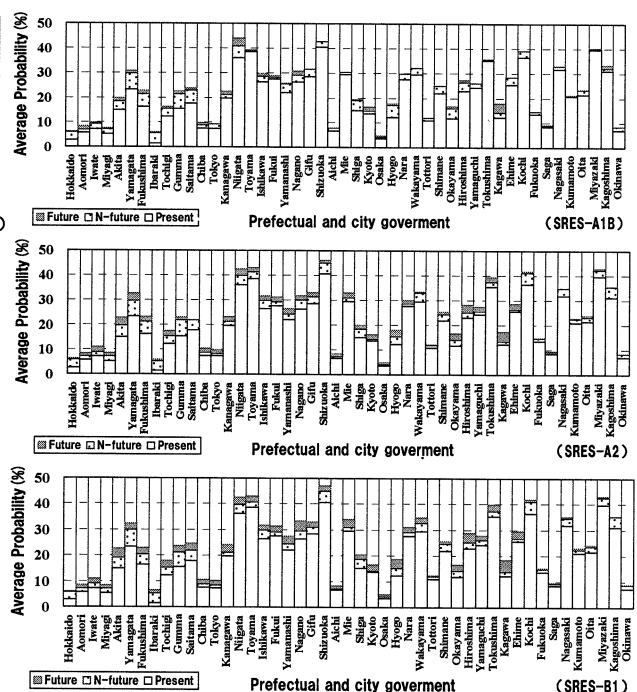


図-7 都道府県別の平均斜面崩壊発生確率

値を示している。なお、最大日降水量を排出シナリオ別にみると、SRES-A2, A1B, B1の順で降雨量、偏差が多くなることが求められた。この結果は、IPCC AR4の気温上昇の序列と同様であり、気候システムの温暖化による水循環の活発化に伴い極端な降雨が生ずる傾向を反映したものと推察できる。

#### 4. 斜面崩壊発生確率の影響評価

数値気候モデルより推計された日降雨量を基に求められた気候変動に従う斜面崩壊発生確率の変化を都道府県毎、SRES排出シナリオ毎に整理したものが図-7である。また、斜面崩壊発生確率増加量を都道府県マップに表示したものが図-8である。降雨量の推計結果を反映し、中央アルプス以北の北海道、東北地方、関東地方、北陸地方、甲信越地方、東海地方に分布する都道府県で斜面崩壊発生確率の上昇が相対的に大きくなる傾向を示す。特に、山形県、秋田県、群馬県、埼玉県、茨城県の斜面崩壊発生確率上昇幅は顕著であり、最大上昇幅を示す山形県では、平均発生確率で現在気候比として今世紀中頃に6.6%、今世紀末に8.9%上昇することが推計された。これらに列挙した都道府県は、概ね今世紀中頃に5.0%程度、今世紀末で7.0%以上の発生確率の上昇を示す。現在気候時には、多雨の生じやすい九州地方、四国地方、中部地方の急峻な地形を呈する都道府県よりも低い発生確率を示していたものの、降雨量増加に従い著しく斜面崩壊のリスクが高まったことを示唆する。また、その他に着目すべき結果は、中部地方、近畿地方南部、中国地方瀬戸内海側、四国地方の発生確率の変動傾向である。これらの地域に含まれる都道府県は、現在気候でも相対的



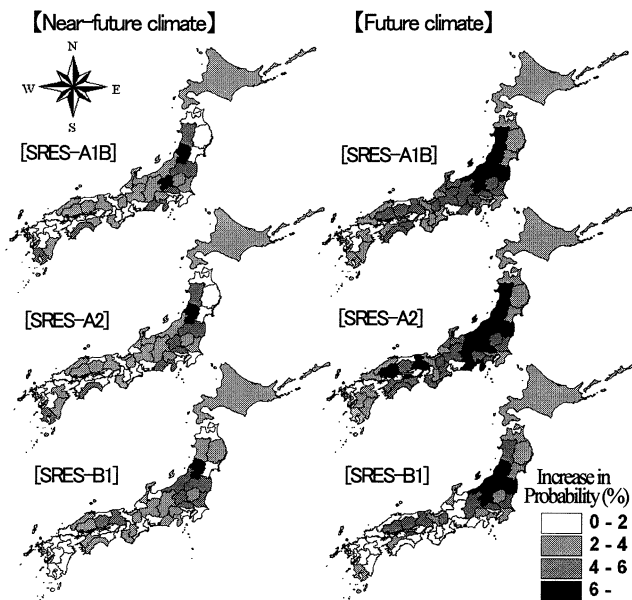


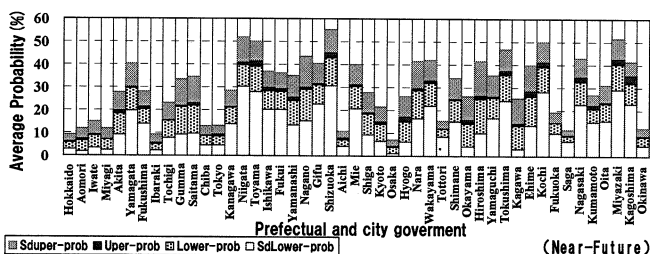
図-8 斜面崩壊発生確率増加量分布

に高い傾向を示していたものの、気候変動に応じて更に発生確率の上昇が見込まれる。現状以上のリスク増幅は更なる深刻な被害の増加を示唆するものである。

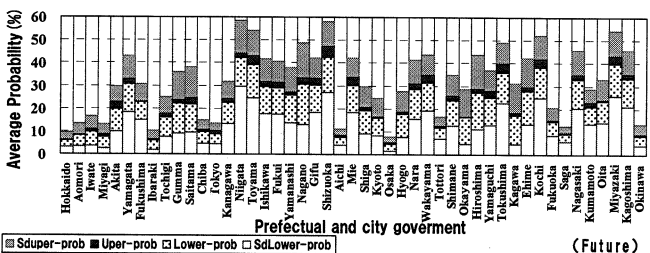
図-9 は、図-7 の結果に示される発生確率の上限値と下限値、および気候モデル毎の偏差(上限値+偏差, 下限値-偏差)を考慮した包括的な都道府県別発生確率を都道府県ごとに整理したものである。図-7 を参考にすると、概ね都道府県で上限に相当するものがSRES-A2, 下限に相当するものがSRES-B1であることが解釈できる。この結果から、新潟県、富山県、静岡県、徳島県、高知県、宮崎県は、どのSRESが想定されたとしても、今世紀中頃、今世紀末に平均発生確率として概ね40.0%まで達し、相対的に列島で高い斜面崩壊リスクを示すことが見てとれる。また、偏差を考慮した場合、これらの都道府県は、概ね50.0%まで平均発生確率が上昇することも示されている。つまり、都道府県の山地全体としても、斜面崩壊現象の生起を促す条件が約半分揃うことを示しており、土砂災害増加の深刻さを示唆している。

## 5. 安定化シナリオ別の影響評価

温暖化政策支援モデルAIPでは、様々な制約下(全球平均気温安定下、GHG濃度安定化等)におけるGHG排出削減目標と温暖化による被害を統合して検討することができる。本章では、GHG濃度がなりゆきにより増加するシナリオ(Business as Usual 以下BaU)と、GHG濃度が二酸化炭素等価濃度で450ppm、550ppmに安定化するシナリオを設定し、それぞれの斜面崩壊の影響を検討した。なお、この3つのシナリオは、産業革命前に比べておよそ、2100年時にGHG濃度450ppmで約2.1℃、GHG濃度550ppmで約2.9℃、BaUで約3.8℃という平均気温上昇に対応する。安定化シナリオに応じた都道府県別の斜面崩壊発生確

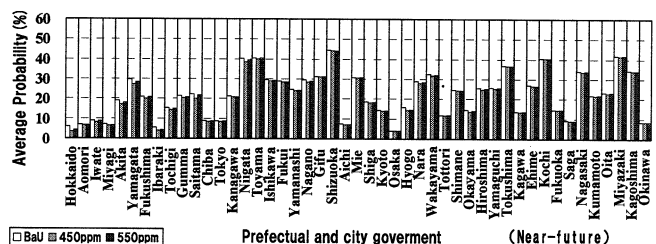


(Near-Future)

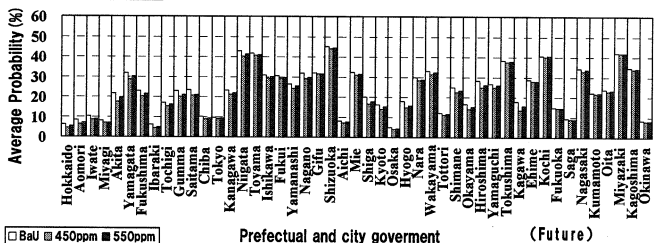


(Future)

図-9 斜面崩壊発生確率総合評価



(Near-future)



(Future)

図-10 GHG濃度安定化シナリオの斜面崩壊発生確率

率の検討結果を今世紀中頃、今世紀末で集計した結果を図-10 に示す。また、図-11は、BaUとGHG濃度450ppmならびにGHG濃度550ppmの安定化を比較し、GHG濃度安定化により見積もられる都道府県毎の平均発生確率確率低下量を今世紀中頃、今世紀末で集計したものである。

これらの結果から、今世紀中頃では、GHG濃度550ppm安定化により1.0%内の発生確率低減が見積もられる。また、GHG濃度450ppm安定化の場合、北海道、東北地方日本海側、関東地方北部、兵庫県、奈良県を除くと、GHG濃度550ppm安定化と同様に1.0%内の発生確率低減にとどまることが見てとれる。今世紀中頃では、GHG濃度ある程度まで安定化させたとしても日本列島の大部分の斜面崩壊リスクを比較的に低下させるのが困難と解釈できる。ただし、北海道、東北地方日本海側、関東地方北部、兵庫県、奈良県について、GHG濃度550ppm安定化により1.0%から2.0%内の発生確率低減が認められており、一部の地域では改善も見込まれる。今世紀末では、今世紀中頃と比較して各々のGHG濃度安定化とともに北海道、九州地方を除き飛躍的な発生確率低下

が認められる。また、地域的な差異も顕著に認められる。GHG濃度550ppm安定化により東北地方日本海側、関東地方北部、北陸甲信越地方、近畿地方、中国四国地方は1.0%以上の発生確率低減が見積もられる。また、GHG濃度450ppm安定化の場合、同様の地方の2.0%から約4.0%の範囲の発生確率低減が見てとれる。

これらの結果を総合評価すると、今世紀中頃、今世紀末の両時点においてGHG濃度安定化により発生確率の低下量が見込まれるものの、特に今世紀中頃よりも今世紀末にその効果が大きく現れることが示されている。また、図-10より、GHG濃度をGHG濃度450ppm、550ppmに安定化させたとしても、急激に発生確率を低下させることが理解できる。この結果は、緩和策のみの対策で斜面崩壊によるリスクを低減させることが困難であることを示す。例えば、国際エネルギー機関(International Energy Agency 以下IEA)より提言される、大気中のGHG濃度を二酸化炭素換算で450ppmに抑える「450シナリオ」でも<sup>13)</sup>リスク低減効果が期待できないことが明らかにされた。したがって、緩和策のみでなく、適応策を補完的に講じる必要がある。

## 6. 結 論

本研究により得られた結果を以下に列挙する。

- 1) 数値気候モデルの降雨量の推計結果より、気候システムの温暖化に伴い日本列島北部の日降雨量増加が著しく、極端な変動になることが明らかにされた。
- 2) 気候変動による斜面崩壊影響評価により、降雨量の結果を反映し、日本列島北部の中央アルプス以北の北海道、東北地方、関東地方、北陸地方、甲信越地方、東海地方に分布する都道府県で斜面崩壊発生確率の上昇が相対的に大きくなる傾向を示し、特に、山形県、秋田県、群馬県、埼玉県、茨城県の斜面崩壊発生確率上昇幅は顕著であることが明らかにされた。
- 3) 気候変動による斜面崩壊影響評価により、中部地方、近畿地方南部、中国地方瀬戸内海側、四国地方、特に、新潟県、富山県、静岡県、徳島県、高知県、宮崎県は、現在気候でも相対的に高い斜面崩壊発生確率を示すものの、気候変動に応じて更に発生確率上昇が見込まれる危険地域となることが明らかにされた。
- 4) AIPによるGHG濃度安定化による斜面崩壊影響評価により、GHG濃度450ppm安定化の場合でも、気候システムの温暖化に対する最大日降雨量増加による斜面崩壊発生確率上昇を十分に補えないことが

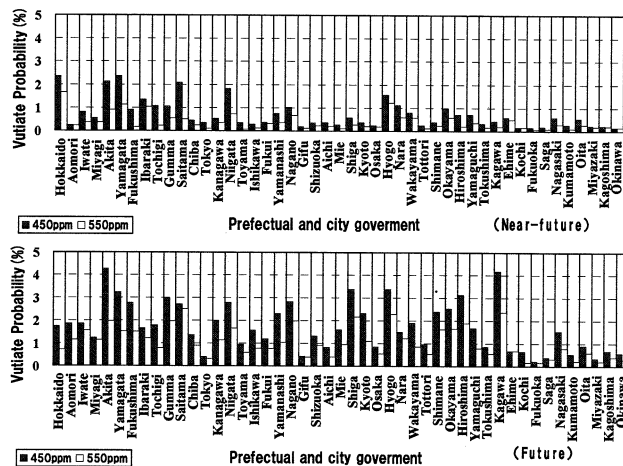


図-11 GHG濃度安定化シナリオによる発生確率低

明らかにされた。

- 5) GHG濃度安定化の評価より、緩和策だけでなく、適応策を講じ斜面崩壊リスクを低減させる必要が提案される。

本研究を通じて、気候シナリオに応じた数値気候モデルの出力結果と斜面崩壊発生確率モデルの結果を温暖化支援モデルAIPを通じて連動させ、系統的に温暖化による斜面崩壊の影響を解析できる手法の構築と、現状で求められている数値気候モデルの推計値から大局的な斜面崩壊の傾向の成果を得ることができた。しかしながら、数100km×数100kmの解像度で解析された数値気候モデルの出力データを統計的アルゴリズムで細解像度(1km×1km)に補間した降水量データを利用した評価であることに留意しなければならない。モデル出力結果と実測値に存在するバイアスの他に、ダウンスケーリングにより生ずる地域的なバイアスも含まれる可能性もある。特に、ダウンスケーリングは現在気候のみを考慮しており、気候システムの温暖化によりメソスケールで降水パターンが変化することも想定される。今後の細解像度の数値気候モデルの開発や高精度のダウンスケーリング手法の確立により、更に高精度の斜面崩壊影響評価の発展が期待できると考えられる。また、空間的議論だけでなく、細やかなタイムステップを評価することで適応策を講ずるべき時期の検討すること、現状の対策整備との斜面崩壊の関係性から対策過不足量、適切な対策種目を検討することも今後の課題である。

## 謝辞

本研究は環境省地球環境研究総合推進費(S-8)の研究助成によって行われた。数値気候モデルのデータ処理でみずほ情報総研株式会社様に協力を頂いた。ここに記して謝意を示す次第である。

## 参考文献

- 1) 例えば E. Hertig, J. Jacobeit : Downscaling future climate change:

- Temperature scenarios for the Mediterranean area, *Global and Planetary Change*, Volume 63, Issues 2-3, pp 127-131, 2008.
- 2) 例えば Ajit Govind, Jing Ming Chen, Hank Margolis, Weimin Ju, Oliver Sonnentag and Marc-André Giasson : A spatially explicit hydro-ecological modeling framework (BEPS-TerrainLab V2.0): Model description and test in a boreal ecosystem in Eastern North America, *Journal of Hydrology*, Volume 367, Issues 3-4, pp. 200-216, 2009.
  - 3) 例えば Samuel D. Brody, Sammy Zahran, Himanshu Grover and Arnold Vedlitz : A spatial analysis of local climate change policy in the United States: Risk, stress, and opportunity, *Landscape and Urban Planning*, Volume 87, Issue 1, pp.33-41, 2008.
  - 4) Hijioka, Y., Masui, T., Takahashi, K., Matsuoka, Y. and Harasawa, H : Development of a support tool for greenhouse gas emissions control policy to help mitigate the impact of global warming, *Environmental Economics and policy studies*, Vol.7, No.3, pp.331-345, 2006.
  - 5) 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.
  - 6) 日本防災協会 : 地球, 環境破壊, 災害, そして いのち, pp511, 2008.
  - 7) 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹 : 数値地理情報と降雨局地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*, No.27, pp.69-83, 2008.
  - 8) 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹 : 将来気候モデルを利用した土砂崩壊リスク評価, *土木学会地球環境論文集*, No.16, pp.27-33, 2008.
  - 9) Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H and Kanno, T.(2005): Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*, Vol. 81, pp.432-445, 2005.
  - 10) 清野 豁 : アメダスデータのメッシュ化について. *農業気象*, Vol. 48, pp.379-383, 1993.
  - 11) 川越清樹, 風間聡, 脇岡靖明, 高橋 潔 : 土砂崩壊リスク評価に対する気候モデルの適用, *土木学会水工学論文集*, Vol.53, pp.661-666, 2009.
  - 12) 国土交通省河川局 : 平成 12 年水害統計から平成 16 年度版.
  - 13) International Energy Agency : *World Energy Outlook 2009 Edition*, pp.696, 2009.

(2010.3.26 受付)

(2010.6.10 受理)

## Application of a Climate Policy Assistance Model to Slope Failure Risk Evaluation in Japan

Seiki KAWAGOE<sup>1</sup>, Yasuaki HIJIOKA<sup>2</sup> and Kiyoshi TAKAHASHI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Symbiotic Systems Science, Fukushima University

<sup>2</sup>Social and Environmental Systems Division, National Institute for Environmental Syudaies, Japan

<sup>3</sup>Center for Global Environmental Syudies, National Institute for Environmental Syudaies, Japan

Multi SRES and climate scenarios are inputted to a slope failure probability model to assess the slope failure risk at each prefecture around mid-century (2046-2065) and around the end of the century (2081-2100). Impact response functions developed by the slope failure probability model are implemented to the climate policy assistance model, AIM/Impact[Policy] and effects of decreasing slope failure risk are assessed under different GHG concentration stabilization scenarios.

The results obtained are as follows; 1) Japan northern areas are estimated high slope failure probability due to occurrence increase maximum daily extreme. 2) As for Niigata, Toyama, Shizuoka, Tokushima, Kochi and Miyazaki Prefecture, they are expected high dangerous degree area according to climate change. 3) Increase of slope failure probability cannot be supplemented only with the GHG density stabilization.