

7. 斜面崩壊の発生と規模に関する変化予測と対応

7.1 気候変動適応情報プラットフォーム（A-PLAT）による土砂災害の将来予測

国立研究開発法人国立環境研究所が運営する気候変動適応情報プラットフォーム（A-PLAT）では、さまざまな気候変動に対する対応情報を掲示するとともに、気候変動予測結果を webGIS 形式で公開している。山地災害関係では、将来の年降水量の予測結果の他、斜面崩壊発生確率の予測結果の分布を見ることができる。

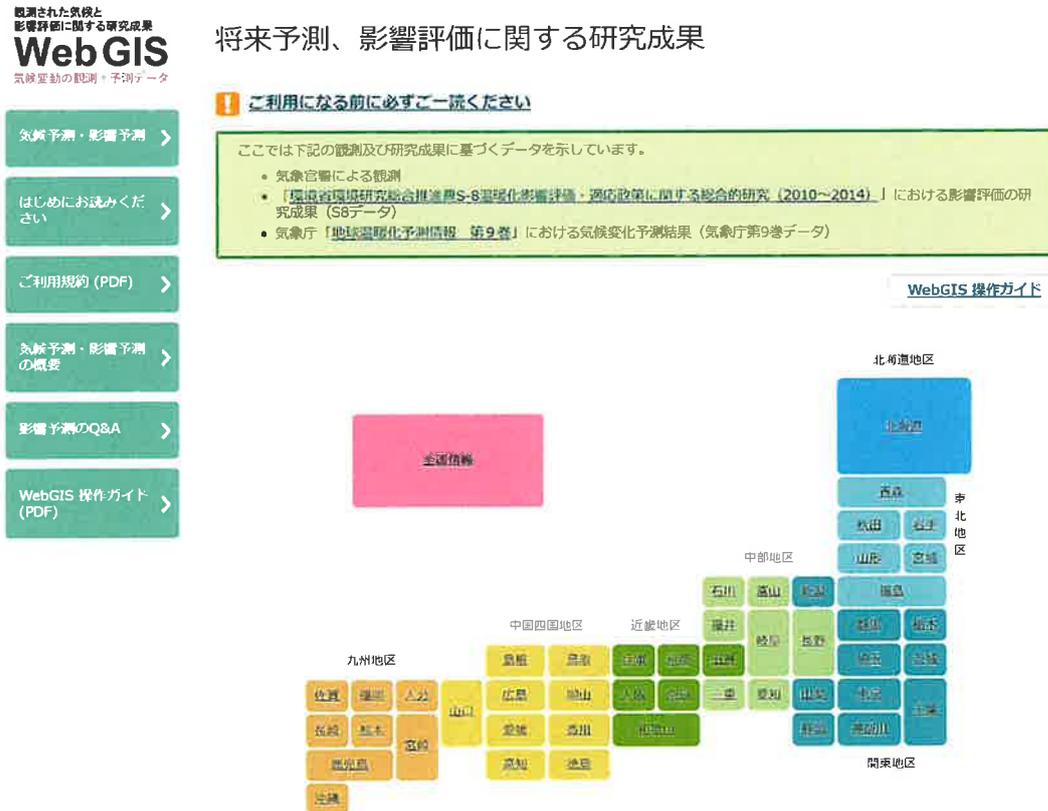


図 7.1.1 A-PLAT の気候変動予測データ参照のトップ画面

出典：気候変動適応情報プラットフォーム (<https://a-plat.nies.go.jp/webgis/index.html>)

2020年7月2日参照

A-PLAT のサイトに紹介されている、斜面崩壊発生確率等の解析手法の説明を以下に示す。斜面崩壊リスクの評価は川越清樹ほか(2008)の手法が採用されているが、この内容について後述する。

■ S-8-1(4)

沿岸・防災リスクの推定と全国リスクマップ開発

1. 研究目的

本研究では、異なる自然災害事象を定量的に評価し、経済被害を求めることで、異なるスケール、地域特性、災害事象を同時に比較することを目的としている。対象とする事象は洪水、斜面崩壊、高潮、砂浜侵食であり、全てを統合して地域に応じた災害対策を論じることが可能である。対象とした4災害を統合し、日本全体から市町村レベルまで取り扱うことのできる本研究は、社会的意義と実用性が大きいといえる。

2. 手法

洪水氾濫リスク：全国の一級河川流域における再現期間毎の極値降雨分布と最大確率流量、集水面積データを用いて、極値降雨と最大確率流量の関係を求めた。この関係式から、任意地点の確率にもとづいた洪水流量を知ることができる¹⁴⁻¹。また、国土交通省の治水経済調査マニュアルを参考に、土地利用ごとに被害額単価を決定し、氾濫モデルから得られた浸水深と浸水期間を被害額単価に乗じることにより、被害額を算定した。ここでは、現在の治水水準とした50年に一回の洪水に対する防護レベルを越えた際の被害額を、日本全国において洪水被害額として求めた¹⁴⁻²。

斜面崩壊リスク：再現期間に応じた降雨に対する斜面崩壊発生確率を推計する。この推計に用いる斜面崩壊発生確率モデルは、降雨による地下水の勾配と地質、斜度を変数として、過去の実績データからロジスティック関数の係数を最小二乗法で求めて構築したものである¹⁴⁻³。被害額は砂防事業の費用便益分析マニュアルを基に算出し、その値に発生確率を乗じて求めた。

高潮災害リスク：まず地表面の形状と堤防等を与えた地形を表す標高データを構築した。次に、再現する経時的な潮位の変動を設定し、それに対して堤防等から越流する海水の量を計算した。海面上昇量と高潮増大率を与えて計算を行い、浸水深が最大となるとき浸水面積、浸水人口および浸水被害額を推計した¹⁴⁻⁴。高潮防護施設の整備の目安として多く使われてきた伊勢湾台風級の台風が室戸台風級になる場合を想定し、高潮増大率は1.3とした。海面上昇をシナリオで与えた。浸水被害額は洪水氾濫と同様、治水経済マニュアルによった。

砂浜・干潟消失リスク：砂浜消失リスクについては、海面上昇量の将来予測結果を用いて、Bruun則（汀線後退量と底質移動限界水深、海面上昇量の関係を表す）により将

来（21世紀末頃）の砂浜侵食量を予測した。全国の砂浜の底質粒径のデータはないため、複数の粒径を与えてBruun則に従って将来の侵食量を予測した¹⁴⁻⁵。干潟消失リスクについては、海面上昇量の将来予測結果と海底地形データを用いて、将来の干潟消失面積を求めた¹⁴⁻⁵。

複合災害リスク：洪水氾濫と高潮が同時に生じた際の被害額を評価した。沿岸部に洪水と同じ再現期間の高潮の潮位を境界条件として与え、氾濫被害を計算した結果、被害額は洪水被害単独のものから4%程の上昇にとどまった。また、同時に生じる再現期間は大変長いものであることから、洪水と高潮が同時に生じる毎年起こりうると考える平均被害額も大変小さい額となり無視できるものである。

3. 研究成果

洪水氾濫被害額と斜面崩壊被害額、高潮被害額の分布を図1(4)-1、1(4)-2に示す。洪水氾濫被害額は沿岸部の都市圏に大きく生じる。また、斜面崩壊は、都市近郊の丘陵地に大きな被害が生じる。豪雨時には洪水氾濫と斜面崩壊は同時に生じることが多く、豪雨災害として両方の被害額分布を勘案して、適応策を講じる必要がある。高潮は都市が発達している沿岸低平地に甚大な被害が生じる。河道に沿って内陸地域まで遡上氾濫する様子が見られる。洪水氾濫被害の大きい地域と重なる地域も多く、両災害を勘案した適応策が必要である。砂浜および干潟の消失は、砂浜および干潟の面積の変化から求めた消失率で表記した。砂浜については全国的に侵食が進み、60cmの海面上昇量のときの砂浜消失率は80%をこえる。特に高潮のリスクも大きい地域では、沿岸防災対策の観点からも砂浜保全が重要である。数値地図上に個々または統合した災害のリスクを表示することによって地域に応じた対策を考察できる。

治水レベルが50年に一回の洪水を防ぐ場合の3大都市圏の被害額分布を図1(4)-3に示す。資産価値が高いので、低平地に大きな被害額が存在しているのがわかる。

4. 適応策オプションと実施に向けた課題

適応策にはハードウェアとソフトウェアに分けることができる。国交省は、以下のような洪水対策のハードウェアのオプションを取り上げている。ダムを設置、既存ダムの有効活用、遊水地、放水路、河道掘削、引堤、堤防嵩上げ、河道内樹木伐採、決壊しない堤防、決壊しづらい堤防、高規格堤防、排水機場、雨水貯留施設、雨水浸透施設、遊水機能の保全、部分的に低い堤防の存置、霞堤、輪中、二

代表的な都道府県の土砂災害発生率の予測結果

出典：気候変動適用情報プラットフォーム (<https://a-plat.nies.go.jp/webgis/index.html>)

2020年7月2日参照

気候モデル：MIROC5, 排出シナリオ=RCP2.6

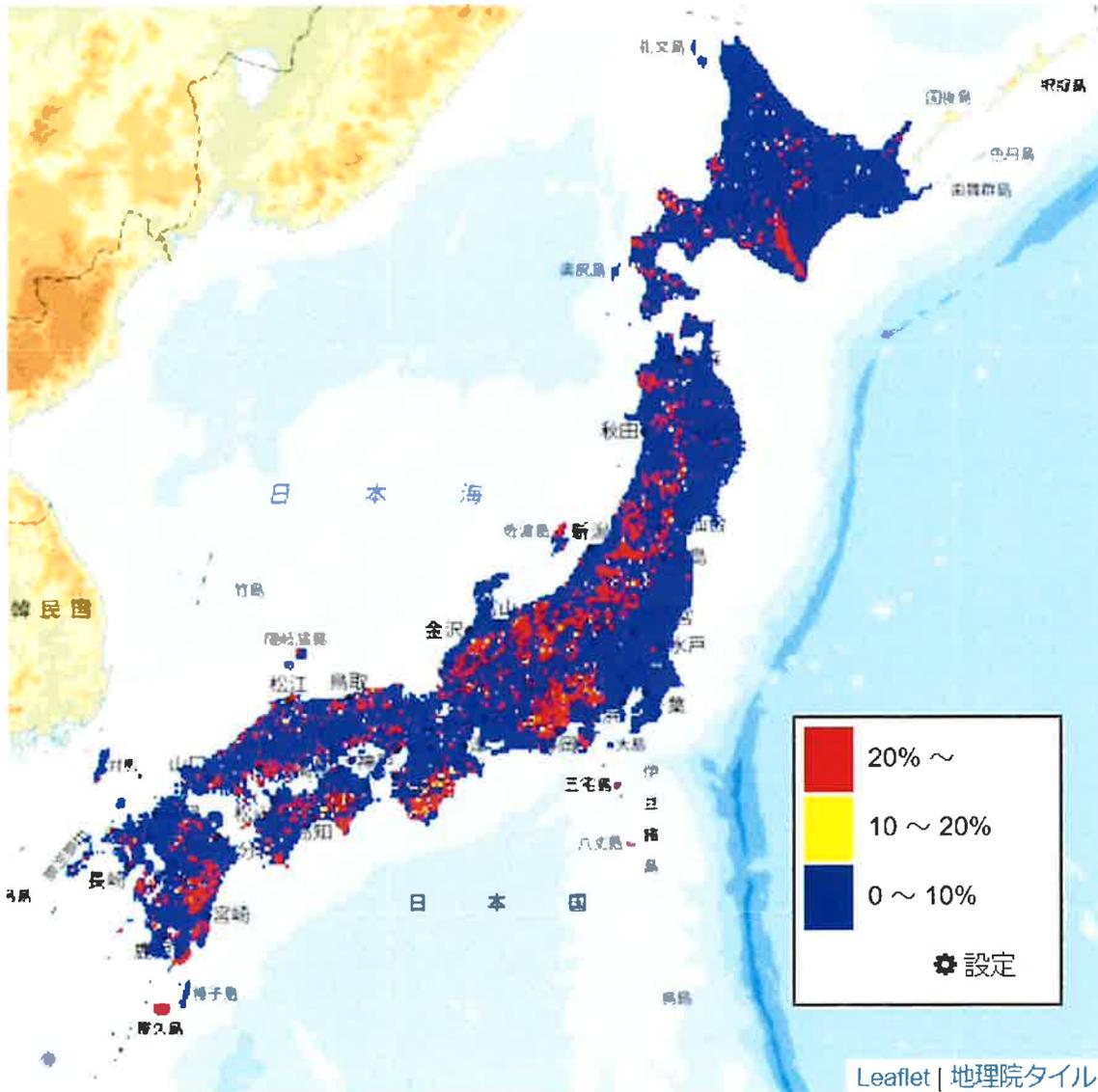


図 7.1.2 日本全体の斜面崩壊発生危険率の分布の一例—その1 (A-PLAT,2020)

気候モデル：MIROC5,排出シナリオ=RCP8.5

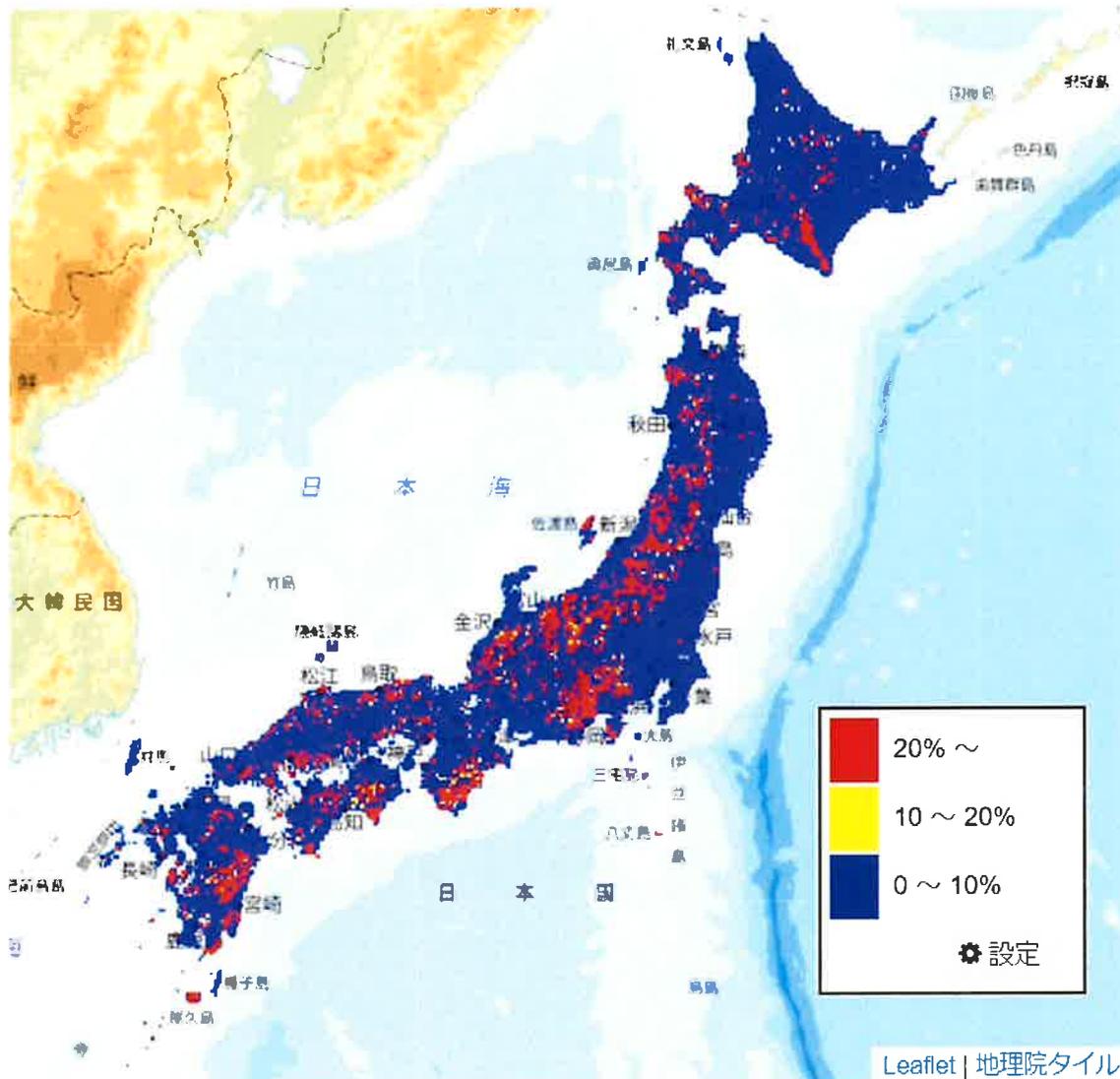


図 7.1.3 日本全体の斜面崩壊発生危険率の分布の一例—その2 (A-PLAT,2020)

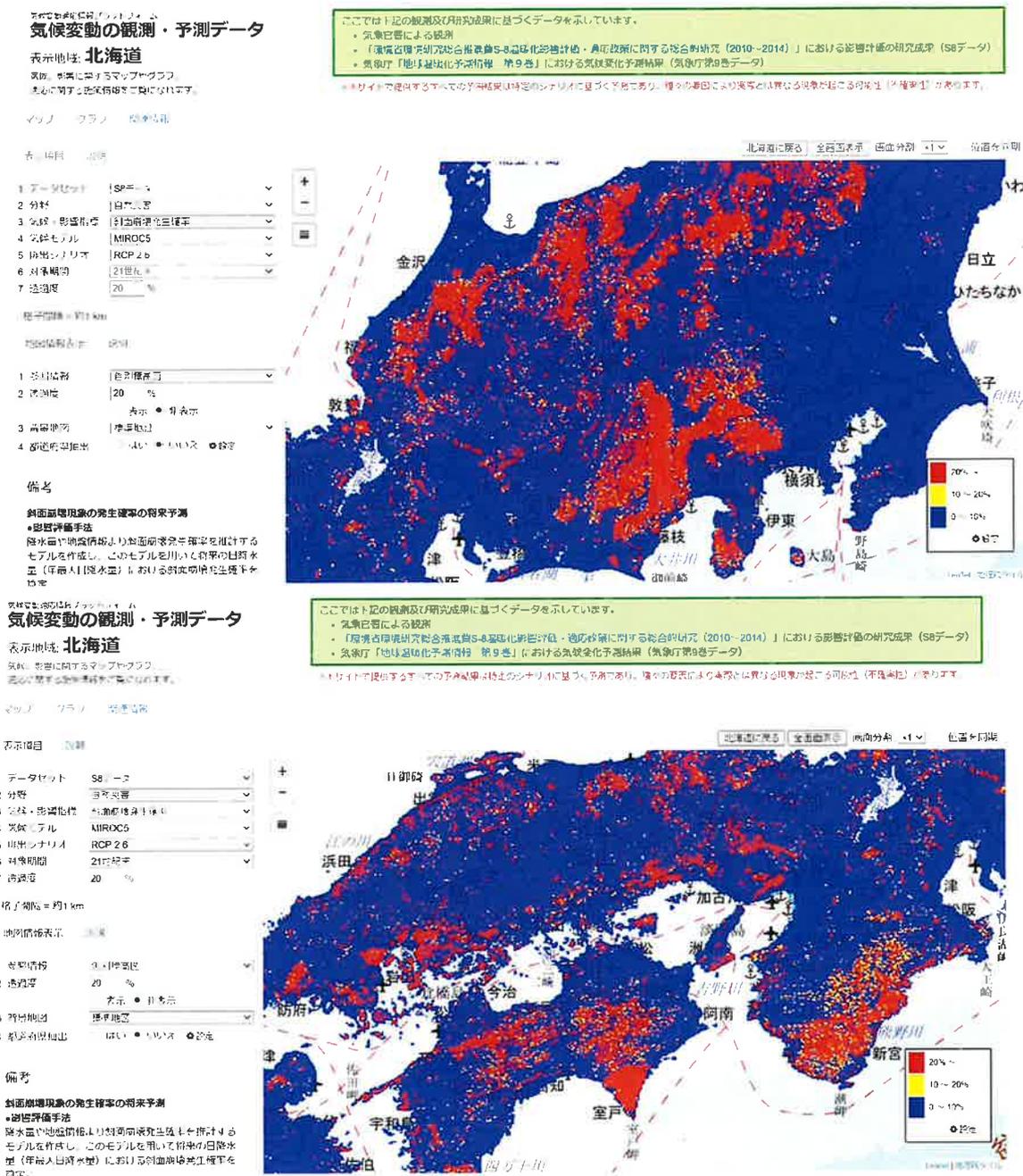


図 7.15 関東・中部・関西・中国・四国地域の斜面崩壊発生危険率の分布の一例 (A-PLAT,2020)

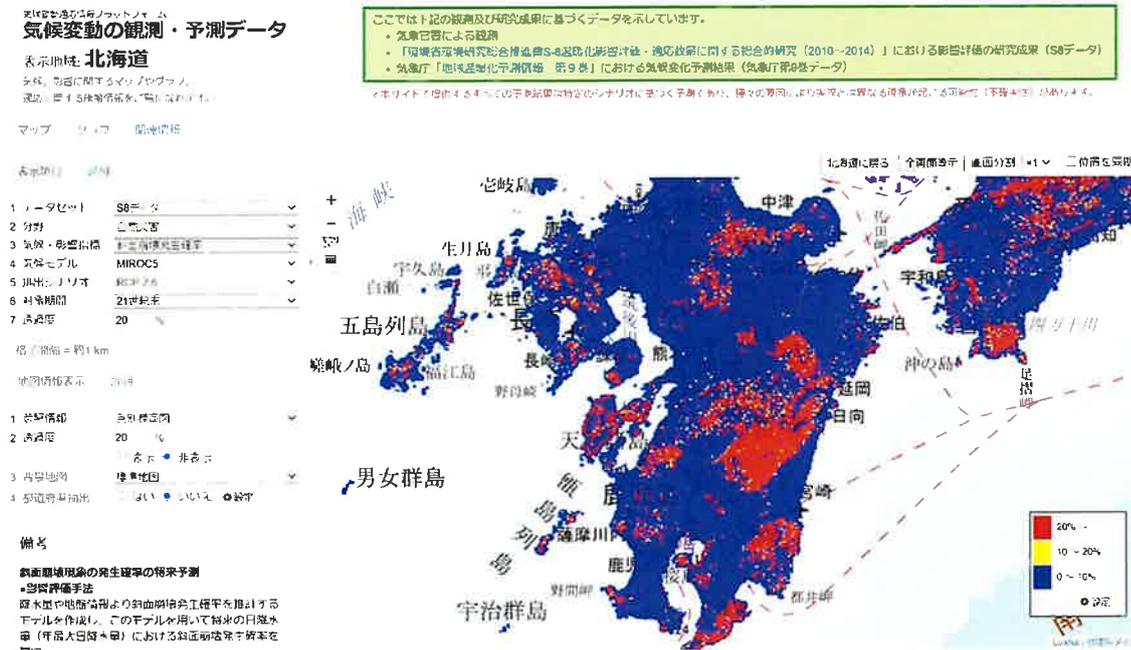


図 7. 1.6 九州地域の斜面崩壊発生危険率の分布の一例 (A-PLAT,2020)

気候変動適応情報プラットフォーム (A-PLAT) のサイトで紹介されている山地災害に関する論文を以下の表に示す。

表 7. 1.1 A-PLAT のサイトで紹介されている山地災害の予測等に関する論文

区分	文献
現在の状況の概要情報	内田 太郎, 西口 幸希: "歴史的に見た近年の土砂災害の特徴", 砂防学会誌 64(2), (2011), 58-64
	H. Saito, H. Matsuyama: "Catastrophic Landslide Disasters Triggered by Record-Breaking Rainfall in Japan: Their Accurate Detection with Normalized Soil Water Index in the Kii Peninsula for the Year 2011", SOLA 8, (2012), 81-84
	Y. Nishiguchi, T. Uchida, N. Takezawa, T. Ishizuka, T. Mizuyama: "Runout Characteristics and Grain Size Distribution of Large-scale Debris Flows Triggered by Deep Catastrophic Landslides", International Journal of Erosion Control Engineering 5(1), (2012), 16-26
	丹羽 諭, 内田 太郎, 泉山 寛明, 桜井 亘, 大野 亮一...et al.: "大規模土砂生産後の土砂流出", 砂防学会誌 70(6), (2018), 34-45
将来予測される影響の概要情報	川越 清樹, 脇岡 靖明, 高橋 潔: "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", 地球環境研究論文集 18, (2010), 29-36
	S. Kawagoe, S. Kazama, P. R. Sarukkalgige: "Probabilistic modeling of rainfall induced landslide hazard assessment.", Hydrol. Earth Syst.Sci. 14, (2010), 1047-1061
	川越 清樹, 小野 桂介, 青木 春奈: "気候変動に伴う斜面崩壊に起因した土砂生産量の推計", 河川技術論文集 16, (2010), 77-82
	川越 清樹, 風間 聡, 沢本 正樹: "数値地理情報と降雨極値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 27(1), (2008), 69-83
	藤田 正治: "気候変化が土砂災害の素因・誘因に及ぼす影響", 砂防学会誌, 65(1), (2012), 14-20

<引用文献>

気候変動適応情報プラットフォーム (A-PLAT)

<https://adaptation-platform.nies.go.jp/materials/index.html> (2020/7/17 参照)

<https://adaptation-platform.nies.go.jp/materials/ref/index.html> (2020/7/17 参照)

川越清樹, 風間聡, 沢本正樹(2008): 将来気候モデルを用いた土砂崩壊リスク評価. 土木学会地球環境研究論文集, 16, 27-33

7.2 降雨量から崩壊面積を推定する方法

林野庁(2018)の土石流・流木対策指針解説では、土石流発生時の「新規崩壊発生見込み量に伴う土砂量」の算定にあたって図7.2.1に示す雨量指数と崩壊面積率の関係図が算定法の一つとして掲載されている。これは林(1985)の研究成果であるが、この分析に用いたデータは表7.2.1と表7.2.2に示す通り、昭和38年(1963年)から昭和47年(1972年)までに発生した19事例である。この内、No.19のデータには新生崩壊面積率のデータが無いことから、図7.2.1は18事例という少ない事例によって導かれた関係図である。ほとんどの災害事例が今から50年以上の事例であり、当時の降雨特性や山地の降雨への耐性は大きく変化していると考えられる。

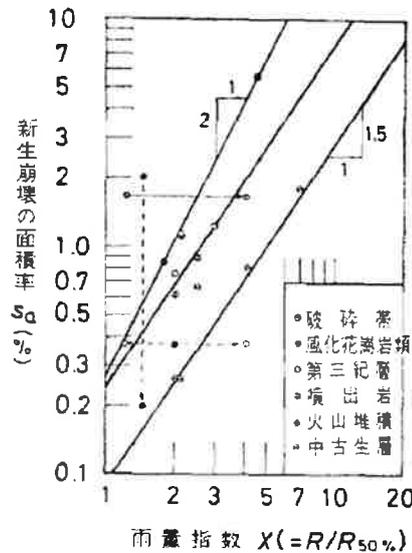


図 7.2.1 新規崩壊発生に伴う土砂量の推定に利用される関係図(林, 1985)

表 7.2.1 林(1985)が新生崩壊面積率の分析に持ちいたデータ(1)(林, 1985)

表-1. 調査地
Hydrologic and geologic data

No.	地区名	災害日 年月日 (昭和)	当日の雨量 (mm)	降雨確率 W (%)	$\frac{R}{W=50\%}$ $=R50\%$ (mm)	$R/R50\%$
1	青森局・津刈川	41年8月	200	1.05	68	2.94
2	大阪局・西谷(村)	40年9月	1,000	0.01	144	6.99
3	秋田局・藤里(村)	38年8月	190	1.14	90	2.11
4	前橋局・栗山(村)	41年9月	280	18.75	190	1.47
5	和歌山県橋本市	40年9月	225	0.325	105	2.14
6	石川県津幡川	39年7月	180	2.75	88.5	2.03
7	新潟県黒川村	42年8月	400	0.134	89	4.49
8	佐賀県伊万里	42年7月	(602*)180	(0.06*)31.5	148	(4.07*)1.22
9	〃	〃	(602*)180	(0.06*)31.5	148	(4.07*)1.22
10	山口県厚東	41年8月	300	2.0	120	2.50
11	大阪局・長門峡	41年8月	300	1.85	150	2.00
12	高知県室戸	41年5月	350	0.26	165	2.12
13	宮崎県北川	41年8月	450	0.625	180	2.50
14	岐阜県明知町	47年7月	283	3.2	131	2.16
15	岩手県久慈	41年10月	300	0.82	72	4.17
16	〃 普代	41年10月	150	6.5	—	—
17	三重県上野(阿波)	40年9月	170	10.0	95	1.79
18	静岡県南伊豆町	41年7月	258	3.0	130	1.98
19	栃田川最上渡部	38年	350	4.0	195	1.79

() は推定値, (*) は時間雨量から換算。データの出所: 記入したもの以外は引用文献(11)と各調査機関からの資料による。
対象地域の面積は、700~7,500 ha (大部分が 1,000~3,000 ha) の範囲である。

表 7.2.2 林 (1985) が新生崩壊面積率の分析に持ちいたデータ (2) (林, 1985)

新生崩壊率 S _a (%)	総崩壊率 S _a (%)	地 質	最寄りの観測所名または位置	調査および資料提出機関
1.23	1.87	新第三紀層	青森県津軽郡碓ヶ関村, 他	青森県治山課
1.77	1.81	中古・新三	福井県大野郡西谷村木戸	大坂局治山課
1.14	1.52	新第三紀層	秋田県山本郡藤里村柏毛観測所	秋田県治山課
2.03(/10)	3.96(/10)	火山堆積(日光)	栃木県塩谷郡栗山村宇黒部	前橋局治山課
0.26	0.49	中生層	伊都郡高野口名古屋応中中学校	和歌山県林業課
0.76	0.90	新第三紀層	金沢地方気象台(金沢市)	石川県治山課
5.72	5.79	花崗岩類	岩船郡山北村関川小学校	新潟県治山課
1.64	1.68	噴出岩	伊万里市伊万里農林高校	佐賀県森林保全課
0.37	0.49	古第三紀層	〃	〃
0.91	0.93	噴出岩	宇都市木田船木	山口県治山課
0.62	0.62	〃	山口県阿東町大字篠生	〃
0.26	0.49	中生層	室戸岬観測所(室戸市)	高知県森林土木課
0.67	0.72	〃	袁白許郡北川村川内名役場	宮崎県治山課
1.1	—	花崗岩類	猿投地観測所(小原・大沼・足助)	愛知県治山課(4)
0.82	0.85	古生層	久慈市門前久慈農林高校	岩手県林業課
0.26	0.55	〃	—	〃
0.85	1.02	花崗岩類	上野湖観測所(上野市)	三重県林業課
0.377	—	火山堆積(粘土)	石廊崎観測所(静岡県南伊豆町)	引用文献(8)
—	0.89	破砕帯・花崗岩類	飯高観測所(三重県飯高町)	引用文献(9)

図 7.2.2 は黒岩・平松が特定の流域における崩壊面積の経年変化から年最大日雨量と崩壊面積率の関係を調べたものであるが、崩壊面積率 (崩壊面積 ÷ 流域面積) の値が図 7.2.1 の林 (1985) の調査事例に比べると遙かに小さい。

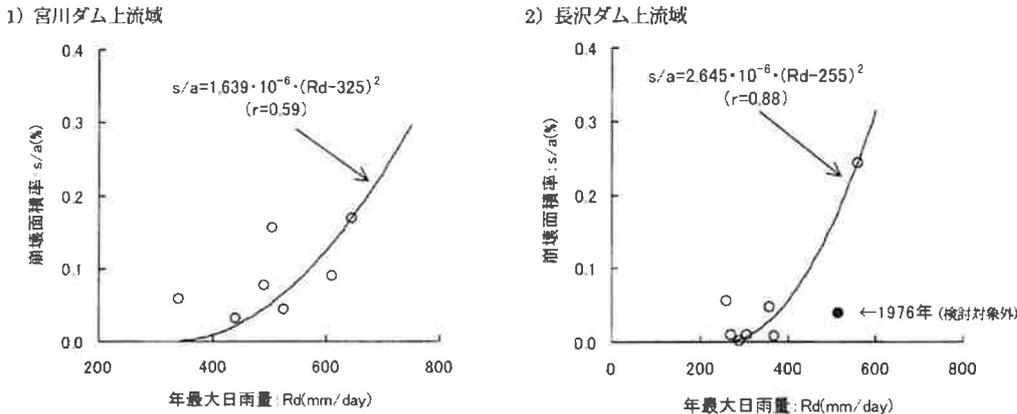


図 7.2.2 年最大日雨量と崩壊面積率の関係 (黒岩・平松, 2004)

図 7.2.3 は大村 (1980) が特定流域の経年の崩壊履歴から取りまとめた総雨量と崩壊面積率の関係図であるが、天竜川流域での崩壊面積率は最大で 13%程度であり、釜無川流域での崩壊面積率は最大で 17%程度となっており、図 7.2.1 の林 (1985) の関係図の崩壊面積率の上限値より大きな値となっている。

近年の砂防事業では崩壊可能土砂量の算出に崩壊面積率を利用することは少なく、既往崩壊地が無い場合はサンプル調査によるゼロ次谷での崩壊可能土砂量をゼロ次谷の個数にかけて崩壊可能土砂量を算定することが多い。しかし、大村 (1980) や黒岩・平松 (2004) が示すような流域毎の降雨量と崩壊面積率の関係は、気候変動に伴う今後の異常豪雨に対する崩壊面積の増加の程度を把握する上では重要な研究になると考える。

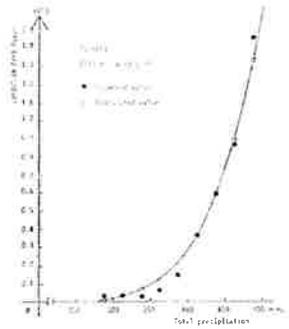


Fig. 5 Relation between total precipitation and landslide area ratio Fujioka region
 図-5 藤岡地区における総降雨量と崩壊面積率の関係

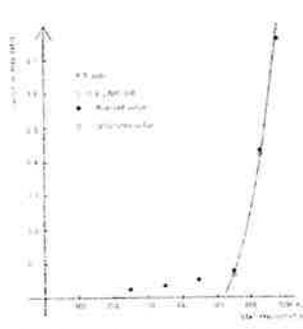


Fig. 6 Relation between total precipitation and landslide area ratio on Niyo-do region
 図-6 仁夜道地区における総降雨量と崩壊面積率の関係

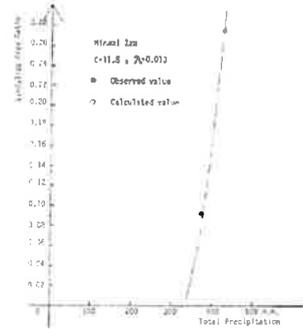


Fig. 7 Relation between total precipitation and landslide area ratio on Minami Izu region
 図-7 南伊豆地区における総降雨量と崩壊面積率の関係

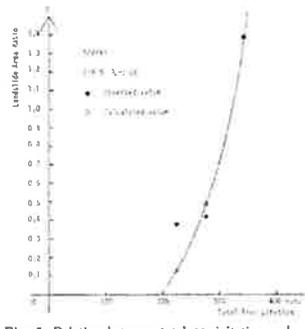


Fig. 8 Relation between total precipitation and landslide area ratio on Nozoki region
 図-8 及位地区における総降雨量と崩壊面積率の関係

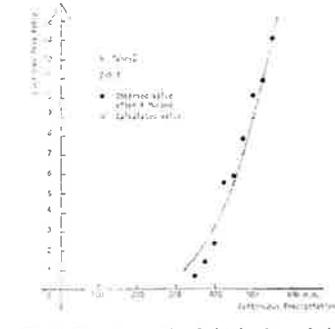


Fig. 9 Comparison with calculated value and observed value of landslide area ratio Tenryu region
 図-9 天竜川流域における崩壊面積率の実測値と計算値の比較

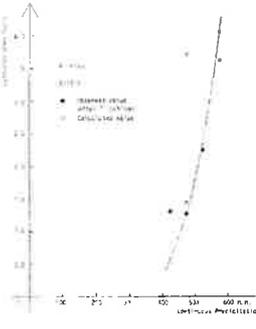


Fig. 10 Comparison with calculated value and observed value of landslide area ratio on Kizu region
 図-10 木津川流域における崩壊面積率の実測値と計算値の比較

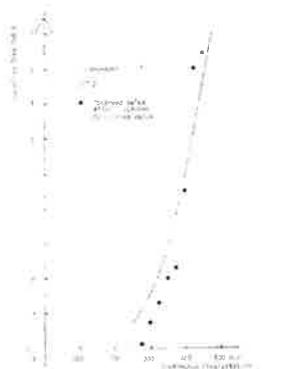


Fig. 11 Comparison with calculated value and observed value on landslide area ratio on Kamanashi region
 図-11 釜無川流域における崩壊面積率の実測値と計算値の比較

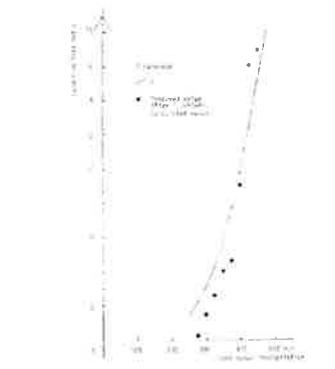


Fig. 11 Comparison with calculated value and observed value on landslide area ratio on Arakawa region
 図-11 釜無川流域における崩壊面積率の実測値と計算値の比較

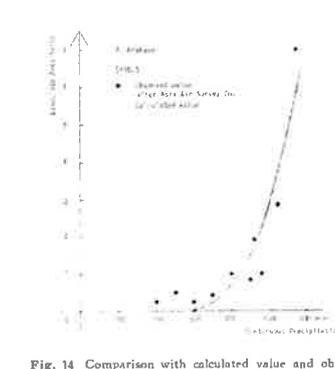


Fig. 14 Comparison with calculated value and observed value on landslide area ratio on Arakawa region
 図-14 荒川流域における崩壊面積率の実測値と計算値の比較

図 7. 2.3 総雨量と崩壊面積率の関係 (大村, 1980)

<引用文献>

林野庁 (2018) : 土石流・流木対策指針解説

林拙郎 (1985) : 崩壊面積率と水文データとの二、三の関係, 日本林学会誌, Vol.67, No.6, pp.209-117.

砂防学会 (1992) : 砂防学講座第3巻, pp.??.

黒岩知恵・平松晋也 (2004) : 森林伐採や植栽を指標とした崩壊面積予測手法に関する研究, 砂防学会誌, Vol.57, No.2, pp.16-26.

大村寛 (1980) : 崩壊面積の予測に関する基礎的研究 (I), 新砂防, 117, pp.15-25.

7.3 表層崩壊の発生場所の予測手法

降雨による表層崩壊の発生場の予測手法はこれまでに複数の研究者が発表している。その事例をいくつか紹介する。

図 7.3.1 は沖村ほか（1985）がダルシー則に基づく浸透流モデルと無限長斜面の安定解析を組み合わせて崩壊危険度を求めた事例である。図 7.3.2 は平松ほか（1990）が斜面内の雨水の不飽和浸透過程を考慮した浸透流解析と無限長斜面の安定解析を組み合わせて、崩壊発生場のシミュレーションをした事例である。

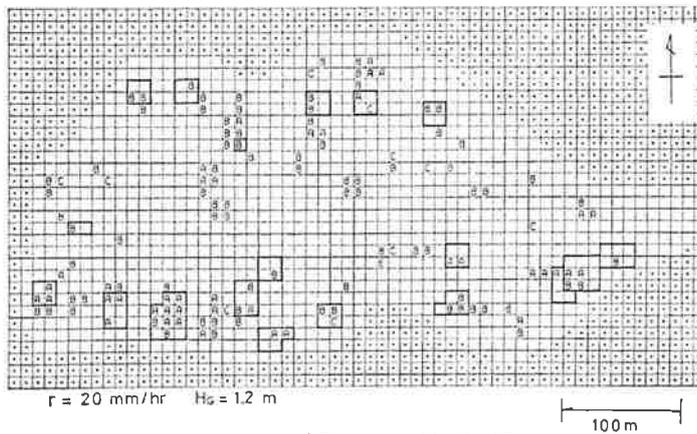


図-18 竹平 NW 試験地の崩壊危険度予測図
Fig. 18 Potential failure map for Takenotaira NW test field

図 7.3.1 10m メッシュで崩壊発生危険度を評価した事例（沖村ほか，1985）

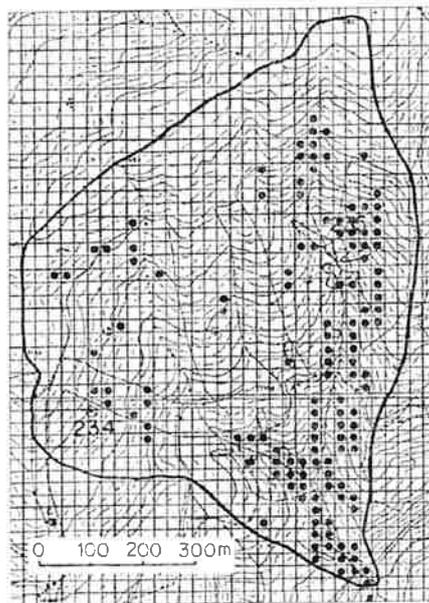


図-14 崩壊発生斜面分布状況
Fig. 14 Distribution of hillside landslide

図 7.3.2 表層崩壊の発生シミュレーション結果（平松ほか，1990）

内田（2013）は、これまでに発表された表層崩壊のいろいろな発生場予測モデルを考察し、モデルの複雑化によって入力条件となるデータ取得が不十分になることが予測精度の向上を妨げになっていることを指摘し、現地調査での取得が比較的容易な土層厚の推定方法を改善することによる推定精度向上を図った。図 7. 3.3 は内田（2013）が雨量強度別に崩壊発生場の予測を行った結果である。

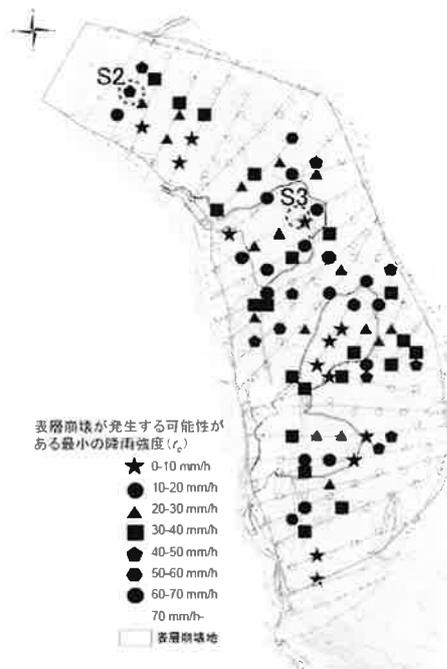


図9 宮内地区における表層崩壊発生危険度評価結果 (r_c の算出結果)

図 7. 3.3 表層崩壊の発生場を雨量強度別に予測した事例（内田，2013）

<引用文献>

- 内田太郎（2009）：場の条件の設定手法が表層崩壊発生箇所の予測に及ぼす影響，砂防学会誌，Vol.62，No.1，pp.23-31.
- 内田太郎（2013）：表層崩壊の予測精度向上に向けて，平成 25 年度 国土技術政策総合研究所講演会 資料，国総研資料 第 759 号
- 平松晋也・水山高久・石川芳治（1990）：雨水の浸透流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究，砂防学会誌，Vol.43，No.1，pp.5-15.
- 沖村孝・市川龍平・藤井郁也（1985）：表土層内浸透水の集水モデルを用いた花崗岩表層崩壊発生位置の予知のための手法，砂防学会誌，Vol.37，No.5，pp.4-13.

7.4 気候変動モデルを用いた将来の土砂災害の変化予測

7.4.1 気候変動モデルを用いた将来の斜面崩壊発生状況の予測

先述の7.1節で説明したように、気候変動適応情報プラットフォーム(A-PLAT)に将来の予測気候に対する「斜面崩壊発生確率」の分布図がwebGIS形式で掲載されている。斜面崩壊発生確率の解析モデルは川越ほか(2008a)が提案した以下の解析式を用いた多重ロジスティック回帰分析から構成された斜面崩壊発生確率モデルが採用されている。

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

ここに、 P : 斜面崩壊発生確率、 a : 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

地形条件である起伏量は、国土数値情報 KSMETA-G05-56M に格納された最高標高と最低標高の差である。水文条件である動水勾配は、国土数値情報 KSMETA-G05-54M の表層土壌と国土数値情報 KSMETA-G05-56M の斜面傾斜度を用いて擬似二次元化した斜面に日降雨量を入力し、Richards による飽和不飽和浸透解析 (Richards,1931) を行うことで求めている (川越・風間, 2009)。

図 7.4.1 は斜面崩壊発生確率の算出に用いる各パラメータと崩壊の発生確率の関係を示した図(左)とモデル係数を決定するための回帰分析結果(右)である。

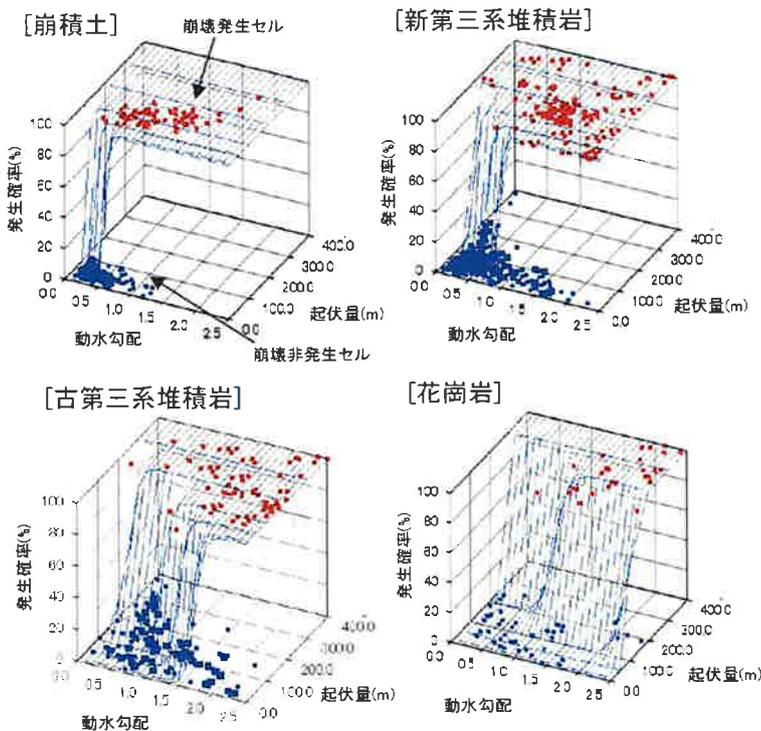


表 1 斜面崩壊発生確率モデルの説明変数。

地質	項目	動水勾配	起伏量	切片
崩積土	係数 β	25.99	0.16	-15.97
	有意確率	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 β	19.64	0.14	-19.29
	有意確率	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 β	14.31	0.11	-24.97
	有意確率	0.05	0.03	0.03
	標準化回帰係数	2.15	2.02	—
花崗岩	係数 β	9.31	0.13	-35.99
	有意確率	0.04	0.04	0.05
	標準化回帰係数	1.37	1.26	—

図 7.4.1 各パラメータと発生確率の関係を示した地質毎のロジスティック曲線(左)と解析モデルの説明変数の回帰分析結果(右)(川越・風間, 2009)

図 7.4.2 に入力値である気候変動モデルによる日降雨量の極値分布を、図 7.4.3 に各気候モデルでの斜面崩壊発生確率の分布を示す。

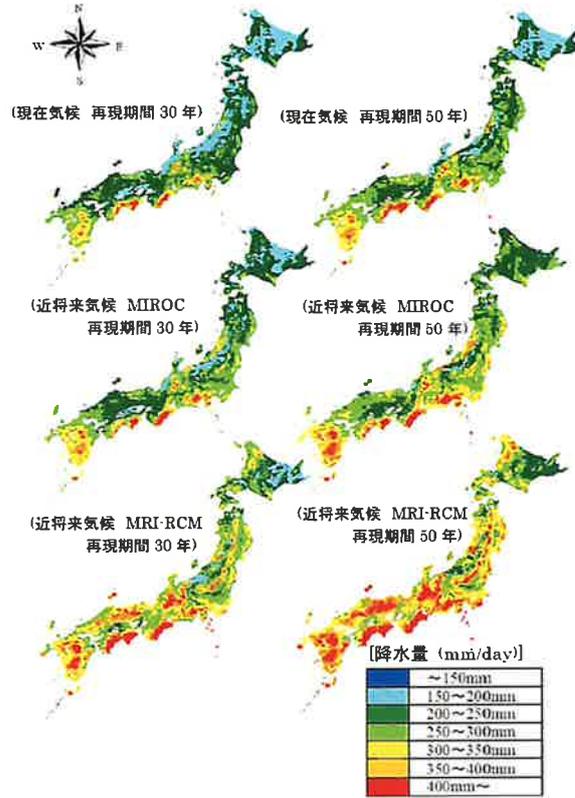


図 7.4.2 各気候モデルと再現期間に対する日降雨極値分布 (川越・風間, 2009)

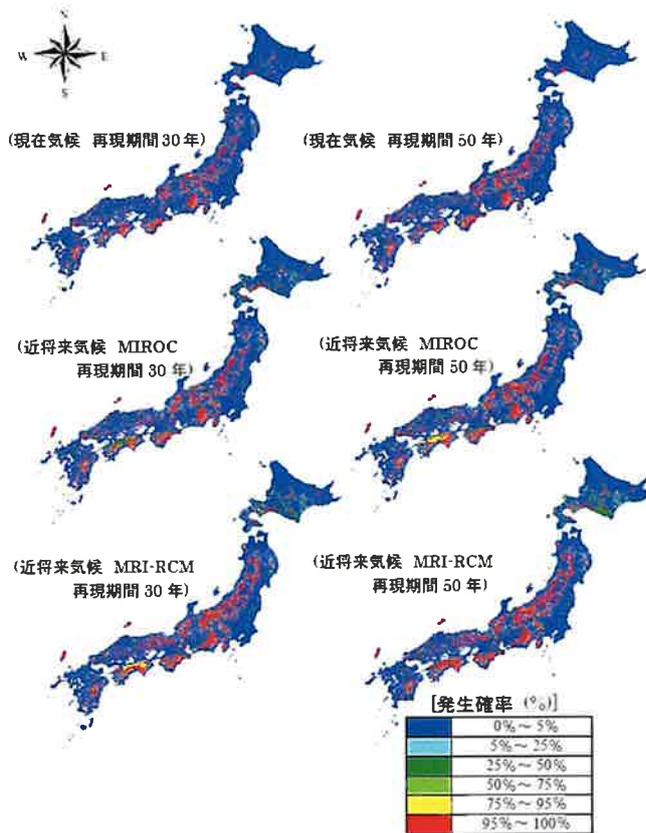


図 7.4.3 各気候モデルと再現期間に対する斜面崩壊発生確率分布 (川越・風間, 2009)

<引用文献>

- 川越清樹・風間聡・沢本正樹 (2008a) : 数値地理情報と降雨極値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, No.1, PP.69-83.
- 川越清樹, 風間聡, 沢本正樹(2008b) : 将来気候モデルを用いた土砂崩壊リスク評価. 土木学会地球環境研究論文集, 16, 27-33.
- 川越清樹・風間聡 (2009) : 温暖化に対する土砂災害の影響評価, 地球環境, Vol.14, No.2, pp.143-152.
- 川越清樹・風間聡・肱岡靖明・高橋潔 (2009) : 斜面崩壊リスク評価に対する気候モデルの適用, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.661-666.
- 川越清樹 (2014) : 気候モデルを用いた将来の土砂災害被害額推計, 土木学会論文集 G (環境), Vol.70, No.5, pp. I_167-175.
- Richards, L.A. (1931) : Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics, 1, 318-333.

7.4.2 気候変動モデルを用いた将来の土砂生産量の変化予測

秋本ほか (2009) は前項で紹介した川越ほか (2008a) の解析モデルを用いて将来の土砂生産量の予測を行っている。ここでの土砂生産量の教師データは国土交通省, および水資源機構の所管する日本列島各地の 59 ヶ所のダム堆砂データで, ダム上流の流域面積が 185km² 以上で, ダム経過年 15 年以上の大規模かつ運用期間の長いダムを対象としている。その教師データを用いて秋本ほか (2009) は斜面崩壊発生確率とダム堆砂に関して図 7.4.4 のような関係を導いている。

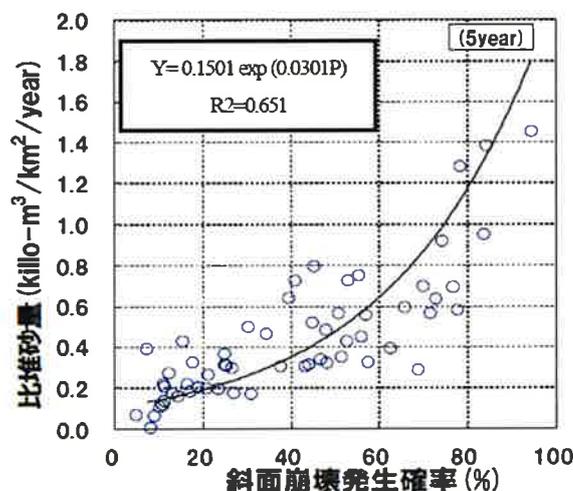


図 7.4.4 再現期間 4 年の斜面崩壊発生確率とダム比堆砂量の関係 (川本ほか, 2009)

図 7.4.5 は土砂生産量の予測分布を気候モデル毎に示した図である (秋本ほか, 2009)。秋本ほか (2009) はこの方法を用いて全国の主な流域での将来の土砂生産量を予測しているが代表的な 3 つの流域での予測結果を図 7.4.6 に, 日本全体での予測結果を図 7.4.7 に示す。

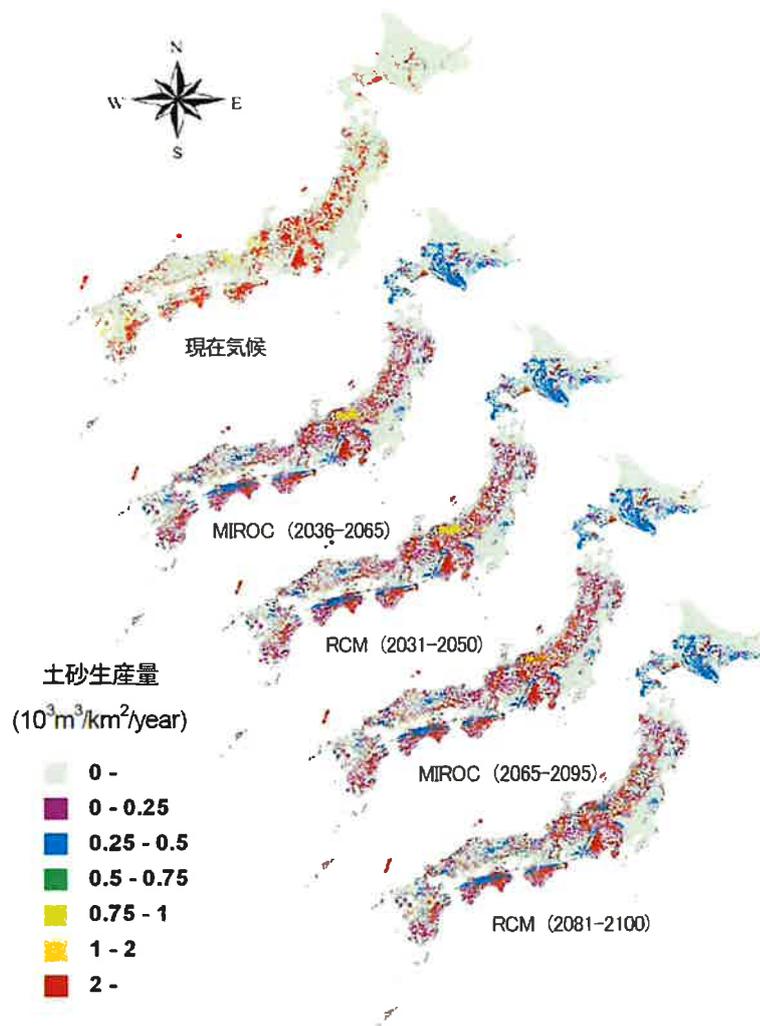


図 7.4.5 土砂生産量予測分布 (川本ほか, 2009)

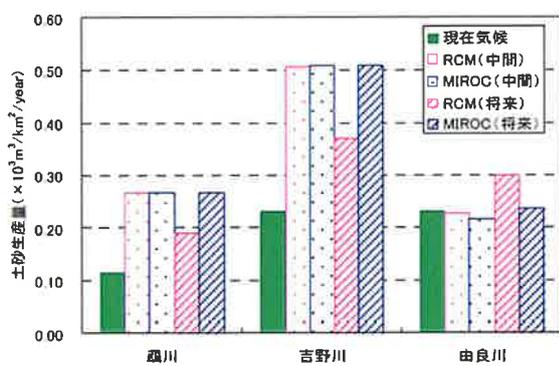


図 7.4.6 3流域の平均土砂生産量の変化予測 (川本ほか, 2009)

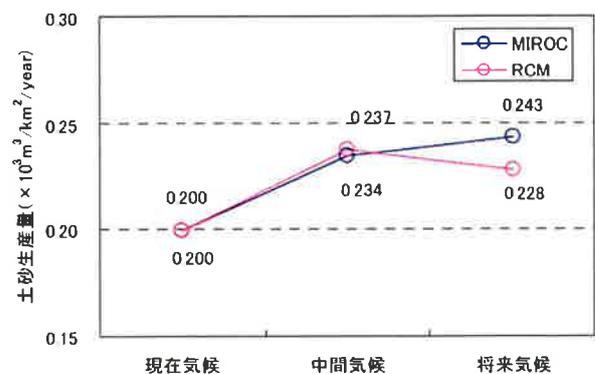


図 7.4.7 日本列島の平均土砂生産量の変化予測 (川本ほか, 2009)

<引用文献>

秋本嗣美・川越清樹・風間聡 (2009) : 数値気候モデルを用いた土砂生産量の予測, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.655-660.

7.5 夏期雨量と新極値の発生危険度を用いた土砂災害危険度の評価事例

日本の日雨量の歴代記録は四国や紀伊半島で800mm/日を超えており、九州でも600mm/日を超える地域が多い。豪雨を経験したこれらの地域では同程度の豪雨が発生しても大規模な斜面災害は多発しないが、この程度の豪雨が北海道や東北地方で発生した場合、いたるところで大規模な斜面災害が発生すると予想される。つまり、対象地域の斜面災害に関する豪雨への耐性は近年の豪雨の履歴が大きな要因を占めている。林ほか(2011)はこの耐性を2年超過確率雨量 $R_{1/2}$ の大きさを表現することを提案している。

図7.5.1は先述した4.3.4項で紹介した図4.3.10の再掲であるが、各観測地点の年降水量と既往最大日雨量の関係から新極値の発生危険度を評価する手法を提案している。横軸は27年～59年の統計年を有する日本の123観測地点の年降水量の平均値である。縦軸は解析当時から30年前までの各雨量観測地点の既往最大日雨量である(岸原ほか,1993)。図中の●印の地点はその後の30年間に新極値が発生した地点を示している。危険度1に分類される観測地点では新極値が発生した地点が多い。

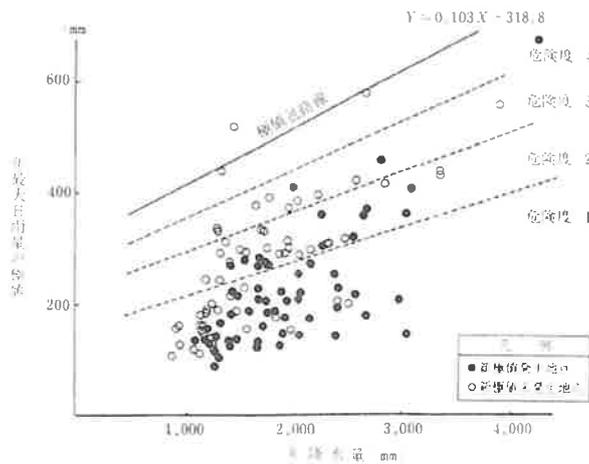


図 7.5.1 年降水量と新極値の発生危険度の関係 (岸原ほか,1993)

4.3.4項にも記載したが、岸原ほか(1993)は既往の極値が包絡線より遠い方が新極値の発生する可能性が高いとして、新極値の発生率 Z_i を以下のように定義している。

$$Z_i = \{(Y_i - y_i) / Y_i\} \times 100$$

ここに、包絡線の方程式 $Y_i = aX_i + b$

X_i : i 地点における年降水量(mm)

a, b : 包絡線の直線式の係数

Y_i : X_i に対応する包絡線の値

y_i : i 地点における既往の極値

そして、新極値発生危険度を次のように定義している。

新極値発生危険度 1 : $(100 - Z_i) < 50\%$

新極値発生危険度 2 : $50\% < (100 - Z_i) < 70\%$

新極値発生危険度 3 : $70\% < (100 - Z_i) < 85\%$

新極値発生危険度 4 : $(100 - Z_i) > 85\%$

なお、岸原ほか（1993）で示されている新極値発生危険度の定義の表現には誤植があり、それを修正した。

榎田（2019）は岸原ほか（1993）の新極値発生率の評価手法の考え方に基づく新極値発生危険度を斜面災害の発生危険度を表す指標として捉え、地域毎の豪雨による斜面災害の危険性を評価する手法を検討し、近年の代表的な豪雨災害事例で手法の適用可能性を評価した。図 7. 5.2 は統計期間が 50 年以上（最大 146 年）の主要な気象観測所の年最大日雨量データを元に、各観測地点での観測開始年から 30 年前（1988 年）までの既往最大日雨量（これを M-30 とする）と夏期降水量の関係図である。図中の●印は最近の 30 年間で新極値が発生した観測地で、○印は発生していない地点である。ここでの新極値の判断は、30 年前までの既往最大日雨量より 120%以上大きな日雨量とし、120%に満たない場合は新極値が発生していないと判断した。この判断を「既往最大日雨量より大きい」とすると 1mm でも大きければ新極値発生となる不具合が発生することから、「同程度の雨量」の域を超える判断として 20%の余裕を考慮した。図-4 に示すように全体としては夏期降水量が大きい地点では既往最大日雨量（M-30）も大きくなる傾向にある。また、最近の 30 年間に新極値が発生した地点は同じ夏期降水量に対して既往最大日雨量（M-30）が比較的小さな地点に集中している。

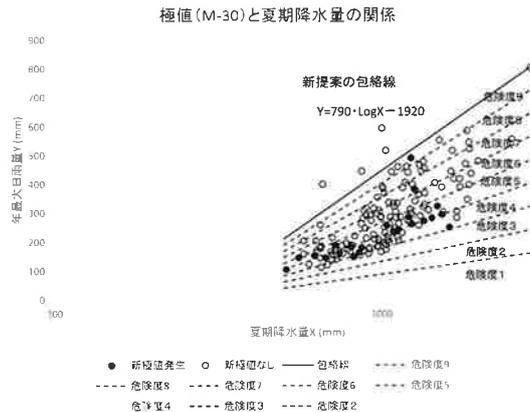


図 7. 5.2 夏期降水量と新極値の発生危険度の関係（M-30）（榎田，2019）

図 7. 5.3 は川越ほか（2009）が数値気候モデルの気候予測モデルにおける最大平年値月降雨量と日降雨極値の関係を見たグラフであるが、図 7. 5.2 と同様に暖候期の月降雨量が増加すると日雨量の極値も増加する傾向にある。

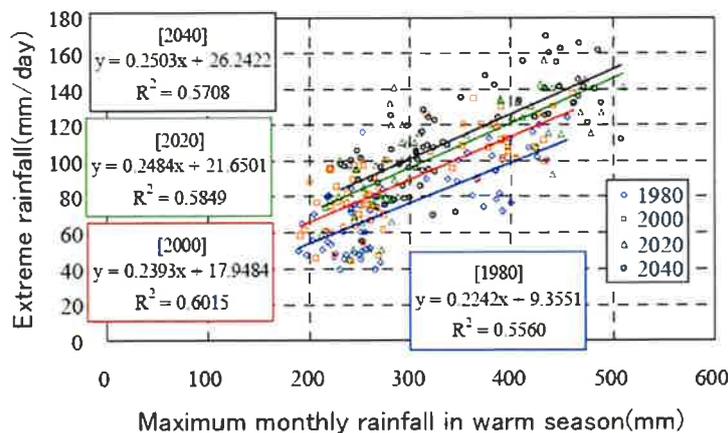


図 7. 5.3 暖候期の最大平年値月降雨量と日降雨極値の関係（川越ほか,2009）

榎田（2019）は近年に発生した斜面災害と本手法の新極値発生危険度の関係を調べるために各観測地点での観測開始年から10年前（2008年）までの既往最大日雨量（これをM-10とする）について図7.5.2と同様の解析を行った。包絡線も図7.5.2と同じである。それは先述したようにこの包絡線が日本における日雨量の限界に近いと考えるもので、解析に用いるデータの期間と無関係に同一であるという考えである。図7.5.4は各観測地点での既往極値（M-10）と夏期降水量の関係図である。

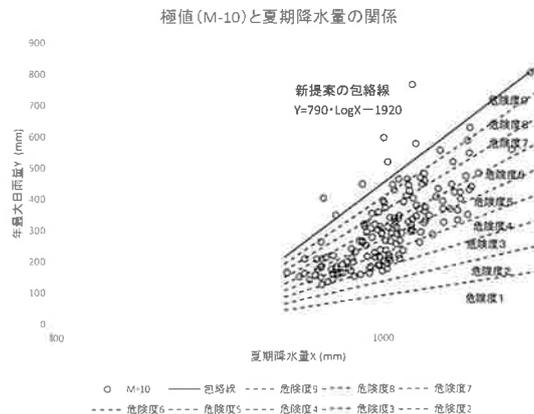


図 7.5.4 夏期降水量と新極値の発生危険度の関係（M-10）（榎田，2019）

榎田（2019）は10年前（2008年）までの観測データを用いた新極値発生危険度を元に、近年の豪雨災害の事例での検証を行っている。図7.5.5は福岡県の斜面災害発生危険度（M-10対応）の分布と2017年7月の九州北部豪雨での主要な斜面災害地点を表している。危険度分布を見ると、朝倉周辺は過去に大きな豪雨を経験していない地域が集中しており斜面災害危険度が高い。2017年の土砂災害発生地域は斜面災害危険度が比較的高い地域で発生している。斜面災害危険度（M-10対応）の分布と2017年豪雨の斜面災害発生箇所の分布は調和的である。

図7.5.6は広島県の斜面災害発生危険度（M-10対応）の分布と2018年7月の西日本豪雨での主要な斜面災害地点を表している。広島県では広島市のみが10年前までに大きな豪雨を経験しており、その他の地域はその経験が無いことから斜面災害危険度が高い地域が多い。2018年の豪雨災害におけるがけ崩れもそのような地域で多く発生していることが判る。

図7.5.7は愛媛県の斜面災害発生危険度（M-10対応）の分布と2018年7月の西日本豪雨での主要な斜面災害地点を表している。愛媛県は中央の山岳地帯で過去に大きな豪雨を経験した地域が広がり、沿岸部にはそれを経験していない地域が広がっている。この沿岸部の斜面災害危険度が高い地域に2018年の斜面災害が多く発生している。宇和島付近では危険度6程度の地域でも斜面災害が多発しているが、全体としては斜面災害危険度（M-10対応）の分布と2018年豪雨の斜面災害発生箇所の分布は概ね調和的である。

2017年と2018年の豪雨災害の発生場所について、3つの県で斜面発生危険度（M-10対応）の分布と比較したがどの事例も調和的であった。つまり、本手法で算出した斜面災害発生危険度が今後の斜面災害の発生予測に利用できる可能性が示された。

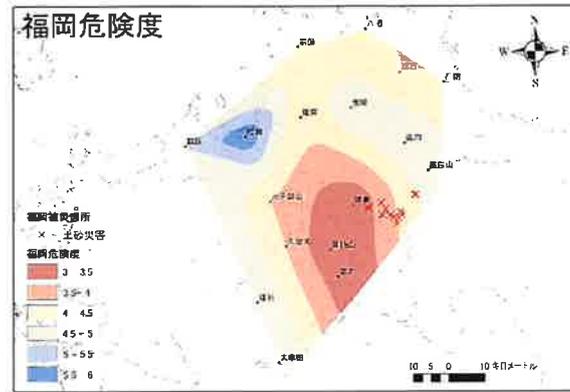


図 7. 5.5 福岡県内の斜面災害発生危険度（M-10 対応）の分布と近年の広域災害箇所との関係（榎田，2019）

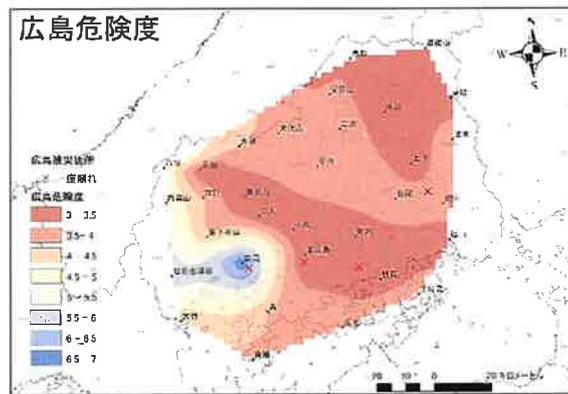


図 7. 5.6 広島県内の斜面災害発生危険度（M-10 対応）の分布と近年の広域災害箇所との関係（榎田，2019）

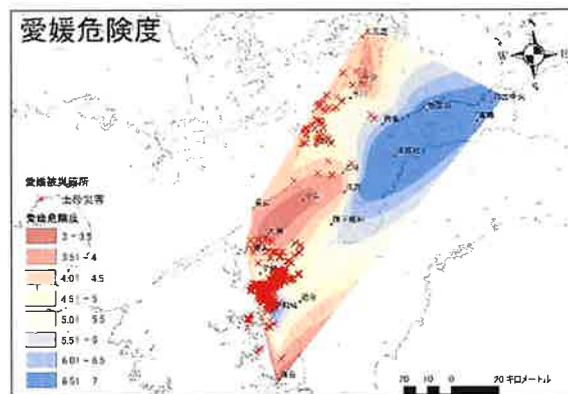


図 7. 5.7 愛媛県内の斜面災害発生危険度（M-10 対応）の分布と近年の広域災害箇所との関係（榎田，2019）

<引用文献>

- 岡村未対（2018）：2018年西日本豪雨による愛媛県の被害調査報告，第2回平成30年7月豪雨による地盤災害調査報告会
- 榎田充哉（2019）：新極値の発生危険度を用いた斜面災害発生危険度評価，日本地すべり学会誌，Vol.57, No.2, pp.14-18.
- 岸原信義・法村俊郎・市川仁士・榎田充哉・斎藤裕久（1993）：異常豪雨は予測できるか（Ⅱ），水利科学，Vol.36, No.6, pp.1-17.
- 川越清樹・風間聡・肱岡靖明・高橋潔（2009）：斜面崩壊リスク評価に対する気候モデルの適用，水工学論文集，第53巻, pp.661-666.

7.6 気候変動および山地災害の評価の現状と今後の山地災害対策の方向性（執印康裕）

7.6.1 災害外力と災害発生に対応関係について

4.4 節において、災害外力が過去から現在まで増大傾向にあり表 4.4.1 に示すレベル 3 の災害外力による災害が発生していること、および将来において、その発生頻度および規模ともに増加傾向にあることが予測されていることを述べたが、当然ながら災害の発生・非発生及び発生した場合の被害規模は災害外力のみによって決まるものではない。災害外力および対象とする空間範囲に対する災害外力の暴露の程度、対象範囲の災害外力に対する抵抗力（レジリエンス）の 3 要素によって決定される。これに関連して牛山（2017）は日本全域における災害発生の時系列変化について詳細な検討を行ない、1949～2014 年の自然災害全体の死者・行方不明者数、1968～2014 年の風水害による死者・行方不明者数について、いずれも統計的に有意な減少傾向にあったことを示している。この事は災害外力が増大傾向（図 4.4.2 参照）にある一方で、時代の進行に伴うハード・ソフト対策などの進展によって、災害外力に対する抵抗力（レジリエンス）が増大していることを示唆しているのかもしれない。

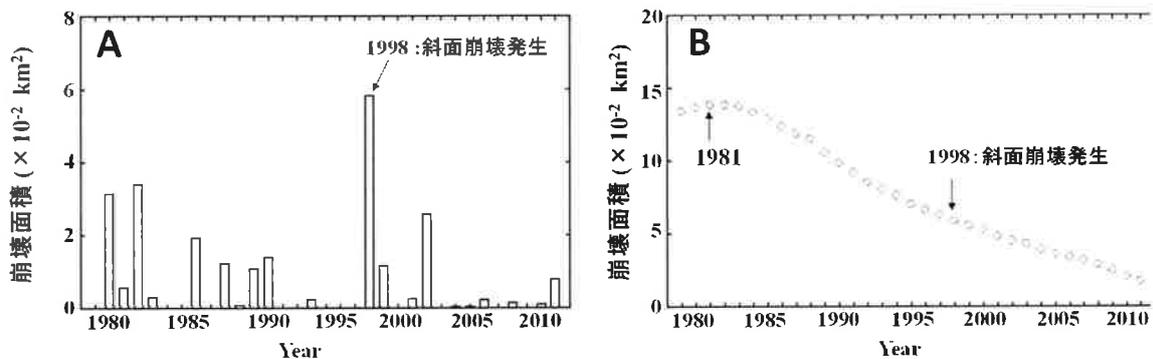


図 7.6.1 豪雨（災害外力）と森林植生（レジリエンス）の時系列変化を考慮した表層崩壊面積のシミュレーション結果，A：各年の災害外力と各年の森林植生分布，B：1998 年の災害外力と各年の森林植生分布

牛山（2017）の検討結果は、日本全国を対象にしたものであるが、豪雨（災害外力）を誘因とする表層崩壊に起因する山地災害についてみると、この災害外力とレジリエンスの関係はかなり明瞭になる。森林植生の違いが表層崩壊の発生・非発生に大きく影響を与えることは周知の事実であり、数多くの先行研究が存在する（例えば 執印ら, 2013; Reichenbach et al., 2014; Schmaltz et al., 2017）。その一例として図 7.6.1 に執印ら（2013）による宇都宮大学船生演習林を空間範囲とした検討結果を示す。具体的には 1998 年の 8 月末の台風 4 号による集中豪雨によって、演習林内の 36 箇所の複数地点で表層崩壊が発生した事例（宇都宮大学演習林研究部 1999）を対象にモデル計算によって検討したものである。適用モデルは、Okimura and Ichikawa(1985)によって提示された表面地形による地下水の飽和側方流動過程を考慮した分布型崩壊モデルであり、森林植生の空間分布は森林簿を基に推定している。本図には各年の災害外力を各年の森林植生の空間分布に入力した時に出力される崩壊面積の時系列変化（図 7.6.1A 参照）と災害発生年の 1998 年豪雨を各年の森林植生の空間分布に入力した時に出力される崩壊面積の時系列変化（図 7.6.1B 参照）を示している。図 7.6.1A から崩壊面積そのものは 1998 年豪雨が最大であるのに対して、図 7.6.1B に示すように同一外力を入力

とした崩壊面積は 1981 年以降では減少していることが分かる。このことは森林植生によるレジリエンスが 1981 年以降に増加している傾向にあることを示している。この結果は先の牛山 (2017) が提示した結果と調和的である可能性が高いことを意味する。

7.6.2 土砂災害警戒情報の枠組からの検討

前章までに、災害外力は過去から将来にわたって増加傾向にあること、ただし災害の発生・非発生および発生した場合の被害規模は災害外力と対象空間のレジリエンスの相互関係から決定されることを示した。ここまで記述した内容を土砂災害警戒情報の枠組から、東京都伊豆大島を対象に極めて単純に検討した事例 (執印ら 2018) について紹介する。

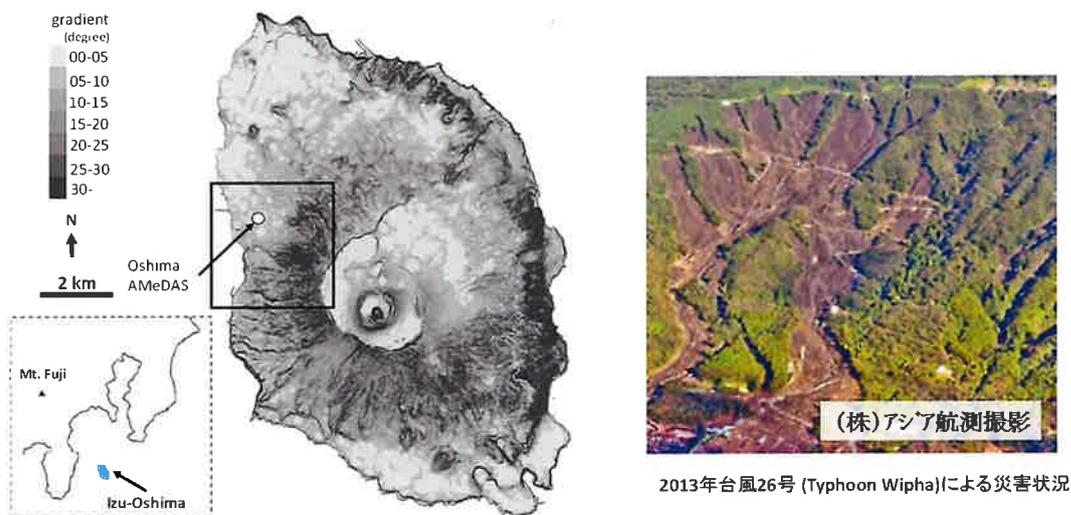


図 7.6.2 伊豆大島の位置および地形概略と 2013 年台風 26 号による災害状況写真

本対象地では、1950 年から 2015 年までの 66 年間で 1958 年 9 月および 2013 年 10 月に 2 回の大規模な土砂災害が発生している。1958 年 9 月の土砂災害では、狩野川台風を誘因とする表層崩壊・土砂流出により 9 月 26 日午後 4 時 20 分頃に土石流が元町地区を流下し (日本経済新聞電子版, 2013), 死者 1 名, 行方不明者 1 名, 重軽傷者 53 名の人的被害が発生した (井上, 2014)。このときの降雨概況は、本島西部に位置する伊豆大島元町地区にある気象庁観測所で観測された総降雨量 536.9mm, 最大時間雨量 87.5mm である。一方 2013 年 10 月の土砂災害は、2013 年台風 26 号による 10 月 15 日から 16 日未明にかけての記録的な降雨 (総降雨量: 824mm, 最大時間雨量: 119mm) を誘因とするものであり、16 日午前 2 時過ぎから 3 時頃にかけて山腹斜面上部の広範囲にわたって発生した表層崩壊とそれに引き続く土石流によって生じたものである。特に山裾に位置する元町地区、神達地区周辺を中心に死者 35 名, 行方不明者 4 名に及ぶ極めて甚大な土砂災害が発生した (石川ら, 2014)。図 7.6.2 に伊豆大島の位置および地形概略と 2013 年台風 26 号による災害状況写真を、図 7.6.3 に図 7.6.2 の枠内の両台風による崩壊・土石流範囲を示す。

図 7.6.3 から 2013 年台風 26 号による崩壊・土石流の発生範囲が狩野川台風によるものと比較して広範囲に及んでいることが確認される。この両者の違いは豪雨規模に代表される災害外力の違い及び森林植生の時代に応じたレジリエンスの違いを反映したものである。ただし両者 (つまり災害外力

とレジリエンス) の違いが災害発生に与えた影響を土砂災害警戒情報の枠組みから同時に検討することは難しい。何故ならば、土砂災害警戒情報は災害外力としての降雨特性から得られる指標を基本としているからである。そこで災害外力を基準(モノサシ)とする1958年と2013年のレジリエンスの違いの検出可能性について検討した。

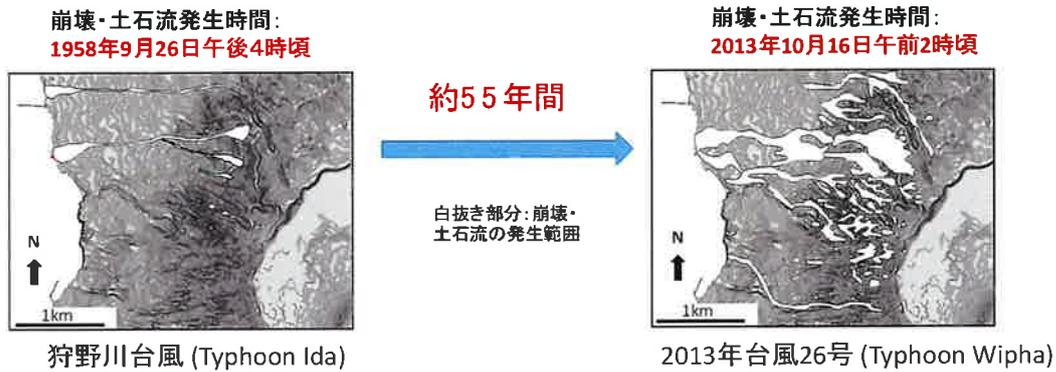


図 7.6.3 1958年の狩野川台風および2013年台風26号による崩壊・土石流の発生範囲

現行の土砂災害警戒情報で用いられている指標(RBFN値)は、土壌雨量指数と60分積算雨量の関係から得られるスネーク曲線による評価法の枠組みから求められるものである。ただし本検討において適用する指標(以後はGIPRIと称する)は検討が容易なように時間軸にあわせて表示が可能な指標とした。GIPRIの算出式を式(1)、(2)に、

図 7.6.4 に狩野川台風を例とした算出法の概略図を示す。

$$L = \sqrt{\{\log(a)\}^2 + \{\log(b)\}^2} \dots \dots \dots (1)$$

$$GIPRI = 10^L \dots \dots \dots (2)$$

ただし、L: 確率年1年とする原点からの距離、a: 土壌雨量指数の確率年(単位: year)、b: 1時間雨量の確率年(単位: year)、GIPRI: 統合確率年指数(単位: year)である。

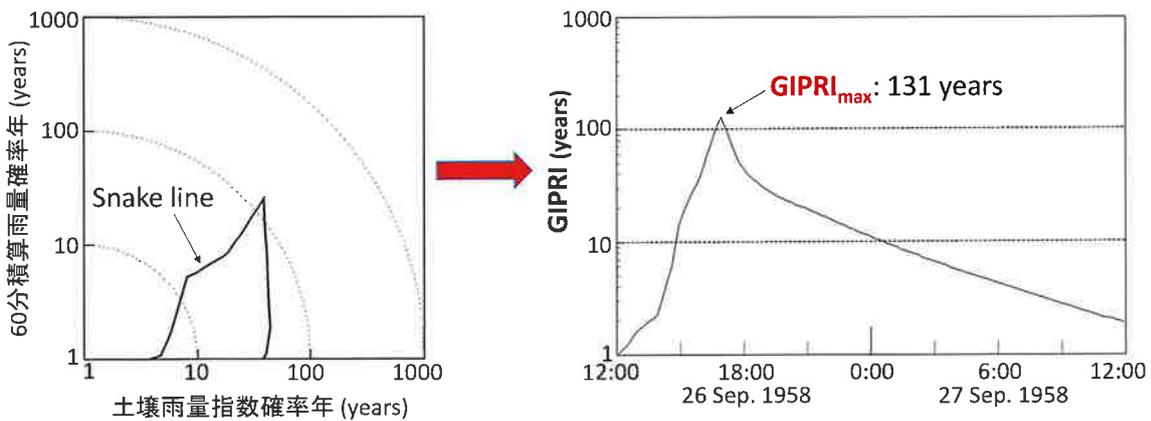
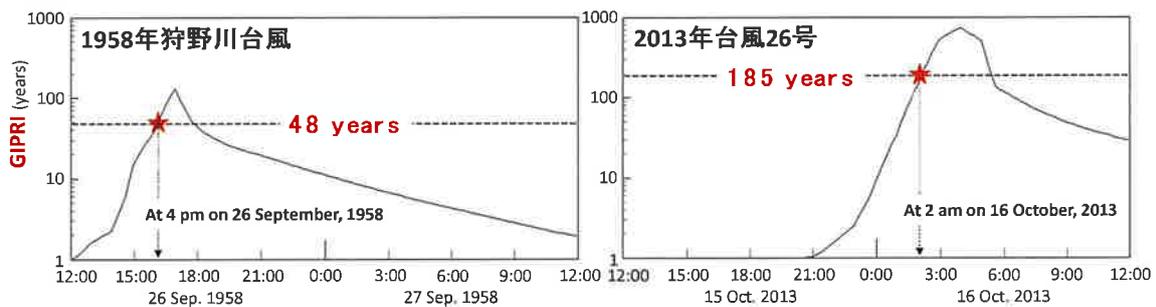


図 7.6.4 1958年の狩野川台風を事例としたGIPRIの算出法の概略

すなわち本指標は

図 7. 6.4 において示されるスネーク曲線上の土壌雨量指数確率年と 60 分積算雨量の確率年を幾何的に統合したものであり、各時刻におけるスネーク曲線のプロット位置が原点から離れるほど、土砂災害発生危険度が高い状態にあるとの極めて単純な仮定に基づいている。

図 7. 6.5 に 1958 年の狩野川台風及び 2013 年台風 26 号の GIPRI の短期時系列変化と 1958－2015 年までの GIPRI 各年最大値の長期時系列変化を示す。本図から、2013 年台風 16 号の災害外力が最大であること、また斜面崩壊発生の推定時刻における GIPRI の値は狩野川台風時と比較して 2013 年台風 26 号の値が増加していることが、GIPRI の 24 時間の短期時系列変化（図 7. 6.5 上段）および 66 年間の長期時系列変化（図 7. 6.5 下段）の両方から確認できる。このことは 1958 年と 2013 年のレジリエンスの違いを、およそ 55 年間の森林植生の生長による蓄積量の違いとして検出可能であることを示唆している。また 2013 年台風 26 号による斜面崩壊発生時の GIPRI は 185 years であり、1958 年の狩野川台風の最大外力の 131 years（図 7. 6.4 参照）を超えていることが確認される。つまり、この事は 1958 年の狩野川台風と同規模の災害外力が 2013 年に発生したとしても、斜面崩壊は非発生であった可能性が高いことを示唆している。



★: 斜面崩壊発生推定時刻のGIPRI

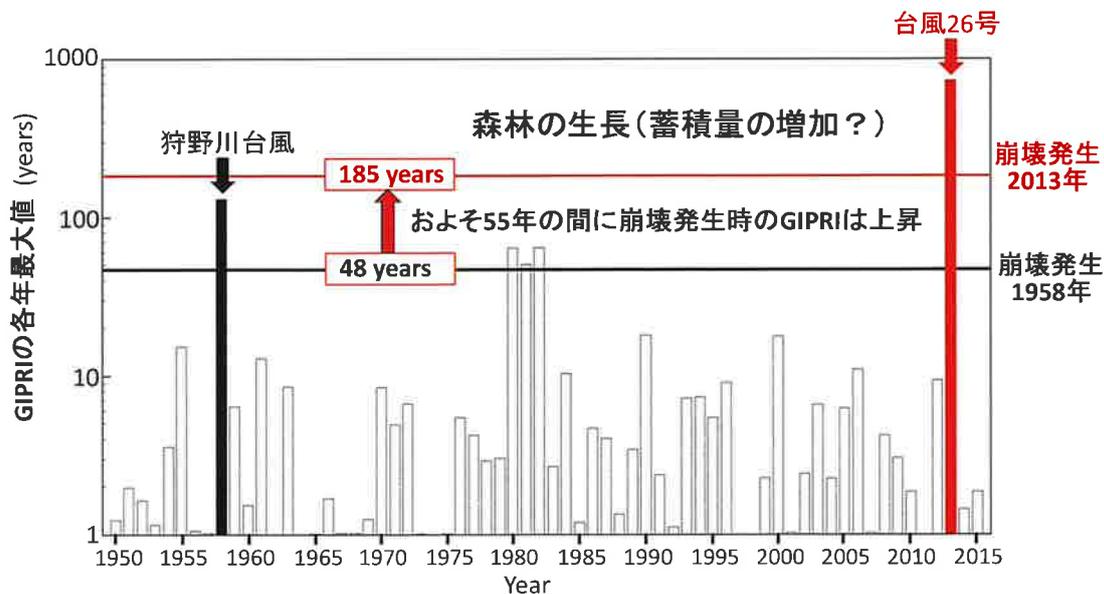


図 7. 6.5 1958 年の狩野川台風及び 2013 年台風 26 号の GIPRI の短期時系列変化（上段）と 1958－2015 年までの GIPRI 各年最大値の長期時系列変化（下段）

以上の事は、山地災害において発生・非発生を規定する主要な要素の1つである森林植生について議論する上で興味深い結果であることを示していると言えよう。例えば2013年の伊豆大島の災害では斜面崩壊によって発生した流木によって被災範囲が拡大したことが指摘されることが多いが、これは55年間の森林の生長（蓄積量の増加）によってレジリエンスが増加していたにも関わらず、それを上回る災害外力（前掲の表4.4.1のレベル3以上）によって生じた結果であると解釈するのが自然であろう。さらに森林植生による土砂災害発生防止機能には限界があることは広く認識されているにも関わらず、誤解を恐れずに言えば、その定量的な限界については殆ど検証が行われていない。つまり気候モデルの計算結果を用いて、地球温暖化による将来の山地災害を予測し、それをベースに今後の山地災害対策のあり方を検討することも重要ではあるが、将来予測の不確実性を鑑みれば、現在に至るまで社会経済的な影響を強く受けてきた、そして今後も受け続けるであろう森林植生の過去から現在までの状況変化を踏まえた上で、現在までに発生した山地災害を対象に森林が有するレジリエンスの限界あるいはその変遷について検証を行ない、それをベースに今後の山地災害対策のあり方を検討することも重要であるのかもしれない。

<引用文献>

- 井上公夫(2014)：伊豆大島・元町の土砂災害史，地理，59-2，p.10-19
- 石川芳治・他14名(2014)：2013年10月16日台風26号による伊豆大島土砂災害，砂防学会誌，Vol.66，No.5，p.61-72
- 日本経済新聞電子版(2013)：伊豆大島「将来の憂いなきよう」55年前，土石流を記録，2013年11月3日配信，http://www.nikkei.com/article/DGXNASDG0200W_S3A101C1CR0000/，参照2017-11-14
- Okimura, T. and Ichikawa, R.(1985)：A prediction method for surface failures by movements of infiltrated water in a surface soil layer. Natural Disaster Sci. Vol. 11, p.41-51.
- Reichenbach P., Busca C., Mondini A. C. (2014): The influence of land use change on landslide susceptibility zonation: The Briga catchment test site (Messina, Italy), Environmental Management 54. p.1372-1384, DOI 10.1007/s00267-014-0375-0
- Schmaltz E. N., Steger S., Glade T. (2017): The influence of forest cover on landslide occurrence explored with spatio-temporal information. Geomorphology 290, p.250-264
- 執印康裕・他4名(2013)：降雨及び人工林における林齢空間分布の経時変化が表層崩壊発生に与える影響評価について，緑化工学会誌，Vol.39(1)，p.27-32
- 執印康裕・他3名(2018)：確率年を用いた単一降雨指標による土砂災害発生危険度の評価について－東京都伊豆大島を事例として－，砂防学会誌，Vol.71，No.1，p.28-34
- 牛山素行（2017）：日本の風水害人的被害の経年変化に関する基礎的研究，土木学会論文集 B1（水工学）Vol.73，No.4，I_1369-I_1374
- 宇都宮大学演習林研究部(1999)：平成10年8月末豪雨による船生演習林被害の記録，宇都宮大学農学部演習林報告35，p.119-123

7.7 豪雨にともなう斜面崩壊の規模と発生場の特徴（土屋 智）

7.7.1 はじめに

福岡県朝倉市，東峰村，大分県日田市の山間部で最大 24 時間降雨量 829mm（朝倉市黒川）という未曾有の豪雨があった九州北部豪雨災害（平成 29 年 7 月）は，過去に経験のない甚大な斜面災害をともなった。多数の表層崩壊が森林域で高密度に発生したことから，予想をはるかに上回る流木が土石流や洪水流に加わり溪流を下り，集落域に至り（松浦，2018）被害を拡大した。林業が盛んな地方で多くの立木が森林域から流出し，災害を増長させたことから，社会的なインパクトも大きかった。また，多くの表層崩壊のほかにも，深層的で規模の大きな崩壊も発生した。これら崩土の多くは流動化し溪岸を侵食しつつ，溪床土砂を巻き込み増大して流下した様子も見られた。

この土砂災害の誘因は，狭い範囲に集中的な強雨が継続して降ったことにあるが，その素因には，マサ土化した花崗岩類や風化の進んだ泥質片岩のほかに，火山性岩という脆弱な地質で覆われていることがあげられる（丸谷ら，2017）。災害の概要は，砂防学会（丸谷ら，2017）や京都大学防災研究所の報告書に詳しく，斜面崩壊の機構についても地質，地区ごとに調査され，多くの有用な情報を提供している（千木良ら，2018）。

ここでは，当該地区で発生した斜面崩壊を包括し，災害情報として蓄積することを目的に，斜面崩壊の規模と発生場に関する特徴把握を試みた。なお，解析に用いた資料は，国土地理院が作成した「平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」（<https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/>）と国土地理院の基盤地図情報・数値標高モデル（10m メッシュ）である。

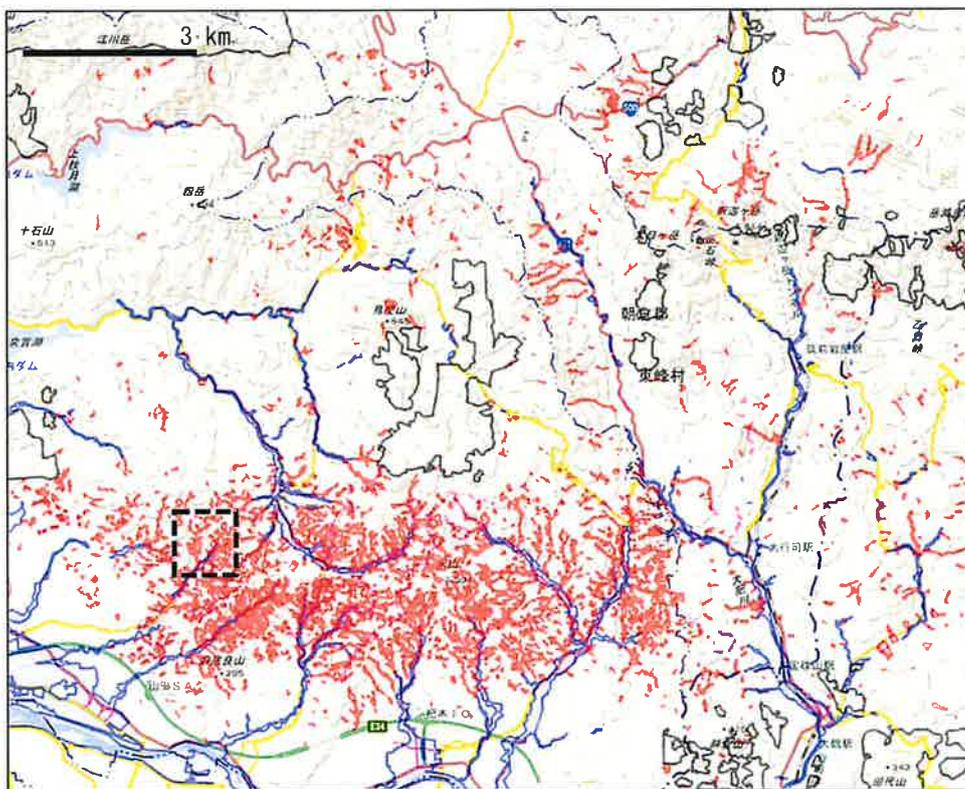


図 7.7.1 解析対象域（国土地理院「平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」より作成，矩形域は図 2 の範囲）

7.7.2 国土地理院作成の斜面崩壊資料

国土地理院が作成した「平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」は、被災後に撮影された空中写真と災害対策用ヘリコプターによる画像による正射画像を用いている。これにより、豪雨で発生したとされる土砂崩壊地、道路損壊、鉄道損壊、洪水流到達範囲を判読したもので、1935 個の土砂崩壊地が抽出されている。また、抽出された崩壊地は、ポリゴンとして境界座標と面積が整理され、一般的な GIS ソフトで閲覧可能な GeoJSON ファイルで公開されている。解析対象範囲は、図 7.7.1 に示すように土砂崩壊地が高密度に分布する区域を含む 246.16km² の領域で、1723 個の土砂崩壊地を含む。なお、判読された土砂崩壊地は、長さや幅が約 50m 以上の崩壊跡で、写真では区分できない複数の崩壊地と堆積地とが一体で抽出されている。

図 7.7.2 には国土地理院が UAV 撮影した奈良ヶ谷川（図 7.7.1 の破線区域を流下する）の森林地帯の崩壊箇所（平成 29 年 7 月 7 日 17 時 45 分撮影）を示した。土砂崩壊地は単一ではなく複合的に発生・流下した様子がうかがえる。図 7.7.3 には、図 7.7.1 の破線で示す矩形領域におけるポリゴン化された土砂崩壊地を示す。これに見るように幅 50~100m、流下長 200m ほどの崩壊が複数一体となってポリゴン化されていることがわかる。

図 7.7.3 の表示区域に占める崩壊地面積を区域面積で割り崩壊面積率とすると、約 16.5%と概算でき、高い値を示す。図 7.7.3 に示す区域が図 7.7.1 の崩壊地が密集する区域（横 10km、縦 3km）を代表するとすれば、密集する区域の崩壊面積率は約 16%相当と考えられる。図 7.7.2 を参考に、土砂崩壊地の平均崩壊深を仮に 1m とすれば、密集域からの生産土砂量は、約 500 万 m³ と概算される。

7.7.3 崩壊地と地形因子

次に、被害状況判読図をベースに基盤地図・数値情報（10m メッシュ）から地形因子を求め、崩壊地の発生場に関する地形的な特徴を評価する。用いた地形因子は、標高、斜面向き、傾斜、TPI（地形位置指数）、TRI（地形起伏指数）で、これらは、GIS ソフト QGIS のラスタ解析により求めた。



図 7.7.2 奈良ヶ谷川流域の崩壊箇所（国土地理院 UAV 撮影、平成 29 年 7 月 7 日）

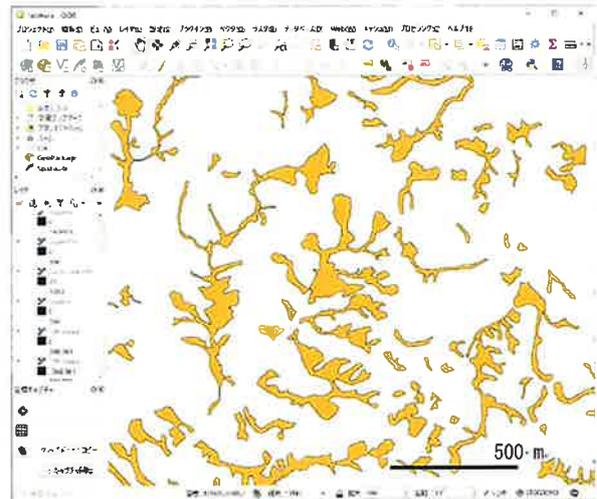


図 7.7.3 ポリゴン化された崩壊地（複数が一体としてポリゴン化されている）

(1) 解析域内の地形因子

図 7.7.4 には、解析対象地内の標高分布を土砂崩壊地ポリゴンとともに示した。土砂崩壊地の高密度な分布域は、標高分布とはほぼ無関係に領域の右下域に長方形をなすように分布する。またこの高密度な分布域は、図 7.7.4 の下端を右から左に蛇行する筑後川の北方山麓の標高 200~500m の範囲である。また図中の中央右側を南下する大肥川を境に、その東側で土砂崩壊地は少なくなる。

図 7.7.5 には、解析域の斜面方向（向き）の分布について、真北方向を 360 度として示した。谷と尾根を境に斜面の向きが異なることから、地形の特徴が良好に示されていることがわかる。図 7.7.4 に示す崩壊地の密集域とそれ以外における斜面方向を比べると、特徴ある分布は見られない。

図 7.7.6 には、斜面勾配の分布を示す。図 7.7.5 と同じように、崩壊地の密集域とそれ以外の斜面勾配を比べると、特徴ある斜面勾配の分布は見られない。なお、密集域の斜面勾配は、25~40 度の範囲に含まれるようである。

さて、地形因子には、標高、斜面向き、勾配のほかには TPI（地形位置指数）、TRI（地形起伏指数）を用いている。TPI とは、対象セルの標高とその周辺セルの標高との差で定義（式 (1)）され、この値が高ければ尾根部で、低ければ（負）、周辺よりも低い谷部であることを示す。また TRI は、式 (2) で定義され対象セルと周辺セルのそれぞれの差の絶対値の平均で周囲との平均高度差を示す。したがって、TRI をセル幅で割ると平均的な勾配を示すことを意味している。

図 7.7.7 に解析領域の TPI 分布を示す。TPI 値の分布範囲は、約-5m から 5m 程度の範囲を示している。この値は、対象セルを取り囲む周辺セルとの標高差を意味するから、正負の大きさに応じて谷・尾根地形を示すとされる。

ここではセル幅が約 10m と小さいため、分布範囲は、単に対象セルと周辺との相対的な高さの違いを示したものと考えられる。また図 7.7.7 を見ると TPI は、領域内ではほぼ均等に分布しているように見受けられる。

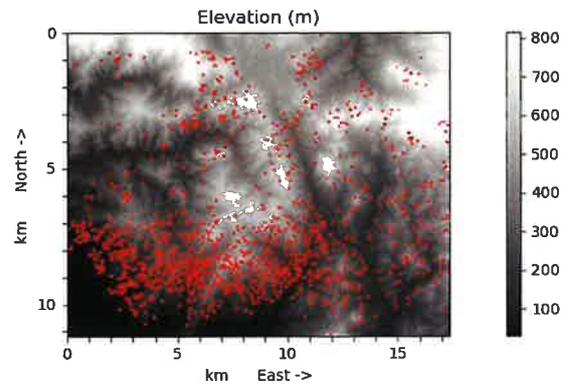


図 7.7.4 解析対象域の標高分布（赤点は崩壊地ポリゴンの最高点位置を示す）

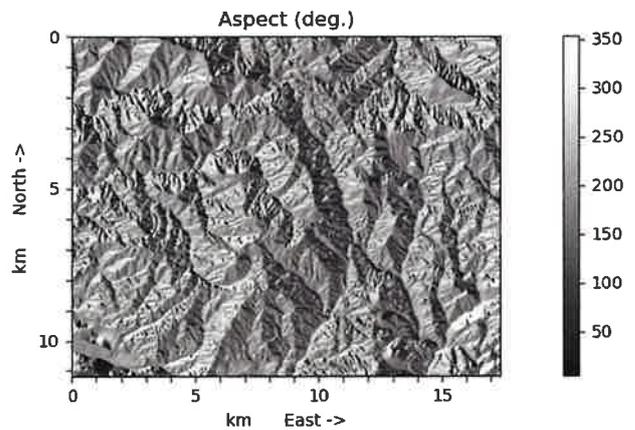


図 7.7.5 解析対象域の斜面方向（向き、真北：0 時計回り 360 度まで）

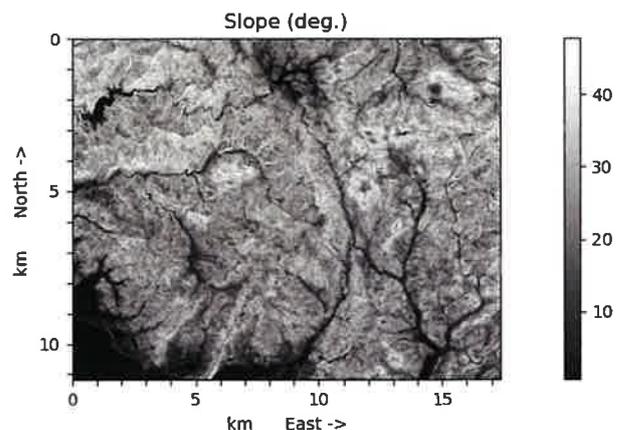


図 7.7.6 解析対象域の斜面勾配分布

図 7. 7.8 には、TRI の分布を示した。TRI は対象セルと周囲 8 近傍のセルとの標高差の絶対値の平均であるから、対象セルが周辺とどの程度の高低差があるかを示している。また、セル幅で除すとその値は勾配を示すので、図 7. 7.6 にほぼ等しい分布模様を示している。

以上に示すように、土砂崩壊地の密集する区域とそれ以外で地形因子（標高, 斜面向き, 傾斜, TPI, TRI）を用い対比したが、その分布の違いは見いだせない。

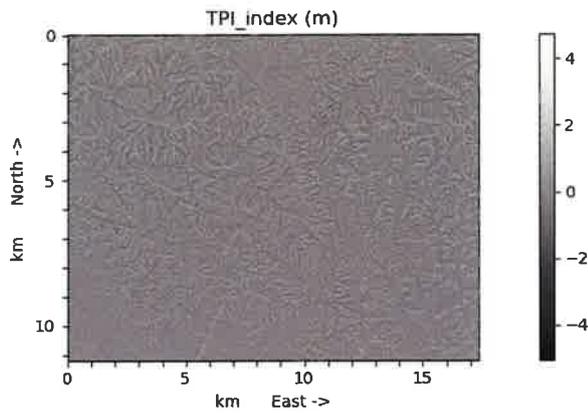


図 7. 7.7 解析対象域の TPI(地形位置指数)の分布

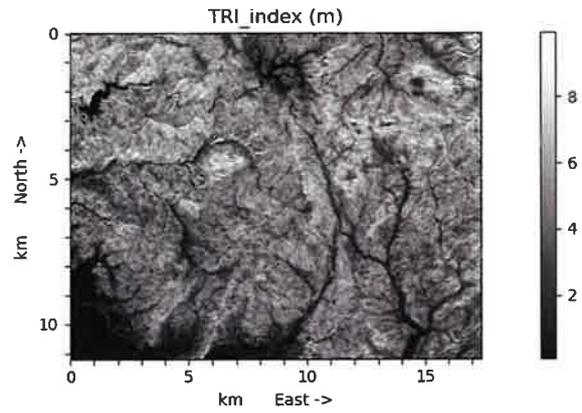


図 7. 7.8 解析対象域の TRI(地形起伏指数)の分布

$$TPI = \frac{DEM(i, j) - (DEM(i-1, j+1) + DEM(i, j+1) + DEM(i+1, j+1) + DEM(i-1, j) + DEM(i+1, j) + DEM(i+1, j-1) + DEM(i, j-1) + DEM(i+1, j-1))}{8} \dots (1)$$

$$TRI = \frac{(|DEM(i-1, j+1) - DEM(i, j)| + |DEM(i, j+1) - DEM(i, j)| + |DEM(i+1, j+1) - DEM(i, j)| + |DEM(i-1, j) - DEM(i, j)| + |DEM(i+1, j) - DEM(i, j)| + |DEM(i-1, j-1) - DEM(i, j)| + |DEM(i, j+1) - DEM(i, j)| + |DEM(i+1, j-1) - DEM(i, j)|)}{8} \dots (2)$$

(2) 土砂崩壊地を含むセル分布と地形因子

対象域内のラスタ解析により求めた各セルで地形因子それぞれについて、その大きさ毎に出現頻度を求め、土砂崩壊地とそれ以外の斜面（一般セル）を対比し違いを把握する。

図 7. 7.9 には、標高を因子として土砂崩壊地とそれ以外の斜面の頻度分布を対比した。解析領域内の対象セルは、非現実的な数値が含まれることを避けるため、図 7. 7.4 に示す標高分布の 1~99%を取り出し、解析対象とした。対象セル数は 1908037 個、土砂崩壊地はセル数 52678 個である。領域内のセルは、標高 220~370m に約 40%が分布するが、

土砂崩壊地セルは、標高 180~270m域で約 45%が尖塔形に突出し分布する。土砂崩壊地がこの標高ゾーンで多いことは、降雨量もこのゾーンで多かったと推察される。

図 7. 7.10 には、斜面の傾斜方向の分布を対比した。斜面の傾斜方向は、真北を 0 とし時計方向

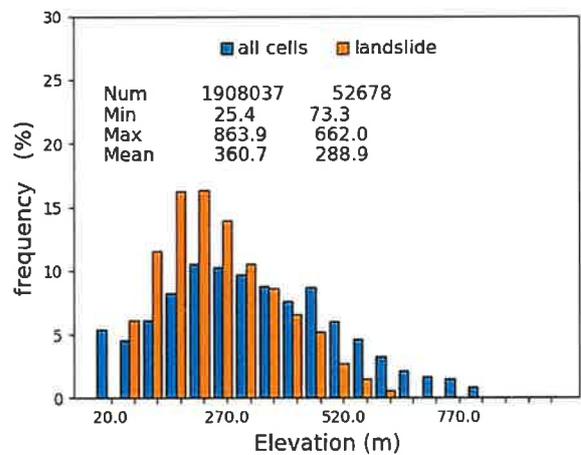


図 7. 7.9 一般セルと土砂崩壊地セルの標高分布の対比

に 360 度の範囲に出現する傾斜方向をカウントしている。図に示すように約 180 前後の南向き斜面が 10%前後と他に比べて多いが、一般セルと土砂崩壊地のセルの分布には違いがみられない。

図 7.7.11 には、斜面の勾配分布を対比した。一般セルと土砂崩壊地セルの分布を比べると、一般セルが 0~6 度に約 9%存在することを除けば、両者はほぼ同様の分布を示す。土砂崩壊地セルの最小は 3.9 度、最大は 47.9 度を示し、15~30 度の範囲で全体の約 60%を示す。

図 7.7.12,図 7.7.13 には、それぞれ一般セルと土砂崩壊地セルの TPI(地形位置指数), TRI(地形起伏指数)の分布を対比した。図 7.7.11 同様に、一般セルの分布と土砂崩壊地セルを比べると、両者の分布形状はほぼ同様で違いを見いだせない。図 7.7.12 から崩壊地セルは TRI として -2~0m に突出するが、一般セルのピークは -1~0m であり、周辺と高さに差異があるとは判断できない。図 7.7.13 における TRI は、図 7.7.11 の斜面勾配の分布と同様であり、これも両者の違いを見いだせない。

なお、一般セルの個数は 1,888,162 ~ 1,910,400 で、崩壊地セルが 52,676 ~ 52,678 であるから、領域面積に対する土砂崩壊地の面積率は 2.8%を示す。一般に大災害とされるケースで崩壊面積率は 1%を超えるといわれる(海堀ら, 2010) に対して、解析領域内の 2.8%は 3 倍大きく、突出する崩壊密度であったといえる。しかも土砂崩壊地が密集する 10km, 3km 区域では約 16%であり、これは庄原災害の 7% (海堀ら, 2010) の倍以上で、極めて大きいといえる。

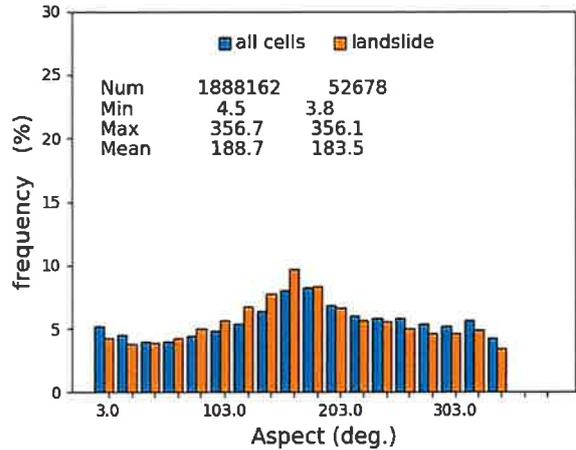


図 7.7.10 一般セルと土砂崩壊地セルの斜面方向分布の対比

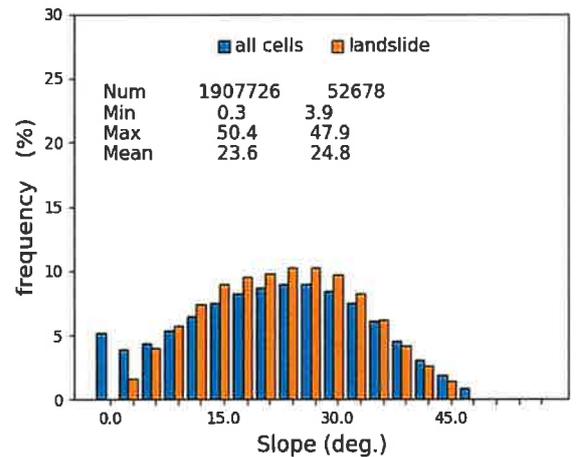


図 7.7.11 一般セルと土砂崩壊地セルの斜面勾配分布の対比

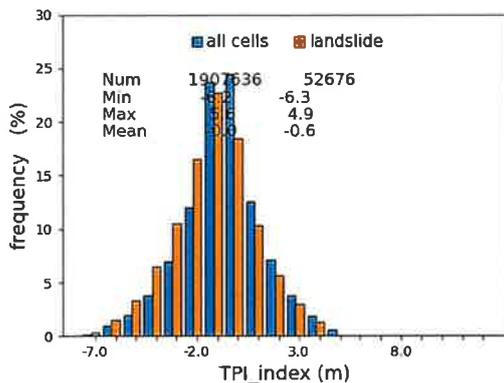


図 7.7.12 TPI 分布の対比

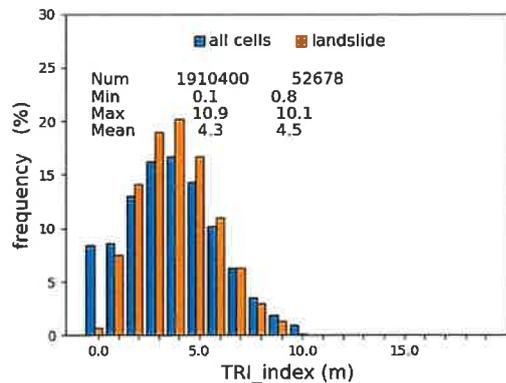


図 7.7.13 TRI 分布の対比

(3) 崩壊の発生位置の特徴

「平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」に記載された土砂崩壊地は、図 7. 7.3 に示すように崩壊地と堆積地が区分されず、またその複数が一体として描かれている。崩壊の発生場としての地形的特徴を抽出するのであれば、土砂崩壊地ポリゴンから崩壊地を特定する必要がある。ここでは、ポリゴン境界の最高標高を示す位置を当該土砂崩壊地ポリゴンの崩壊地に相当するとしここでの地形因子を用いた（抽出した土砂崩壊地の個数は、ポリゴン数にほぼ等しい 1,687 個である）。図 7. 7.14 には、図 7. 7.9 と同様に一般セルと崩壊地セルの標高分布を対比示すが、両者の分布形状はほとんど同じである。ただし、図 7. 7.15 に示すように TPI 分布は、一般全セルの分布に対して、ピークがやや右に移行する結果を示した。辛うじて違いが認められたのはこの事例のみであり、他は全ポリゴンと対比とした場合（図 7.7.9, 図 7.7.10, 図 7.7.11, 図 7.7.12）とほぼ同様の分布を示した。図 7. 7.15 のピーク 1m 右移行は、崩壊地の頭部が堆積部を含む土砂崩壊地よりも相対的に高位にあったことを示すので、違いは当然の結果といえる。

このように、抽出された土砂崩壊地の崩壊頭部を特定し、全体の地形因子と対比しても、違いを見出すには至らなかった。

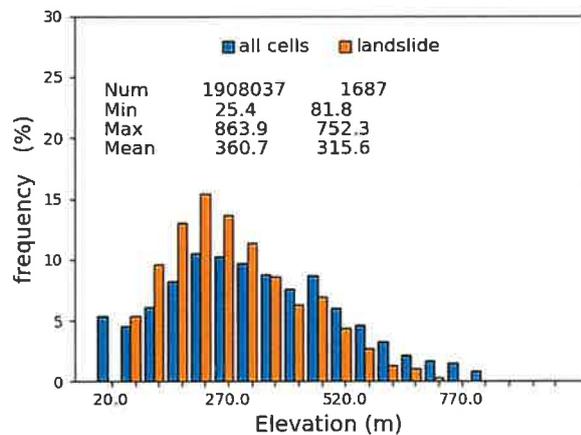


図 7. 7.14 一般セルと崩壊地セルの標高分布の対比

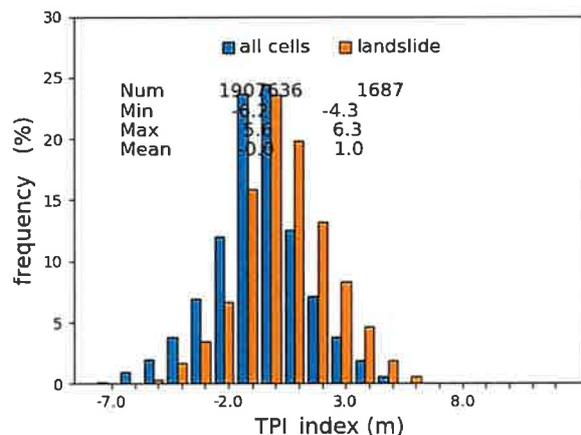


図 7. 7.15 一般セルと崩壊地セルの TPI 分布の対比

(4) 土砂崩壊地の面積、長さ (L)、高さ (H)、L/H 率

「平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」には、ポリゴン境界座標のほかに、土砂崩壊地の面積が整理されている。また、土砂崩壊地ポリゴンにおいて、崩壊土砂はポリゴン領域の最大標高を示す位置から最小位置に移動したと仮定し、2つの標高と位置から水平長 (L) と高さ (H)、また両者から与えられる L/H 率を求めた。なお、各ポリゴンの最大と最小の標高は、境界座標から最近棒のメッシュ座標の標高とした。

図 7. 7.16 には、土砂崩壊地の面積を 1,000m²階でカウントしその頻度分布を示した。これによれば、面積 1,000m²以下で 30%強、面積 2000m²以下のものが約 60%を占め、3000m²まで含めると 70%強を示す。抽出された土砂崩壊地は、長さと同幅が約 50m 以上で複数の崩壊地と堆積地とが一体で抽出されていることから、面積 3000m²としても、多くはその 1/2~1/3 程度と推察され、土砂崩壊地の多くは小規模な表層崩壊と考えられる。ただし、面積 10,000m²の大幅面積を有する崩壊が約 10%、170 個程度存在し、最大は 100,000m²以上を示している。深層型の斜面崩壊の発生も少なくなかったと判断される。

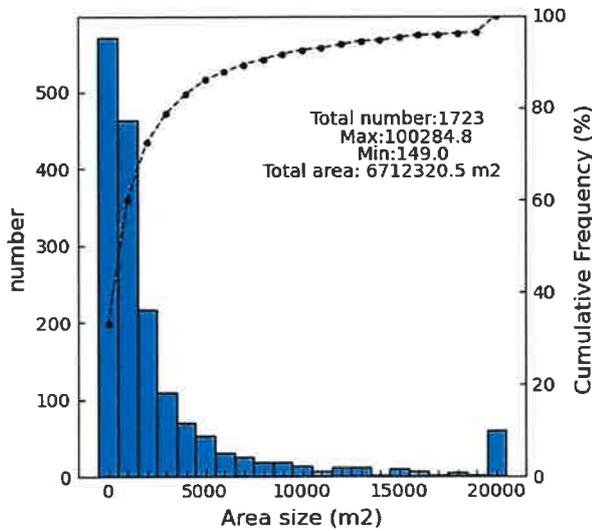


図 7.7.16 土砂崩壊地の面積の頻度分布

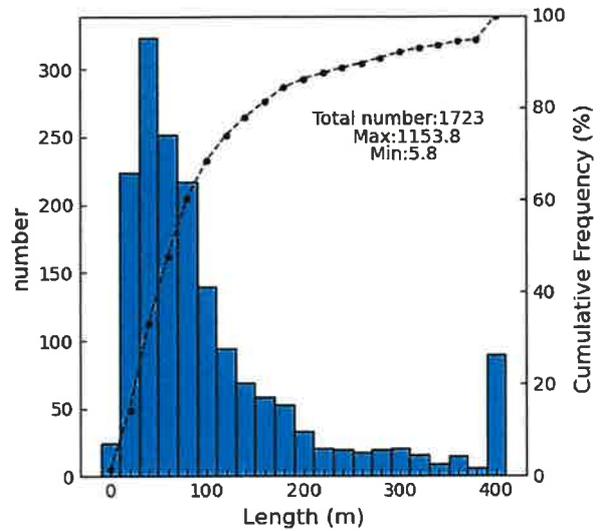


図 7.7.17 土砂崩壊地の水平長さの頻度分布

図 7.7.17 には、土砂崩壊地の水平長さの頻度分布を示した。土砂崩壊地の長さは、滑落・流動方向の水平距離を示し、図 7.7.17 によれば 100m までのものが約 70% を占める。一方、長さ 400m を超えるものも 100 個程度みられ、最長では 1,100m 超のものがある。これは崩壊土砂量の比較的少ない表層崩壊のほか、多量の崩土を伴う斜面崩壊が長距離を流動したケースが相当程度あったことによると判断される。

図 7.7.18 には、高さの頻度分布を示した。土砂崩壊地の高さは、40m が約 50% でピークを示し 60m までのものを含めると約 70%、90m とすると約 90% が含まれる。なお、最大の高さは 326m であった。

図 7.7.19 には、図 7.7.17 に示す長さを図 7.7.18 の高さで割り求めた L/H 率の頻度分布を示した。これは、どの高さを有する土砂崩壊地がどこまで到達したかを示すものである。一般的な崖崩れであればそのほとんどが 2 倍以内となるが、図 7.7.19 にみるように、2.5 倍で約 80% 弱、3.0 倍で約 90% が含まれることがわかる。一般的な崖崩れよりも流動した距離は長い結果を示すが、これは、複数の崩壊地を一体としていることのほか、規模が大きな深層型の崩壊が含まれていることが影響したと判断される。

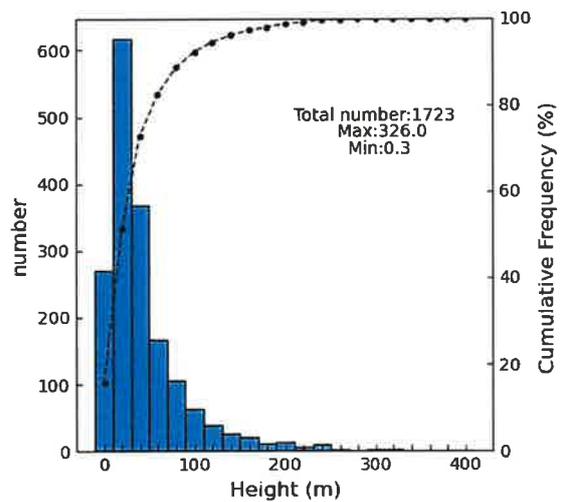


図 7.7.18 土砂崩壊地の高さの頻度分布

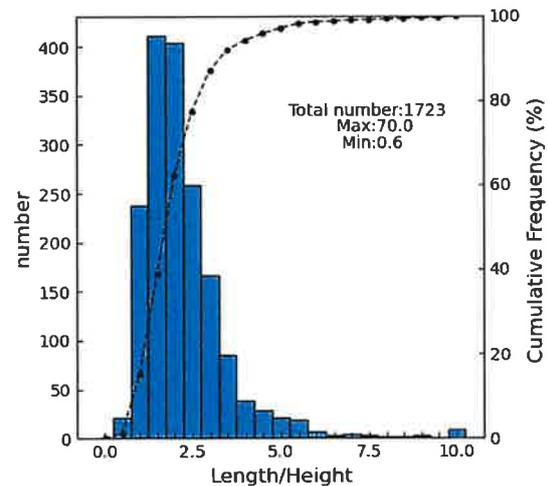


図 7.7.19 土砂崩壊地の長さ/高さ (L/H) の頻度分布

7.7.4 おわりに

1. 九州北部豪雨により甚大な土砂災害を生じた朝倉市の山間部森林域で発生した表層崩壊を対象に、国土地理院が作成した「平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」を用いて、斜面崩壊の規模と発生場に関する特徴把握を行った。その結果を取りまとめると以下のようなものである。
2. 解析領域内には崩壊地が密集する区域（横 10km, 縦 3km）があり、そこでの崩壊面積率は約 16.5%と極めて高く、平均崩壊深を 1m とすれば、約 500 万 m³の土砂生産が見込まれること、また、これを含む解析領域 246.16km²の崩壊面積率は 2.8%を示し、降雨に伴う一般的な崩壊面積率 1%を大きく超えることを示した。
3. 解析領域の地形因子、標高、斜面向き、傾斜、TPI、TRIにおいて、土砂崩壊地とそれ以外の一般斜面でそれぞれの地形因子の頻度分布を対比したところ、両者の違いは見られなかった。斜面崩壊の発生場と密度の違いは、素因である地形ではなく、誘因である降雨によるものと推察される。つまりは、外力である降雨による影響がきわめて大きな土砂災害であったともいえる。
4. 土砂崩壊地の面積、長さ(L)、高さ(H)、L/H 率を調べたところ、土砂崩壊地の面積は、面 1,000m²以下で 30%強、2,000m²以下のものが約 60%を占め、3,000m²まで含めると 70%強を示した。抽出された土砂崩壊地のほとんどは表層崩壊であったことが裏付けされる。土砂崩壊地の水平長さは 100m までのものが約 70%を占め、高さは 60m までのものが約 70%を占めた。また、L/H 率は、2.5 で約 80%弱、3.0 で約 90%が含まれることがわかった。これには、土砂崩壊地の抽出が複数の崩壊地を一体としていること、規模の大きな深層型の崩壊が含まれていることが影響したと思われる。

今回の取りまとめは、「平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」としてデジタル化された土砂崩壊地ポリゴンを使用している。オープンソースとして公開された国土地理院に謝意を表します。

<引用文献>

- 丸谷知己, 海堀正博, 地頭菌, 他 21 名 (2017), 2017 年 7 月の九州北部豪雨による土砂災害, 砂防学会誌, 70(4), 31-42.
- 松浦純正 (2018), 山地斜面の植生と崩壊発生の関係, 2017 年九州北部豪雨災害調査報告書, 京都大学防災研究所, 123.
- 千木良雅弘ら (2018), 斜面崩壊と地質, 2017 年九州北部豪雨災害調査報告書, 京都大学防災研究所, 123.
- 海堀正博ら (2010), 2010 年 7 月 16 日に発生した広島県庄原市の土砂災害の緊急調査報告, 63(4), 30-37

7.8 北九州北部豪雨にともなう斜面崩壊の発生場と規模に関する特徴（土屋 智）

7.8.1 はじめに

平成 29 年 7 月の九州北部豪雨では、福岡県朝倉市、東峰村の山間森林地帯を中心に経験の無い多大な斜面崩壊が発生した。この土砂崩壊地の分布は、国土地理院が作成した「平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」（https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H29hukuoka_oaita-heavyrain.html）に公表されており、その概要は、7.8 節および土屋（2020）に示されたとおりである。本節では、国土地理院の基盤地図情報・数値標高モデル（5m メッシュ）とともに、これらの土砂崩壊地に関わる治山対策に供する基礎情報を取得する目的で、対応が求められる規模と勾配を有する土砂崩壊地の抽出を行い、発生場としての特徴を把握することにした。

7.8.2 土砂崩壊地の面的規模と斜面勾配による区分

（1）面的規模による区分

表層崩壊は、一般的に樹木根系が分布する深さを有する斜面崩壊であるとされている（海堀，2019）。面的な大きさに関する基準は見られないが、多くは幅 10 から 30m，斜面長 10 から 50m 程度であろう。当該域は、マサ土化した花崗岩類や風化の進んだ泥質片岩のほかに、火山性岩という脆弱な地質であり、風化は堆積岩地帯の表層よりも深いと予想される。これらを考慮し、抽出された土砂崩壊地のうち、面積 2,000m² 以下を表層崩壊、それ以上を深層的崩壊と区分することにした。

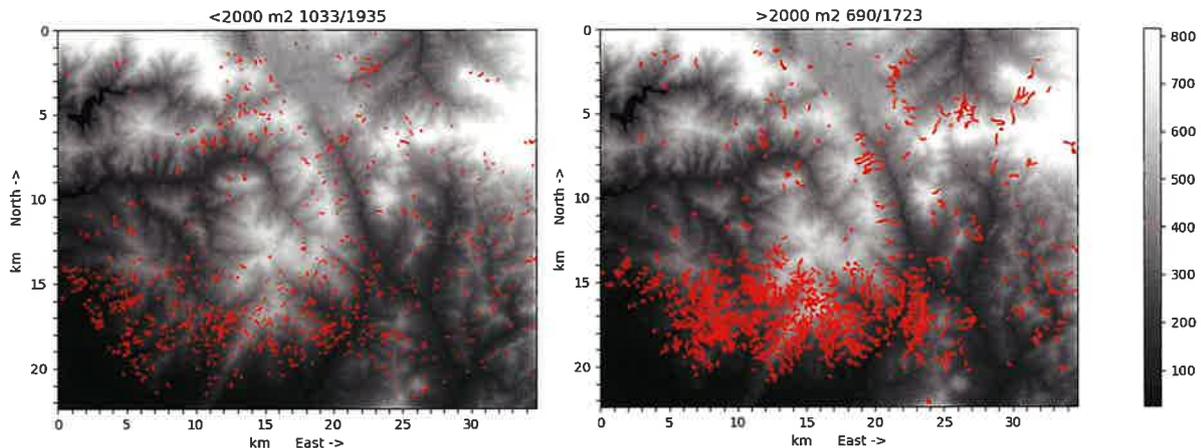


図 7.8.1 面積区分による土砂崩壊地の分布（左：面積 2,000m²以下，右：面積 2,000m²以上）
（国土地理院が作成した「平成 29 年 7 月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」および基盤地図情報・数値標高モデル（5m メッシュ）を使用）

図 7.8.1 には、面積ごとに区分した土砂崩壊地を国土地理院の基盤地図情報・数値標高モデル 5m メッシュのマップ上に示した。土砂崩壊地の面積 2,000m² 以下とした表層崩壊地（図 7.8.1，左）は、対象域の全箇所 1723 個（面積合計，6,712,320m²）のうち 1,033 個（面積合計，1,005,774m²）であり、個数は全数の約 53%と半数以上を示すが、面積は全面積の約 15%を占めるにとどまる。一方、面積 2000m² 以上とした深層的崩壊地は 690 個であるが、土砂崩壊地の全面積の約 85%，5,706,546m²と大部分を占める。

崩壊跡地の復旧にあつては、面積の小さい表層崩壊は自然復旧を期待できる場合が多いことから、

治山対策にあつては、先行的に深層的崩壊地への対策が求められよう。ただし、抽出した深層的崩壊地には、緊急性が高くない比較的緩傾斜なセルを多く含むものもある。したがって効果的な復旧対策には、これらの緩傾斜セルを多く含む土砂崩壊地を除いた残りの深層的崩壊地を対象にすることが適当と思われる。

(2) 斜面勾配による区分

斜面崩壊は、一般に勾配 30 から 40° の範囲で発生頻度が高い傾向にある(松澤ほか, 2015)。当該域の土砂崩壊地斜面の勾配分布は、それよりも緩く 15 から 30° の範囲でその頻度が高い(土屋, 2020)。この勾配は、土砂崩壊地ポリゴンを構成する全点の標高から求めたもので、ポリゴン内部のセル勾配を評価していないので、その影響が表れたかもしれない。

ここでは、土砂崩壊地として平均的な傾斜を与えるため、土砂崩壊地ポリゴンに含まれるセルを対象にある勾配を超えるセルが占める割合を基準に区分することにした。具体的には内部セルのうち、勾配が 20° 以上のセルをカウントし、これが 60%以上であることを基準に区分した(図 7.8.2)。これにより抽出された 20° 以上の土砂崩壊地ポリゴンは、より斜面崩壊地に近く、それ以外であれば崩壊土砂の堆積地に近い特徴を含むと考えられる。

図 7.8.3 に斜面勾配 20° を基準として分類した土砂崩壊地ポリゴンの分布を示す。図 7.8.3 の左図に示す勾配 20° 以下の土砂崩壊地は、180 個で全土砂崩壊地の約 10%、右図の勾配 20% 以上の場合は 1279 個で約 74% を占める。

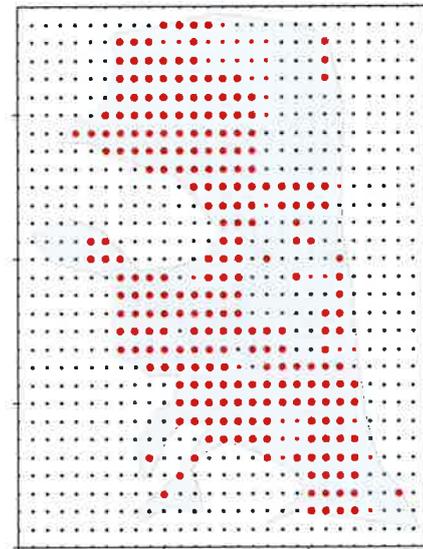


図 7.8.2 土砂崩壊地ポリゴン(灰色)と勾配 20°以上のセル(赤)の例(黒:国土地理院メッシュ標高)

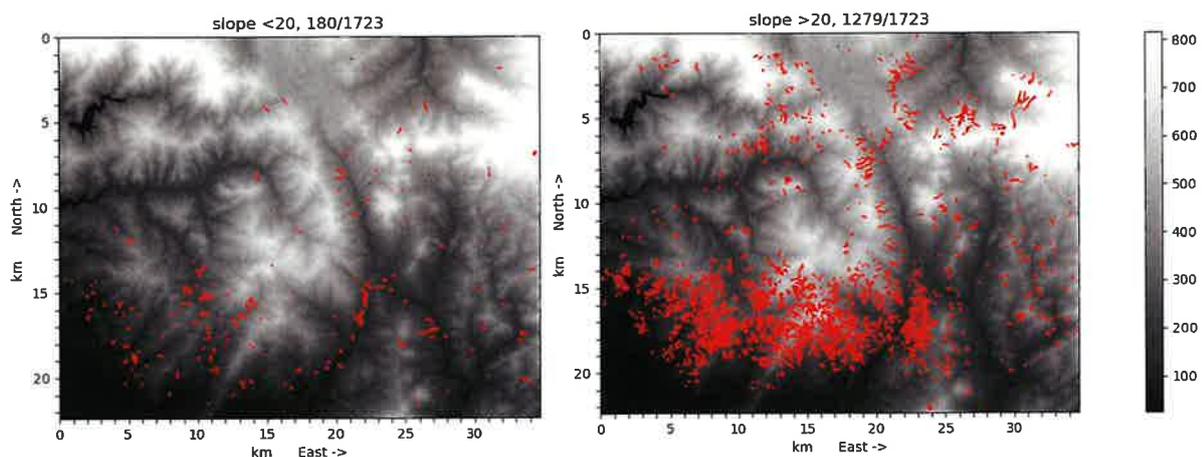


図 7.8.3 斜面勾配区分による土砂崩壊地の分布(左:ポリゴン勾配 20° 以下, 右:ポリゴン勾配 20° 以上)

土砂崩壊地の多くが勾配 20° 以上に分類されることから、土砂崩壊地は緩傾斜な堆積地に近いものではなく崩壊地に近い傾斜を有するものと判断される。なお、両者の合計が対象域内の全土砂崩壊地数に一致しないのは、判定基準の 60% に達しないポリゴンが存在することを意味している。また、勾配 20° 以下の土砂崩壊地は、多くが谷部に近い位置にあり、勾配 20° 以上のものは尾根から山腹に位置する傾向が示される (図 7. 8.3)。

(3) 面積 2,000m² で勾配 20° 以上の土砂崩壊地分布

土砂崩壊地における土砂生産とその移動を考えると、図 7. 8.1 と図 7. 8.3 に示す面積 2,000m² 以上と勾配 20° 以上の基準は、それ以下の場合よりも活発で危険側に認識される。すなわち、治山施設の配備を考える時、面積 2,000m² 以上で勾配 20° 以上の土砂崩壊地が分布する空間エリアの優先度は高いと考えられる。

図 7. 8.4 には、面積 2,000m² 以上でしかも斜面勾配 20° 以上の土砂崩壊地を抽出し、その分布を示した。この条件を満足する土砂崩壊地は、479 個、合計面積は 4,282,152m² となり、面積 2000m² 以上で分類した場合から 211 個、面積で 1,424,394m² 減少する。その結果、図 7. 8.1 よりも集団で群状に分布する傾向がみられ、集中する範囲は概ね 3 つのグループに分類される。グループ 1 は集落に近く、2 は尾根から山腹が主体、3 は山腹から溪流沿いの位置にある。土砂崩壊地の復旧対策は、それぞれのグループが有する位置条件を勘案し適切な施設の整備が必要と考えられる。

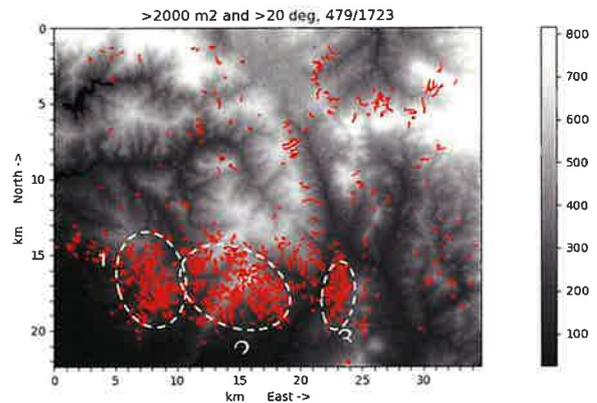


図 7. 8.4 面積 2000m² 以上で斜面勾配 20° 以上の土砂崩壊地分布

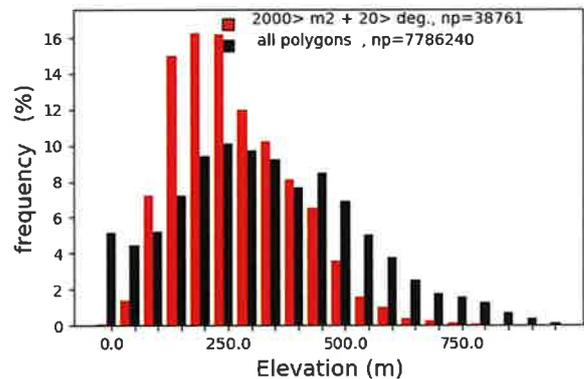


図 7. 8.5 土砂崩壊地と全セルの標高頻度分布

(4) 標高, 勾配, 斜面向きの分布

対策の優先度が高いとされる面積2,000m²以上で勾配20°以上の土砂崩壊地の平面的分布は図7.8.4に示すとおりである。ここでは、この条件下にある土砂崩壊地の標高, 勾配, 斜面向きについて、領域内全セルのそれらと対比して、特徴があるかを検討する。

図7.8.5には標高の頻度分布を対比した。標高の全セル頻度分布は250mを中心に、450m付近でやや大きくなり、その後標高1,000mまで漸減する。これに対して、土砂崩壊地の頻度分布は、標高200から250mの区間で特異的に高く、この区間に約45%が集中するようである。なお、図7.8.4に示す土砂崩壊地が集中する3区は概ねこの標高帯に一致している。

図7.8.6には、勾配の頻度分布を対比した。全セル頻度分布は30から35°を中心にそれ以降は60°まで急激に減少する。土砂崩壊地の頻度分布も全セルの場合とほぼ同型であるが、30から35°がやや突出し、この区間で約30%強を占めていることが特徴的である。

図7.8.7には、斜面方向の頻度分布を対比した。斜面の傾斜方向は、真北を0とし時計方向に360°の範囲に出現する傾斜方向をカウントしている。図に示すように約180°前後の南向き斜面が10%弱で他に比べて多いが、全セルと土砂崩壊地の頻度分布には違いがみられない

(5) それぞれの因子間の対比

図7.8.4に示す面積2,000m²以上で勾配20°以上の土砂崩壊地について、面積, 標高, 傾斜を因子にそれぞれの対比から関係性を見しておくことにする。

図7.8.8には、横軸に標高と縦軸に傾斜をとり、その対比を示す。標高と傾斜は、各土砂崩壊地ポリゴン内のセルの平均値とした。両者の分布には関係性を見いだせず、傾斜20から50°の範囲に、標高とは無関係にプロットされる。当該域では、丘陵域から尾根にかけての広い範囲で発生したことを裏付ける。

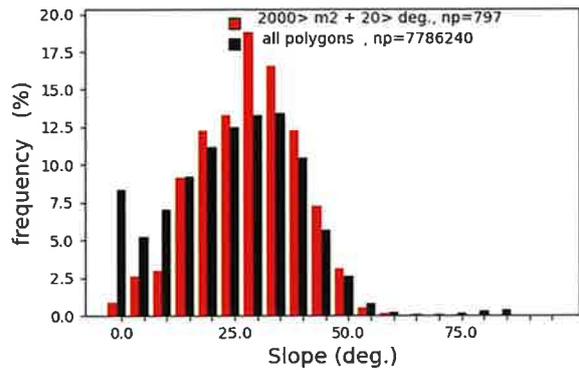


図 7.8.6 土砂崩壊地と全セルの勾配頻度分布

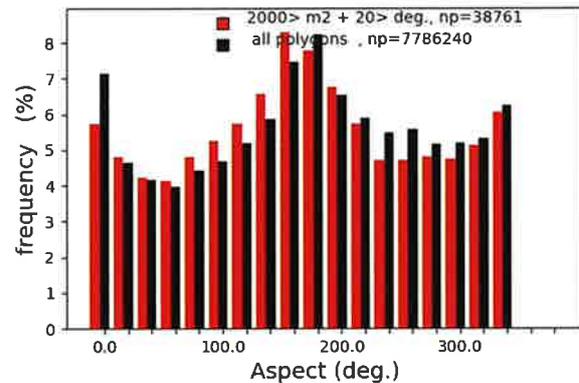


図 7.8.7 土砂崩壊地と全セルの斜面方向頻度分布

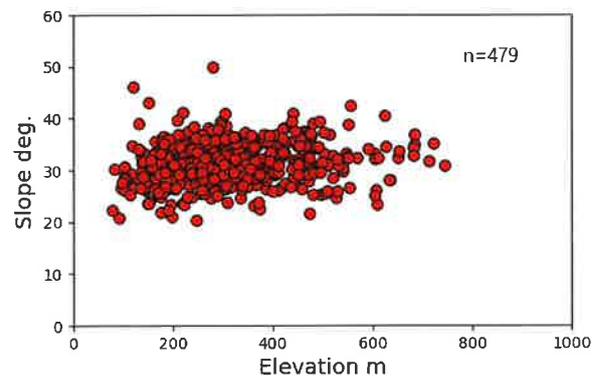


図 7.8.8 抽出した土砂崩壊地の標高と傾斜の対比

図 7.8.9 には、面積と傾斜を対比した。これに見るように面積と傾斜は無関係のように分布する。傾斜が小さくても大きな面積の土砂崩壊地は幾つもカウントされる。傾斜 30° 付近を中心に面積規模に応じた正規分布形状に近い分布を示す。

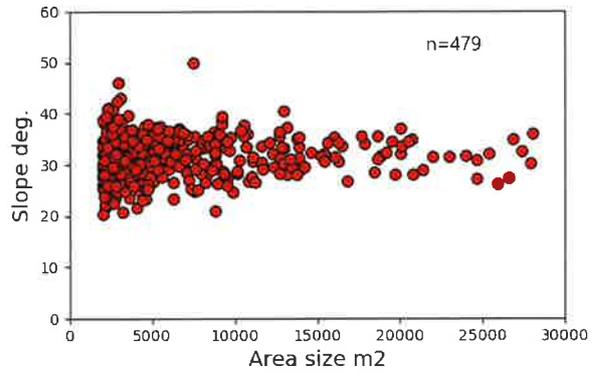


図 7.8.9 抽出した土砂崩壊地の面積と傾斜の対比

図 7.8.10 には、面積と標高を対比した。図 7.8.8, 図 7.8.9 と同様に有意な関係は見いだせない。標高 200 から 400m にかけての丘陵域に多くが分布し、大きな面積の土砂崩壊地もこの標高域に存在していることがわかる。

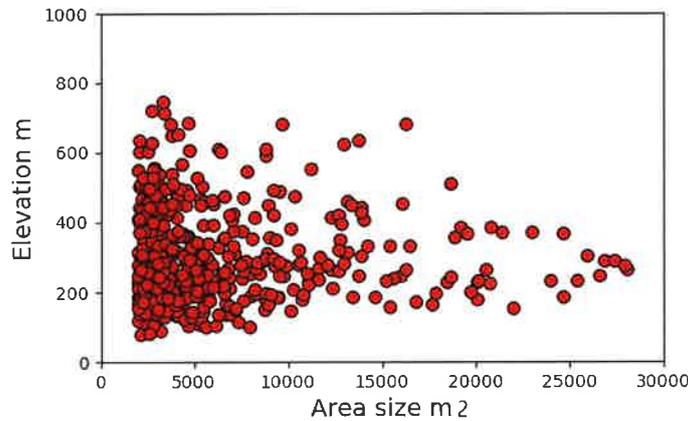


図 7.8.10 抽出した土砂崩壊地の面積と標高の対比

(6) 土砂崩壊地頭部場の特徴

土砂崩壊地の崩壊地としての特徴を把握するため、土砂崩壊地ポリゴンの最高標高を有するセル(図 7.8.11)を代表として、そこでの傾斜、標高、斜面方向の分布を明らかにしておく。

図 7.8.12 には、土砂崩壊地の頭部セルと全セルの標高頻度分布を対比した。図 7.8.4 に示す土砂崩壊地と全セルの標高頻度分布とほぼ同型であり、違いは見いだせない。図 7.8.12 の結果は、土砂崩壊地の崩壊部の結果を示しているため、両者に違いが見られないことは、20° 以上のセルの標高分布に頭部セルの標高が含まれたことによるものと考えられる。

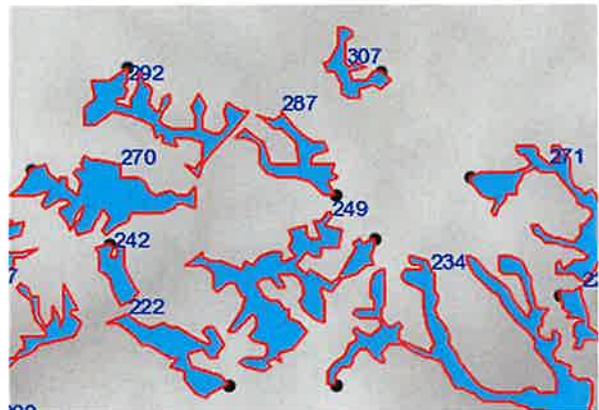


図 7.8.11 土砂崩壊地ポリゴン (数字はポリゴンのナンバー) と最高標高箇所 (黒点)

図 7.8.13 には同様に頭部セルと全セルの勾配頻度分布を対比した。これも土砂崩壊地を対比した図 7.8.6 と同様な分布傾向を示すものの、勾配 25 から 35° の範囲が突出する分布形状を示し、頭

部セル全数の約 67%を占める。図 7.8.6 に示す勾配分布よりも 5° 大きくなったのは、土砂崩壊地の斜面形状が頭部付近で大きくなることを意味している。多くの土砂崩壊地が、緩傾斜の尾根から下降して斜面勾配が大きくなる地点を頭部に発生したことが推察される。

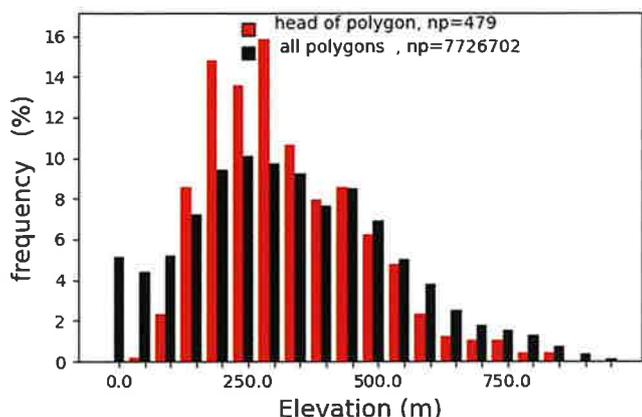


図 7.8.12 土砂崩壊地の頭部セルと全セルの標高頻度分布

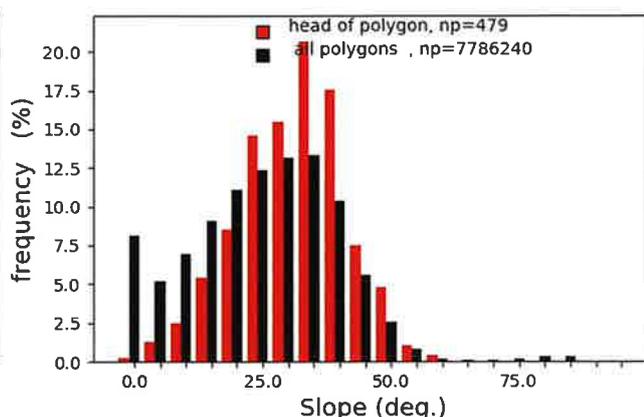


図 7.8.13 土砂崩壊地の頭部セルと全セルの勾配頻度分布

図 7.8.14 には、頭部セルと全セルの斜面方向の頻度分布を対比した。土砂崩壊地の斜面方向分布を対比した図 7.8.7 と同様の分布を示すが、前者が約 180° 前後で大きな数値を示すのに対し、120 から 160°（南南東向きの斜面）で突出する様子が見られる。豪雨が発生した当時、九州北部では対馬海峡付近にあった梅雨前線に向かって南海上の熱帯低気圧などから湿った空気が流入している（福岡管区气象台, 2012）ことから、災害時には南南東斜面により多くの雨が降ったと推察される。これは、斜面崩壊の発生に関して、外力としての豪雨の影響が大きかったことの裏付けに相当するのではないかとと思われる。

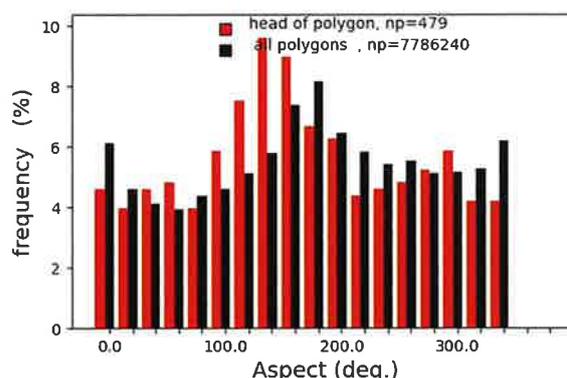


図 7.8.14 土砂崩壊地の頭部セルと全セルの勾配頻度分布

7.8.3 おわりに

平成 29 年 7 月の九州北部豪雨により多大な斜面崩壊が発生した福岡県朝倉市、東峰村の山間森林地帯の土砂斜面崩壊について、面的規模から表層崩壊とそれ以外の深層的崩壊に区分するとともに斜面勾配 20° を基準に急傾斜斜面を有する崩壊地を抽出し、各々の土砂崩壊地の発生場の特徴を示した。過去に経験のない豪雨が引き起こした甚大な斜面災害の大本である斜面崩壊の発生場に焦点をあて、その位置、形態から特徴抽出し、災害を軽減する治山施設の配置や機能強化に供する情報取得も意図したが、これについては、定量的で具体的な情報を得るには至らなかった。

当該域の土砂崩壊地を対象とした治山対策を進めるには、崩壊地の傾斜が大きいこと、自然復旧が

期待できない規模の土砂崩壊地が多く分布する溪流や山腹を対象に施設配備を進めることが望ましい。このことから、土砂崩壊地の面積が 2,000m² で勾配 20° 以上のものを抽出し、位置と形態に関する特徴を示した。さらに土砂崩壊地を形成する崩壊地について、発生場に関する特徴を把握するため、その最高標高セルを抽出し未崩壊地を含む一般セルとの比較対比を行った。これにより、面積 2,000m² 以上で斜面勾配 20°以上の条件を満足する土砂崩壊地について発生場の特徴を取りまとめると以下のようなものである。

- 1) 土砂崩壊地は 479 個、合計面積は 4,282,152m²であった。対象域におけるすべての土砂崩壊地は 1,723 個、面積合計は 6,712,320m²であるから、個数で約 28%、面積で 64%に減少した。治山対策は、これらが分布する流域あるいは山腹から優先的に進めるのが望ましく、空間分布を考慮した適切な施設整備が必要と思われる。
- 2) 土砂崩壊地の標高、勾配、斜面向きの分布は、①標高は 200 から 250mの区間で特異的に高く、この区間に約 45%が集中すること、②勾配は 30 から 35° がやや突出しこの区間で約 30%強を占めること、③斜面向きは北から時計回りに約 180° 前後の南向き斜面が 10%弱で他に比べてやや大きいこと、がわかった。
- 3) 土砂崩壊地の標高、勾配、斜面向きの対比から、標高と勾配、面積と勾配、面積と標高を対比しても有意な関連性は見いだせなかった。
- 4) 土砂崩壊地の頭部の特徴は、①標高の頻度分布は全セルによる分布とほぼ同型であり、違いは見いだせないこと、②勾配の頻度分布では、勾配 25 から 35° の範囲が突出し頭部セル全数の約 67%を占めること、③斜面方向の分布では、北から時計回りに 120 から 160°（南南東向き）の斜面が多くなることがわかった。

<引用文献>

海堀正博（2019）豪雨と土砂災害，砂防学，朝倉書店，178-186

土屋智（2020）豪雨にともなう斜面崩壊の規模と発生場の特徴，森林保全・管理技術研究開発委員会
治山施設部会 令和元年度報告書

福岡管区气象台（2012）災害時自然現象報告書，2012 年第 1 号

松澤真，木下篤彦，高原晃宙，石塚忠範（2015）花崗岩地域における土層構造と表層崩壊形状に与える山地の開析程度の影響，地形，36(1)，23-48

7.9 斜面崩壊の発生と規模に関する変化予測手法の今後の方向性と治山分野での活用

(1) 各種手法の特徴

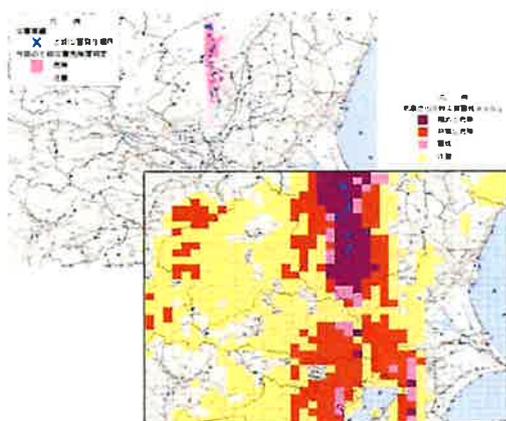
気候変動適応情報プラットフォーム (A-PLAT) のように気候変動に対応した斜面崩壊の予測手法の開発は重要であるが、現在、A-PLAT で採用されている手法は導水勾配と起伏量のみを因子とした簡易な確率モデルによる手法であり、地質も崩積土、新第三系堆積岩、古第三系堆積岩、花崗岩という特徴的な地質のみを識別しているのみである。

確率モデルの特徴として、狭いエリアで作成したモデルは広域に適用した場合の的中率が大きく低下し、広いエリアを対象として作成したモデルは狭いエリアに適用した場合の的中率が大きく低下するという共通の課題がある。

従来から行われている実態調査に基づく分析も、対象地域毎に降雨量と崩壊面積率等の関係が異なることがわかっており、これらの関係を治山分野で活用するためには、それぞれの対象地域毎に実態調査を実施する必要がある。

表 7.9.1 は五十嵐ほか (2017) が現在運用されている土砂災害危険情報サービスの危険予測の精度に関して調べた事例である。土砂災害警戒情報で「極めて危険」と判定されたメッシュの中で実際に土砂災害が発生したメッシュの比率は 0.488%と極めて小さい。残りの 99.5%のメッシュでは土砂災害が発生しなかった。

表 7.9.1 土砂災害危険情報による危険度判定と土砂災害発生の関係 (2015年9月関東・東北豪雨)
(五十嵐ほか, 2017)



土砂災害発生の危険度の高まり	判定メッシュ (M)	発生メッシュ (M)	発生メッシュ率 (R=M/M)	見逃し率 メッシュ数
	メッシュ数	メッシュ数	メッシュ比	
	人口	人口	人口比	
注意	72,179	0	0.000%	0
	3,479,711	0	0.000%	
警戒	56,787	0	0.000%	0
	7,900,827	0	0.000%	
非常に危険	14,123	0	0.000%	0
	1,038,773	0	0.000%	
極めて危険	31,942	156	0.488%	0
	1,275,193	1,243	0.097%	
合計	174,031	156	0.090%	0
	13,774,544	1,243	0.009%	

図 7.9.1 土砂災害警戒情報の事例
(2015年9月関東・東北豪雨)
(五十嵐ほか, 2017)

(2) 今後の方向性と治山分野での活用方法

斜面崩壊の実績から要因等进行分析する手法は各種開発されているが、将来の斜面崩壊発生を予測する手法は、開発途上にあると考える。まずは、地域特性を含めた斜面崩壊の実用的な予測手法を開発する必要がある。その予測手法は森林植生の影響を含めた手法が望ましい。

一方、森林飽和の状態を迎えている中での近年の山腹工は、崩壊が発生した場所の事後対策がメイ

ンであり、斜面崩壊の予測手法を活用することは少ないと考えられる。溪間工については上流部で斜面崩壊が発生し易い場所の流域に優先的に溪間工を配置するなどの、活用が可能である。

<引用文献>

五十嵐孝浩ほか(2017):土砂災害危険情報サービスによる判定結果と土砂災害発生実績の比較検討,
土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.73, No.4, I_1363- I_1368.

8. 土砂・流木の流出形態の変化予測とその対応

8.1 流木量の予測に関する既往の方法

林野庁（2018）の土石流・流木対策指針解説では、流木量の算出時の参考資料として以下の図 8.1.1 や図 8.1.2 の関係図を示している。これらの関係図は石川ほか（1989）や石川（1989）などの研究成果が元となっている。この2つの関係図は流域面積と流木流出率や発生流木幹材積の関係は、災害事例毎に異なることを示しており、気候変動の影響で将来の降雨量や降雨パターンが異なると、これらの関係が変化する可能性を示している。

	施設	災害名	平均径
●	無	昭和57年 長崎災害(3渓流)	10cm以上
○	有	昭和62年 山形災害(4渓流)	10cm以上
○	有	昭和63年 広島災害(7渓流)	10cm以上
△	有	同上(6渓流)	10cm未満
○	無	同上(3渓流)	10cm以上
△	無	同上(4渓流)	10cm未満

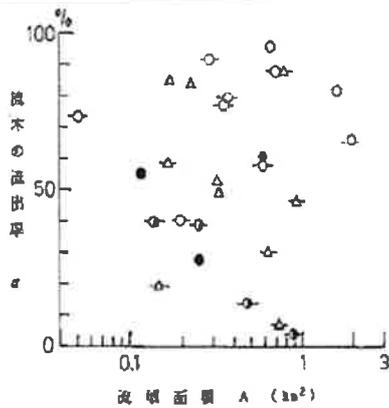


図-5 流域面積と流木の流出率

(出典)：砂防学会誌 Vol. 42 No3 1989 を一部修正

図 8.1.1 林野庁（2018）が採用している流域面積と流木の流出率の関係図（石川ほか，1989）

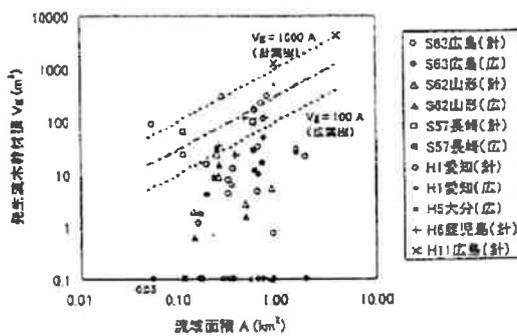


図-7 流域面積と発生流木幹材積

(出典)：流木対策指針（案）計画編 建設省砂防部砂防課 H12.7

図 8.1.2 林野庁（2018）が採用している流域面積と発生流木幹材積の関係図（建設省，2000）

<引用文献>

林野庁（2018）：土石流・流木対策指針解説

石川芳治・水山高久・福沢誠（1989）：土石流に伴う流木の発生および流下気候，新砂防，Vol.42，
No.3, pp.4-10.

石川芳治（1989）：山地小渓流からの流木を伴う土砂流出による災害に関する研究，京都大学博士論文

建設省（2000）：流木対策指針（案）計画編

8.2 日本の森林における森林蓄積と木材供給量、年齢構成の推移

図 4.8.1 では、平成 24 年までの森林蓄財の推移を示したが、平成 29 年 3 月末の状況を林野庁（2017）の資料から紹介する（図 8.2.1）。図 8.2.2 と図 8.2.3 は年齢構成であるが、人工林は 11 齢級（55 年未満）にピークがあり、天然林は 13 齢級（65 年未満）にピークがある。林野庁（2007）の調査結果からそれぞれのピーク年齢が 2 つ移動しており、図 8.2.4 は木材自給材積と木材自給率の推移である（林野庁，2018）。国産材の自給も若干増加傾向にあるが、人工林の材積はそれ以上に年々増加している。

林野庁のこの調査の主要部分は都道府県の森林簿等のデータをもとに林野庁が集計したもので、現地調査をすることなく、収穫予想表等を使って経年変化を反映させたものである。しかしながら、最近の研究（資源調査を反映したもの）では、森林資源の蓄積、成長量（炭素吸収量）が林野庁の森林資源調査の倍程度となるとの報告もある（江草ほか，2020a，2020b）。理由は、老齢木は成長しないというデータに基づいた古い収穫予想表を使っていること、温暖化で樹木の生長が進んでいることなどとされている（図 8.2.4 参照）。増加した人工林が流木の供給源となる可能性がある。

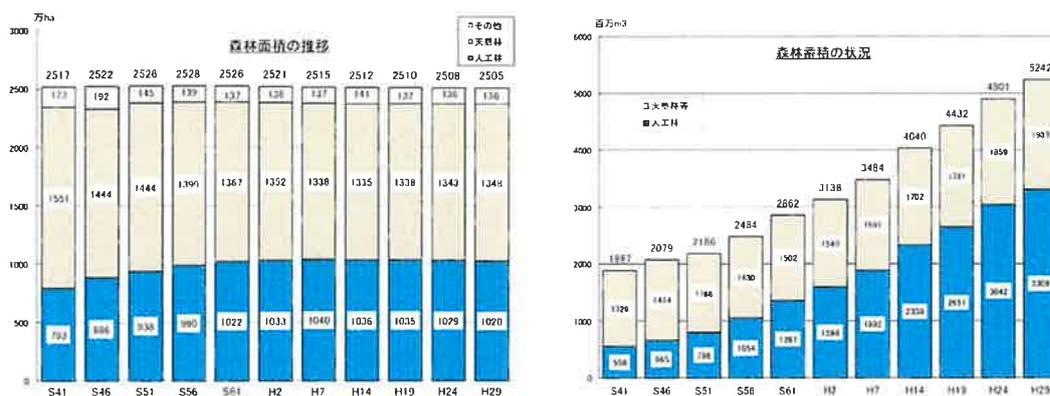


図 8.2.1 森林面積の推移 (左) と森林蓄財の推移 (右) (林野庁，2017)

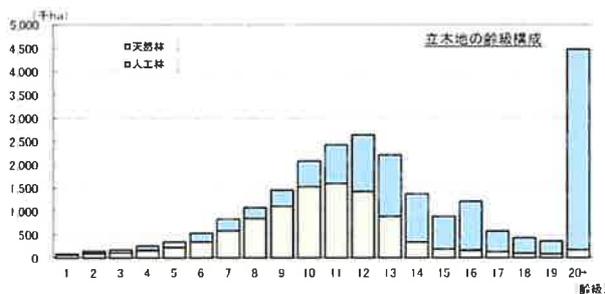


図 8.2.2 立木地の年齢構成 (林野庁，2017)

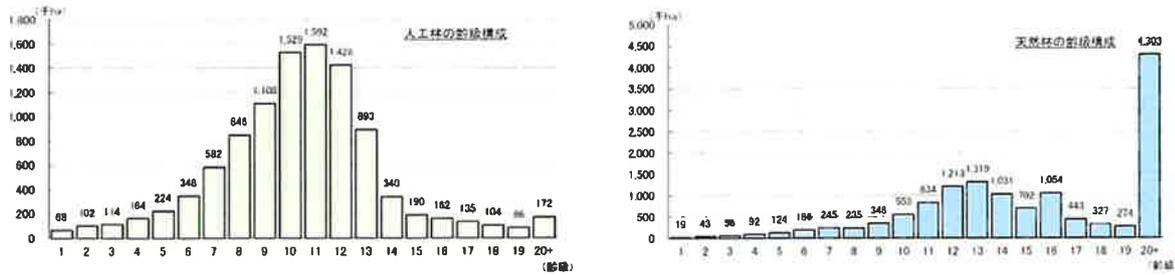


図 8.2.3 人工林と天然林の齢級構成 (林野庁, 2017)

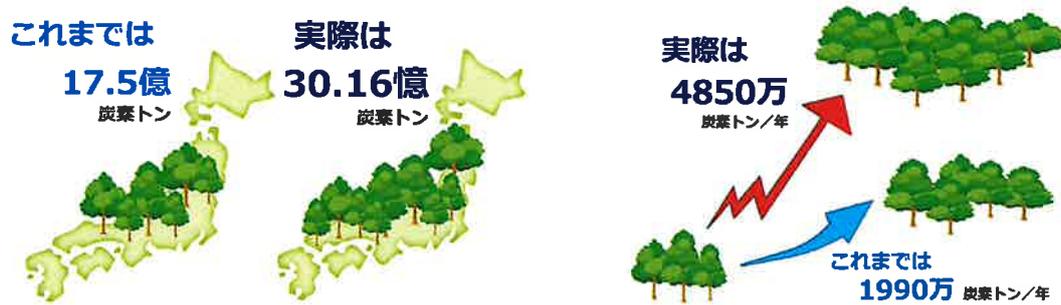


図 8.2.4 森林炭素蓄積量 (炭素換算) (左) と年あたりの森林炭素吸収速度(炭素換算) (右) (江草ほか, 2020)

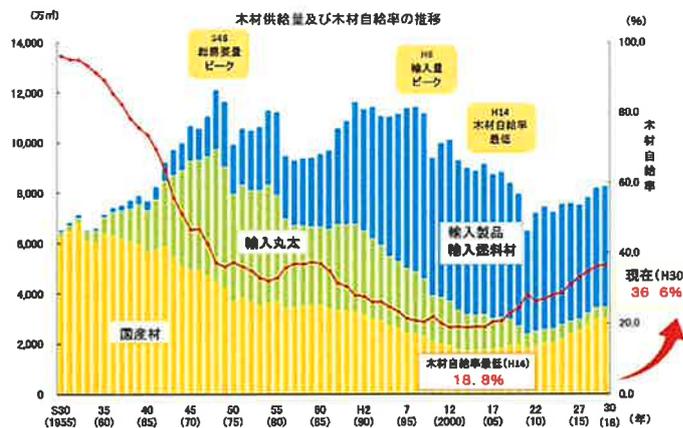


図 8.2.5 木材自給材積と木材自給率の推移 (林野庁, 2018)

<引用文献>

林野庁 (2007) : 森林資源の現況 (平成 19 年 3 月 31 日現在)

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h19/2.html> (2020/7/16 参照)

林野庁 (2017) : 森林資源の現況 (平成 29 年 3 月 31 日現在)

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h29/2.html> (2020/7/16 参照)

林野庁 (2018) : 平成 30 年度木材需給表

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/press/kikaku/190927.html> (2020/7/16 参照)

江草智弘・熊谷朝臣・白石則彦 (2020) : 日本の森林の炭素貯留能力は本当はムチャクチャすごかつ

た!,日本の研究.com (<https://research-er.jp/articles/view/89414> 2020/7/17 参照)

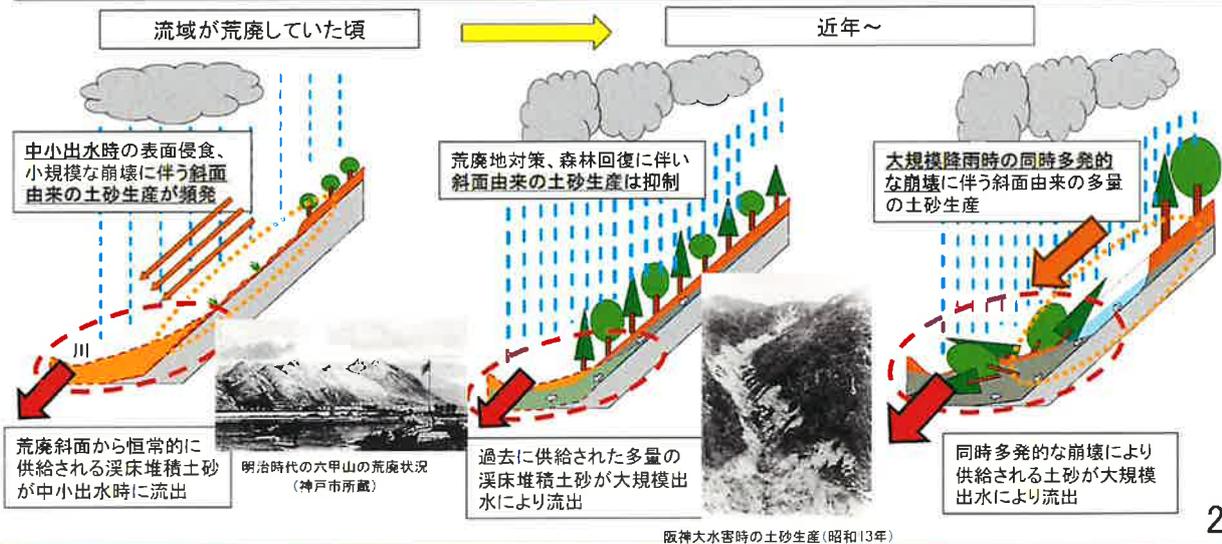
Tomohiro Egusa, Tomo'omi Kumagai, Norihiko Shiraishi(2020): Carbon stock in Japanese forests has been greatly underestimated, Scientific Reports, natureresearch

8.3 砂防分野での気候変動対応の方向性

令和元年度から、国土交通省は「気候変動を踏まえた砂防技術検討会」を主催し、気候変動に伴い地域毎に顕在化の懸念される土砂移動現象及び砂防計画に必要な関係諸量（土砂量等）の評価手法の高度化等の技術的な検討を行っている。

過去に生じた土砂災害とそれを引き起こした降雨パターンの分析において留意すべき事項（森林状況の変化と土砂生産形態の変化（イメージ））

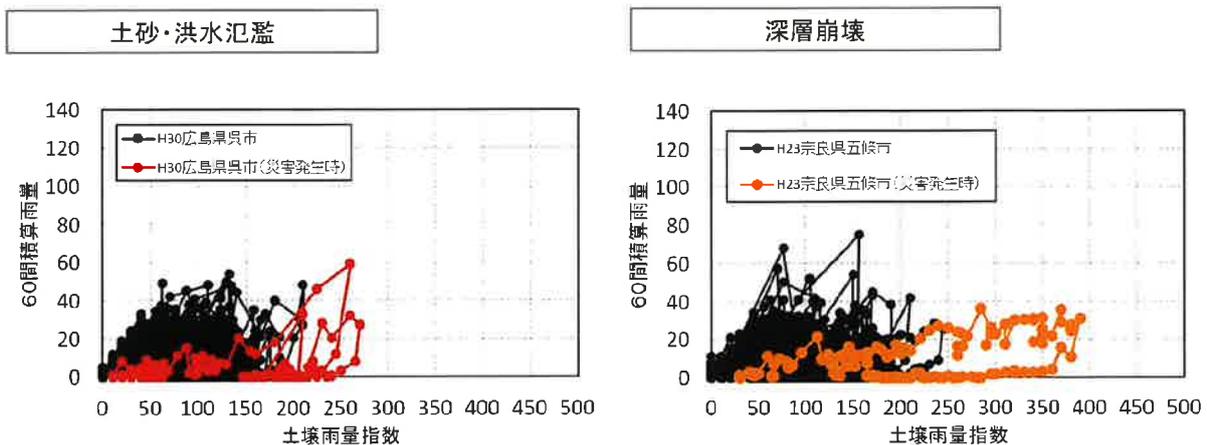
- 流域が荒廃していた頃においては、恒常的に溪床に生産される土砂が中小出水により土砂流出が頻発。
- 荒廃からの回復に伴い斜面からの土砂供給は抑制されたが、過去に生産された溪床堆積土砂が大規模な出水により流出。
- 近年においては、大規模な降雨に伴い同時多発する崩壊により供給される多量の生産土砂が、大規模な出水により流出。
- 既往災害実績を用いた分析にあたり、流域状況の変化に留意する必要。



2

土砂移動現象と降雨特性の分析の方向性（分析①）

- 将来想定される降雨の特性（降雨パターン）から、当該地域において顕在化・増加の恐れのある土砂移動現象を推定できないか。
- 降雨パターンの評価は、例えば、発生・非発生の分離性の高い降雨指標として、土壌雨量指数と60分積算雨量の組み合わせによる「スネークラインの形状」を活用し、それとどのような土砂移動現象との関連性が高いのかを整理できないか。
- さらには、それら土砂移動現象と関連性の高い素因（地形・地質等）との関連性も整理できないか

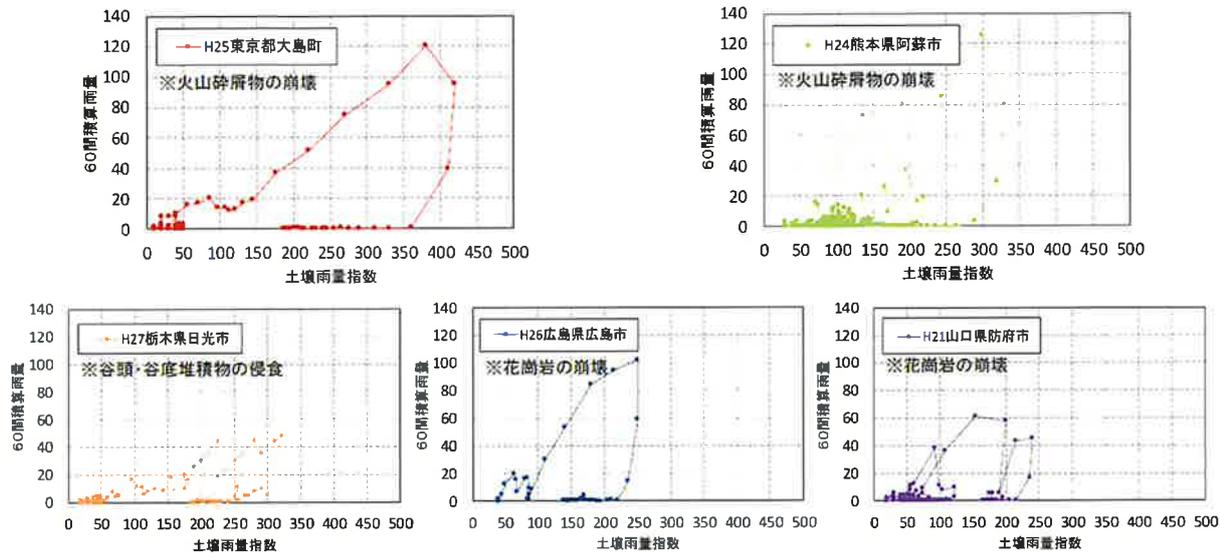


3

土砂移動現象と降雨特性の分析の方向性

- 表層崩壊・土石流が同時多発した災害のスネークラインについて、60分間積算雨量(短期降雨指標)が大きいもしくは比較的大きい形状であることがうかがえる。

表層崩壊・土石流

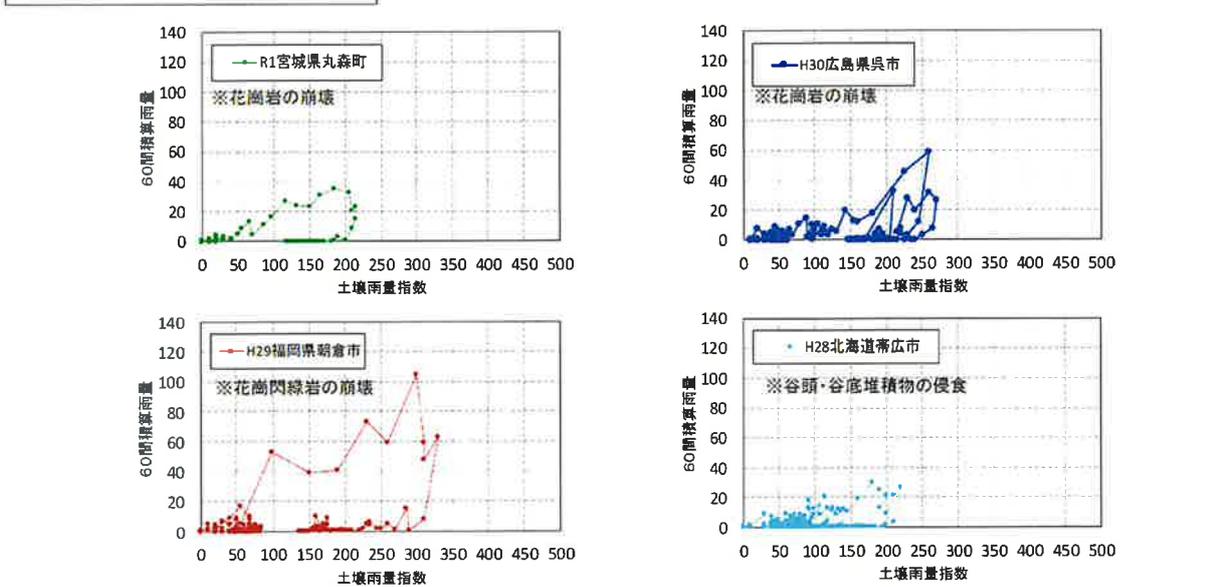


4

土砂移動現象と降雨特性の分析の方向性

- 土砂・洪水氾濫の発生した災害のスネークラインについて、土壌雨量指数(長期降雨指標)が大きいもしくは比較的大きい形状であることがうかがえる。

土砂・洪水氾濫

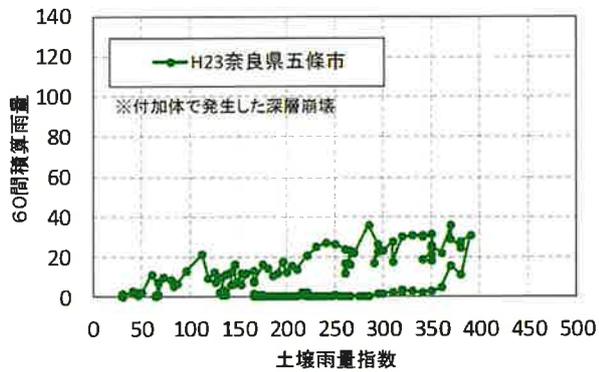


5

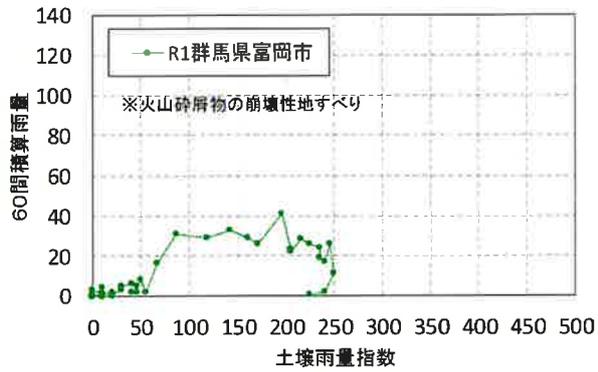
土砂移動現象と降雨特性の分析の方向性

- 深層崩壊の発生した災害のスネークラインについて、土壌雨量指数(長期降雨指標)が極めて大きい形状であることがうかがえる。

深層崩壊



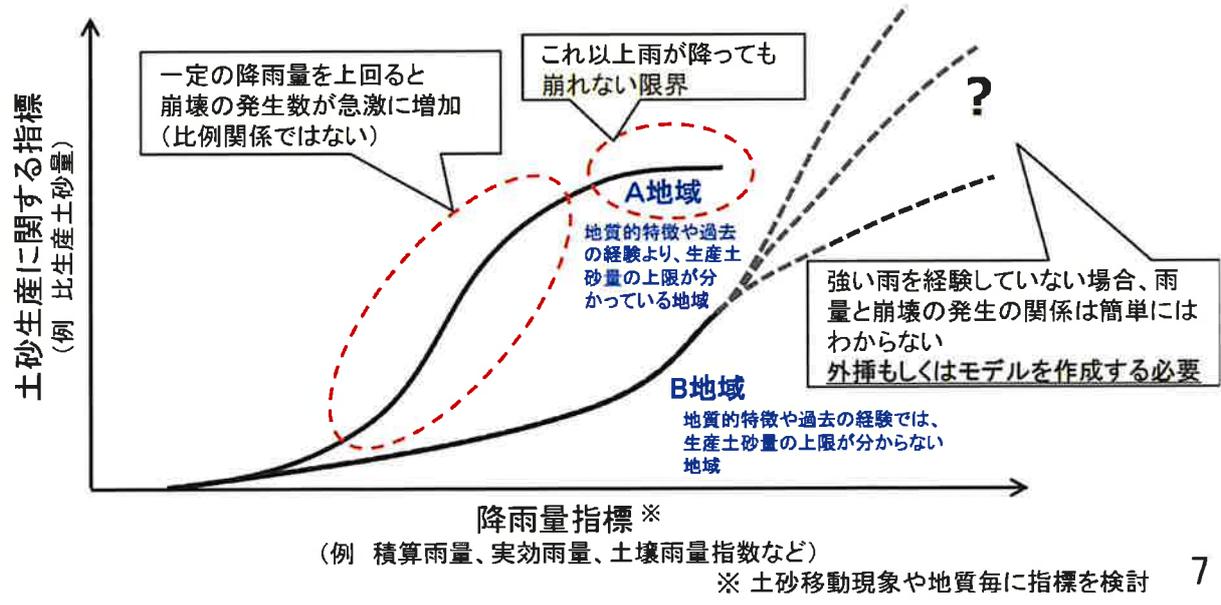
崩壊性地すべり



6

既往土砂災害とそれを引き起こした降雨特性との関係整理(分析②)

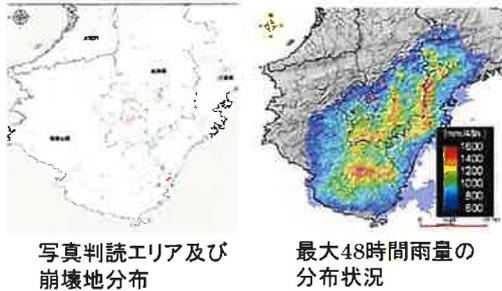
- 既往土砂災害の実績から、降雨量指標と土砂生産量(崩壊土砂量)との関連性について整理し、将来起こりえる降雨に回答する土砂生産量について推定できないか。
- 経験を超える降雨量に対する土砂生産量について、外挿手法やモデルによる解析的手法等によって検討できないか。



7

(既往分析例) 既往土砂災害とそれを引き起こした降雨特性との関係整理

- 平成23年台風12号の事例について内田ら(2012)により降雨量と斜面崩壊の密度の関係について分析。
- 降雨量の増大に伴い非線形的に相対的な崩壊密度が増大(単純な比例関係ではない)
- 各地域において降雨量と斜面崩壊の密度の関係について同様に整理できる可能性



$$\text{相対的な崩壊密度} = \frac{n(r)}{a(r)} \div \frac{N}{A}$$

$n(r)$ …ある雨量(r)の領域に属する崩壊地の数
 $a(r)$ …雨量 r の領域の面積
 N …全調査対象領域の崩壊地数
 A …全調査対象面積

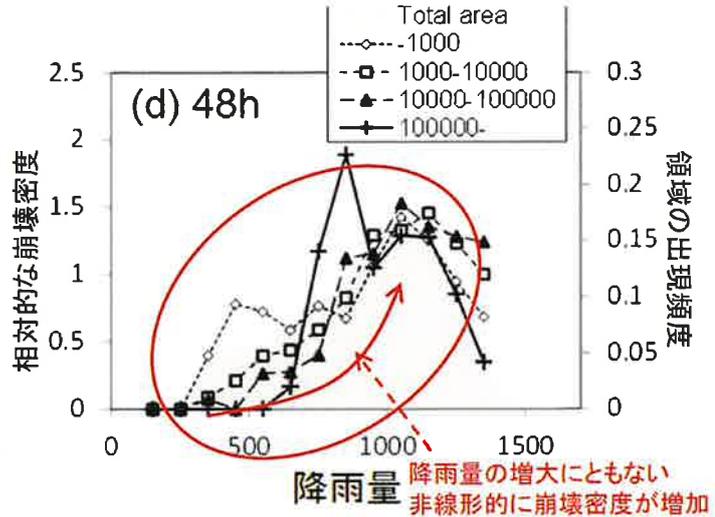
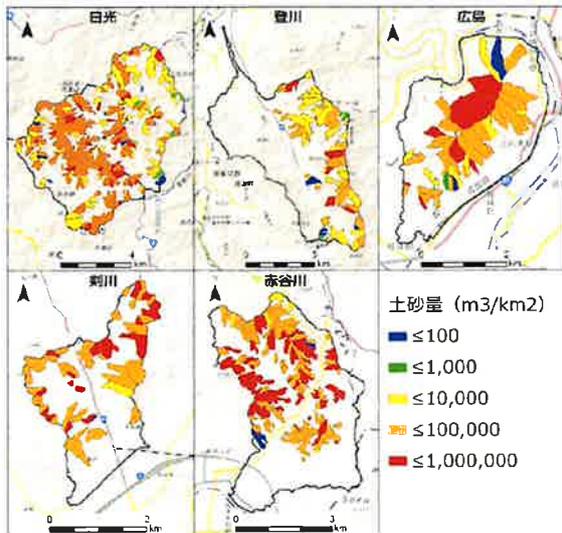


図 2011年紀伊半島大水害の例における最大48時間雨量と斜面崩壊の相対的な崩壊密度の関係、凡例の数字は崩壊土砂量(m³)
 内田ら(2012)

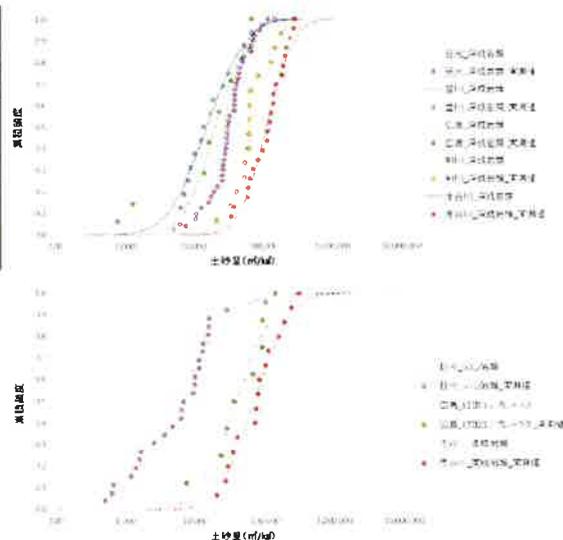
8

(既往分析例) 生産土砂量の実態把握に関する既往研究例

- 流出土砂量の空間分布様式の出現頻度は対数正規分布で表現可能であると考えられ、流出土砂量の不確実性は対数正規分布を用いて評価できる可能性がある。



比生産土砂量の空間分布



比生産土砂量の累積頻度分布

対馬・内田(2019):土木技術資料

9

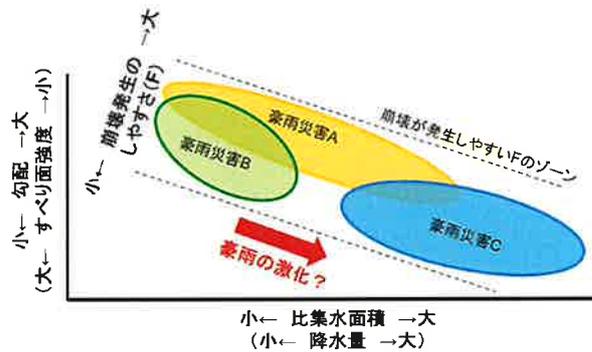
勾配が緩い斜面でも崩壊が発生する条件の検討について(分析③)

- 既往の豪雨災害の崩壊発生条件について、データが得やすい地形的要因による比較ができないか。
- 例えば、羽田野が提案した地形的滑動力示数を用いることで、降水量の増加が緩い勾配での崩壊につながることを示せないか。

- ・ 崩壊の発生しやすさを地形的要因で表現した指標の一つに、羽田野が提案した地形的滑動力示数がある。

地形的滑動力示数 $F = \tan\theta \times a^{1/3}$

比集水面積の大きな斜面では緩い勾配でも崩壊し、
比集水面積の小さな斜面では急な勾配でしか崩壊しにくい。



10

課題と論点

- 【課題と論点】
- 気候変動を踏まえた土砂災害対策を講じる上では、どのような土砂移動現象が、いつ、どこで発生し、その影響範囲がどの程度であるかを評価することが重要であるが、現状における対策や研究水準を踏まえ、優先的に検討すべき技術的課題は何か。
 - 土砂移動現象に対する気候変動の影響を評価するにあたり、各土砂移動現象と降雨パターンとの関係を分析するにあたっての留意事項。
 - ・ 降雨指標の観点
 - ・ 地質等の分類
 - ・ 森林状況などの影響 等
 - 気候変動(降雨特性の変化)による土砂移動現象の変化をどのように評価するか。
 - ・ どのような土砂移動現象がどのような地域で顕在化・増加するか
 - ・ 計画・設計上の外力はどのように変化するか 等

11

<引用文献>

国土交通省 (2020a) : 「気候変動を踏まえた砂防技術検討会」 第1回検討会 (2020/1/8) 資料6

国土交通省 (2020b) : 「気候変動を踏まえた砂防技術検討会」 第2回検討会 (2020/5/21) 資料4

8.4 国土交通省の水災害対策検討小委員会の答申

国土交通省（2020c）は気候変動を踏まえた流域治水対策の答申として以下の内容を示している。

● 気候変動を踏まえた新しい水災害対策の方向性

1. 水災害対策を過去の現象から気候変動を考慮したものへ転換

治水計画を「過去の降雨実績に基づくもの」から「気候変動による降雨量の増加などを考慮したもの」に見直し

2. 「流域治水」への転換

河川、下水道等の管理者が主体となって行う従来の治水対策に加え、集水域と河川区域のみならず、氾濫域も含めて一つの流域として捉え、その河川の流域全体のあらゆる関係者がさらに協働して流域全体で水害を軽減させる治水対策、「流域治水」への転換を進めていくことが必要。

すなわち、流域におけるあらゆる主体の参画のもと、地域の特性に応じ、

- ① なるべく氾濫を防げるよう治水施設の整備等を進めることに加え【氾濫を防ぐための対策(ハザードへの対応)】
- ② 治水施設の能力を上回る大洪水の発生により、氾濫した場合を想定して被害を回避するためのまちづくりや住まい方の工夫等の対策【被害対象を減少させるための対策(暴露への対応)】
- ③ 氾濫の発生に際し、的確・適切に避難できるようにするための体制の充実といった被害軽減のための対策と、被災地における早期の復旧・復興のための対策【被害の軽減・早期復旧・復興のための対策(脆弱性への対応)】

の3要素を多層的に進める「流域治水」に流域一体となって取り組むべき。

これまで、都市部の河川流域を対象に実施している「総合治水対策」の概念を、地方部を含む全国の河川に拡大し、都市化による流出量の増大への対策にとどまらず、様々な主体の協働（参画）により、更なる流出抑制対策を推進。

（事前防災の加速）

□ 現在計画している治水対策を加速化するとともに、事前防災対策の事業メニューを追加し、計画的に実施。

（社会における防災の視点の一般化）

□ 行政機関、民間企業、国民一人ひとりが、意識・行動・仕組みに防災・減災を考慮することが当たり前となる社会を目指す。

● 気候変動を踏まえた新しい水災害対策の具体策

1. 治水計画等の見直し

- 河川整備基本方針の基本高水の見直し 等
- 河川整備計画の目標流量の見直し 等
- 海岸保全基本方針等の見直し 等
- 施設の機能や安全性の確保のため、設計基準等を見直し 等
- 海岸防護の基準となる外力や設計基準等を見直し 等

2. 「流域治水への転換」

2-1-1 氾濫をできるだけ防ぐための対策 ～ハザードの対応～

【氾濫水を減らす】

- 越流・越波した場合でも決壊しにくい「粘り強い堤防」を目指した堤防の強化を実施
- 更なる堤防の強化に向け、継続的に検討や技術開発を推進。
- 水害・土砂災害リスクの低い地域へ居住や都市機能を誘導した区域や、地域における災害時の防災拠点となる区域等について、優先的に浸水対策等を実施し保全を図る。
- 地域の水防力の維持・高度化に向けた新技術の活用及び水防体制の強化。

【流水をためる】

- 利水ダムを含む既存ダムの洪水調節機能の強化
(「事前放流」を本格化、予測精度向上等に向けた技術・システム開発)
- 霞堤等の保全・整備により遊水・排水機能を保全
(開発抑制のために区域(災害危険区域等)の指定を推進)
- 霞堤や越流堤等の河川の構造の工夫、土地利用の誘導・規制にあり方等について、地域と連携

【雨水を流域のあらゆる場所でためる】

- 都市部等の内水対策
(既存の下水管路網に雨水貯留機能がある雨水調整池や地下空間を活用した大規模な貯留施設等の整備、民間事業者等の協力による雨水貯留施設等の整備)
- 流出抑制対策の充実とその全国展開
(都市部に加えて、地方部の河川流域においても流出抑制対策を推進、開発に伴い低下する雨水浸透貯留機能を補う以上の流出抑制対策、ため池・田んぼ・耕作放棄地等の既存ストックに貯留機能を活用)
- 流域の様々な主体の協力の効果の見える化・計画への反映の推進

2-1-2 被害対象を減少させるための対策 ～暴露への対応～

【土地の水災害リスク情報の充実】

- 浸水想定区域の早期指定を進めるとともに、指定対象外である中小河川、海岸、下水道等の水災害リスクの速やかな公表に努める。
- 想定最大クラスの規模以外に、高頻度の洪水や河川整備後の多段階の浸水想定図等を公表
- 土砂災害警戒区域等の早期指定を進めるとともに、今後の基礎調査（区域の抽出）においては、より高精度な地形データを用いて抽出精度を向上。
- これらの水災害リスク情報を関係者間でリスクコミュニケーションを図り、まちづくりや住まい方の工夫に活用

【水災害リスクがより低い区域への誘導, 住まい方の工夫】

- 水災害リスクが高い区域における開発抑制の強化・よりリスクの低い地域への誘導策の推進
- 水害リスクを踏まえた住まい方の工夫のための情報提供
- 金融・保険業界に対し、水害リスク情報やその回避・回避軽減のための様々の取り組みについて情報提供
- 災害等を期に将来的な地区のあり方について調整を進め、場合によっては、インフラの整備や本格復旧を図るのではなく、地域住民の近傍の地域拠点等へ移転を促進し、持続可能なまちづくりを行う

【浸水範囲を限定, 氾濫水を制御】

- 家屋等の被害範囲を限定するために二線堤の整備や自然堤防の保全を推進
- 二線堤や自然堤防等の活用による、氾濫拡大の抑制のための水流の制御

2-1-3 被害の軽減・早期復旧・復興のための対策 ～脆弱性への対応～

【土地の水災害リスク情報の充実】

- 浸水想定区域の早期指定を進めるとともに、指定対象外である中小河川、海岸、下水道等の水災害リスクの速やかな公表に努める。
- 避難のために活用されてきた水災害リスク情報を充実させ、経済被害を軽減する取組にも活用
- 社会全体で浸水対策を取組むことにより、水災害に対してレジリエンス力を高めることで持続可能な社会が形成

【住民の円滑な避難行動を実現する対策】

- 各地区主体で共助の力や情報通信技術を活用
- 住民の避難行動につながるよう情報の充実や表現の工夫
- 予測精度の向上、解析手法の高度化により、長期予測を実施
- 民間ビル等の避難施設の活用
- 中小河川も含めた水系一貫の洪水予測や高潮等の予測

【経済被害を軽減する】

- 民間企業地域経済を支える社会インフラが一体となって水災害に対する強靱性を強化

【関係者と連携した早期復旧・復興の取組み】

- 人工衛星、センサー、AI 等を活用した、広域的な被災情報を迅速に取得
- 重要な施設については、浸水してもその機能の維持・継続が可能となるよう耐水化を実施
- 既存（の排水）施設を活用した氾濫水の排水により、流域全体で浸水の早期解消の推進
- TEC-FORECE をはじめとした国による市町村等の災害応急対策への支援の拡大
- 民間企業の協力強化により、官民が一体となった TEC-FORCE の推進
- 金融業界とも連携し、リスクに応じた水害保険などを充実
- 水防活動の強化

2-2 事前防災の加速

- 流域治水の考え方は、令和元年東日本台風で被災した 7 水系で大規模災害からの復旧・復興のためにとりまとめられた概ね 5～10 年の「緊急治水対策プロジェクト」においてある程度具現化されている。7 水系以外の一級水系においても緊急的に実施すべき流域治水を示し、それに基づき事前防災対策を加速していく

2-3 社会全体で防災・減災の仕組みの導入充実

（「流域治水」を流域全体で横断的に取組む施策）

- 進展する情報通信技術を社会実装し、これらの技術を避難行動の支援や防災施策にも活用していく
（水災害に関するデータ、情報通信技術、予測技術を統合化・融合化し、これらを流域のあらゆる主体と共有することにより各主体の浸水対策などの取組を支援していく）
- 社会における防災の主流化を目指す
（行政機関、民間企業、国民一人ひとりが、意識・行動・仕組みに防災・減災を考慮することが当たり前となる社会を目指す）
- 自然環境の持つ防災・減災機能をはじめとする多様な機能を活かす「グリーンインフラ」としての効果が発揮されるよう考慮しつつ取組みを推進する

● 速やかに実施すべき施策

(将来の気候変動を踏まえた計画・設計基準に見直し)

- 河川整備計画の目標流量の見直し 等
- 海岸管理者と連携し、必要に応じ、出発水位を見直し
- リスク評価結果を踏まえた下水道における中長期的な整備方針の設定推進
- 施設の機能や安全性の確保のため、設計基準等を見直し

(事前防災の加速)

- 一級水系を対象に緊急的に実施すべき流域治水を示し、事前防災対策を加速

(さらなる堤防強化)

- 越流・越波した場合でも決壊しにくい「粘り強い堤防」を目指した堤防の強化を実施

(企業等の様々な関係者の参画)

- 利水ダムを含む既存ダムの洪水調節機能の強化
- 流出抑制対策の充実とその全国展開

(土地のリスク情報を充実)

- 浸水想定区域の早期指定を進めるとともに、指定対象外の中小河川、海岸、下水道の水災害リスクを速やかに公表し、避難、まちづくり、住まい方、浸水対策に活用

(まちづくり, 住まい方の工夫)

- 水災害リスクが高い区域における開発抑制の強化・よりリスクの低い地域への誘導策の推進
- 水害リスクを踏まえた住まい方の工夫のための情報提供
- 治水事業と住まい方との連携の強化

(避難態勢の強化)

- 地区ごとで個人の防災計画を作成、防災情報の充実や表現の工夫
- 民間ビル等の避難施設の活用

<引用文献>

国土交通省 (2020c) : 「気候変動を踏まえた水災害対策小検討会」第4回検討会資料6

8.5 社会資本審議会（2017）の土砂災害対策への答申

5.3 土砂災害に対する適応策

（気候変動の土砂災害への影響）

土砂災害については、以下にみられるような気候変動による影響に対して対策に取り組むべきである。

- ・大雨や短時間強雨の発生頻度が増加することにより、土砂災害の発生頻度が増加する。
- ・急激に発達する積乱雲群等による、突発的で局所的な大雨が増加することにより、警戒避難のためのリードタイムが短い土砂災害の発生が増加する。
- ・台風の勢力が増大すること等により総雨量が 1,000mm を超えるような記録的な大雨の発生頻度が増えることによって、深層崩壊等の計画規模を超える土砂移動現象の発生頻度が増加する。
- ・記録的な大雨の発生頻度が増加することにより、土石流が流域界の尾根を乗り越えて流下する現象や、不明瞭な谷地形を呈する箇所における土石流等の発生頻度が増加する。
- ・台風による風倒木の発生や土砂移動現象の頻度の増加、規模の増大等に伴い土砂と相まって流出する流木が増加することが想定され、流木災害の発生頻度が増加する。

（土砂災害の発生頻度の増加への対策）

土砂災害の発生頻度が増加することにより、さらに多くの人命を危険に晒し、社会経済活動に重大な影響を与えることのないよう、一層、人命を守る効果の高い箇所における施設整備を重点的に推進するとともに、避難場所・経路や公共施設、社会経済活動を守る施設の整備を実施すべきである。また、砂防堰堤の適切な除石を行うなど、既存施設も有効に活用すべきである。

土砂災害のおそれのある箇所が多く存在することから、費用や整備に要する期間に制約のある中、できるだけ効率的にハード対策が進められるよう、施設の計画・設計方法や砂防ソイルセメント等の活用など、使用材料について、より合理的なものを検討する必要がある。

また、土砂災害は降雨等の誘因と地形・地質等の素因が箇所ごとに連関して発生するものであり、正確な発生予測のためにはさらなるデータ蓄積と研究、技術開発が必要である現状を踏まえ、ハード対策とソフト対策を一体的に進めていくことが重要となる。

土砂災害防止法の改正により土砂災害警戒区域の指定をより一層促進し、ハザードマップの作成・公表や夜間の防災訓練などの実践的な訓練等を通じて、警戒避難体制の強化を図るべきである。

今後は、土砂災害警戒区域等の指定の前段階においても、土砂災害防止法に基づく基礎調査結果をホームページに掲載、公共施設等での提示、各戸配布、回覧板など様々な方法で公表することで土砂災害の危険性を住民等に十分周知し、速やかに土砂災害のリスクが高いことを示すことによって警戒避難体制の整備等を促していくべきである。

事前に地域ごとに時系列での行動手順を決めておくタイムライン（時系列の行動計画）の作成について支援を行うなど、警戒避難体制の充実・強化を図るべきである。

また、警戒避難を的確に行うためには、避難勧告等の情報を出す側である市町村、それらの情報を受け取る側の住民代表双方に土砂災害に関する知識をもった人材の育成等が重要である。児童・生徒への防災教育、住民への講習会、都道府県・市町村職員等を対象とした研修等、対象と目的を明確にした取組を推進するべきである。

(警戒避難のためのリードタイムが短い土砂災害への対策)

土砂災害に対しては、時間的に余裕をもって、あらかじめ設定された避難場所に立退き避難をすることが基本となるが、土砂災害の前兆現象が起き始めるなど危険が差し迫っている場合には、住民が一刻も早く危険な場所から離れることができるよう、危険な場所や逃げる方向についてこれまで以上に周知するべきである。また、近隣のマンション等の堅牢な建物の高層階に避難することも有効な方法であることを周知する必要がある。その上で、既に家の外に出られる状況でない場合、小規模な急傾斜地の崩壊等が想定される区域においては、斜面と反対側にある2階以上の部屋へ移動することも考えるべきである。ただし、この場合、土石流については家屋が全壊する可能性があること等にも十分留意しなければならない。また、実践的な防災訓練、防災教育を通じて日頃から土砂災害に対する正確な知識の普及に努めるべきである。

今後は、的確な避難勧告や避難行動を支援するため、土砂災害警戒情報の発表単位の細分化、精度向上を検討するとともに、早い段階から雨や地中の水分の含み具合に関する時系列情報を提供できるように検討するべきである。

さらに、より迅速な状況の把握及び情報の伝達ができるようソーシャルメディア等の新たな情報収集・共有の方法を活用することも検討するべきである。

(計画規模を上回る土砂移動現象への対策)

計画規模を上回る土砂移動現象に対しても、砂防堰堤等が少しでも長い時間、減災機能を発揮することで、人命を守り、社会経済活動への影響を最小限とすることができるように、砂防堰堤等の施設配置や構造を検討するべきである。

さらに、それによって少しでも住民の避難時間を確保することや氾濫範囲を減少させることで避難場所・経路を保全するなど、ハード対策とソフト対策の連携方策についても検討するべきである。

(深層崩壊等への対策)

記録的な大雨による深層崩壊等に伴う大規模土砂災害に対しては、初動対応を迅速化するため、深層崩壊等の発生や河道閉塞の有無をいち早く把握する国土監視体制の強化を進めるべきであり、人工衛星、地震計ネットワークにより大規模土砂移動現象を迅速に検知できる危機管理体制の整備を推進するべきである。

併せて、今後は、地質、地質構造等の素因に関する情報を把握するため、空中電磁探査などの新たな技術の活用を図っていくべきである。

また、河道閉塞による湛水、火山噴火の降灰とその後の降雨等によって、土石流の発生等、甚大な被害が懸念される場合には緊急調査をおこない、市町村に対して避難勧告等の判断に資する情報を提供するべきである。

大規模土砂災害への危機管理対応については、UAV (Unmanned Aerial Vehicle : 無人航空機) 等の新たな技術の導入を進めるとともに、関係機関と連携したより実践的な訓練を実施するなど、対応の迅速化、高度化に取り組むべきである。

また、大規模土砂移動現象の発生後は、下流域への土砂の影響を考慮し、流域全体の継続的なモニタリングが必要である。

(不明瞭な谷地形を呈する箇所での土砂災害への対策)

不明瞭な谷地形を呈する箇所で土砂災害が発生することに対しては、対象箇所が膨大に存在することが想定されることから、重点的に対策すべき箇所を抽出するため、危険度評価手法を検討するとともに、地形特性を踏まえた、より合理的な施設の構造について検討を行うべきである。

(土石流が流域界を乗り越える現象への対策)

不明瞭な谷地形を呈し隣接溪流等に流れ込む危険性のある箇所では、土砂量や範囲を適切に推定するため、土石流の氾濫計算等を行い、その結果のハード対策、ソフト対策への活用を検討するべきである。

(流木災害への対策)

土砂移動現象の頻度の増加や規模の増大に伴い、発生頻度の増加が懸念される流木災害に対しては、流木災害により土砂災害の被害が拡大することがないように、流木捕捉効果の高い透過型堰堤の採用、流木止め設置、既存の不透過型堰堤を透過型堰堤に改良することなどを検討し、流木対策計画を策定するべきである。

(上流域の管理)

迅速で効率的な流域管理を進めるために、人工衛星や航空レーザ測量によって得られる詳細な地形データ等を定常的に蓄積することで、国土監視体制の強化を図るべきである。

さらに国土管理の観点から、上流域の荒廃を防ぐことは重要であり、山腹工等の斜面对策や、地域との連携によって実施されている里山砂防事業、グリーンベルト整備事業について、その効果を検証しつつ推進するべきである。

(災害リスクを考慮した土地利用, 住まい方)

土砂災害警戒区域等の指定を促進するとともに、指定の前段階においても土砂災害防止法に基づく基礎調査結果を公表し、いち早く土砂災害のリスクが高いことを示すことで、より安全な土地利用を促していく必要がある。特に、要配慮者利用施設や防災拠点の安全確保にはこれまで以上に十分な配慮を促すべきである。

災害リスクが特に高い地域については、土砂災害特別警戒区域の指定による建築物の構造規制や宅地開発等の抑制を促進するべきである。あわせて当該地域からの移転を促進するため、がけ地近接等危険住宅移転事業等による支援を促進するべきである。

<引用文献>

社会資本整備審議会（2017）：水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会～答申

8.6 土砂流出量の予測に関する既往の方法

表 8.6.1 は江頭(2001)がまとめた土砂流出モデルの比較表である。表 8.6.2 は横尾ほか(2018)がまとめた土砂動態解析モデルの比較表である。これらのようにさまざまな土砂流出モデルが提案されているが、土砂流出モデルの種類が多いということは、目的の違いや取り扱う現象の違いがあり、万能な土砂流出モデルが存在しないということでもある。

全体の傾向として土砂の輸送過程の解析の精度は向上したものの、土砂の生産過程については大木の問題を抱えている。土砂生産過程は、表面侵食、表層崩壊、深層崩壊、土石流などさまざまであることから、それを精度良く予測することが難しい。

表 8.6.1 水理・水文学的手法による土砂流出モデル (江頭, 2001 に追記)

研究者	斜面・河道網	降雨流出モデル	土砂生産	河道の流れ 土砂の輸送	特徴・その他
砂田・長谷川(1994) 砂田・小松・小林(2000)	GIS データに基づく流域地形モデル, 河道網の生成	流出関数法による表面流	降雨強度と斜面勾配の関数	等流, 掃流砂, 全流砂量	大流域 (流域全体)
江頭(1998) 江頭・松木(2000)	地形図, 単位河道の合成, 単位河道へ接続する斜面	表面流は kinematic wave, 中間流はダルシー則	(考慮できる)	等流, 掃流砂, ウオッシュロード	ダム貯水池の流域規模, 河道貯留土砂量の増減, 粒度分布変化あり
宝・野ツ又・上坂(1998)	GIS データに基づく流域地形モデル, 河道網の生成	表面流, 中間流とも 2 次元, kinematic wave, ダルシー則	表面流の関数, 土砂生産強度に RS データを考慮	等流, 流砂量式	山地流域, 河道貯留土砂, 粒度分布変化ともに不明
市川・佐藤・椎葉・宝(1999)	GIS データに基づく斜面素片およびその集合体	kinematic wave による表面流, ダルシー則による中間流	表層崩壊 (無限長斜面)	土石流~掃流砂が河道への横流入の形式	土砂輸送過程が斜面素片で扱われている。土砂生産にカ点, 斜面素片における貯留土砂の変化あり
高橋・井上・中川・里深(2000)	地形図に基づく河道モデルとそれを接続する斜面	kinematic wave による表面流	(考慮できる)	等流, 土石流~掃流砂 ウオッシュロード	山地流域, 河道貯留土砂量の変化, 粒度分布変化あり
村上・林・亀山・渡部(2001)	GIS データと地形図に基づく斜面モデル, 土砂水理学の知見に基づく河道モデル	Stanford Watershed Model	農耕地からの土砂流出, 河岸侵食	拡散波, 掃流砂, ウオッシュロード	農耕地を含む流域, 土砂生産は農耕地と河道
佐山・寶(2003)	GIS データに基づく流域地形モデル	中間流・表面流混合型の Kinematic Wave Runoff モデル	表面侵食,	掃流砂, 浮遊砂,	山地流域, 河道貯留土砂量の変化,

表 8. 6.2 土砂動態解析モデルの比較 (横尾ほか, 2018)

文献	対象面積 (km ²)	対象期間	領域の分割			降雨の空間分布	斜面等の解析方法					河道の解析方法			
			モデルのタイプ	斜面の分割単位	河道の分割単位		水の流出		土砂の流出			水の流出		土砂の流出 (土砂動態)	
							対象現象 (解析方法)	場の条件の空間分布	対象現象	場の条件の時間変化	場の条件の空間分布	対象現象	場の条件の時間変化	対象現象	場の条件の空間分布
高秀ら (1983)	約300	1出水	①	平均10 km ² の領域	3~5 kmの単位1次元河道	不明	流出解析 ^①	不明 ^②	斜面崩壊	粒度分布 ^③	不明 ^④	表面流	地形条件	土石流・掃流砂・浮遊砂	河道形状 ^⑤
林田・長谷川 (1994)	509	1年間	②	250 m グリッド	250 m グリッドから縦河道網を作成	考慮	流出関数法	地形条件	斜面崩壊	一定	地形条件 ^⑥	表面流	地形条件	掃流砂	河道形状 ^⑦
浦田ら (1999)	14.2	8時期	②	50 m グリッド	50 m グリッドから河道網を作成 ^⑧	一定	表面流 (KW) 中期流 (KW) 中期流 (Da)	地形条件	斜面崩壊	一定	地形条件	表面流	地形条件	土石流・掃流砂	河道形状 ^⑨
江頭・松本 (2000)	450	9年間	③	平均5 km ² の領域	44本の単位1次元河道	考慮	表面流 (KW) 中期流 (Da)	地形条件	土石流堆積物の再移動	一定	一定 ^⑩	表面流	地形条件	掃流砂 WL	河道形状 ^⑪ 粒度分布 (2分類)
高橋ら (2000, 2001)	131	14年間	②	平均2 km ² の領域	50 m 毎の1次元河道	一定	KW	地形条件	裸地侵食 植生の侵食 ^⑫	一定	崩壊地分布 ^⑬	表面流	地形条件 相度係数 ^⑭	土石流・掃流砂 WL	河道形状 ^⑮ 河床の粗粒度 ^⑯ 粒度分布 (4分類)
佐山・廣 (2003)	625	7ヶ月	②	250 m グリッド	250 m グリッド	一定	表面流 (KW) 中期流 (Da)	地形条件	表面侵食	一定	地形条件 ^⑰	表面流	地形条件	掃流砂 浮遊砂	河道形状 ^⑱
山本ら (2004)	870	18年間	③	平均3 km ² の領域	平均3 kmの単位1次元河道	考慮	表面流 (KW) 中期流 (Da) 中期流 (Da)	地形条件	土石流堆積物の再移動	粒度分布 ^⑲	一定 ^⑳	表面流	地形条件 相度係数 ^㉑	掃流砂 浮遊砂 WL	河道形状 ^㉒
福岡ら (2004)	567	20年間	③	平均3 km ² の領域	1次元河道 ^㉓	一定	表面流 (KW) 中期流 (Da)	地形条件 等価粗度 ^㉔	土石流堆積物の再移動	一定	一定 ^㉕	表面流	地形条件 相度係数 ^㉖	掃流砂 浮遊砂 WL	河道形状 ^㉗ 粒度分布 ^㉘
伊藤ら (2007)	720	48時期 (1出水)	①	平均20 km ² の領域	1次元河道 ^㉙	考慮	貯留関数法	流出解析の係数	斜面崩壊 土石流等	安積の土砂供給タイムミング	生産土砂量供給タイムミング	表面流	地形条件	掃流砂 浮遊砂	河道形状 ^㉚
丹羽ら (2014)	21	4出水	①	0.5 km ² 以下の領域	50 m 毎の1次元河道	考慮	流出関数法	液状土	斜面崩壊 土石流等	安積の土砂供給タイムミング	崩壊地分布 ^㉛	表面流	地形条件	土石流・掃流砂	河道形状

近年の研究では石尾ほか (2017) が山地流域のみで無く、田畑や市街地など、土地利用が混在した流域での土砂生産・流送モデルを提案している。図 8. 6.1 は石尾ほか (2017) が提案するモデルの解散過程を示すフロー図である。図 8. 6.2 にこのモデルで算出した年間生産土砂量の分布と各河川の年間輸送土砂量の分布を示したものである。

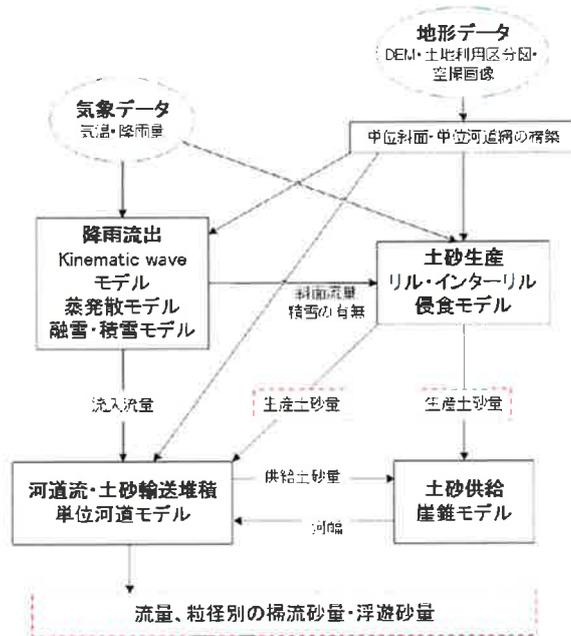


図 8. 6.1 土砂生産・流送モデルの計算過程 (石尾ほか, 2017)

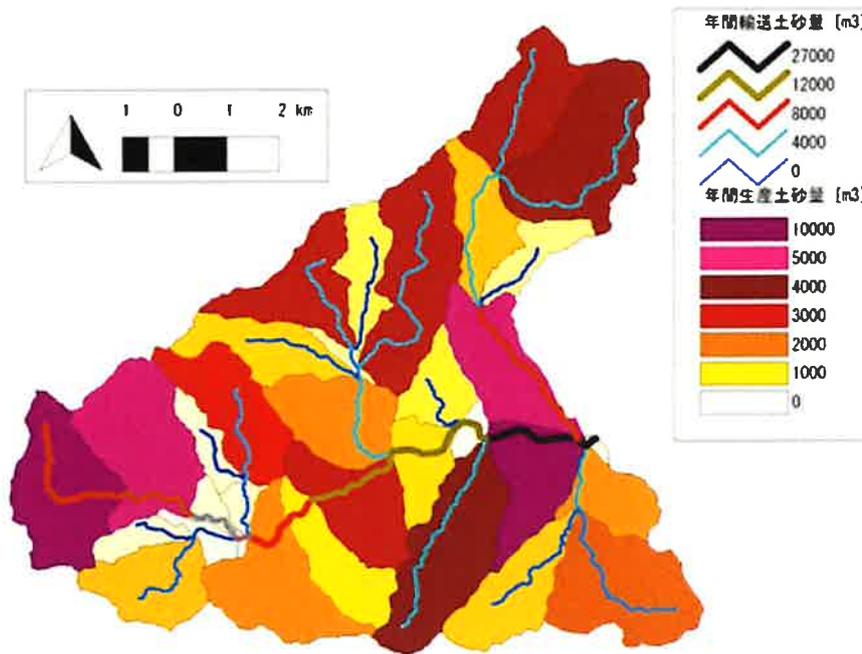


図 8.6.2 年間生産土砂量と年間輸送土砂量 (石尾ほか, 2017)

<引用文献>

- 江頭進治 (2001): 土砂流出予測法, 水工シリーズ 01-A-2, 土木学会水理委員会・海岸工学委員会, pp.A-2-1~A-2-14.
- 砂田憲吾・長谷川登 (1994): 国土数値情報に基づく山地河川水系全体における土砂動態のモデル化の試み, 土木学会論文集, No. 485/1I-26, pp.37-44.
- 砂田憲吾・小松勝彦・小林弘 (2000): 流域全体の土砂動態モデルに関する基礎的検討, 水工学論文集, 第44巻, pp.729-734.
- Egashira, S. (1998): Research Related to Prediction of Sediment Yield and Runoff, Symposium on Japan-Indonesia IDNDR Project, September 21-23, 1998, Bandung, Indonesia, pp.373-384.
- 江頭進治・松木敬(2000): 河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法, 水工学論文集, 第44巻, pp.735-740.
- Takara, K., K. Notsumata and R. Uesaka(1998): A Distributed Model for Flood Runoff and Sediment Yield Based on Remote Sensing and GIS, Symposium on Japan-Indonesia IDNDR Project, September 21・23, 1998, Bandung, Indonesia, pp.373-384.
- 市川温・佐藤康弘・椎葉充晴・立川康人・宝馨(1999): 山地流域における水・土砂動態モデルの構築, 京大防災研究所年報, 第42号B・2, pp.211-224.
- 高橋保・井上素行・中川一・里深好文(2000): 山岳流域における土砂流出の予測, 水工学論文集, 第44巻, pp.717-722.
- 村上正吾・林誠二・亀山哲・渡辺正孝(2001): 河川流域内農林地域における土砂動態モデルに関する基礎的検討, 水工学論文集, 第45巻, pp.799-804.

- 佐山敬洋・寶馨 (2003) : 斜面浸食を対象とする分布型土砂流出モデル, 土木学会論文集, No.726, II-62.
- 石尾将大・金海生・宇野哲平 (2017) : 土砂生産・流送モデルの開発, こうえいフォーラム第 25 号, pp.1-7.
- 横尾善之・丹羽諭・内田太郎・平岡真合乃・勝山正則・五味高志・水垣滋・浅野 友子 (2018) : 山地流域の水・土砂流出における空間スケールの影響 (3) - 数値解析モデル上の取り扱い事例, 水文・水資源学会誌, Vol.31, No.4, pp.245-260.

8.7 林野庁の土石流・流木対策指針解説等で推奨されている新規崩壊面積の推定法

土石流・流木対策指針解説等（林野庁，2019）では新規崩壊発生見込み量とそれに伴う土砂量の推定方法として以下の方法を提示している。過去の経験による算出で利用しているのは1992年以前の研究成果である。

(1) 式による算出

対象範囲における現在の崩壊面積又は崩壊率を基準として次式により求める。

新規崩壊発生面積（率）＝現在の崩壊地面積（又は崩壊率）×計画降雨量／既往最大日雨量
 ここに、計画降雨雨量は100年確率日雨量など

(2) 過去の経験による算出

①雨量指数（X）の算出

$$X = P / P50$$

ここに、P：豪雨時の日雨量（100年確率日雨量），
 P50：50年確率日雨量

②新生崩壊の面積率（s/a）%

$$(s/a) = c X^m$$

ここに、c,m:係数，

中生層地帯：c=1/11, m=3/2

第三紀層地帯他：c=1/4.2, m=3/2

風化花崗岩他：c=1/3.7, m=2

s：崩壊面積合計，a：流域面積

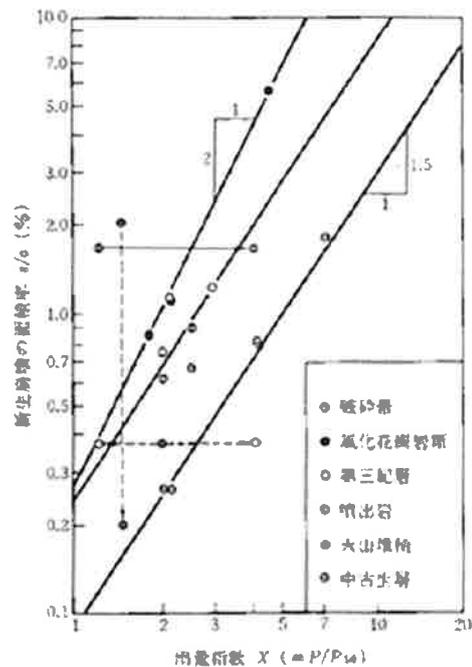


図 8.7.1 雨量指数と新生崩壊の面積率
 (砂防学会，1992)

<引用文献>

林野庁（2019）：土石流・流木対策指針解説等

石川芳治・水山高久・福沢誠（1989）：土石流に伴う流木の発生および流下気候，新砂防，Vol.42，No.3，pp.4-10.

石川芳治（1989）：山地小溪流からの流木を伴う土砂流出による災害に関する研究，京都大学博士論文

砂防学会（1992）：砂防学講座 第3巻

国総研資料（2016）：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策片）解説

8.8 流木シミュレーションの現状

○平成 26 年度流域山地災害等対策調査（流木災害対策手法検討調査）委託事業

「物理的にシミュレートする手法は現在の所存在しないため、流木が存在することによる特徴的事例を土石流の氾濫範囲シミュレートに組み込み、流木による氾濫範囲を予測する。具体的には、①河道閉塞部なしの氾濫計算、②河道閉塞部を地形データで再現した上での氾濫計算、③河道閉塞部が決壊した場合の氾濫計算」

○流木を伴う土石流のシミュレーション

「流木」を「濃度」として扱い、河床変動の基礎方程式に以下の 3 つの機構を追加。・流木の連続式・流木の輸送速度（連続式に付加）・流木と河床の摩擦力（運動方程式に付加）鳥取大学大学院工学研究科 三輪

○個別要素法による流木捕捉シミュレーション解析法

「広島県庄原地区で発生した流木災害に関するシミュレーション解析」 防衛大学校 香月ら

「3D-DEM による流木捕捉工の捕捉シミュレーション解析」 防衛大学校 香月ら

8.9 土砂・流木の流出形態の変化予測と治山分野での活用

土石流・流木対策指針解説等（林野庁，2019）では石川ほか（1989）や石川（1989）などの 1980 年代の研究成果を元に、当時の流域面積と流木量等との関係から流木量を推定する方法が推奨されている。参照されている研究成果の多くは 30 年以上前の研究成果であるが、この 30 年間で森林の状況も降雨の状況も変化していることから、近年の流木の流出形態に関する追加の調査と研究が必要である。過去から現在までの流木の流出形態の違いから、今後の気候変動に伴う流出形態の変化を予測する必要がある。

土砂の流出形態については各種解析モデルが提案され、特定の流域での適用例が数多く発表されているが、表面侵食、表層崩壊、深層崩壊、土石流などさまざまな形式の土砂生産過程を精度良く推定することが課題となっている。気候変動に伴う土砂の流出形態の変化を適正に評価するためには、土砂流出解析モデルにおける土砂生産過程の多様化と予測精度の向上が必要である。

しかし、土石流対策の実務における土砂量等の算定は、現在の土石流・流木対策指針解説等（林野庁，2019）にも適用されている一般的な方法を採用することになるが、「溪床に接続する斜面の新規崩壊発生見込み量に伴う土砂量」の推定精度の向上が重要である。特に気候変動に伴ってそれがどのように変化するか推定が重要となる。現在の指針では 1992 年以前の研究成果である雨量指数と新生崩壊の面積率の関係図も使用しており、現在、その関係がどのように変化しているのか、また、気候変動に伴って将来的にどのように変化するかを予測することが必要である。

<引用文献>

林野庁（2019）：土石流・流木対策指針解説等

石川芳治・水山高久・福沢誠（1989）：土石流に伴う流木の発生および流下気候，新砂防，Vol.42, No.3, pp.4-10.

石川芳治（1989）：山地小渓流からの流木を伴う土砂流出による災害に関する研究，京都大学博士論文

建設省（2000）：流木対策指針（案）計画編

9. 風倒木災害の発生予測とその対応

9.1 風況予測シミュレーションの現状

図 9.1.1 は、風況シミュレーションソフト「RIAM-COMPACT」を用いた風倒木被害の予測結果である(谷川ほか, 2010)。谷川ほか(2010)はシミュレーションで得られた小班での風況値を説明変数、被害の有無を2値の目的変数として、2つの地域(A, B 地域)のそれぞれでロジスティック回帰分析を行った。解析対象地を「植栽後10年以上経過している針葉樹人工林」に限定しているが、樹種などの森林属性は考慮されていない。風況シミュレーションソフト「RIAM-COMPACT」は、19年前に内田・大屋(2001)が発表したシミュレーションである。

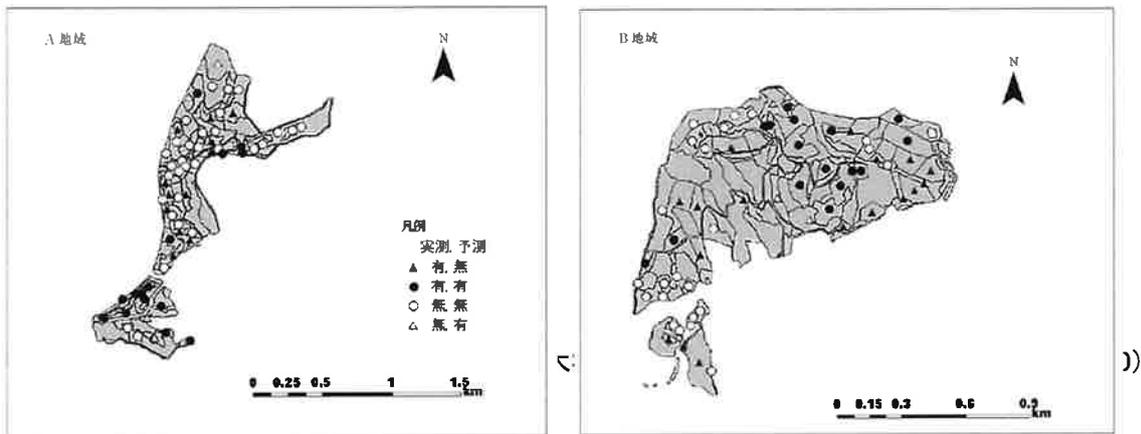


図 9.1.1 風況シミュレーションによる風倒木被害の予測と実験結果の対比(谷川ほか, 2010)

谷川ほか(2010)より新しい研究として、中尾・服部(2016)は森林層を考慮した竜巻のシミュレーションを提案している(図 9.1.2)が、巻末の参考文献に記載している23種類の文献中、日本の文献は2つのみである。それだけ、日本における森林を考慮した風況シミュレーションは少ないと考えられる。

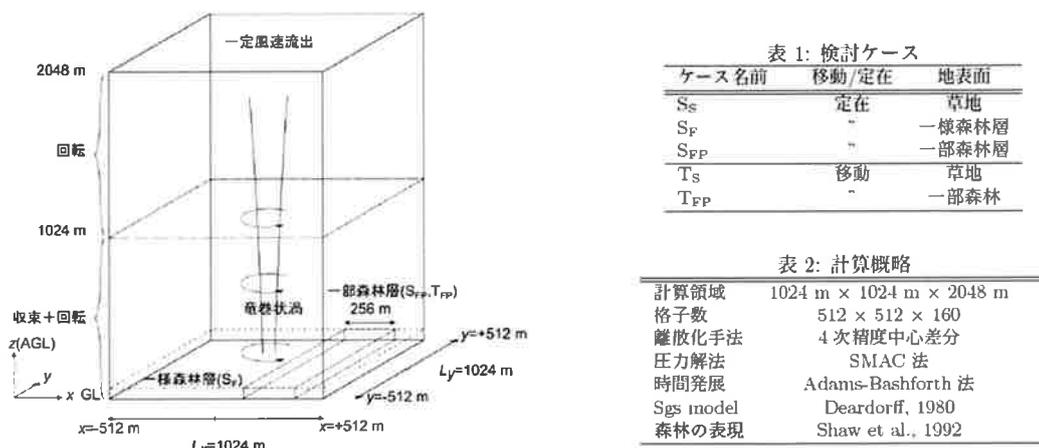


図 9.1.2 森林層を考慮した竜巻シミュレーションの計算領域と条件(中尾・服部, 2016)

日本流体学会誌「ながれ」の22巻5号(2003年)は「複雑地形上の風況予測法」の特集号であ

った。その中で、内田・飯田 (2003), 村上ほか (2003), 石原 (2003), 中山 (2003), 谷川 (2003) 内田・大屋 (2003) が論文を投稿し, 村上ほか (2003) が局所風況予測システム LAWEPS を, 石原 (2003) が非線形風況予測モデル MASCOT を, 谷川 (2003) が LOCALS を, 内田・大屋 (2003) が「RIAM-COMPACT」をと, 複数の解析モデルを発表している。

その中の一つである, 村上ほか (2003) は局所風況予測システム LAWEPS を発表しているが, これは一つの解析モデルではなく, 改良型 Mellor-Tamada モデルや改良 $k-\epsilon$ モデル, 樹木の影響を考慮した樹木 Canopy モデルなどの複数の解析モデルから構成されている。石原 (2003) は複雑地形における高精度の3次元非線形風況予測モデル MASCOT を発表している。その解析事例を図 9.1.4 に示す。

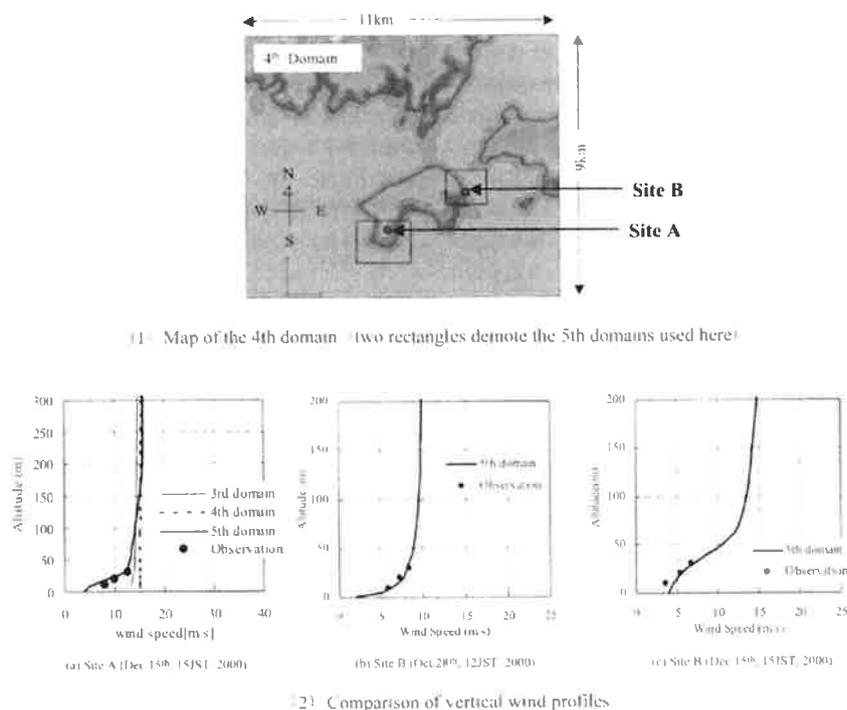


図 9.1.3 複雑地形を考慮した LAWEPS による解析例(村上ほか, 2003)

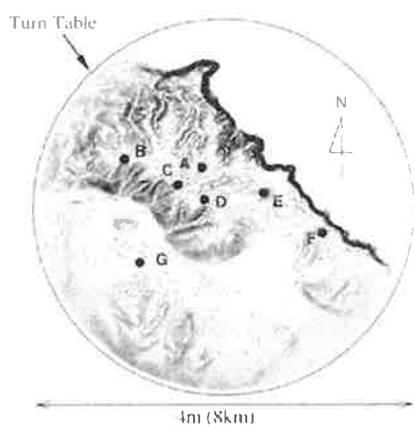


図 5 地形の等高線と測定点の配置

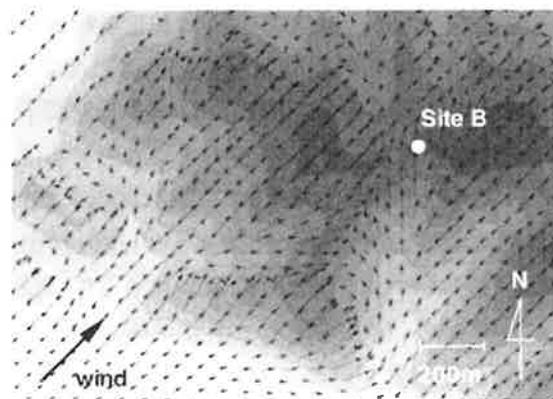


図 6 B地点SW風向における地上10mでの風速分布

図 9.1.4 複雑地形を考慮した MASCOT による非線形風況予測モデルの解析例(石原, 2003)

谷川（2003）は LOCALS を発表しているが、これは風力発電のための風況や発電量評価、風力発電運用時のメンテナンス等の事前情報としてのリアルタイム風況/発電出力予測が目的である。同じ学会誌に投稿された複数のモデルを紹介したが、それらの解析モデルの違いを詳細に記述することは難しい。

古い文献では萩野ほか（1995）が発表した解析モデルがあるが、平面 2 次元又は鉛直 2 次元での風況シミュレーションであり、日本における風況シミュレーションの初期モデルである。

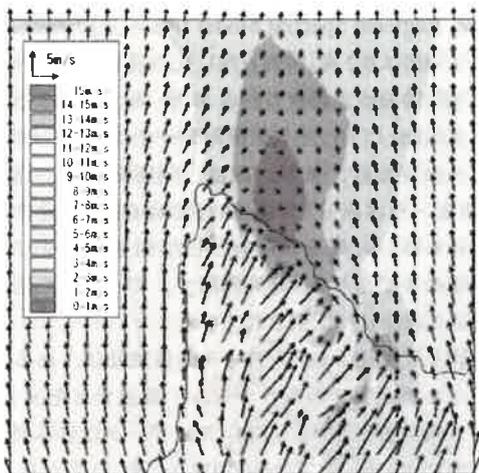


図 9.1.5 LOCALS による風速分布と風速ベクトルの解析例（谷川，2003）

関連する研究では片岡（2002）の都市での風況シミュレーション（図 9.1.6）や防風林の 2 次元シミュレーションの例（萩野，2017）などがある（図 9.1.7）。

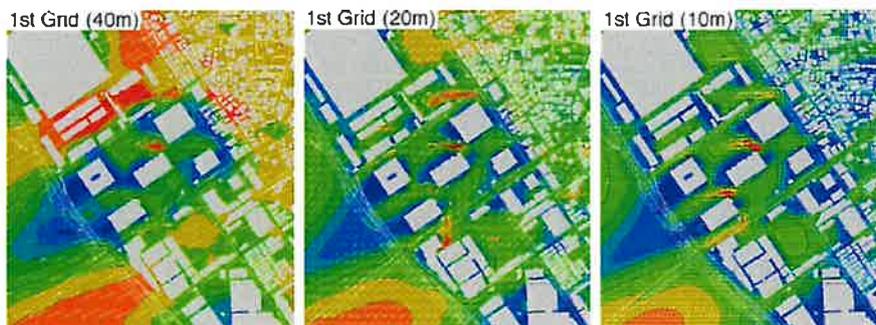


Fig. 5 地上3.5mにおける風速分布 風向：ENE
Wind Velocity Distribution

図 9.1.6 風環境シミュレータ Zephyrus(ゼフィルス)を用いた都市の風況シミュレーションの例（片岡，2002）

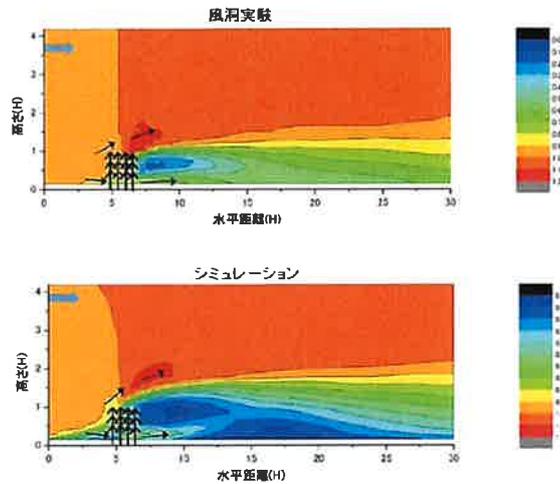


図 9.1.7 防風林に関する鉛直 2 次元シミュレーションの事例 (萩野, 2017)

中尾・服部 (2016) が参考文献としてあげている文献の中に Gardiner *at el.* (2000) や Peltola *at el.* (1999) の文献がある。Gardiner *at el.* (2000) や Peltola *at el.* (1999) は樹種や樹高, 樹径によって, 樹木を損傷させるために必要な風力等を 2 つの解析モデル (GALES モデル, HWIND モデル) によるシミュレーションによって評価している (図 9.1.8, 図 9.1.9 参照)。日本ではこのような樹木の風耐性に関するシミュレーションの文献は見つけれられていない。

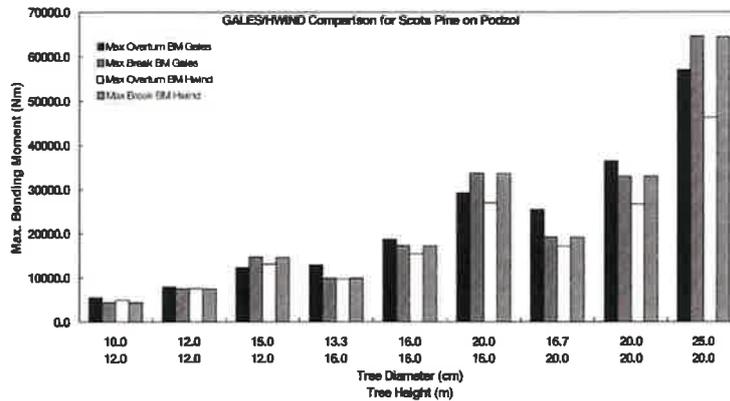


図 9.1.8 スコットランド松を損傷させるための曲げモーメント (Gardiner *at el.*, 2000)

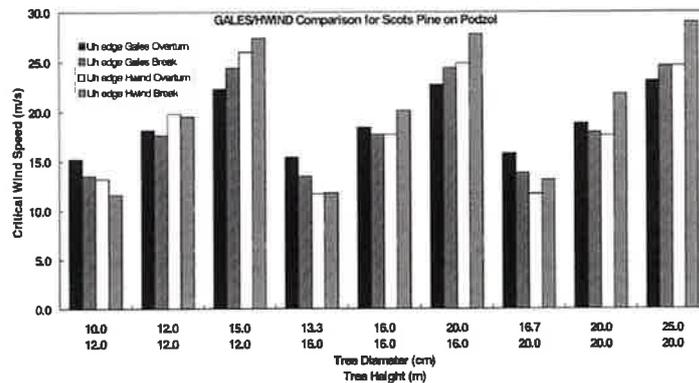


図 9.1.9 スコットランド松を損傷させるための樹冠風速 (Gardiner *at el.*, 2000)

<引用文献>

- 内田孝紀・大屋裕二 (2001a) : ラージ・エディ・シミュレーションによる局地的風況予測モデル RAIN-COMPACT の評価, 九州大学応用力学研究所報, 第 121 号, pp.73-85.
- 内田孝紀・大屋裕二 (2001b) : LES を用いた局地的風況予測に関する研究, 第 23 回風力エネルギー利用シンポジウム
- 内田孝紀・大屋裕二 (2002) : ネストグリッドを用いた複雑地形上の風況予測シミュレーション, 日本風工学会誌第 92 号, pp.135-144.
- 内田孝紀・大屋祐治 (2003) : 風況シミュレータ RAIN-COMPACT の開発—風況精度とリアルタイムシミュレーション—, 日本流体力学会誌「ながれ」, 22 巻 5 号, pp.417-428.
- 内田孝紀・飯田明由 (2003) : 複雑地形上の風況予測手法, 日本流体力学会誌「ながれ」, 22 巻 5 号, pp.373-374.
- 谷川直太・加治佐剛・太田徹志・溝上展也・吉田茂二郎 (2010) : 風況シミュレーションソフト「RIAM-COMPACT」を用いた風害発生予測手法の汎用性について, 九州森林研究, No63, pp.151-154.
- 中尾圭祐・服部康男 (2016) : 森林層を考慮した地表面を移動する竜巻状渦の性質, 第 24 回風工学シンポジウム, pp.43-48.
- 片岡浩人 (2002) : 風環境シミュレータ「Zephyrus (ゼフィルス)」の開発, 大林組技術研究所報, No.66, pp.49-54.
- 片岡浩人 (2015) : 数値液体計算による移動する竜巻状旋回気流がもたらす風圧分布の予測, 平成 27 年度日本風工学年次研究発表会, pp.153-154.
- 萩野裕章・西川敦・戎信宏・小川滋 (1995) : 谷地形における強風の数值実験—1991 年台風 19 号による大分県における風倒木災害—, 愛媛大学農学部演習林報告, 32 号, pp.1-12
- 萩野裕章 (2017) : 防風林を通過する風の流れを予測する, Forest Winds, No.70
- 石原孟・山口敦・藤野陽三 (2000) : 複雑地形における高精度の風況予測モデルの開発へ向けて, 第 22 回風力エネルギー利用シンポジウム
- 石原孟 (2003) : 非線形風況予測モデル MASCOT の開発とその実用化, 日本流体力学会誌「ながれ」, 第 22 巻 5 号, pp.387-396.
- 磯修・大江直樹・石原孟・山口敦・荒川洋 (2004) : 複雑地形上の風況予測に関する考察, 風力エネルギー利用シンポジウム, 26 巻, pp.231-234.
- 中山昭彦・岸修士郎 (2000) : ラージ・エディ・シミュレーションによる実地形形状気流の予測, 応用力学論文集, Vol.3, pp.737-744.
- 中山昭彦 (2003) : 複雑地形上気流のシミュレーション例と今後の課題, 日本流体力学会誌「ながれ」, 第 22 巻 5 号, pp.397-403.
- 村上周三・持田灯・加藤信介・木村敦子 (2003) : 局所風況予測システム LAWEPS の開発と検証, 日本流体力学会誌「ながれ」, 第 22 巻 5 号, pp.375-386.
- 谷川亮一 (2003) : LOCALSTM による風況シミュレーションモデルの開発と風況評価, 日本流体力学会誌「ながれ」, 第 22 巻 5 号, pp.405-415.
- Gardiner, B., Peltola, H. and H., Kellomäki, S.(2000): Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees, Ecol. Model., 1129, pp.1-23.

Peltola, H. and Kellomäki, S.(1999): A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch, Can. J. For. Res., 29, pp647-661.

9.2 最近の風倒木災害から見た今後の地球温暖化に対する課題－風倒木の発生予測と効果的な風倒木被害の抑制方法の開発（石川芳治）

IPCC 第5次評価報告書（2013年）によると、1970年代以降の北大西洋海域では、熱帯低気圧の発生数や強度の増加はほぼ確実とされている。北太平洋の日本周辺も含むそれ以外の海域では、観測データの精度や一貫性の問題もあって、発生数や強度といった熱帯低気圧活動の増加の確信度は低いとされている。しかしながら、最近、非常に強い勢力の台風が相次いで日本を襲い、暴風により大きな被害が発生している。2018年9月4日に徳島県南部に上陸した台風21号は近畿地方を縦断し、最大瞬間風速30m/sを超える猛烈な風が観測され、台風の進路の東側では、建物の被害や電柱・配電線の被害による停電、鉄道・道路の通行止め、風倒木による被害等が発生した。また、大阪湾沿岸では高潮が発生し、関西空港の滑走路が浸水し、閉鎖された。2019年9月9日に千葉市に上陸した台風15号は関東地方に記録的な暴風をもたらした。アメダス千葉では最大瞬間風速57.5m/sを記録し、観測史上1位を記録した。この暴風により、千葉県およびその周辺では人家や鉄道・道路に大きな被害を与えた。特に、電柱や配電線への被害は甚大で一時は93万戸を超える停電が発生し、完全に解消されるまでには約1ヶ月を要し、市民生活、産業活動に大きな影響を与えた。この台風では、風倒木も千葉県を中心として周辺地域でも多数発生し、人家や電柱・配電線、道路・鉄道等に被害を与えている。

このように、風倒木災害は繰り返し発生しており、今後、台風の強さが増すと、風倒木による被害が増加することも予想されることから、風倒木の発生予測と対策についても検討しておくことが重要と考えられる。

9.2.1 風倒木の発生予測と効果的な風倒木被害の抑制方法の開発

(1) 風倒木が発生し易い森林・樹木の予測法の開発

風倒木の被害を受けやすい森林は、次の条件によると考えられる。これらの中で、どのような森林や樹木が風倒木被害を受けやすいかを明らかにする必要がある。

- (a)個々の樹木の形状による。(樹高、直径、樹齡、形状比、樹冠長比)
- (b)個々の樹木の樹種による。(針葉樹、広葉樹)
- (c)森林の密度、構造による。
- (d)森林、樹木の位置(標高、傾斜、地形)による
- (e)森林、樹木の生育する地盤と根系(粘性土、砂質土、根系の深さ)

(2) 風倒木がもたらす二次災害の予測手法

風倒木によりもたらされる被害の予測手法

- (a)風倒木による電柱、配電線への被害
- (b)風倒木による家屋、建物に対する被害
- (c)風倒木による道路、鉄道に対する被害

(3) 風倒木被害を軽減する手法の開発(事前)

風倒木被害を受けにくい森林・樹木の形成手法

- (a)人工林の施業方法（主として間伐の時期，間伐率，枝打ち）
- (b)境界林の維持管理方法

(4) 風倒木発生地での斜面崩壊，土石流災害の発生の予測手法と対策

風倒木の発生後の山腹斜面では，豪雨により斜面崩壊や土石流が発生する。

(a)風倒木地における斜面崩壊・土石流等の発生危険度の判定方法

風倒木の形態別（根返り，幹折れ，傾倒），風倒木の発生率
地形（斜面の傾斜），土壌（地盤）の状態

(b)治山施設の機能強化と施設配置方法

山腹工，治山ダム，流木捕捉式治山ダム等による風倒木地からの二次災害対策

(5) 風倒木の発生後の対処方法（事後）

- (a)風倒木の処理方法，
- (b)風倒木跡地の森林回復方法

<参考文献>

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第5次評価報告書 第1作業部会報告書 気象庁翻訳，
2013年

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_ts_jpn.pdf

9.3 風倒木災害の発生予測とその対応（石川 芳治）

9.3.1 はじめに

毎年、多数の台風が日本に上陸・接近し、広い範囲にわたって暴風雨をもたらしている。これらの暴風により森林の立木（樹木）が倒されたり（根返り）、折られたり（幹折れ）、曲げられたり（幹曲がり）、傾けられたり（傾倒）するなどの風倒木被害が発生する場合がある。これらの風倒木により、森林の立木（樹木）自体が大きな被害を受けるとともに、風倒木により家屋・道路・鉄道・電柱や配電線等が被害を受けることにより、人命やライフラインに大きな被害を与える場合もある。さらに、風倒木の発生時およびその後に山腹斜面崩壊が発生・拡大する場合もある。

このような風倒木被害と、それによりもたらされる山腹斜面崩壊を防止・軽減することは森林の整備・保全を図り、土砂の流出、洪水、土石流等による災害の防止・軽減を図るために重要な課題である。ここでは、最近の主な風倒木災害の概要をまとめるとともに、風倒木災害が発生し易い条件を整理し、さらに風倒木災害を防止・軽減する手法を提案する。

9.3.2 風倒木被害と引き起こされる災害

風倒木による直接的な被害として立木（樹木）自体が根返り、幹折れ、幹曲がり、傾倒して木材としての経済的な価値が低下する。さらに、倒木により周辺の家屋や建物を損壊させたり、道路・鉄道等の交通機関を不通にさせたり、周辺の電柱や配電線を損壊して停電を起こすなどの間接的な被害を与えて、災害を引き起こす場合がある。さらに、風倒木の発生に伴い斜面崩壊が発生して人家等に被害を与える場合がある。また、風倒木の被害地では、その後の降雨により斜面崩壊、土石流等が発生して、二次災害を引き起こす場合がある。表 9.3.1 には最近の主な風倒木被害の概要を示す。

9.3.3 風倒木被害を受けやすい森林の特徴

風倒木被害の発生の主な原因は強風であるので、まず、強風をもたらす台風などが接近した森林が被害を受けやすくなる。強風が発生した場合でも、その地域の全ての森林（立木）が被害を受ける訳ではなく、局所的に被害を受ける場合が多いので、被害を受けやすい場所（森林）を予測することも必要である。さらに、強風による立木の根返り、揺れ・振動等により、立木の根系が入っている表層地盤が緩み、これが山腹斜面崩壊の発生を引き起こす場合があるので、このような山腹斜面崩壊についても検討しておく必要がある。

(1) 最近の風倒木被害をもたらした風速、雨量

基本的に、風倒木は台風などによる強風により発生する。また、台風などでは、強風と同時に降雨を伴うので、降雨による表層土の強度低下も根返り等の倒木被害に影響していることが考えられる。表 9.3.2 に最近の主な風倒木被害発生時の原因となった気象現象、風速および雨量を示す。一般に「風速」は10分間の平均風速であり、「瞬間風速」は0.25秒間ごとに更新される測定値の3秒間(12サンプル)を平均した値である。一般的に、瞬間風速は平均風速の1.5から2倍近い値になると言われている。最大風速および最大瞬間風速は風速と瞬間風速の最大値である。

気象庁による「風の強さと吹き方」¹⁰⁾の目安では、「細い木の幹が折れたり、根の張っていない木が倒れ始める。」のは平均風速が20~25m/s、瞬間風速が約30m/s以上とされており、「多くの樹木が倒れる。」のは平均風速が35~40m/s、瞬間風速が約45m/s以上とされている。

表 9.3.1 最近の主な風倒木被害^{1), 2), 3), 4), 5), 6), 7), 8), 9)}

番号	発生年・月・日	気象原因	場所	被害面積 (ha)	箇所数 (箇所)	山腹崩壊発生箇所
1	2019・9・9	台風15号 房総半島台風	千葉県	9,000		
2	2018・9・4	台風21号	大阪府, 京都府	高槻市 613		
3	2016	台風7,9,10,11号	北海道	9,000		
4	2004・10・ 19~20	台風23号 他(16,18,21号)	兵庫県, 朝来町他	3,244.31	2,839	災害後 132箇所
5	2004	台風18号	北海道	37,000		
6	2002	台風21号	北海道	18,000		
7	1998・9	台風7号	奈良県	4,227		多数
8	1993・9・3	台風13号	鹿児島県	6,500		
9	1991・9	台風19号	大分県	22,483		災害後 1,132箇所
10	1991・9	台風19号	福岡県	7,239		
11	1981・8	台風15号	北海道	58,780		
12	1954	台風15号 (洞爺丸台風)	北海道	742,000		

表 9.3.2 最近の主な風倒木被害発生時の風速, 雨量^{1), 2), 3), 4), 5), 6), 7), 10), 11)}

番号	発生年・月・日	気象原因	観測所	最大風速 (m/s)	最大瞬間風速 (m/s)	連続雨量 (mm)
1	2019・9・9	台風15号	千葉	35.9	57.5	109(2日間)
2	2018・9・4	台風21号	関空島 和歌山	46.5 39.7	58.1 57.4	田辺市 70(3日間)
3	2004・10・ 19~20	台風23号	北海道	22.9		215(2日間) 23(1時間)
4	1993・9・3	台風13号	大根占町		74	
5	1991・9・27	台風19号	日田	16.7	44.4	
6	1981・8	台風15号	苫小牧	27.7	38.6	

(2) 風倒木被害を受けやすい森林の特徴

台風等による風倒木被害はこれまで全国各地で発生しており、その被害実態を調査して報告している文献は多い。ここでは、既往の風倒木被害（災害）実態に関する文献に記載されている、風倒木被害の特徴のうち主なものを抜粋して示す。なお、風倒木被害は、発生する場所の森林の樹種や林齢、地質、地形、強風を生じさせた台風等の規模や進路等の影響を受けると考えられるので地域により多少異なり、このため、報告されている文献において、共通している特徴もあるが、異なる見解が示されている場合もある。

(i)北海道水産林務部林務局森林整備課では「風倒木被害のリスクを軽減する森林づくり」（2018年）において2004年台風18号による風倒木被害の特徴を次のように述べている。

- ア. 風倒木被害は南向き斜面で発生し易い。
- イ. 風倒木被害は尾根筋沿いで発生し易い。（尾根筋沿いで強風が発生し易い）
- ウ. 一般に針葉樹より広葉樹の方が強風に強い。
- エ. 形状比が小さい方が強風に強い。

※形状比＝樹高÷胸高直径、形状比は70前後が望ましい。

(ii)宮本ら²⁾による、1991年台風19号による大分県での風倒木調査結果において次のように報告している。

- ア. 風倒木の被害を受けた人工林（主としてスギ）の樹齢は20～50年生がほとんどで、特に幼齢林はほとんど被害を受けていなかった。
- イ. 根返りの生じた箇所では、一部、倒木の発生と同時に崩壊した斜面があった。このような崩壊を生じた斜面の勾配はほとんどが33°以上であり、風倒木を生じた斜面の勾配がさらに緩い勾配でも分布していたのに比べると、斜面崩壊はより急勾配で発生していた。

(iii)松村³⁾は既往の風倒木災害に関する既往文献調査により、風倒木の実態を次のようにまとめている。

- ア. 風倒木被害は大型の台風によるものが多い。
- イ. 倒木は、スギ・ヒノキ・カラマツで多く発生している。ただし、伊勢湾台風では春日山原始林でも発生している。
- ウ. 倒木は高齢林に多い。
- エ. 風倒木は、風が集中しやすい地形や尾根部や孤立峰などの風が加速されやすい地形に集中している。

(iv)稲垣⁴⁾は1998年の台風7号による岐阜県内の風倒木地を調査し、次のような報告をしている。

- ア. 風倒木の被害は人工林（針葉樹）で多く広葉樹では少ない。
- イ. 倒伏の被害が大きかったのは、基盤が1m以浅に位置し、根鉢の深さが制限される地盤であった。また、人工林で間伐が行われていない場所でも倒伏被害が多かった。これは間伐が行われていないところは根系の発達が悪かったためと推定される。
- ウ. 風倒木のあった人工林の地盤は、表土のNc値が2以下と緩んでいた。一方、倒伏被害のなかった広葉樹の地盤ではその緩みはほとんどなかった。

- (v)水上⁹⁾らは九州地方において発生した風倒木の実態調査に関する既往の文献を調査して、風倒木に関する特徴を次のようにまとめている。
- ア. スギは他の樹種に比べて風倒の被害を受けやすい。また品種によって被害形態に差が認められる。
 - イ. 広葉樹は針葉樹に比べて被害を受け難い。
 - ウ. 土壌の浅いところでは倒伏型が多く、土壌が深いところでは折損型が多い。
 - エ. 高齢木で被害が多い。
 - オ. 形状比が 70 以上の林分では被害率が高くなる。
 - カ. 樹冠長率が 60%を超えると被害率が低くなる。
 - キ. 疎な林分よりも密な林分の方が被害率が高い。収量比数が中庸 (0.65~0.84) では被害率が低く、過疎および過密な林分では被害率が高くなる。
 - ク. 間伐後 1~2 年経過した林分で被害率が最も高い。間伐後 6 年以上経過した林分では被害が小さい。無間伐状態の過密林分では被害が多い。
 - ケ. 被害規模が中小 (25ha 未満) の被害地の地形的分布は南斜面や南西斜面に被害が集中していた。被害規模が大 (25ha 以上) では、南斜面、南~西側に向かって開けた地形、山脈の北側斜面の高所、台地状の平坦な地形、円錐形の山の中腹、山麓地帯に多かった。
 - コ. 樹冠直径のばらつきが大きい林分では被害率が高くなっていた。

9.3.4 風倒木被害にともなう山腹斜面崩壊の特徴

- (i)2004 年 10 月 19~20 日に兵庫県で発生した風倒木被害にともなう山腹斜面崩壊の特徴は次のとおりであった⁹⁾。
- ア. 崩壊の勾配は、40 度を超えるような箇所が多く、ほとんどが 35 度以上であった。
 - イ. 斜面形状は平行斜面が多く、また比高率 (崩壊頭部の高さ/斜面の全高) が高いことから斜面の上部から崩壊が発生している。
 - ウ. 崩壊深さは平均 0.88m で、浅い表層崩壊であった。
- (ii)松村³⁾は風倒木被害 (災害) に関する既往文献調査により、風倒木に伴う山腹斜面崩壊の実態を次のようにまとめている。
- ア. 倒木の発生により、雨が少なくても同時に崩壊を発生させる。
 - イ. 倒木の発生は、山腹斜面表層土の強度低下を招きその後の崩壊発生に対する抵抗力を小さくする。
 - ウ. 樹林間隔が狭く、表層土の薄い地盤で風倒被害は多く発生している。
 - エ. 風倒木地では、その後、少ない降雨でも崩壊が発生し易い。
 - オ. 表層崩壊の発生箇所は、地下水や地表水の集まり易い凹地形の斜面であった。
- (iii)稲垣⁴⁾は 1998 年の台風 7 号による岐阜県内の風倒木地を調査し、表層崩壊の特徴について次のような報告をしている。
- ア. 風倒木地で表層崩壊が発生したのは、地下水や表流水の集中しやすい、やや沢地形の部分であった。

<引用文献>

- 1)北海道水産林務部林務局森林整備課，風倒木被害のリスクを軽減する森林づくり，2018年3月作成，<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/srs/riskdown.pdf>，2020年7月10日参照
- 2)宮本邦明，岡田寛，高濱惇一郎，三重野友親，岩男道也，中尾剛：1991年台風19号による風倒木に関する調査，砂防学会誌，Vol.45，No.3,p.18-23，1992
- 3)松村和樹：風倒木地における山腹表層崩壊に関する研究，
<file:///C:/Users/owner/Downloads/K-215643-1.pdf>，2020年7月13日参照
- 4)稲垣秀輝：植生の違いによる風倒木の発生と斜面崩壊，応用地質，Vol.40,No.4,p.196-206,1999
- 5)水上真一郎，村上拓彦，溝上展也，吉田茂二郎：九州における風倒木被害の発生リスクに関するレビュー，日本森林学会九州支部研究論文集，No.59，p.292-295，2006，
<http://ffpsc.agr.kyushu-u.ac.jp/kfs/kfr/59/bin090519124324009.pdf>，2020年7月10日参照
- 6)（社）兵庫県治山林道協会，平成16年台風による風倒木被害と再度災害防止対策，
<http://www.chisanrindou.net/data/pdf/books/book12.pdf>，2020年7月6日参照
- 7)福岡県土整備部砂防課：福岡県の主な土砂災害例，事例5，平成03年(1991年)風倒木災害，
<http://www.sabo.pref.fukuoka.lg.jp/jirei/jirei5.html>，2020年7月13日参照
- 8)千葉県森林組合：台風被害森林の森林整備について
<http://www.senmoriren.jp/?m=202007>，2020年7月13日参照
- 9)高槻市，平成30年台風21号による森林被害について，
<http://www.city.takatsuki.osaka.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/84/02-07typhoon21sinrinsaigai.pdf>，2020年7月13日参照
- 10)気象庁：災害時気象報告，令和元年房総半島台風及び8月13日から9月23日にかけての前線等による大雨・暴風等，290p，2020
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_202002.pdf，2020年7月13日参照
- 11)気象庁大阪管区气象台：災害時気象報告，平成30年台風第21号による9月3日から5日にかけての暴風，高潮等，150p，2019
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_201904.pdf，2020年7月13日参照
- 12)気象庁；風の強さと吹き方（表）
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/yougo_hp/kazehyo.pdf，2020年7月13日参照
- 13)林業・木材製造業労働災害防止協会；災害事例研究 No.15 〔林業〕風倒木を切断中，幹が裂けて腹部を直撃された
http://www.rinsaibou.or.jp/cont02/items17/0217_no15_idx.html，2020年7月13日参照
- 14)後藤恵之助，浜崎一弘，湯藤義文：台風9119号による風倒木災害の衛星リモートセンシング調査，日本リモートセンシング学会，第13回学術講演会論文集，p.209-212,1992
- 15)石黒悦爾，岩崎浩一，守田和夫：Landsat-5/TM データによる森林被災地域抽出の可能性，農業機械学会誌，Vol.57,No.5,p.65-72,1995

9.4 台風の災害に対する影響度の長年変化と近年の風倒木被害（川邊 洋）

9.4.1 はじめに

台風が引き起こす災害には、豪雨、強風、高潮の諸災害がある。豪雨は洪水・浸水や土砂災害の原因となり、強風は建物の損壊、農作物の被害、交通障害、風倒木の原因となる。また、高潮は強風と相まって浸水災害を助長する。

ここでは、台風の影響を豪雨と強風の両面から指標化した研究をもとに、アメダス観測開始以降 43 年間の変遷を概観し、その間に発生した風倒木被害と強風の関係を見てみたい。

9.4.2 豪雨と強風から見た台風の影響度

気象庁では、台風の勢力を示す目安として、10 分間平均風速をもとに、台風の「大きさ」と「強さ」を表現している。「大きさ」は強風域の半径で、「強さ」は最大風速で代表させている。しかしこれらはいくまで、台風の強度を中心付近の特徴で表したもので、台風からの総合的な影響（とくに災害に対する）の程度を表したものとはなっていない。

台風による影響は、主に大雨と強風という二つの側面から捉えることができるとして、台風の影響を見積もるために、国立情報学研究所の北本朝展は台風インパクト指数（大雨指数+強風指数=総合指数）なるものを提案している。台風インパクト指数に関する以下の説明やデータは、「<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/disaster/>」から引用したものである（主に 2020 年 7 月 26 日参照）。

大雨インパクト指数は次のように定義されている。まず、全国のアメダス観測所への台風の最接近時刻を中心としたひと雨を台風の影響を受けた期間内の総降水量とする。全国のアメダス観測所のひと雨降水量を単純合計して、最大の台風の値を 10,000 として規格化した数値を大雨インパクト指数とする。

一方、強風インパクト指数の定義は次のようなものである。全国のアメダス観測所への台風最接近時刻の前後各 24 時間の最大風速の最大値を、個々のアメダス観測所での当該台風による最大風速とする。風のエネルギーが風速の 3 乗に比例することから、最大風速の 3 乗を全国のアメダス観測所について合計し、最大の台風の値を 10,000 として規格化した数値が強風インパクト指数である。

2つの指数を単純に合計したものを総合インパクト指数とする。台風インパクト指数には、台風本体の雲の要因だけではなく、梅雨前線や秋雨前線の活発さなど、もともと雨が降りやすい状況が生まれていたかどうかという要因も考慮され（大雨インパクト指数）、また、台風進路と日本との位置関係、台風の進行速度などの要因も考慮されている（強風インパクト指数）。

アメダス観測が開始された 1976 年以降 2018 年までの 43 年間の 770 台風を、10 年毎に区切り（最後は 3 年）、「台風インパクト指数 2 次元ヒストグラム」として表したものが図 9.4.1(1)~(5)である。

- (1) 1976~1985 の 10 年間（170 台風）
- (2) 1986~1995 の 10 年間（205 台風）
- (3) 1996~2005 の 10 年間（186 台風）
- (4) 2006~2015 の 10 年間（156 台風）
- (5) 2016~2018 の 3 年間（53 台風）

図 10.4.1 で、縦軸は大雨インパクト指数、横軸は強風インパクト指数である。図の左上は「雨台風」タイプ、右下は「風台風」タイプ、右上は雨風ともにインパクトが大きい総合的に強大な台風で

ある。なお、図中の丸数字は表 9.4.1 の No.に対応している。

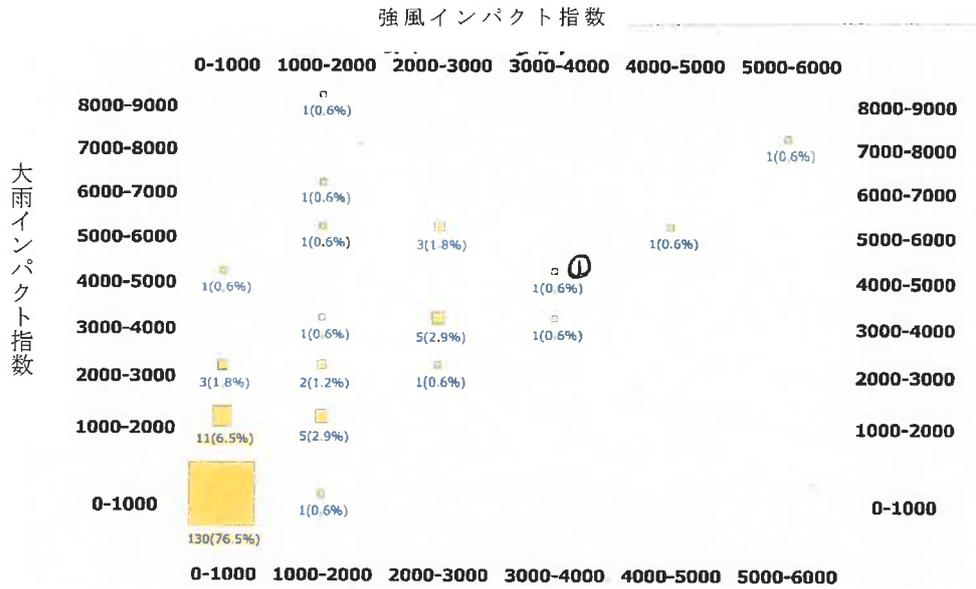


図 9.4.1(1) 2次元ヒストグラム (1976~1985)

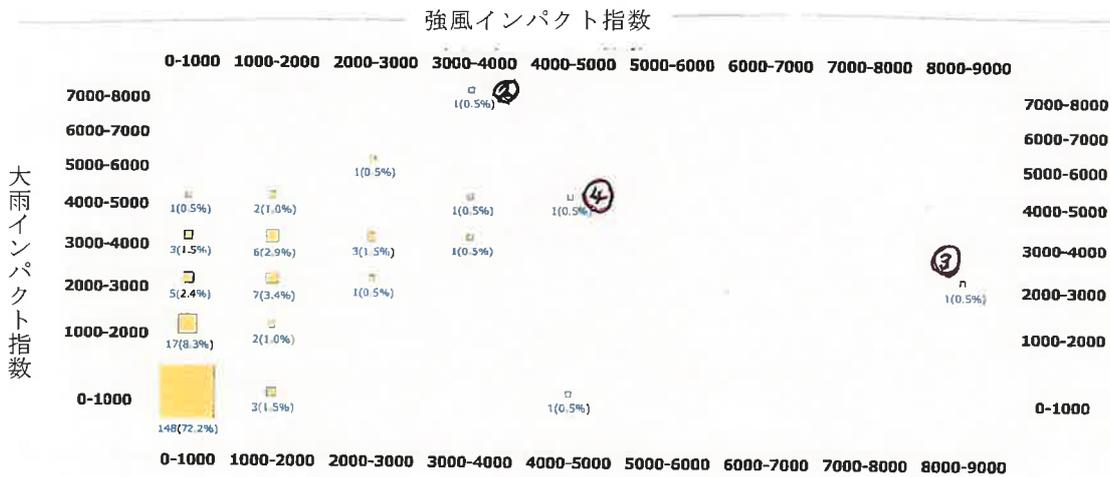


図 9.4.1(2) 2次元ヒストグラム (1986~1995)

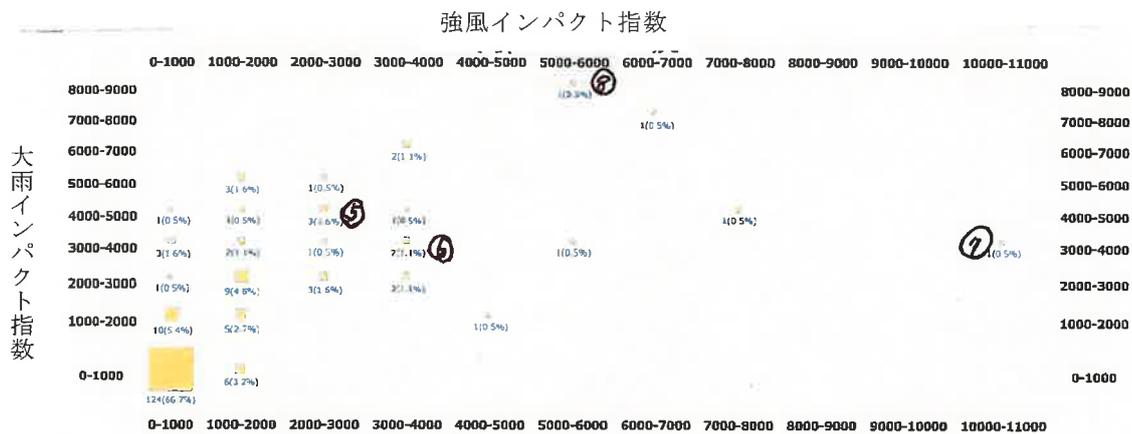


図 9.4.1(3) 2次元ヒストグラム (1996~2005)

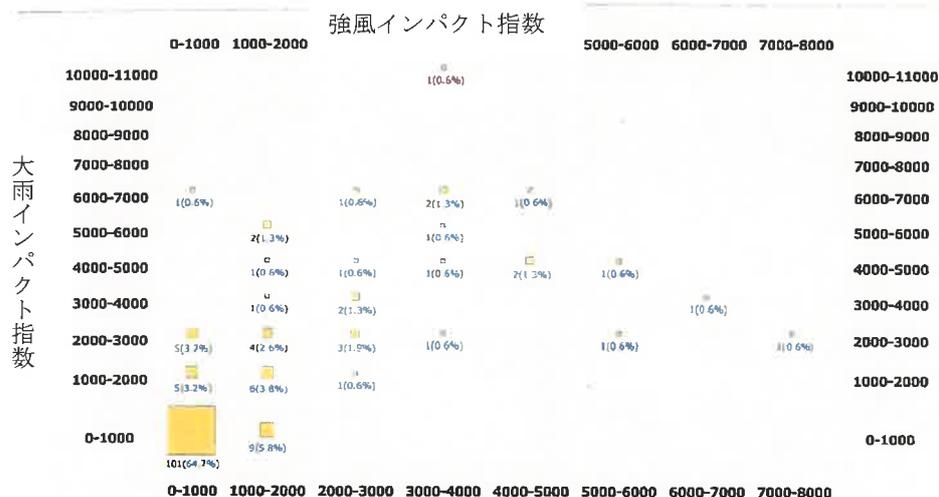


図 9.4.1(4) 2次元ヒストグラム (2006~2015)



図 9.4.1(5) 2次元ヒストグラム (2016~2018)

9.4.3 43年間の変遷

日本列島を襲う台風の年々の数には大きな変化は見られないが、大雨と強風のインパクト指数がそれぞれ5,000以上の台風に限ると、その個数の変化は次のようになる。

期間	大雨	強風	両方
(1)	8	1	1
(2)	2	1	0
(3)	8	5	2
(4)	9	4	0
(5)	4	4	2

最後の(5)の期間が3年間であることを考えると、大雨インパクト指数5,000以上の台風の数には大きな変化は見られないが、強風インパクト指数5,000以上の台風は、1996年以降明らかに増加して

いる。

図 9.4.2 は、1976~2018 の間の全 770 台風をまとめて示したヒストグラムである。そこに図 9.4.1 の(1)~(5)の大まかな分布範囲を記入してある。この図からも、雨の降り方に大きな変化は見られず、年ごとに大きな強風を伴った台風が現れる傾向が見える。強風インパクト指数が飛び抜けて大きな台風が、各期間の台風の分布範囲を細長く引き延ばしている。ここでの大雨インパクト指数は中程度である。

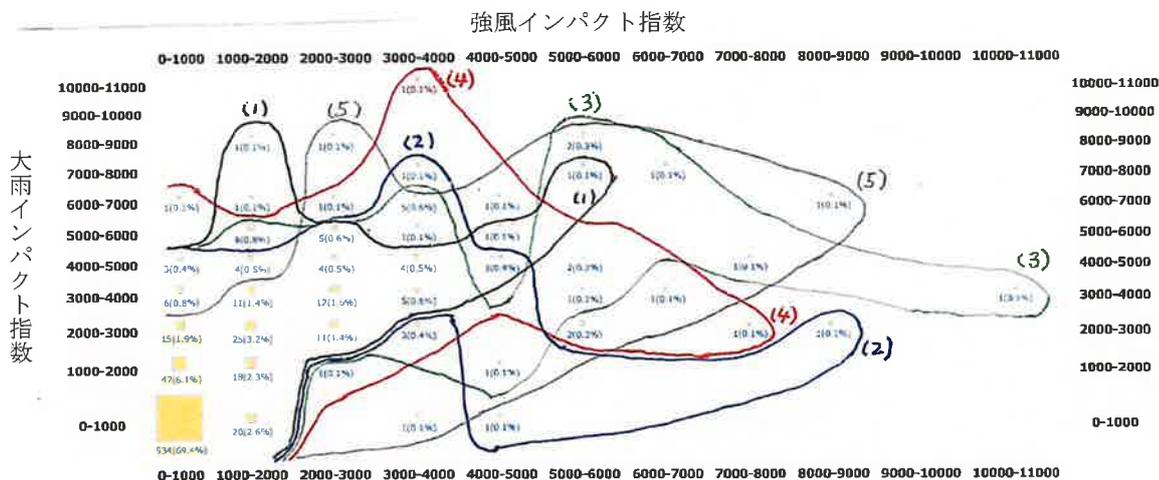


図 9.4.2 2次元ヒストグラム (1976~2018)

9.4.4 風倒木被害を発生させた台風のインパクト指数

いくつかの道府県で風倒木被害を発生させた台風を取り上げ、その道府県における風倒木被害面積、その近辺での最大風速と最大瞬間風速、台風インパクト指数をまとめたものが表 9.4.1 である (台風を選択には、表 2.1.13~表 2.1.16 と、表 9.3.1~表 9.3.2 を参照した)。

表 9.4.1 風倒木被害をもたらした台風のインパクト指数

No.	台風番号	大雨指数	強風指数	総合指数	最大風速 (m/s)	瞬間最大風速 (m/s)	場所	風倒木被害面積 (ha)
1	198115	4,981	3,700	8,681	27.7	38.6	北海道	58,780
2	199019	7,833	3,966	11,799	22.0	56.1	三重県	2,700
3	199119	2,391	8,052	10,443	25.6	54.3	大分県・福岡県	29,722
4	199313	4,374	4,931	9,305	36.5	59.1	鹿児島県	6,500
5	199807	4,446	2,841	7,287	43.5	58.5	奈良県	4,227
6	200221	3,259	3,032	6,291	30.7	53.0	北海道	18,000
7	200418	3,150	1,000	13,150	27.6	51.5	北海道	37,000
8	200423	8,427	5,827	14,254	25.1	51.9	兵庫県	3,244
9	201610	2,354	2,214	4,568	24.8	36.1	北海道	9,000
10	201821	2,672	5,840	8,512	46.5	58.1	大阪府	723

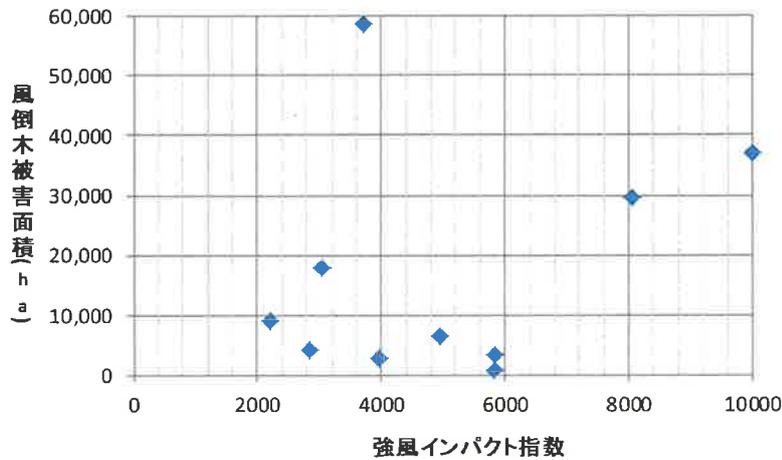


図 9.4.3 強風インパクト指数と風倒木被災面積

風倒木被害面積は、どの程度管理された森林が、どの程度の広がりを持って分布しているのかなどに左右され、一概に風速と対応するものではない。したがって、最大風速や最大瞬間風速との相関は見られない。因みに、強風インパクト指数と風倒木被害面積との関係を示すと図 9.4.3 のようになる。強風インパクト指数が 6,000 以下ではこれと言った相関は見られないが、6,000 を越えると被害面積は大きくなる傾向がある。

9.4.3 項で述べたように、今後、強風インパクト指数の大きな台風が増加すると予想されるので、風倒木被害が生じないような対策が必要である。

9.4.5 おわりに

風倒木被害の原因としての台風の要因は、強さ、頻度、経路である。強さと頻度については上で概観してきた。すなわち、日本列島を襲う台風の個数はこの 43 年間でほとんど変化していないこと（年平均 18 個程度）、豪雨をもたらす台風（大雨インパクト指数が 5,000 以上の台風）の個数も年平均 0.7 個程度でほとんど変わっていないこと、その強度も年々激しくなっているような傾向にはないこと（図 9.4.2 参照）、などが明らかになった。

一方、強風をもたらす台風（強風インパクト指数が 5,000 以上の台風）の個数は、1996 年以降大幅に増加した。1996 年以前の 20 年間は 2 個だったが、その後の 23 年間では 13 個に増加している。図 9.4.2 に見られるように、その中には散発的に強度が著しく大きい台風が出現している。

経路については、強風インパクト指数の中で多少考慮されているようである。表 9.4.1 では、1998 年以前の風倒木被害が、台風 198115 を除いて、九州を始めとする西日本に集中しているが、それ以降、北海道にも頻繁に台風が上陸し、その強風が風倒木被害をもたらしているということから、気候変動による台風の経路の変化も重要な要因になると考えられる。

9.5 森林に対する台風の影響度と被害林の特徴（川邊洋）

—9.4 節¹⁾の補遺—

9.5.1 はじめに

9.4 節では、台風の影響を豪雨と強風の両面から指標化した研究をもとに、アメダス観測開始以降 43 年間の台風の変遷を概観し、その間に発生した風倒木被害面積と強風の間関係を検討した¹⁾。本節はその補遺として、風倒木被害面積の人工林面積に対する割合と強風の間関係を概観し、樹種と可能な限り被害林の生育状況との関わりを調べることを試みた。

9.5.2 風倒木被害を発生させた台風と樹種、森林の状況

9.4 節¹⁾では、いくつかの道府県で風倒木被害を発生させた台風を取り上げ、その強風インパクト指数と各道府県における風倒木被害面積の間関係を検討したが、ばらつきの大きい結果となった（9.4 節¹⁾の図 9.4.3）。その理由として、次のようなことが考えられた。

- ・各道府県の森林面積に大きな差がある、
- ・風倒木被害を受けた森林の樹種は何か、どの程度管理された森林か、

などに左右され、単純に被害面積と強風が対応するものではない。本節では、各道府県の森林面積・人工林面積と、少なくとも被害木の樹種と管理状況（に特徴的な点があれば）に注目した。後述の表 9.5.1 の順番に、若干の説明を加える。なお、9.4 節¹⁾は大分県と福岡県を一括して示したが、本節では分けて記載した。

1. 1981 年 15 号台風（北海道）

1954 年の洞爺丸台風と比べると森林被害の規模は小さいものの、局地的に甚大な被害をもたらした。大雪、阿寒山系など十勝地方や富良野地方で、トドマツ・エゾマツ天然林の被害が見られたが²⁾、十勝、上川、日高支庁では、大半がカラマツ人工林の被害であった³⁾。

2. 1990 年 19 号台風（三重県）

風倒木被害林はヒノキ・スギの人工林であった⁴⁾。

3. 1991 年 19 号台風（大分県）

日田地方では、スギ・ヒノキを中心とする針葉樹地帯（内約 80%が人工林、その約 90%がスギ）が広がり、風倒木のほとんどはこのスギ・ヒノキであった⁵⁾。

人工林の被害は 22,019ha（天然林は 464ha）で、ほとんどが人工林である。これまでの台風では顕著な被害が森林に発生していないため、とくに強風害に対して鈍感になっていて、風に対して脆弱な構造のまま管理していた⁶⁾。

4. 1991 年 19 号台風（福岡県）

被害木はスギ・ヒノキの人工林である。樹齢数百年を越えるスギ老齢大径木にも多数の被害が発生、つまり数百年間は様々な気象害を受けることなく生育してきたということになる^{4) 7)}。福岡県の被害地は前項の大分県の被害地と隣接していることから、大分県と同様の状況にあったと言えるかもしれない。

5. 1993 年 13 号台風（鹿児島県）

被害はスギ・ヒノキの人工林で発生している。戦後の拡大造林政策の中で林地肥培が比較的大規模に行われ、そのような林分で被害が大きかった⁸⁾。

6. 1998 年 7 号台風（奈良県）

被害はスギ・ヒノキの人工林で発生した⁹⁾。

7. 2002年21号台風（北海道）

十勝支庁の総被害面積は約 8,400ha（内、防風保安林 1,500ha）で、樹種はカラマツ人工林であった。平坦な地形上に造成された樹木は、樹種そのものの耐風特性が大きく作用したものと考えられる¹⁰⁾。被害の中心は、カラマツ・トドマツなどの 20～50 年生の人工林であった¹¹⁾。

8. 2004年18号台風（北海道）

美唄市内の防風林ではカラマツ人工林¹²⁾、胆振、網走、石狩、支笏湖周辺ではカラマツ・トドマツ人工林¹³⁾が被害を受けた。また、羊蹄山麓、雄武町での被害林はトドマツ人工林であった¹⁴⁾。

9. 2004年23号台風（兵庫県）

被害はスギ・ヒノキ人工林で発生した。23号台風の直前に、16、18号という23号より強風インパクト指数の大きな台風が通過したが、とくに23号で甚大な風倒木被害が発生した¹⁵⁾。

10. 2016年10号台風（北海道）

トドマツ・カラマツ人工林で被害が発生した¹⁶⁾。

11. 2018年21号台風（大阪府）

街路樹や公園、緑地内での倒木が多い。高槻市内の被害は 613ha で、大阪府内の風倒木被害面積の 84%を占めているが、そこでの被害林はスギ・ヒノキ人工林であった¹⁷⁾。

9.5.3 強風インパクト指数と風倒木被害面積率との関係

表 9.5.1 に各台風の強風インパクト指数、各道府県の風倒木被害面積、森林面積、人工林面積およびそれらの比を示す。各道府県の森林面積と人工林面積は、2017年3月末の値（林野庁）であるが、1981年～2018年の約40年間には大きな変化はないものとみなした。

風倒木の樹種は、北海道のカラマツ・トドマツとそれ以外の府県のスギ・ヒノキの二通りのみである。いずれにしても被害を受ける森林のほとんどが人工林なので、風倒木被害面積の各道府県の人工林面積に対する割合（ a/c ）に注目する。強風インパクト指数と面積率（ a/c ）の関係を図 9.5.1 に示す。図中の番号は、表 9.5.1 の番号に対応している。

図中のプロットの（ a/c ）は、ほぼ強風インパクト指数に比例した直線状の配列をしている。10-7-2-5-11 の並びには、北海道のカラマツ・トドマツ（10, 7）、三重県・鹿児島県・大阪府のスギ・ヒノキ（2, 5, 11）が並んでおり、面積率の違いの要因には強風インパクト指数の違いのみが見られ、樹種の違いはほとんど見られないようである。ただ、地形の複雑さの違いを考慮すると、北海道は樹木そのものの耐風特性が際立つことになり¹⁰⁾、スギ・ヒノキよりカラマツ・トドマツの方が強風に若干弱いと言えるかもしれない。

福岡県（4）は、この 10-7-2-5-11 の並びから少々上方に外れているようであるが、数百年間は様々な気象害を受けることなく生育してきた⁷⁾という環境下での強大な台風襲来が被害を拡大し、隣接する大分県（3）と同様の被害状況⁶⁾にあったことが考えられる。

このプロットの並び 10-7-2-5-11 から上方に大きく外れているプロットの並びが見られる（6-1-3）。1の北海道にとって、1981年の台風15号は1954年の洞爺丸台風以来の久しぶりの台風で、被害が拡大してしまったのではないか。3の大分県では、前述のように、それまでの台風ではほとんど被害が発生しなかったため、強風に対して脆弱な構造のまま管理していた⁶⁾ということもあり、それが被害拡大の大きな原因であろう。この 6-1-3 を結ぶ直線は、強風に対する管理が行き届いていない人工林の被害面積率を表しているように見える。なお、6の奈良県の被害が大きい理由はよく分からない。

一方、10-7-2-5-11 のプロットの並びから下方にずれているプロットの並びも見られる (9-8)。兵庫県 (9) は短期間に三つの台風が襲ったにも拘わらず¹⁵⁾、被害が少ない理由は不明である。8 の北海道の被害面積率が小さい理由もよく分からないが、23 年前の 1981 年 (1) と 2 年前の 2002 年 (7) の台風を経験し、2002 年 (7) の台風では 20~50 年生のカラマツ・トドマツ人工林が被害を受けた¹⁴⁾ということは、洞爺丸台風後から 1981 年の台風後の間に植栽された人工林 (計算上 21~48 年生となる) が、2002 年の台風で被害を受けたことになり、2004 年の台風はその直後の台風だったことが、被害面積率が小さかった理由かもしれない。そのように考えると、下方にずれたプロット 9-8 を結ぶ直線は、度重なる台風に襲われて被害を受けた後に襲来した台風による被害を表しているとも考えられる。

9.5.4 おわりに

風倒木被害の原因としての台風の要因は、強さ、頻度、経路である。9.4 節の報告¹⁾では、日本列島を襲う台風の個数はこの 43 年間でほとんど変化していないこと (年平均 18 個程度)、豪雨をもたらす台風 (大雨インパクト指数が 5,000 以上の台風) の個数も年平均 0.7 個程度でほとんど変わっていないこと、その強度も年々激しくなっているような傾向にはないこと、などを明らかにした。

一方、強風をもたらす台風 (強風インパクト指数が 5,000 以上の台風) の個数は、1996 年以降大幅に増加した。1996 年以前の 20 年間は 2 個だったが、その後の 23 年間では 13 個に増加している。

経路については、表 9.5.1 では、1998 年以前の風倒木被害が、台風 198115 を除いて、九州を始めたとする西日本に集中しているが、それ以降、北海道にも頻繁に台風が上陸するようになり、その強風が風倒木被害をもたらしている。台風の経路の変化も重要な要因である。

表 9.5.1 風倒木被害をもたらした台風の強風インパクト指数と被害面積率

No.	台風番号	強風インパクト指数	道府県	風倒木被害面積 a (ha)	森林面積 b (ha)	人工林面積 c (ha)	a / b (%)	a / c (%)
1	198115	3700	北海道	58,780	5,538,447	1,475,342	1.06	3.98
2	199019	3966	三重県	2,700	372,230	229,969	0.73	1.17
3	199119	8052	大分県	22,483	452,791	233,485	4.97	9.63
4	199119	8052	福岡県	7,239	222,394	140,234	3.26	5.16
5	199313	4931	鹿児島県	6,500	587,983	278,601	1.11	2.33
6	199807	2841	奈良県	4,227	283,701	172,203	1.49	2.45
7	200221	3032	北海道	18,000	5,538,447	1,475,342	0.33	1.22
8	200418	10000	北海道	37,000	5,538,447	1,475,342	0.67	2.51
9	200423	5827	兵庫県	3,244	560,006	238,170	0.58	1.36
10	201610	2214	北海道	9,000	5,538,447	1,475,342	0.16	0.61
11	201821	5840	大阪府	728	57,220	28,140	1.27	2.59

林野庁 (平成29年3月末)

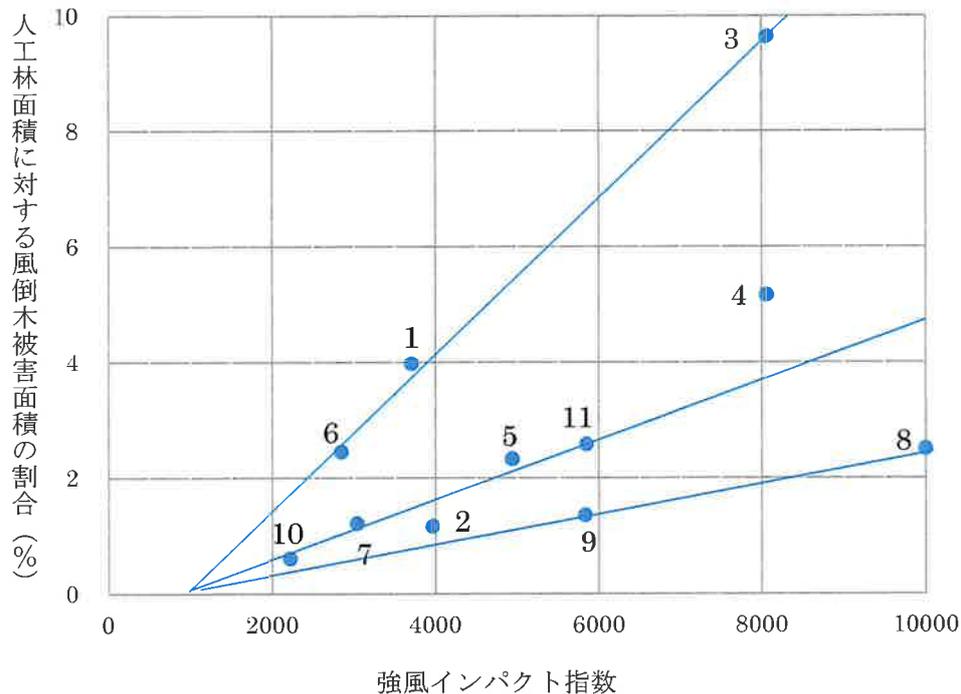


図 9.5.1 強風インパクト指数と風倒木被害面積率の関係

<引用文献>

- 1) 川邊 洋 (2020) 台風の災害に対する影響度の長年変化と近年の風倒木被害, 森林保全・管理技術研究開発委員会治山施設部会, 令和元年度報告書.
- 2) 高田功一・仁原勝男・佐藤義弘・柴田 前・渡邊定元 (1987) 1981 年の 15 号台風による森林被害—東京大学北海道演習林の例—, 日林北支論, 35, 25-27.
- 3) 水井憲雄・畠山末吉 (1984) カラマツ人工林の台風被害と耐風性, 北海道林業試験場研究報告, 22.
- 4) 陶山正憲 (1993) 台風による樹木の風倒・折損機構, 水利科学, 37, 25-53.
- 5) 宮本邦明・岡田 寛・高濱淳一郎・三重野友親・岩男道也・中尾 剛 (1992) 1991 年台風 19 号による風倒木に関する調査, 新砂防, 45(3), 18-23.
- 6) 諫本信義・高宮立身 (1992) 1991 年 9 月, 台風 19 号により発生した大分県における森林被害の要因解析, 森林立地, 34(2), 98-105.
- 7) 野田 亮 (1993) 1991 年台風第 17・19 号による福岡県の森林被害, 森林立地, 35(1), 50-59.
- 8) 木上真一郎・村上拓彦・溝上展也・吉田茂二郎 (2006) 九州における風倒木被害の発生リスクに関する研究レビュー, 九州森林研究, 59, 292-295.
- 9) 谷口房一・小川恒一・水山高久・藤田正治・小杉賢一朗・扇 行徳 (1999) 1998 年台風 7 号による奈良県南部の風倒木災害, 砂防学会誌, 52(2), 27-30.
- 10) 鳥田宏行 (2006) 2002 年台風 21 号により北海道十勝の防風保安林に発生した風害の要因解析, 日林誌, 88(6), 489-495.
- 11) 丹所俊博 (2003) 風倒被害木の材質調査, 林産試だより, 9 月号, 3-5.

- 12) 佐藤 創・鳥田宏行・真坂一彦・今 博計・澁谷正人 (2009) 防風林の風倒要因の解析—2004年台風 18 号による北海道美唄市の例—, 日林誌, 91, 307-312.
- 13) 鷹尾 元 (2005) 空から見た風倒害—2004 年台風 18 号が森林に遺した爪痕を探し求める—, 森林総研北海道支所研究レポート, 83.
- 14) 北海道立林業試験場 (2005) 2004 年台風 18 号被害に関する調査速報 (概要版) .
- 15) (社) 兵庫県治山林道協会 (2008) 平成 16 年台風による風倒木被害と再度災害防止対策.
- 16) 北海道水産林務部林務局森林整備課 (2018) 風倒木被害のリスクを軽減する森林づくり.
- 17) 東野隼士 (2019) 平成 30 年台風 21 号被害により直面した被災木処理の問題点について, 災害被災木等活用実態調査成果報告会資料, 日本木質バイオマスエネルギー協会.

9.6 風倒木災害の発生予測と治山分野での活用

風況シミュレーションはいろいろな解析モデルが存在するが, 樹齢や樹種毎の森林の強度を考慮したシミュレーションは無く, 風況シミュレーションを用いて風倒木災害を事前に予想することは難しい。一方, 風倒木災害に対して弱い森林の条件に関する情報は揃いつつあることからその情報を治山分野でどのように活用するかが重要となる。

10. 治山施設の適正配置と機能強化に対する検討

<全体方針>

- ①基本は保全対象の重要度や影響の大きさ(距離等)による仕様の変更→その判断基準を明確にする。
- ②「気候変動により災害の頻度や規模が増大する」+「治山予算の中で実施可能な内容」が前提。
- ③森林基本図の利用や簡易法による土砂量の算出など、古い慣習に対する新技術の活用促進を共通項目として記述する(レーザ・プロファイラ等による地形図での計画図面等)。
- ④重要な保全対象がある場所に特定すると、適用できる条件が限定的となり、その他の一般的な治山施設には関係無いということになる。重要な保全対象が無い、通常の治山施設でも実施した方がよい対策を提案する。
- ⑤優先度が高い地域における数百年超過確率雨量規模の土石流・流木災害を想定した、「基本的な機能を喪失することのない対策施設の設計と設置」の具体化。→確率水文量が治山施設の機能強化に直接的に影響するのは土石流の流体力を考慮した治山ダムのみであるので、本章全体として重要度は低い。

10.1 林野庁の最近の取り組み

林野庁では、気候変動による山地災害や洪水被害の激化を踏まえ、令和2年9月に学識経験者からなる検討会を設置し、豪雨災害に関する今後の治山対策の在り方について技術的な検討を進めている。令和3年3月に、同検討会(座長:石川芳治 東京農工大学名誉教授)の検討内容がとりまとめられた。その概要を以下に述べる。

10.1.1 近年の豪雨災害を踏まえた治山対策の取り組み状況に関する評価と課題

- (1) 降雨形態の変化による降水量・流量の増加によって、山地災害の発生形態も変化しており、以下の特徴がみられる。
 - ① 山地の尾根部付近(注:森林土壌中の水分量が飽和状態になりにくい地点)からの崩壊が多発し土石流化したことによる下流への流出土砂量の増大(崩壊の過程としては尾根部付近が飽和状態となり水が噴き出して崩壊に至るケースが多いが、溪流における深い層の崩壊が尾根部にまで発達(後退)するケース、侵食が尾根部付近まで発達(到達)するケースもある)
 - ② 崩壊の同時多発化
 - ③ 深層崩壊の発生
 - ④ 洪水流量の増加による流木災害の激甚化
- (2) 山地災害の発生形態の変化に対応していくため、災害復旧に向けた対応と並行して技術的な検討会を設置し、災害発生メカニズムの分析や施設配置の考え方等被災地以外でも取り組むべき施策の方向性について取りまとめを行った。
- (3) 特に、流木対策については、平成29年7月九州北部豪雨の発生以前は設置地域に限られていた「流木捕捉式治山ダム(いわゆるスリットダム)」が全国で約100基集中的に設置された。加えて、新たな対策として、都道府県・森林管理局が、スリットの配置を工夫し流木の捕捉効果向上を実証する取組や、既存の治山施設に流木捕捉機能を付加し、低コスト・短期間での機能向上を可能

とする取組も進めるなど、技術開発が各地で進み始めたところである。

(4) 災害が多発化・激甚化し、被災地域の復旧対策が優先される状況にはあるが、山地防災力を高めていくためには、山地災害危険地区等における予防治山対策の計画的かつ効果的な推進が今後の課題である。また、令和元年東日本台風における千曲川や阿武隈川、令和2年7月豪雨における球磨川、最上川等のように流域面積が広い大河川において甚大な洪水被害が発生しているところであり、治水対策の推進と併せて森林の洪水緩和機能発揮に対する要請も高まっているところである。

<引用文献>

林野庁（2021）：豪雨災害に関する今後の治山対策の在り方検討会 とりまとめ

10. 1. 2 気候変動を見据えた森林の土砂流出防止機能・洪水緩和機能の維持・向上のための対策

(1) 表層よりもやや深い層からの崩壊発生が増加していることへの対応

- ①発生源の対策や監視にも取り組むことが必要である。対策や監視の対象とする箇所抽出には、リモートセンシング技術による微地形判読を有効に活用すべきである。
- ②対策については、現地へのアクセス条件等施工性や経済性を踏まえつつ、雨水の分散や排水を図るなど崩壊発生自体の抑制を図る対策（例えば簡易な筋工、柵工、カゴ工、斜面補強土工等の設置）を検討すべきである。
- ③山地尾根部等における災害発生の予兆観測については、現地踏査やリモートセンシング技術を活用した斜面における亀裂の発生状況の確認等既存の方法に加え、土壌の水分量や電気伝導度、水温等を測定することにより崩壊発生につながる地下水の動態を把握する手法の有効性が確認されている。

(2) 流量増による溪流の縦横侵食が激化していることへの対応

- ①溪流における治山施設の配置の工夫により対処していくことが必要である。具体的には、
 - ア．集落等保全対象の近接地においては土石流の衝撃にも対応できる構造の治山ダム（天端幅：2～4 m）とするとともに、上流における不安定土砂の流出・生産が多く、かつ繰り返しのメンテナンスが可能な場合にあつてはダム上流側に一定程度の貯砂容量を持たせるタイプの治山ダムを設置すること。
 - イ．保全対象から一定程度距離がある流下区域においては、施工性やコストの観点も考慮しながら比較的規模の小さい治山ダムを階段状に設置することにより溪流の縦横侵食を防止すること等、溪流の状況等を踏まえながら、タイプの異なる治山ダムを効果的に組み合わせて溪流全体を安定化させることに一層留意すべきである。
- ②特に、流下区域にきめ細かく配置する階段状の治山ダムについては、都市部などではその効果を実感しにくい面があるが、過去の山地災害の発生例を検証しても、こうしたきめ細かな対策が講じられていた溪流において、土砂や流木の流出量が抑制された例がいくつも確認されているところである。

今後集中豪雨が激化すれば溪流の土砂がより移動しやすくなることから、溪流の治山施設計画の

策定に当たっては、流下区域の対策も十分配慮すべきである。

- ③他方、近年、同一地域に豪雨が繰り返しもたらされることにより、溪流が激しく侵食された結果、設置時に想定していた治山ダムの堆砂勾配よりも緩い勾配で堆砂する（すなわち想定以上に溪流が侵食される）ケースも見られる。これは、過去からの治山対策等の実施により森林再生が図られたことから、土砂の生産が減少した一方、豪雨が激化し流量が増加したことによるものと推察される。

こうした事象が発生した際、階段状に治山ダムが配置されている溪流では、治山ダムの連結により想定していた堆砂の勾配が維持できず、ダム下流での洗掘が発生し、溪流の不安定化を招くおそれがある。このため、豪雨に見舞われた際には、治山施設の点検を速やかに実施し、必要に応じて既存の治山ダムの補強等の対策を講じるべきである。

また、新たに治山ダムの配置を計画する場合（特に保全対象が集中するような重要な箇所）であって、近年の豪雨により荒廃した溪流が近隣に存在するときは、当該溪流の安定勾配を参考にして施設配置をより高密度に計画するなど、標準的な基準だけで判断することなく、現地踏査等を通じて現場実態を把握した上で施設配置を検討すべきである。

- ④加えて、河川（本川）の流量が増加することにも留意すべきである。具体的には、支川の下流末端部（支川の出口）が本川の水衝部となる場合における支川の溪岸侵食抑制対策である。本川との合流付近の溪岸が絶えず侵食されれば、山脚の洗掘が常時発生するなど安定化が図られないおそれがあるため、溪流の施設配置計画の検討に当たっては、河川本川との合流点近くにおける溪岸侵食防止のための護岸工等（床固工、帯工）の設置も検討すべきである。

（3）溪流内・溪流沿いの危険木の量が増加することへの対応

- ①流木を流出させない対策と流木化させない対策の両面が重要である。前者の対策については、平成29年7月九州北部豪雨による流木災害発生以降に、全国的に取り組んできている流木捕捉式治山ダムの設置等の取組を引き続き継続していくべきである。

後者の対策については、洪水断面が大きくなり洪水に巻き込まれるおそれがある樹木の量が増加することを念頭に対策すべきである。具体的には、溪流沿いの立木のうち侵食を受け根が浮くなどして根系機能の発揮が期待できない状態となっているものを、帯状又は単木で伐採するとともに、将来、再度流木被害を招く危険性を低減するため、当該地を伐採後の植栽箇所から除外し周辺樹種の自然導入へ誘導する等林相転換を図っていくべきである。

伐採木の処理に際しては、施工の効率化を図りつつ、土壌を攪乱させないように林床保全に努めるとともに、流木化させない処理に留意すべきである。

- ②危険木の伐採幅や伐採方法については、過去の土石流等の流下痕跡や樹木の根張りの状況も踏まえつつ、施工効果や施工性の観点から、一定程度の規模を確保することが望ましい。
- ③近年、航空レーザ測量を活用し、流木化するおそれのある樹木の分布状況を把握する取組（総量を把握し、施設配置等の事業計画の立案につなげる動き）もみられるところであり、流域全体の事業計画の策定に当たってこうした取組の導入も検討すべきである。
- ④地形条件等によっては森林が溪流付近に存在することにより、土石流の流下エネルギーの緩衝機能や土石の捕捉効果等を発揮した例も確認されている。他方、豪雨の激化による流量増に対して、こうした機能をあらかじめ見込むことについては、特に堆積区域において、保全対象との関係性や土地利用の実態を踏まえ慎重に検討し、伐採・非伐採を判断していくべきである。

(4) 線状降水帯の形成等により山地災害が同時多発化していることへの対応

①治山施設が未整備の箇所です土石流等が発生した場合には、溪流の土砂・流木を巻き込んで高いエネルギーを維持したまま、下流の集落等へ直接土砂や流木が流出し、被害が拡大するおそれがある。

このため、今般決定された「防災・減災、国土強靱化5か年加速化対策」としての予算措置も活用しつつ、危険度が高くかつ施設が未整備となっている地域を優先して、着手率の向上を主眼に対策を講じていく必要がある。

②災害リスクの高まりが広域に及んでいるため、全ての箇所において短期間のうちに下流から上流にかけてきめ細かな施設配置を行うことは実態上困難であることから、保全対象の状況を踏まえ、施設配置に濃淡や事業期間の優先度を付ける等に留意すべきである。このため、地域関係者と連携しながら、整備水準、施設配置や優先度の考え方、警戒避難体制の強化などについて合意形成を図りつつ対策を進めていくことが肝要である。

③既に施設が一定程度配置されている地区にあつては、施設の追加設置のみならず、既存施設の嵩上げ・増厚等の既存施設の有効活用も検討すべきである。

特に、住宅密集地の上流等、狭小地を通過して現場に到達する必要がある等施工条件が厳しい箇所も多く存在する状況にある。このため、事業計画の立案段階から、復旧工法の決定のみならず、資材の搬入方法の選定についても実態に即したものとなるよう十分検討すべきである。また、こうした検討・実施には地元調整を含め時間を要することから、調査測量・工事の早期発注の取組にも努めるべきである。

(5) 対策対象箇所の選定方法の高度化について

①線状降水帯の形成等により山地災害が多発化することを踏まえれば、対策を優先・重点化すべき箇所を効率的に抽出していくことが不可欠となる。

②各地において、航空レーザ測量技術やCS立体図(注:地形図から判読できる3つの地形量「標高」「傾斜(slope)」「凹凸(曲率Curvature)」を異なる色調で彩色し、複数枚を重ねて透過処理することで立体表現した図法)等により微地形を把握し、その情報を元に現地調査を行うことで、効率的に治山施設の配置計画を策定する取組もみられるところである。

リモートセンシング技術を活用したデータとしては、空中写真、衛星画像データ、航空機やUAVを活用したレーザデータが挙げられる。活用の時期・目的によって、必要となる範囲、情報の内容・精度が異なることから、コストも考慮しつつ、最適な活用方法を確立すべきである。これまでは、山地災害の発生予測や発生状況の確認等概況把握に活用されることが主流であったが、災害の激甚化(復旧すべき箇所数の増加)を踏まえ、溪流の土壌侵食量の差分解析結果を活用するなどにより施設配置計画の策定への活用も積極的に進めるべきである。

また、リモートセンシング技術と現地調査の組み合わせについては、各地における事例を収集・分析し、担当職員が参考にできるよう組み合わせ方法等について標準化を図ることも必要である。

なお、対策箇所の選定に際しては、山地災害危険地区情報を活用して1次抽出した上で、リモートセンシング技術の活用により山地斜面における亀裂の発生状況、ガリーの発達状況、溪流の不安定土砂の堆積状況等に関する情報を組み合わせることにより、より現地実態に合った箇所の抽出が進むものと考えられる。

③近年の山地災害の激甚化や今後の気候変動に対応していくため、山地災害危険地区に関する判定情報の調査分析や精度向上に努めていくべきである。

具体的には、まずは、近年の山地災害発生箇所の被害調査やその周辺地域における災害リスクの分析を行い、危険地区情報の更新・反映に努めるべきである。さらに、今後の気候変動に対応した山地災害危険地区の運用に向けては、山地災害が発生した場合に、当該箇所やその周辺地域を対象にした調査・分析に継続的に取り組み、山地災害の発生メカニズムに関する情報の蓄積を進めていくべきである。その際、災害が激甚化すれば対応すべき箇所数が増加することから、レーザ計測等も活用しつつ効率的かつ効果的にデータ蓄積を行っていきけるよう、どのようなデータを蓄積するかについてあらかじめ整理し、関係者に周知しておくべきである。

(6) 発生源対策（ゼロ次谷）について

- ①発生源対策については、到達や資材の搬入が困難な場所もあることを十分考慮し、対策をすべき箇所については、保全対象の重要性を考慮して見極めていくとともに、簡易なものも選択肢として検討することが必要である。

例えば、小型の木製治山ダムの設置等を通じて崩壊発生源の溪流の安定化を図る取組例があり、その効果を検証し、横展開していくことも有効である。

- ②森林土壌及び根系の発達に伴い、近年の崩壊は森林の根系が及ばないやや深い層から発生していることも踏まえ、斜面の安定を補完する地山補強土工等の技術開発にも取り組むことは有意義であると考えられる。

- ③森林の根系機能については、垂直根に加え、水平根の土壌緊縛力に関するメカニズム把握に関する調査分析が進められているところであり、根系機能の評価に係る精度向上と発生源対策の効果的実施に資するため、引き続き分析を進めていくべきである。

また、立木間中央部における根量が多い方が、樹木同士が絡み合うネット効果による崩壊防止機能の高まりが期待できることが明らかになってきていることを踏まえ、自然災害や病虫獣害の被害により疎林となっている保安林等について、保全対象との関係性を踏まえながら、補植等の必要な対策を講じることについても検討すべきである。

(7) 土石流等の流下区域対策について

溪流における土石流の流量が増加し、流下エネルギーが増大するとともに、巨礫が含まれることにより、流下断面の増加や既存施設への衝撃力の増加が生じることを考慮し、治山ダムの施設配置の考え方に加え、放水路断面や袖部の取扱等の構造についても検討していく必要がある、関係事業の動向等も踏まえつつ、適時に技術的な検討を深めるべきである。

(8) 災害の激甚化へ対応する効率的な事業実施について

- ①対策対象箇所の抽出に当たっては、衛星画像、航空レーザ、ドローンレーザの使い分けを図ることや、施工期間の短縮や施工の効率化に当たっては、二次製品や現地発生材の有効活用、ICT等の新技術の導入を積極的に導入していくべきである。また、これら取組の横展開を図るため、各地における研修や実証的取組等も進めていくべきである。

- ②近年、激甚化する山地災害への初動調査として、森林管理局と関係都道府県の合同によるヘリコプターや UAV を活用した被害状況調査を積極的に実施する等、各地において早期復旧に向けた取組が進められているところである。

今後、気候変動に伴い山地災害の発生が激甚化・広域化していくことが見込まれる中、災害発生

状況の迅速な把握が一層求められることとなる。このため、初動調査に当たっても、上述の対策対象箇所の抽出と同様に、災害の規模や求められるデータに応じて多様な手法を効率的に組み合わせる知見の収集・蓄積や関係機関との共有を進めるべきである。

加えて、被災地域の荒廃状況に関するデータの収集・蓄積は貴重な情報であり、その分析を通じて施策の見直し等につなげていくべきである。

<引用文献>

林野庁（2021）：豪雨災害に関する今後の治山対策の在り方検討会 とりまとめ

10.2 治山技術基準の現状と課題

10.2.1 治山技術基準における確率水文量の算出方法

治山技術基準解説－山地治山編（林野庁，2020）に掲載されている確率水文量の算出方法は、対数正規分布や対数ピアソンⅢ型分布を利用した日雨量などの確率水文量の算出方法と流出解析に利用する降雨強度式の設定方法である。降雨強度式の設定方法については岩井・石黒（1970）の方法が紹介されている。

10.2.2 外力の計画規模を考慮した治山施設

確率水文量などを治山施設の計画規模や設計に反映するのは、治山堰堤の計画高水流量と土石流ピーク流量，土石流流体力の算出である。計画高水流量は土石流ピーク流量算出や放水路断面の形状検討に利用される。

一方，山腹工の計画・設計には確率水文量は利用されない。

10.2.3 治山施設の配置に関する治山技術基準の記述内容

治山技術基準解説－総則・山地治山編（林野庁，2020）に記載されている治山施設の配置に関する具体的な記述は以下の通りである。アンダーラインの赤文字の部分は2020年版の改定で追記された内容である。流域の土砂管理は砂防事業で行っており，治山事業の中では流域の土砂を管理する記載は無い。（本項の赤字は2020年版で追記・修正された箇所）

< 3-2-1 山地治山計画において計画すべき内容 >

山地治山計画は，溪間工，山腹工，森林整備等を適切に組み合わせて，荒廃地の復旧及び荒廃の未然防止を行うよう策定するものとする。

〔解説〕

- 1 山地治山計画においては，山腹荒廃地の復旧，山腹荒廃危険地の荒廃防止，荒廃溪流における縦横侵食防止等を行い，森林の生育基盤の維持形成を図るとともに，山地災害を発生させるおそれのある荒廃地等を直接復旧・整備する発生源対策を検討するものとする。
- 2 荒廃地の復旧及び荒廃の未然防止に当たっては，荒廃の程度，下流への影響度合いを考慮して発生源対策の内容等を定めるとともに，荒廃特性に適合した工種・工法を検討するものとする。
- 3 荒廃地の拡大，土石流の発生等により下流に大きな影響を及ぼすおそれがある場合は，予防対策を含めた総合的な対策を検討するものとする。
- 4 治山施設の配置，工種・工法の選定等に当たっては，治山施設の新設費用のみでなく，耐久性，将来の補修等も含めた総合的なコスト縮減対策の推進を考慮した計画となるよう努めるものとする。
また，長期にわたり治山施設の機能の維持が図られるように，既存の治山施設の適切な補修や機能強化を考慮した計画となるよう努めるものとする。
- 5 地すべり又は森林整備に関する計画及び設計に当たっては，第4編「地すべり防止事業」，第5編「保安林整備事業」に準じて行うものとする。

〔参考〕近年の災害状況を踏まえた対策（複合防御型治山対策） 近年の災害では，① コアストーンを含む巨石や土石流への対策，② 脆弱な地質地帯における山腹崩壊等対策，③ 流木対策等，複合

的に対策を講ずるべき箇所が確認されている。このことから、溪流の発生区域、流下区域、堆積区域の特性や、地形や地質等の条件を整理し、有機的に組み合わせて山地災害を効果的に防御する複合的な治山対策を検討する必要がある。

参考文献

林野庁:治山施設に係る個別施設計画策定のためのガイドライン, 平成 28 年 3 月

林野庁:治山施設個別施設計画策定マニュアル, 平成 30 年 3 月
林野庁:「平成 30 年 7 月豪雨を踏まえた治山対策検討チーム」中間取りまとめ, 平成 30 年 11 月

< 3-2-3 山腹荒廃危険地対策 >

山腹荒廃危険地においては、対象とする山腹斜面の自然的条件及び社会的条件を踏まえ、発生源対策、落石及び崩壊土砂の流出防止対策並びに森林の土砂崩壊及び流出防止機能を高めるための森林整備を適切に組み合わせて計画するものとする。

〔解説〕

1 山腹荒廃危険地対策は、山地災害危険地区及び、その他の山腹荒廃危険地であって保全対象との関係から対策を実施する必要性の高い箇所を重点的な対象として計画するものとする。

2 工種・工法の選定に当たっては、地質、地形、林相※等の自然的条件及び山腹斜面の上下部にある保全対象等の社会的条件を踏まえて、総合的に判断するものとする。(※旧版の「土質、風化状況、傾斜」が削除され「林相」が追加された。)

< 3-2-3 土石流・流木※対策 >

土石流・流木※の発生のおそれのある溪流においては、土石流及び流木に起因する山地災害を防止・軽減するため、流域の特性に応じて、荒廃地等の復旧・整備を含めた発生源対策や、溪床の縦横侵食の防止対策等を総合的に計画するものとする。(※「土石流等」が「土石流・流木」に変更されたが、元々「等」の中に流木に関する記述は含まれていた。)

〔解説〕

- 1 土石流・流木対策は、山地災害危険地区や、その他の土石流（泥流、土砂流を含む）・流木の発生が危惧される溪流等と保全対象との関係から、対策を実施する必要性の高い箇所を重点的な対象として計画するものとする。
- 2 土石流・流木に起因する山地災害対策においては、いわゆる流動化のおそれのある山腹崩壊地等の復旧・整備を含めた発生源対策に重点を置きつつ、土石流・流木の流出区間を発生、流送、堆積等の区間に適宜区分の上、他事業との連携・調整も踏まえ、それぞれの土砂移動の特性に応じた工種・工法を選定するものとする。
- 3 流木対策は、流木の発生形態が土石流に伴う場合と洪水流に伴う場合があることから、形態に応じて土石流を中心とする計画ないし流木対策を中心とする計画を選択するものとする。なお、流木が堆積し流出のおそれがある場合は、必要に応じて、流木等の除去を行うよう計画するものとする。
- 4 治山施設の設置を計画する場合は、地域における治山施設の整備状況等を踏まえ、既存施設の嵩上げ、増厚、スリット化等の機能強化を行うことも検討して計画するものとする。
- 5 火山地帯では、侵食谷の発達や火山噴出物が広範囲に堆積することによる浸透能の低下により、

泥流が比較的頻繁に発生することが多いことから、泥流対策を考慮して計画するものとする。

<参考文献>

林野庁：土石流・流木対策指針，平成30年3月

<引用文献>

林野庁（2020）治山技術基準解説—総則・山地治山編

岩井重久・石黒政儀（1970）：応用水文学，森北出版

10.3 山地災害対策に関する検討委員会からの提言内容（H27）

「今後の山地災害対策の強化に向けて（中間取りまとめ）（林野庁，2015）」の中で「山地災害対策に関する検討委員会（委員長：鈴木雅一，委員：石川芳治，執印康裕ほか）」の意見として挙げられている各種課題を以下に示す。

10.3.1 山地災害対策を巡る現状及び課題

（1）短時間強雨など極端現象の頻発や森林の高齢級化に伴う山地災害の発生形態の変化

- ①森林の高齢級化が進む中，短時間強雨など極端な現象の影響もあり，山地災害は，成熟した壮齢林においても多く発生。
- ②壮齢林が崩壊や土石流等の発生源となる結果，斜面上に生育する立木が崩壊等とともに流下し，橋梁等を閉塞することにより土砂の氾濫域が拡大し，被害の増大をもたらす流木災害が顕在化。
- ③特に脆弱な地質地帯においては，0次谷（谷頭部）を含む山腹斜面での同時多発的な崩壊が発生
- ④0次谷（谷頭部）での小規模崩壊が引き金となって発生する土石流のみならず，表面流水や浸透水が溪流沿いに集中・流下し，渓床堆積物の移動がきっかけとなって，渓床・渓岸の侵食等を繰り返しながら流下土砂量の規模拡大を招くタイプの土石流が発生（後者の場合，源頭部の崩壊は必ずしも明瞭でないが，下流での被害は甚大となる傾向）
- ⑤林木の根系が届かない不透水層を境界面として山腹が崩壊する深層崩壊が発生
- ⑥全国に約44万基（平成24年度末現在）の治山ダムが整備されるなど，既に多くのストックが形成されているが，記録的な豪雨等により，一度安定化した既往の治山事業施行地であっても，再び山地災害が発生するケースが顕在化。

（2）山地災害の激甚化に伴う人的・物的被害の拡大

IPCC 第5次評価報告書において，今世紀末までに極端な降水がより強く，頻繁となる可能性が非常に高いと指摘されていることを踏まえれば，山地災害の激甚化の傾向が今後一層顕著となることが見込まれる中で，これら地球温暖化による影響の軽減を図るための適応策を進めていく観点からも，国民の生命・財産等の保護により重点を置いた山地災害対策の充実強化を図っていく必要がある。

（3）国土保全の拠点となる農山漁村における生活基盤の脆弱化

国立社会保障人口問題研究所による将来人口の推計結果によれば，30年度には特に農林漁業の従事者数が多い市町村の人口減少率が大きくなる傾向が示されている。このような事態が進行すれば農山村における人々の生活基盤の脆弱化も懸念されるが，山地災害の発生はこうした流れを加速化させる可能性がある。農山村における人々の生活基盤を維持していく観点からも，山地災害対策を効果的に進めていく必要がある。

（4）山地災害危険地区の把握精度の向上の必要性

山地災害の発生メカニズムは，それぞれの箇所ごとの傾斜や地質・土質条件，森林の根系分布等の素因に加え，降雨等の誘因が複雑に絡み合っており，山地災害がいつ，どこで，どのような規模で発生するのか等を正確に予測するには技術的な困難を伴う。その中で，毎年平均2千件程度の報告がある山地災害の発生件数のうち，山地災害危険地区において発生するものの割合は，およそ4割強となっており，山地災害対策の対象を絞り込むに当たって，一定の役割を果たしてきたものと評価される

ものの、事前防災としての山地災害対策の効果を高めていくためには、さらにその把握精度の向上を図っていくことが重要である。

(5) 山地災害危険地区における保安林の指定割合や治山施設の整備水準の低位な状況

現在、集落周辺を中心に約 260 万 ha の森林（うち人工林が約 100 万 ha）が土砂流出防備保安林又は土砂崩壊防備保安林（以下、「土砂流出防備保安林等」という。）に指定されているが、保安林の指定が治山事業の着手と連動して行われる場合が多いこともあり、山地災害危険地区における土砂流出防備保安林等の指定の割合は、治山事業の着手率（平成 24 年度末現在で約 48%）を若干上回る水準にとどまっているのが現状である。さらに、治山事業が着手された山地災害危険地区であっても、必要な施設整備がすべて完了した、いわゆる概成に至った地区の割合はその 2 割強に過ぎず、多くは当面の対策のみがなされた段階にとどまっている状況にある。このように、近年の山地災害の発生リスクの高まりを考慮した場合、必ずしも十分な整備水準が確保されていない個所もあることから、事業の効果や地域のニーズ等を踏まえつつ、治山事業の整備水準を高めていく必要性についても考慮する必要がある。

10.3.2 事前防災対策としての山地災害対策の強化に向けた基本的な方向

(1) 山地災害が発生する危険性の高い個所の的確な把握

これまでの山地災害の発生事例から得られた統計的データや森林の土砂崩壊防止機能等に係る科学的知見等に基づき、現行の山地災害危険地区の調査基準について、近年の山地災害の発生状況や発生形態の変化等を踏まえながら詳細な分析を加えた上で、その精度の向上が図られるよう、所要の見直しを行うこととする。

(2) 山地災害危険地区の土砂流出防備保安林等の配備を通じた制度的運用の強化

山地災害の発生リスクが高い森林として把握された山地災害危険地区については、人工林を含め、国土保全上の重要性を踏まえ、土砂流出防備保安林等の配備を計画的に進め、伐採・開発等に対する一定の規制措置を講じ、治山事業の実施とともに、土砂崩壊・流出防止機能の十全な発揮を図っていくこととする。

(3) 保全対象に被害を与えるリスク判断を踏まえたメリハリのある事業個所の選定や事業計画の策定

具体的には、地形や地質条件等から判断される崩壊等を招く森林の潜在的な脆弱性、崩壊や土砂の流出状況等に応じて想定される被害の規模、保全対象との関係（迂回路のある道路か、あるいは人家の密集地か、崩壊は発生しているが保全対象への影響はみられないか等）、既存の治山施設の効果の発

現状況（土石流が想定される溪流であって、治山ダムの基数や強度等が不足している等）等、様々な条件を考慮して事業実施に係る優先度評価を適切に行う。

特に下流の人家等への被害が想定される土砂の崩壊や土石流等の発生源となる森林においては、土砂の生産・流出の場となる流域の中で、適切な配置計画に基づく治山施設の整備や健全な森林への誘導に向けた森林の整備を推進する。特に治山施設については、過去の被災事例から得られた教訓を踏まえ、近年顕著になりつつある溪流への出水の集中により生じる土石流流体力等の外力を的確に考慮

した必要な強度を有し、かつ、想定を超える外力によって施設の一部が破損した場合でも、下流に甚大な被害を及ぼさないよう、施設の最低限の機能は維持される性能を有するような、粘り強い構造とするなど、現地の状況に応じ、柔軟な対応を行うこととする。

また、このような事前防災・減災対策としての取組を効果的かつ効率的に進めていくためには、既に荒廃現象や崩壊の前兆現象がみられる森林のみならず、山地災害危険地区として把握された潜在的な崩壊等の危険性のある森林も含めた形で、下流の保全対象に被害を与えるリスクや事業実施による効果等を同一の尺度により判断した上で、事業実施後の保安林としての適切な管理も含めて、事業を計画していく必要があり、これらを踏まえた事業の進め方等についても検討が必要である。

(4) 生態系としての森林の機能と治山施設の機能を組み合わせた防災・減災対策の推進

今後、溪流を軸とした治山施設の整備にとどまらず、森林域における土砂の生産・流出の場となる発生源、流送区域、堆積区域を一連のものとして空間的に捉え、それぞれの立地特性に応じ、治山施設の整備と森林の整備を組み合わせた取組を行うことにより、根系の土壌緊縛力、下層植生の発達による土壌の侵食防止力や保水力を含めた形で、森林の持つ防災・減災機能を総合的に高める「緑の国土強靱化」を推進することとする。

(5) 既往の治山事業施行地における治山施設の機能強化を含む長寿命化対策等災害リスクの高まりに対応した整備水準の向上

既往の治山事業施行地において、治山施設の老朽化に伴う機能の劣化や治山ダムの下流のり先の洗掘等に起因する施設の不安定化等がみられる場合に加え、周辺地域における集中豪雨の頻発等により、災害外力が増大するリスクが高まっているなど、当該施設の施行当時よりも厳しい計画条件となっている場合においては、これらを考慮した構造等への見直し等を図るなど、当該施設の機能強化も含めた長寿命化対策や追加的な施設の配置、機能の低下した森林の整備等を推進し、森林の土砂崩壊・流出防止機能の持続的な発揮を図ることとする。

(6) ハード・ソフト施策の連携の強化

山地災害による被害の防止・軽減を図る観点から、治山施設の整備等ハード対策に加え、地域における監視・観測体制や避難体制の整備等のソフト施策との連携を強化する。

10.3.3 今後の主な取り組みに関する提言内容

(1) 山地災害危険地区の調査基準の見直し

山地災害危険地区の調査基準のうち、地形、地質、土層深、林木の樹種・齢級等の評価区分や評価点数等について、これまでの崩壊の実態分析や森林の土砂崩壊・流出防止機能等に係る研究成果等に基づき、その妥当性を検証した上で、調査基準の見直しを行う。特に、以前と比較して若齢の森林面積が大きく減少して全体として高齢級へ移行した現状を踏まえた齢級の評価を行うとともに、過去の観測記録を上回る豪雨が全国的に生じつつある中、これまで降雨量が比較的多い地域と少ない地域では、降雨量の変動に対する崩壊等の脆弱性に差があると考えられることから、これら降雨量に応じた地域特性を踏まえた山地災害の危険度判定手法の検討を行う。

また、溪床堆積物の上に植生が繁茂し、長期間にわたって安定している溪流であっても、過去の観

測記録を上回る豪雨に伴う外力が誘因となって土石流化するケースもみられることから、山地災害危険地区の調査データをもとに、航空レーザ測量成果を活用した微地形解析の手法等も取り入れ、個々の流域単位で崩壊等のリスク評価を行った上で、これを具体の山地災害対策につなげていくような取組を推進する。

山地災害危険地区の危険度の判定に当たっては、災害履歴、保全対象となる人家や公共施設等、林木の齢級等、時系列に変化する判定因子も含まれていることから、こうした変化を適時、的確に把握し、定期的に最新の危険度スコアに更新するなどにより、治山事業の優先度を随時見直していく。

(2) 適正な保安林の配備及び保全管理の推進

山地災害危険地区の土砂流出防備保安林等の配備に当たっては、治山事業施行地にあつては、当該治山事業の実施による効果の発現が一体のものとして捉えることができる全体計画の範囲を基本単位とし、治山施設の上流域や上部山腹斜面を含む森林の機能の発揮が効果的に図られる面的な区域を指定するなど、適正な配備に努める。

また、現時点では荒廃現象や崩壊を招く前兆現象が必ずしも明瞭な形では確認されていない山地災害危険地区も多く存在するものと見込まれるが、山地災害危険地区に係る調査基準に照らして精査した上でなお、山地災害危険地区としての基準を満たすものについては、保全対象の重要度等も勘案しながら、土砂流出防備保安林等の指定を早急に進めていくことが肝要である。

さらに、治山事業施行地については、工事概成後も森林の土砂崩壊・流出防止機能等が持続的に発揮されるよう、森林の保育・管理、治山施設の維持管理、周辺の保安林を含めた立木の伐採規制や開発規制等の施策を一体的に運用していく。

(3) 土石流・流木災害への対応の強化

人家等重要な保全対象を有する山地災害危険地区を中心として、流域内での土砂の生産・流出の場を一連のものとして空間的に捉えた上で、以下の取組を推進する。

①流域調査

航空レーザ測量データや森林GIS等の活用、土砂の崩壊・流出等のシミュレーションや森林の土砂崩壊防止機能の評価等を行い、具体的な治山施設の配置や森林の整備等事業計画の策定を効果的かつ効率的に行うための手法の高度化や汎用性の向上を図る。

②発生源

0次谷（谷頭部）や遷急線付近の発生源対策として、今後想定される崩壊の形態や規模、施工条件等に応じた山腹工（筋工、土留工、ロープネット工、アンカー工等）を計画する。加えて、土石流については、溪流を流下する過程で発達してエネルギーが増大し、衝撃力も大きくなるため、これをできる限り発生源付近で効率的に抑えることを基本として、治山ダムによる山脚固定、溪流内に堆積する不安定土砂の固定等を図る。

③流送区間

土石流等の発生源から流送区間における山脚固定や溪床勾配の緩和により、溪岸や溪床の侵食の抑制、土石流の流下エネルギーの軽減を図るための遮水型と透過型を組み合わせた階段状の治山ダム群を配置する。

この場合、下流の保全対象との関係等を踏まえ、集中豪雨等により想定される土石流流体力等の外力について、周辺地域における山地災害の発生状況等もみながら、ある程度幅を持たせた形で想

定した上で、適切な天端厚、鉄筋の挿入や背面への盛土等による袖部の補強、副ダム等洗掘防止対策等を加味した施設の計画、設計を行う。既存の施設については、嵩上げ、増厚、流木止めの付加、副ダムの整備等の機能強化及び透過型治山ダムの除石・除木等による機能維持を含む適正な維持管理・更新等の長寿命化対策を推進する。

また、流出土砂が溪流沿いの立木や倒木を巻き込み、流木化することにより土石流災害による被害の拡大を招くおそれがある。このため、溪流沿いに堆積又は倒伏している林木を流出させないための適切な処理を行う。

④堆積区間

堆積区間においては、想定を超えた規模で土砂が流出した場合の流出土砂の堆積促進機能や流木の捕捉機能を有する災害緩衝林として、立木の成長を促すための密度管理を主眼とした森林の整備及びその維持造成に必要な治山施設の整備を推進する。

(4) トータルコストの縮減による効率的な事業執行

具体的には、崩壊地であって、次期降雨による拡大崩壊のおそれが少ないと見込まれるとともに、保全対象に与える影響や将来的な植生回復の見通しを比較検討した上で妥当と判断される場合には、必要なモニタリングを行いつつ、自然の回復力を活用した復旧方法を検討する。

また、治山事業の施行に当たって、事業コストの縮減を図るため、木材や転石等現地発生資材を活用した工法等の普及を進める。さらに、これまでに整備された治山施設について、点検・診断を着実に実施し、その結果に基づき、必要な補修や更新等を適切な時期に実施するメンテナンスサイクルの構築を図るとともに、災害外力が増大するリスク等が想定される場合には治山ダムの嵩上げや増厚等の機能強化を行うなど、既存施設を有効活用した取組を推進する。

(5) 特異な山地災害への対応

記録的な豪雨の頻度が増えることにより発生が見込まれる深層崩壊については、現時点では山地災害危険地区としての的確に把握することは困難であり、当面、林野庁が平成 25 年度末にとりまとめた「大規模崩壊治山対策マニュアル」に基づき、地すべり防止事業を含む治山事業の実施区域等での試行事例を増やししながら、その汎用性を高め、対応力の強化を図る。

(6) 山地災害の発生メカニズム等の知見の向上に向けた調査・研究の推進

地球温暖化による降雨強度の増大等に対応していくため、山地災害の発生のメカニズムや森林が山地災害の発生を抑制する効果等について、その定量的な評価を含め、科学的な知見をさらに向上させるための調査・研究やデータの体系的な蓄積を進め、事前防災対策としての治山技術の高度化への活用を図っていく。

(7) ハード・ソフト施策の連携の強化

治山施設の整備等ハード対策に加え、荒廃地等の監視・観測体制の構築、山地災害危険地区や保安林の指定状況等を地図情報として住民に提供すること等による避難体制の整備等のソフト対策を効果的に組み合わせ、事前防災としての取組の強化を図る。

(8) 事業の実施体制の確保

国や都道府県等における研修や技術交流会への参加，業務に係る調査・試験研究の成果の発表の促進等を通じて，これら治山技術者の育成・確保を図っていく。

また，大規模な山地災害の発生時の現況調査や応急対策，災害復旧対策の立案等に当たっては，都道府県等の要請を踏まえ，林野庁，各森林管理局・署等の技術者や独立行政法人森林総合研究所等の専門家による支援や技術的助言等を迅速に行う。

<引用文献>

林野庁（2015）：今後の山地災害対策の強化に向けて（中間とりまとめ）

10.4 山地災害危険地区調査要領の現状と課題

山地災害危険地区調査要領（H28，林野庁）は，山腹崩壊危険地区調査要領（H28，林野庁），地すべり危険地区調査要領（H28，林野庁），崩壊土砂流出危険地区調査要領（H28，林野庁）の実施時期や調査結果の取りまとめ，報告・保管に関する内容をまとめたものである。個々の危険地区調査の現状と課題を以下に示す。

10.4.1 山腹崩壊危険地区調査の現状と課題

山腹崩壊危険地区調査は「今後の山地災害対策の強化に向けて（中間取りまとめ）（林野庁，2015）」などの提言を受けて，平成27年度流域山地災害調査（山地防災力調査）委託事業（林野庁，2016）が実施され，評価基準の見直しが行われ，「樹種」が調査項目から除外された。

表10.4.1は多雨地域の山腹崩壊危険度点数表，表10.4.2は非多雨地域の山腹崩壊危険度点数表である。表10.4.3は多雨地域と非多雨地域の区分である。当道府県単位で区分している。危険度評価には表10.4.4を用いるが，対象斜面の中の最危険となったメッシュの点数で危険度を評価する。

表 10.4.1 雨量区分，地質，地形及び林況による山腹崩壊危険度点数表（多雨地域）
（林野庁，2016）

調査項目	単位	区分	地 質							
			第1類	第2類	第3類	第4類	第5類	第6類	第7類	
1	傾斜	%	0~30	0	0	0	0	0	0	0
			31~50	8	16	17	22	27	25	20
			51~70	42	31	51	52	47	48	39
			71~90	62	48	59	55	69	57	63
			91~	70	56	51	60	59	44	71
2	縦断面形	凹形	30	24	25	26	29	25	31	
		平直	22	19	10	5	16	8	8	
		複合	8	14	0	0	0	13	4	
3	横断面形	凸形	0	0	5	5	6	0	0	
		~150	20	19	25	26	29	25	31	
		151~210	30	24	20	14	25	13	16	
4	上層深	m	211~	0	0	0	0	0	0	0
			0.5以下	0	0	0	0	0	0	0
			0.5~1.0以下	6	5	3	3	4	3	6
			1.0~2.0以下	10	8	8	9	10	8	10
5	齢級	2.0超	20	16	17	17	20	16	20	
		1	34	26	27	28	33	28	33	
		2~3	50	40	42	43	49	41	51	
		4~7	36	31	30	31	37	30	37	
		8~11	34	26	27	28	33	28	33	
12以上	30	24	25	26	29	25	31			

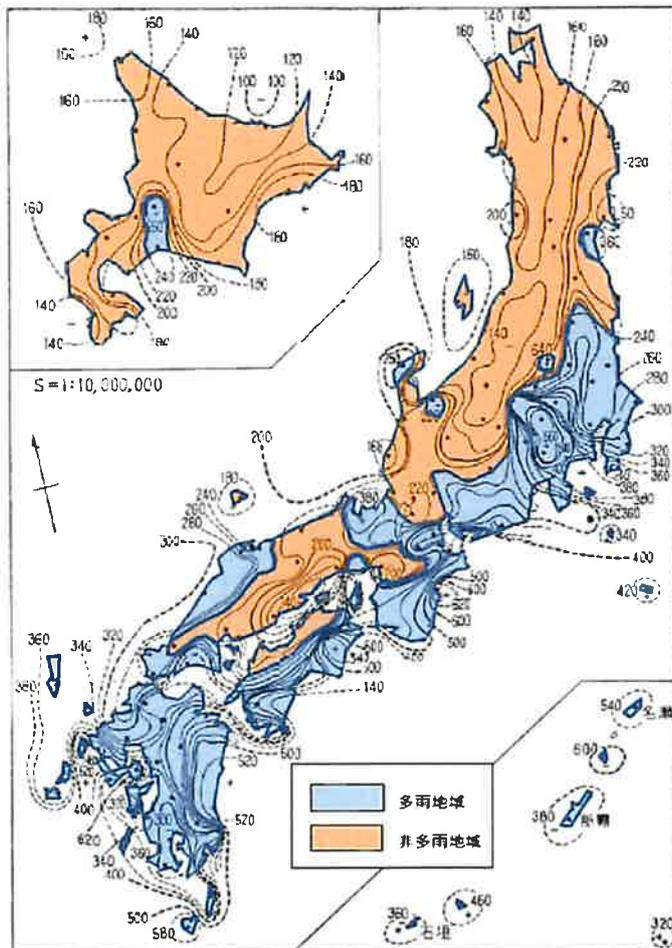
第1類 火山性の第四紀堆積物（シラス等の火山堆積物）
 第2類 水成の第四紀堆積物（洪積砂礫等）
 第3類 新第三紀層の堆積岩
 第4類 古第三紀以前の堆積岩（古第三紀層，中生層，古生層）
 第5類 火山岩（流紋岩，石英粗面岩，安山岩，玄武岩及びそれらの溶岩）
 第6類 半深成岩・深成岩（花崗斑岩，石英斑岩，玢岩，輝緑岩，花崗岩，閃緑岩，斑禰岩等）
 第7類 変成岩（動力及び接触変成岩，片岩類，蛇紋岩等）

表 10.4.2 雨量区分, 地質, 地形及び林況による山腹崩壊危険度点数表 (非多雨地域)
(林野庁, 2016)

調査項目	単位	区分	地質						
			第1類	第2類	第3類	第4類	第5類	第6類	第7類
1 傾斜	%	0~30	0	0	0	0	0	0	0
		31~50	6	22	13	12	31	23	14
		51~70	32	47	46	30	61	49	36
		71~90	49	60	51	42	71	66	60
		91~	54	64	46	52	61	57	70
2 縦断面形		凹形	23	27	22	22	31	28	30
		平直	5	18	16	12	18	17	5
		複合	0	13	0	0	0	21	0
		凸形	0	0	4	4	16	0	4
3 横断面形	度	~150	12	4	22	22	31	28	30
		151~210	23	27	19	12	12	15	20
		211~	0	0	0	0	0	0	0
4 土層深	m	0.5以下	0	0	0	0	0	0	0
		0.5~1.0以下	5	5	3	3	4	4	6
		1.0~2.0以下	5	9	7	7	10	9	10
		2.0超	15	18	15	15	20	19	20
5 粒径		1	26	31	25	25	35	32	34
		2~3	39	46	36	37	51	47	50
		4~7	28	33	28	28	37	34	36
		8~11	26	31	25	25	35	32	34
		12以上	23	27	22	22	31	28	30

第1類 火山性の第四紀堆積物(シラス等の火山堆積物)
 第2類 水成の第四紀堆積物(洪積砂礫等)
 第3類 新第三紀層の堆積岩
 第4類 古第三紀以前の堆積岩(古第三紀層, 中生層, 古生層)
 第5類 火山岩(流紋岩, 石英粗面岩, 安山岩, 玄武岩及びそれらの溶岩)
 第6類 半深成岩・深成岩(花崗斑岩, 石英斑岩, 玢岩, 輝緑岩, 花崗岩, 閃緑岩, 斑輝岩等)
 第7類 変成岩(動力及び接触変成岩, 片岩類, 結晶岩等)

表 10.4.3 山地崩壊危険地区調査実施要領における雨量による地域区分 (林野庁, 2016)



多雨地域		非多雨地域	
栃木県	徳島県	北海道	福井県
東京都	愛媛県	青森県	山梨県
神奈川県	高知県	岩手県	長野県
富山県	福岡県	宮城県	滋賀県
石川県	佐賀県	秋田県	京都府
岐阜県	長崎県	山形県	大阪府
静岡県	熊本県	福島県	兵庫県
愛知県	大分県	茨城県	鳥取県
三重県	宮崎県	群馬県	島根県
奈良県	鹿児島県	埼玉県	岡山県
和歌山県	沖縄県	千葉県	広島県
山口県		新潟県	香川県

注) 多雨地域と非多雨地域の区分は「100年確率日雨量の分布図(岩井・石黒,1974)」をもとに全国の面積が概ね半分となる240mmを閾値としている。

図 10.4.1 雨量による地域区分の根拠とした岩井・石黒(1974)の研究結果

「岩井重久、石黒政徳：応用水文統計学、1974」より抜粋、加筆修正

表 10.4.4 山地崩壊危険度判定表（林野庁，2016）

表-4-1 山腹崩壊危険度判定表（多雨地域）

危険度	危険度点数が最高点のメッシュの点数
a ₁	135 点以上
b ₁	125 点以上 135 点未満
c ₁	100 点以上 125 点未満

表-4-2 山腹崩壊危険度判定表（非多雨地域）

危険度	危険度点数が最高点のメッシュの点数
a ₁	125 点以上
b ₁	115 点以上 125 点未満
c ₁	100 点以上 115 点未満

表-5 被災危険度判定表

危険度	公共施設等の種類及び数量
a ₂	公用若しくは公共用施設（道路を除く。）又は 10 戸以上の人家がある場合
b ₂	5 戸以上 10 戸未満の人家がある場合
c ₂	5 戸未満の人家又は道路がある場合

表-6 山腹崩壊危険地区の危険度判定表

危険度	危険度点数
A	a ₁ -a ₂ 、a ₁ -b ₂ 、b ₁ -a ₂
B	a ₁ -c ₂ 、b ₁ -b ₂ 、c ₁ -a ₂
C	b ₁ -c ₂ 、c ₁ -c ₂ 、c ₁ -b ₂

地震による山腹崩壊危険度点数表を表 4.3.5 に、落石による山腹崩壊危険度点数表を表 10.4.6 に示す。表 10.4.7 は地震に関する地域別補正係数の地域区分表である。

表 10.4.5 地震による山腹崩壊危険度点数表（林野庁，2016）

調査項目		区分	点数
震央又は活断層からの距離	km	5未満	9
		5以上 10未満	5
		10以上	1
斜面傾斜	%	0~40	0
		41~60	1
		61~80	4
		81以上	8
斜面横断面形	度	0~150	2
		151~270	3
		271以上	0
斜面長	m	0~100	5
		101~200	4
		201~300	2
		301以上	0
メッシュの斜面位置	%	0~30	3
		31~50	0
		51以上	3
斜面の状況		火山性(噴出岩)の地質 オーバーハングが有る 表面に転石・浮石が多い 風化・変質・亀裂が発達した岩	3
		風化・変質した岩 亀裂の発達した岩 土砂・粘質土	2
		上記以外	1
		土層深	m
0.5未満	1		

IV. 治山施設の適正配置と機能強化に対する検討

表 10.4.6 落石による山腹崩壊危険度点数表 (林野庁, 2016)

調査項目	区 分		点数
	剥離型	転石型	
発生源の傾斜角	60度以上	60度以上	2
	60度未満	60度未満	1
落下の高さ	40メートル以上		2
	40メートル未満		1
岩石等の安定状況	容易に岩目から欠ける。 下方に落下しているものが多い。	落石の頻度大。 地上から浮き上がっている。 叩くと動揺する。	2
	上記以外	上記以外	1
落下斜面の植生状況	無立木地、崩壊地、幼齢林、草生地、老齢疎林		2
	上記以外		1
地震の強さ	地域別補正係数の地域区分表(表-7)から判定する	A	2
		B、 C	1

表 10.4.7 地震に関する地域別補正係数の地域区分表 (林野庁, 2016)

地域区分	都道府県	対 象 地 域	地域区分	都道府県	対 象 地 域		
A	北海道	釧路市、帯広市、根室市、沙流郡、新冠郡、日高郡、浦河郡、釧路郡、 幌泉郡、河東郡、上川郡(十勝総合振興局)、河西郡、広尾郡、 中川郡、足寄郡、十勝郡、釧路郡、厚岸郡、川上郡、阿寒郡、白糠郡、 野付郡、檜浦郡、目梨郡	B	北海道	上川郡(上川総合振興局)のうち東神楽町、上川町、東川町及び 美瑛町、勇払郡、網走郡、斜里郡、空知郡、有珠郡、白老郡		
	青森県	三沢市、上田田市、八戸市、上北郡、三戸郡		青森県	青森市、弘前市、黒石市、五所川原市、むつ市、つがる市、 平川市、東津軽郡、西津軽郡、中津軽郡、南津軽郡、北津軽郡、 下北郡		
	岩手県	全域		秋田県	全域		
	宮城県	全域		山形県	全域		
	福島県	福島市、二本松市、相馬市、南相馬市、いわき市、田村市、伊達市、 本宮市、伊達郡、相馬郡、安達郡、田村郡、双葉郡、石川郡、 東白川郡		福島県	会津若松市、郡山市、白河市、須賀川市、茂多市、吾妻郡、 鹿角郡、耶麻郡、河沼郡、大沼郡、西白河郡		
	茨城県	全域		新潟県	全域		
	栃木県	全域		富山県	魚津市、常川市、黒部市、下新川郡		
	群馬県	全域		石川県	輪島市、珠洲市、鳳珠郡		
	埼玉県	全域		富山県	魚津市、常川市、黒部市、下新川郡		
	千葉県	全域		石川県	輪島市、珠洲市、鳳珠郡		
	東京都	全域		富山県	魚津市、常川市、黒部市、下新川郡		
	神奈川県	全域		石川県	輪島市、珠洲市、鳳珠郡		
	長野県	全域		富山県	魚津市、常川市、黒部市、下新川郡		
	山梨県	全域		石川県	輪島市、珠洲市、鳳珠郡		
	富山県	富山市、高岡市、氷見市、小矢部市、砺波市、射水市、中新川郡、 南砺市		富山県	魚津市、常川市、黒部市、下新川郡		
	石川県	金沢市、小松市、七尾市、羽咋市、白山市、加賀市、能美市、 かほく市、野々市、兜尾郡、羽咋郡、河北郡、能美郡		石川県	輪島市、珠洲市、鳳珠郡		
	静岡県	全域		富山県	魚津市、常川市、黒部市、下新川郡		
	愛知県	全域		石川県	輪島市、珠洲市、鳳珠郡		
	岐阜県	全域		富山県	魚津市、常川市、黒部市、下新川郡		
	三重県	全域		石川県	輪島市、珠洲市、鳳珠郡		
	福井県	全域		富山県	魚津市、常川市、黒部市、下新川郡		
	滋賀県	全域		石川県	輪島市、珠洲市、鳳珠郡		
	京都府	全域		富山県	魚津市、常川市、黒部市、下新川郡		
	大阪府	全域		石川県	輪島市、珠洲市、鳳珠郡		
	奈良県	全域		富山県	魚津市、常川市、黒部市、下新川郡		
	和歌山県	全域		石川県	輪島市、珠洲市、鳳珠郡		
	兵庫県	全域		富山県	魚津市、常川市、黒部市、下新川郡		
	鳥取県	鳥取市、岩美郡、八頭郡		石川県	輪島市、珠洲市、鳳珠郡		
	徳島県	徳島市、鳴門市、小松島市、阿南市、板野郡、阿波市、吉野川市、 名西郡、名東郡、那賀郡、勝浦郡、海部郡		富山県	魚津市、常川市、黒部市、下新川郡		
	香川県	東かがわ市、さぬき市、木田郡		石川県	輪島市、珠洲市、鳳珠郡		
	鹿児島県	奄美市、大島郡		富山県	魚津市、常川市、黒部市、下新川郡		
	B	北海道		札幌市、函館市、小樽市、室蘭市、北見市、夕張市、岩見沢市、 網走市、苫小牧市、美幌市、苫別市、江別市、赤平市、三好市、 千歳市、滝川市、砂川市、歌志内市、深川市、富良野市、穂別市、 伊達市、伊達市、北広島市、石狩市、北平市、石狩郡、松前郡、 上磯郡、亀田郡、茅渚郡、山越郡、檜山郡、留志郡、三海郡、久遠郡、 奥尻郡、檜穂郡、島牧郡、寿都郡、磯谷郡、虹色郡、岩内郡、古宇郡、 檜浦郡、古平郡、余市郡、空知郡、夕張郡、滝川郡、雨竜郡	C	北海道	旭川市、留萌市、紋別市、樺内市、十勝市、名寄市、 上川郡(上川総合振興局)のうち鷹栖町、当麻町、比布町、愛別町、 和寒町、網走町及び下川町、中川郡(上川総合振興局)、 増毛郡、留萌郡、若前郡、天塩郡、宗谷郡、枝幸郡、礼文郡、 白糠郡、紋別郡
		山口県		全域		山口県	全域
福岡県		全域	福岡県	全域			
佐賀県		全域	佐賀県	全域			
長崎県		全域	長崎県	全域			
熊本県		八代市のうち千丁町、鏡町、坂本町、東陽町及び泉町、茶尾市、 水俣市、玉名市、天草市、山鹿市、宇土市、上天草市、 宇城市(松橋町、小川町及び豊野町を除く)、玉名郡、藤北郡、 天草郡	熊本県	八代市のうち千丁町、鏡町、坂本町、東陽町及び泉町、茶尾市、 水俣市、玉名市、天草市、山鹿市、宇土市、上天草市、 宇城市(松橋町、小川町及び豊野町を除く)、玉名郡、藤北郡、 天草郡			
大分県		中津市、日田市(前津江町、中津江村、上津江町、大山町及び 大瀬町、玖珠郡を除く)、豊後高田市、杵築市、宇佐市、国東市、 東国東郡、理見郡	大分県	中津市、日田市(前津江町、中津江村、上津江町、大山町及び 大瀬町、玖珠郡を除く)、豊後高田市、杵築市、宇佐市、国東市、 東国東郡、理見郡			
鹿児島県		(奄美市及び大島郡を除く)	鹿児島県	(奄美市及び大島郡を除く)			
沖縄県		全域	沖縄県	全域			

現状の山腹崩壊危険地区調査の課題は以下のような点である。

- ①多雨地域と非多雨地域の区分が約 50 年前の文献を判断材料としているが、多雨地域と非多雨地域という 2 区分では各地の降雨特性を評価できない。例えば、年平均降水量が 1500mm 程度の広島県と年平均降水量が 700～1000mm 程度の地域（900mm 未満の観測所は全国 32 地点中 31 地点が北海道に集中、1000mm 未満の観測所は全国 60 地点中 54 地点が北海道に集中）を多く含む北海道を同じ区分で評価することは難しい。また、広島県でも沿岸部の年平均降水量は 1200mm 程度であるが中山間部では 2500mm 程度と多く、県内でも違いがある。日本の年平均降水量は屋久島の約 4500mm から北海道の常呂の約 700mm まで地域毎に大きく異なり、雨の降り方も地域によって大きく異なる。
- ②数量化Ⅱ類の統計解析結果を元に各カテゴリ一点数を決めているが、数量化Ⅱ類などの統計手法は「狭い領域で求めたカテゴリ一点数を広域に適用するとの的中精度が低下し、広い地域で求めたカテゴリ一点数を特定の狭い地域に適用するとの的中精度が低下する」という性質を持っており、全国的な危険度の指標にはなり得ない。数量化Ⅱ類のカテゴリ点数による方法での的中精度を高めるためには、県毎又はそれより狭い地域毎の点数表が必要となる。
- ③落石に関する危険度点表が山腹崩壊危険度点数表のような複雑な点数では無く、評価項目毎に 2 点か 1 点の 2 者択一による点数で、地震に関する地域別補正係数の地域区分も大胆に 3 区分されており、危険度評価の信頼性に疑問が残る。
- ④保全対象から離れた場所の 0 次谷は危険度評価の対象外となる可能性がある。

<引用文献>

- 林野庁（2015）：今後の山地災害対策の強化に向けて（中間とりまとめ）
林野庁（2016）：平成 27 年度流域山地災害調査（山地防災力調査）委託事業報告書
林野庁（2016）：山腹崩壊危険地区調査要領（平成 28 年 7 月）
岩井重久・石黒儀（1974）：応用水文統計学

10.4.2 崩壊土砂流出危険地区調査の現状と課題

調査対象は図 10.4.2 に示すように1次谷の上流端(谷頭)を含むメッシュまでである。崩積土砂流出危険度の点数表を表 10.4.8 崩積土砂流出危険度点数表(林野庁, 2016)に危険度評価表を表 10.4.9 崩積土砂流出危険度判定表(林野庁, 2016)に示す。対象流域の中で最危険となった沢(溪流)の点数でその流域の危険度を評価する。

表 10.4.8 崩積土砂流出危険度点数表(林野庁, 2016)

調査項目	区分	点数
荒廃発生源の崩壊(地すべり)危険度	a ₁	56
	b ₁	48
	c ₁	40
	d ₁	0
転石の混入割合	10%未満	0
	10%以上20%未満	5
	20%以上30%未満	20
	30%以上	9
荒廃発生源直下の渓床勾配	9° 未満	0
	9° 以上14° 未満	5
	14° 以上19° 未満	14
崩壊土砂流出区間の延長	200m未満	0
	200m以上500m未満	14
	500m以上	37
平均渓床勾配	5° 未満	0
	5° 以上8° 未満	8
	8° 以上11° 未満	16
	11° 以上16° 未満	24
	16° 以上	30

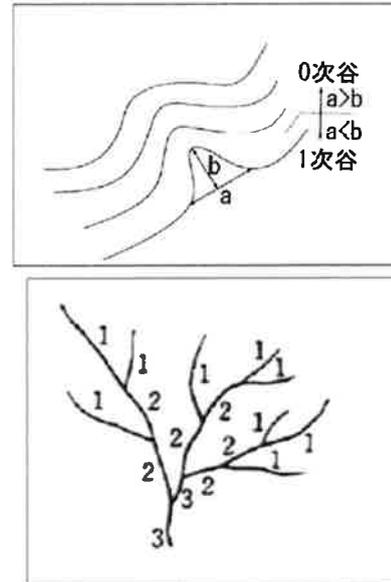


図 10.4.2 調査対象の谷次数

注 d₁ : 荒廃発生源の崩壊危険度が 100 点未満のもの及び地すべり危険度が a₁、b₁、c₁以外のもの。

表 10.4.9 崩積土砂流出危険度判定表(林野庁, 2016)

表一 2 崩壊土砂流出危険度判定表

危険度	危険度点数
a ₁	140 点以上
b ₁	120 点以上 140 点未満
c ₁	100 点以上 120 点未満

表一 3 被災危険度判定表

危険度	公共施設等の種類及び数量
a ₂	公用若しくは公共用施設(道路を除く。)又は 10 戸以上の人家がある場合
b ₂	5 戸以上 10 戸未満の人家がある場合
c ₂	5 戸未満の人家又は道路がある場合

表一 4 崩壊土砂流出危険地区の危険度判定表

危険度	危険度点数
A	a ₁ -a ₂ 、a ₁ -b ₂ 、b ₁ -a ₂
B	a ₁ -c ₂ 、b ₁ -b ₂ 、c ₁ -a ₂
C	b ₁ -c ₂ 、c ₁ -c ₂ 、c ₁ -b ₂

現状の崩壊土砂流出危険地区調査の課題は以下のような点である。

- ① 溪床の荒廃状況は評価対象に含まれていない。
- ② 数量化Ⅱ類の統計解析結果を元に各カテゴリ一点数を決めているが、数量化Ⅱ類などの統計手法は「狭い領域で求めたカテゴリ一点数を広域に適用するとの精度が低下し、広い地域で求めたカテゴリ一点数を特定の狭い地域に適用するとの精度が低下する」という性質を持っており、全国的な危険度の指標にはなり得ない。数量化Ⅱ類のカテゴリ点数による方法での精度を高めるためには、県毎又はそれより狭い地域毎の点数表が必要となる。
- ③ 調査対象が1次谷の上流端（谷頭）を含む100mメッシュ及びその下流であり、そのメッシュに含まれない上流部の0次谷は危険度評価の対象にならない。
- ④ 一つの流域内で最も危険度の大きい1次谷が特定されると当該溪流について危険度評価がなされ、その流域に存在するその他の1次谷からの溪流は危険溪流として扱われない。
- ⑤ 気候変動に伴って東北地方や北海道など、これまで豪雨が少なかった地域の災害リスクが高まっているが、そのリスク評価は含まれてない。

<引用文献>

林野庁（2015）：今後の山地災害対策の強化に向けて（中間とりまとめ）

林野庁（2016）：平成27年度流域山地災害調査（山地防災力調査）委託事業報告書

林野庁（2016）：崩壊土砂流出危険地区調査要領（平成28年7月）

10.4.3 山地災害危険地区の調査方法の在り方

気候変動に伴う山地災害の変化に対応するという観点から山地災害危険地区の調査方法の在り方について検討した。

平成28年度の山地災害危険地区調査要領の改定は、「今後の山地災害対策の強化に向けて（中間とりまとめ）（林野庁，2015）」で提言された以下の内容が含まれていない。

- 1) 降雨量に応じた地域特性を踏まえた山地災害の危険度判定手法の検討
- 2) 航空レーザ測量成果を活用した微地形解析の手法等も取り入れ、個々の流域単位で崩壊等のリスク評価を行った上で、これを具体の山地災害対策につなげていくような取組を推進する必要がある。最近の山地災害で問題となっている0次谷については調査対象とならない可能性があり、0次谷についても積極的に調査対象に加える必要がある。

また、現在採用されている数量化Ⅱ類によるカテゴリ一点数による危険度評価は、統計上の問題点を多く含んでおり、危険度評価の精度向上の上での限界がある。精度を向上させるためには最近のディープラーニング（深層学習）の手法を取り入れるなどの取り組みが必要である。

また、山間地からの流木が問題となっており「今後の山地災害対策の強化に向けて（中間とりまとめ）（林野庁，2015）」でも流木対策について言及されているが、「流木危険地区調査要領」は未だに整備されていない。調査手法については「流木災害対策の必要な森林を抽出する手法 手引き（案）

(林野庁, 2016)」が作成されているので、山地災害危険地区調査の中に取り組んで定期的な調査を実施することが望ましい。また、風倒木に対する危険地区調査の要領も整備されていない。

山地災害危険地区調査を1次抽出のための調査と位置付けて更なる精度向上は目指さず、ここで選定された地区に対して詳細調査を実施して更に危険な地区を絞り込むという考え方もある。しかし、その考え方の場合、山地災害危険地区調査で選定されなかった地域は、詳細調査対象地としても選定されなくなる。

一方、平成29年7月の九州北部災害では朝倉地区において山地災害危険地区と災害発生場所が重なっている地区は災害発生地全体の1割程度で、指定されていない場所での災害が多発したという報告がある。この時の朝倉地区のような異常豪雨が発生すれば、通常の豪雨では異常が生じない場所でも崩壊が発生する。しかし、この時の朝倉地区でも全ての斜面で崩壊が発生した訳では無く、崩壊が発生しない斜面も存在する。山地災害危険地区調査が通常の豪雨による山地災害の発生場を選定する手法だとすれば、平成29年7月の九州北部災害時のような異常豪雨時に山地災害が発生する場所を事前に予測する手法の開発が必要となる。また、その調査を実施する治山事業の創出も必要である。流域別調査（森林計画事業）の活性化もそのための治山事業となり得る。

<引用文献>

林野庁（2015）：今後の山地災害対策の強化に向けて（中間とりまとめ）

林野庁（2016）：流木災害対策の必要な森林を抽出する手法 手引き（案）

10.5 予防治山事業の今後の在り方

10.5.1 予防治山事業の現状

復旧治山事業は荒廃山地の復旧整備事業であり、流木防止総合対策事業も荒廃山地が対象となる。気象変動に伴う山地災害の増加に対応するためには予防治山事業の充実がより重要となる。

山地災害危険地区の設定も、危険地区に対する治山対策の整備率を上げることが各都道府県の林務目標の一つとなっており、予防治山事業の一躍を担っている。

表 10.5.1 は林野庁治山課の令和3年度予算概算要求の資料である。令和3年度の概算要求額を見ると治山事業費補助の中の復旧治山には事業費で26,693百万円の予算を要求しているが緊急予防治山の要求額は事業費で6,593百万円である。また、緊急予防治山事業に関する新規拡充事項として「山地尾根部付近の崩壊における大量の土砂流出等、甚大な被害の発生を未然に防止するため、上流部を対象とした発生源対策や崩壊発生の予兆等の観測を推進します」としている。

表 10.5.1 治山課の民有林治山事業の予算に占める予防治山関連予算

令和3年度 民有林治山事業 概算要求 事業別編括表【一般会計（要求・要望）＋東日本大震災復興特別会計（復旧対策）】
(単位:千円、%)

事 項	令和2年度 当初予算額		令和3年度 概算要求額			
	事業費	国 費	事業費	国 費	対前年度比	
					事業費	国費
治山事業費	68,140,405	42,430,926	76,296,656	47,735,152	112.0	112.5
治山事業費(民有林直轄)	11,606,422	11,606,422	14,106,563	14,106,563	121.5	121.5
治山事業費	8,971,558	8,971,558	10,348,486	10,348,486	115.3	115.3
地すべり防止事業費	2,634,864	2,634,864	3,758,077	3,758,077	142.6	142.6
営繕宿舍費(民有林直轄分)	14,412	14,412	19,497	19,497	135.3	135.3
治山事業調査費	176,451	176,451	176,451	176,451	100.0	100.0
治山事業費補助	56,343,120	28,311,641	61,994,145	31,237,641	110.0	110.3
治山等激甚災害対策特別緊急事業費補助	6,478,182	3,563,000	6,549,091	3,602,000	101.1	101.1
山地治山総合対策事業費補助	44,397,994	22,359,641	48,508,068	24,559,641	109.3	109.8
復旧治山	20,307,765	10,206,441	26,693,751	13,467,641	131.4	132.0
山地災害重点地域総合対策	1,567,273	785,000	2,054,183	1,036,000	131.1	132.0
流木防止総合対策	2,063,092	1,037,000	2,053,456	1,037,000	99.5	100.0
緊急総合治山	1,334,182	670,000	1,752,547	884,000	131.4	131.9
緊急予防治山	5,030,830	2,566,000	6,593,016	3,386,000	131.1	132.0
緊急機能強化・老朽化対策	822,000	411,000	1,610,729	812,000	196.0	197.6
地すべり防止	3,352,000	1,676,000	3,032,000	1,516,000	90.5	90.5
緊急総合地すべり防止	240,000	120,000	230,000	115,000	95.8	95.8
防災林造成	9,680,852	4,888,200	4,488,386	2,306,000	46.4	47.2
水源地域等保安林整備事業費補助	5,466,944	2,389,000	6,936,986	3,076,000	126.9	128.8
水源地域整備	3,022,694	1,531,000	3,838,986	1,944,000	127.0	127.0
保安林整備	2,444,250	858,000	3,098,000	1,132,000	126.7	131.9
後進地域特別法適用団体補助率差額	-	2,322,000	-	2,195,000	-	94.5
治山事業工事諸費(民有林直轄分)	1,477,166	1,477,166	1,496,940	1,496,940	101.3	101.3
治山事業工事諸費(調査分)	9,908	9,908	9,908	9,908	100.0	100.0
合 計	69,627,479	43,918,000	77,803,504	49,242,000	111.7	112.1
民有林直轄治山事業	13,098,000	13,098,000	15,623,000	15,623,000	119.3	119.3
民有林補助治山事業	56,529,479	30,820,000	62,180,504	33,619,000	110.0	109.1

広島県では平成30年度に甚大な豪雨災害を受けて今後の治山事業の方針として以下の内容を挙げている。これは災害発生前までの治山事業の反省に立った方針であり、それまでに広島県が実施してきた予防治山事業が十分でないことを裏付けている。

表 10.5.2 平成30年度豪雨災害を受けた広島県の治山対策の方針

項目	対応
巨石を含む転石への対応	新たに治山ダムを計画するに当たっては、現地調査の結果で得られた転石の最大礫径を2倍にするなど、より安全側に決定し、転石の衝撃力に耐えうる天端厚の設定や鉄筋の挿入による補強を行う。
土石流の流体力を考慮した治山ダムの設計	再度災害の恐れが高く、土石流による甚大な被害が懸念される箇所においては、土石流の流体力を考慮し、土石流発生時においても安定を確保できる治山ダム（土石流対応型）を採用する。
治山ダム堤体の洗掘対策	被災した治山ダムの機能強化を図るため、同等の土石流の規模を勘案し、堤体の埋め戻し部の補強や洗掘対策の工法を決定する。
流木対策	流域が広大で大量の流木発生が懸念される箇所においては、平成29年7月九州北部豪雨災害を踏まえ、林野庁が作成した「土石流・流木対策指針」に基づき、流木捕捉式治山ダムの設置の検討など、現地の状況に応じた工法を採用する。

<引用文献>

林野庁（2015）：今後の山地災害対策の強化に向けて（中間とりまとめ）

林野庁（2021）：令和3年度予算概算要求の概要 治山課関係予算の概要（治山課）

広島県（2019）：平成30年7月豪雨災害を踏まえた治山対策方針（平成31年3月）

10.5.2 治山事業における山地災害危険地区の積極的な活用

山地災害危険地区は予防治山事業において重要な役割を占めている。気候変動に伴う山地災害の変化に対応するためには、10.4節で上げたような改善を行った上で、予防治山事業において積極的に活用すべきである。

10.5.3 予防治山事業の拡大

気候変動に伴う山地災害の変化に対応するためには、災害発生後の復旧治山等を強化するだけでなく予防治山事業を積極的に拡大する必要がある。そのための具体的な事業として以下の内容が挙げられる。

- ①気候変動に伴う山地災害の変化に対応する山地災害危険地区選定手法の改良
- ②上記①の改良のために、気象システムや空間情報システム、ディープラーニング等の学会との連携事業の実施
- ③流域全体での土石流・流木対応の治山施設の適正配置のための、治山事業の中で実施する流域の土砂管理手法、流木管理手法の確立とそのため事業の実施（砂防事業との棲み分けを含む）。
- ④異常豪雨に対する山地災害危険箇所の抽出や0次谷での崩壊危険度を把握するために、最近減少し

ている流域別調査（森林計画事業）を活発化させ、リモートセンシング技術等の最新技術を取り入れて調査の効率化を図る。

気候変動に伴う山地災害の変化に対応するために、予防治山事業のみで対応するのは予算面で限界がある。復旧治山事業も取り入れて施設の適正配置や機能強化を考慮する必要がある。しかし、被災地の復旧については再度災害防止の視点が入り入れられつつあり、本研究テーマ範疇から外れる。復旧治山の中でも被災地では無く、その一歩手前の荒廃地や災害の兆候を示す場所での復旧治山の活用が望まれる。

10.6 斜面崩壊の変化に対応する治山施設の適正配置と機能強化の検討

10.6.1 気候変動に伴う斜面崩壊の変化及び対応

気候変動に伴う山地災害の現状と課題の整理結果から、気候変動に伴う斜面崩壊の変化及び対応として、以下のようなことが想定される。

- ①集中豪雨や線状降水帯の発生による広域な土砂災害の増加。
- ②東北地方や北海道など、豪雨への耐性が低い地域での豪雨の発生と斜面崩壊の増加。
- ③日本全国での既往最大豪雨の発生による斜面崩壊発生リスクの増加。
- ④局地的で希な豪雨による土砂災害への対応
- ⑤災害外力レベルに応じた対応の必要性
- ⑥火山噴出物、崖錐堆積物等の脆弱な地質地帯における土砂災害対策の推進
- ⑦航空レーザ測量を用いた微地形解析による崩壊発生箇所、土砂災害発生箇所の予測技術の開発

10.6.2 山腹工の計画・設計に関する実務面での課題

治山の山腹工の計画・設計に携わっている技術者からのヒアリングに基づいてそれぞれの課題を整理した。

(1) 山腹工の計画に関する実務面での課題

- ①山地治山事業では荒廃箇所単位の計画が大半であり、どこにどの程度の対策工が必要であるか、流域全体を考慮した計画が必要。
- ②明らかにフリーフレームや鉄筋挿入が必要と思われる小崩壊が多発しているような箇所であっても、現況勾配が 1:1.0 よりも緩いという理由だけで、経済性から、簡易法枠や植生基材吹付が採用される場合がある。
- ③0次谷の崩壊危険度に関する調査は通常の予防治山事業の中では実施されないため、危険箇所の把握が不十分である。特に民有林については調査が不十分である。
- ④異常豪雨に対応した山地災害危険地区の選定手法が確立されていない。

(2) 山腹工の設計に関する実務面での課題

- ①土留工の安定計算で切土タイプと盛土タイプとあるが、全て背面は土砂として計算しており、露岩している場合は正確に評価できない。
- ②法枠工や鉄筋挿入工を計画する際、ボーリング調査がない場合、現場で判断することが多く、技術者によって崩壊深さの設定に違いがでる。

10.6.3 斜面崩壊の変化に対応した治山施設の適正配置

(1) 治山施設の適正配置に関する方針

- ①保全対象の重要度や、影響の大きさを計画規模や治山施設の仕様を変更する。
- ②対象流域全体での治山施設（山腹工、溪間工）配置計画の作成
- ③斜面中腹からの崩壊発生場所を推定することは困難であることから、それらは溪流での待ち受け対策を強化する。

(2) 治山施設の適正配置のあり方

- ①治山・砂防・河川，流域一帯で，減災に取り組む
- ②施設配置計画への空間情報システムの活用（微地形判読結果の活用と精度の悪い森林基本図の見直し）
- ③斜面崩壊の形態毎に発生する可能性の高い斜面（地区）を選定する。
- ④異常豪雨に対応した山地災害危険地区の選定手法を開発する。特に土層深の厚い0次谷で通常の豪雨では崩壊が発生しないが，異常豪雨では崩壊が発生する場所を抽出する技術の配発が必要である。
- ⑤異常豪雨時にルリ・ガリが発生する場所を抽出する手法の開発。

(3) 治山施設の適正配置の具体策

- ①重要な保全対象の近隣での地山補強土工（ノンフレーム工法等）や法枠工等の積極的な導入。
- ②通常の豪雨では崩壊は発生しないが異常豪雨では崩壊が発生する0次谷での山腹工の積極的な導入
- ③表層土壌侵食対策の積極的な導入（通常豪雨ではルリ・ガリは発生しないが異常豪雨では発生する場所も含む）
- ④表層崩壊を予防する柵工や杭工の積極的な導入
- ⑤通常の豪雨では崩壊は発生しないが異常豪雨では崩壊が発生する地点での中層崩壊を予防するための補強土工，法枠工，アンカー工，杭工等の積極的な導入。

10.6.4 斜面崩壊の変化に対応した治山施設の機能強化

治山山腹工の工種とそれぞれの工種の機能強化方法について以下にまとめた。

図 10.6.1 山腹工の標準的な工種

区分		工種	機能強化方法
山腹基礎工		のり切工	—
		土留工	配置箇所・範囲の追加
		埋設工	—
		水路工	—
		暗きょ工	配置箇所・範囲の追加
		のり枠工	配置箇所・範囲の追加
		グラウンドアンカー工	配置箇所・範囲の追加
		補強土工	配置箇所・範囲の追加 頭部ワイヤ連結型鉄筋挿入工の採用
		張工	配置箇所・範囲の追加
		吹付工	配置箇所・範囲の追加
山腹緑化工	緑化基礎工	柵工	—
		筋工	—
		伏工	—
		軽量のり枠工	配置箇所・範囲の追加
	植生工	実播工	—
		植栽工	—
落石防止工	落石予防工	斜面切取工	配置箇所・範囲の追加
		転石整理工	配置箇所・範囲の追加
		被覆工	配置箇所・範囲の追加
		固定工	配置箇所・範囲の追加
		根固工	配置箇所・範囲の追加
	落石防護工	落石防護柵工	高エネルギー吸収型の採用
		落石防護網工	高エネルギー吸収型の採用
		落石防護擁壁工	配置箇所・範囲の追加

10.7 土砂・流木の流出形態の変化に対応する治山施設の適正配置と機能強化の検討

10.7.1 気候変動に土砂・流木の流出形態の変化及び対応

気候変動に伴う山地災害の現状と課題の整理結果から、気候変動に伴う土砂・流木災害の変化及びそれへの対応として、以下のようなことが想定される。

- ①集中豪雨や線状降水帯の発生による広域な土砂・流木災害の増加。
- ②東北地方や北海道など、豪雨への耐性が低い地域での豪雨の発生と土砂・流木災害の増加。
- ③日本全国での既往最大豪雨の発生による土砂・流木災害発生リスクの増加。
- ④局地的で希な豪雨による土砂災害への対応
- ⑤災害外力レベルに応じた対応の必要性
- ⑥火山噴出物、崖錐堆積物等の脆弱な地質地帯における土砂災害対策の推進
- ④コアストーンを含む巨石や土石流への対策が必要。
- ⑧0次谷対策の必要性
- ⑨航空レーザ測量を用いた微地形解析による崩壊発生箇所、土砂災害発生箇所の予測技術の開発
- ⑩土石流扇状地における宅地開発の規制
- ⑪山腹崩壊の防止による土砂・流木の発生抑制
- ⑫土石流の発達、流下にとまなう土砂・流木の発生抑制
- ⑬優先度が高い地域における数百年超過確率雨量規模の土石流・流木災害を想定した、「基本的な機能を喪失することのない対策施設の設計と設置」の具体化。

10.7.2 溪間工の計画・設計に関する実務上の課題

治山の溪間工の計画・設計に携わっている技術者からのヒアリングに基づいてそれぞれの課題を整理した。

(1) 溪間工の計画に関する実務面の課題

- ①土石流・流木対策指針等解説（林野庁、2018）が発行された直後は、流木対策を目的とした溪間工が計画されることもあったが、最近では計画されない傾向にある。全国的には導入例は少ない。
- ②山地治山事業では荒廃箇所単位の計画が大半であり、どこにどの程度の対策工が必要であるか、流域全体を考慮した計画が必要。
- ③土石流対応の治山ダムが不足しており、積極的に導入しようとされていない。
- ④ダムの計画勾配を決定する根拠を決める方法として、現溪床の1/2を採用することが多々あるが、砂防のように計画地上流200m程度区間のような基準がないため、都合の良い箇所の1/2を採用されることがある。溪床に岩盤が延々と続く箇所の1/2を採用する場合もあり、理屈としておかしい場合がある。
- ⑤ダムの計画勾配の決定根拠として、近隣でもなく地形・地質状況が異なる箇所の既設堆砂勾配を指示されることがある。

(2) 溪間工の設計に関する実務面の課題

- ①治山ダムの高さの決定方法が定性的で曖昧である。
- ②間詰工、側壁護岸工の安定計算の考え方が、明らかに間違っている場合や、過大となっている場合がある。

- ③安定計算の手法については、断面表以外に示されたものがなく、土石流時の安定計算は統一されていない場合がある。
- ④ダム安定計算において、従来の1～5型はなくなりつつあり、床掘土と背面ポケットを計算し安定計算する事例が増えてきているが、考え方が発注者により様々で、ダムの安定計算が統一されていない。
- ⑤土石流対策を目的とする治山ダムでも、砂防と同じ天端厚（幅）3m以上の厚いダムを山間地に並べるのは問題がある。流体力を考慮した設計の適用が望まれる。
- ⑥土石流・流木対策指針解説等（林野庁、2019）で採用されている雨量指数と新生崩壊の面積率の関係図、流域面積と流木の流出率との関係図などが30年以上前の古い研究成果によるものである。

10.7.3 流木対策に関するこれまでの行政の対応

- ・ H24.3 気候変動に対応した森林の水土保全機能の向上方策検討調査（林野庁）
→H21～H23の3ヵ年で、森林地域における気候変動による影響の類型化を行い今後の傾向を推定。治山事業に関連する気候変動要素のその影響を整理。モデル流域を設定してリスク評価の検討・分析を実施。評価手法を示し、治山事業における適応策の方向性、体系を整理。
- ・ H28.4 流木災害対策に必要な森林を抽出する手法 手引書（案）（林野庁）
→流木災害対策が必要な箇所を効率的に把握する手法を取りまとめる目的で、レーザ・プロファイラデータを使用した流木発生危険箇所の抽出手法を示した。
- ・ H29.11 「流木災害等に対する治山対策検討チーム」中間とりまとめ（林野庁）
→平成29年7月九州北部豪雨を踏まえた課題の抽出、事前防災・減災対策を講ずる箇所の選定、発生区域、流下区域、堆積区域での対策、その他について示した。
- ・ H30.3 土石流・流木対策指針（林野庁）
→山地災害危険地区（崩壊土砂流出危険地区）等で土石流・流木対策を実施する際の調査、計画、設計、維持管理についての指針を示した。

<引用文献>

- 林野庁（2019）：土石流・流木対策指針解説等
 林野庁（2017）：平成29年度災害復旧対策緊急調査（九州北部豪雨に伴う山地災害に関する復旧計画等検討業務）委託事業 報告書（公表資料）
 近畿中国森林管理局（2018）：流木災害対策の取組－流木災害等に関する治山対策

10. 7. 4 土砂・流木の流出形態の変化に対応した治山施設の適正配置

(1) 治山施設の適正配置に関する方針

- ①保全対象の重要度や、影響の大きさを計画規模や治山施設の仕様を変更する。
- ②対象流域全体での治山施設（山腹工，溪間工）配置計画の作成
- ③砂防事業として実施すべき事業は砂防事業で実施する。例えば，集落の近接地の谷出口への土砂・流木対策は砂防事業が適している。

(2) 今後の流木対策の在り方

- ①治山砂防河川，流域一帯で，減災に取り組む
- ②災害に強い森づくりの推進 そのためには，林業従事者の増加（魅力ある林業）
- ③管理の行き届いていない森林の抽出
- ④森林環境税の活用による荒廃森林の整備
- ⑤効率的な流木対策の推進
- ⑥ハード対策・ソフト対策の組み合わせ
- ⑦保安林の適正な配備
- ⑧既設ダムの維持管理
- ⑨流木の活用
- ⑩流木の流出率や新生崩壊の面積率の算定の高度化及び関係式の再検証

(3) 治山施設の適正配置の具体策

- ①谷止工群の中でいくつかの地点（合流部など）で土石流に耐えるような高規格化することで，全体としての効果を向上させる。
- ②常時流水が確認できる溪流の溪岸崩壊に対する護岸工の積極的な導入。
- ③溪流の上流部（源頭部，0次谷）への山腹工（簡易流木留め施設を含む）の積極的な導入
- ④溪流上流部や中流部における階段状治山ダムの積極的な導入
- ⑤溪流の湾曲部，拡幅部への流木止や流木捕捉式治山ダムの設置
- ⑥溪流の下流部における流木止や流木捕捉式治山ダムの設置

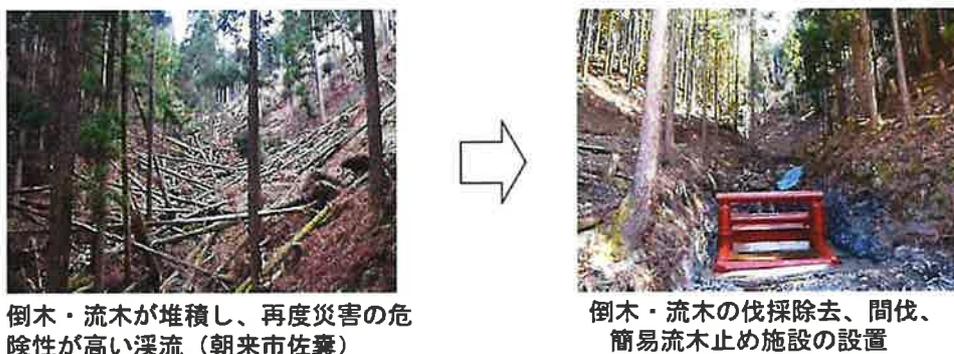


図 10. 7.1 溪流上流部への簡易流木止め施設の設置例（兵庫県，2015）

<引用文献>

兵庫県（2015）：「災害に強い森づくり（第2期対策）」の導入の経緯，災害に強い森づくり事業検証報告書 2015

10.7.5 土砂・流木の流出形態の変化に対応した治山施設の機能強化

土石流対応の治山ダムや流木対策用の治山ダムの資料は既に土石流・流木対策指針解説等（林野庁，2019）に掲載されているため，その他の機能強化について検討する必要がある。土石流・流木対策指針解説に記載されていない溪間工の機能強化対策として以下のものがある。

- ①鉄筋コンクリート造の治山堰堤
- ②砂防堰堤と同等の基礎地盤条件の採用
- ③不良基礎地盤への杭基礎の導入
- ④流木補足工（流木止）の導入

<引用文献>

林野庁（2019）：土石流・流木対策指針解説等

10.8 風倒木災害に対応する治山施設の適正配置と機能強化の検討

10.8.1 気候変動に風倒木災害の変化及び対応

気候変動に伴う山地災害の現状と課題の整理結果から、気候変動に伴う風倒木災害の変化及び対応として、以下のようなことが想定される。

- ①風倒木被害には地域的に被害が多発する地域があるが、年間の被害面積のトレンドに増加傾向は見られない。
- ②東北や北海道での風倒木災害が増加する可能性がある。

10.8.2 風倒木対策のための治山施設の計画・設計に関する実務上の課題

(1) 治山施設の計画に関する実務上の課題

- ①風倒木対策の事前対策が可能な治山施設が無い。
- ②風倒木被害の危険度を事前に予測する調査手法が確立していない。

(2) 治山施設の設計に関する実務上の課題

- ①事後としての待ち受け対策（防護工）や流木対策に関する治山施設は複数存在するが、事前対策となる治山施設が無い。

10.8.3 風倒木災害の変化に対応した治山施設の適正配置

(1) アンケート結果

本研究開発で実施したアンケート調査によると、治山事業における風倒木災害対策は保安林整備事業で実施すべきだという意見の都道府県が圧倒的に多かった。17種類の保安林の種類を以下に示すが、この中で青字の保安林が、風倒木災害（流木災害を含む）対策への貢献が特に期待できる保安林である。

<保安林の種類:17種類>

- ①水源かん養保安林、②土砂流出防備保安林、③土砂崩壊防備保安林、④飛砂防備保安林、⑤防風保安林、⑥水害防備保安林、⑦潮害防備保安林、⑧干害防備保安林、⑨防雪保安林、⑩防霧保安林、⑪なだれ防止保安林、⑫落石防止保安林、⑬防火保安林、⑭魚つき保安林、⑮航行目標保安林、⑯保健保安林、⑰風致保安林

(2) 治山施設の適正配置に関する方針

- ①樹齢や樹種毎の森林の強度を考慮したシミュレーションは無く、風況シミュレーションを用いて風倒木災害を事前に予想することは難しい。一方、風倒木災害に対して弱い森林の条件に関する情報は揃いつつあることからその情報を治山分野でどのように活用するかが重要となる。
- ②治山施設によって、風倒木の事前対策を実施することは難しいことから、事後対策としての治山施設の適正配置を考える。
- ③流木対策に対する治山施設の適正配置とは異なる点を取り上げる。

(3) 治山施設の適正配置の具体策

- ①人家等に近接した風倒木危険地では、崩壊地斜面については土留工法枠工等の山腹工を施工する

(兵庫県治山林道協会, 2005)。

- ②強風で根系が揺すられ地盤が緩んでいるとして予防的頭部ワイヤ連結型鉄筋挿入工等で山腹工を施工して対策を進める (兵庫県治山林道協会, 2005)。
- ③溪流の上流部 (源頭部, 0 次谷) への簡易流木止め施設の導入(図 8.2.1 参照)
- ④シカ食害による下層食性の衰退を防護するための植生防護柵の設置
- ⑤過密林の伐採後の土留工による表面浸食防止



図 10. 8.1 シカ食害による下層植生の衰退を改善するための植生保護柵の設置例 (兵庫県, 2015)



図 10. 8.2 過密林の伐採後の土留工による表面浸食防止の例 (兵庫県, 2015)

<引用文献>

兵庫県治山林道協会 (2005) : 平成 16 年台風による風倒木災害と再度災害防止対策

兵庫県 (2015) : 「災害に強い森づくり (第 2 期対策)」の導入の経緯, 災害に強い森づくり事業検証報告書 2015

10. 8. 4 風倒木災害の変化に対応した治山施設の機能強化

前述した, 溪流の上流部 (源頭部, 0 次谷) への簡易流木止め施設は最近開発された工法であり, 機能強化にも該当する。風倒木対策に関するその他の治山施設は既存技術の適用であり, 機能強化的な側面は無い。

<引用文献>

兵庫県治山林道協会 (2005) : 平成 16 年台風による風倒木災害と再度災害防止対策

10.9 斜面崩壊の変化に対応する治山施設の適正配置と機能強化の検討（石川芳治）

ここでは、豪雨により発生する斜面崩壊を対象とし、基本的には斜面崩壊、土石流・流木災害が発生する前の予防的な対策を行うための治山施設（森林整備を含む）を対象とする。

10.9.1 気象条件、自然環境および森林等の変化

近年、我が国の気象条件や森林を取り巻く環境は変化しており、それらの主なものは次のとおりである。

- (1)気候変動により、短時間雨量強度が大きな豪雨が増加しているとともに、強度の強い豪雨の降雨期間も長くなり、さらに1回の豪雨での影響範囲も広域化してきている。また、これらの強度の強い豪雨の発生頻度も増加の傾向にある。さらに、台風が大型化、強大化しているため風倒災害起こり易くなっている。
- (2)森林の皆伐面積は小さくなり、人工林の高齢級化が進んでいる。高齢級の樹林は風倒の被害を受けやすい。
- (3)全体としては人工林の間伐が進んでいるものの、一方で間伐が滞っている人工林も依然として多く存在している。
- (4)全国的なニホンジカの生息密度の増加により、下層植生（林床植生）の食害が目立ってきている。特に、再造林地においては被害を受けやすい状況にある。
- (5)森林の皆伐後の再造林が行われていない場合も生じている。

10.9.2 斜面崩壊形態

気象条件、自然環境および森林等の変化に伴い、次のような形態の斜面崩壊が発生している。

- (1) 第二次世界大戦直後においては豪雨により表層崩壊が多く発生していたが、これは伐採後10～20年の根系の腐朽による強度低下が主な原因の一つと推定される。しかしながら、戦後に植栽された人工林の多くは間伐施業が主流で皆伐施業は少なく、このため、人工林では表層崩壊は減少傾向にある。
- (2) 表層崩壊が減少したために、それまでは割合としては少なかった、中層崩壊（根系よりも深い箇所(深さ2～5m)にすべり面がある崩壊）が目立つようになってきている。
- (3) 数の上では表層崩壊が最も多く、0次谷において発生して例が多い。0次谷の中でも特に、過去に崩壊が発生した凹地部（地形的には谷頭部に相当する）において発生し易い。なお、一般の表層崩壊は、降雨による土中の地下水の上昇に伴うせん断抵抗力の低下が主な原因とされている。
- (4) シカの食害による下層植生（林床植生）の衰退や間伐等の手入れ不足による下層植生（林床植生）の衰退により、表層土の浸透能が低下し、地表流量が増加することにより森林斜面においてリル、ガリが発生しこれが拡大することにより崩壊になる場合も目立つようになってきている。
- (5) 豪雨の強度、継続時間が長くなったことにより、溪流の流量が増加し、溪床・溪岸の浸食激しくなり、そのため溪岸崩壊が増加している。なお、溪岸崩壊は屈曲部の外湾側、本川と支川の合流点の水衝部において多く発生する。
- (6) 強風による風倒（特に根返り）が発生した斜面では表層土が攪乱されて強度が低下し、豪雨により斜面崩壊が発生し易くなる。

気象条件，自然環境，森林等の変化と斜面崩壊形態の関係を図 10. 9.1 に示す。

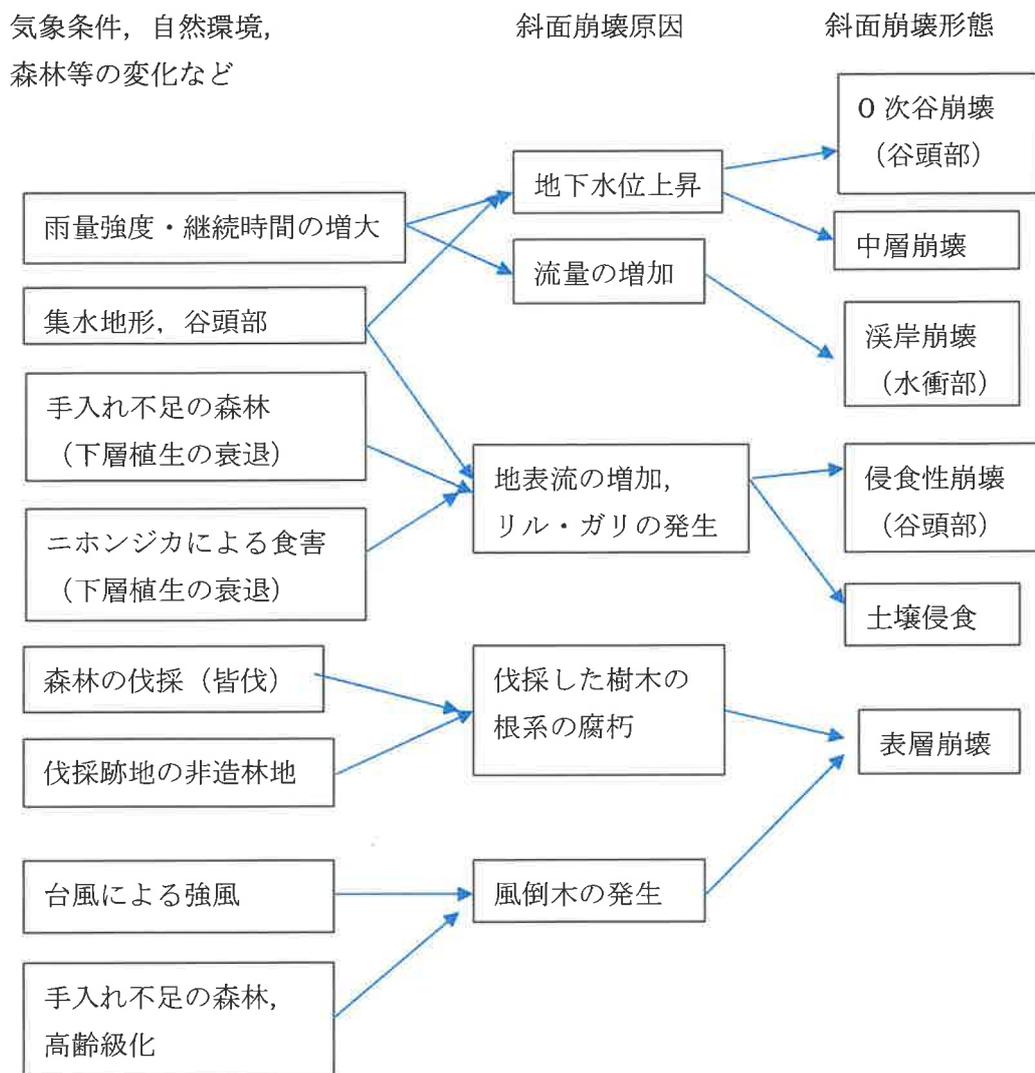


図 10. 9.1 気象条件，自然環境，森林等の変化と斜面崩壊形態の関係

10.9.3 斜面崩壊形態の調査

我が国の山地には一般に急勾配の斜面が広く分布している。これらの斜面に対して一律に治山対策を実施することは現実的ではない。したがって、図 10.9.2 に示すように、山地（森林）の急勾配の斜面（山地災害危険地区など）の中から危険性が高い斜面を抽出するとともに、斜面崩壊形態を予測して、その斜面崩壊形態に適した対策を実施する必要がある。表-1 に斜面崩壊形態別の崩壊の発生し易い斜面の特徴と主な斜面調査項目を示す。なお、いずれの斜面崩壊形態においても共通する調査項目としては、地形（斜面勾配，斜面長（斜面高），表層土深，地質，植生）がある。



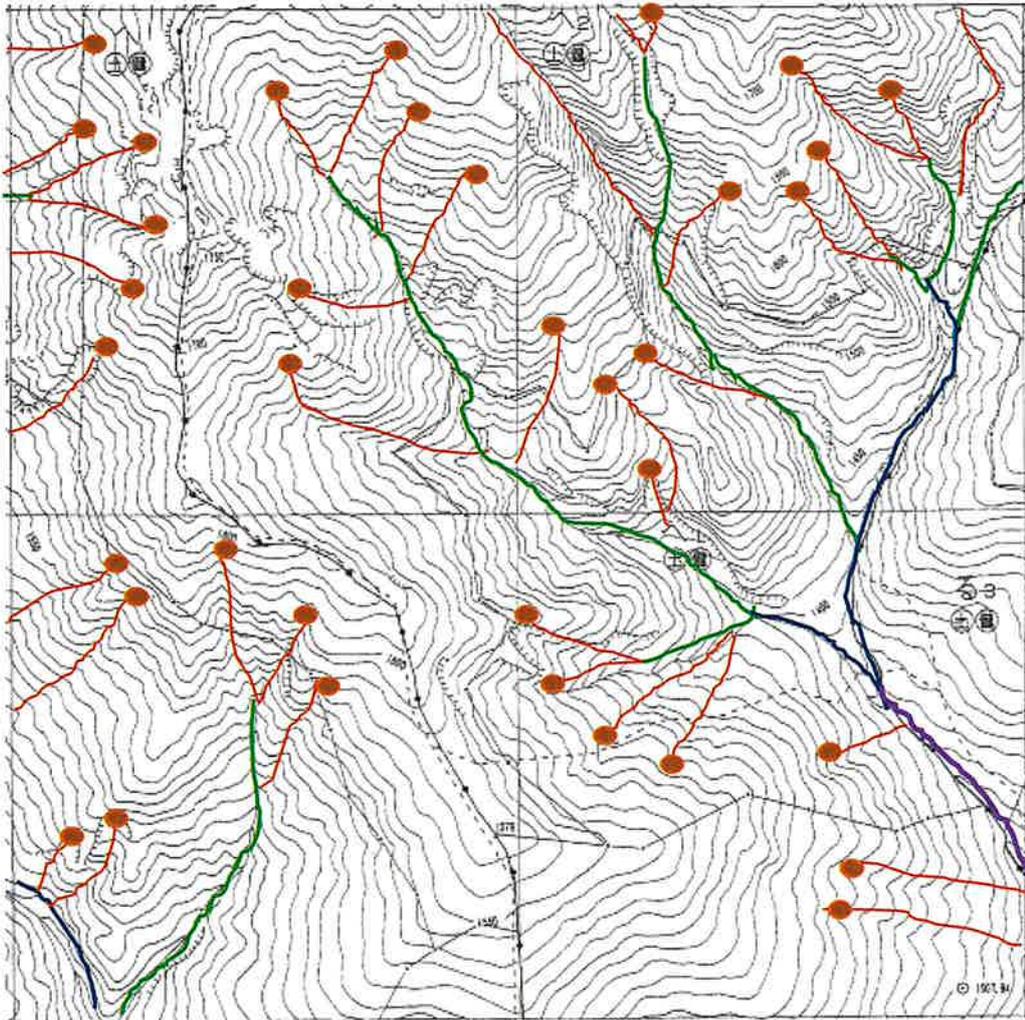
図 10.9.2 斜面調査～治山対策検討までの流れ

表 10.9.1 斜面崩壊形態別の崩壊の発生し易い斜面の特徴と主な調査項目

C. 斜面崩壊形態	B. 崩壊の可能性の高い斜面	A. 主な調査項目	調査法
(1) 0次谷崩壊（谷頭部，尾根部付近の崩壊）	0次谷区域内，谷頭部（源頭部）	谷密度が高い 谷頭部 尾根部付近	地形図 地形図 現地調査＋地形図（航空レーザ，UAV）
(2) 表層土壌侵食，侵食性崩壊	リル・ガリの存在，下層植生（林床植生）衰退地区，集水地形	リル，ガリの存在 下層植生被覆率 集水面積	現地調査（航空レーザ） 現地調査（航空レーザ） 現地調査＋地形図（航空レーザ，UAV）
(3) 表層崩壊	伐採跡地・幼齢林 風倒木地 山火事跡地	林齢（幼齢林） 表層土攪乱状態 下層植生被覆率	現地調査 現地調査（UAV） 現地調査（UAV）
(4) 中層崩壊	断層・破碎帯が有る，流れ盤斜面，亀裂がある，湧水がある。	断層・破碎帯の有無 流れ盤（受け盤） 亀裂の有無（崩壊前） 湧水の有無（崩壊前）	現地調査，シームレス地質図 現地調査 現地調査 現地調査
(5) 溪岸崩壊	溪流の外湾側，本支川合流部の水衝部	屈曲部の外湾側，水衝部	現地調査（航空レーザ，UAV） 現地調査（航空レーザ，UAV） 地形図（航空レーザ，UAV）

表 10.9.1 に示す調査法の参考資料を次ぎに示す。

調査法参考（1）谷密度、谷頭密度の測定法



参考図-1 谷密度、谷頭密度の測定法（参照；森林計画図・基本図：利根川上流 14）
（1km×1km の範囲）

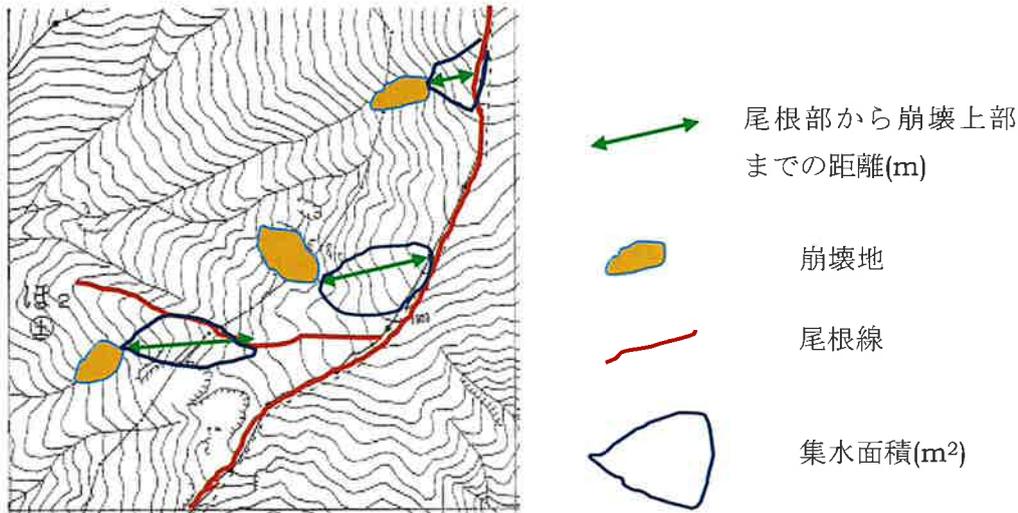
- | | | |
|--|---|--|
|  一次谷 |  二次谷 |  三次谷 |
|  谷頭（一次谷上流端） |  四次谷 | |

谷密度(m^{-1}) = 谷線総延長(m) / 領域の面積(m^2)

谷頭密度 (個/ m^2) = 谷頭個数 (個) / 領域の面積 (m^2)

木下博久ら（2019）（応用地質，第 59 巻，第 6 号，p472-484）によれば，「崩壊密度と谷密度には比較的高い相関がある。」としている。なお，「領域面積としては，メッシュによるよりも，流域面積単位に測定した方が良い。」との結論を示している。谷密度・谷頭密度が高いほど崩壊が発生し易いと考えられる。

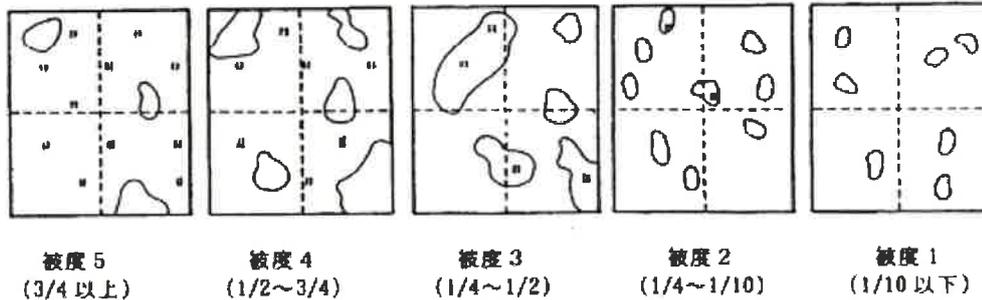
調査法参考（2）尾根部から崩壊地上部までの距離および集水面積（崩壊上部での）の測定法（崩壊地がある場合）



参考図-2 尾根部から崩壊地上部までの距離および集水面積

調査法参考（3）下層植生被覆率の測定法

下層植生（林床植生）：高さ約 1.5m 以下の植生。7～9 月に測定することが望ましい。1m×1m 程度の四角内の下層植生の面積率（上方からの植生部投影面積率）を 5 段階で目測する。



参考図-3 下層植生被覆率の測定法

被度 5；下層植生が面積の 3/4 以上を占める。

被度 4；下層植生が面積の 1/2～3/4 を占める。

被度 3；下層植生が面積の 1/4～1/2 を占める。

被度 2；下層植生が面積の 1/4～1/10 を占める。

被度 1；下層植生が面積の 1/10 以下。

（ブロンーブランケ法）

正式には 1m×1m のコドラート（方格）を用いるが、用いなくても良い。

写真を撮影しておけばさらに良い。

10.9.4 発生する可能性が高い斜面崩壊形態の予測

斜面調査結果を基に、図 10.9.3 に示すように、対象斜面（地区）において発生する可能性が高い斜面崩壊形態を予測する。

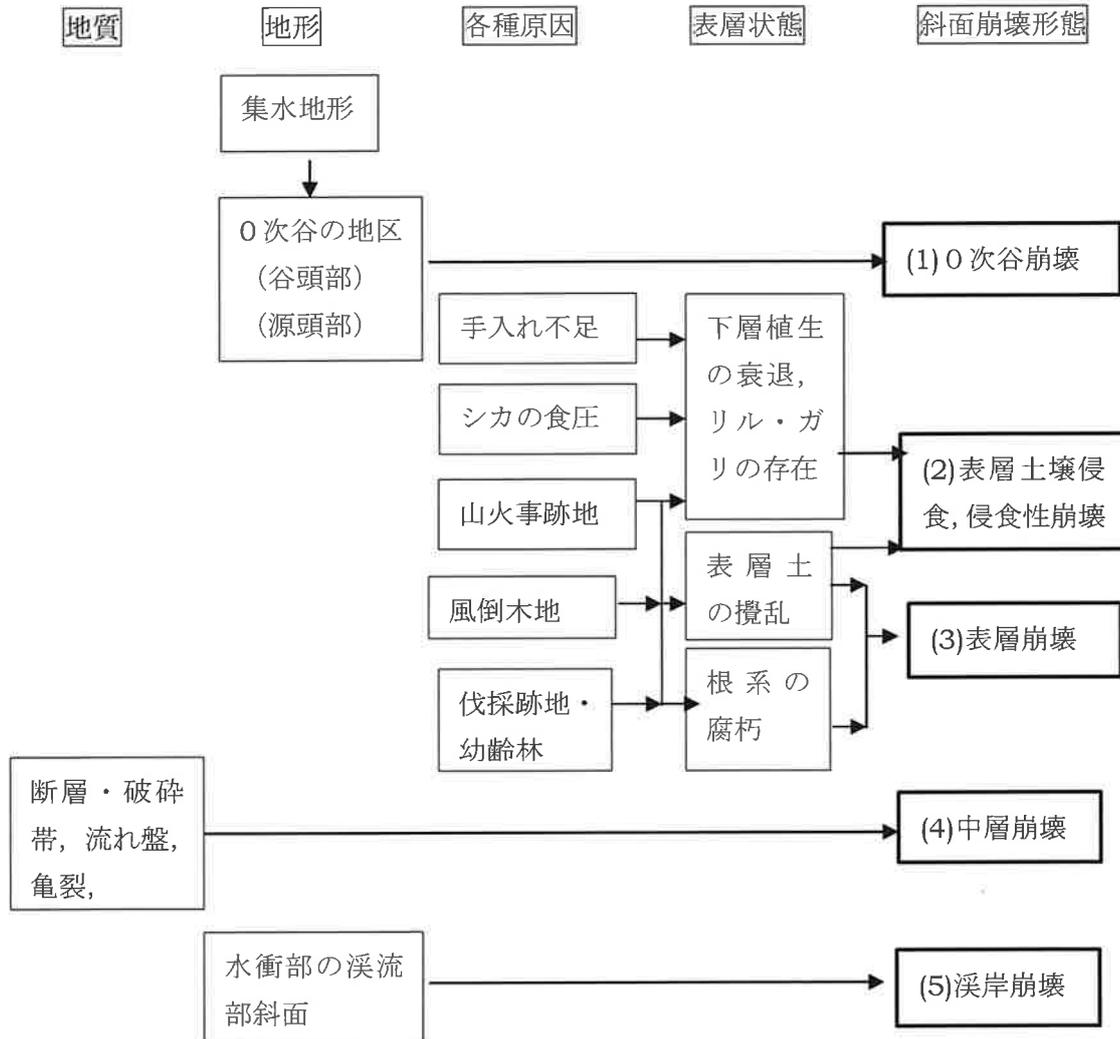


図 10.9.3 地形・地質・下層植生等の特徴と発生する可能性の高い斜面崩壊形態

10.9.5 斜面崩壊形態別の適する治山対策の検討

対象斜面（地区）において発生する可能性が高い斜面崩壊形態についてそれぞれに適する治山対策を検討する。

(1) 0次谷崩壊（谷頭部、尾根部付近の崩壊）

(i) 斜面の特徴

0次谷は谷地形の最上流部の全体としては凹型地形をした斜面であり、浸食の最前線に当たる地域である。このため、他の斜面に比べると斜面自体が不安定であり、斜面崩壊が発生する確率が高い。特に過去に崩壊が発生した部分の周辺は部分的に斜面勾配が急であり地下水や地表水が集まり易いことから斜面崩壊が発生し易い。なお、尾根部の付近で斜面崩壊が発生することもあるので、注意が必要である。

(ii) 斜面崩壊例

0次谷における斜面崩壊（表層崩壊）の例を図 10.9.4 に示す。



図 10.9.4 0次谷斜面崩壊（2016年7月広島災害）

(iii) 適する治山対策

0次谷は凹地形をしているが、基本的には谷ではなく、斜面である。

このため、斜面崩壊対策として図 10.9.5 に示すように山腹工（斜面崩壊対策手法）を用いることが適する。0次谷の斜面には、間伐等と合わせて筋工や柵工を設置すると良い。0次谷の中にある崩壊跡地のの上流側は特に急勾配となっており、地下水が集まり易いことから、このような箇所には土留工を配置するのが良い。また部分的に急勾配で不安定な斜面に対しては補強土工法を用いる。0次谷で斜面崩壊が発生した場合には崩壊土砂は下流の1次谷、2次谷を流下する可能性が高く、この時に溪岸・溪床を浸食して多量の土砂・流木を巻き込んでその規模を拡大して土石流となり下流を襲うこととなる。このような土石流の規模の拡大を防止することは土石流・流木対策とし

て重要である。このためには0次谷での斜面崩壊を防止することは土石流・流木対策としても効果が高い。そのため、0次谷の直下流において崩壊土砂を捕捉するためのネット工等を設置することも効果が高い。

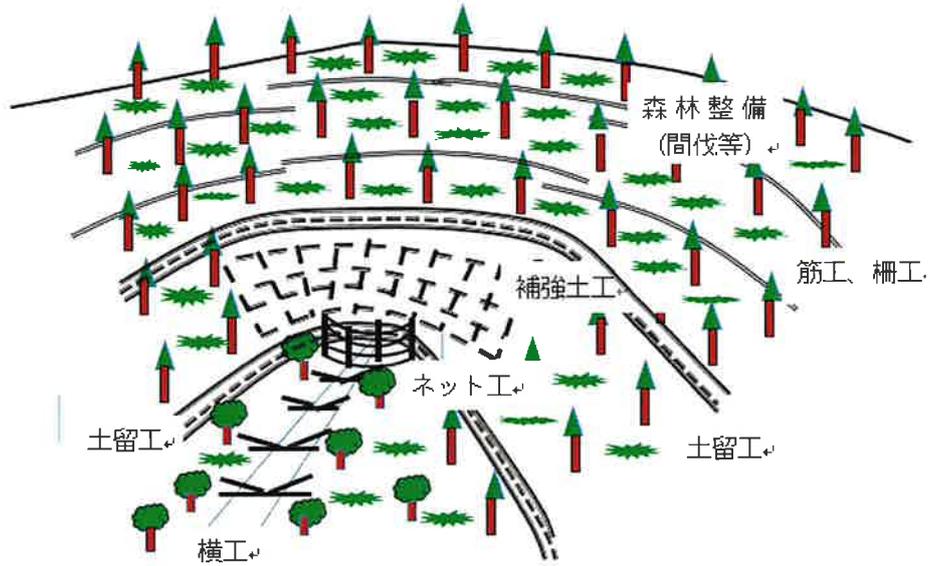


図 10.9.5 0次谷における治山対策の模式図

(2) 表層土壌侵食，侵食性崩壊

(i) 表層土壌侵食，侵食性崩壊の特徴と発生原因

下層植生（林床植生）が繁茂している森林では、豪雨があっても大部分の雨水は表層土内に浸透するため地表流は少ない。しかしながら、下層植生（林床植生）が乏しい森林内では、リター（落葉・落枝）も流出してしまい、表層土の浸透能が低下し、地表流の流量および流速が増加してしまうために、地表流により布状浸食が発生し、さらにリル、ガリが発生して土壌侵食が起こる。土壌侵食により多量の土砂が溪流に流れ込むと濁水を発生させたり、下流の溪床・河床を上昇させて土砂や洪水の氾濫を助長する。地表流が集まりガリ浸食を加速すると谷頭斜面が崩壊したり、谷壁斜面が崩壊して侵食性崩壊が発生し、崩壊土砂が溪流を流下して土石流・流木災害を引き起こすこととなる。下層植生（林床植生）の衰退原因は、森林等において間伐や除伐が適切に行われないことによる林床への日照不足による場合、シカの食圧が高い場合、山火事等により林床植生が消失する場合などがある。また、不適切な伐採等により表土が攪乱された場合にも表層土の侵食が発生する。

(ii) 表層土壌侵食，侵食性崩壊例

表層土壌侵食，侵食性崩壊の例を図 10.9.6～図 10.9.9 に示す。



図 10.9.6 皆伐後のシカの食害により下層植生が衰退して土壌侵食が発生した例

(東京都奥多摩町，2004 年7 月 11 日発生)



図 10.9.7 侵食開始点上部の地表流の流下痕跡
(群馬県沼田市柿平沢, (2016年9月7日))



図 10.9.8 侵食開始点の状況



図 10.9.9 山腹斜面のリル・ガリ侵食の発達に伴い発生した斜面崩壊
(熊本県芦北町田浦トンネル抗口付近, 2020年7月豪雨)

(iii) 適する治山対策

表層土浸食，侵食性崩壊の発生原因は下層植生（林床植生）の衰退に伴う浸透能の低下と地表流量・流速の増加にある。このため，対策としては，下層植生（林床植生）を回復させることであり，その原因により，間伐を実施したり，シカの生息密度を低下させたり，防護柵を設置することが重要である。しかしながら，このような対策を実施しても急速に下層植生（林床植生）が回復しない場合には，斜面において筋工や柵工を設置してリターの流出を防止し，地表流の流速を減少させて布状侵食を減少させ，リル侵食を抑制する。リル，ガリ侵食がかなり進んでいる場合にはリル，ガリの侵食拡大を防止するために水路工や横工を設置する（図 10.9.10）。



図 10.9.10 表層土壌侵食，侵食性崩壊に適する治山対策の例

(3) 表層崩壊

(i) 表層崩壊の特徴

表層崩壊は急斜面であればどこでも発生する可能性あるものの、特に可能性が高い森林斜面としては、皆伐や森林火災後 10～20 年を経た斜面で根系が腐朽したがまだ新しい樹林の根系が十分には発達していない斜面や、風倒木（特に根返りにより表層土が攪乱された）の発生した斜面などであり、急勾配で表層土が薄い斜面で表層崩壊の可能性が高い。

(ii) 表層崩壊例

表層崩壊の例を図 10.9.11, 図 10.9.12 に示す。



図 10.9.11 表層崩壊の例（熊本県芦北町，2020 年 7 月豪雨）



図 10.9.12 風倒木地における表層崩壊の例（京都市北区，2020 年 7 月撮影）

(iii) 適する治山対策

表層崩壊の主な原因が根系の腐朽による場合には、再生林による幼木の保育管理を充実させて生長を促し、根系の発達を促進させ、根系が十分に発達するまでは柵工や土留工により斜面の安定度を強化する。また、根返りの生じた風倒木地については倒木を除去して再生林を行うとともに、表層土の攪乱により崩壊の危険性が高い斜面では短期的な対策として、柵工や杭工により斜面の安定度を向上させたり、人家に近い斜面ではより安全度が高い補強土工、ネット捕捉工、コンクリート法枠工等を施工する（図 10.9.13）

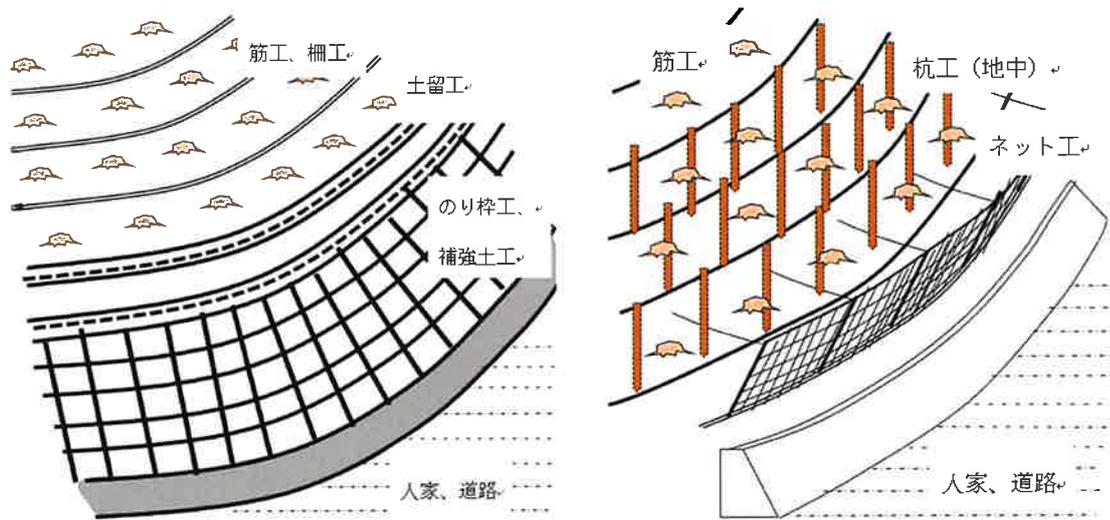


図 10.9.13 表層崩壊に適する治山対策の例

(4) 中層崩壊

(i) 中層崩壊の特徴

中層崩壊はすべり面の深さが2m～5m程度と根系の深さよりも深いために根系による斜面崩壊の抑制効果は期待できない。発生の引き金になるのは基本的には地下水位の上昇と考えられる。また、中層崩壊が発生する素因としては地質構造による影響が大きく、斜面内あるいは斜面付近に弱層となる断層・破碎帯が走り、流れ盤の斜面において発生し易いと考えられる。

(ii) 中層崩壊例

中層崩壊の例を図 10.9.14 に示す。



図 10.9.14 中層崩壊の例（熊本県芦北町，2020年7月豪雨）

(iii) 適する治山対策

すべり面が2m～5m程度と根系よりも深いので森林整備による抑止効果は期待できない。そのため、斜面崩壊の抑制工として地表水・地下水排除工，抑止工として補強土工，法枠工，アンカー工，杭工等が適する（図 10.9.15）。

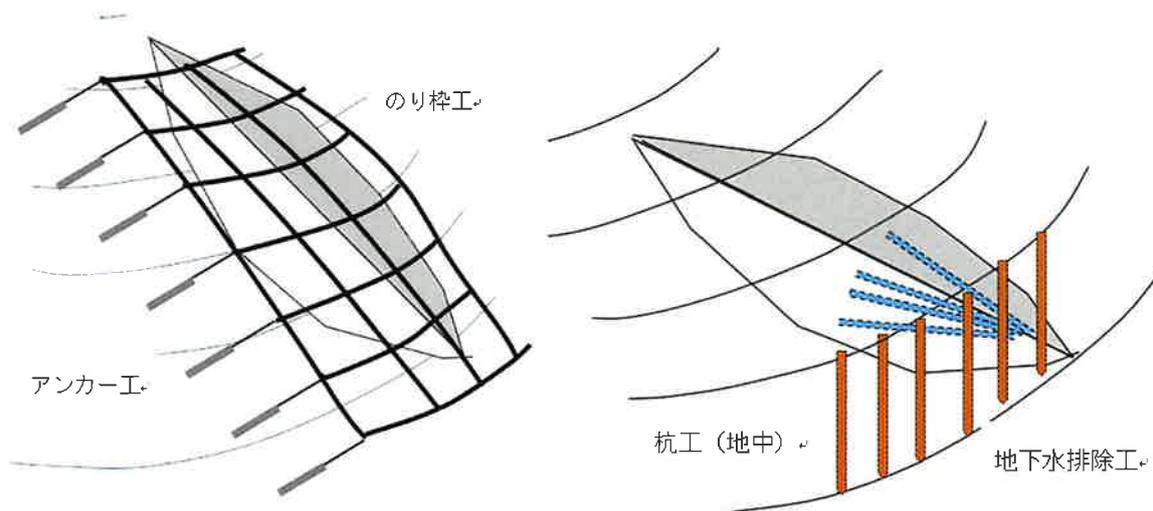


図 10.9.15 中層崩壊に適する治山対策の例

(5) 溪岸崩壊

(i) 溪岸崩壊の特徴

溪流沿いの急斜面の下部にあたる部分が流水等により侵食されて不安定になっている箇所が起こりやすい。特に、水衝部では洪水時や土石流時には流速が早く、水深も大きくなるため斜面下部の侵食が進み、不安定となり溪岸崩壊が発生し易くなる。

(ii) 溪岸崩壊例

溪岸崩壊の例を図 10.9.16 に示す。



図 10.9.16 溪岸侵食による斜面崩壊の発生（2017年7月九州北部災害）

(iii) 適する治山対策

溪岸崩壊を防止するために、直接的に溪岸を保護する護岸工、溪床を上昇させて溪岸斜面の安定度を向上させる治山ダム工などを設置する（図 10.9.17）

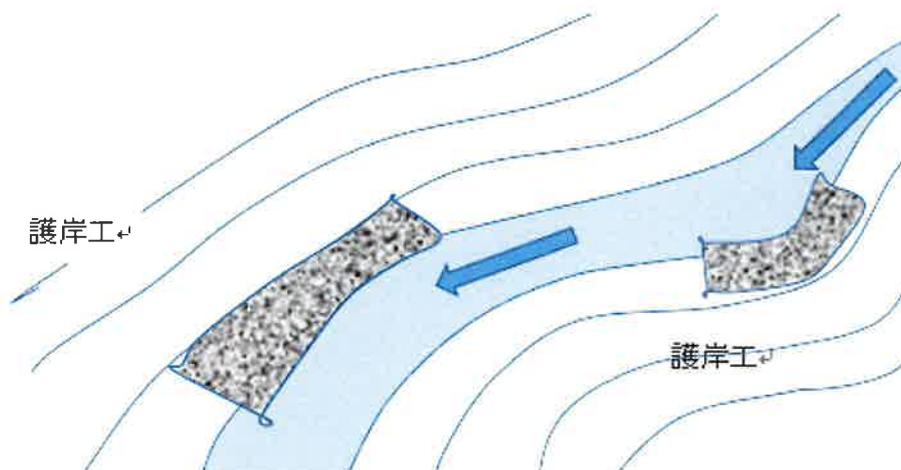


図 10.9.17 溪岸崩壊に適する治山対策の例

10.9.6 斜面崩壊による災害の防止・軽減に関する治山対策の機能強化の検討

治山対策の機能強化については次の事項を基に総合的に検討する。

(i)斜面崩壊の想定規模

(ii)斜面崩壊による被災度

(保全対象人家戸数, 保全対象施設の種類と規模並びにそれらの被災度)

≒(iii)治山対策施設による効果

(iv)治山対策の費用

(v)施工・維持管理の難易度

個々の斜面における斜面崩壊対策の想定規模あるいは発生確率（頻度）は基本的には個々の斜面における現地調査結果を基に斜面崩壊形態・規模, 発生確率を推定することにより決定する。その上で, その想定規模あるいは発生確率における個々の斜面崩壊による被災度（被害の大きさ）を推定する。基本的には「被災度」≒「治山対策施設による効果」と考えられる。被災度には建物や施設等のように金額で評価できるものと, 人命のように金額による評価が不適切なものがある。なお, 被災度（被害）は崩壊の規模や発生確率のみならず影響地域内の建物や施設の多寡等により異なる。一般に治山対策施設による効果が小さい斜面に比べて, 治山対策施設による効果が大きい斜面に対しては高い機能（安全度が大きい）を持つ施設を計画する。一般的には機能の高い施設は低い施設に比べて費用は多くなる。このような関係を表 10.9.2 に示す。例えば, 図 10.9.13 に示した表層崩壊対策施設として, のり砕工, 補強土工, 杭工等は筋工, 柵工, 土留工等に比べて高機能（安全度が高い）と考えられる。さらに, 同じ種類の対策施設でも, 施設の安全率を通常よりも大きくすることにより高機能にすることも考えられる。

表 10.9.2 は個々の斜面崩壊における被災度等の違いにより対策施設の機能を変える場合であるが, これとは別に, 同一斜面において, 気候変動による降雨量・降雨強度の増加により崩壊の発生確率あるいは崩壊規模が変化して被災度等が変化することも考えられる。なお, 被災度（被害）は崩壊の規模や発生確率のみならず影響地域内の建物や施設の多寡等により異なる。対策施設による効果が想定できればそれに従って表 10.9.3 に示すように対策施設の機能を向上させることも考えられる。しかしながら, 降雨量・降雨強度と斜面崩壊の発生確率, 規模の関係については未だ不明の点が多いので, 具体的な方法は今後の検討事項である。

表 10.9.2 斜面崩壊対策施設の機能強化の考え方
(個々の斜面崩壊における被災度, 発生確率（頻度）等が異なる場合)

想定規模の降雨時の斜面崩壊による被災度（被害）あるいは発生確率	小	⇔	大
対策施設による効果	小	⇔	大
対策施設の機能（安全度）	低	⇔	高
対策の費用	少ない	⇔	多い

表 10.9.3 斜面崩壊対策施設の機能強化の考え方
 (同一斜面において、崩壊規模、発生確率が異なる場合)

想定降雨の規模	100年超過確率⇔気候変動を考慮した場合
斜面崩壊の規模あるいは発生確率	小 ⇔ 大
想定規模の斜面崩壊による被災度(被害)あるいは発生確率(頻度)	小 ⇔ 大
対策施設による効果	小 ⇔ 大
対策施設の機能(安全度)	低 ⇔ 高
対策の費用	少ない ⇔ 多い

10. 10 土砂、流木の流出形態の変化に対応する治山施設の適正配置と機能強化（石川芳治）

10. 10. 1 気象条件、自然環境および森林等の変化

ここでは、土石流・流木による災害が発生する前の予防的な対策を行う場合の治山施設（森林整備を含む）を対象とする。

近年、我が国の気象条件や森林を取り巻く環境は変化しており、それらの主なものは次のとおりである。

- (1)気候変動により、短時間雨量強度が大きな豪雨が増加しているとともに、強度の強い豪雨の降雨期間も長くなり、さらに1回の豪雨での影響範囲も広域化してきている。また、これらの強度の強い豪雨の発生頻度も増加の傾向にある。
- (2)森林の皆伐面積は小さくなり、人工林の高齢級化が進んでいる。高齢級の立木が流木になると、流木量が増えるばかりでなく、大径化により折れ難くなり、流木長が長くなり橋梁に詰まり易くなる。
- (3)降雨量が多くなると洪水流量も大きくなり、流木は下流まで流出し易くなる。

山地における、多量の土砂、流木の下流への流出形態としては土石流とそれに伴う流木が主である。

10. 10. 2 土石流・流木の発生・流下・堆積形態

(1) 土石流：土石流の発生・流下・堆積機構

土石流の多くは、①山腹斜面崩壊や溪岸斜面崩壊による崩壊土砂が急な溪床勾配（約15°以上）の溪流に流入して流下することにより起こる。②崩壊土砂が溪床状に堆積して土砂ダムができ、これが後に決壊して土石流となる場合もある。また、③溪床堆積土砂が流動化して土石流化する場合もある。一旦土石流が溪流を流下し始めると、その流下過程で、溪床・溪岸を侵食して土砂量を増し、さらにこのときに溪床・溪岸に生育している樹木を巻き込んで流木量を増加させながら下流に流下し、溪床勾配が緩くなった部分で土砂や流木が堆積し、溪流の外に氾濫する（図10.10.1）。

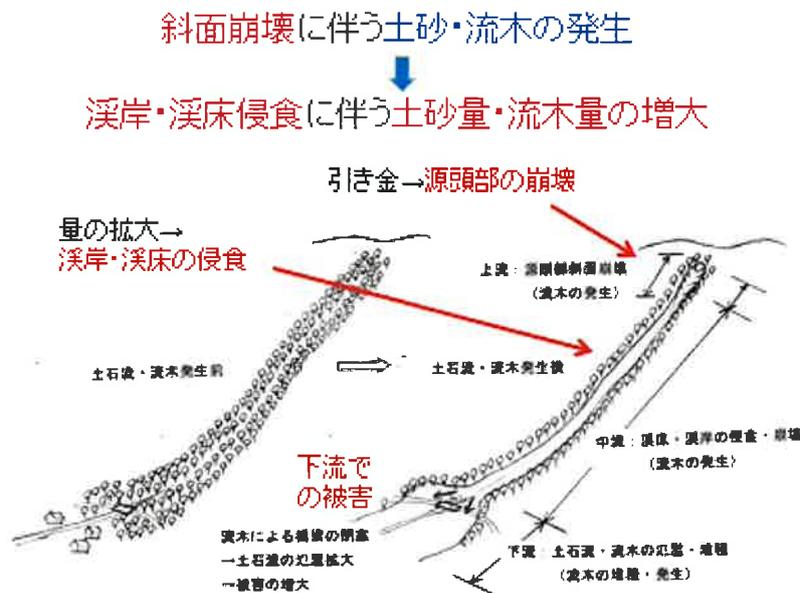


図 10. 10.1 溪流における土石流・流木の発生・拡大の原因

(2) 流木：流木の発生・流下・堆積機構

土石流とともに流下する流木の発生源のうち主なものは、①斜面崩壊部上に生育していた樹木と存在していた倒木、②土石流が流下する際に侵食された部分に生育していた樹木と堆積していた倒木である。これらの流木は溪流を流下する際に折れて短くなるとともに、しばしば溪流部を流下する際に集まり、流木塊となって流下する。このため、下流部の短い支間長の橋梁を閉塞して土石流や土砂・洪水の氾濫を助長し被害を大きくする。ただし、流木は流水に浮いて流れ易いので、多くの土砂が堆積した後も洪水によりもさらに下流に流下して行き、下流の橋梁を閉塞したり、海にでて漂流して船舶の航行に支障を与える場合がある。

10. 10. 3 土石流・流木の発生と規溪流と規模の調査

土石流・流木の発生危険溪流の現況調査と土砂量、流木量の推定調査は「土石流・流木対策の手引き」(林野庁)に基づいて行う。

10. 10. 4 土石流・流木の例

土石流・流木の発生、流下、堆積、氾濫の例を図 10. 10.2～図 10. 10.6 に示す。



図 10. 10.2 土石流・流木の発生・流下・堆積・氾濫
(2014 年 8 月広島災害, 広島市安佐北区高松山)



図 10. 10.3 中流部における土砂と流木の発生 (2017 年 7 月九州北部災害)



図 10. 10.4 土石流の堆積・氾濫, 巨石が含まれている。(2018 年 7 月, 広島県熊野町川角)



図 10.10.5 流木による閉塞された橋梁（平成 29 年 7 月九州北部豪雨，福岡県東峰村，大肥川支川宝珠山川）



図 10.10.6 2013 年 10 月台風 26 号による伊豆大島土石流・流木災害（大金沢）

10. 10. 5 土石流・流木災害を防止・軽減するための溪流部における治山対策

溪流における土石流・流木対策は基本的には「土石流・流木対策の手引き」（林野庁）に基づいて行う。

溪流部において山地災害を引き起こす主な現象は土石流と流木の流下・氾濫・堆積であるがこれらの現象は斜面崩壊が引き金となって起こる場合が多いため、斜面崩壊対策と組み合わせて検討する必要がある。また、ほとんどの場合、土石流と流木は同時に発生・流下・堆積する場合が多いので、両者について同時に対策を検討することが重要である。

(i) 溪流の上流部（土石流発生区間）（溪床勾配 15° 以上）

土石流の発生の引き金になるのは溪流の上流部における山腹斜面崩壊である場合が多い。このため、溪流の上流部（急勾配で溪床・溪岸の侵食が起こりやすい）において治山ダムや簡易なネット工等で崩壊土砂を捕捉することで土石流への発達を防止することが重要である（図 10. 10.7, 図 10. 10.8）。さらに、豪雨により溪床堆積物内の地下水位・水位が上昇して溪床堆積物が流動化することにより土石流が発生する場合もある。このような場合には、溪床に階段状に床固工を設置して溪床堆積物の流動化を防止することにより土石流の発生を抑止する（図 10. 10.8）

主要な土石流の発生原因である源頭部の斜面崩壊を防止することで、流木の発生も防止・軽減できる。

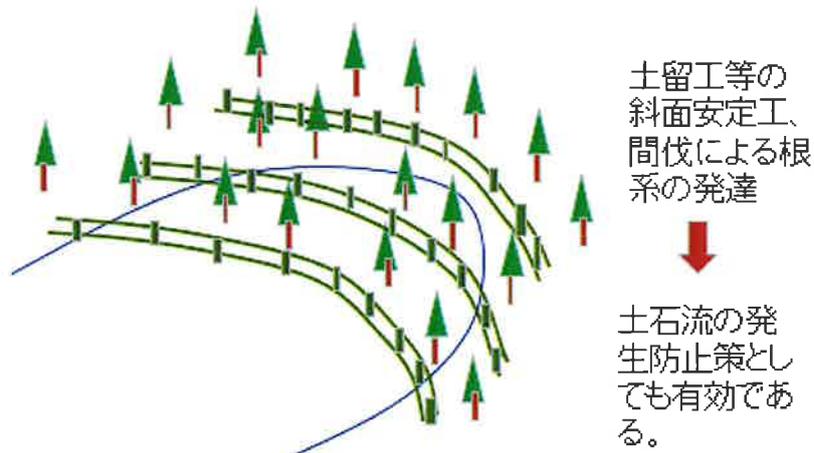


図 10. 10.7 溪流の上流部（源頭部，0次谷）における流木発生対策の模式図

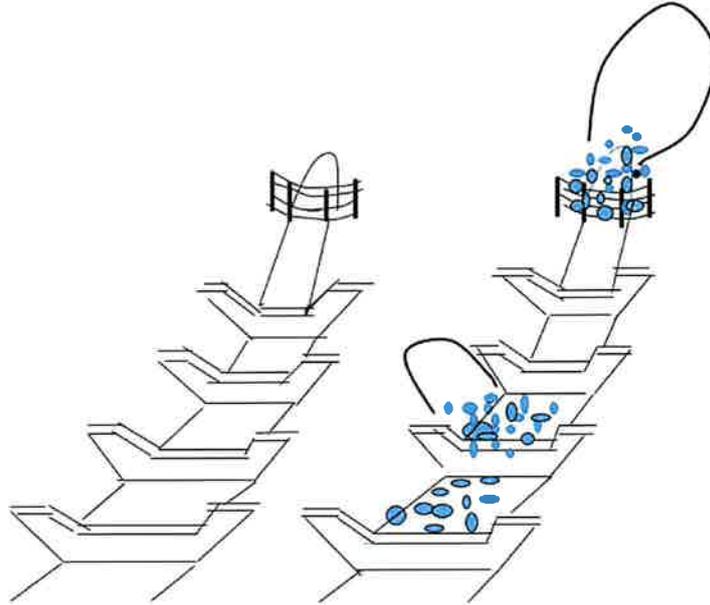


図 10.10.8 溪流の上流部における土石流・流木対策の模式図

(ii) 溪流中流部（土石流流下区間）（溪床勾配 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ）

溪流の中流部は土石流の流下区域にあたるが、この区間においても土石流の流下に伴い溪床や溪岸が侵食されて多量の土砂や流木が生産される。したがって、溪流の中流部にも治山ダムを階段状に設置して溪床・溪岸の侵食を抑制して、土砂量・流木量の増大を防止することが重要である（図 10.10.9）。また、流木量を減少させる方法としては、事前に溪流沿いの人工林を広葉樹に林相転換をするなどの方法をとることも効果的である（図 10.10.10）。さらに流木が流下してきた場合に効率的に捕捉するためには、溪流の湾曲部や拡幅部に流木止や流木捕捉式治山ダムを設置する（図 10.10.11）。

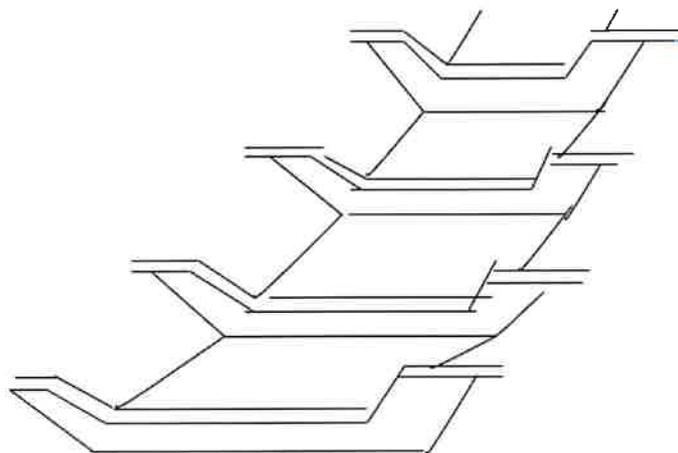


図 10.10.9 溪流中流部における階段状治山ダムの模式図

森林整備による方法; 流木量を減らし、流されにくい森林を育てる。良好な溪畔林・溪流生態系を保全する。

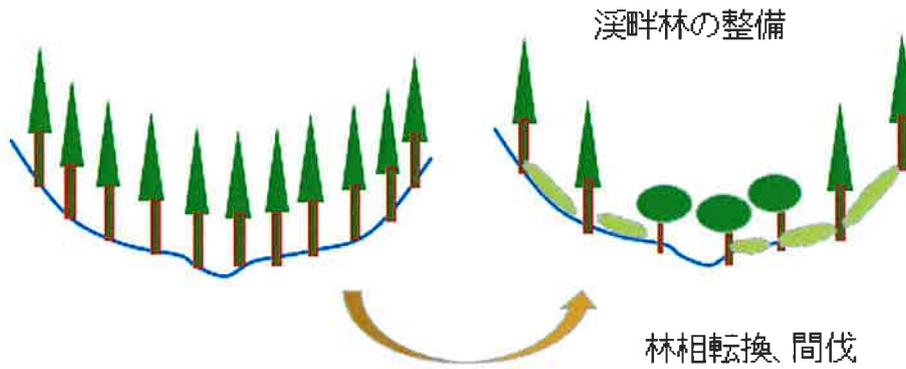


図 10. 10.10 森林整備による流木発生対策

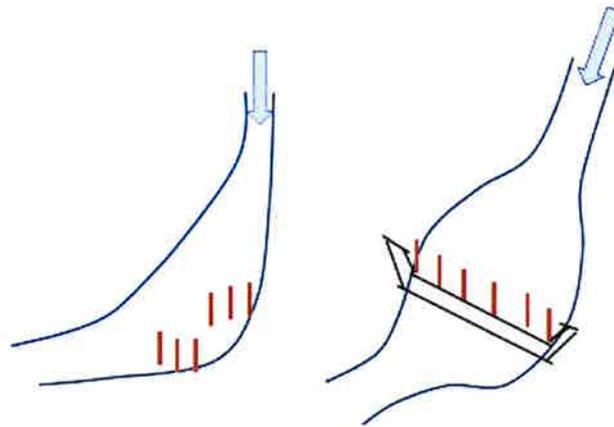


図 10. 10.11 溪流の湾曲部，拡幅部への流木止，流木捕捉式治山ダムの設置模式図

(iii) 溪流下流部（土石流堆積区間）（溪床勾配 10° 未満）

溪流の下流部では土石流の流量（流出土砂量）は最大となりこのため、既存の流路内では流下しきれずに、流路外の氾濫し、堆積する。また、この付近に橋梁があると、橋梁に流木が閉塞されることにより土石流の氾濫は助長される。このため、氾濫・堆積区域内に人家や施設があると大きな被害を発生させる。人家や施設の被害を防止するためにはその上流において土石流や流木を捕捉するために治山ダムや流木捕捉式治山ダムを設置する（図 10. 10.12）。

一般に溪流下流部は溪床勾配が緩く、河幅も広くなるので治山ダムや流木捕捉式治山ダムの土砂や流木の捕捉効果は高い（図 10. 10.13）。一方で、土石流の流量や流木量は最も大きくなるので治山ダムの補強や流木捕捉式治山ダムの補強が必要である。特に、土石流に巨石を含む場合には、巨石の衝突による衝撃力を考慮して増厚等の処置を行う。また、土砂や流木が氾濫しても人家等に被害が起こらないような森林域がある場合には、これらの森林を土砂や流木の堆積・捕捉促進に用いることも可能である。しかしながら、森林による土砂や流木の捕捉には限界があるので、注意深い検討が必要である。

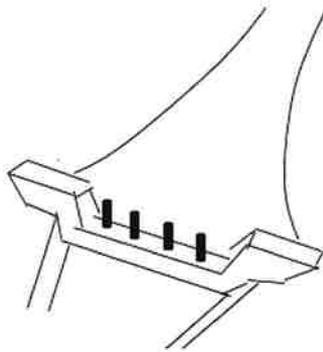


図 10. 10.12 溪流の下流部における流木捕捉式治山ダムの設置

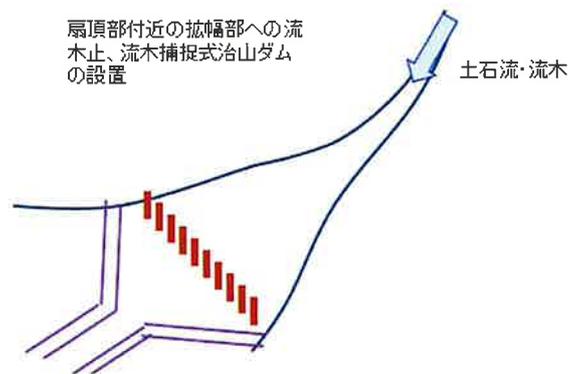


図 10. 10.13 溪流下流部における流木対策の模式図

10. 10. 6 土石流・流木による災害の防止・軽減に関する治山対策の機能強化の検討

土石流・流木による災害の防止・軽減に関する治山対策の機能強化については次の事項を基に総合的に検討する。

- (i) 土石流・流木の計画規模（流出土砂量，ピーク流量，流速，流動深，流木量等）
（溪流により異なる）
- (ii) 土石流・流木による被災度
（保全対象人家戸数，保全対象施設の種類と規模並びにそれらの被災度）
≒ (iii) 治山対策の効果
- (iv) 治山対策の費用
- (v) 施工・維持管理の難易度

土石流・流木の計画規模（流出土砂量，ピーク流量，流速，流動深，流木量等）は基本的には(i) 現地調査等を基に決定する（例えば「土石流・流木対策の手引き」（林野庁））。しかしながら，現地調査等によっては決定が困難な場合には，(ii) 地形，地質，植生，気候等が類似している地区での既往の土石流・流木の事例を参考に決定することも可能である。

各溪流において土石流・流木の計画規模（流出土砂量，ピーク流量，流速，流動深，流木量等）が決まれば，その計画規模における各溪流での土石流・流木による被災度（被害の大きさ）を推定する（表 10. 10.1）。基本的には「被災度」≒「治山対策施設による効果」と考えられる。被災度には建物や施設等のように金額で評価できるものと，人命のように金額による評価が不適切なものがある。なお，被災度は土石流・流木の計画規模のみならず影響範囲内の建物や施設の多寡等により異なる。一般に治山対策施設による効果が小さい溪流に比べて，治山対策施設による効果が大きい溪流においては高い機能（安全度が大きい）を持つ施設を計画する。一般的には機能の高い施設は低い施設に比べて費用は多くなる。斜面崩壊対策のところでも説明したように，施設の機能の高低は施設の種類によっても異なるが，同じ種類の施設では，施設の安全度（強靱性）によっても異なる。

なお，土石流中に巨石が含まれることが想定される場合には，対策施設への巨石の衝突により発生する衝撃力を考慮して施設を設計することが重要である。

表 10. 10.1 表-4 土石流・流木対策施設の機能の考え方
（溪流により計画規模，被災度等が異なる場合）

計画規模の土石流・流木による被災度（被害）	小 ⇔ 大
対策施設による効果	小 ⇔ 大
対策施設の機能（安全度）	低 ⇔ 高
対策の費用	少ない ⇔ 多い

表 10. 10.1 では同一溪流において1種類の計画規模を想定している場合を示しているが，同一溪流において通常の（これまでの）計画規模とは別に，気候変動による降雨の影響を考慮して計画規模を決定する方法がある。具体的には，土石流・流木対策においてはこれまで，通常は100年超過

確率の降雨により発生すると想定される規模（流出土砂量，ピーク流量，流速，流動深）を計画規模としてきた。しかしながら，気候変動等により，近い将来，降雨強度や降雨量が大きくなることが予想されているので，そのような大きな降雨により発生する場合の土石流・流木の計画規模を設定して対策を行うことが考えられる。100年超過確率規模の土石流・流木をL1規模，気候変動による降雨の増加を考慮した場合の土石流・流木をL2規模とした場合には，L1規模<L2規模になると考えられるので，表10.10.2に示すようにL1規模に比べて，L2規模の施設にはより高い機能が必要となる。

表 10.10.2 表-5 土石流・流木対策施設の機能の考え方
(同一溪流において，L1規模，L2規模を想定した場合)

計画降雨の規模	100年超過確率⇔気候変動を考慮した場合
計画土石流・流木の規模	L1規模 ⇔ L2規模
計画規模の土石流・流木による被災度（被害）	小 ⇔ 大
対策施設による効果	小 ⇔ 大
対策施設の機能（安全度）	低 ⇔ 高
対策の費用	少ない ⇔ 多い

L1規模はこれまでの方法で決定することができる。一方で，L2規模をどのように決定するかを検討する必要がある。一つの方法としては，気候変動による降雨量・降雨強度の増加を推定して，その降雨量・降雨強度を用いて（すわわち大きな降雨量・降雨強度を用いて）従来と同じ方法で計画規模を推定する方法が考えられる。このためには，降雨量・降雨強度と土石流・流木の規模（流出土砂量，ピーク流量，流速，流動深）との関係を知ることが必要である。しかしながら，降雨量・降雨強度と土石流・流木の規模の関係についてはこれまで多くの研究が行われてきているが，未だに，多くの人が納得できる結論に至っていない。

このような中で，砂防便覧（2015）2)に掲載されている約450個の土石流に関するデータに基づいた確率的な分析により，図10.10.14～図10.10.17に示すように，L2規模の土石流の計画流出土砂量および計画ピーク流量を95%あるいは99%予測線を用いて推定する手法が提示されている3)。具体的には，図10.10.14～図10.10.17に示す95%あるいは98%予測線を用いて，対象溪流の流域面積からL2規模の土石流の計画流出土砂量および計画ピーク流量を設定することになる。計画ピーク流量が設定できれば， Manning式等を用いて，土石流の流速や流動深を算定することができる。

一般的に，L2規模はL1規模に比べて，土石流のピーク流量，流速，流動深は大きくなるため，対策施設，例えば治山ダムを例にとれば，L2規模の設計外力（土石流の流動深による静水圧，流体力，衝撃力）が大きくなり，図10.10.18に示すように，結果としてL1規模の外力に基づく設計に比べて，L2規模に対応する施設は機能を高める必要がある。このためには，治山ダムの天端厚（断面積）を大きくしたり，鉄筋で補強する等の対応が必要となる。

なお、既設の対策施設の中で重要なものについては、L2 規模の設計外力に対して機能を発揮するように改築を行うことも必要である。

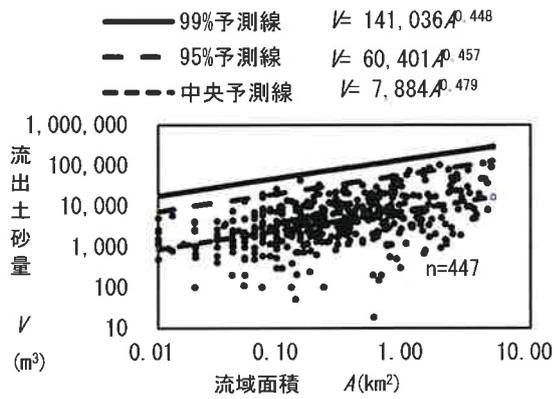


図 10.10.14 全データを用いた場合の流出土砂量の99%,95%予測線

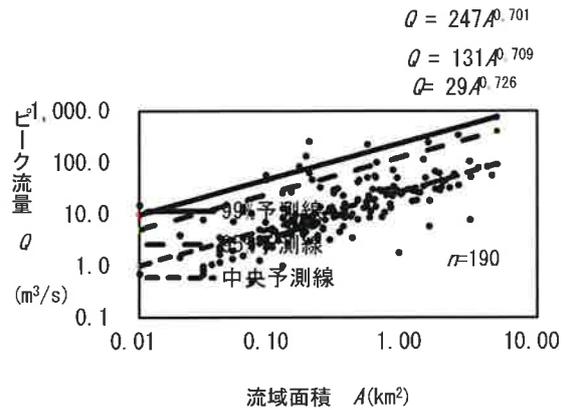


図 10.10.15 火山噴出岩、古生層・中生層を除く地質のピーク流量の99%,95%,中央予測線

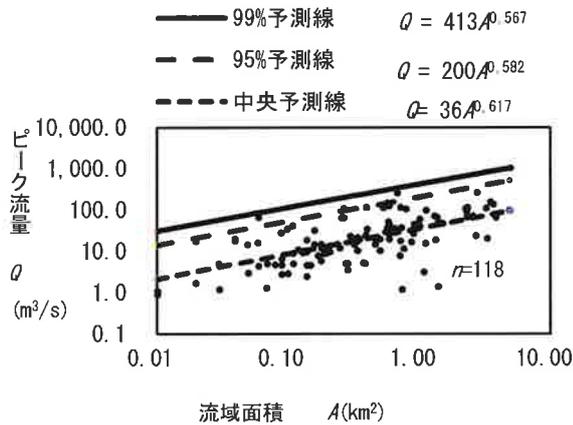


図 10.10.16 火山噴出岩のピーク流量の99%,95%, 中央予測線

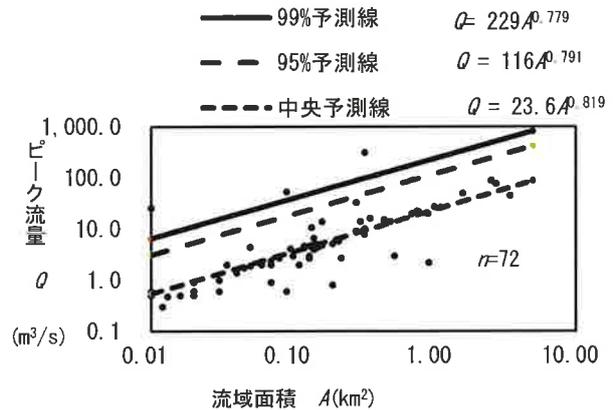


図 10.10.17 古生層・中生層のピーク流量の99%,95%, 中央予測線

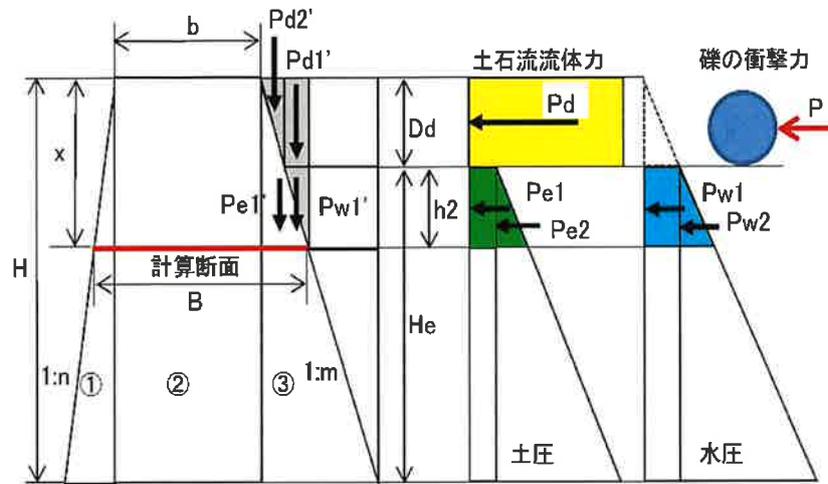


図 10. 10.18 L2 規模の外力による安定計算時の荷重図

<引用文献>

- 1)石川芳治, 執印康裕, 柏原佳明, 宮田直樹, 大野亮一, 飛岡啓之, 梶原誠, 沼宮内信 (2016) 2016年9月7日台風13号による柿平沢土砂災害, 砂防学会誌 Vol.69, No.4, p.37-43
- 2) (一社) 全国治水砂防協会 (1978, 1983, 1988, 2015) : 砂防便覧・昭和53年版, p.52-89, 昭和58年版, p.38-45, 昭和62年版, p.48-71, 平成26年版, p.66-109
- 3)石川芳治 (2021) 流域面積, 降雨量, 地質が土石流の流出土砂量・ピーク流量に与える影響と確率的手法を用いた流出土砂量・ピーク流量の推定法, 砂防学会誌, Vol.73, No.5, p.15-26

10.11 風倒木災害に対応する治山施設の適正配置と機能強化（石川芳治）

10.11.1 気象条件、自然環境および森林等の変化

風倒木に関連する、我が国の気象条件や森林を取り巻く環境の変化の主なものは次のとおりである。

- (1)気候変動により、台風が大型化、強大化しており、さらに発生頻度も高まっている。
- (2)森林の皆伐面積は小さくなり、人工林の高齢級化が進んでいる。高齢級の樹林は一般に風倒の被害を受けやすい。

10.11.2 風倒木被害への対応

風倒木被害を防止・軽減する手法としては、大きくは、事前の対策として(i)森林を強風に対して強くする、事後の対策として(ii)風倒木被害の把握(調査)、(iii)風倒木の処理(二次災害防止)(iv)風倒木被害地の復旧(再度災害防止)がある。また、ソフト対策として(v)警戒避難基準雨量の検討等がある。

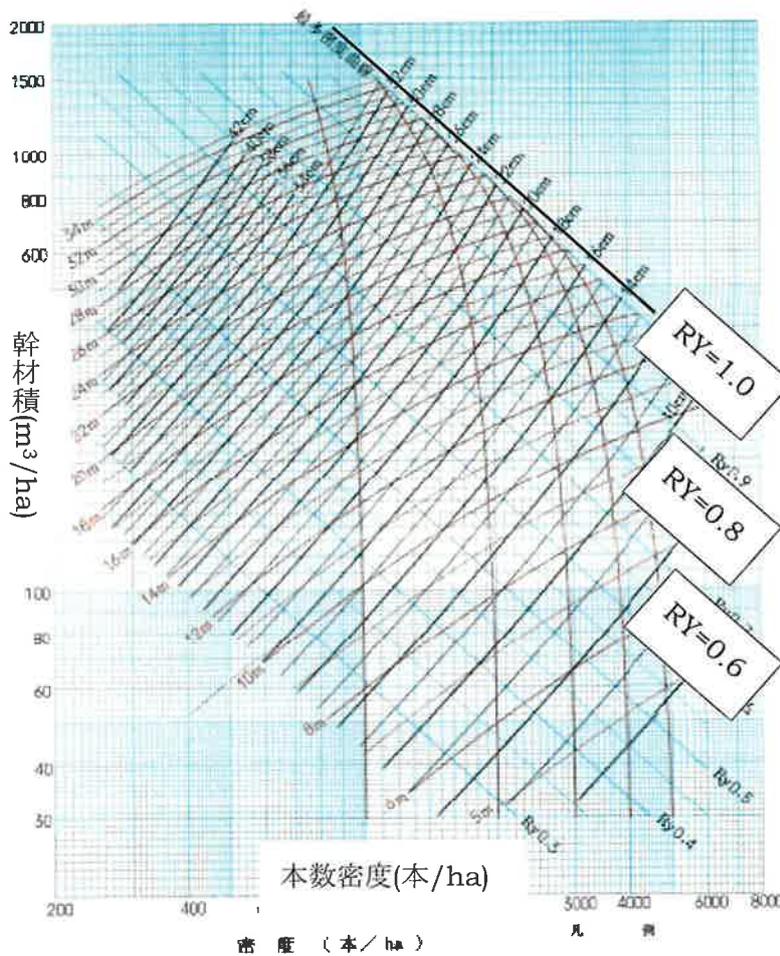
(1) 強風に強い森林を育てる（事前対策）

台風等の強風により風倒木被害を受けると、木材としての価値が低下するとともに、復旧にも多額の費用が掛かる。さらに、風倒木により、人命、家屋、道路、鉄道、電柱、配電線等に被害を与える場合もある。このような風倒木被害を未然に防ぐことは森林の整備・保全を図り、土砂の流出、洪水、土石流等による災害の防止・軽減を図るために重要な課題であり、経済的な損失も防止することができる。風倒木被害を防止・軽減するためには強風に強い森林を育てることが重要である。このためには、普段からの森林の手入れ、管理が重要である。

(i)北海道水産林務部林務局森林整備課では「風倒木被害のリスクを軽減する森林づくり」(2018年)を公表しており、以下ではその要点を述べる。

a. 風倒木被害を軽減する森林づくりの方向性

- ・保護林帯の設置：単層林の風上側に、樹高の1～2倍程度の幅の保護林帯（耐風性がある樹種）を設けると風の被害を受けにくくなる。
- ・植栽方法の工夫：多樹種をパッチ状に植栽する（小面積の区画に分ける）と、強風の被害を受けにくくなる。
- ・適切な密度（本数）管理：本数密度が高いと、被害を受けやすい傾向があるので、適切な密度管理をする必要がある。図5.6.1に示す、林分密度管理図において、収量比を0.6～0.8程度とする。



注) 収量比(RY)は
最多密度(ある樹
高での上限の本数
密度)を1とした
時の、相対的な混
み具合。

一般に、0.8以上
は混み過ぎ、0.6
以下は空き過ぎ。

図 10.11.1 林分密度管理図の例

b. カラマツ人工林の仕立て方と耐風性

- ・ 植栽時の本数が少ない方が、耐風性が高い。
- ・ 30 年生前後で耐風性は低い。
- ・ 間伐直後では耐風性は低い。
- ・ 高齢では疎仕立て(密度が疎)の方が、耐風性が高い。
- ・ 風当たりの強い森林では風倒木被害が出やすい。事前に風当たりの強さを推定する。

c. 風倒木被害のリスクを考慮した施業方法

- ・ 風の強い場所と弱い場所で施業方法を変える。
- ・ 風の弱い場所では、風倒木被害のリスクを考慮しなくても良い。風以外の条件を考慮して、自由に選択できる。
- ・ 風の強い場所では、風倒木被害のリスクが高いので、施業方法を工夫する。

ア. ha 当たりの植栽本数を減らし、伐期を長くすると有利。

イ. 特に風が強い場所は短伐期も選択する。

d. 一般に風倒木被害に強い森林は、山地災害に強い森林(山地災害防止機能の高い森林)にもつながる。風倒木被害のリスクを軽減する森林づくりを進めると、根系や下層植生がよく発達した森林と

なることから、山地災害防止機能も高い森林となる。

- ・適切に間伐を実施し、適切な密度に維持する。
- ・状況に応じて複層林化、針広混交林化を行う。

(ii) 水上⁵⁾らによれば、間伐後 1~2 年後経過した林分では被害が最も大きく、間伐後 6 年以上経過した林分では被害が小さいこと、および、無間伐状態の過密林分では風倒木の被害が大きくなる傾向があるため、間伐を早目に実施し、低密度林で管理することが風に対して安定を高めることになっている。

(2) 風倒木被害実態の把握（調査）

風倒木の被害範囲は広域にわたる場合が多く、さらに、道路から遠い地域も多い。このため、風倒木の実態調査は被害の範囲、重要度、アクセス可能な道路の分布等により大きくは次に述べる 2 つの方法により行う。なお、道路が存在していても、倒木等によりアクセスができない場合があるので、このような場合は道路を使用できないと判断する。

(i) 人家、公共施設（電柱、配電線等）が被害を受けている地域（アクセス可能な道路沿の地域）：現地へ赴き、目視・ドローン等を用いて風倒木の被害状況やその後の降雨による二次災害の危険性等を調査する。被害状況では、風倒木の被害状況（位置、林相、面積、根返り・幹折れ・曲がり・傾倒の状況等）のみならず、人家への影響、電柱・配電線への影響、道路への影響、山腹斜面崩壊の有無とそれらに伴う二次災害の危険性について調査する。

(ii) 上記以外の地域（アクセス可能な道路から離れた地域）：航空写真、航空レーザ、人工衛星画像、場合によってはドローンによる撮影・計測等により被害状況（位置、林相、面積、根返り・幹折れ・曲がり・傾倒の状況等）、山腹斜面崩壊の有無を調査する。なお、航空写真、人工衛星画像からは、根返り・幹折れは判読し易いが、幹曲がりや傾倒は判読が難しい場合が多い。なお、幹曲がりや傾倒を含めて風倒木の影響範囲を調査する方法としては、人工衛星に搭載されているマルチスペクトルセンサのデータを用いて、植生活力指数の RVI(近赤外の反射強さ/赤色域の反射強さ)、NDVI(正規化植生指数, Normalized Difference Vegetation Index), RIB ($IR1/IR2=Band5/Band7$) を用いて風倒木地を同定しようとする試みがなされている^{14), 15)}。最近ではドローンにもマルチスペクトルセンサを搭載してデータを得る場合もある。

(3) 被害木の処理（二次災害防止）

風倒木被害地に健全な森林を早急に再生するためには、被害木を処理して、新たに苗木の植栽等を行う必要がある。しかしながら被害が広域にわたっている場合には全域において早急な処理は困難であるので、対象箇所の重要性（二次災害の危険性）や作業の難易度等により優先度をランク分けして、段階的に被害木の処理を実施していく場合が多い。

倒木処理の優先度を A, B, C の三段階にランク分けする場合の事例を次に示す。

- A ランク：(i) 人家・道路・鉄道・河川に近接している被害地で被害木が人家・道路・鉄道等に被害を与えている箇所、(ii) 被害木が落下・傾倒して人家・道路・鉄道等に被害を与える危険性が高い箇所、(iii) 斜面崩壊が発生しており、その後の降雨等により拡大して人家・道路・鉄道等に被害を与える危険性が高い箇所、(iv) 河川内に倒木や土砂が堆積して河道を閉塞している箇所
- B ランク：人家・道路・鉄道・河川に近接している被害地で被害木の伐倒・玉切り・搬出が比較的容易である箇所

Cランク：被害木の伐倒・玉切り・搬出が困難な箇所

被害木の処理にあたっては、作業の効率を向上させるためにできるだけ高性能林業機械を用いる。なお、道路・林道・作業道が利用できない、あるいは設置できない箇所では、索道やヘリコプターによる運材を検討する。

なお、風倒木の処理において、チェーンソーで幹を切断する機会が多いが、風倒木が弓なりに倒れている場合には幹に強い張力がかかっている場合があり、玉切りの際に急に幹がはね返り、作業者に当たって大きな事故となる場合がある¹³⁾ので注意を要する。

(4) 風倒木被害地の復旧（斜面崩壊等による再度災害防止）

風倒木被害地では同時に山腹斜面崩壊が発生している場合があり、また、その後の降雨により新たに風倒木被害地で山腹斜面崩壊が発生したり、拡大して周辺の人家、道路、鉄道等に被害を与える場合がある。また山腹斜面崩壊による土砂や倒木が河道を閉塞して、次の豪雨等で下流に流出して土砂や洪水の氾濫、流木災害を引き起こす場合がある。このように、風倒木被害の後の山腹斜面崩壊等の発生・拡大による災害は再度災害と呼ばれる。ここでは、風倒木被害と同時に発生する斜面崩壊や土石流への対応、ならびに風倒木被害の発生後に風倒木被害地で発生する斜面崩壊・土石流等に対する対応について述べる。

(i) 風倒木被害地における斜面崩壊等の点検・調査

2004年の台風による風倒木被害を受けた兵庫県における事例では風倒木被害地における斜面崩壊等による再度災害防止については次のような点検や調査がなされている⁶⁾。

- a. 危険箇所のパトロール：風倒木被害地で、人家等に近接している箇所については、その後の降雨による斜面崩壊の発生や拡大の兆候を点検するためのパトロールを定期的実施する。
- b. 衛星画像、航空写真等による崩壊地の変化の把握：広域を対象として風倒木被害発生後の2時期の衛星画像、航空写真（航空レーザ）等を用いて、その間の斜面崩壊地（および土石流）の変化を把握する。画像の判読とともに、地形条件を調査し、崩壊地の位置、崩壊地の状況（風倒木地か否か）、崩壊形態（表層崩壊・深層崩壊）、規模（面積）、傾斜、斜面の向き等を調査する。

(ii) 風倒木被害地における斜面崩壊の特徴

大分県では1991年9月の台風19号により、22,483haの風倒木被害が発生し、1993年6月の降雨で1,132箇所の山腹斜面崩壊が報告された。この時に発生した山腹斜面崩壊の特徴³⁾は次のとおりである。

- a. 風倒木地斜面の表層土層は擾乱を受けて不安定な状態で、非風倒木地に比べて崩壊発生率が高い。
- b. 風倒木地の斜面では非風倒木地における斜面に比べ、斜面崩壊の発生に関わる雨量が少ない。
- c. 崩壊に関わる雨量が少ない分、急勾配風倒木地において崩壊・土石流が発生しても土砂・流木は勾配の緩い下流の保全対象地域まで流下せずに溪流内に停止・堆積している。
- d. その後の降雨で堆積土砂・流木が流出することにより再度災害を発生させる可能性が残っている。

兵庫県では2004年の風倒木災害の約2年後の2006年7月には、梅雨前線性の豪雨により、風倒木被害地を含む周辺で土砂災害（斜面崩壊等）が発生した⁶⁾。このため、土砂災害発生箇所について、斜面崩壊等の場所、発生日時、降雨量、風倒木被害地との関係等を調査した。その結果、西播磨県民

局管内では、57箇所での崩壊の内47箇所が風倒木被害地であった。なお、2006年の斜面崩壊等は比較的小さな降雨によって発生した。風倒木被害時およびその後の降雨による斜面崩壊の特徴は次のように報告されている。

- a. 崩壊地の斜面形状は、直線斜面が多く、次に谷型斜面で、尾根型斜面では発生していなかった。また、等斉斜面や凸型斜面が多かった。
- b. 斜面勾配については、40度前後の斜面がほとんどであった。
- c. 比高率は60%を超えるものが多く、斜面の上部から崩壊していることがわかった。
- d. 崩壊深の平均は0.9mで、勾配が急になるほど崩壊深が浅くなる傾向が見られた。
- e. 斜面の方向は、北向き斜面（崩壊方向角180～240度）で多く発生していた。
- f. 林齢は30年を超える林分が多かった。

(iii) 再度災害防止の対策方針

風倒木被害地では、風倒木被害の後に山腹斜面崩壊等の発生・拡大等により再度災害が発生する可能性がある。風倒木被害地において発生する可能性が高い再度災害の形態としては、次のようなものがある。

- ①降雨や融雪により山腹斜面崩壊が発生する、または拡大する。
- ②溪流内や溪流付近に堆積していた風倒木が、流木として流下する。

このような再度災害が予想される場合には、再度災害を防止するために次のような対策を行う。

a. 斜面崩壊に対する予防対策

斜面崩壊が発生した場合にリスクが高い、人家等に近接した風倒木被害地では、斜面崩壊を防止するために、土留工、のり枠工および落石や崩壊土砂を捕捉する防護柵工等の山腹工を施工する。また、未崩壊斜面でも強風で根系がゆるがれ、地盤が緩んでいる可能性があり、予防的に山腹工を施工する。

b. 流木対策

溪流において土石流等とともに流木が流下して、下流の人家等に被害を及ぼす可能性がある箇所について、土石流対策と併せて、流木を捕捉する流木捕捉式治山ダム等を設置する。

c. 道路、河川の保全対策

風倒木を玉切りして林内に残置した処理木が表層崩壊等とともに落下して、下方の道路・河川に入り、被害を与える場合がある。このような処理木について、点検を行い、下方に落下する危険性があるものは、斜面外に搬出したり杭等により斜面に固定するなどの対策を実施する。

(5) 警戒避難基準雨量等の検討（ソフト対策）

風倒木被害地では、風倒木被害にともなう斜面崩壊の発生や、強風による根系の揺れにより表層地盤が緩んで、風倒木の発生前に比べて風倒木発生後には小さな降雨でも斜面崩壊が発生する可能性がある。このため、土砂災害の警戒避難基準雨量の引き下げについて検討を行うとともに、危険が迫っている場合には付近の住民の避難について市町村長や住民に助言を行う。警戒避難基準雨量の引き下げの量については、風倒木被害地の状況や既往の土砂災害発生状況により異なる。2004年の台風による風倒木被害を受けた兵庫県における事例では、引き下げ率は最大50%となっている⁶⁾。最初は基準雨量を低めに設定し、実際の降雨の状況を見て、徐々に引き上げて、風倒木発生前の水準に戻してい

くのが一般的である。

また、必要に応じて風倒木の被害状況や斜面崩壊の発生状況を考慮して山地災害危険地区および被害想定区域等を見直す。

特に、風倒木被害地が集落、人家に近接している場合には、風倒木被害後の降雨による斜面崩壊等による人家・人命への被害を防止するために警戒避難体制を強化する必要がある。風倒木被害を受けた人家の裏山の斜面の点検を行い、斜面の危険度判定をおこなうとともに、避難路、避難場所等について調査を行う。これらの結果について市町村長や住民に資料を提供し、助言を行う。

10.11.3 おわりに

これまで、森林が受ける風倒木被害について述べてきたが、一方で、森林は防風の機能も有しており、家屋や田畑を強風から守るために配置されている場合がある。このような防風機能を向上させることは、風倒木被害を軽減することと相通ずるものが多数あり、基本的には両立するものである。さらに、風倒木被害を受けにくい森林をつくることは、山腹斜面崩壊や土石流などによる山地災害に強い森林をつくることと多くの面で共通している。

地球温暖化に伴い、日本を襲う台風の強度や数も増えることが予想されており、それに伴い強風の発生頻度も増加することが予想される。これまで風倒木災害を受けなかった地域でも今後、風倒木被害を受ける可能性が高くなると思われるので、事前に風倒木災害への対策を実施し、風倒木被害が発生した場合には迅速に実態調査を行い、風倒木の処理および再度災害防止のための対応を行うことが重要となってくると思われる。

<引用文献>

- 1)北海道水産林務部林務局森林整備課，風倒木被害のリスクを軽減する森林づくり，2018年3月作成，<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/srs/riskdown.pdf>，2020年7月10日参照
- 2)宮本邦明，岡田寛，高濱惇一郎，三重野友親，岩男道也，中尾剛：1991年台風19号による風倒木に関する調査，砂防学会誌，Vol.45，No.3,p.18-23，1992
- 3)松村和樹：風倒木地における山腹表層崩壊に関する研究
file:///C:/Users/owner/Downloads/K-215643-1.pdf，2020年7月13日参照
- 4)稲垣秀輝：植生の違いによる風倒木の発生と斜面崩壊，応用地質，Vol.40,No.4,p.196-206,1999
- 5)水上真一郎，村上拓彦，溝上展也，吉田茂二郎：九州における風倒木被害の発生リスクに関するレビュー，日本森林学会九州支部研究論文集，No.59，p.292-295，2006，
<http://ffpsc.agr.kyushu-u.ac.jp/kfs/kfr/59/bin090519124324009.pdf>，2020年7月10日参照
- 6)（社）兵庫県治山林道協会，平成16年台風による風倒木被害と再度災害防止対策，
<http://www.chisanrindou.net/data/pdf/books/book12.pdf>，2020年7月6日参照
- 7)福岡県土整備部砂防課：福岡県の主な土砂災害例，事例5，平成03年(1991年)風倒木災害，
<http://www.sabo.pref.fukuoka.lg.jp/jirei/jirei5.html>，2020年7月13日参照
- 8)千葉県森林組合：台風被害森林の森林整備について
<http://www.senmoriren.jp/?m=202007>，2020年7月13日参照
- 9)高槻市，平成30年台風21号による森林被害について，

<http://www.city.takatsuki.osaka.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/84/02-07typhoon21sinrinsaigai.pdf>, 2020年7月13日参照

- 10) 気象庁：災害時気象報告，令和元年房総半島台風及び8月13日から9月23日にかけての前線等による大雨・暴風等，290p，2020

http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_202002.pdf, 2020年7月13日参照

- 11) 気象庁大阪管区气象台：災害時気象報告，平成30年台風第21号による9月3日から5日にかけての暴風，高潮等，150p，2019

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_201904.pdf, 2020年7月13日参照

- 12) 気象庁；風の強さと吹き方（表）

https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kazehyo.pdf, 2020年7月13日参照

- 13) 林業・木材製造業労働災害防止協会；災害事例研究 No.15 [林業] 風倒木を切断中，幹が裂けて腹部を直撃された

http://www.rinsaibou.or.jp/cont02/items17/0217_no15_idx.html, 2020年7月13日参照

- 14) 後藤恵之助，浜崎一弘，湯藤義文：台風9119号による風倒木災害の衛星リモートセンシング調査，日本リモートセンシング学会，第13回学術講演会論文集，p.209-212,1992

- 15) 石黒悦爾，岩崎浩一，守田和夫：Landsat-5/TM データによる森林被災地域抽出の可能性，農業機械学会誌，Vol.57,No.5,p.65-72,1995

令和3年6月30日 発行

編集・発行 公益社団法人 森林・自然環境技術教育研究センター

郵便番号 102-0074

住 所 東京都千代田区九段南 4-8-30 アルス市ヶ谷 103

T E L 03-5212-8148

F A X 03-5212-8021

E-mail office@jafee.or.jp

U R L <http://www.jafee.or.jp/>