

2章 森林施業(間伐)が水収支・環境に与える影響評価

2-1 東北地方のスギの胸高直径と辺材面積ならびに樹皮厚の関係

根系から吸収された水分は樹液流として樹幹内を上昇し、葉の気孔から光合成活動とともに蒸発します。この現象が蒸散であり、同現象の計測方法の一つに樹液流速測定法があります。この手法では、根から葉に至る一連の水の流れに着目し、樹幹内を上昇する樹液流量を評価することで蒸散量を求めます。樹液流量は樹液が存在している辺材の面積と、同部位の平均樹液流速の積として算出されるため、辺材面積は樹木の蒸散量を定量的に評価する上で欠かすことのできない重要な要素です。また、森林に雨が降ると、その一部は葉・枝・幹に付着して林床面まで到達せず、大気に戻ります。この現象は遮断損失と呼ばれています。スギの樹皮は雨水の貯留機能を有しており、樹皮厚が大きいほどその効果が高まります (Iida et al. 2017)。したがって、遮断損失現象を検討する上で、樹皮厚の計測値ならびに推定のための関係式は重要です。

樹液流速測定法によるスギ林の蒸散量の評価は関東以西において数多く行われていますが、東北地方での計測事例は極めて少ない状況にあります (飯田ら 2019)。また、樹皮の雨水貯留機能を東北地方のスギについて検討した例も限られています。そこで、東北地方に位置する長坂試験地・上の沢のスギ林分 (16 個体) を対象としてスギの辺材面積ならびに樹皮厚を測定しました。

【スギの辺材幅と樹皮厚は胸高直径と相関関係を有する】

辺材幅ならびに樹皮厚は胸高直径と正の相関を示しました。辺材幅については、胸高直径 41.1 cm の個体が外れ値の傾向があるため、これを除外した場合の回帰式を示しています。外れ値の傾向があるデータも含めた場合は $y = 0.044x + 2.22$ (決定係数は 0.26) となります。上の沢のスギの辺材幅ならびに樹皮厚はここに示した回帰式で推定することが可能であり、蒸散や遮断損失に関する検討への貢献が期待されます。

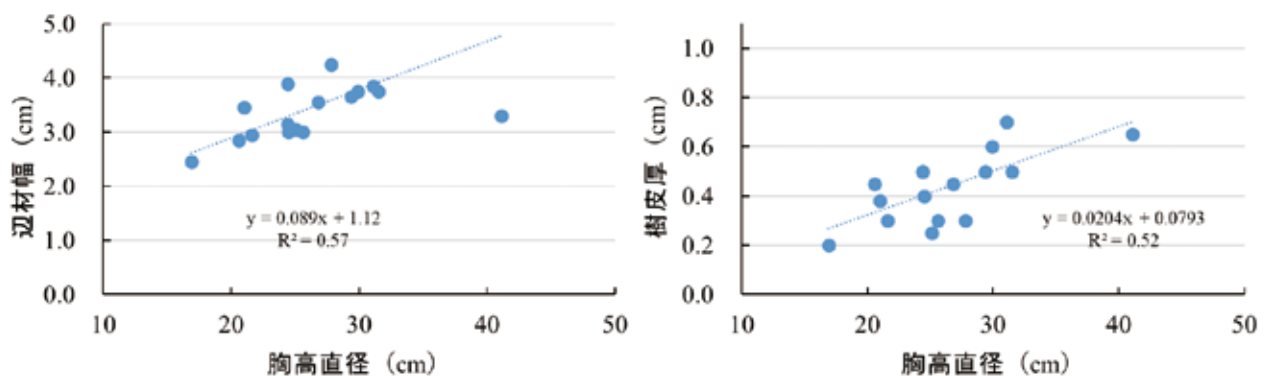


図 12. 辺材幅 (左)、樹皮厚 (右) と胸高直径の関係 (データは飯田ら (2017) に基づく)

【関東以西のデータによる辺材面積のアロメトリー式の妥当性】

樹木のある部位のサイズと、ほかの部位のサイズ等の間には関係があることが多いです。この関係はアロメトリーと呼ばれます。この関係を用いると、知りたい部位のサイズを実測しなくても、別の部位のサイズから推定することが可能となるため、様々なアロメトリー式が提案されています。

鶴田ら（2011）は関東以西（千葉、石川、福岡）に位置するスギ6林分の辺材面積データに基づいて、辺材面積のアロメトリー式を作りました。この関係が東北地方に位置する長坂試験地・上の沢スギ林分についても当てはまるかどうか、検討を行いました。彼らの結果とともに上の沢スギ林分の辺材面積を胸高直径とともにプロットすると、その分布域はオーバーラップすることが分かりました。このことから、彼らのアロメトリー式の汎用性は高く、東北地方のスギ林分についても適用できる可能性があります。ただし、東北地方のデータは上の沢の1林分に留まっており、東北地方の別のスギ林分について適用する際は留意が必要です。今後も東北地方において計測事例を蓄積し、このアロメトリー式の適用可能な範囲を明らかにする必要があります。

前述のように、上の沢のデータのみに着目すると、胸高直径41.1 cmの個体の辺材面積が外れ値の傾向を示すことが分かります。しかし、鶴田ら（2011）のデータと比較すると、同個体の辺材面積は他のスギ林分で計測された値の範囲内に位置していることが分かりました。したがって、同個体の辺材面積は自然界に存在する個体間差の範囲にあると判断されます。このように、多数の林分において計測データを蓄積することによって、計測された値が個体間差なのか、あるいは外れ値なのかを客観的に判断することもできます。

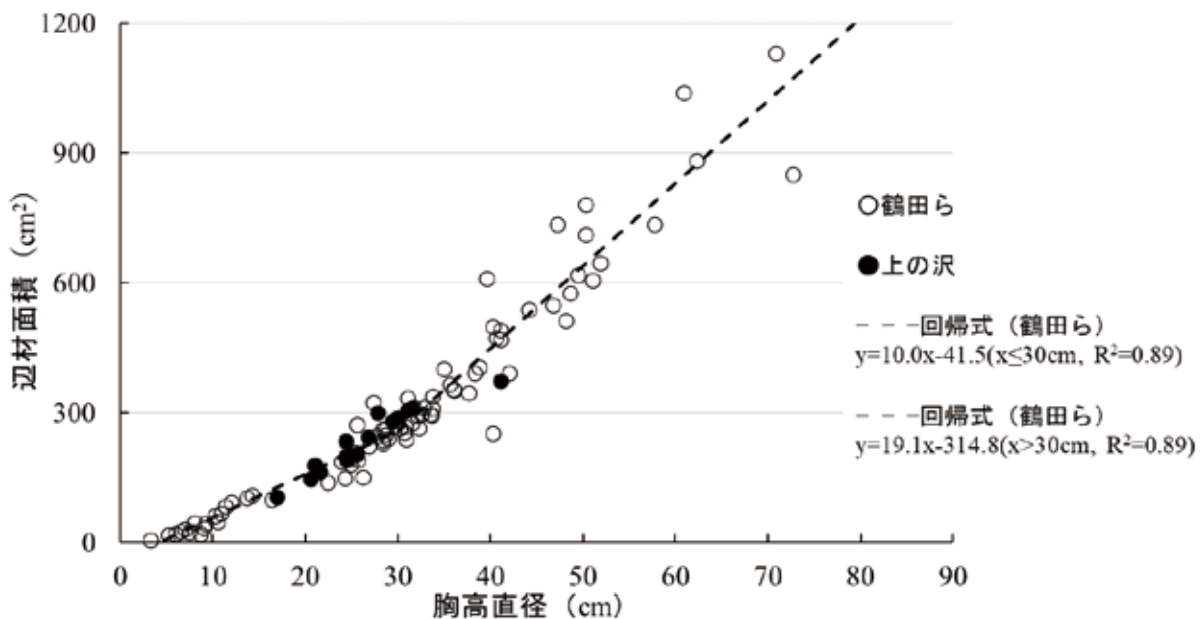


図 13. 胸高直径と辺材面積の関係（飯田ら（2017）を一部改変）

東北地方では、樹液流速ならびに樹皮の雨水貯留機能に関するデータが著しく不足した状況が続いています。ここで示した樹皮厚ならびに辺材面積アロメトリー式の検討結果を契機として、関東以北で新たな計測が実施され、林分蒸散量や遮断損失に関する検討が進むことが望まれます。本成果は、東北地方のスギ林の蒸散および遮断損失現象の解明に大きく貢献するものです。

2-2 間伐がスギ林の蒸散量に及ぼす影響

人工林では、水や光などをめぐる樹木間の競争を緩和するために間伐の実施が必要です。間伐を実施すると樹木の数が減って林分蒸散量が減少するため、利用可能な水資源量の増加も期待されます。他方、間伐を実施すると樹木の光環境は改善するために、蒸散活動が間伐前よりも活発になる可能性も考えられます。間伐に伴って、実際の森林はどのような応答を示すのか、計測に基づいて明らかにする必要があります。そこで、長坂試験地・上の沢のスギ林分を対象として本数率4割の間伐を実施し、間伐前2年間および間伐後3年間、合計5年間にわたって樹液流速測定法によるスギ林分蒸散量の計測を行いました（対象プロット内のすべての個体が計測対象：間伐前16個体、間伐後10個体）。そして、間伐後の林分蒸散量の減少ならびにその後の変化傾向を明らかにしました。

【間伐後にスギ林の蒸散量が減少し、数年間で回復する】

間伐によってスギ林の蒸散量は間伐後1年目に71%まで減少しましたが、2年目には100%、3年目には107%となり、間伐から数年で間伐前の水準に戻ることが明らかとなりました（図14）。

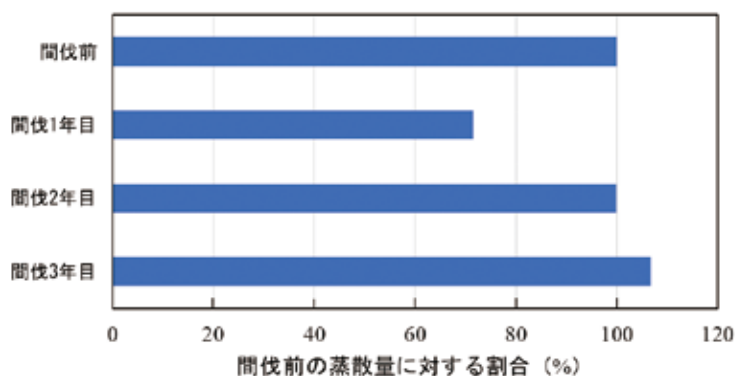


図14. 間伐による林分蒸散量の変化（データは lida et al. (2024) に基づく）

一方、プラントキャノピーアナライザーを用いて計測されたスギ林の葉面積指数は、間伐後1年目に25%に減少し、その後増加したものの、3年目においても42%にとどまっていたことが分かりました（図15）。つまり、間伐後3年目ではスギ林の葉面積指数は間伐前の状態には戻っていませんでしたが、林分蒸散量は元の水準まで回復したことになります。なお、葉面積指数はプラントキャノピーアナライザーを用いて林内と林外の光の差異から計測しています。

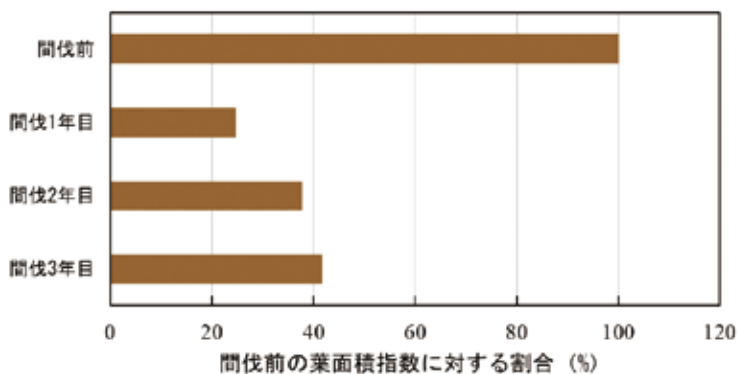


図15. 間伐による葉面積指数の変化（データは lida et al. (2024) に基づく）

【間伐後に辺材の深い部分を通る樹液流速が顕著に増加する】

以上のことから、間伐による樹木の光環境の改善、特に樹冠下部の日当たりが良くなり、蒸散活動が活発になったものと考えられます。樹冠下部の蒸散に使われる水は辺材の深い部分(辺材深部)を通過した樹液流であることが知られています。したがって、間伐後に辺材深部の樹液流速は増加したのではないかと推測することができます。実際の計測データから、樹皮直下から深度2 cmまでの辺材の浅い部分(辺材浅部)を通る樹液流速は間伐1年目に増加し、その後も同様の水準で推移したことがわかります(図16左)。一方で、深度2~4 cmの辺材深部を通る樹液流速は間伐1年目に減少しましたが、2年目に間伐前の状態を上回った後、3年目にはさらに増加したことがわかりました(図16右)。このことから、前述の推測通り、辺材深部の樹液流速の顕著な増大によって、間伐から数年で蒸散量が元の水準に回復したことがわかりました。

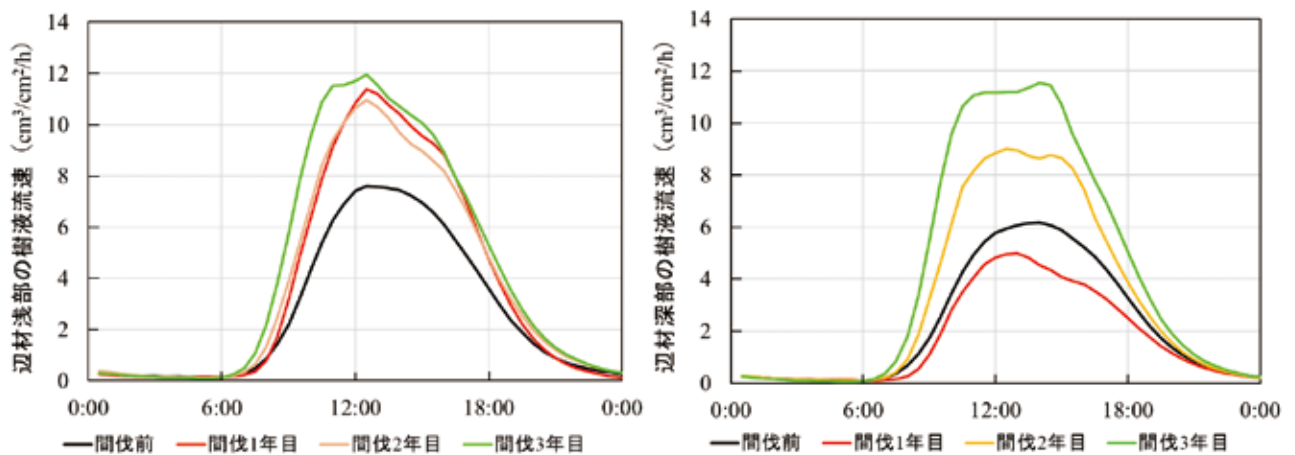


図16. 樹皮直下から深度2 cmまでの辺材の浅い部分(左)ならび深度2~4 cmの深い部分(右)の樹液流速の平均日変化(データはIida et al. (2024)に基づく)

間伐後の林分蒸散量の変化を正確に把握するためには、間伐によって樹木の日当たりが大きく改善されることを考慮し、辺材浅部および深部双方の樹液流速を正しく計測する必要があります。一般的に、間伐を実施していない林分では、辺材深部の樹液流速は浅部よりも小さいことから、深部の樹液流速は推定されるか、あるいは無視されることも少なくありません。しかし、間伐による樹冠下部の光環境の改善によって、辺材深部の樹液流速は間伐後に増加することが計測データから確かめられました。仮に、辺材深部の樹液流速を計測しなかった場合、間伐による林分蒸散量の減少が長期間継続する結果が得られることになり、注意が必要です。

森林植生による蒸散活動は水を大気に戻す働きの一つです。これ以外にも、遮断損失と森林内の地面からの蒸発(林床面蒸発)によって、水は大気へと戻っていきます。この3つの働きは、併せて、蒸発散と呼ばれています。蒸発散によって大気に戻った水は水資源として利用することはできません。したがって、間伐が利用可能な水資源量にどのような影響を与えるのかを総合的に解明するためには、蒸散だけではなく、間伐前後において遮断損失と林床面蒸発がどのように変化するのかも明らかにする必要があります。このような視点に立ち、間伐前後での正確な現地計測に基づいた間伐による影響評価を継続していきます。

2-3 間伐が水収支に与える影響：林地残材の遮断損失量の定量化

日本ではスギは最も代表的な植栽樹種です。スギ人工林を間伐する際、材としての利用価値が低い場合は切り捨て間伐と称し、間伐したスギを林地残材として流域内に放置します。その林地残材は、森林流域の水収支に影響を及ぼすと考えられます。しかし、林地残材が水源涵養機能に及ぼす影響を評価した研究はほとんどありません。秋田県大館市長坂試験地の2つの流域（上の沢・下の沢）において（図3）、間伐試験を実施した際の林地残材のうちスギ針葉の遮断損失量について調べました。

【間伐による林地に残置されるスギ針葉量】

間伐は2007年2月～3月に実施され、伐採木は林外に搬出されましたが、枝葉や小径木は林内に残地されました（図17右）。林地残材のスギ針葉量を明らかにするため、流域内の全間伐対象木（胸高直径（DBH） ≥ 3 cm）についての毎木調査をしました。その結果、上の沢と下の沢の全間伐対象木のDBHの平均値 \pm 標準偏差（n=サンプル数）は、それぞれ 13.6 ± 6.0 cm（n=3,767）と 9.7 ± 3.2 cm（n=5,848）となります。スギ針葉量は、アロメトリー式： $W = 0.070348 \cdot DBH^{2.596261} \cdot h^{-0.935245}$ （Hosoda and Iehara 2010）を用いて算出します。ここで、 W はスギ針葉の乾燥重量（kg）、 DBH は胸高直径（cm）、 h は樹高（m）となります。下の沢の間伐木数は、上の沢よりも多いものの小径木が多く、そのため発生した林地残材のスギ針葉量は、下の沢より上の沢の方がやや多くなります（図17左）。流域の林地残材は、上の沢で4.54 t/ha、下の沢で4.28 t/haでした。間伐後の流域内の林地残材は、均一に分布していません。林地残材は、谷筋に集中して多くみられます（図17右）。

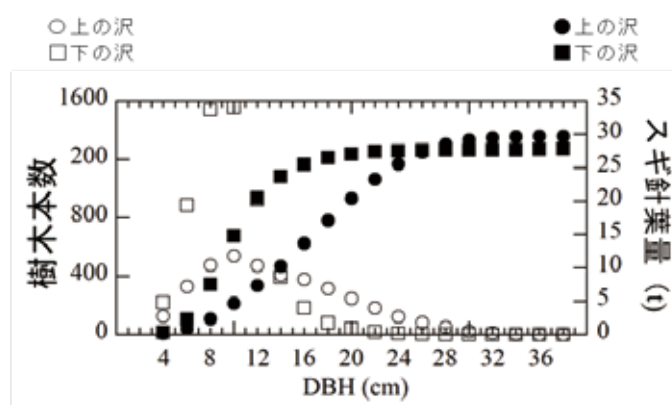


図17. 長坂試験地における間伐木の毎木調査で算出された胸高直径（DBH）別の樹木本数とスギ針葉量の積算値（左）および間伐後に残置されたスギ針葉の様子（右）（Noguchi et al. (2022) を一部改変）

【間伐による残置されたスギ針葉による雨水遮断損失量の変化】

長坂試験地における水文観測によると、無積雪期（4月～11月）の降雨量および上の沢と下の沢の樹冠通過量は、それぞれ1397.5 mm および1151.8 mm と1179.2 mm でした。また、林床面蒸発モデル（玉井ら 1994）から求めた林床面蒸発量は、156.9 mm でした。上の沢における同期間についての樹冠通過降水量を図18a、残置された4.54 t/ha のスギ針葉量による月別遮断損失量・累積遮断損失量を図18b、残置された20.0 t/ha のスギ針葉量による月別遮断損失量・累積遮断損失量を図18c に示します。間伐時に残置されたスギ針葉が流域内に4.54 t/ha 均一に分布すると仮定すると、スギ針葉による遮断損失量は、26.3 mm となり、林床面蒸発量の16.8%に相当します。残置されたスギ針葉が流域に20.0 t/ha 局所的に集中して分布すると仮定すると、スギ針葉による遮断損失量は116.1 mm となり、林床面蒸発量の74.0%に相当します。このように林地残材のうちスギ針葉の遮断損失量は無視できるものでなく、間伐による水源涵養機能への影響を総合的に明らかにするために、さらなる検討が必要です。

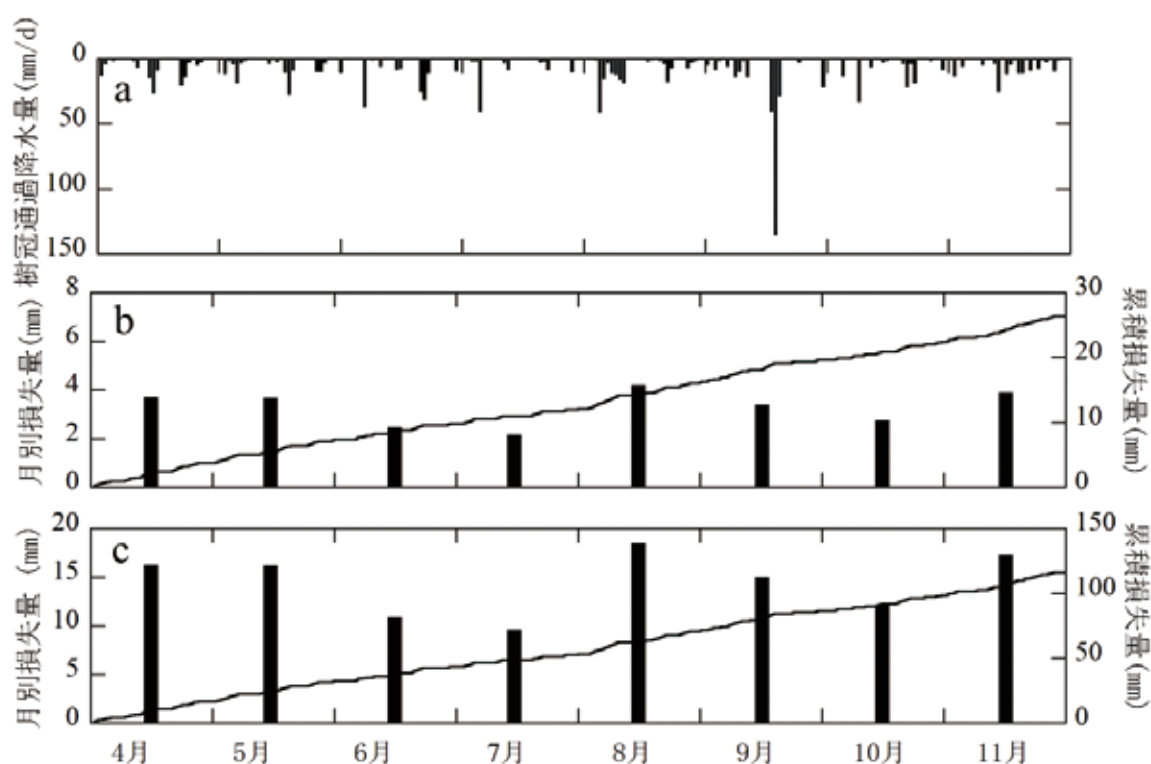


図18. 上の沢における (a) 樹冠通過降水量、(b) 4.54 (t/ha) のスギ針葉量による月別遮断損失量・累積遮断損失量、(c) 20.0 (t/ha) のスギ針葉量による月別遮断損失量・累積遮断損失量（Noguchi et al. (2022) を一部改変）

木質バイオマス発電施設の整備が各地で進み（林野庁 2025）、間伐の際に発生した林地残材は林外に持ち出される機会も増加したと考えられます。しかし、まだ多くの林地残材が、収集・運搬コストの課題から林内に放置されています。林地残材の有効利用として、枝条を路面に散布して、路面の維持管理に活用することも行われています（森林総合研究所 2012, 岩手県 2023）。間伐の際に発生した林地残材は、流域内にどのように放置されるかによって、水収支に及ぼす影響が異なります。今後、林地残材の有効利用を図りつつ、水収支を明らかにする点から林地残材が流域内に分布する状況を把握することが課題となります。

2-4 スギ林における間伐による林床面蒸発量の変化

近年、林業の活性化や森林の多面的機能の発揮をめざして、人工林での皆伐や間伐の実施例が増えています。皆伐や間伐は森林群落内における水移動素過程のそれぞれに影響を与えます。例えば間伐により林床面日射量が増えると、林床面蒸発量も増えると考えられます。そこで秋田県長坂試験地のスギ林で実施された間伐（2017年1月～2月）を対象に、間伐前後での林床面蒸発量の変動をモデルによって評価しました。

【間伐前後で相対日射率を比較】

長坂試験地の気象露場（図3）における全天日射量（林外）と上の沢の4ヶ所のプロット（プロット1～4）における林床面日射量（林内）を2016年8月～2018年11月まで観測しました。森林内外での日射量の観測値から、相対日射率を算出します。間伐後、全てのプロットで相対日射率の増加が明瞭に認められます（図19）。間伐前と間伐後で相対日射率の平均値は、13%から43%へと約3.3倍に増加しました（図19）。

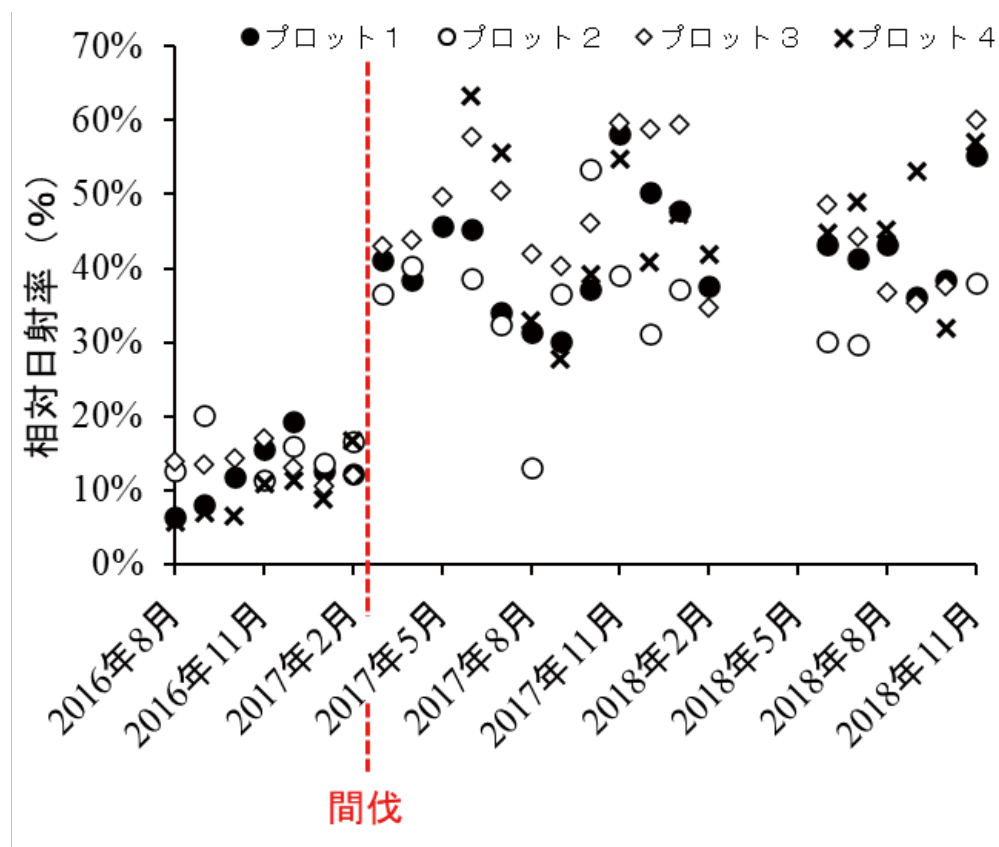


図19. 間伐前後での相対日射率の変化（玉井ら（2020）を一部改変）

【林床面日射量への影響度を比較】

長坂試験地における結果と既往の成果（京都府の山城試験地、京都市銀閣寺試験地）について、林床が積雪で覆われた日がほとんどないと考えられる 6 月～11 月の 6 ヶ月間の林床面蒸発量を比較しました。1980 年から 2018 年までの 39 年間分の気象データを使って計算した林床面蒸発量の平均値は、間伐前で 73.4 mm、間伐後で 191.8 mm となり間伐により約 2.6 倍に増加しました。林床面蒸発量との関係は降水量よりも林床面日射量の方が明瞭であることから、降水量よりも林床面日射量の方が、林床面蒸発量への影響度が大きいことが分かります（図 20）。

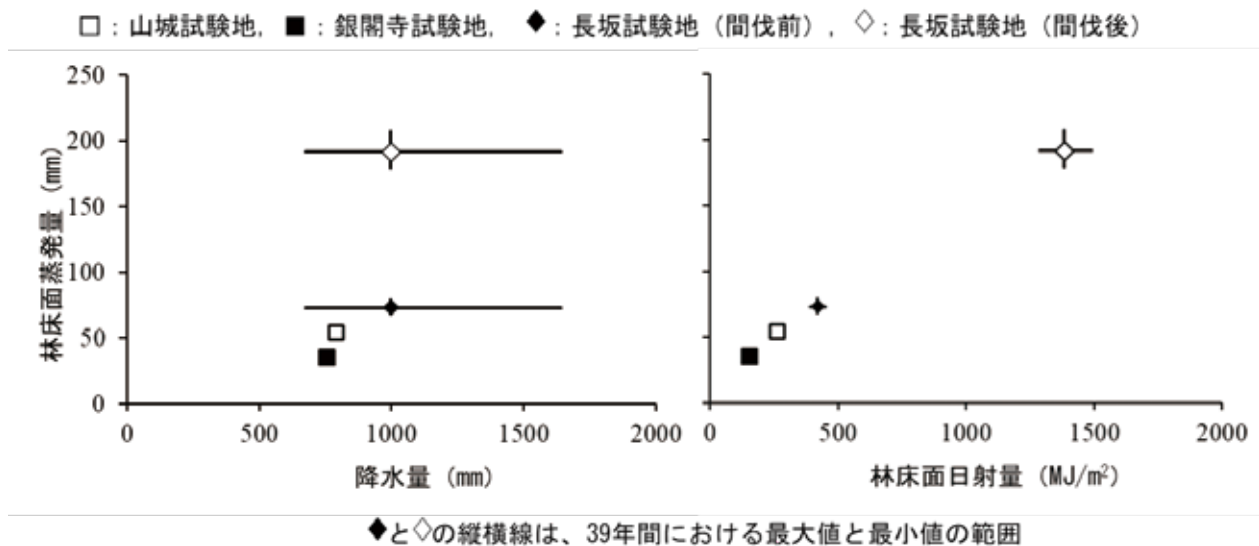


図 20. 林床面蒸発量と降水量、林床面日射量との比較（玉井ら（2020）を一部改変）

使用したモデルは、表層土壌の気相中の湿度が約 100% であると仮定していますが、日本の森林土壌では概ね妥当な値であると考えています。しかし、林床面日射量が多すぎて、なおかつ落葉層が薄い場合や少雨が数か月にわたって継続した際には、この仮定の確認が必要となるので注意が必要です。この成果は、森林管理による水資源などへの影響予測に貢献する成果となります。

2-5 作業道における表面流の発生と植生回復

森林施業や森林の維持管理には、林道や作業道といった路網は必要不可欠です。その路網の開設は、林地斜面を切り盛りして地表を攪乱して作設するため、土砂流出の発生源となります。また植生が回復した斜面では裸地斜面と比べて、表面流の発生量が低減します。長坂試験地では、間伐に合わせて作業道の開設をしました。ここでは、作業道における表面流の発生と植生回復状況について調査した結果を示します。

作業道は切土と盛土のみによって作設され、転圧、敷砂利およびのり面の整形などを行われませんでした。その総延長、密度および平均幅員は、それぞれ 655.6 m、100.1 m/ha および 2.6 m で、作業道の面積は流域面積の 2.6% になります（図 24）。作業道上の異なる地形の調査区を 4 ケ所選定し、各調査区において長さ 1 m の区間の調査プロットを 4～5 ケ所設置しました。そのプロット内をさらに切土のり面、山側わだち、中央部、谷側わだちおよび路肩に区分し（図 21）、区分されたそれぞれの場所の植生の被度と種の出現数を調査しました。

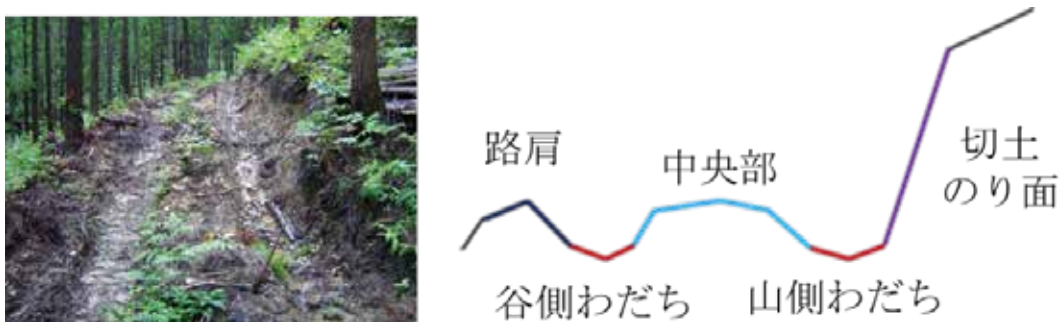


図 21. 長坂試験地で開設された作業道の様子（左）と作業道の断面模式図（右）

【植生回復は作業道の中央部・路肩で早く、切土のり面・山側わだちで遅い】

開設 7 ヶ月後の作業道の植生の被度は、切土のり面 < 山側わだち < 谷側わだち < 路肩 < 中央部の順番で高く、中央部と切土のり面、山側わだちおよび山側わだちと路肩の間に統計的に有意な差があります（図 22 左）。

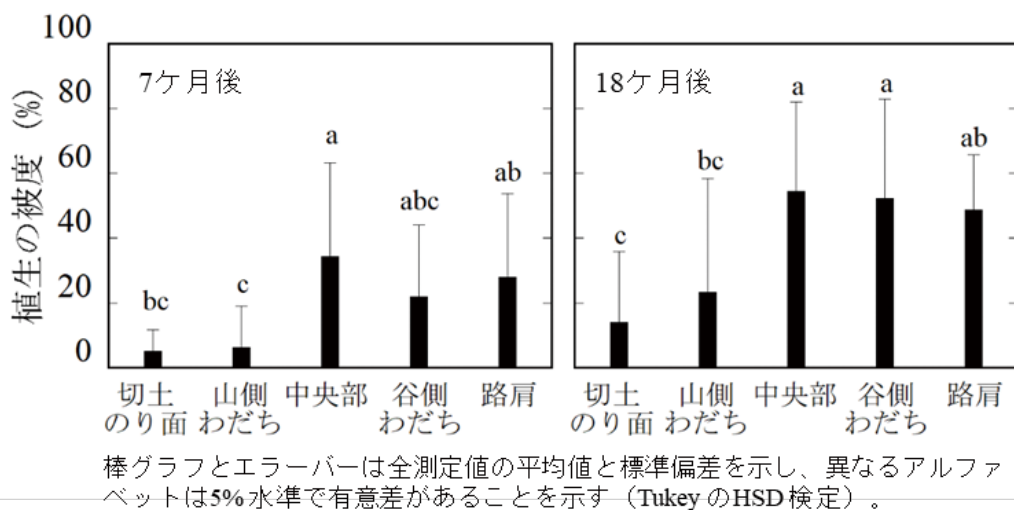


図 22. 作業道における植生の被度の変化（データは野口ら（2014）に基づく）

開設7ヶ月後の作業道の植生の種数は木本が20種、草本が48種となり、山側わだち<切土のり面<谷側わだち<路肩<中央部の順番で多く、山側わだちと中央部、谷側わだち、路肩の間で統計的に有意な差があります(図23左)。

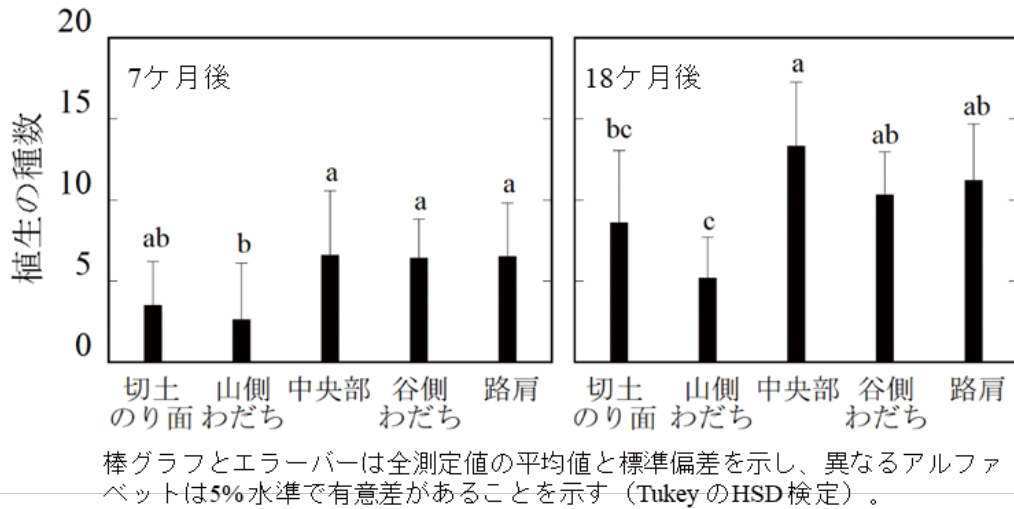


図23. 作業道における植生の種数の変化(データは野口ら(2014)に基づく)

18ヶ月後の植生の被度は、切土のり面<山側わだち<路肩<谷側わだち<中央部の順番で高く、切土のり面と中央部、谷側わだち、路肩および山側わだちと中央部、谷側わだちの間に統計的に有意な差があります(図22右)。

18ヶ月後の植生の種数は木本が28種、草本が68種となり、開設7ヶ月後と同様な順番で多く、山側わだちと中央部、谷側わだち、路肩および切土のり面と中央部の間で統計的に有意な差があります(図23右)。このように被度は時間経過とともに増加し、路肩で植生回復が早く、切土のり面で遅くなります。また出現種数も時間経過とともに増加し、中央部で多く、山側わだちで少なくなります。なお、出現した樹種は、高木性のアカマツ、スギ、亜高木性のコシアブラ、低木ではリョウブ、キブシ、タニウツギ、ヒメアオキです。また草本では、シダ植物(ワラビ、ヤマドリゼンマイなど)、イネ科(ススキ、アキメヒシバなど)、キク科(アキタブキなど)などが確認されました。

【作業道における雨滴浸食・表面流の発生が植生回復に影響】

上の沢の作業道における表面流の発生状況について、降雨・融雪時に現地を確認しました(図24; 図25)。切土のり面では、凍上融解および雨滴による侵食が生じていました(図25A)。また、切土のり面の断面から地中流が流出していました(図25B)。切土のり面の断面から恒常的に地中流が流出する場所の一部では、斜面上方に湿性植物が小規模に群生する場所(湿原)がありました(図25C)。一方で作業道が河道を横断する場所では、渓流水が作業道に流入して(図25E)、表面流の発生源となります。発生した表面流は、山側わだちで断続的に流下していることが確認されました(図25D)。表面流が発生する作業道上の場所は、無積雪期は降雨中に、積雪期は積雪の融解により容易に確認することができます(図25FG)。積雪の融解は、切土のり面の断面から流出する地中流が要因のこともあり、作業道上で断片化している表面流は、地中流の流出によって連続することが示唆されました(図24)。現地踏査では、降雨終了後も流域内では作業道の総延長の21.2%で表面流が発生していました(図24)。切土のり面と山側わだちにおいて、植生の被度が低く植生の種数が少ないのは、雨滴浸食や表面流の発生が要因と考えられます。

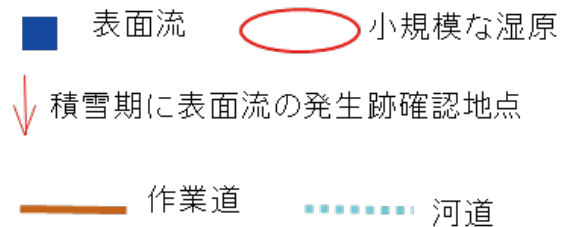
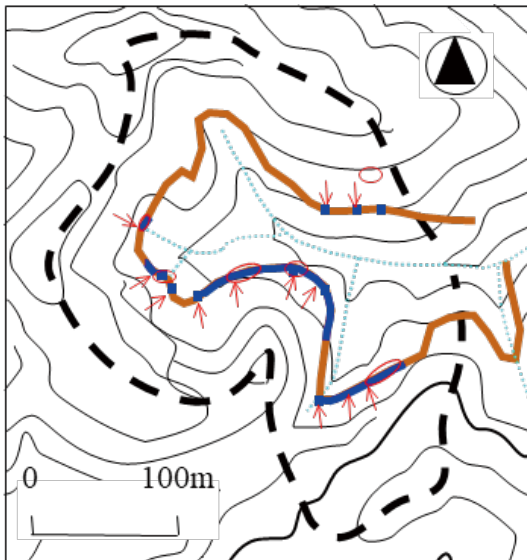
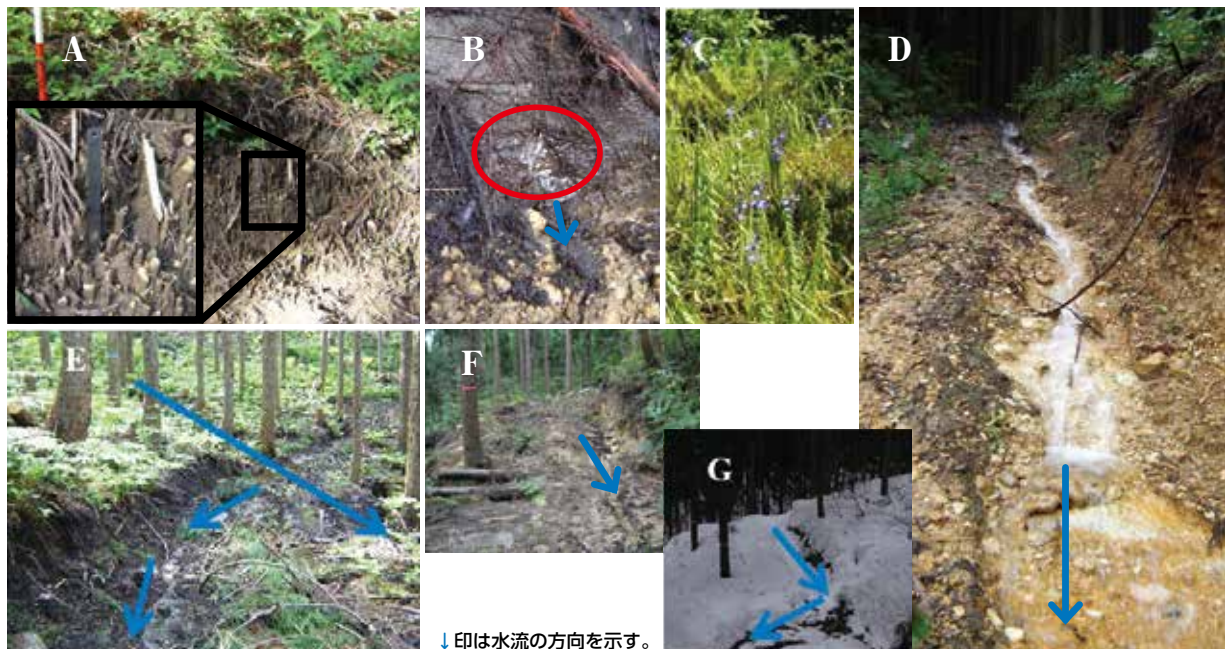


図 24. 上の沢の作業道における表面流の発生状況（野口ら（2014）を一部改変）



(A) 土のり面での雨滴侵食による土柱、(B) 切土のり面（○印）からの恒常的な地中流の流出、(C) 小規模な湿原における湿性植物のサワギキョウの群生 (D) 作業道の谷側わだちを流下する表面流 (E) 渓流水の一部が作業道へ流れ込んでいる地点、(F) (G) 作業道において切土斜面からの恒常的な地中流の流出により表面流が発生する場所は、冬期において積雪が溶けやすい。

図 25. 作業道における表面流の発生状況（野口ら（2014）を一部改変）

作業道において表面流が発生する場所や流れの状況は流域内で一様ではありません。作業道の開設の際は、地中流の発生源となりうる湿原周辺や河道の周辺などに配慮する必要があります。表面流の発生が避けられない場合でも、表面流が連続して集中しないようにすることが肝要です。表面流が集中する場所では、路面侵食が生じます。さらに深刻になると、のり面の侵食や崩壊につながります。持続的な森林管理のために、土砂を流出させない道づくりが必要です（森林総合研究所 2012）。

2-6 強度間伐によるスギ人工林の混交林誘導と表土保全機能の評価

秋田県では平成20年度に「秋田県水と緑の森づくり税」を創設し、この税を活用した森林環境や公益性を重視した森づくりのための事業を展開しています。そこで秋田県の長坂試験地では、スギ人工林の公益性に関して調べるため、土砂移動抑制機能に関する調査や間伐による効果を検証するための取り組みが行われています。スギ人工林において、強度が異なる間伐を実施し、無施業林や皆伐区と比較しながら表土の移動量や下層植生の推移を観測しました。また、間伐前後の広葉樹の侵入・定着状況についても調べました。

【土砂受け箱による土砂移動量の測定】

土砂移動量は、土砂受け箱（幅25 cm、高さ15 cm、奥行き20 cm）を異なる林相毎にそれぞれ30～50個設置して測定しました（図26）。各林相において、年4回（冬：11-4月、春：5-6月、夏：7-8月、秋：9-10月）土砂受け箱で捕捉された内容物を回収して、細土（ $\Phi < 2$ mm）、石礫（ $\Phi \geq 2$ mm）、リター（落葉などの有機物）に分別し、それらの重量を測定します。地表の物質移動レートは、単位観測期間中の物質移動量を降水量で除して、斜面幅1 m降水量1 mmあたりの量とします。



図 26. 林内に設置された土砂受け箱による土砂移動量の測定の様子

【間伐による土砂移動量の変化と林床植被率の推移】

土砂移動量は、積雪期に少なくなっており、冬期の積雪が地表を被覆して土砂の移動を抑制していると考えられます。間伐すると、土砂移動量は一時的に増加しますが、2～3年後には伐採前の状況程度に回復します（図27）。これは伐採作業に伴う林地の攪乱が収まったことや、林床植生の回復によるためと考えられます（図28）。

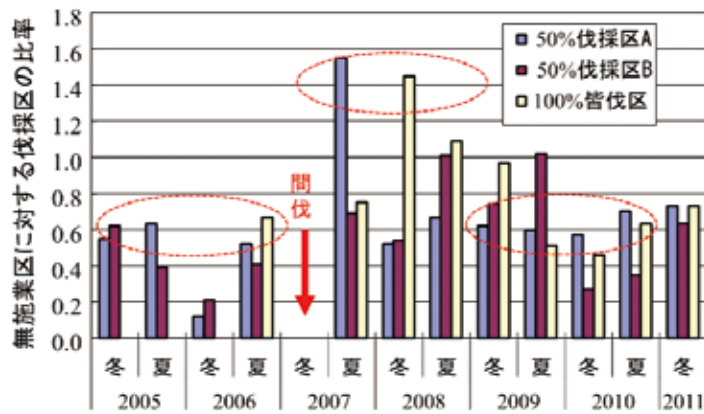


図 27. 土砂受箱による土砂移動量の観測の様子 (和田・金子 (2012b) を一部改変)

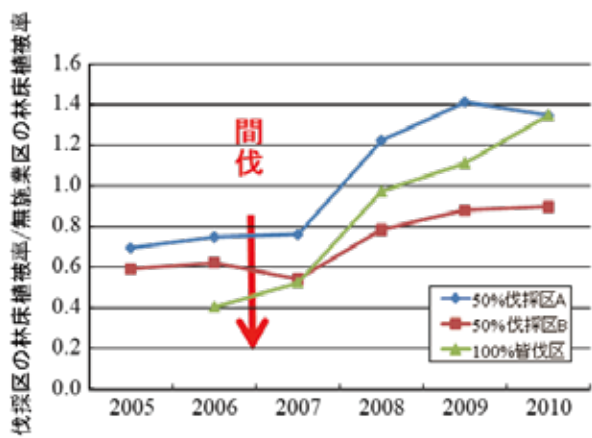


図 28. 林床植被率の推移 (左) と間伐から 2 年 4 ヶ月後の林床植被の様子 (右) (和田・金子 (2012b) を一部改変)

【広葉樹の侵入と定着状況】

調査区では、エゴノキ、サクラ類、コシアブラ、アオダモ、クリ、ナラ類などの広葉樹が見られましたが、間伐区および皆伐区では、2007 年 3 月に間伐および皆伐すると、これら広葉樹の本数が大幅に増加しました。間伐後にエゴノキなどの定着本数が増加し、広葉樹の本数増加が認められ、混交林化への誘導の効果が認められます。広葉樹が増加したのは間伐による影響と考えられます (図 29)。

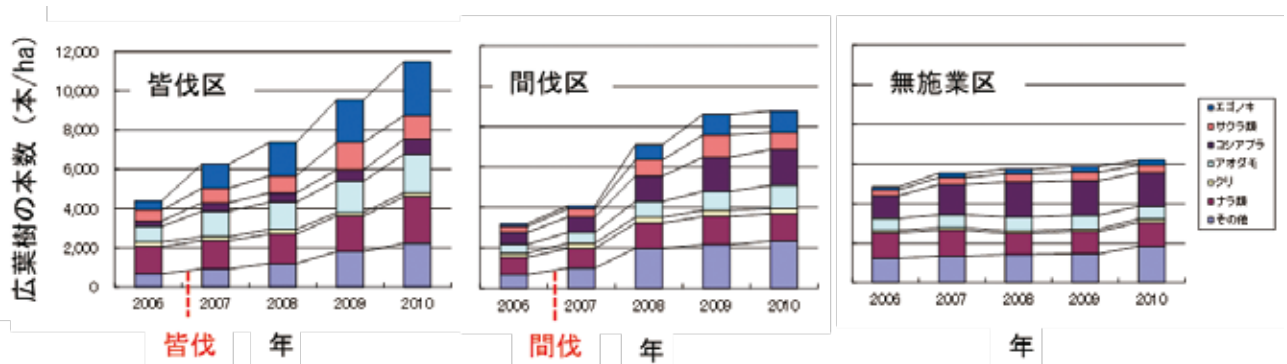


図 29. 間伐後の広葉樹の定着本数の推移 (和田・金子 (2012a) を一部改変)

【林相別の年間土砂移動量】

広葉樹林や混交林では、林地の土砂（細土や石れき）の土砂移動量がスギ林と比較して少なく、内容物についてリター（落葉などの有機物）の移動が多くなります（図30）。広葉樹の侵入・定着によって、林地は林床植生や広葉樹の落葉による被覆が増大することで、土砂移動量が減少したものと考えられます。このことから間伐による広葉樹林化や混交林化によって、さらなる表土保全機能の向上が期待できます。

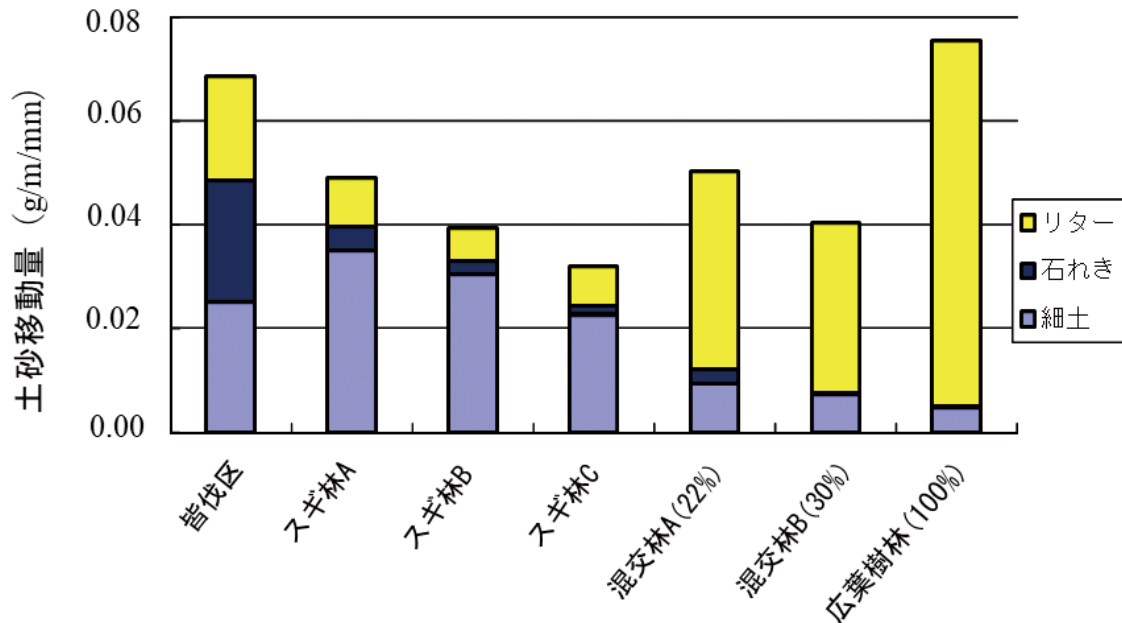


図 30. 林相別の年間土砂移動量（和田・金子（2012a）を一部改変）

以上のことから、間伐の実施は林床植物を回復させ、広葉樹の混交は落葉によるリター層を蓄積し、雨滴侵食を緩和していると考えられます。さらに、冬期の積雪が地表を被覆して土砂の移動を抑制していると考えられます。このように、この長坂試験地の事例では、強度な間伐を実施しても表土保全機能に大きな影響はありませんでした。間伐の実施に際しては、作業道開設などにおける林地の攪乱を最小限に抑えるなど、林地の保全に配慮することが大切です。