

気候変動を踏まえた砂防技術検討会  
令和5年度版とりまとめ

令和6年3月

気候変動を踏まえた砂防技術検討会

## 目次

1. 気候変動下における土砂災害対策を取り巻く状況	P1
2. 気候変動を踏まえた土砂災害対策を進める上での課題と検討の方向性	P3
2. 1. 気候変動を踏まえた土砂災害対策の基本的な課題	P3
2. 2. 近年の土砂災害実績を踏まえた課題	P3
2. 3. 近年頻発化の傾向にある土砂・洪水氾濫の顕在化を踏まえた課題	P4
2. 4. 気候変動を踏まえた土砂災害対策の課題と中間とりまとめ時に整理した検討の方向性	P5
3. 中間とりまとめ時に整理した課題に対する検討成果と今後の方向性	P5
3. 1. 気候変動に伴う地域毎の降雨特性の変化に応じて頻発化もしくは新たに顕在化する恐れのある土砂移動現象とその発生頻度の推定	P7
3. 1. 1. 土砂移動現象を引き起こす降雨パターンの変化の把握・類型化	P7
3. 1. 2. 土砂移動現象・降雨特性・地質地形の関係分析に基づく、地域毎に顕在化・頻発化する土砂移動現象の予測	P8
3. 2. 気候変動に伴い顕在化してきた土砂移動現象の発生の蓋然性の高い箇所の解明	P9
3. 2. 1. 生産土砂量・下流への土砂の流出しやすさを評価した土砂・洪水氾濫危険流域抽出手法の検討	P9
3. 2. 2. 土砂流出に係る数値解析手法の高度化	P10
3. 2. 3. 流域スケール土砂動態モデリング	P11
3. 2. 4. 崩壊性地すべり、谷地形が不明瞭な箇所での土石流の発生危険箇所抽出手法の検討	P11
3. 3. 気候変動に伴う降雨特性の変化に応じた生産土砂量の応答特性の解明	P12
3. 3. 1. 物理モデルによる生産土砂量の予測	P12
3. 3. 2. 過去の土砂災害における降雨量と生産土砂量の関係分析	P13
4. 今後検討すべき課題と方向性	P13
4. 1. 気候変動に伴う降雨特性変化が地域ごとの土砂災害の形態、頻度、規模に与える影響の推定	P14
4. 2. 気候変動に伴い顕在化してきた土砂移動現象の発生・被害のおそれの蓋然性の高い箇所の解明	P15
4. 3. 気候変動に伴う降雨特性の変化に応じた流域生産土砂量の応答特性の解明	P17
5. 令和5年度版とりまとめを踏まえた今後の取り組み	P17
参考文献	P19

## 1. 気候変動下における土砂災害対策を取り巻く状況

- IPCC（気候変動に関する政府間パネル）では、2021年～2023年にかけて第6次評価報告書を発表し、「人間活動が主に温室効果ガスの排出を通して地球温暖化を引き起こしてきたことには疑う余地がなく、1850～1900年を基準とした世界平均気温は2011～2020年に1.1°Cの温暖化に達した。」  
「継続的な温室効果ガスの排出は更なる地球温暖化をもたらし、考慮されたシナリオ及びモデル化された経路において最良推定値が2040年（※多くのシナリオ及び経路では2030年代前半）までに1.5°Cに到達する。」と報告している<sup>1)</sup>。
- 日本国内における気象状況として、アメダス全国1,300地点での1時間降水量50mm以上の年間発生件数をみると、1976年からの10年間と直近2013年からの10年間の約40年間で約1.5倍になっているように、増加傾向が見られる<sup>2)</sup>。
- 日本国内における土砂災害の発生件数は、直近の2013年からの10年間の年平均1,446件であり、その前の2003年からの10年間の年平均1,180件に比べ約1.2倍になっており、増加傾向が見られる。なお、現在と同様の整理を開始した1982年からの10年間の1時間降水量50mm以上の年間発生件数は、243回から328回の約1.3倍に増加しており、その期間の土砂災害発生件数は、年平均897件に比べ約1.6倍に増加している<sup>3)</sup>。なお、土砂災害発生件数の誘因別の分類を始めた平成9年から令和4年までの地震による土砂災害発生件数は全体の約4.8%程度であり、それらは気候変動が一因と考えられる災害発生件数の増加とは直接寄与しないが、数値として含まれている。
- また、死者・行方不明者で見ると、2005年頃より増加傾向にあり、10年移動平均で見た場合、2005年の頃に比べ、近年は約2倍以上になっており<sup>4)</sup>、土砂災害が激甚化していることが読み取れる。土砂移動現象別に見ると、特に土石流等による被害が増加している。
- 気候変動による影響が顕在化していることを定量的に評価した研究によると、近年、土砂災害により大きな被害が発生した平成30年7月豪雨では6.7%<sup>5)</sup>、令和元年東日本台風では10.9%<sup>6)</sup>、降雨期間中の総降水量が増加したことが示されている。さらに気候変動が進んだ場合に、令和元年東日本台風規模の台風は、2度上昇で平均4.4%、4度上昇で平均19.8%、総降水量が増加すると評価されている<sup>7)</sup>。
- 将来予測に関する最新の研究では、現在気候（1951年～2011年）と4度上昇時の将来気候（2051年～2111年）の解析結果を比較すると、50年に1度程度の年最大24時間雨量が全国的に増加する。特に東海や九州にかけての太平洋側と北日本で増加率が高く、40%を超える場所も見られるという報告がされている<sup>8)</sup>。
- また、大きな土砂災害を発生させることの多い梅雨豪雨の発生数について2度上昇時は約1.2倍、4度上昇時は約1.5倍に増加すること、発生域の北限が2度上昇時は青森県と秋田県の県境付近、4度上昇時は北海道の石狩地方と留萌地方の境付近まで北上する報告もある<sup>9)</sup>。
- このような気候変動に伴う豪雨の頻発化・激甚化により、これまで発生件数の少なかった地域における土砂災害の増大、さらには、これまで頻度の少なかった土砂移動現象による土砂災害が顕在化してきている可能性がある。今後、気候変動の進展に伴い、台風・梅雨前線ともに影響範囲が東進、北進し、これにより、これまでも集中豪雨が数多く発生した九州西部や中国地方ではより一層降水量が増大し、これまで降水量が多くなかった地域である北海道や東北地方においても集中豪雨が発

生するようになると予想されている<sup>例えば10)</sup>。

- しかしながら、土砂移動現象については、未だ未解明な部分が多く、気候変動による影響を適切に把握し、適応策を検討するためには技術的な課題が多く残っている。
- そこで本検討会では、将来発生・顕在化が懸念される地域毎の土砂移動現象及び対策の検討・実施に必要な関係諸量の調査・評価手法の高度化を図ることによって、土砂災害対策分野における気候変動への適応策の実施に資することを目的として議論を進めてきた。
- ここでは、これまでの議論と研究・技術開発状況を整理し、現時点における成果と引き続き検討すべき内容を取りまとめた。

## 2. 気候変動を踏まえた土砂災害対策を進める上での課題と検討の方向性

### 2. 1. 気候変動を踏まえた土砂災害対策の基本的な課題

- 気候変動を踏まえた土砂災害対策の検討に向け、まず中長期的な土砂災害の傾向を把握するため、1988年から2020年で1つの市町村における死者・行方不明者が5名以上の災害を整理したところ、そのような大きな被害を伴う土砂災害は、フォッサマグナ以西の西南日本で多く、特に花崗岩質の地質が広く分布する西南日本内帯では表層崩壊や土石流が同時多発的に発生することによって生じる土石流の直撃による被害に加えて土砂・洪水氾濫等による被害、付加体が広く分布する西南日本外帯では深層崩壊に起因する被害が多いことが分かった。また、東北日本では、数は少ないものの土砂・洪水氾濫による被害の割合が多く、土砂移動形態はその地域の素因や誘因の特性によって異なることが分かった<sup>11)</sup>。
- 今後、気候変動に伴う土砂災害に適応するためには、気候変動に伴う降雨特性が地域ごとにどのように変化するか、その変化を受けて一層頻発化もしくは顕在化する土砂移動現象は何か、を地域の地質、地形等の特性を考慮し適切に評価する必要がある、その評価手法を構築することが求められている。
- そこでは、発生頻度や発生数の変化割合のような社会が分かりやすく理解できるような表現と共に説明することが望ましい。
- さらに、気候変動への適応策を具体的に検討するために、計画論上の土砂移動現象の規模、設計論上の外力（降水量・生産土砂量・流出土砂量）がどの程度変わるのがかを想定する必要がある。

### 2. 2. 近年の土砂災害実績を踏まえた課題

- 近年の特筆すべき土砂災害としては、年平均（昭和57年から令和4年）の約2.3倍の2,581件もの土砂災害が一連の豪雨で発生した平成30年7月豪雨とこれまで土砂災害の発生が比較的少なかった関東・東北方面において土砂災害が広域に多発した令和元年東日本台風が挙げられる<sup>12)</sup>。
- 平成30年7月豪雨では、広島県呉市や愛媛県宇和島市等で同時多発的な土石流により甚大な人的被害やインフラ被害が発生した。加えて、広島県呉市等で土砂・洪水氾濫が発生し、こちらも人家、人命のみならずインフラへ大きな被害を与え、経済・物流にも大きな影響を与えた。
- 令和元年東日本台風では土砂・洪水氾濫の発生に加え、土砂災害警戒情報の発表基準を上回る大雨特別警報が発表されるような豪雨のあった市町村において、土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域等の指定の対象となっていない、または指定基準を満たさない箇所において土砂移動現象が発生し、人的被害が発生した。
- 具体的には、宮城県丸森町内において土砂・洪水氾濫による被害が発生したほか、群馬県富岡市内における明瞭な地すべり地形を呈さない箇所での地すべり（崩壊性地すべり）による被害の発生、宮城県町廻倉地区における谷地形が不明瞭な箇所での土石流被害の発生等、土砂災害警戒区域の指定基準を満たさない箇所での人的被害が生じた。
- 平成30年7月豪雨や令和元年東日本台風は気候変動による影響が顕在化しているという報告<sup>5),6)</sup>があることから、これらは気候変動化における土砂災害防止法を考える上の将来的な課題とも言える。
- また、気候変動による豪雨の激甚化やこれまで豪雨が少なかった地域における頻度の増加が研究成果でも予測されている<sup>8),9)</sup>が、実際にこれまで発生件数の少なかった地域における土砂災害の増加や、

これまで頻度が少なかった土砂移動現象による土砂災害が顕在化してきており、今後もこのような傾向が続くことが懸念される。

- その中で、崩壊性地すべりや谷地形が不明瞭な箇所での土石流といった土砂災害警戒区域等の指定の対象となっていない、または指定基準を満たさない箇所において発生する土砂移動現象については、ハード・ソフト対策を実施する上で必要となるハザードの特定ができていないため、今後このような現象に対しても警戒避難体制の強化はもとより、施設整備等の対策を適切に講じることができるよう、発生の蓋然性の高い箇所の抽出しハザードを特定する手法を確立することが重要な課題となる。

## **2. 3. 近年頻発化の傾向にある土砂・洪水氾濫の顕在化を踏まえた課題**

- 土砂・洪水氾濫は、表層崩壊等により発生した多量の土砂が、谷出口より下流の河道で堆積することにより、河床上昇・河道埋塞が引き起こされ、土砂と泥水もしくは泥水の氾濫が発生する現象で、その被害は土石流と比較し広範囲に及ぶ。土砂・洪水氾濫は、これまで度々大きな被害をもたらしてきたが、平成後半以降、頻発化の傾向にある<sup>13)</sup>。
- 過去から土砂・洪水氾濫は発生していたが、阪神大水害（昭和 13（1938）年）等のように、高度成長期以前に流域の広い範囲が禿地であった地域で大きな被害をもたらした土砂・洪水氾濫は、流域の荒廃が著しかった時期に、禿地での活発な表面侵食や小規模な表層崩壊により恒常的に生産され河床等に堆積していた土砂が下流に流送され、下流域の河床上昇を引き起こしたことが主たる要因の一つであったと考えられる。
- このような地域においては、例えば平成 30 年 7 月豪雨時に六甲山周辺には阪神大水害を上回る降雨量があったにも関わらず、被害は大幅に軽減されたことから分かるように、土砂の生産、流送域における山腹工の施工等による森林の回復、砂防堰堤及び床固工等が整備されたことによって、山腹斜面の侵食抑制や溪床堆積土砂の流出防止が図られ、今日においても流域内の土砂移動が大幅に抑制され、被害を防止していると考えられる<sup>14)</sup>。
- 現在は、高度成長期におけるエネルギー革命を経て、樹木の伐採が大きく減り山腹に植生が回復したことによって、かつて禿地が広がっていたような流域を含め、日本各地において森林土壌の発達が進んでいると考えられる。
- また、近年発生している土砂・洪水氾濫は、森林が発達している流域において同時多発的な表層崩壊等が発生することに起因している事例が多いことから分かるように、禿地が広がっていた時期に比べ土砂生産の形態が大きく変化してきており、今後、ここ数十年に経験したことがないような集中豪雨が発生すると、森林に覆われた山腹斜面において表層崩壊やこれに伴う土石流が発生し、溪床堆積物の移動を防止することに主眼を置いた対策を実施しその効果が表れてきている流域や、中小出水では殆ど土砂移動がないような流域においても、土砂・洪水氾濫による被害が発生するおそれがあるものと考えられる。
- このように、大崩壊地等、現在、継続的な土砂生産が生じている流域ばかりでなく、かつて流域の広い範囲が禿地であって、そこから長年にわたって経年的に流出した多量の土砂が溪床に堆積している溪流、すなわち過去の土砂・洪水氾濫を受けて施設整備を進めてきた流域や、明らかな土砂生産源がないような流域で発生する土砂・洪水氾濫に対しても適切に対策を講じるためには、気候変動に伴う降雨特性の変化によって表層崩壊等によって多量の土砂が生産され、その土砂が下流域に運搬され

保全対象付近に堆積しやすい特徴を有する流域（以下、「土砂・洪水氾濫危険流域」という。）を特定し、被害が想定される範囲を把握する必要がある。

- また、近年の土砂・洪水氾濫では、表層崩壊や土石流により山腹等から流木が大量に生産されることで被害を増長している事例が多く見られ、流木による被害の増大が懸念される<sup>15)</sup>。災害実績等を踏まえ、土砂・洪水氾濫対策に着手する流域では、土砂・洪水氾濫時に流出する流木への対策も必要に応じて実施することが重要であるため、発生する流木量、流木に伴う被害想定手法を構築することも求められている。

## **2. 4. 気候変動を踏まえた土砂災害対策の課題と中間とりまとめ時に整理した検討の方向性**

- 中間取りまとめ<sup>15)</sup>において、「近年の土砂災害実績を踏まえた課題」、「近年の土砂・洪水氾濫の顕在化を踏まえた課題」を踏まえ、以下の通り検討すべき課題が整理されている。
- 今後の気候変動を踏まえた土砂災害への適応策を推進するためには、①どのような土砂移動現象が今後頻発化もしくは新たに顕在化する恐れがあるのかを社会全体として認識できるようにすることと、②計画論上の土砂移動現象の規模、設計論上の外力（降水量・生産土砂量・流出土砂量）がどの程度増加するのかを推定する手法を構築することが重要となる。
- ①については、今後どのような土砂移動現象がどのような地域・箇所で頻発化もしくは新たに顕在化する恐れがあるのか、即ち「現象の変化の解明」については、広域的、地域的の両方の視点より検討を進めるべきである。
- 広域的な視点での検討としては、まずは気候変動に伴う地域毎の降雨特性の変化に応じて今後より一層頻発化もしくは新たに顕在化する恐れのある土砂移動現象を推定するとともに、その発生リスクの変化傾向を大まかな地域毎に評価する手法の構築を行い、全国各地域における気候変動による土砂災害リスクが今後どのように変化を把握できるようにすべきである。
- 地域的な視点での検討としては、具体的なハード・ソフト対策における適応策を講ずる観点から、特に気候変動に伴う降雨特性の変化によって顕在化しつつある、土砂・洪水氾濫のほか、崩壊性地すべりや谷地形が不明瞭な箇所での土石流のような、現在土砂災害防止法で指定基準、ハザードの広がり特定する手法が定められていない土砂移動現象が発生する蓋然性の高い箇所の抽出手法の構築を急ぐべきである。
- ②については、降水量の増加に応じてどう生産土砂量が変化するのか、即ち降水量に対する生産土砂量の応答特性を評価する手法及び山地の特徴を踏まえた流域スケールでの水・土砂流出を評価する手法の構築を目指すべきである。

## **3. 中間取りまとめ時に整理した課題に対する検討成果と今後の方向性**

- 上記を踏まえて、各課題に関する取り組みの方向性が整理されている<sup>16)</sup>（表1）。短期的に対応するものと中長期的に取り組む必要があるものに分かれる。以下の章では、これまでの研究・技術開発の取り組みを整理し、現時点での成果や今後の方向性について整理した。

表 1 「気候変動を踏まえた砂防技術検討会中間取りまとめ」を踏まえた研究・技術開発課題への取組（気候変動を踏まえた砂防技術検討会第3回資料より<sup>13)</sup>）

「気候変動を踏まえた砂防技術検討会中間取りまとめ」を踏まえた研究・技術開発課題への取組		取組期間: 赤(1年程度)、青(2年~4年) 黒(長期的課題)
取組内容		アウトプット・行政施策への反映のイメージ
①気候変動に伴う地域毎の降雨特性の変化に応じて頻発化もしくは新たに顕在化する恐れのある土砂移動現象とその発生頻度の推定		
1.土砂移動現象を引き起こす降雨パターンの変化の把握・類型化	・スネークラインのCL超過回数を指標とした気候変動による降雨特性変化に伴う土砂災害リスク地域別変化 ・気候変動による集中豪雨等の降雨特性変化	将来の地域別リスクの変化→警戒避難情報提供の高度化
2.土砂移動現象・降雨特性・地質地形の関係分析に基づく、地域毎に顕在化・頻発化する土砂移動現象の予測	主要な土砂災害の土砂移動形態、素因、誘因等の諸元の整理、土砂移動現象毎の支配的な素因・誘因の特性分析	・素因と土砂移動形態の関係把握 ・降雨と土砂移動形態の関係把握 将来の地域別リスクの変化→警戒避難情報提供の高度化
②気候変動に伴い顕在化してきた土砂移動現象の発生の蓋然性の高い箇所の解明		
1.生産土砂量・下流への土砂の流出しやすさを評価した土砂・洪水氾濫危険流域抽出手法の検討	・既往の土砂・洪水氾濫の土砂移動・被災実態整理、コネクティビティ評価等に基づく、土砂・洪水氾濫危険流域・区域の抽出手法検討 ・土砂・洪水氾濫被害想定・施設配置計画手法高度化	土砂・洪水氾濫のおそれのある流域の抽出、土砂・洪水氾濫危険流域危険度評価、被害想定高度化
2.土砂流出に係る数値解析手法の高度化	豪雨時の細粒土砂の挙動を考慮した掃流状集合流動区間の土砂動態解析手法の検討	土砂動態解析手法高度化
3.流域スケールの土砂動態モデリング	マルチスケール流域土砂動態モデルの開発と動的土砂災害対策への応用	流域土砂動態モデルの開発
4.崩壊性地すべり、谷地形が不明瞭な箇所での土石流の発生危険箇所抽出手法の検討	(崩壊性地すべり) 集水面積・傾斜等の地形、降下火砕堆積物等の地質に着目した発生箇所の類型化 (谷地形が不明瞭な箇所での土石流) 発生場の特徴に関する現地の詳細調査	・崩壊性地すべりの危険箇所抽出手法 ・谷地形が不明瞭な箇所での土石流の危険箇所抽出手法
③気候変動に伴う降雨特性の変化に応じた生産土砂量の応答特性の解明		
1.数値シミュレーション・物理モデルによる生産土砂量の予測	・土層生成速度、樹木根系の効果を含む斜面せん断強度、間隙水圧変化を考慮した流域生産土砂量予測	生産土砂量の予測高度化
2.過去の土砂災害における降雨量と生産土砂量の関係分析	・西日本豪雨における崩壊・土石流に関する降雨量と生産土砂量の関係分析 ・既往の降雨量と生産土砂量関係分析結果・手法整理	降雨量と生産土砂量の関係式 →砂防計画等で土砂量等の見直し

### 3. 1. 気候変動に伴う地域毎の降雨特性の変化に応じて頻発化もしくは新たに顕在化する恐れのある土砂移動現象とその発生頻度の推定

#### 3. 1. 1. 土砂移動現象を引き起こす降雨パターンの変化の把握・類型化

##### ①気候変動による集中豪雨等の降雨特性変化

- 大きな土砂災害を発生させることの多い梅雨豪雨について、気候予測データセット（NHRCM05）を用いて発生数を整理した結果、梅雨豪雨の発生数について2度上昇時は約1.2倍、4度上昇時は約1.5倍に増加すること、発生域の北限が2度上昇時は青森県と秋田県の県境付近、4度上昇時は北海道の石狩地方と留萌地方の境付近まで北上することが示されている<sup>9)</sup>。
- 大規模な地球温暖化予測データベース「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（d4PDF）」を、日本全国を対象に5kmメッシュに高解像度化し、線状降水帯や複雑な地形の影響を受けた大雨を再現するための多数の高解像度気候予測シミュレーションを実施した最新の研究成果によると、線状降水帯の発生頻度は、2度上昇時に約1.3倍、4度上昇時に約1.6倍になること、50年に1度程度の年最大24時間雨量が全国的に増加し、特に東海や九州にかけての太平洋側と北日本で増加率が高く、40%を超える場所があることが示されている<sup>8)</sup>。
- 日本全国を網羅した多数の高解像度気候予測シミュレーションにより線状降水帯や梅雨末期、台風による大雨の将来変化を評価することが出来るようになったこと<sup>8)</sup>を踏まえ、今後は最新のデータセットを用いて土砂災害対策に着目した降雨特性変化を把握するとともに、砂防計画検討への反映手法を検討する必要がある。
- その際、事業目的ごとに適した手法を検討するのが望ましい。具体的には、主に数10～100km<sup>2</sup>以上の流域で実施することの多い土砂・洪水氾濫対策では、気候変動を踏まえた治水計画のあり方 提言（令和元年10月、令和3年4月改訂）<sup>17)</sup>や気候変動を踏まえた下水道による都市浸水対策の推進について 提言（令和2年6月、令和3年4月一部改訂）<sup>18)</sup>の知見を踏まえて、過去実験と将来実験との降雨量の変化倍率を検討すると共に、具体的な砂防計画・設計への反映に向けた議論すべき・解決すべき論点を整理することが考えられる。具体的な事例として、例えばアンサンブル予測降雨波形データを用いて、クラスター分析によりこれまで豪雨を経験していない小流域で降雨が卓越する、反対に降雨が減る場合等の評価を行うことが考えられる。
- また、5km<sup>2</sup>以下の流域で実施することの多い土石流対策では、これまでその規模の流域スケールの年超過確率1/100以上の規模（より高頻度）の降雨特性変化に関する知見が少ないことから、まずは、降雨量変化倍率の検討に適した地域区分について分析・検討を実施する。地域区分については、都道府県ごと、気象予報区分ごとに降雨変化倍率を設定する等が考えられる。
- また、土砂・洪水氾濫対策、土石流対策共に山地部と平野部での地形や標高等の違いといった降雨特性に及ぼす影響を踏まえて検討することが望ましい。

##### ②スネークラインのCL超過回数を指標とした気候変動による降雨特性変化に伴う土砂災害リスク地域別変化

- 日本全国を対象に気候予測データセット（NHRCM05）を用いて現在気候（1980年～2000年）と2度上昇時・4度上昇時の将来気候（2076年～2095年）とのスネークラインのCL（土砂災害発生基準線、

Critical Line) 超過降雨イベントの発生頻度を比較した研究では、全国的に降雨イベントの発生頻度の増加傾向が見られ、これらを土砂移動現象の形態と関連が深いと考えられる地帯構造をもとにしたブロック別に整理すると、西南日本内帯では梅雨前線の影響で初夏に頻度が増加、北海道東部と東北日本では台風の影響で夏の終わりに頻度が増加、フォッサマグナと西南日本外帯と沖縄では両方の影響で7月から9月に全般的に頻度が増加する傾向が見られることが報告されている<sup>19)</sup>。

- 発生頻度について、日本全国を平均した増加割合を見てみると、現在気候と比較した場合、2度上昇時は約1.3倍、4度上昇時は約2.1倍（予測シナリオごとに約1.8倍～約2.6倍）となっている。
- ここでCLは、土砂災害警戒情報の発表基準であり、土砂災害警戒情報は、土石流や同時多発的ながけ崩れを対象としている。CL超過降雨イベントの増加は地域の警戒避難体制への負荷の増大を意味するとともに、気候変動により土石流や同時多発的ながけ崩れの発生リスクが増加する可能性が高いことを示している。
- これにより、気候予測データと3. 1. 2. で検討された土砂移動毎の支配的な素因・誘因の整理結果と合わせることで、地域ごとに顕在化する災害の形態を推定する手法・考え方は整理された。

### 3. 1. 2. 土砂移動現象・降雨特性・地質地形の関係分析に基づく、地域毎に顕在化・頻発化する土砂移動現象の予測

#### ①主要な土砂災害の土砂移動形態、素因、誘因等の諸元の整理、土砂移動現象毎の支配的な素因・誘因の特性分析

- 主要な土砂災害の素因の特性分析について1988年4月から2020年9月の間で1つの市町村において死者・行方不明者が5名以上発生した災害の48件を地体構造別に整理・分析したところ、土石流、がけ崩れ、土砂・洪水氾濫は素因によらず全国的に発生すること、土石流は西南日本で多く、特に花崗岩が広く分布している西南日本内帯で多いこと、深層崩壊は西南日本で発生し、付加体が広く分布している西南日本外帯で多いこと、東北日本やフォッサマグナの地域では西南日本内帯・外帯に比べ発生数が少ないということが分かった<sup>16)</sup>。
- 誘因の特性分析について、整理した災害を対象に土砂移動現象（土石流、がけ崩れ、土砂・洪水氾濫、深層崩壊）ごとに発生する降雨パターンを把握するためにスネークラインの形状での類型化を行った研究では、スネークラインの包絡線を設定した場合に、土砂・洪水氾濫が短時間指標（60分積算雨量）と長時間指標（土壌雨量指数）の両方の影響が強いこと、深層崩壊は長時間指標の影響が強いことが示された<sup>7)</sup>。
- 土砂災害の素因である地体構造や誘因である降雨パターンを基に発生しやすい場や条件について、一定程度整理が進んできた。これらと気候予測データと3. 1. 1. で検討されているCLを用いて土砂災害の発生頻度を求める手法を組み合わせることで、今後、どの地域でどのような土砂移動現象が頻発化・激甚化するかを推測することが考えられる。例えば、これまで西南日本に比べ土砂災害が少ない傾向にあった東北日本で、土砂災害の発生頻度、特に土砂・洪水氾濫の頻度が増加する可能性があるといった今後顕在化する土砂災害の特徴を推定することが出来る。しかしながら、地質や降雨波形に関する情報が不足していると、推測が困難になるため、データが蓄積されている地域で試行し、課題を整理することが望ましい。
- このような検討を進めることで、例えば直轄砂防事業における気候変動への適応策を検討する上での

対象現象やシナリオを決定する材料になる。また各都道府県において、気候変動により頻発化、激甚化する可能性のある土砂移動現象を推定し、今後の土砂災害対策の方向性を検討することが可能となる。例えば、土石流対策が主の自治体において、頻発化する可能性のある土砂・洪水氾濫対策も対象とするうえでの意思決定のツールとなり得る。

### 3. 2. 気候変動に伴い顕在化してきた土砂移動現象の発生の蓋然性の高い箇所 の 解明

#### 3. 2. 1. 生産土砂量・下流への土砂の流出しやすさを評価した土砂・洪水氾濫危険流域抽出手法の検討

##### ① 既往の土砂・洪水氾濫の土砂移動・被災実態整理、コネクティビティ評価等に基づく、土砂・洪水氾濫危険流域・区域の抽出手法検討

- 表層崩壊等によって多量の土砂が生産され、その土砂が下流域に運搬され保全対象付近に堆積しやすい特徴を有する溪流(土砂・洪水氾濫危険流域)を経験的もしくは物理的に特定する手法の確立には、一定程度の時間が有する。そこで、まず過去に被災実績がある流域の特徴と同様の条件で発生リスクが高いことと想定し、流域抽出の考え方を整理のために事例分析を行った。
- そこで、平成 21 年から平成 30 年までに土砂・洪水氾濫が発生し、流域の土砂動態が把握出来ている事例を分析し、流域面積が 3km<sup>2</sup> 以上、生産土砂量が 10 万 m<sup>3</sup> 以上の流域で発生していることが分かった。また、被害家屋の実態が把握出来ていた平成 29 年九州北部豪雨、平成 30 年西日本豪雨、令和元年東日本台風の事例を分析し、河床勾配が 1/150 から 1/200 において家屋流出等の家屋被害の大半が発生する傾向があることが分かった<sup>20)</sup>。
- 上記の知見を取りまとめる形で、「土砂・洪水氾濫により大きな被害のおそれのある流域の調査要領(案)(試行版)(以下、「抽出要領」という。)」が令和 4 年 3 月に公開された<sup>21)</sup>。
- 抽出要領に基づき、都道府県を中心に土砂・洪水氾濫危険流域の抽出を引き続き進め、優先度に応じてハード対策を実施することが考えられる。一方、土砂・洪水氾濫が発生した際の被害範囲を推定する手法や、抽出要領で把握しきれない土砂・洪水氾濫危険流域の把握手法には引き続き課題があることを踏まえ、災害時のデータ蓄積、研究・技術開発を継続していく必要がある。
- その際、土砂水理学的な知見を踏まえた手法の検討を基本にしつつ、山地流域では狭隘な谷地形、谷底平野、扇状地等、地形が複雑に変化することを踏まえ、モデル化が困難な箇所について、山地域から下流域への土砂の流出しやすさ(土砂流出ポテンシャル)を土砂に関する山地域と下流域の土砂流下の接続性(コネクティビティ)等によって便宜的に取り扱う手法を、必要に応じて検討することが望ましい。

##### ② 土砂・洪水氾濫被害想定・施設配置計画手法高度化

- 河川砂防技術基準 計画編 第 3 章 砂防(土砂災害等対策)が平成 31 年 3 月に改訂され、土砂・洪水氾濫対策施設の配置は数値計算等に基づき計画することになったことを踏まえ、直轄砂防事業を中心に数値計算による土砂・洪水氾濫被害想定・施設配置計画検討が進められている。令和 5 年 12 月時点で、8 事業において数値計算による施設配置計画策定が完了している。
- しかし、土砂・洪水氾濫は、山地上流域で表層崩壊が土石流化、もしくは溪床堆積物が土石流化し、河床勾配に応じて土砂移動形態を掃流状集合流動、掃流へと変化させながら、堆積・侵食を繰り返し

河床変動が発生した結果として発生する。その水流出・土砂流出のメカニズムは、その複雑さから未解明な部分が多いため、水流出・土砂流出の評価手法の検討・高度化を複数の手法を比較しながら検討を進めていくことが望ましい。

- その際、水・土砂流出の適切な予測のために、山地流域の降雨分布特性を想定することが必要であり、**3. 1. 1. ①**で示した降雨特性変化を踏まえた砂防計画立案手法と合わせた技術開発を進めていく必要がある。
- 砂防計画立案手法の検討と合わせて、土砂・洪水氾濫対策に有効と考えられるコンクリートスリット砂防堰堤や遊砂地等の効果を河床変動計算において適切に表現出来る手法も検討することが望ましい。
- 合わせて、検討した手法を検証するためのデータの取得は極めて重要である。豪雨時の降雨、流量、流砂量、地形変化等のデータを取得することが求められる。
- 水・土砂の流出のメカニズムを把握する上では、常時、災害時の現地観測データを蓄積し、数値計算との比較を行うことで精度向上が図られるものであるため、流砂水文観測を継続的に実施することが望ましい。山地流域は、比流量が大きく粒径階が幅広く存在し、土砂供給も間欠的であるという特徴から、流砂観測の結果の精度に未だ課題があることを踏まえ、流砂観測結果と数値シミュレーションをお互い補完することで精度向上を図る手法の開発を進める必要がある。
- さらに近年の土砂・洪水氾濫発生時には土砂と共に流下する流木により被害が増大する事例がある。しかしながら、これまで流木の対策計画を立案する手法が整理されていなかった。現時点の知見を整理し、土砂・洪水氾濫対策時に流出する流木量を推定する手法を示した令和5年8月に「土砂・洪水氾濫時に流出する流木の対策計画の基本的な考え方（試行版）」（以下、「流木マニュアル」という。）が公表された<sup>2)</sup>。ただし、ここでは対処すべき流木量の算出手法を提示するに留まり、流木により河道や橋梁が閉塞する可能性を評価する手法や施設配置計画の考え方が示されていないため、今後知見を蓄積し、流木マニュアルを改訂していくことが求められる。

### 3. 2. 2. 土砂流出に係る数値解析手法の高度化

#### ①豪雨時の細粒土砂の挙動を考慮した掃流状集合流動区間の土砂動態解析手法の検討

- 河床勾配が急な山地溪流では、土石流～掃流状集合流動～掃流と土砂移動形態が変化しながら下流へ土砂が流下する。細粒土砂等の影響により、土砂動態が変化することが報告されており、特に豪雨時の細粒土砂の挙動に影響を受ける掃流状集合流動区間における土砂動態解析の精度向上は、土砂災害対策のために検討すべき課題である。
- そのような土石流～掃流状集合流動～掃流と土砂移動形態が変化する区間の解析について検討する上で、これまでの研究成果を踏まえた上で検討を進めることが望ましい。
- 近年のデータが取得されている出水を対象に解析を実施した研究事例では、継続的な大規模崩壊地からの土砂流出現象は、既往の解析手法で再現可能である反面、新たに崩壊が発生することにより大量な細粒土砂を含む土砂が生産され、河床材料に比べ細粒土砂の割合が大きい土砂が供給されるような出水の場合は、既往の解析手法では再現が出来ず、細粒土砂の液相化（細粒土砂が水と同じ挙動を示し、見かけの水の密度が増加することで土砂が流れやすくなる現象）等を考慮することで一定の精度での再現が可能となるすることが出来ることが報告されている。加えて、粒径分布等解析上影響の大

きな項目が明確化されたことが報告されている<sup>22)</sup>。

- 一方、同一河川でも、出水規模の違いにより場の条件が異なることが想定されるため、大規模出水時と中小規模出水時の土砂移動現象を共に精度良く再現する手法もしくは使い分けする場合はその考え方を引き続き検討し、研究を進める必要がある。
- その使い分けについては、砂防事業で想定するシナリオを明確にし、土砂生産から流出のシナリオに応じたモデルを選定するという観点を持つことが考えられる。

### 3. 2. 3. 流域スケール土砂動態モデリング

#### ①マルチスケール流域土砂動態モデルの開発と動的土砂災害対策への応用

- 平成 23 年紀伊半島大水害のように大規模な土砂災害が発生した場合、深層崩壊、表層崩壊、土石流、土砂・洪水氾濫等の様々な形態の土砂生産・土砂移動現象が発生する。その際には、様々な時空間スケールの河床変動が発生する。流域スケールの土砂流出特性を検討する場合でも、斜面・溪流スケールでの土砂流出現象も考慮出来るモデル、いわゆるマルチスケールの土砂動態を解析するモデルが必要である。それを活用することで、被害推定や災害後の再現計算が容易になる。
- 1つの事例として、個別の土石流モデル Mopho2DH と流域土砂動態モデル SiMHIS の統合により、マルチスケール流域土砂動態モデルが開発された。そのモデルを、和歌山県を流れる那智川における平成 23 年紀伊半島大水害を対象に適用し、土石流が発生する溪流から流出する土砂量を、土石流による溪床や溪岸の侵食現象により評価可能であることが報告されている<sup>24)</sup>。
- 土砂移動現象ごとの数値計算モデルの高度化が必要である一方、マルチスケール流域土砂動態モデルのような現状のモデルを統合し、その時点において実用可能なツールを準備しておくことは重要である。今後は、例えば流木に関するモデルを統合する等、より汎用性の高いモデルとなるような取り組みを進めることが望ましい。

### 3. 2. 4. 崩壊性地すべり、谷地形が不明瞭な箇所での土石流の発生危険箇所抽出手法の検討

#### ①(崩壊性地すべり) 集水面積・傾斜等の地形、降下火砕堆積物等の地質に着目した発生箇所の類型化

- 明瞭な地すべり地形や谷地形が認められない 30 度未満の緩斜面で発生し、土砂災害警戒区域の指定基準に満たしていない箇所が発生する崩壊性地すべりの類型化のために、降雨（過去 50 年間）及び地震（過去 100 年）により発生した崩壊性地すべりの事例を整理した。それにより、「崩壊性地すべりは、明瞭な地すべり地形や谷地形が認められない緩斜面において、降雨や地震時に突発的に発生し、土塊（斜面の一部）が高速かつ長距離移動する現象であり、典型的には、地質構造等の弱面に起因して土塊の「すべり」が発生し、並進運動（比較的平らな面に沿った移動）する。また、土塊が高速で長距離移動することで、土塊の大半が斜面から抜け出し、原型が崩れてバラバラになることも多い。」と整理された<sup>25)</sup>。
- 発生危険箇所の抽出に向け、誘因を整理した結果、降雨では日雨量が 100 年超過確率を超える豪雨での発生事例が 8 割を示し、近年増加傾向で 1995 年以降は関東以北での発生事例が確認されている。地震では震度 6 以上での発生事例が 8 割を示し、ほとんどが関東以北であることが分かった。
- また、素因を整理した場合、地質、地質構造では、流れ盤上の地質構造を有し、堆積岩、テフラ（火

山灰等)、火山岩で多く発生することがわかり、それぞれに発生する地質年代も把握出来るようになってきた。

- 地形、地質による類型化は進んだ一方、具体の発生箇所の抽出手法については、引き続き検討が必要である。今後は、的確なソフト対策に向けて、崩壊性地すべりの発生危険度が高い箇所の特定や発生リスクの低減方策を検討することが望ましい。
- 崩壊性地すべりや深層崩壊のような発生事例や発生頻度が少ない災害現象については、現状においては発生の蓋然性が高い個別箇所を抽出することが困難であり、また仮に特定が可能であったとしても、他の土砂移動現象と比較してハード対策実施の優先度が低くなる可能性がある現象でもある。このような現象に対して、ハード対策、ソフト対策の検討の方向性について今後議論していくことが望ましい。

## ② (谷地形が不明瞭な箇所での土石流) 集水面積・傾斜等の地形、降下火砕堆積物等の地質に着目した発生箇所の類型化

- 長期的に取り組む課題としていたことや発生事例が少ないことから、未解明なことが多い。海外では、hillslope debris flow や debris avalanche と呼ばれ知見が多い(例えば 26), 27) ことから、海外も含めて情報収集を行い、検討すべき点を整理することが望ましい。
- また、ゼロ次谷への表流水の集中や、中間流の集中が原因との指摘があるため、発生時には調査を実施し、そのような発生場の特徴の把握を継続していくことが望ましい。

## 3. 3. 気候変動に伴う降雨特性の変化に応じた生産土砂量の応答特性の解明

### 3. 3. 1. 物理モデルによる生産土砂量の予測

#### ①土層生成速度、樹木根系の効果を含む斜面せん断強度、間隙水圧変化を考慮した流域生産土砂量予測

- 山地流域の地表近傍における多階層的な水文地形システムのプロセスベースドモデルを構築し、豪雨による表層崩壊の発生場と発生のタイミング、そして崩土量を説明し、予測することのできる革新的なモデルが構築された<sup>28)</sup>。
- これにより降水量の増大と共に流域からの生産土砂量も増大するが、土砂の量と地形に制約された上限をもつ、土砂生産の非線形性の再現が可能となった。例えば、平成 28 年九州北部豪雨における赤谷川で再現を実施した事例がある<sup>29)</sup>。これにより将来降雨予測波形を複数与えることで、生産土砂量の推定だけでなく、確率評価が可能となった。
- 本モデルを用いた実装を着実に進め、気候変動に伴う降雨特性の変化に応じた生産土砂量の応答特性を砂防事業へ反映させる手法を検討することが望ましい。
- 合わせて、本モデルの適用外となる花崗岩以外の地質において、3. 3. 2. を参考に生産土砂量の応答特性を経験的もしくは物理的、もしくは両方を用いた手法を研究・開発し、展開していくことも必要である。
- また、気候変動に伴う降雨特性の変化に応じた生産土砂量の応答特性を解明するにあたっては、過去と今日における森林状況等の山地環境の変化に留意すべきことも重要であるが、若い森林での土砂災害(昭和 63 年 7 月豪雨災害での広島県旧加計町)と成熟した森林での土砂災害(平成 29 年九州北部豪雨での福岡県朝倉市)を対象とし、土砂災害を引き起こした降雨及び発生流木量を比較した研究が

ある。そこでは、成熟した森林は若い森林と比較して、より規模の大きい豪雨に対して防災機能を発揮できること、成熟した森林では、若い森林と比較して土砂災害時の流木量が大きくなることが明らかにされている<sup>30)</sup>。中長期的には、林齢の異なる森林の根系の緊縛力、森林の重量、森林の蒸発散等による斜面崩壊、流出への影響を考慮することで、森林管理と一体となった砂防計画、流域流木対策計画の立案が可能になると考えられる。

### 3. 3. 2. 過去の土砂災害における降雨量と生産土砂量の関係分析

#### ①平成 30 年 7 月豪雨における崩壊・土石流に関する降雨量と生産土砂量の関係分析

- 3. 3. 1. で物理モデルによる生産土砂量の予測手法の研究事例を示した。ているが、この研究事例で用いられた手法は、基盤岩が花崗岩類で構成されている地域を対象として構築されており、他の地質帯で適用可能な物理モデル構築には引き続き時間が必要である。そこで、今後も引き続き過去の土砂災害時の降雨量と生産土砂量の関係から、将来予測される降雨規模に応じた生産土砂量を推定する経験的な手法も合わせて、検討を進めることが重要となる。
- 平成 30 年 7 月豪雨に加え、昭和 63 年 7 月豪雨災害、平成 11 年 6 月豪雨災害、平成 22 年 7 月豪雨災害、平成 26 年 8 月豪雨を加えて、1km メッシュごとの地質別の崩壊生産土砂量と降雨量の関係を整理した研究事例では、崩壊生産土砂量の上位 10%とピークまでの積算雨量を比較した場合、線形で増加する結果が出ている<sup>29)</sup>。
- また、花崗岩類以外の地質帯にも適用事例のある既往の物理モデルである H-SLIDER 法により崩壊生産土砂量を推定したところ、4 次谷～5 次谷の流域区分において、モデルを用いて推定した土砂量が平成 30 年 7 月豪雨の実績値とオーダーレベルで合ってくる上、降雨が増加すると崩壊生産土砂量が頭打ちになり、頭打ちが発生するのが平成 30 年 7 月豪雨の約 2 倍相当の雨量で発生するとの結果が出た。
- 経験した降雨と崩壊生産土砂量の関係のみから、未経験降雨による崩壊生産土砂量を推定することの限界や採用する物理モデルを用いた場合の妥当性の判断について、引き続き課題となっている。
- これらについて、3. 3. 2. ②と合わせて、将来予測される降雨規模に応じた生産土砂量を推定する経験的手法の活用や経験的手法と物理的手法を組み合わせた手法について継続して検討を進める必要がある。

#### ②既往の降雨量と生産土砂量関係分析結果・手法整理

- 平成 29 年九州北部豪雨の赤谷川を対象に、谷次数ごとに生産土砂量と降雨量との関係を整理した事例では、1 次谷流域では、最大 24 時間雨量 600mm で比生産土砂量に頭打ちがある傾向がみられた。また、4 次谷流域では、最大 24 時間雨量と比生産土砂量をロジスティック回帰曲線で表現出来る可能性が示されている<sup>29)</sup>。3. 3. 2. ①の 1km メッシュごとの分析で降雨に対し崩壊生産土砂量が線形で増加していることから、計画立案の対象とする流域のスケールに留意することが重要であることが分かる。
- 3. 2. 2. ①と同様の課題はあるものの、それらを踏まえて更なる経験的手法の検討や経験的手法と物理的手法を組み合わせる手法を継続して検討を進める必要がある。
- 加えて、新たな災害発生時にはデータ収集を実施し、検討事例を蓄積していくことが望ましい。

#### 4. 今後検討すべき事項と方向性

- 中間とりまとめを受けた研究・検討や中間とりまとめ後の様々な分野の検討は進んできたものが、未だ解決すべき課題が多い。しかしながら、近年の災害状況を踏まえても検討すべき課題の方向性に大きな変化はない。一方、気候変動を踏まえた土砂災害への適応策を検討するために、土砂災害への影響の見える化や適応策の具体的な検討について、優先順位を付けつつ少しでも進めるべきである。
- 1つ目として、どのような土砂移動現象が今後頻発化もしくは新たに顕在化する恐れがあるのかを社会全体として認識できるようにすることが必要であり、具体的な方向性は以下の通りである。
- 気候変動で予想される降雨特性の変化により、土砂移動現象がどのような地域・箇所でも頻発化もしくは新たに顕在化する恐れがあるのか、を把握すべきではないか。
- 降雨特性変化については、土砂災害対策の適応策を検討するために、地域特性を踏まえた定量化に向けた試みを進めるべきではないか。
- 頻発化、顕在化する土砂移動現象を推定し、具体的なハード・ソフト対策における適応策を講ずる観点から、特に気候変動に伴う降雨特性の変化によって顕在化しつつある、土砂・洪水氾濫のほか、谷地形が不明瞭な箇所での土石流や、崩壊性地すべりのような、現在土砂災害防止法で指定基準、ハザードの広がりやを特定する手法が定められていない土砂移動現象が発生する蓋然性の高い箇所の抽出手法、被害想定手法の構築を継続し、実装に向けた検討を進めるべきではないか。
- 土砂災害防止法の対象となっている土砂移動現象についても、気候変動による影響が顕在化していないか継続的に調査することが必要ではないか。その際、地域特性を考慮した分析を行うべきではないか。
- 2つ目として、計画論上・設計論上の外力（降水量・生産土砂量・流出土砂量）がどの程度増加するのかを推定する手法を構築することが必要であり、具体的な方向性は以下の通りである。
- 降水量の増加に応じてどう生産土砂量が変化するのか、即ち降水量に対する生産土砂量の応答特性を評価する手法の現場実装に向けた検討を進めるべきではないか。
- 加えて、降水量と生産土砂量の変化だけでなく、適応策の検討の観点から保全対象付近まで流れてくる土砂やそれを制御する対策施設を評価する手法の構築を目指すべきではないか。
- 以上の観点から、検討すべき事項とその具体的な内容を以下に整理した。

#### 4. 1. 気候変動に伴う降雨特性変化が地域ごとの土砂災害の形態、頻度、規模に与える影響の推定

##### ①土砂移動現象を引き起こす降雨パターンの変化の把握

- 山地流域の地形性降雨等を考慮した気候変動における降雨特性の変化を把握すること。砂防事業の特徴を踏まえ、比較的大きな流域を対象とする土砂・洪水氾濫対策や深層崩壊対策等の計画を検討する場合、比較的小さな流域を対象とする地先的な土石流対策の計画を検討する場合といった、流域スケールごとの土砂移動現象を考慮した検討をするべきである。地先的な土石流対策は、単発かつ複数の箇所で事業が実施されている現状を踏まえ、都道府県単位、気象予測区分、標高区分といった単位での特性変化に着目することが望ましい。
- 降雨特性変化を把握する場合は、線状降水帯や複雑な地形の影響を受けた大雨を再現するために 5km

メッシュに高解像度化した気候予測シミュレーション結果のデータベースである「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF)」<sup>8)</sup>を用いることが望ましい。

- その上で、気候変動による土砂災害への影響を社会全体で共有するための分かりやすい表現を検討することが望ましい。例えば、土砂災害の頻度の変化が考えられる。具体的には、アンサンブル気候予測データベースを活用し、過去実験における土壌雨量指数や未経験降雨指数<sup>31)</sup>の最大値を将来実験結果が超過する回数を整理すること等で、頻度の増加を表現出来る可能性がある。
- さらに、降雨特性変化を砂防事業の計画論に反映させるための手法を検討するべき。その際、降雨規模だけでなく降雨分布により土砂移動現象が異なることを踏まえ、クラスター分析等を用いた降雨分布の影響を考慮した手法を検討することも考えられる。

### ②地域毎に顕在化・頻発化する土砂移動現象の予測

- 土砂災害の素因である地体構造や誘因である降雨パターンを基に土砂災害が発生しやすい場や条件の整理が進んだことにより、今後、どの地域でどのような土砂移動現象が頻発化・激甚化するかを推測することが可能になってきた。
- 気候予測データと CL を用いて土砂災害の発生頻度を求める手法を組み合わせることで、例えば、これまで西南日本に比べ土砂災害が少ない傾向にあった東北日本で、土砂災害の発生頻度、特に土砂・洪水氾濫の頻度が増加する可能性があるといった今後顕在化する土砂災害の特徴を推定することを試みることも考えられる。しかしながら、CL はメッシュが異なる場合の評価手法については課題があるため、土砂災害実績に加え地質や降雨波形に関する情報が蓄積されている地域で試行し、顕在化する土砂災害の特徴を推定する上での課題を整理することが望ましい。
- このような検討を進め、各事業主体において、気候変動により頻発化、激甚化する可能性のある土砂移動現象を推定し、今後の土砂災害対策の方向性を検討することが望ましい。例えば、土石流対策が主の自治体において、頻発化する可能性のある土砂・洪水氾濫対策も対象とするうえでの意思決定のツールとなり得る。

### ③土砂災害のおそれのある区域への影響の予測

- 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（土砂災害防止法）に基づいて指定する土砂災害警戒区域は、経験的な手法で土砂災害のおそれのある区域を定めている。今後、気候変動が土砂災害のおそれのある区域へ与える影響を推定するために、これまで述べた基礎技術の研究・技術開発を引き続き進めることが望ましい。
- 加えて、現在の経験的な手法の妥当性や見直しの必要性の検討のために、災害発生時に土砂等が到達した範囲と土砂災害警戒区域との比較を行い、知見を蓄積していくことが望ましい。

## 4. 2. 気候変動に伴い顕在化してきた土砂移動現象の発生・被害のおそれの蓋然性の高い箇所の解明

### ①土砂の生産・下流への土砂の流出しやすさを評価した土砂・洪水氾濫危険流域抽出、氾濫想定手法の検討

- 近年、頻発する土砂・洪水氾濫については、土砂・洪水氾濫により大きな被害のおそれのある流域の抽出を進め、リスクの見える化を進めるべき。また、流域抽出を進めるとともに、現手法で抽出出来

ない流域がある可能性を考慮し、土砂・洪水氾濫が発生した際には調査を実施し、必要に応じて流域抽出手法の再検討を行うことが望ましい。その際、土砂水理学的な観点からリスクの多寡を分類・評価する方法を検討することが望ましい。

- 流域の抽出のみならず、土砂・洪水氾濫時に被害を受ける想定氾濫区域を推定する手法の検討を進めるべき。検討に際しては、モデルの高度化に加え、全国多数あると考えられる土砂・洪水氾濫により大きな被害のおそれのある流域を対象にリスクの見える化を早期に進めるための簡素化の両面から実施することが望ましい。

### **②土砂流出に係る数値解析手法の高度化**

- 土砂流出に係る数値解析手法の高度化を進めるにあたり、これまでの研究成果のレビューを行った上で、検討を進めることが望ましい。特に、土石流における細粒土砂の挙動が、検討課題として重要である。
- 豪雨時における山地流域の土砂動態については、土砂生産現象によって、同一河川においても出水ごとに土砂動態が異なることがある等、流域ごとに土砂生産－流出現象に関する想定シナリオを考えることが重要である。
- また、その際、出水規模の違いが土砂動態に与える影響を把握し、それを考慮出来る数値解析手法を構築すること、未解明なことが多いことを踏まえ、単一の手法にこだわらず複数の手法で検討する方向性とする、に留意しつつ、数値解析手法の高度化を図ることが望ましい。
- 解析技術の高度化にあたっては、土砂移動現象のモデル化による高度化、流砂水文観測結果との比較によるキャリブレーションの共に不確実性が大きいことを踏まえ、数値解析結果と流砂水文観測結果の相互利用することで精度を高める手法と共に不確実性を評価する手法も検討を進めることが望ましい。
- 土砂移動現象に関する数値解析手法の高度化と合わせ、土砂災害対策の適応策を検討する上で、コンクリートスリット砂防堰堤や遊砂池のような土砂・洪水氾濫対策として有効と考えられる施設の評価手法を検討すべき。
- 4. 3. で示す気候変動に伴う降雨と生産土砂量の応答特性変化の把握は土砂災害対策の根幹ではあるが、降雨に伴う水の流出過程、崩壊土砂の移動と溪床堆積土砂の再移動を踏まえた土砂流出過程等の山地流域の水・土砂の流出に関する研究・技術開発のレビューを行い、現状の技術水準を整理する体制を構築していくことが望ましい。

### **③土砂・流木の生産・挙動を考慮した生産-流出モデリング**

- 土砂・洪水氾濫発生時に流木が被害を拡大させる事例が多いことを踏まえ、土砂だけでなく流木の挙動を評価するための技術の開発を進めるべき。流木の挙動は、斜面崩壊や河床侵食に伴う発生、水・土砂と共に下流への流下、トラブルスポット等への閉塞、氾濫に伴う家屋等被害や堆積量の増大といった複雑なメカニズムを持っていることを踏まえ、それぞれの現象の特徴に応じたモデル化を進めることが望ましい。
- モデル化に時間を要する可能性があることを踏まえ、流木による被災シナリオ、被害メカニズム、流木による被害拡大に関する知見を収集し、流木マニュアルに反映できる内容を加え更新することで、施策を前に進めることが望ましい。

#### ④崩壊性地すべり、谷地形が不明瞭な箇所での土石流の発生危険箇所抽出手法の検討

- 崩壊性地すべりについて、これまでの事例収集・分析、類型化により、流れ盤上の地質構造で発生し、特定の年代の堆積岩、テフラ、火山岩地質で発生することが多いという知見が得られてきた。崩壊性地すべりは収集・分析した事例が少ないため、今後の研究の進展のためにこれまでの成果を取りまとめ公表すべき。
- 土砂災害警戒区域の指定がされない箇所で発生するという特徴を踏まえ、発生するリスクが高い地域や箇所の特定に向けた研究を継続することが望ましい。
- 谷地形が不明瞭な箇所での土石流は、中間とりまとめ後、大きな被害をもたらすものが発生しなかった。一方、海外を中心に研究事例があることから、それらの情報収集に加え、日本国内の発生事例の収集や日本で発生した場合の調査を進め、ゼロ次谷への表流水の集中や中間流の集中の可能性に着目しつつ、発生するリスクが高い地域や箇所の特定に向けた研究を継続することが望ましい。

#### 4. 3. 気候変動に伴う降雨特性の変化に応じた流域生産土砂量の応答特性の解明

##### ①物理モデル、経験的手法、それらを組み合わせた生産土砂量予測

- 土層生成速度、樹木根系の効果を含む斜面せん断強度、間隙水圧変化を考慮した流域生産土砂量予測手法が構築されたことを踏まえ、花崗岩地域における実装を進めるべき。まずは、対象を限定して実装することが現実的であるが、全国展開を見据えた形で汎用的な手法となるような方針で実装を進めることが望ましい。
- 上記手法が適用出来ない地形・地質においては、研究を進めると共に、経験的手法及び経験的手法と物理モデルを組み合わせた手法により生産土砂量の予測手法を検討することが望ましい。その際、用いる手法の適用性が比較的良好な流域スケール、土砂生産における非線形性等を考慮した手法とすることが望ましい。
- 生産土砂量の予測に際しては、森林の影響についても検討することが望ましい。例えば、中長期的に林齢の異なる森林の根系の緊縛力、森林の重量、森林の蒸発散等による斜面崩壊、流出への影響を考慮することで、森林管理と一体となった砂防計画、流域流木対策計画の立案が可能になると考えられる。
- 加えて、検討した予測手法の検証のために、新たな災害発生時にはデータ収集を実施し、検討事例を蓄積していくべき。

#### 5. 令和5年度版とりまとめを踏まえた今後の取り組み

- 今後、令和5年度版とりまとめに基づき、重要性や社会実装の実行性や達成可能性等の観点から優先順位を検討し、調査・研究を進め、可能なものから社会実装を進め、成果について随時社会に発信すべき。
- 気候変動への適応策を進めるにあたっては、砂防堰堤の整備等の事前防災の着実な進捗のみならず、維持管理を実施するタイミングや実施頻度についても検討・見直しが必要となる可能性があることに留意すべき。
- 気候変動への適応は長期的な視点を持って取り組む課題であり、国土のあり方を意識しながら検討す

ることが必要である。今後の人口減少・高齢化を踏まえ、気候変動により変化する地域のリスク評価に基づくリスク軽減対策の充実を図る検討も進めるべき。

以上

## 参考文献

- 1) 環境省 地球環境局：IPCC 第 6 次評価報告書（AR6）統合報告書（SYR）の概要，2023  
<https://www.env.go.jp/content/000126429.pdf>
- 2) 気象庁：気候変動監視レポート 2022，2023  
[https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2022/pdf/ccmr2022\\_all.pdf](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2022/pdf/ccmr2022_all.pdf)
- 3) 国土交通省砂防部：令和 4 年の土砂災害，2023  
<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r4dosha/r4doshasaigai.pdf>
- 4) 内田太郎：激甚化する土砂災害～近年の土砂災害の特徴を概観し将来に備える～，土木施工，Vol.62, No.6, pp.18-19, 2021
- 5) Kawase, H., Y. Imada, H. Tsuguti, T. Nakaegawa, N. Seino, A. Murata, and I. Takayabu：The Heavy Rain Event of July 2018 in Japan enhanced by historical warming, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 101(1), pp. S109-S114, doi:10.1175/BAMS-D-19-0173.1, 2019
- 6) Kawase, H., M. Yamaguchi, Y. Imada, S. Hayashi, A. Murata, T. Nakaegawa, T. Miyasaka, and I. Takayabu：Enhancement of Extremely Heavy Precipitation Induced by Typhoon Hagibis (2019) due to Historical Warming, *SOLA*, Vol. 17A, pp. 7-13, doi:10.2151/sola.17A-002, 2021
- 7) 環境省：勢力を増す台風～我々ほどのようなりスクに直面しているのか～2023，2023  
<https://www.env.go.jp/content/000147982.pdf>
- 8) Kawase, H., Nosaka, M., Watanabe, S., Yamamoto, K., Shimura, T., Naka, Y., Wu, Y. H., Okachi, H., Hoshino, T., Ito, R., Sugimoto, S., Suzuki, S., Fukui, S., Takemi, T., Ishikawa, Y., Mori, N., Nakakita, E., Yamada, J., Murata, A., Nakaegawa, T., and Takayabu, I：Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario, *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 128, e2023JD038513, 2023
- 9) Naka, Y., Wu, Y. H. and Nakakita, E.: Comprehensive future projections for the line-shaped convective system associated with Baiu front in Japan under RCP scenarios using regional climate model and pseudo global warming experiments, *Front. Earth Sci.*, 11:1093543, 2023
- 10) Osakada, Y. and Nakakita, E.: Future Change of Occurrence Frequency of Baiu Heavy Rainfall and Its Linked Atmospheric Patterns by Multiscale Analysis, *SOLA*, Vol. 14, pp. 79–85, doi:10.2151/sola.2018-014, 2018
- 11) 西内卓也，國田佳穂，林真一郎，坂井佑介，北本楽，小杉恵，山本悟司：解析雨量を用いたスネークラインの整理から見た主要な土砂移動現象発生時の雨量指標の発生の傾向，砂防学会誌，Vol.76, No.2, pp.3-10, 2023
- 12) 国土交通省砂防部：気候変動を踏まえた砂防技術検討会（第 2 回）資料 2，2020  
[https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee\\_kikohendo/200521/02shiryo.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee_kikohendo/200521/02shiryo.pdf)
- 13) 国土交通省砂防部：気候変動を踏まえた砂防技術検討会（第 2 回）資料 3，2020  
[https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee\\_kikohendo/200521/03shiryo.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee_kikohendo/200521/03shiryo.pdf)
- 14) 国土交通省砂防部：六甲砂防管内の砂防事業による効果，2018  
[https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h30dosha/H30koukajirei\\_rokkou\\_jigyo.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h30dosha/H30koukajirei_rokkou_jigyo.pdf)
- 15) 気候変動を踏まえた砂防技術検討会：気候変動を踏まえた砂防技術検討会 中間とりまとめ，2020  
[https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee\\_kikohendo/200521/chukan\\_torimatome.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee_kikohendo/200521/chukan_torimatome.pdf)
- 16) 国土交通省砂防部：気候変動を踏まえた砂防技術検討会（第 3 回）資料 2，2021  
[https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee\\_kikohendo/210305/02shiryo2.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee_kikohendo/210305/02shiryo2.pdf)
- 17) 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会：気候変動を踏まえた治水計画のあり方 提言，2021  
[https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/chisui\\_kentoukai/pdf/r0304/01\\_teigen.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/pdf/r0304/01_teigen.pdf)
- 18) 気候変動を踏まえた都市浸水対策に関する検討会：気候変動を踏まえた下水道による都市浸水対策の推進について 提

言, 2021

<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001402868.pdf>

- 19) Wu, Y. H., Nakakita, E. and Kunitomo, M.: Future change of rainfall-triggered landslide risk using NHRCM05 based on critical line method, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76, No.2, pp.I\_67-I\_72, 2020
- 20) 坂井佑介, 山越隆雄, 對馬美沙: 土砂・洪水氾濫による家屋被害の実態把握と地形分析, 土木技術資料, Vol.63, No.1, pp.30-35, 2021
- 21) 国土交通省砂防部: 土砂・洪水氾濫により大きな被害のおそれのある流域の調査要領(案)(試行版), 2022  
[https://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/sabo/dosyakouzuihanran\\_youryou\\_r0403.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/sabo/dosyakouzuihanran_youryou_r0403.pdf)
- 22) 国土交通省砂防部: 土砂・洪水氾濫時に流出する流木の対策計画の基本的な考え方(試行版), 2023  
[https://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/sabo/dosyakouzuihanran\\_ryuuboku\\_r0508.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/sabo/dosyakouzuihanran_ryuuboku_r0508.pdf)
- 23) 国土交通省: 河川研究開発公募 地域課題分野(砂防) 豪雨時の細粒土砂の挙動を考慮した掃流状集合流動区間の土砂動態解析手法の提案 研究成果概要, 2023  
[https://www.mlit.go.jp/river/sabo/tiikikadai/r50531/r2\\_tiiki\\_report4.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/sabo/tiikikadai/r50531/r2_tiiki_report4.pdf)
- 24) 国土交通省: 河川研究開発公募 地域課題分野(砂防) マルチスケール流域土砂動態モデルの開発と動的土砂災害対策への応用 研究成果概要, 2023  
[https://www.mlit.go.jp/river/sabo/tiikikadai/r50531/r2\\_tiiki\\_report5.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/sabo/tiikikadai/r50531/r2_tiiki_report5.pdf)
- 25) 国土交通省砂防部: 気候変動を踏まえた砂防技術検討会(第7回) 資料2, 2023  
[https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee\\_kikohendo/230810/04siryou2.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee_kikohendo/230810/04siryou2.pdf)
- 26) Rickenmann, D.: Debris-Flow Hazard Assessment and Methods Applied in Engineering Practice, *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol.9, No.3, pp.80-90, 2016
- 27) Hungr, O., Leroueil, S. and Picarelli, L.: The Varnes classification of landslide types, an update, *Landslides*, 11, pp.167-194, 2014
- 28) 国土交通省: 河川研究開発公募 地域課題分野(砂防) 山地流域における水文・地形プロセスのモデリングに基づく土砂移動現象の発生場・降雨閾値・生産土砂量の定量的評価 研究成果概要, 2023  
[https://www.mlit.go.jp/river/sabo/tiikikadai/r50531/r2\\_tiiki\\_report6.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/sabo/tiikikadai/r50531/r2_tiiki_report6.pdf)
- 29) 国土交通省砂防部: 気候変動を踏まえた砂防技術検討会(第7回) 資料4, 2023  
[https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee\\_kikohendo/230810/07siryou4.pdf](https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee_kikohendo/230810/07siryou4.pdf)
- 30) Sato, T., Katsuki, Y., Shuin, Y.: Evaluation of influences of forest cover change on landslides by comparing rainfall-induced landslides in Japanese artificial forests with different ages, *Scientific Reports*, Vol.13, No.1, 14258, 2023
- 31) 小杉賢一郎: 土砂災害に対する警戒・避難のための未経験降雨指数の提案, 砂防学会誌, Vol.75, No.1, pp.3-14, 2022