

28. 日本列島全域を対象とした 土石流発生ポテンシャルの推計と評価

伊藤 圭祐¹・川越 清樹²
Keisuke ITO, and Seiki KAWAGOE

本研究では、日本列島を対象領域に設定し、降雨変動に対する土石流発生ポテンシャルの危険度を求める解析に取り組んだ。災害実績、地形、地質、降水量等の数値地理情報、および数値地理情報化されたデータを利用して降雨量に感度をもった斜面崩壊危険領域を流域による空間情報で示すことと並行して、流域地形状況(河床勾配)と比較することで土石流発生ポテンシャルを氷解した。結果として、土石流危険度ポテンシャルの高い流域の集中する領域を抽出すると、①朝日山地・飯豊山地、②糸魚川―静岡構造線周辺に位置する関東―赤石―木曽山地群、③飛騨高地、④紀伊山地、⑤四国山地、⑥九州山地という結果を得た。

¹学生会員 理工学士 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 博士(環境科学) 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)

Key Words : Rainfall condition, logistic curve, probability, river bed gradient and map

1. はじめに

地球温暖化に関連付けられる気温上昇に伴う大気中の飽和水蒸気圧の増加、海水温上昇に伴う台風強度の増大等より短時間の降雨量増大と豪雨の頻度増加が見込まれている。IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptationは、「世界の多くの地域で21世紀中における強い降雨の発生頻度、あるいは総降水量に占める強い降雨の割合が増加する」ことを報告しており¹⁾、既に日本でも、短時間の降雨量増大傾向²⁾と、列島各地で降雨量の極値更新が認められている³⁾。極値更新に示される未曾有の豪雨発生は、現在までの気象事象で設計基準を設定して対策を整備してきた領域、および対策不要と評価された領域の災害危険度の増加を示唆する。社会基盤における雨量の設計基準の超過や、複合的災害を誘発させる複数現象の同時発生に伴い更なる甚大な災害が引き起こされる可能性を有している。これに対し、社会の安全を確保するために構造物や防災体制を整備して災害の被害軽減に努めることが必要である。水文統計情報を基に計画される整備効果をとどめるだけでなく、豪雨に対しての地域の影響度を推し量ることで最大限の災害ポテンシャルも見積もり、災害に対して適応できる選択肢を拡張させていくアプローチも肝要と考えられる。

日本列島は、環太平洋造山地域に属しており、急峻な地形、脆弱な地質を呈する。そのため、降雨等の外

的な営力の発生に伴いマスムーブメント現象が活発になる特徴を有している。総じてマスムーブメントに関連する災害は、現象の起動域が地中であるため挙動を可視しにくい特性をもち、危険を予知、判断することも困難である。そのため、人的被害が生じやすいことも明らかにされている⁴⁾。2014年8月20日に広島市内で発生した豪雨(三入地域気象観測所 24時間最大雨量257mm)は、広島県内107か所で土石流を生じさせ、広島市安佐北区、および安佐南区に死者74名にのぼる犠牲を与えた⁵⁾。短時間降雨量の増加の傾向から、今後もこの災害に匹敵する激甚災害は増加する可能性も予見される。したがって、予め降雨に対する潜在的なマスムーブメントの危険度を明らかにすることと、また、こうした地域に災害に対する適応策を整備する必要がある。

本研究では、日本列島を対象領域に設定し、降雨変動に対する土石流発生ポテンシャルの危険度を求める解析に取り組んだ。土石流の主たる土砂生産源を斜面崩壊と仮定した評価を試みている。災害実績、地形、地質、降水量等の数値地理情報、および数値地理情報化されたデータを利用し、降雨量に感度をもった斜面崩壊危険領域を流域による空間情報で示した。また、降雨に対する危険度を求める段階で各流域の降雨感度に対するリスク影響線を作成し、降雨量に対する斜面崩壊発生確率の推移の可視化を試みた。広範領域を対象に降雨に伴う斜面崩壊と河道勾配の情報を重ね合わせることで危険流域の土石流ポテンシャルを評価した。

こうした情報は、対策優先領域や地域に則した適応策のオプションを議論する基礎的資料として利用できる。

土石流に関する危険領域抽出の事例としては、芦田らが、溪床堆積物上の表面流、流域面積と堆積物の粒径の情報を用いて、力学的考察から降雨強度と継続雨量によって危険雨量が規定されることを求めた。この取り組みを通じて土石流発生危険度を導く方法を確立させ、全国的な規模で土石流危険渓流を指定し、危険範囲と危険雨量を予知しようとする取り組みの推進を提言している⁶⁾。ただし、この解析方法は、物理過程をふまえた精緻化された評価手法である一方で、粒径等の緻密な情報の必要性より広範領域への適用が困難な側面も持つ。現在、土木研究所の土砂管理研究グループが表層崩壊に起因した土石流危険度評価マニュアル(案)を取りまとめ、C-SLIDER法として、グリッドセル当たりの安全率($F_s > 1.0$)を発生確率に置き換え、溪流単位の危険度を求める方法について提案している⁷⁾。この評価手法は、日本の土石流評価のベースとなり実務面で活用されている。ただし、この評価でも広範領域を対象にするには土質定数の設定を列島全域の規模で明らかにしなければならない。例えば流域で事業を進めて、調査と併合させて評価する手法として有効であるが、広範領域を対象に危険度を抽出させる手法としての適用は困難である。また、降雨の地域特性などの要素が含まれた評価方法とは異なる。Salvatore Grimaldiらは、イタリアの流域を対象に確率年降雨状況に合わせた土壌状況を判断し土石流評価マップを作成し⁸⁾、Giuseppe T. Aronicaらもイタリアの流域を対象に降雨特性と有限要素法の組み合わせより土石流評価マップを作成した⁹⁾。Ji-Yuan Linらは、FLO-2Dモデルを開発し、降雨量を反映させながら台湾の流域を対象に移動状況まで緻密に解析した土石流評価マップを開発した¹⁰⁾。これらは、ある程度の降雨特性も考慮した先行研究となるが、特定地域を対象とした固有的な条件も踏まえて開発されたもので広範領域を対象としたものではない。これら先行研究に対し、本研究は、降雨量に対する斜面の影響性も踏まえて列島全域規模で土石流の危険度を求めるアプローチより進めている。土質定数や粒径等の土石流評価として不足する情報もあるが、本研究の特徴である水文的な広範領域に対する解析アプローチの成果と今後の調査進展による地質、土質情報の整備より求められる既往研究による評価アルゴリズムの結果との重ね合わせより将来的に精緻化した評価手法へ発展する可能性も含んでいる。また、本研究における水文的アプローチは発展的な研究の取り組みとして温暖化などの巨視的な影響を踏まえた解析にも利用できる側面も有している。

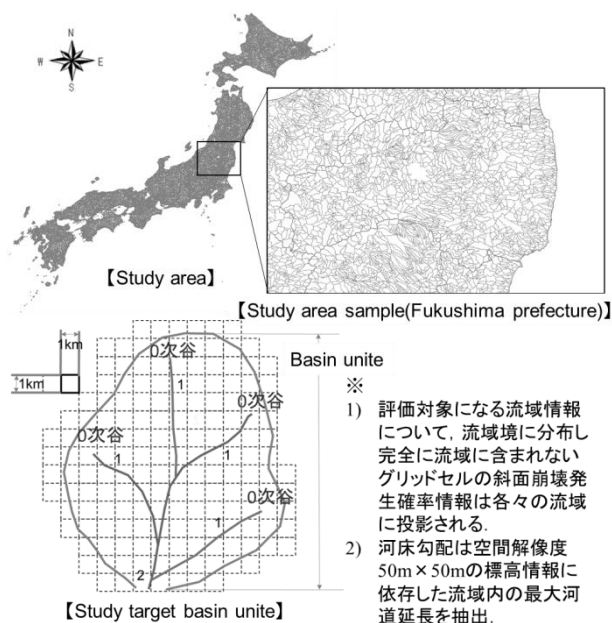


図-1 流域情報解析モード、および対象流域図

2. 解析方法、およびデータセット

日本列島を対象領域に設定した降雨変動に対する土石流発生ポテンシャルの評価を行うため、以下の①から④の解析を進めた。

- ① 斜面崩壊発生確率モデル¹¹⁾を利用し、雨量に応じた斜面崩壊の発生確率を3次メッシュ(空間解像度 $1\text{km} \times 1\text{km}$)のグリッドサイズで得た。
- ② 3次メッシュの斜面崩壊発生確率を2次谷までの流域情報で統合した。また、流域に関して、河道の最大流路延長、最大標高、および最低標高の差による比高差より河床勾配を得た。
- ③ 流域に対して降雨量と斜面崩壊発生確率の関係によるリスク影響線を作成し、流域毎にリスク上昇率の高まる降雨量情報を取得した。
- ④ 斜面崩壊(土砂生産)に関してリスク上昇率の高い降雨量、土砂運搬に関して河床勾配を基に土石流発生ポテンシャルの危険度を求めた。

以下に各解析の方法、およびデータセットを説明する。

(1) 斜面崩壊発生確率モデル¹¹⁾

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を用いて開発されており、日本列島全域に対する斜面崩壊のリスクを求める評価への適用事例を有している¹²⁾。モデルのベースは、「1」と「0」の二項分布に対して、斜面崩壊実績の有を「1」、無を「0」に設定し、これらをロジスティック曲線で連結させることにより連続的線形の関係の成立させることである。ロジスティック曲線を重回帰式で解くことで斜面崩壊発生

確率モデル式は構築され、説明変数として地形の要素、水文学の要素を用いている。地形要素として起伏量、水文学の要素として動水勾配を利用し、地質に応じてモデル式の係数が求められている。式(1)は斜面崩壊発生確率モデル式である。

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

ここで、 P ：斜面崩壊発生確率、 β_0 ：切片、 β_h ：動水勾配係数、 Y_h ：動水勾配、 β_r ：起伏量係数、 Y_r ：起伏量である。斜面崩壊発生確率モデルより求められる結果は、「0」から「1」で推移するまでの発生確率であり、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こととなる。また、このモデルに用いられるデータは3次メッシュの数値地理情報であり、単体の斜面崩壊ではなく、斜面崩壊が生じうる地域としての評価であることに留意しなければならない。

モデルに利用される地形の要素である起伏量は、国土数値情報G04-a-11_地図図幅番号-jgd_GMLに格納された3次メッシュ内の最高標高と最低標高の差より求められている。起伏量は、地形の複雑さを示す値として解釈されており、従来から地形解析やマスマーブメント評価のパラメータ¹³⁾として利用されている。

モデルに利用される水文学の要素である動水勾配は、国土数値情報G05-54M-48-01に格納された土壌と国土数値情報G04-a-11_地図図幅番号-jgd_GMLの斜面傾斜度を用いて擬似二次元化した斜面に24時間降雨量を入力し、Richardsによる飽和不飽和浸透解析を行い求められている。降雨発生後の最大傾斜を示す浸潤線から発生確率に用いる動水勾配を得ている。動水勾配は、単位距離当りの地下水水頭の変化率であり、降雨量が多くなるほど急勾配を呈する。急な動水勾配は、土塊の有効応力を減少させるため、斜面は不安定化する要因となる。降雨量の変化に応じて動水勾配も変化するが、並行して斜面崩壊発生確率も変化する。そのため、水文学の要素は動的条件と位置づけられる。本解析では降雨条件として、Case①：0mm(地形要素にのみ依存した結果)、Case②：50mm、Case③：100mm、Case④：150mm、Case⑤：200mm、Case⑥：250mm、Case⑦：300mm、Case⑧：500mmを検討した。これら8パターンの降雨量変化に応じた危険度の推移を求めることに取り組んだ。浸透解析について、1時間毎に等分配して降水を与えた条件より計算を行った。

地質条件には国土数値情報G05-54M-48-01に格納されたデータを利用した。

(2) 流域情報の設定

土石流の単位を示す流域情報は、2次谷までを区分す

ることとした。塚本らの調査より、谷成長の幼年期に相当する凹型斜面(0次谷)に多くの山崩れが集中していることが明らかにされている¹⁴⁾。本解析では、0次谷を斜面崩壊集中する主動領域として捉え、1次谷を斜面崩壊した崖錘体積物も残存し0次谷からの土砂流出より侵蝕影響も受ける領域、2次谷を運搬、もしくは堆積する領域と仮定し、2次谷までを土石流評価の流域と設定した。なお、この流域情報は、日本地図センター監修の数値地図50mによる空間解像度50m×50mの標高情報を基に作成した。中心グリッドとそれに隣接する8つのグリッドの比較による最低標高位置を連続的に求めることで河道網を作成し、2次谷までを区分することで流域情報を整備した。区分された流域の河道における最大延長、最大標高と最低標高の差による比高差を取得し、これらの比より河床勾配を求めた。

流域情報と3次メッシュの情報として求められた斜面崩壊発生確率の統合については、リスクの高まるグリッドセルの数量の傾向が明らかになるため、流域に含まれる3次メッシュの平均値を集計することとした。

図-1に流域情報解析模式、および対象流域図を示す。本解析の評価対象は44,105流域であり、流域の規模情報として面積平均値15.32km²、最長を示す流域内の河道延長の平均値5.91kmの情報が取得されている。

(3) 降雨量と斜面崩壊発生確率によるリスク影響線

流域に応じて3次メッシュの斜面崩壊発生確率平均値を求めるが、この値は降雨条件のCase①から⑧までの8パターンで取得される。雨量と斜面崩壊発生確率の関係運動することでリスク影響線は求められる。参考事例として、リスク影響曲線は、3次メッシュの解析がロジスティック曲線をベースとしているため曲線に近似した形状で示される。リスク影響曲線より、発生確率の高まる降雨量が定量的に把握でき、流域毎のリスク上昇率の高い降雨量を特定することが可能となる。本解析では、日本列島中の対象流域について、斜面崩壊発生確率50%超過する範囲中で、最も発生確率増加量の大きな降雨量の範囲を求め、リスク上昇率の高い降雨量として抽出する試みを行った。なお、多雨量になっても斜面崩壊発生確率が50%に満たない流域については、対象外とした。このリスク影響線に基づき取得される最大の発生確率増加量に対する降雨量の解析結果を斜面崩壊(土砂生産)に対するリスク評価の基準として用いた。

(4) 河床勾配による危険度ランクの分類と土石流危険度のポテンシャル評価

流域区分された流域の河道における流路延長、最大標高と最低標高の差による比高差を取得し、これらの

比から河床勾配を求めた。河床勾配より求められる危険度は土砂の流下しうる運動、運搬に対してのものとなる。河道勾配を把握することで土砂の推進力と土砂氾濫が波及しうる範囲を推計することもできる。本解析では、土石流発生ポテンシャルを評価するため、土砂運搬に関して河床勾配をランクで設定した。勾配のランクは、国土技術政策総合研究所資料の砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説¹⁵⁾に示される土砂移動の形態の溪床勾配による目安に準拠して土砂動態に応じてランクを分類(レベル1から5)した(図-2 参照)。判別について、特に勾配1/3以上のレベル5、勾配1/3未満から1/4以上のレベル4は、土砂生産に匹敵するレベルのため高い危険度に属する。落下、堆積の運動過程を示すレベル3、2も土砂波及する領域のため災害として被害が甚大になる可能性を含んでいる。運動過程が掃流に相当するレベル1に変化することで危険度低いものとなる。なお、土砂と水の混合率、および土石の粘性や流域の植生等の諸条件によっては土砂動態に変化する可能性もあるため、広域評価の次段階の精査でこれらの影響は慎重に調査解析しなければならない。

本章の(3)にて求められた「斜面崩壊発生確率最大増加量に対する降雨量」との統合に関しては、斜面崩壊について降雨量レンジの低い値をリスク大(少降雨量でも斜面崩壊発生確率が高まる)、高い値をリスク小(多降雨量で斜面崩壊発生が高まる)というランクに設定し、各々のランクに河床勾配による危険度のレベルを当てはめる方法とした。土石流の主導になる生産側(斜面崩壊)を中心に計30レベルによる危険度を設定した(図-2 参照。降雨はLevel R6からR1の6段階に設定)。

3. 斜面崩壊発生確率の解析結果と考察

図-3に降雨量に応じた流域毎の斜面崩壊発生確率マップ、図-4に最も発生確率増加量の大きくなる降雨量の流域マップを示す。

図-3より、降雨量増加にしたがって高い斜面崩壊発生確率を示す領域が拡大する傾向と、24時間降雨量500mmに達することで平野を除く日本列島の概ねが斜面崩壊発生確率95%から100%に達することがみてとれる。発生確率として高位に属する95%から100%に含まれる流域数に着目すると、降雨影響なし(Case①)の場合は0ヶ所、100mm (Case③)時は1,776ヶ所、200mm (Case⑤)時は4,018ヶ所、300mm (Case⑦)時は6,628ヶ所、500mm (Case⑧)時は10,243ヶ所(列島全流域の23.3%)となる。概ね降雨量に応じて95%から100%に含まれる流域数は線型的に増加する傾向を示す(24時間降雨量1mmあたりの変化で20ヶ所)。考察のための参考として国土数値地理情報G05-54M-48-01に格納されている地形分類と当該解析による流域区分の重ね合わせをし、地形情

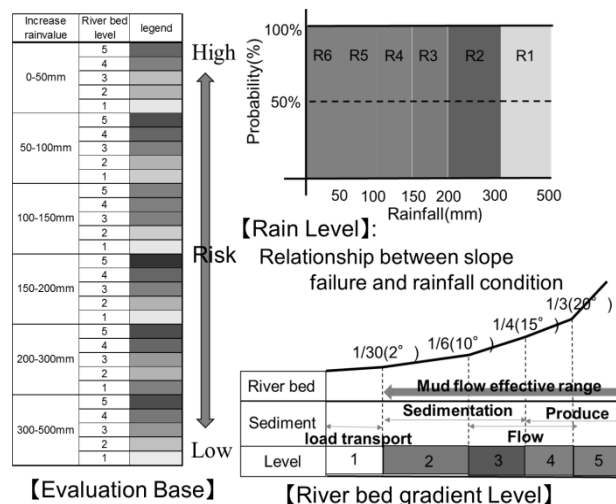


図-2 土石流発生ポテンシャルの評価基準

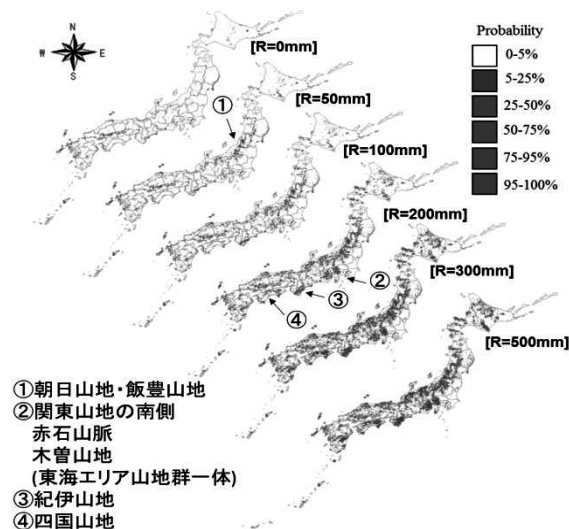


図-3 流域の斜面崩壊発生確率評価マップ

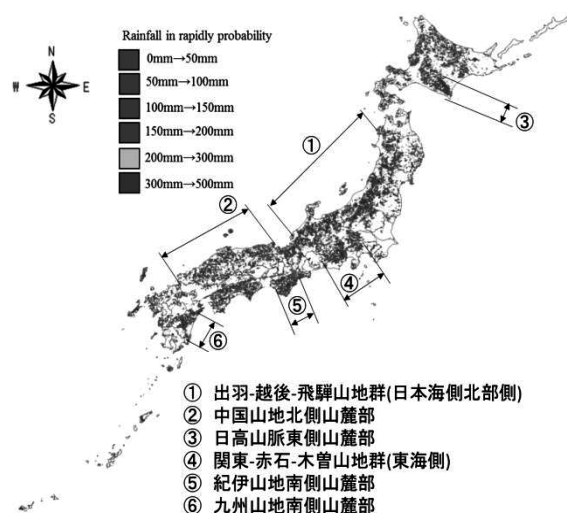


図-4 リスク影響曲線の最大傾斜降雨量の流域マップ

報をふまえた検証を行った。降雨条件Case⑧時において95%から100%に含まれないうちの24,311ヶ所の流域は平地に属し、列島全流域の55.2%を占めることが求められた。なお、地形分類が平地に属する全流域の平均

発生確率1.3%となり、降雨に対する斜面崩壊の影響度の小ささが示されている。降雨条件Case⑧時に95%から100%に含まれる流域、95%から100%に含まれない地形分類を平野とする流域で総計78.5%が抽出されているが、残りの21.5%に属する地形区分は丘陵地急斜面及び緩斜面、山地緩斜面に属するものがほとんどである。これら地形の平均発生確率は7.6%であり、平地よりも相対的に高い危険度を示す。したがって、500mm以上の降雨量でも斜面崩壊のリスクの高まる流域が残されていることに留意しなければならない。なお、列島の斜面崩壊の高まりの空間的な特徴としては、50mm/24h時に朝日山地・飯豊山地で95-100%の領域が出現する。降雨量増加にしたがって朝日山地・飯豊山地を中心に95-100%の領域が日本海側の山岳地西側の山麓に拡大し、更に300mm/24h時には日本海側の山岳地東側の山麓に広がる傾向が示された。その他に、200mm/24hになることで関東山地の南側、赤石山脈、木曾山地の東海エリア山地群一体、紀伊山地、四国山地に斜面崩壊発生確率95-100%の領域が認められる。降雨量増加によりその領域が拡張する傾向が明らかにされた。

図-4に示すリスク影響曲線の最大傾斜降雨量の流域マップより、少雨でもリスク上昇しやすい領域が6ヶ所で集中することが見てとれる。これらの領域は、①出羽―越後―飛騨山地群(日本海側北部側)、②中国山地北側山麓部、③日高山脈西側山麓部、④関東―赤石―木曾山地群(東海側)、⑤紀伊山地南側山麓部、⑥九州山地南側山麓部である。とくに①出羽―越後―飛騨山地群(日本海側北部側)に関しては領域自体の範囲も広いが、少雨に分類される0-50mm/24時間、50-100mm/24時間の領域規模も大きい傾向が示される。少雨に対する土砂生産の感度の高い斜面崩壊ポテンシャル量の大きい領域であるため、社会基盤の状況と見合わせて平常的な降雨にも斜面動向を注視しなければならない。

4. 河床勾配の分析結果と考察

図-5に河床勾配レベルマップを示す。図-6より、急峻な河床勾配を呈するレベル5に属する流域は、糸魚川―静岡構造線、中央構造線を周辺に集中することが見てとれる。これらの急峻な河床勾配は断層変位地形に関連して形成されていると推測される。これらの地域は、総じて土砂を流出させるエネルギー量が大きく、土砂流出の高さを示している。この結果は、長谷川による研究成果¹⁰⁾に示されるダム堆砂データの傾向とも一致しており、糸魚川―静岡構造線、中央構造線の周辺に位置する北陸、東海、および四国地方のダム比堆砂量は相対的に大きな値を示す。なお、糸魚川―静岡構造線、中央構造線を周辺ほど集中していないが、日高

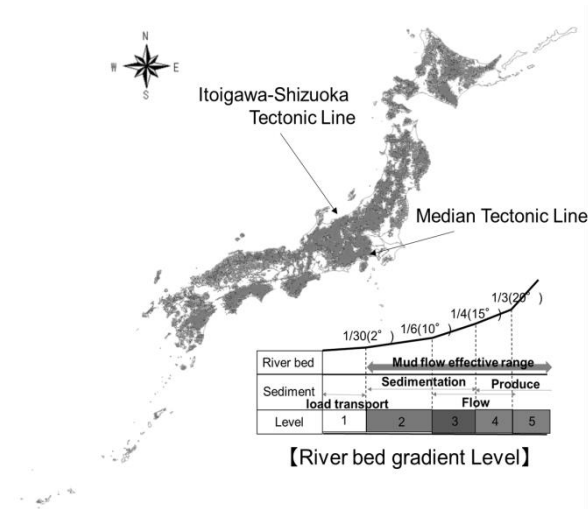


図-5 河床勾配レベルの流域マップ

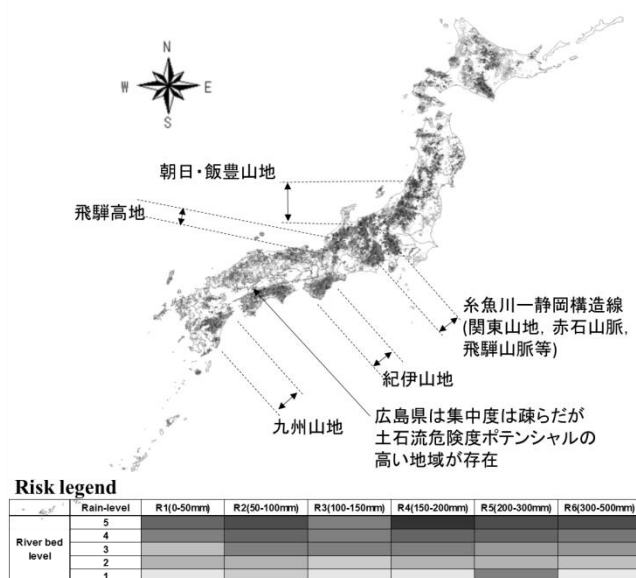


図-6 土石流発生ポテンシャルの危険度マップ

山地西側山麓部、東北地方日本海側(出羽山地中心)、北上山地東側山麓、中国山地北側山麓もレベル5に属する流域が多く認められている。なお、日本列島の河床勾配ランクの占拠率としては、レベル1が25.3%、レベル2が25.7%、レベル3が10.4%、レベル4が7.9%、レベル1が30.7%となる。そのため、運動過程が掃流に相当するレベル1以外の日本列島の74.7%が土砂運動の活発に波及する領域に当てはめられる。

5. 土石流危険流域のポテンシャル評価と考察

図-6に土砂生産を斜面崩壊によるものとして、河床勾配により土砂流出の推力として見積もり、これらの評価を重ね合わせて危険度の高低を評価した土石流危険度のポテンシャル評価マップを示した。

土石流発生ポテンシャルの危険度の高い流域を抽出すると、①朝日山地・飯豊山地、②糸魚川―静岡構造

線周辺に位置する関東－赤石－木曽山地群，③飛騨高地，④紀伊山地，⑤四国山地，⑥九州山地が挙げられる．これら領域には降雨レベルLevel-R6，R5，R4，そして河床勾配レベル5,4が集中している．①から⑥に含まれる流域に関しては，降雨量増加に対して土石流影響範囲も拡大すると見積もられるため，社会基盤情報と重ね合わせた統合的な解析を進める必要がある．現行の評価を物理過程考慮するまでバージョンアップさせることと同時に，現行進められている精度の高い調査と比較しながら降雨量増加に対する対策検討を進めることが望まれる．

なお，参考として，2014年8月20日に発生した広島市内近辺に着目すると前述に示した土石流危険度ポテンシャルの高い流域よりも規模は小さいが，降雨レベルLevel-R6，R5，R4，そして河床勾配レベル5,4が点在している．本災害により広島市内には甚大な被害が認められたが，こうした降雨に対する災害までを評価するためには社会基盤，人口との比較が必須になる．近年の降雨変化の傾向を踏まえても，降雨から災害に至るまでの一連を評価する方法を早急に確立させなければならない．

6. おわりに

日本列島を対象領域に設定し，降雨変動に対する斜面崩壊を土砂生産源に仮定した土石流発生ポテンシャルの危険度を求める解析に取り組んだ．結果として，日本列島で降雨に対して敏感に土石流危険度の増す領域が空間情報として明らかにされた．具体的に土石流危険度ポテンシャルの高い流域の集中する領域を抽出すると，①朝日山地・飯豊山地，②糸魚川－静岡構造線周辺に位置する関東－赤石－木曽山地群，③飛騨高地，④紀伊山地，⑤四国山地，⑥九州山地という結果を得た．

ただし，この結果は相対的な土石流発生ポテンシャルを空間情報として示し，危険流域を領域で抽出しているにとどまる．①地域固有の雨量特性との比較を行う．②表流水の流出量を推計する．③保全対象(家屋，人口等)との関係性を評価する．これらの①から③を検討し，土石流物理過程も求めて社会基盤との関わりまで評価を試み，降雨に対する被害の危険性までを明らかにする取り組みを進めなければならない．

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．ここに記して謝意を示す次第である．

参考文献

- 1) 例えばIPCC：Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, <http://ipcc-wg2.gov/SREX/>, 2011.
- 2) 例えば藤部文昭：日本の気候の長期変動と都市化，天気，Vol.58, pp. 5-18, 2011.
- 3) 鬼頭昭雄：防災影響評価のための極端気象現象の将来変化予測，自然災害科学，Vol.28, pp.281-282, 2010.
- 4) 牛山素行・横幕早季：発生場所別に見た近年の豪雨災害による犠牲者の特徴，災害情報，No.11, pp.81-89, 2013.
- 5) 内閣府非常災害対策本部：8月19日からの大雨による広島県の被害状況等について（第68報），<http://http://www.pref.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/139124.pdf>，Site viewed 2015/06/15.
- 6) 芦田 和男・高橋 保・澤井 健二：土石流危険度の評価法に関する研究，京都大学防災研究所年報，Vol.21, pp.423-439, 1978.
- 7) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ：土木研究所資料 表層崩壊に起因した土石流危険度評価マニュアル(案)，pp.34, 2009.
- 8) Salvatore Grimaldi, Andrea Petroselli, Ettore Arcangeletti and Fernando Nardi：Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic-hydraulic modeling, Journal of Hydrology, Vol.487, pp. 39-47, 2013.
- 9) Giuseppe T. Aronica, Giovanni Biondi, Giuseppina Brigandi, Ernesto Cascone, Stefania Lanza and Giovanni Randazzo：Assessment and mapping of debris-flow risk in a small catchment in eastern Sicily through integrated numerical simulations and GIS, Physics and Chemistry of the Earth, Vol.49, pp.52-63, 2012.
- 10) Ji-Yuan Lin, Ming-Der Yang, Bo-Rung Lin and Ping-Sien Lin：Risk assessment of debris flows in Songhe Stream, Taiwan, Engineering Geology, Vol.123, pp.100-112, 2011.
- 11) 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.
- 12) 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, I_287-I_296, 2012.
- 13) 例えば吉松弘行：山腹崩壊の予測式について，砂防学会誌，Vol.29, pp.1-9, 1977.
- 14) 塚本良則・平松伸二・篠原斉四郎：侵蝕谷の発達様式に関する研究(III)―0次谷と山崩れとの関係―，新砂防，Vol.89, pp.14-20, 1973.
- 15) 国土交通省国土技術政策総合研究所：砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説，国土技術政策総合研究所資料，No.364, 2007.
- 16) 長谷川浩一・若松和寿江・松岡昌志：ダム堆砂データに基づく日本全国の潜在的侵食速度分布，自然災害科学，Vol.24, pp.287-301, 2005.