# 針広混交林の林床被覆状態と斜面土砂流出量の定量評価

QUANTITATIVE EVALUATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN FOREST FLOOR COVER AND SLOPE SEDIMENT RUNOFF AT A MIXED CONIFER-BROADLEAF FOREST

松下晃生[1]・桑原正人[2]・蔭山星[1]・田村隆雄[3]・吉武央気[1]・高野和成[4]・
大木正美[5]・森川裕基[6]・永島悠平[7]・野村七重[8]・清原正道[9]・堂ノ脇将光[10]
Kosei MATSUSHITA, Masato KUWAHARA, Sei KAGEYAMA, Takao TAMURA,
Hiroki YOSHITAKE, Kazunari TAKANO, Masami OOGI, Yuki MORIKAWA, Yuhei NAGASHIMA,
Nanae NOMURA, Masamichi KIYOHARA and Masamitsu DOUNOWAKI

[1]正会員　工修　パシフィックコンサルタンツ（株）流域計画部（〒300-4204　つくば市作谷 642-1）
E-mail: kousei.matsushita@tk.pacific.co.jp (Corresponding Author)
[2]正会員　博士（工学）　京都大学防災研究所 気候変動適応研究センター（〒611-0011 宇治市五ヶ庄）
E-mail: masato.kuwahara@os.pacific.co.jp
[3]正会員　博士（工学）　徳島大学大学院社会産業理工学研究部（〒770-0856 徳島市南常三島町 2-1）
E-mail: tamura@ce.tokushima-u.ac.jp
[4]正会員　徳島大学大学院創成科学研究科（同上）
[5]正会員　農修　パシフィックコンサルタンツ（株）　大阪国土基盤事業部
（〒530-0004 大阪市北区堂島浜一丁目 2 番 1 号）
[6]正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ（株）中国国土基盤事業部（〒730-0013 広島市中区八丁堀 16-11）
[7]非会員 パシフィックコンサルタンツ（株）流域計画部（〒300-4204　つくば市作谷 642-1）
[8]正会員 パシフィックコンサルタンツ（株）中部ＳＩ事業部（〒451-0045 名古屋市西区名駅 1 丁目 1 番 17 号）
[9]正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ（株）九州国土基盤事業部
（〒812-0012　福岡市博多区博多駅中央街 7-21）、
[10]正会員 パシフィックコンサルタンツ（株）流域構造部（〒101-8462　千代田区神田錦町 3−22）

***Key Words**: forest management, mixed forest, sediment runoff, forest floor cover, litter layer*

## 1. はじめに

近年，気候変動の影響を受けた短時間強雨や連続降雨の増加により，雨滴侵食および表面流発生に伴う表層土砂の増加が懸念され，これに伴う土砂災害の頻発・激甚化が懸念されている．山地斜面からの土砂生産・表層移動は，下流河道や貯水池への土砂供給の基礎過程であるが，供用中のダムでは，計画堆砂量を超過する堆砂の進行が確認されている．このような状況に対し，流域全体で治水対策を講じる流域治水 [1)]や，土砂の生産・移動・堆積を一体的に捉える総合土砂管理 [2)]の重要性が高まっている．特に山地流域においては，森林の有する水源涵養機能や土砂流出抑制機能が重要な役割を担うことから，

適切な森林整備等による流域管理が求められる[1),2)]．

森林整備は，施業内容や森林状態に応じて，樹冠遮断，蒸発散，林床被覆，地表面粗度などを変化させ，洪水流出過程に影響を及ぼす[3),4)]．また，下層植生の回復や地表被覆の向上は，雨滴衝撃や表面流出を抑え，表面侵食や表土移動の抑制効果を持つ[5)]．なお，斜面崩壊については，根系補強や地下水位形成過程等を介した別途の検討が必要である．森林整備の施策の一つである針広混交林化[6)]は，単種の樹種が卓越する森林において，針葉樹と広葉樹を混在させた森林へ転換する施業である．針広混交林では，多様な樹種構成により樹冠構造や林床植生が発達し，樹冠遮断による地表到達雨量の減少，林床被覆による雨滴エネルギーの緩和，表面流発生の抑制を通じて，土砂流出抑制機能の向上が期待される．渡邉らは，針葉樹林の中で特にヒノキ人工林において，下層植生やリターによる地表面被覆が乏しく，その結果として，スギ，アカマツ人工林と比較して斜面土砂流出量が大きいことを示した[7)]．森林整備の効果を現地観測に基づき定量的に示すことは重要であるが，既往研究の多くはスギ・ヒノキ人工林等を対象とした報告が中心であり[7),8)]，針広混交林を含む林相間で，林床被覆状態の違いと斜面土砂流出量の対応関係を現地観測により整理した例は限られる．

徳島県に位置する橋本林地は，気象や地形などの自然条件と労働力や生活条件を踏まえた長期的かつ低コストの林業経営のもと，択伐施業により針葉樹人工林の針広混交林化を進めた森林整備事例である[9)]．その持続可能な林業経営が評価され，2016 年には内閣総理大臣賞および農林水産大臣賞を受賞し，針広混交林化の先進事例として位置付けられる林分である．

以上を踏まえ，本研究では，流域治水対策の推進や土砂管理対策に資する知見を得ることを目的に，針広混交林の先進事例である橋本林地を対象として，林相および林床被覆状態の違いが斜面土砂流出量に及ぼす影響を，現地観測に基づき定量的に評価した．

## 2. 調査対象林地

橋本林地は，徳島県那賀川水系臼ケ谷川流域に属する民有林であり，面積約 110 ha，標高 350～660 m の山地に広がる森林である．近傍の国土交通省桜谷雨量観測所における平年年間降水量は約 3,300 mm に達する多雨地域であり，地質は砂岩・泥岩を主体とする秩父累帯に属する．

このような自然条件のもと，橋本林地では 1979 年以降，高密度作業道の整備と長伐期択伐施業を特徴とする自伐林業が継続的に実施されている[9),10)]．

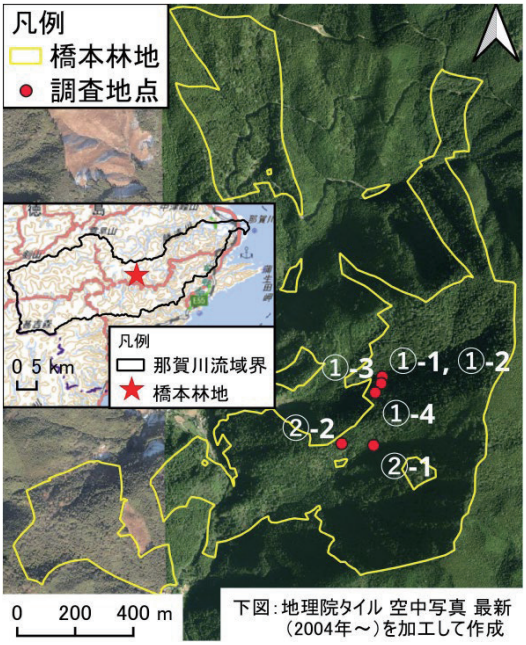



図-1 橋本林地および調査地点の平面図

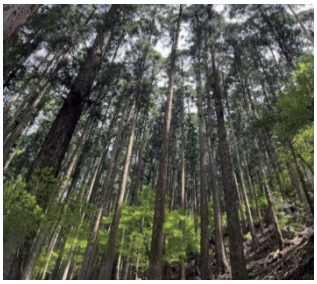


写真-1 橋本林地代表写真

表-1 調査期間一覧表

| 期間 | | | |
|---|---|---|---|
| 期間名 | 調査開始日 | 調査終了日 | 日数 |
| 期間1 | 2025.11.5 | 2025.12.14 | 40 |
| 期間2 | 2025.12.14 | 2026.3.3 | 80 |
| 期間3 | 2026.3.3 | 2026.4.12 | 41 |
| 期間4 | 2026.4.12 | 2026.5.11 | 30 |

橋本林地における林相について，既往文献[10)]を参考とし，代表的な 3 区分を説明とともに示す．橋本林地の平面図および林相区分図を**図-1** に，針広混交林の代表写真を**写真-1** に示す．

林相①：針広混交林：スギやケヤキなどの上層木に加え，低木層には広葉樹（ニッキ，ナンテン等）を含む多樹種が混在する複層・混交構造の林分である．樹種多様性が高く，林内は比較的明るいと観察され，下層植生が発達するなど，生産機能と生活利用・景観機能を併せ持つ特徴を有する．

林相②：スギ人工林：戦後の皆伐後に植栽されたスギを主体とする林分であり，平均樹高・材積ともに高く成長が良好である．

林相①の針広混交林では，間伐により林内の光環境が確保され，下層植生やリターの発達した林床構造が形成されている．そのため，樹冠による遮断蒸発作用および林床被覆の増大に伴って地表面粗度が向上し，雨滴衝撃や表面流の発生が抑制されること

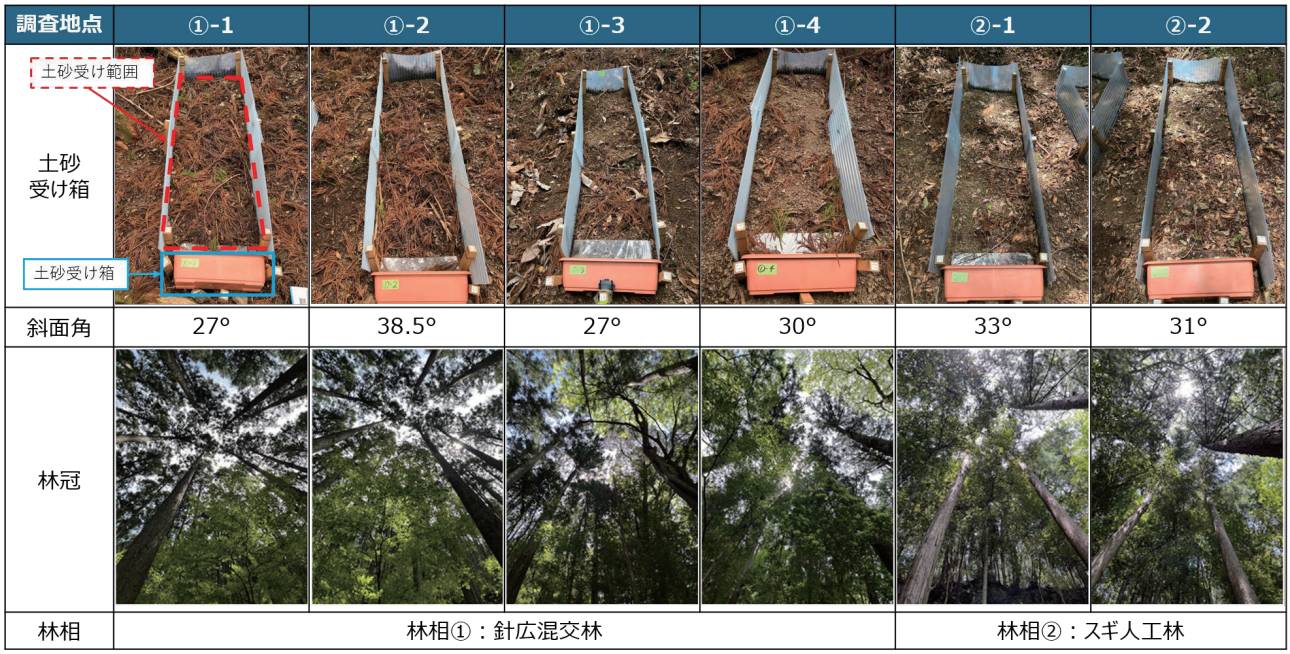



図-2 各調査地点の土砂受け箱の設置状況

で，斜面土砂流出を低減することが期待される林分である．

このように，橋本林地は，針広混交林およびスギ人工林の林床被覆状態の違いが斜面土砂流出量に及ぼす影響を検討する上で適した環境である．

## 3. 斜面土砂流出量調査手法

### (1) 調査地点

調査地点は，**図-1** に示す 6 地点とした．各調査地点の林相，林床の様子および斜面勾配を**図-2** に示す．地点①-1，地点①-2，地点②-1，地点②-2 は，林相①，林相②をそれぞれ代表すると考えられる地点を選定した．地点①-3，地点①-4 は，林相①の中で堆積リターが比較的少ない箇所を選定した．各調査地点の斜面角度は，地点①-1，地点①-3 を除いて斜面勾配 30° 以上を有する急傾斜地に分類される．

### (2) 斜面土砂流出量の測定方法

斜面土砂流出量は，渡邉らの表土移動量調査を参考とし，土砂受け箱を設置して測定した [7]．土砂受け箱の設置状況を**図-2** に示す．土砂受け範囲は，横 50 cm，縦 150 cm とし，下流端に設置した土砂受け箱に捕捉された土砂量を計量した．なお，各斜面で土砂受け範囲以外からの土砂流入量の影響を排除するため，土砂受け範囲の四方は，プラスチック板によって閉じた形とし，調査期間内に土砂受け範囲外からの土砂流入が生じないように配慮した．本方法は，区画内で発生・移動した土砂を捕捉するものであり，自然斜面における横方向の土砂・水移動を完全には再現しない．全調査期間は，2025 年 11 月 5 日から 2026 年 5 月 11 日とし，この期間内に 4 回，土砂流出量を計量した．本観測期間は梅雨・台風期を含まないため，強雨時の土砂流出応答は未評価である．各調査の期間および斜面土砂流出量の回収日を**表-1** に示す．回収した土砂は，「大礫（≧ 5 mm）」「中礫・小礫（2 ~ 5 mm）」「細粒分（< 2 mm）」の 3 種に分類して重量を測定した．本研究では，無機鉱物質量としての土砂流出量を対象とするため，強熱後残留物重量を用いた．ここで，各斜面土砂流出量について，渡邉らの表土移動量調査 [7] を参考とし，土砂流出レートを定義して整理した．土砂流出レートは，捕捉土砂重量を期間降水量および調査区画面積で除し，g/mm/m² として算定した．調査期間内の降水量は，国土交通省の水文水質データベースから，橋本林地に最も近い公表データである桜谷雨量観測所のデータを用いた．桜谷雨量観測所は，調査地から約 2 km，標高 170 m に位置するため，土砂流出量の評価時には，雨量観測所との標高差・距離に起因する降雨量の不確実性が存在する．

### (3) 被度・リター層厚の調査方法

土壌侵食の管理指標として，林床植生と堆積リターの両方を合わせた指標が有用である [5]．本研究においても，林床植生および堆積リターが地表面を覆う割合を被度と定義し，各調査期間の調査開始日と調査終了日における土砂受け範囲内の被度を測定した．被度の測定方法には，三浦らの調査手法を参考




図-3 ポイントカウンティング法による被度調査

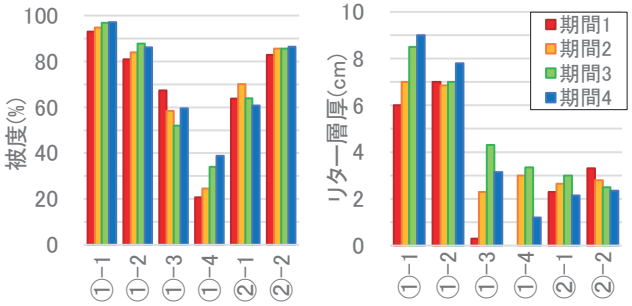



図-4 被度（左）およびリター層厚（右）の調査結果

とし，ポイントカウンティング法を採用した[11]．ポイントカウンティング法の概要を示す．1 観測点の大きさは，50 cm × 50 cm とし，**図-3** に示す 1 辺 5 cm で 10 × 10 = 100 ポイントからなるメッシュ枠を地表に置き，各ポイントにおいて 50 cm の高さから林床要素を判定し，林床要素ごとの占有率を測定した．ここで，全ての調査日，調査地点において判定者は同一とし，判定者の違いによる不確実性が発生しないようにした．林床要素は，「林床植生」「堆積リター」「礫（≧ 2 mm）」「土壌（< 2 mm）」の 4 区分とし，「林床植生」および「堆積リター」の占有率の合算値とした．リター層厚は，各調査地点において定規を用いて測定した．ここで，各調査地点の被度およびリター層厚は，各調査地点の土砂受け箱が，横 50 cm，縦 150 cm の大きさであることから，上流側から 3 分割して測定し，それぞれの測定値を平均して算定した．また，各調査期間の被度およびリター層厚は，各期間の代表値として，**表-1** に示す期間開始日および終了日に測定した値の平均を用いた．なお，本研究におけるリター層厚は簡易指標であり，リター乾燥重量や分解度は未評価である．

## 4. 橋本林地における斜面土砂流出量調査結果

### (1) 林相と被度・リター層厚の関係

各調査地点から得られた被度・リター層厚の測定結果について，**図-4** に示す．針広混交林に設置した地点①-1，地点①-2，地点①-3，地点①-4 では，全期間平均の被度がそれぞれ約 95%，約 85 %，約 60 %，約 27 %，リター層厚が約 8 cm，約 7 cm，約 3 cm，約 2 cm であった．スギ人工林に設置した地点②-1，地点②-2 では，全期間平均の被度がそれぞれ約 64 %，約 84 %，リター層厚がいずれも約 3 cm であった．以上より，本調査地点の中では，針広混交林の代表地点として選定した 2 地点で，スギ人工林と比較して，被度およびリター層厚が大きい傾向が確認された．

### (2) 被度・リター層厚と斜面土砂流出量の関係

各調査地点における被度・リター層厚と斜面土砂流出量の関係について，土砂の分類ごとに整理した結果を，それぞれ**図-5** 上段・中段に示す．針広混交林に設置した地点①-1，地点①-2 では，各調査期間において，被度は約 80 - 100 %，リター層厚は約 6 cm ～ 9 cm であり，土砂流出レートは，大礫，中礫・小礫，細粒分のいずれにおいても 0.05 g/mm/m$^2$ 未満であった．地点①-3，地点①-4 では，各調査期間において，被度は約 20 - 70 %，リター層厚は約 0 cm ～ 6 cm であり，土砂流出レートは約 0.0 ～ 0.4 g/mm/m$^2$ であった．また，スギ人工林に設置した地点②-1，地点②-2 では，各調査期間において，被度は約 50 ～ 90 %，リター層厚が約 2 cm ～ 3 cm であり，土砂流出レートは，約 0.0 ～ 0.3 g/mm/m$^2$ であった．

本調査条件下では，被度が約 60 %未満の場合，土砂流出レートは，大礫で約 0.0 ～ 0.4 g/mm/m$^2$，中礫・小礫で約 0.0 ～ 0.3 g/mm/m$^2$，細粒分で約 0.0 ～ 0.2 g/mm/m$^2$ であるのに対し，被度が 70 %以上では，いずれの土砂分類においても 0.05 g/mm/m$^2$ 未満であった．また，リター層厚が 3 cm 未満では，土砂流出レートは，大礫で約 0.0 ～ 0.4 g/mm/m$^2$，中礫・小礫で約 0.0 ～ 0.3 g/mm/m$^2$，細粒分で約 0.0 ～ 0.2 g/mm/m$^2$ であるのに対し，リター層厚が 3 ～ 4 cm 以上の場合には，いずれの土砂分類でも 0.05 g/mm/m$^2$ 未満の値であった．斜面土砂流出量は，針広混交林，スギ人工林のいずれにおいても，被度およびリター層厚に強く対応し，高被度・厚いリター層を有する地点で小さい値を示した．林床被覆は雨滴衝撃を直接緩和し，リター層は一時貯留・流速低下・浸透促進により表面流の掃流力を低下させた[10]と考えられる．

### (3) 斜面勾配と斜面土砂流出量の関係

各調査地点における斜面勾配と斜面土砂流出量の関係について整理した結果を**図-5** 下段に示す．各調査地点は，斜面勾配が約 27 ～ 38.5°である．本研究で対象とした斜面勾配の範囲においては，勾配の増加に伴う明瞭な斜面土砂流出量の増加傾向は認められ

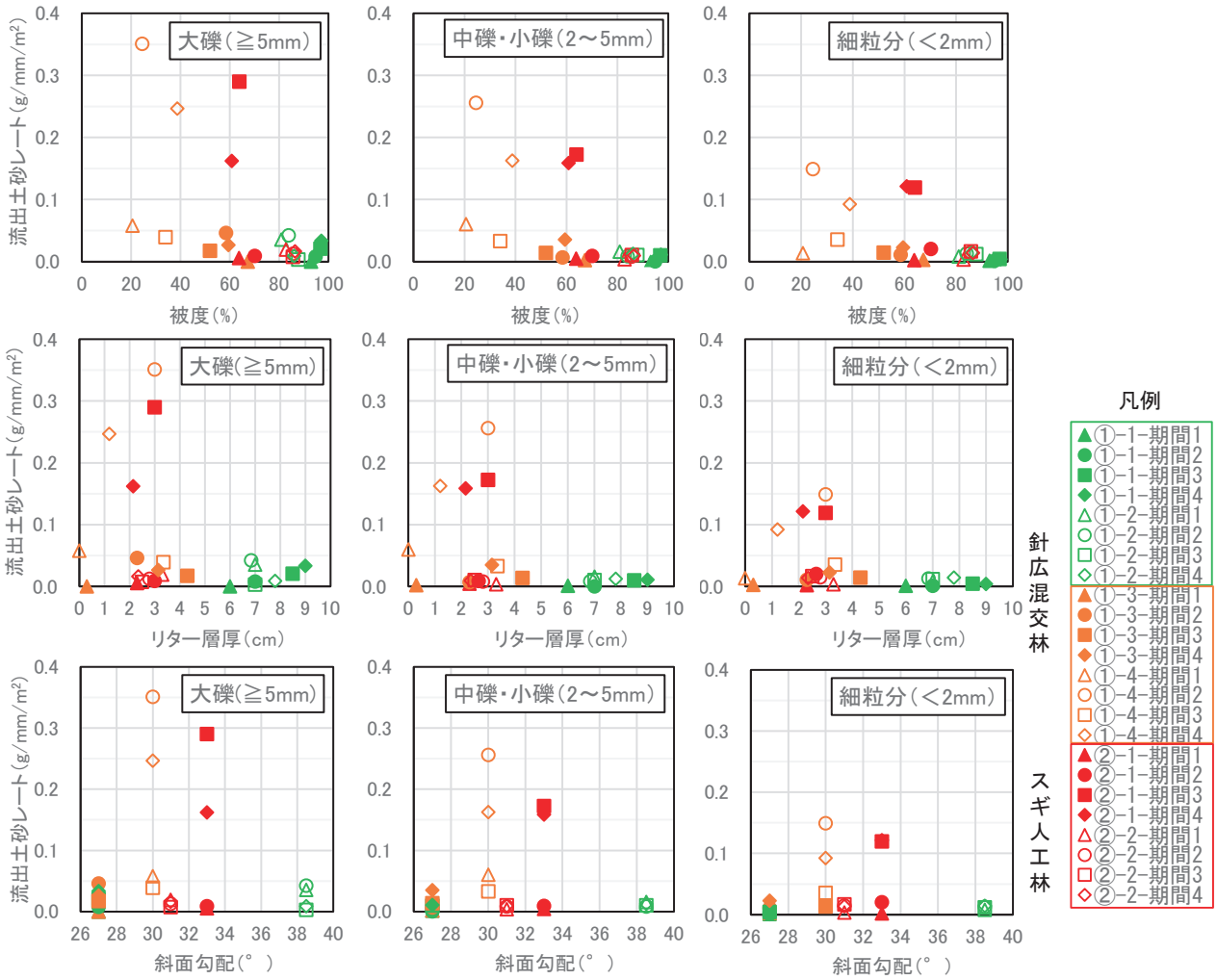



図-5　被度，リター層厚および斜面勾配と土砂流出レートの関係

なかった．この結果から，本研究で対象とした斜面勾配の範囲では，斜面土砂流出量は斜面勾配よりも林床被覆状態と強く対応している可能性が示唆された．地点①-1，地点①-2 では、高い林床被覆状態が維持されていたため，雨滴衝撃の緩和や表面流発生の抑制を通じて土砂流出が抑制された[11]と考えられる．特に，地点①-2 は本調査地点の中で最も大きい斜面勾配（38.5°）を有していたにもかかわらず，林床被覆が小さい地点①-4，地点②-1 と比較して，斜面土砂流出量が小さい結果となった．ただし，地点間では各調査地点の粒度分布や微地形も異なる可能性があり，林床被覆のみの効果として分離するには追加調査が必要である．

## 5. 既往調査との比較および考察

池田らの森林流域からの土壌流出に関する総説[12]を参考に，本研究の調査結果と既往研究の調査結果を定量的に比較し，本研究で得られた斜面土砂流出量のオーダーの妥当性を確認した．池田らは，複数の樹種や林齢，間伐状態の森林を対象として年間当たりの土壌流出量（t/ha/yr）を整理した．土壌流出量は，侵食により発生した土壌量から輸送過程における堆積量を差し引いた，流域外へ流出する正味の土砂量を指す．例えば，斜面勾配が約 30°，降水量が約 1,500 ~ 1,859 mm/yr のヒノキ林において，下層植生ありの場合には約 3.8 ~ 4.5 t/ha/yr，下層植生なしの場合には，約 10.7 ~ 16.3 t/ha/yr と報告されている[11]．ここで，下層植生ありとは，林床にササ類・草本・シダ・低木などが生育する状態，下層植生なしとは，林床の植生が乏しい，またはほぼ消失している状態を指す．今回実施した橋本林地における調査では，斜面勾配が約 27 ～ 38.5°，観測期間降水量を 365 日換算した降水量が約 1,378 mm/yr であった．各調査地点の斜面土砂流出量を，「大礫（≧ 5 mm)」「中礫・小礫（2 ~ 5 mm)」「細粒分（＜ 2 mm)」の合計，かつ期間内の合計値を採用して算定し，年換算斜面土砂流出量（t/ha/yr）に換算した．年換算斜面土砂流出量は，調査期間中の総土壌流出量を調査期間日数で除し，365 日を乗じて算定した．その結果，地点

①-1，地点①-2，地点①-3，地点②-2 は，約 0.7～1.3 t/ha/yr，地点①-4 は 9.8 t/ha/yr，地点②-1 は 6.8 t/ha/yr となった．地点①-4 は，既往文献における斜面土砂流出量が大きい地点と同程度のオーダーであった．一方，地点①-1，地点①-2，地点①-3，および地点②-2 の値は，下層植生ありのヒノキ林で報告された値よりも小さく，おおむね 1/4～1/3 程度のオーダーであった．これらの地点は，地点①-3 を除き被度 80 %以上，地点①-3 は被度 60 %を有している．ただし，既往検討では，流域スケールの年間の土壌流出量が定義されたが，本研究における算定値は，梅雨・台風期を含まない約半年間の観測結果を年換算したものであり，観測期間，降雨特性，土砂捕捉方法および粒径区分が既往研究と完全には一致しないことに留意する必要があり，強雨期を含む長期観測による検証や統計解析が今後の課題である．

## 6. おわりに

本研究では，針広混交林化の先進事例である橋本林地を対象として，林相および林床被覆状態の違いを中心に，斜面勾配との関係も含めて斜面土砂流出量を評価した．以下に主要な結論を示す．

- 針広混交林の代表地点では，リターや下層植生の発達により林床被覆が向上し，スギ人工林と比べ，被度やリター層厚が大きい傾向を示した．
- 斜面土砂流出量は，針広混交林，スギ人工林のいずれにおいても被度およびリター層厚に対応し，高被度・厚いリター層を有する地点で小さい値を示した．
- 本調査の勾配範囲（約 27°～38.5°）および観測期間では，斜面勾配が 30°を超える地点においても，被度やリター層厚が大きい斜面では，斜面土砂流出量が抑制された．
- 本調査条件下では，被度約 70 %以上，リター層厚 3～4 cm 以上が，斜面土砂流出量の小さい林床状態を示す目安となる可能性が示された．

本研究より，林床植生とリター層を維持する森林管理が，表層土砂移動の抑制に寄与する可能性が示された．一方で，本研究は橋本林地の限られた調査地点および観測期間に基づく結果であり，林床管理指標の定量化に向けては，針広混交林の他事例を含めた追加調査や比較分析が今後の課題である．

**謝辞**：橋本林地の管理者である橋本家の皆様には，土砂流出量調査のご協力など，多大なる助力をいただきました．井上美那氏には，橋本林地における土砂重量測定の作業を，株式会社 PCER には，土砂重量測定の室内作業をご協力いただきました．ここに記して謝意を表します．

**参考文献**

1) 国土交通省：流域治水プロジェクト https://www.mlit.go.jp/river/kasen/ryuiki_pro/index.html（参照日：2026 年 5 月 27 日）
2) 国土交通省：総合的な土砂管理 https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/dosyakanri.html（参照日：2026 年 5 月 27 日）
3) 田村隆雄，上田尚太朗，武藤祐則，鎌田磨人：遮断蒸発率と地表面粗度の増強による森林の洪水低減機能の早期向上に関する検討，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.76, No.2, pp.I_127-I_132,2020.
4) 上田尚太朗，田村隆雄，武藤祐則，鎌田磨人：人工林の針広混交林化による森林の洪水低減機能向上に関する研究，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.77,No.2,pp.I_157-I_162,2021.
5) 三浦覚：林地の土壌侵食過程と林床被覆管理，水利科学研究所，水利科学，54 巻 5 号，pp.78-100.
6) 國崎貴嗣：針葉樹人工林の針広混交林への誘導―古典的な森林経理学からみた研究課題―，森林計画誌，58，No1，2024.
7) 渡邉仁志，井川原弘一，茂木靖和，横井秀一，平井敬三：植栽樹種の違いが同一斜面のヒノキ，スギ，アカマツ人工林の表土移動に及ぼす影響，日本森林学会誌，Vol.98,No.5,pp.193-198,2016.
8) 奈良雅代，荒川純彦，新井一司，中村健一：東京都多摩地域スギ・ヒノキ人工林における間伐後 3 年間の土砂流出量の経年変化，東京都農林総合研究センター研究報告，第 9 号，pp.7-14，2014.
9) 滝川景伍：橋本山　生きる山をめぐる―調和する林業と自然，一般社団法人農山漁村文化協会，2025.
10) 佐藤孝吉，天毎木卓哉，橋本忠久：徳島県橋本家人工林択伐施業の特徴と適用，東京農大農学集報，56(1), pp.17-24，2011.
11) 三浦覚：表層土壌における雨滴侵食保護の視点からみた林床被覆の定義とこれに基づく林床被覆率の実態評価，日本林学会誌,Vol.82,No.2,pp.132-140,2000.
12) 池田英史，若松孝志，中屋耕，阿部聖哉：森林流域からの土壌流出の実態・支配因子と予測モデル開発の現状と課題，水文・水資源学会誌，Vol.25,No.6,pp.396-409,2012.

（2026.5.29　受付）