

積雪地域の森林流域における水土保持機能 —現地観測と調査データに基づく森林管理に向けて—



国立研究開発法人 森林研究・整備機構
森林総合研究所 東北支所
Tohoku Research Center,
Forestry and Forest Products Research Institute
森林総合研究所 第5期中長期成果38 (森林環境-10)

目次

はじめに	1
1章 森林流域試験による水源涵養機能の評価	
1-1 森林流域試験	2
1-2 春季の融雪流出に対する皆伐とその後の植生回復の影響	5
1-3 森林伐採が冬季～春季の水流出量に与える影響	7
1-4 温暖少雪年における森林流域からの水流出特性	9
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	11
2-2 間伐がスギ林の蒸散量に及ぼす影響	13
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	15
2-4 スギ林における間伐による林床面蒸発量の変化	17
2-5 作業道における表面流の発生と植生回復	19
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	22
3章 積雪特性の観測と森林管理への応用	
3-1 積雪深の観測と少雪化の長期変動傾向	25
3-2 スギ林・落葉広葉樹林における積雪深の比較	27
3-3 スギ林・落葉広葉樹林における冬期の樹冠通過降水量の比較	29
4章 その他（災害関連）	
4-1 積雪期間の短縮により予測される林野火災発生危険日数の増加	32
4-2 岩手・宮城内陸地震災害地における土壌の水分状態の特徴	35
4-3 海岸林の再生に向けた地下水位変動の重要性	38
参考資料	40
執筆者一覧	45

表紙写真：

上段左：無積雪期における釜淵森林理水試験地2号沢の観測小屋

上段中央：積雪期における釜淵森林理水試験地2号沢の観測小屋

上段右：全天空写真（左上から時計周り：釜淵森林理水試験地スギ林、釜淵森林理水試験地落葉広葉樹林、長坂試験地スギ林間伐区、長坂試験地スギ林無間伐区）

中段：1970年ころの冬季の釜淵森林理水試験地

下段左：長坂試験地において、大型雨雪量計を用いて樹冠通過降水量を測定している様子

下段中央：長坂試験地において、2007年間伐時に開設された作業道

下段右：長坂試験地における2007年間伐直後の上の沢流域の様子

はじめに

積雪地域において、融雪水は重要な水資源であり、森林流域の積雪が供給源となっています。IPCC 第6次評価報告書（AR6）からも気候システムの温暖化には疑う余地はなく、世界的に雪氷減少などの事実が観測されています。日本においても少雪化が生じて、気候変動により積雪地域の春先の水資源不足が懸念されています。その一方で、頻発する豪雨による洪水の軽減策も求められるなど、森林が持つ水土保全機能（水源涵養機能、土砂災害防止機能／土壌保全機能）の役割に対する国民の関心は高まっています。

水源涵養機能について、森林流域試験によって研究が推進されてきました。日本の森林流域試験は、林業試験場（現国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所）場長であった白沢保美氏がスイスのエーメンタールの流域試験を視察後、山林局（現林野庁）に同様な流域試験を実施することを進言し、1906年から1912年まで茨城県常陸太田市、笠間市および栃木県足尾町の国有林において行われたことがはじまりです。現在では、全国の大学、官公庁の試験研究機関において、森林流域試験が実施されています。しかし、森林流域試験が行われている場所に注目すると、温暖な地域での試験地の数と比較して、積雪地域の試験地の数は少なく、水源涵養機能に関する研究の蓄積が必要とされています。積雪地域では、冬期に降水は雪などの固体降水として降り注ぎ、地表に一時的に堆積します。無積雪地域よりも水循環過程が複雑になり、観測機器も雪に対応した特別な装置が必要になるため、無積雪地域よりも森林流域試験の維持のため手間やコストがかかり、観測・調査が困難になることが要因の1つと考えられます。

森林総合研究所は、山形県最上郡真室川町で1939年から水と雪の試験地として森林流域試験を開始しました。積雪地域において、対照流域法による87年以上の観測歴を有する長期森林流域試験地として極めて稀な試験地です。また、秋田県は2002年から大館市で、年間を通じて森林流域試験を続けています。東北の自治体で、年間を通じた森林流域試験を実施しているのは、この試験地だけです。これら積雪地域で蓄積されている研究成果は、貴重な情報として利活用が期待されます。

本冊子は、これら積雪地域における森林試験地を対象とした現地観測と調査データに基づいて「森林流域試験による水源涵養機能の評価」「森林施業（間伐）が水収支・環境に与える影響評価」「積雪特性の観測と森林管理への応用」について計13件の研究トピックを取りまとめています。さらに「岩手・宮城内陸地震」「東日本大震災」および「林野火災」に関連する計3件の研究トピックについても収録するなど、積雪地域の水土保全機能を発揮させるために必要な情報を、幅広く記述しています。この冊子が、積雪地域のみでなく、森林が持つ水土保全機能に関心を持つ国内の団体や、省庁を含む公的機関などの活動に貢献できることを願います。

令和8年1月

国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 東北支所

野口 正二

1章 森林流域試験による水源涵養機能の評価

1-1 森林流域試験

森林は雨水を土壤中に一時的に貯留し、ゆっくりと河川へと流出させるため、降雨時における河川のピーク流量を減少させる一方で、雨が止んだ後の流量低下を緩やかにします。このような森林がもつ河川流量の平準化効果（中野 1985）は、水源涵養機能として世の中に広く知られてきました。この森林の水源涵養機能は、森林流域試験によって科学的に明らかにされてきました。森林流域試験とは、設定した試験流域における降水量と流出量を継続的に観測したうえで、森林など植被状態の違いによる影響を検出する試験です。その方法には、単独流域法、並行流域法および対照流域法があります（図1）。

単独流域法は、ある一つの流域に着目し、植生を変化させない期間（基準期間）と植生を変化（伐採）させた期間（処理期間）を比較する方法です（図1 緑色破線枠）。この方法は同じ流域を対象として比較するため、地形、土壌特性などの影響を考慮する必要はありません。しかし、比較する期間の気象条件が大きく異なると、植生変化の影響を抽出しにくいという欠点があります。

並行流域法は、複数の流域に着目し、植生が保全された流域と植生が変化（伐採）した流域を比較する方法です（図1 橙色点線枠）。この方法は同じ期間で比較するため、気象の影響を考慮する必要がありません。しかし、異なる流域間を比較するため、地形や土壌条件など植生以外の流域特性が異なっていた場合には、その影響を受ける欠点があります。

対照流域法は、流域特性が類似した複数の流域に着目し、基準期間を測定後、そのまま植生を変化させない基準流域と植生を変化（伐採）させた処理流域を設定して、その後を処理期間として引き続き測定して比較する方法です（図1 青色実線枠）。この方法は単独流域法と並行流域法の欠点をなくして森林の状態の変化の影響を抽出することが可能で、森林流域試験地の中で推奨されている方法です。

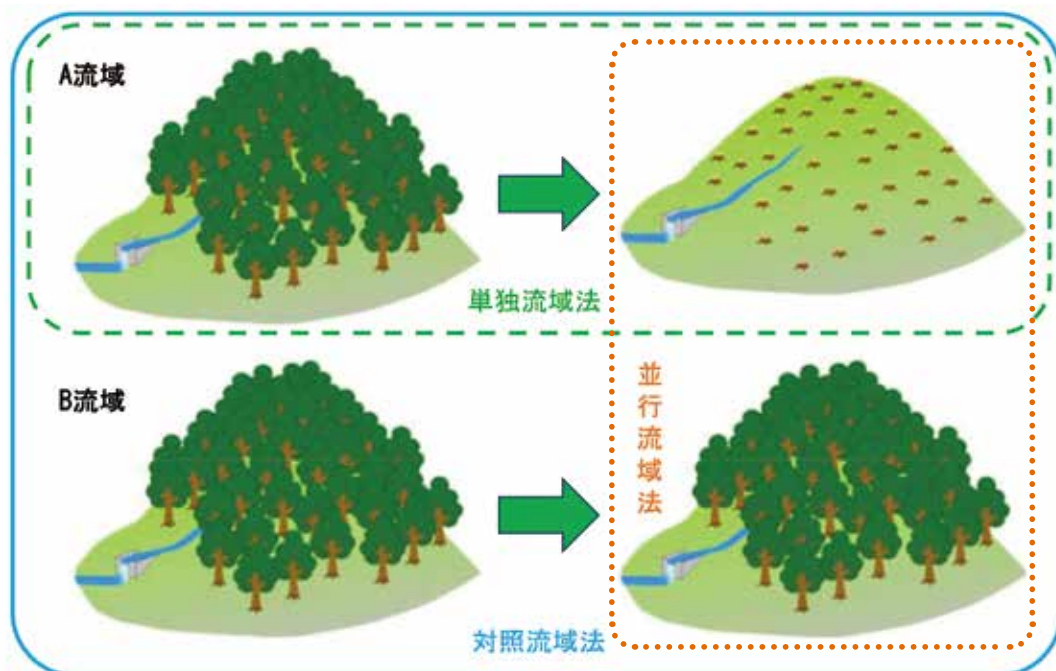


図1. 森林流域試験（森林総合研究所（2025）を一部改変）

【山形県・釜淵森林理水試験地】

釜淵森林理水試験地は東北森林管理局山形森林管理署管内 81 林班に属し、最上川の中流に流入する支流鮭川の二次支流真室川(塩根川)の支沢鶴下田沢の水源流域で、最上郡真室川町大字釜淵(北緯:38° 56'、東経:140° 15')に位置します。水と雪の試験地として地表状態の変化と流出量の関係を明らかにすることを目的に調査が始まりました。試験地は、4つの流域(1号沢:3.060 ha、2号沢:2.482 ha、3号沢:1.540 ha、4号沢:1.117 ha)から構成され、標高は162~252 m、地質は主として凝灰岩・頁岩質凝灰岩で、土壌は褐色森林土からなります(図2)。1号沢と2号沢は1939年から観測が開始されました。隣接する3号沢と鶴下田沢をはさみ対岸に位置する4号沢は、1961年から観測が開始されています(森林総合研究所 2026)。試験地周辺の植生は、明治時代には広葉樹を主とした天然林で、製炭者による部分的な皆伐がされていました。試験地は1912年に伐採跡地においてヒノキが植林され、1913~1916年にスギ・ヒノキと一部にアカマツが補植されました。1号沢は、観測開始から基準流域として自然放置されています。2号沢は、1947~1948年に皆伐されました。皆伐後に火入れと刈払いを繰り返したことにより流域内で雪崩が頻発したため、1960年に階段工を施工したうえでスギが植栽されました。階段工は、その後1969~1970年にも一部で施工されています。3号沢と4号沢では1964年に流域の半分を伐採(3号沢は沢沿い、4号沢は尾根沿い)した後、1970年に残り半分を伐採してスギが植栽されました。(野口・藤枝 2007, 久保田ら 2013)。さらに最近では、2018年10月に2号沢(尾根沿い)と4号沢(谷近く)で作業道開設と小面積間伐が行われています(阿部ら 2023)。

流域からの流出量は、既設の量水堰堤において、45°Vノッチの越流水位を計測し、算出しています(図2右上)。降水量等の一般気象観測は、1号沢量水堰堤から直線距離にして約800 m離れた森林総合研究所東北支所山形実験林・気象観測露場(標高:160 m)で行っています(図2右下)。

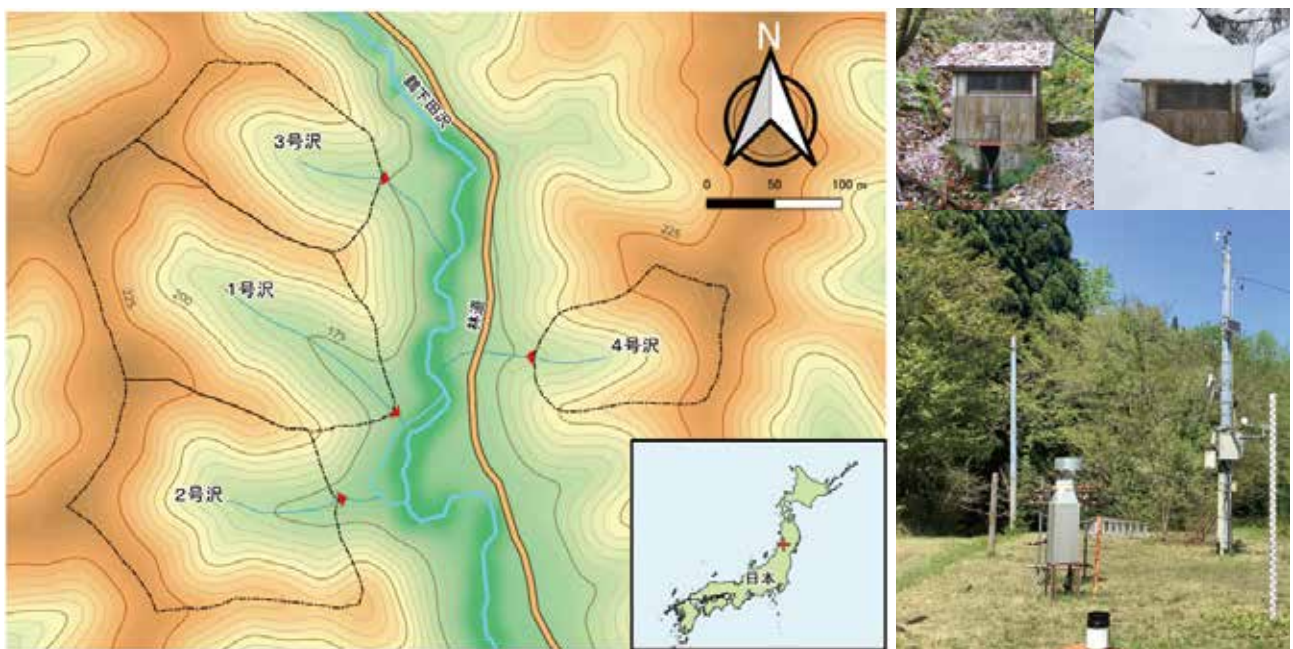


図2. 釜淵森林理水試験地の地形・位置(左)、2号沢量水堰堤と観測小屋(春季・冬季:右上)、山形実験林・気象露場(右下)

【秋田県・長坂試験地】

秋田県長坂試験地は、米代川の中流部に位置し、大館市長坂地区（北緯：40° 16′、東経：140° 24′）の県有林内に設定されています。森林の持つ水土保持機能に関するモニタリング事業の一環として2002年から森林流域試験をしています。試験地は3つの小流域（上の沢：6.55 ha、中の沢：7.52 ha、下の沢：6.50 ha）から構成され（図3）、地形の緩やかな里山地帯にあり、標高は90～170 m、地質は東北地方の日本海側に広く分布する凝灰岩で、表層は黒ボク土と褐色森林土で覆われています。植生は、流域の大部分がスギの人工林であり、スギの生育が劣る稜線部では自然由来のコナラやミズナラ、アカマツなどが優占します。各流域のスギは上の沢と中の沢は1963年に、下の沢は1970年に植栽され、1987年から1995年の間に除伐や間伐が実施されています（金子ら 2010, 2011）。その後、2007年に中の沢を基準流域とし、上の沢と下の沢の2流域を処理流域として間伐試験が実施されました。さらに、2017年に下の沢を基準流域とし、上の沢と中の沢を処理流域として間伐試験が実施されています。

測水施設は、各流域の下流端に設置し、コンクリート製の量水堰堤と量水池および導水管付きの水位観測井から成ります。量水堰堤にはステンレス製の60°Vノッチを取り付け、越流する水位を観測井にて水位計を用いて測定しています（図3右上）。気象露場は、上の沢と中の沢を結ぶ林道沿いの開けた場所（標高100 m）に位置します。降水量は高さ3 mに雨雪量計を設置して通年観測しており、冬期には商用電源を用いて保温装置を稼働させています（図3右下）。

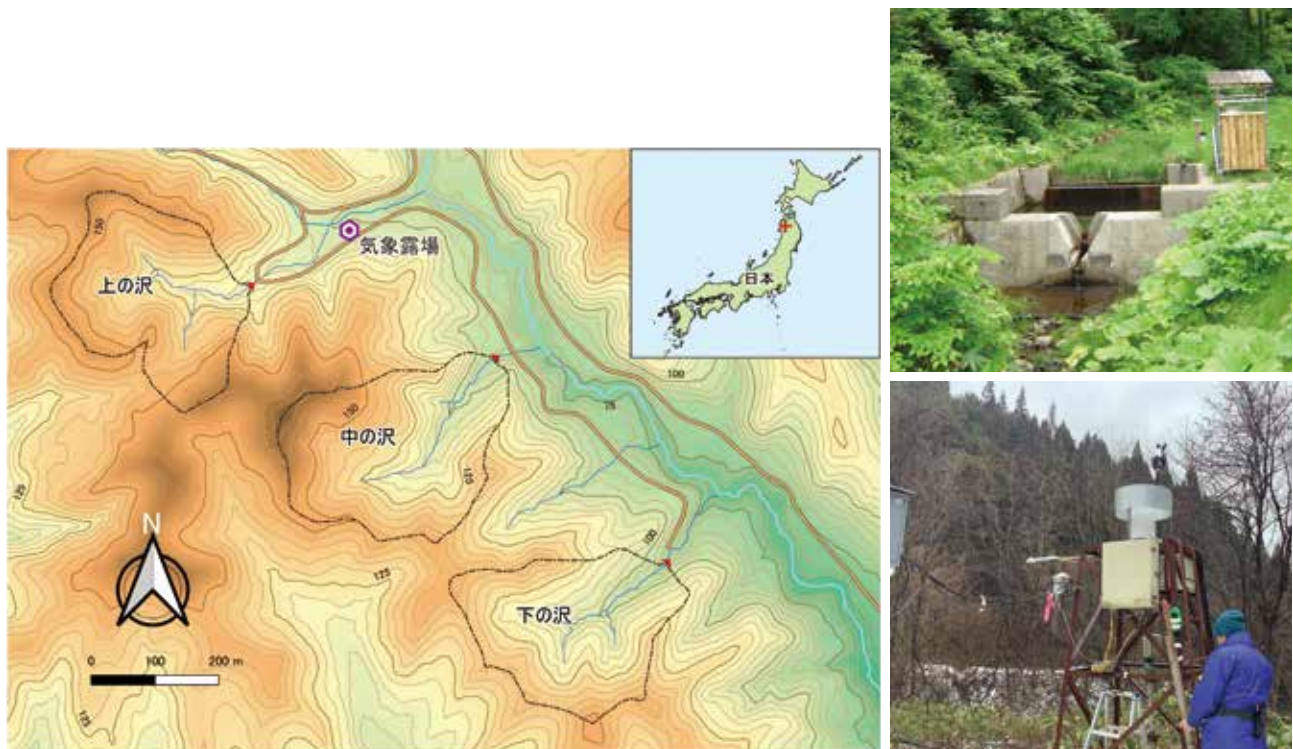


図3. 長坂試験地の地形・位置（左）、上の沢の量水堰堤（右上）、気象露場（右下）

1-2 春季の融雪流出に対する皆伐とその後の植生回復の影響

雪国では、冬季に降り積もった雪が気温の上昇する春季に融け出し、田植えなどに重要な水資源となっています。皆さんは、冬に森林に入ったとき、開けた場所に比べて積雪が少ないと感じたことはないでしょうか。特にスギのような常緑樹は、冬でも葉があるため、樹冠で降雪を遮断し蒸発・昇華させることで、積雪量を減少させます（中井 1996）。そのため、伐採などの森林施業は、雪融け水の流出（融雪流出）に影響すると考えられます（中野・菊谷 1956, 志水・吉野 1996）。そこで、豪雪地帯で長年にわたり水流出を調べている釜淵森林理水試験地を対象として、皆伐が春季の融雪流出にどう影響するかを解析しました。

釜淵森林理水試験地は、特別豪雪地帯にも指定されている山形県最上郡真室川町に位置し、1939年から87年以上にわたって森林からの水流出が観測されている試験地です。現在は1号沢（3.06 ha）、2号沢（2.48 ha）、3号沢（1.54 ha）、4号沢（1.12 ha）の4流域で構成されていますが（図2）、基準流域の1号沢以外はかつて流域全体の森林が皆伐され（図4）、その後でスギ苗木が植林されました。この研究では、漏水のある4号沢を除いた3流域の流出量と、開けた場所で観測した降水量、気温、積雪深などのデータを用いました。伐採による変化は、伐採前の伐採流域（2号沢、3号沢）と基準流域（1号沢）との関係を用いて、仮に伐採が無かった場合の値を推定し、実際に観測された値から差し引くことで評価しました。



撮影者と正確な撮影年月日は不明。4号沢尾根より1・2・3号沢を撮影。2号沢はスギ植栽後10年ほど経過、3号沢は皆伐直後と考えられる。

図4. 1970年ころの冬季の釜淵森林理水試験地（森林総研所蔵）

【皆伐後における春季の融雪流出量および流出開始日の変化】

その結果、春季の融雪流出量は2号沢・3号沢ともに皆伐後に増加し、スギ苗木の植栽から30年ほど経つと元に戻ったことが分かりました（図5左）。また、融雪流出が連日発生するようになる初日（開始日）は、皆伐後に早まる傾向がありましたが、やはりスギ植栽から30年ほどで元に戻っていました（図5右）。

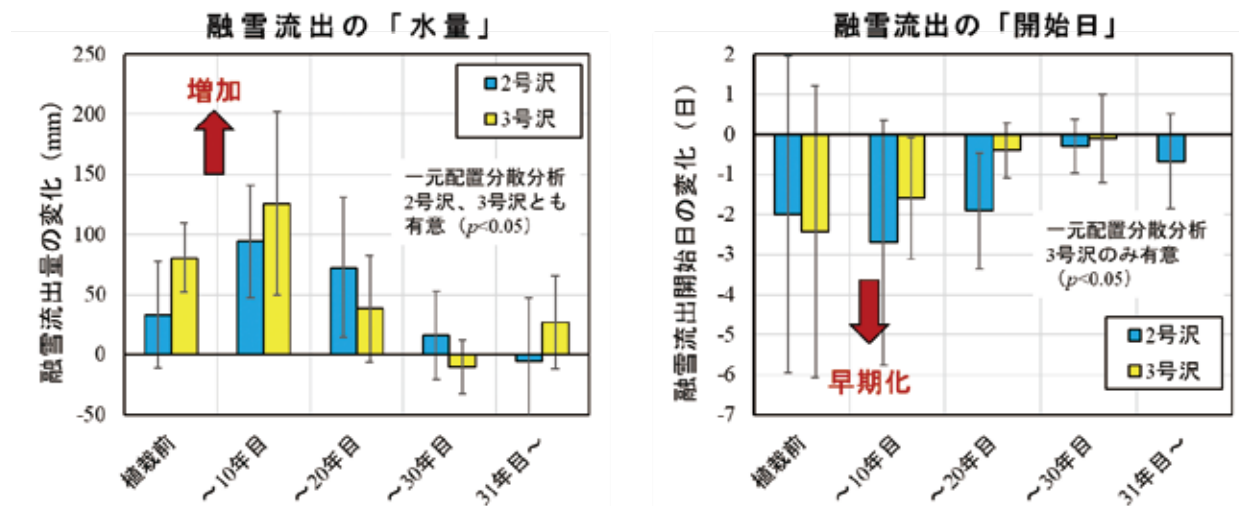


図5. 皆伐後の融雪流出量および開始日の年代による変化
(本図は CC ライセンス (CC BY-NCND4.0) に基づき阿部ら (2023) より改変)

【融雪流出量に対する降雪量および経過年数の影響】

融雪流出量に影響する要因を調べたところ、皆伐による融雪流出量の増加は、降雪量の多い年ほど顕著に現れましたが(図6左)、一方でスギ植栽からの経過年数が長くなるほど、樹木の成長に伴って小さくなる傾向も認められました(図6右)。

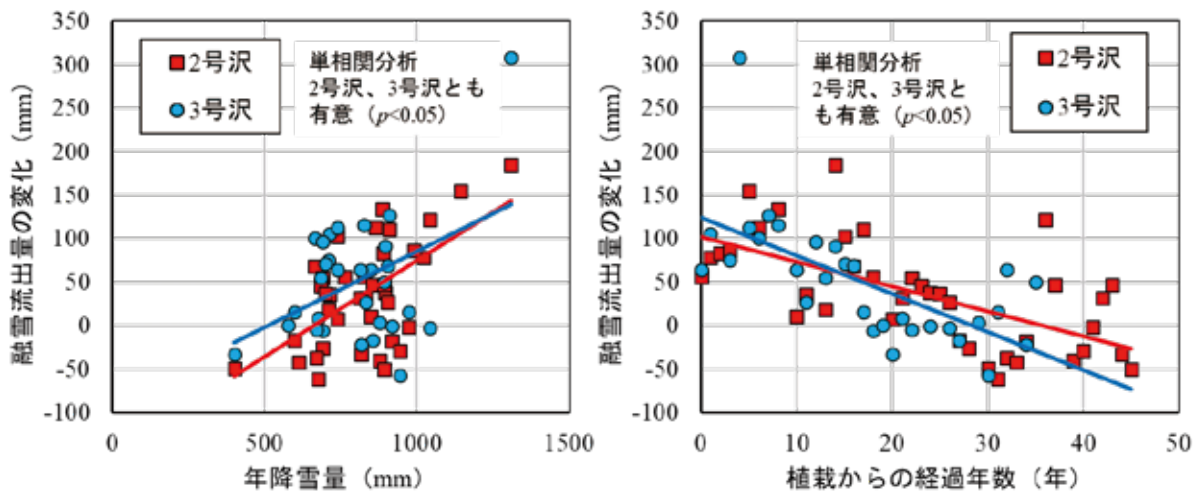


図6. 融雪流出量と年降雪量、植栽からの経過年数との関係
(本図は CC ライセンス (CC BY-NCND4.0) に基づき阿部ら (2023) より改変)

皆伐で生じた融雪流出量の増加と流出開始の早期化は、森林樹冠による降雪遮断と日射遮断が一時的に無くなり、流域内の積雪量が増えるとともに、積雪面への日射も増大したことが主な原因といえます。こういった皆伐の影響は、スギ植栽から約30年経過するとほぼ認められなくなりましたが、これは植栽したスギや自然侵入した広葉樹の成長にともなって、森林全体の葉量が増加した効果と考えられます。一方で流域の材積量は伐採前の水準に達していないと考えられ(川口・小野 1983, 細田・村上 2007)、森林からの融雪流出の応答は、材積に比べて短期間で回復したことが分かりました。

この研究は、皆伐や植林などの森林施業が春季の雪融け水の流出にも大きく影響することを示しており、豪雪地帯での水源かん養機能の理解や維持・向上のために役立つ成果です。

1-3 森林伐採が冬季～春季の水流出量に与える影響

積雪地域で森林を伐採すると融雪流出量が増加しますが、その一方で地表への日当たりが良くなるため、雪融けの開始も早まることが分かりました（図5、図6）。雪国では雪融け水が春季の重要な水資源となっており、もし雪融け時期が全体に早まるとすれば、水が必要な田植え期に水不足になるのではないかと懸念が生じます。そこで、前述の釜淵森林理水試験地を対象として、森林の伐採によって年間のいつの時期の流出量が増加するのか、逆に流出量が減少する時期は無いのかを調べてみました。まず、観測期間を初回の伐採が行われた年とスギが植栽された年を基準として年代区分しました（伐採前、伐採～植栽、植栽～10年目、11～20年目、21～30年目、31～40年目）。そして、それぞれの年代について、伐採流域（2号沢、3号沢）と森林が保全された基準流域（1号沢）の流出量に違いがあるかを、1月～6月の旬ごとに統計学的検定を用いて調べてみました。

【伐採および植栽の前後での2号沢・3号沢の旬流出量の変化】

その結果、2号沢、3号沢とも、森林伐採後には3月～4月といった融雪期の流出量が基準流域の1号沢より多くなっていたことが分かりました（図7、図8）。さらに、2号沢では苗木植栽から20年目まで、3号沢では植栽から10年目までの年代で、まだ厳冬期の2月でも流出量が1号沢を上回っていました。これは、樹冠による降水（雪・雨）の遮断が無くなって、地表へ到達する降水が増えたこと、日射の増大で2月でも融雪が発生しやすくなったことが原因と考えられます（志水1990）。一方、融雪がほぼ終了する5月～6月でも、2号沢、3号沢の流出量はわずかながら1号沢を上回る旬があり、1号沢を下回る旬はほとんど認められませんでした。この地域の田植えは5月～6月中旬に行われるため、森林伐採で雪融けが早まっても、田植え期の水資源量が減ることはないといえます。

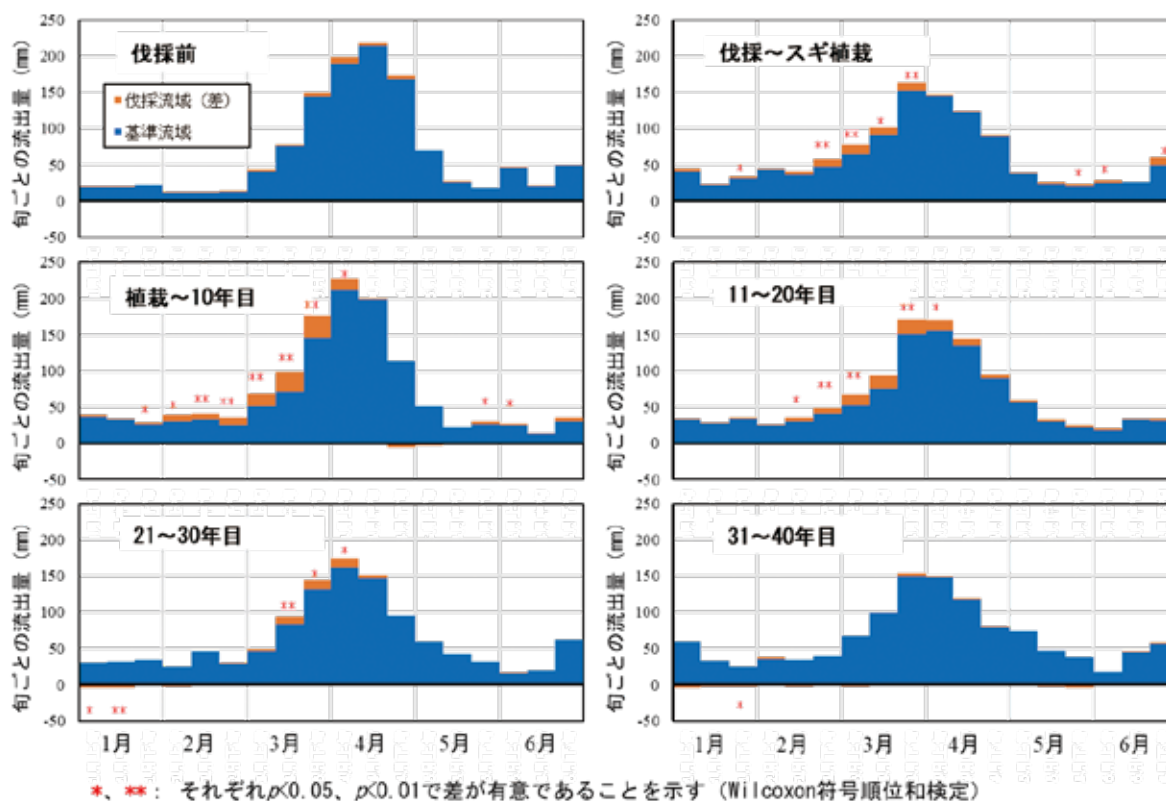


図7. 各年代における伐採流域（2号沢）と基準流域（1号沢）の旬流出量の違い（データは阿部ら（2026）に基づく）

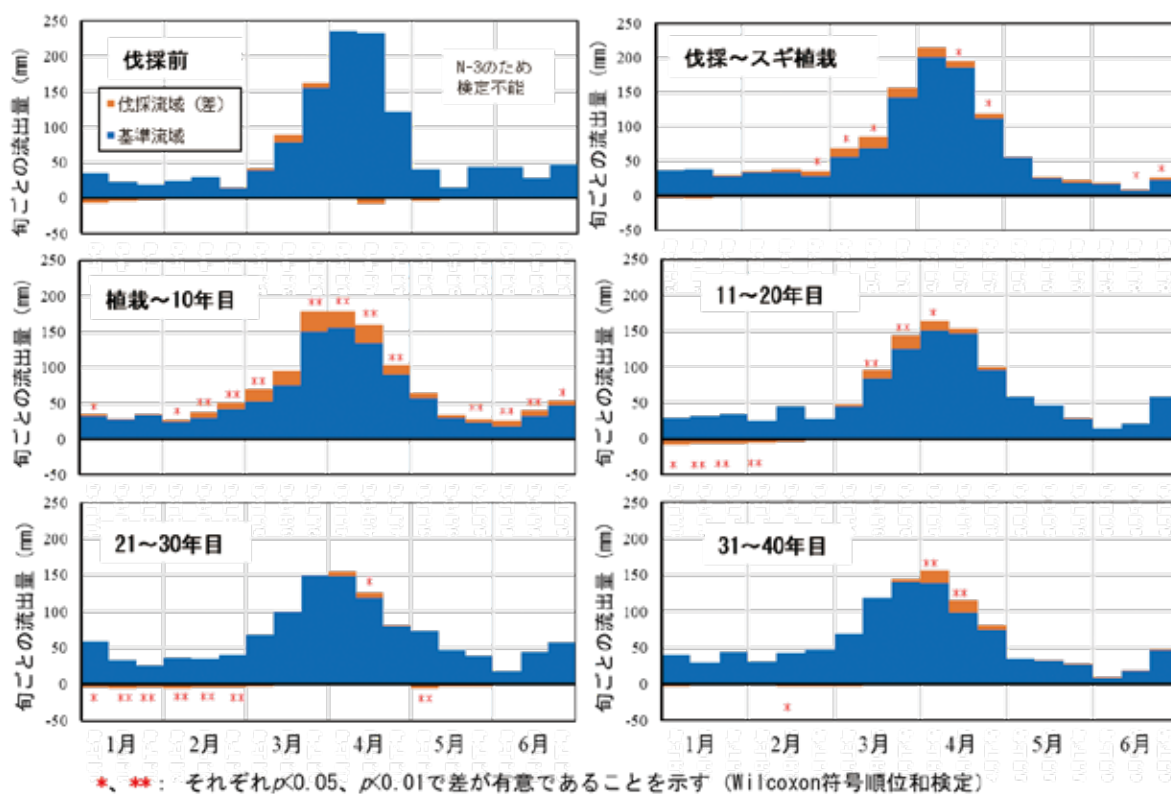


図 8. 各年代における伐採流域 (3号沢) と基準流域 (1号沢) の旬流出量の違い (データは阿部ら (2026) に基づく)

伐採流域 (2号沢、3号沢) と基準流域 (1号沢) との流出量の差は、スギ植栽から時間が経つにつれて小さくなっていき、2号沢では植栽から31年以上経つと差はなくなっていました。これは前節 1-2 「春季の融雪流出に対する皆伐とその後の植生回復の影響」で述べた融雪流出量の増加が植栽から約30年で元に戻ることも整合する結果です。ただし、3号沢では植栽後31年以上経過しても、4月の流出量が基準流域を上回っており、これには地形に起因する日照条件の悪さが関係しているのではないかと推察されます。

なお、伐採による流出量増加は、融雪期の洪水リスクを高める恐れもあります (伊藤・笹 1993)。伐採後の融雪期における洪水ピーク流量は基準流域の約1.1倍とやや高くなり、スギ植栽後20～30年で基準流域と同等に戻っていました。ただし、年代ごとの違いは、統計学的には有意ではなく (Tukey HSD 検定、 $p > 0.05$)、伐採が必ずしも洪水リスクを高めるとはいえませんでした。これは融雪期に大雨が重なる (石井 2012) かといった偶発的な要因が強く影響するためと考えられます。

1-4 温暖少雪年における森林流域からの水流出特性

気候変動により、降雪量が少なくなり春先に水資源が不足する可能性が指摘されています。2020年冬（2019年12月～2020年2月）には、北日本日本海側の降雪量は平年比の44%でした（気象庁2020）。21世紀後半には低標高地域で積雪が大きく減少し、2020年と同程度の少雪が高頻度で出現すると予想されています。東北地方日本海側の低標高地域は、米の主要な生産地であり、水資源の不足は食料生産に大きな影響を与えます。少雪年の流出特性を実証的に明らかにすることは、将来的な春先の河川流量の低下に対する適応策を考える上で必要不可欠です。そこで、長坂試験地における2020年、2021年および2022年の3寒候期（11月～翌年5月）の流出特性の変化を解析しました。

【稀有な温暖少雪年である2020年の冬季の気象状況】

解析期間の気象条件を統計学的に検討するため、試験地から南南西に約7 km離れた場所にあるAMeDAS鷹巣の1980～2022年（43年間）の気象観測値を利用しました。2020年の厳冬期（1月～2月）の平均気温は -0.6°C と過去最高水準に気温が高く、3月上旬の積雪深は過去最低であったことから、稀有な温暖少雪年であったことが明らかです（図9）。これに対し、2022年は -2.8°C と過去の中央値と同等ですが、積雪深は第3四分位を上回る多さです（図9）。

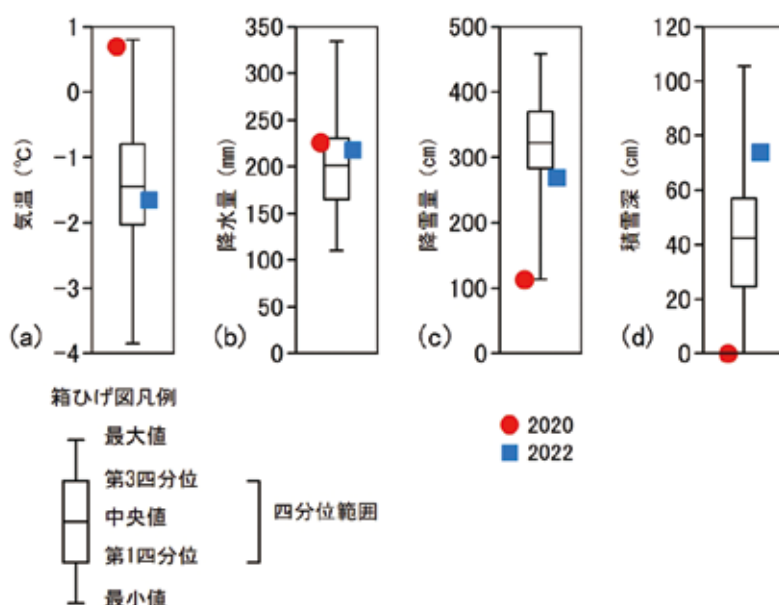


図9. AMeDAS鷹巣における2020、2022年と過去43年間（1980～2022年）の冬季気象状況の比較（田村ら（2024）を一部改変）

【寒候期における旬別流出量の比較】

2020年の厳冬期の平均気温は、過去最高水準に気温が高かったことから流出量が増加し、春期（3月中旬～4月上旬）に融雪出水が見られませんでした（図10）。一方2022年の厳冬期の平均気温は、過去の中央値と同等であり、流出量は小さく、春期に融雪出水による流出量の増加が見られました（図10）。

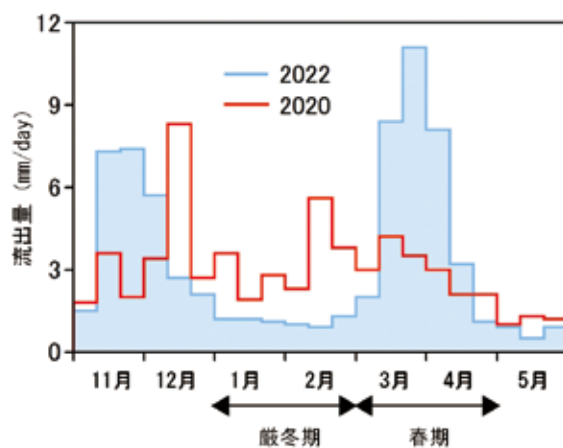


図 10. 寒候期における旬別流出量 (田村ら (2024) を一部改変)

【寒候期における流況の比較】

一般に流況曲線は、流出量の特徴を明らかにするために、1 水年 365 日分の日流出量を大きい値から順にプロットして得られる曲線です。ここでは寒候期の 212 日を対象として、流況曲線を作成しました。日流出量の大きい方から数えて 81 日分を豊水流出量と定め、つぎの 52 日分、そのつぎの 50 日分、さらにそれに引き続く最後の 29 日分をそれぞれ平水流出量、低水流出量、および渇水流出量としました。各流況指標の期間に含まれる日数は、Shimizu et al. (1994) と同様の方法で決定しました (図 11)。図 11 の○印の分布範囲に見られるように、2020 年の厳冬期における日流出量は流況曲線全体に分布します。これに対し、2022 年の厳冬期の日流出量 (図 11 □印) は、ほぼ一定で低水流出量を構成しています (図 11)。

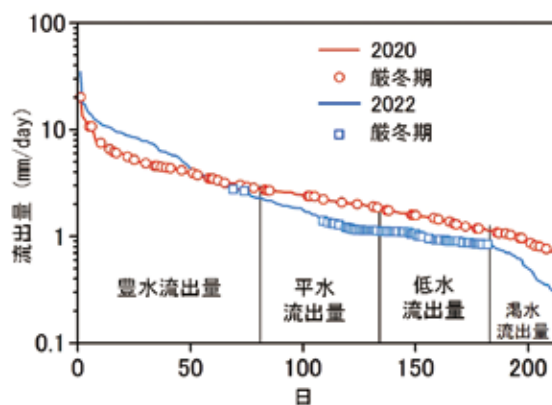


図 11. 寒候期における流況 (田村ら (2024) を一部改変)

温暖少雪年の春期に融雪出水が見られない現象は、厳冬期に降雪ではなく降雨が多いことにより、林内に雪が積もらないことが原因です。春期に積雪深が大きくなることから、気温上昇と降雨によって発生する大規模な融雪出水による災害リスクは低くなると推測されます。一方で、春期にため池に蓄える融雪水を得られないことから、田植え時期以降には農業用水を日々の降水に頼らざるを得なくなります。例年、降水量は 4 月～6 月に少なくなりますが、例年よりも少ない年にはさらに渇水リスクが高くなることが示唆されます。

本研究で得られた 2020 年の観測データは、水流出に気候変動が及ぼす影響を評価し、適切な適応策を検討するための貴重な実証データとなります。

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。

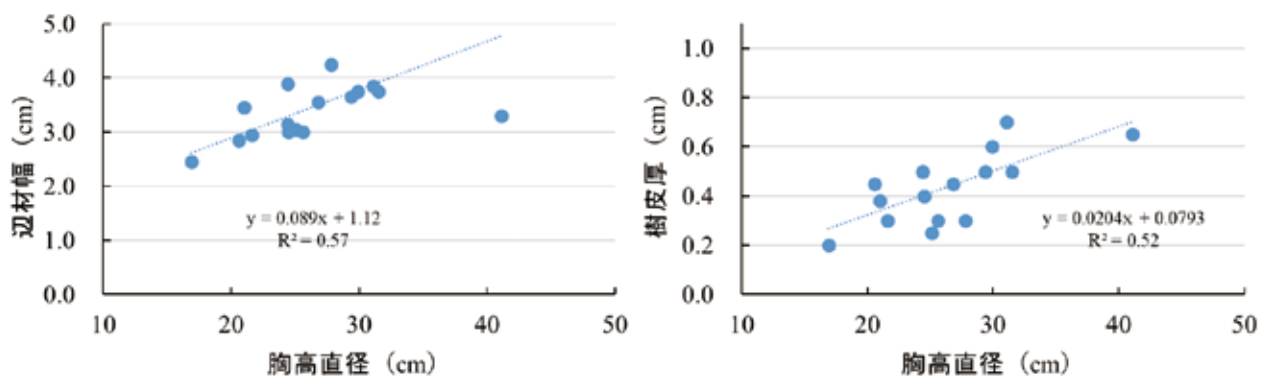


図 12. 辺材幅 (左)、樹皮厚 (右) と胸高直径の関係 (データは飯田ら (2017) に基づく)

【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。

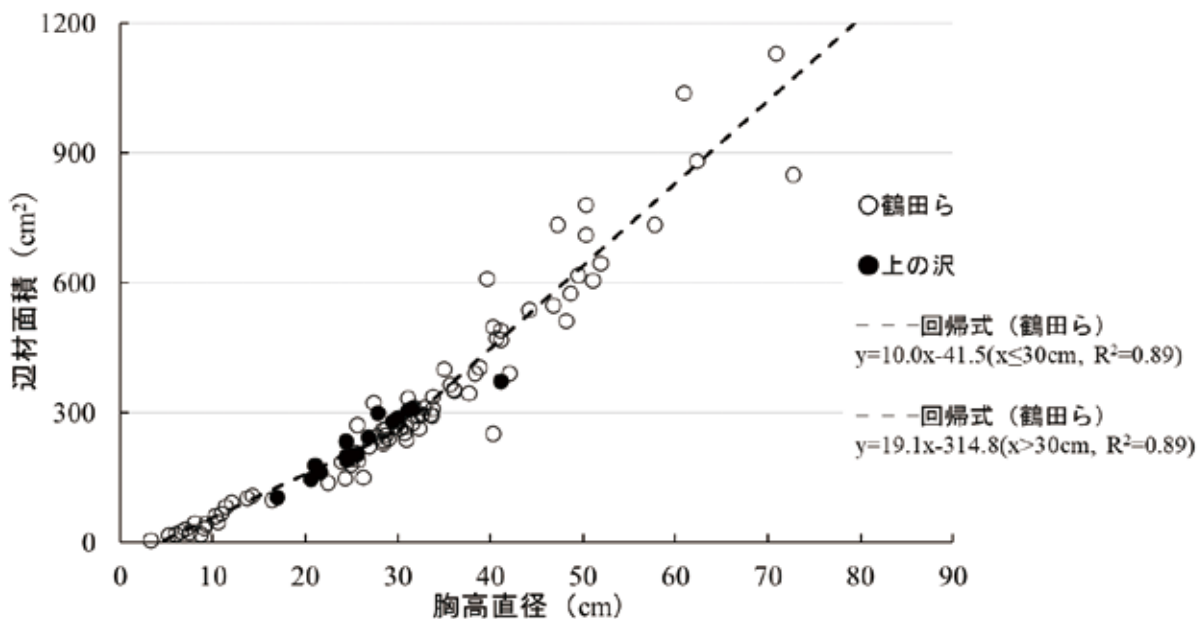


図 13. 胸高直径と辺材面積の関係（飯田ら（2017）を一部改変）

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）。

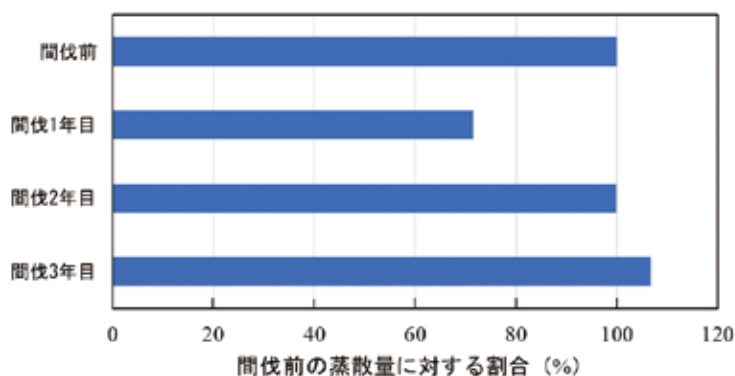


図14. 間伐による林分蒸散量の変化（データは lida et al. (2024) に基づく）

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。

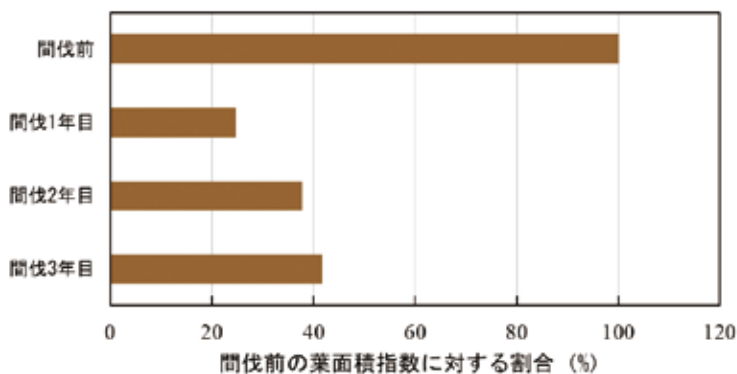


図15. 間伐による葉面積指数の変化（データは lida et al. (2024) に基づく）

【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。

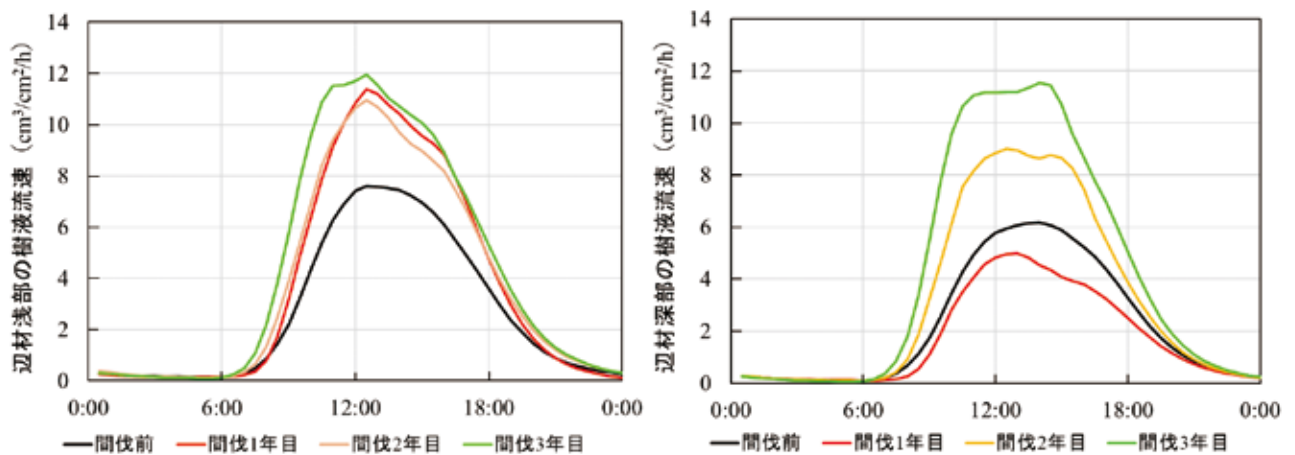


図16. 樹皮直下から深度2 cmまでの辺材の浅い部分(左)ならび深度2~4 cmの深い部分(右)の樹液流速の平均日変化(データはIida et al. (2024)に基づく)

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）。

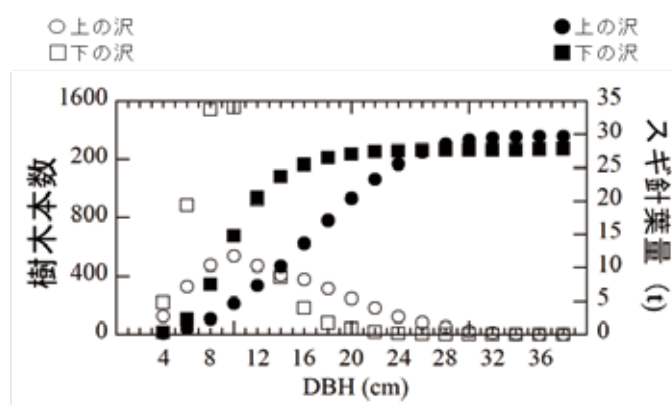


図17. 長坂試験地における間伐木の毎木調査で算出された胸高直径（DBH）別の樹木本数とスギ針葉量の積算値（左）および間伐後に残置されたスギ針葉の様子（右）（Noguchi et al. (2022) を一部改変）

【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。

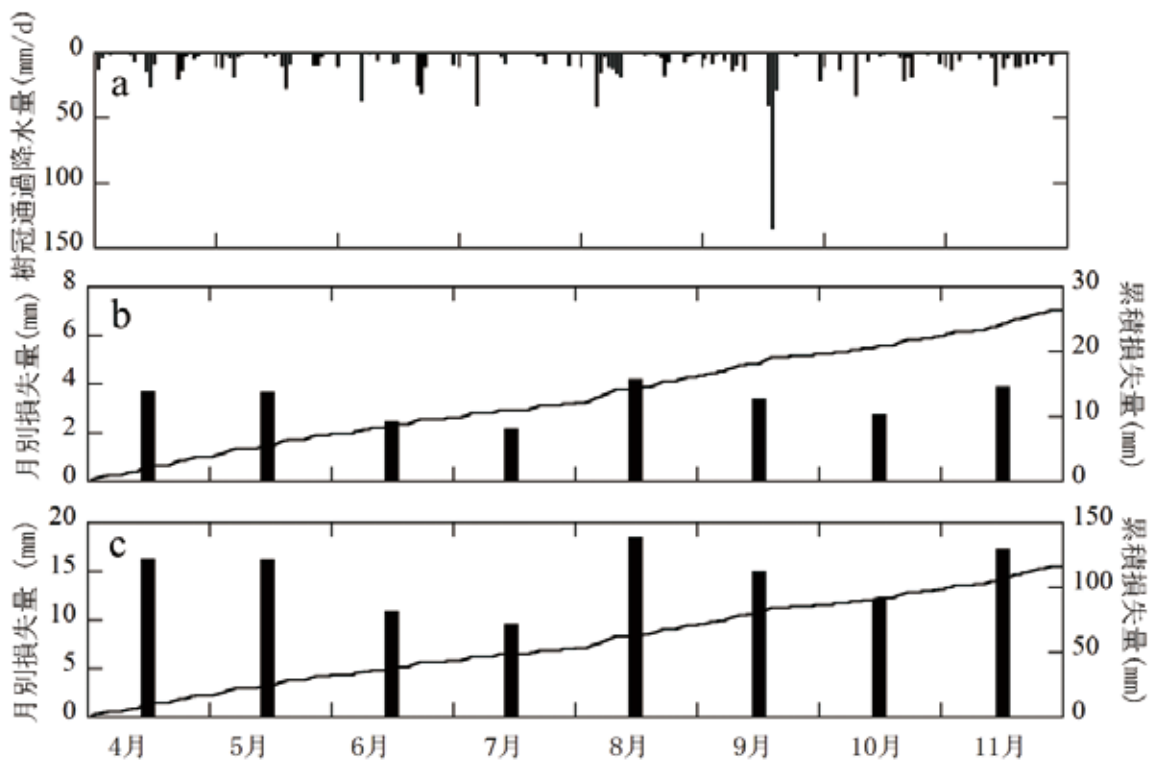


図18. 上の沢における (a) 樹冠通過降水量、(b) 4.54 (t/ha) のスギ針葉量による月別遮断損失量・累積遮断損失量、(c) 20.0 (t/ha) のスギ針葉量による月別遮断損失量・累積遮断損失量（Noguchi et al. (2022) を一部改変）

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）。

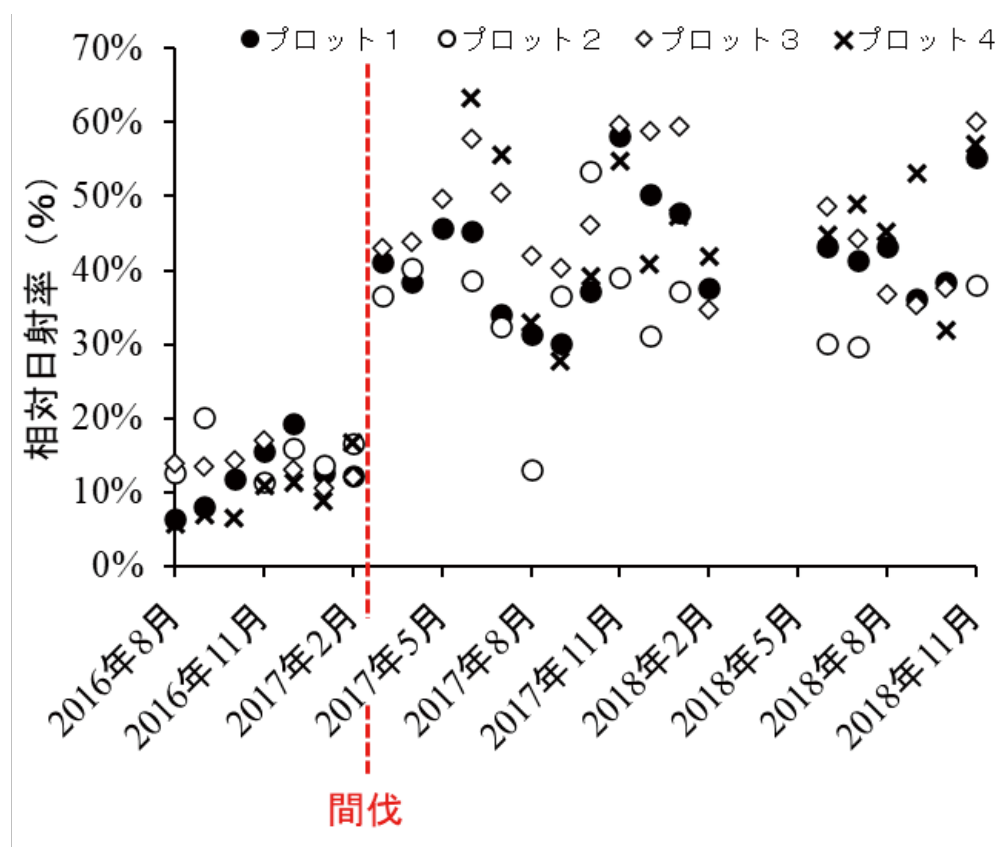


図19. 間伐前後での相対日射率の変化（玉井ら（2020）を一部改変）

【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）。

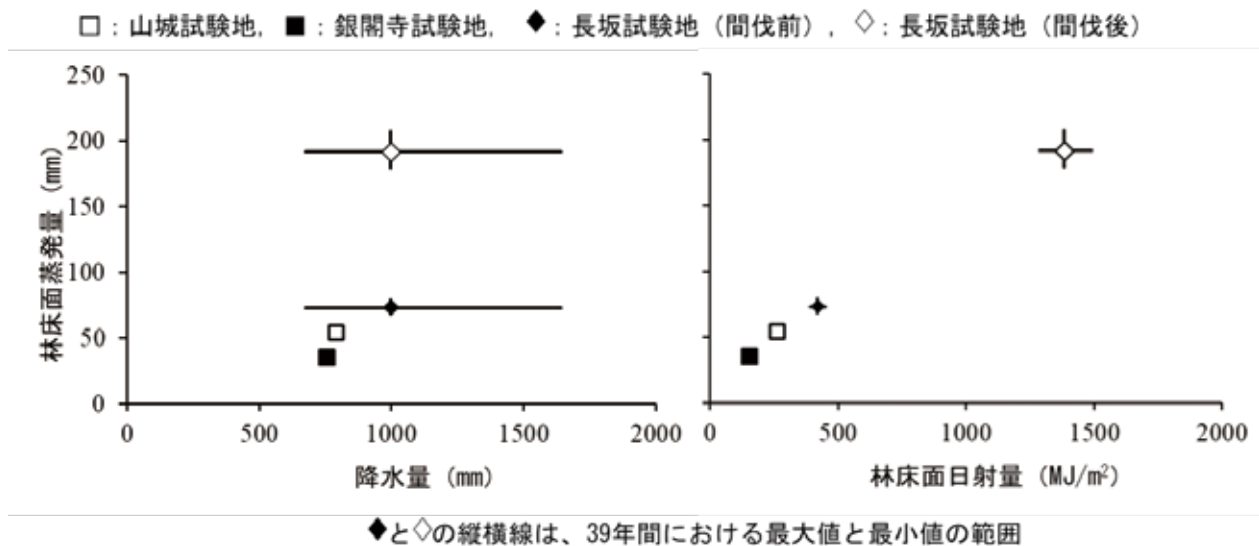


図 20. 林床面蒸発量と降水量、林床面日射量との比較（玉井ら（2020）を一部改変）

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、林床面日射量が多くて、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。

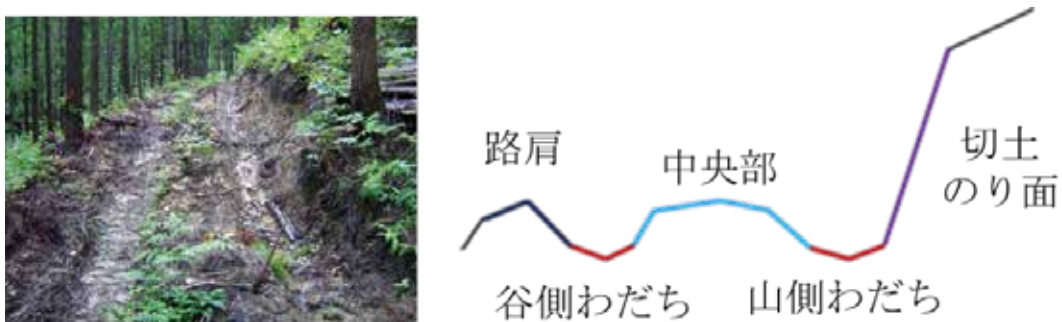


図 21. 長坂試験地で開設された作業道の様子（左）と作業道の断面模式図（右）

【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）。

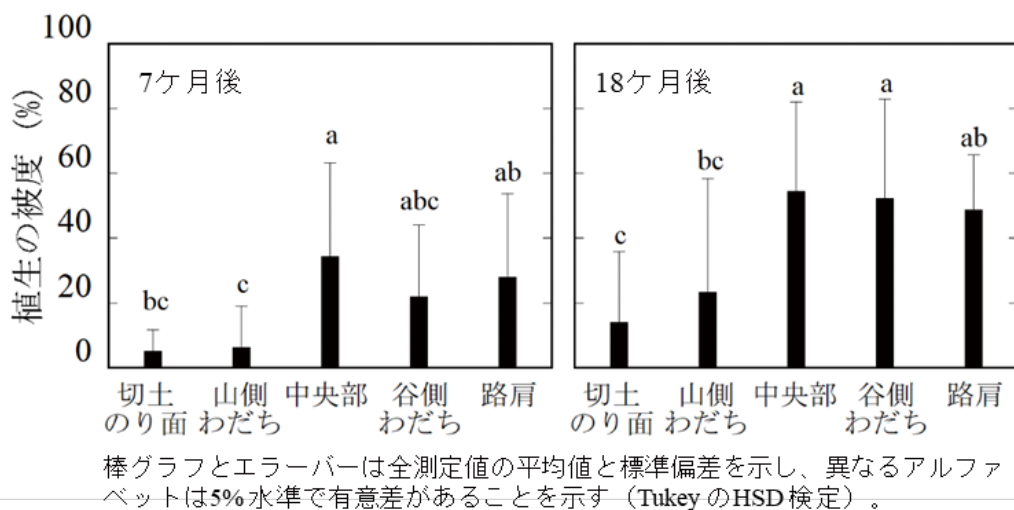


図 22. 作業道における植生の被度の変化（データは野口ら（2014）に基づく）

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)。

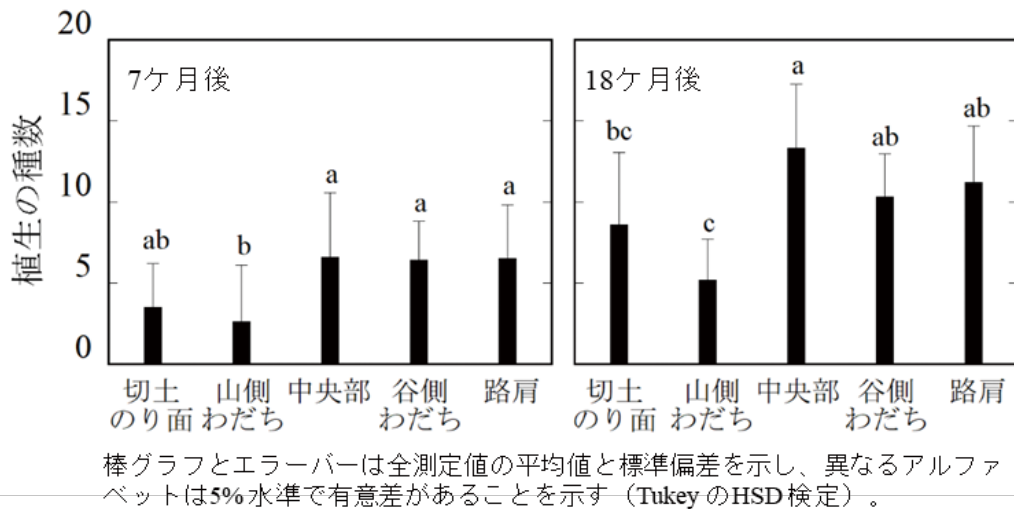


図23. 作業道における植生の種数の変化(データは野口ら(2014)に基づく)

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。

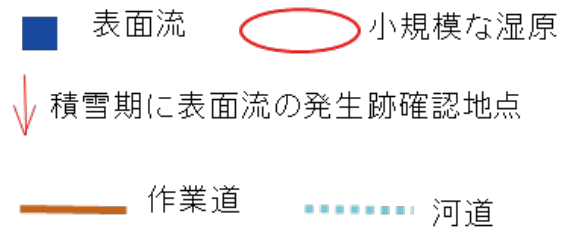
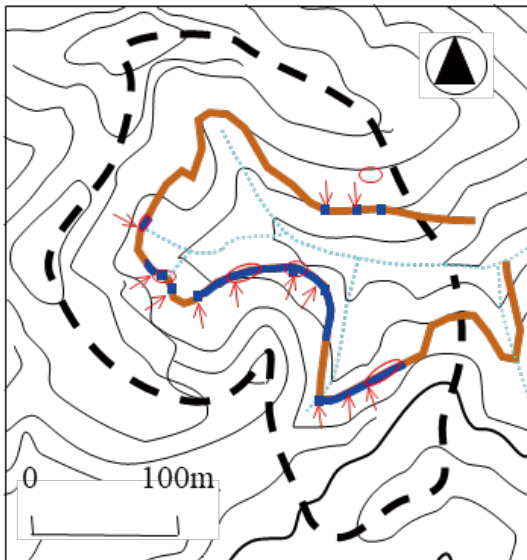
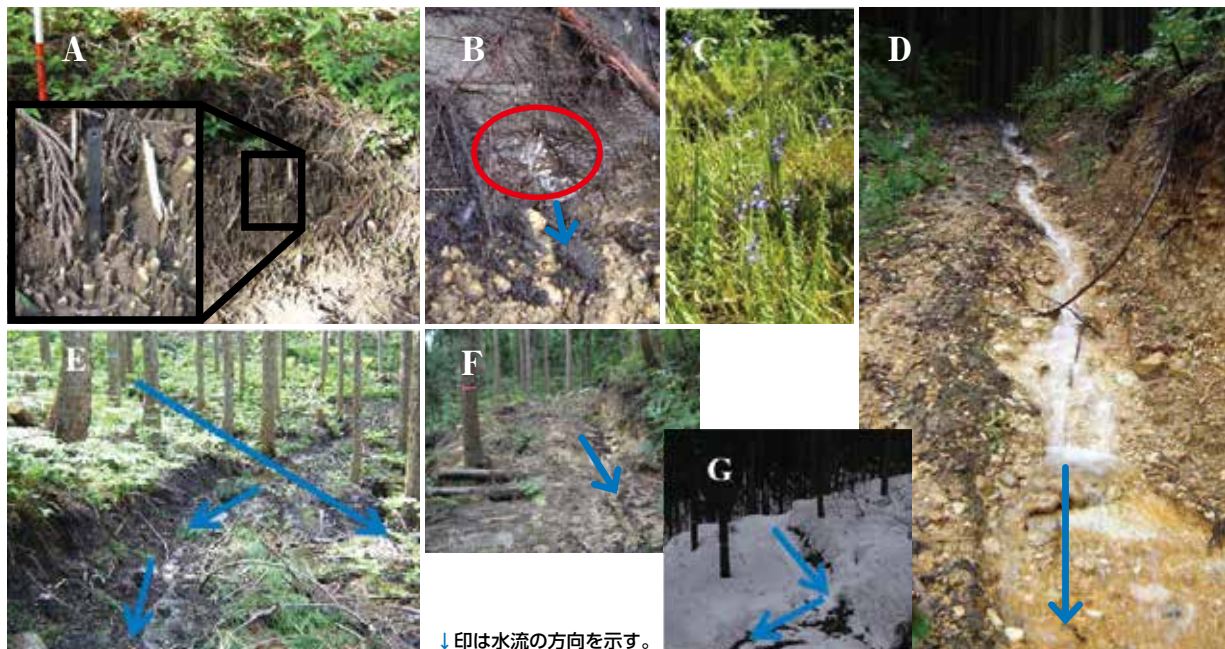


図 24. 上の沢の作業道における表面流の発生状況 (野口ら (2014) を一部改変)



(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）。

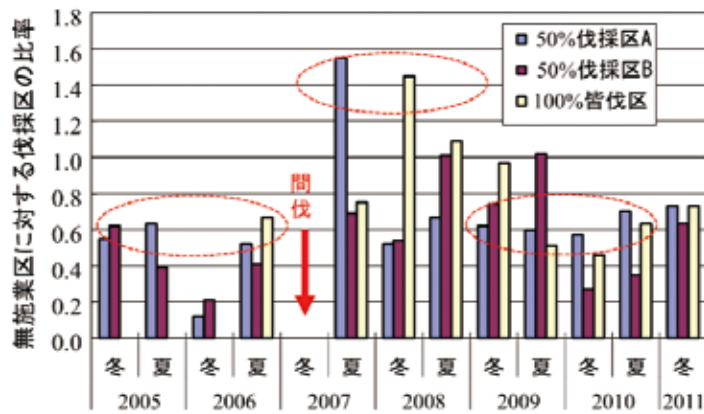


図 27. 土砂受箱による土砂移動量の観測の様子 (和田・金子 (2012b) を一部改変)

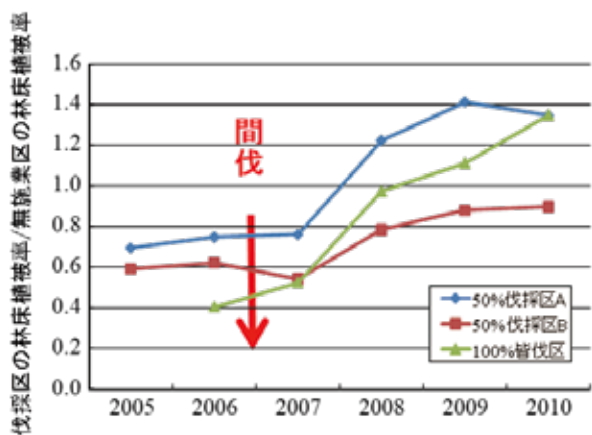


図 28. 林床植被率の推移 (左) と間伐から 2 年 4 ヶ月後の林床植被の様子 (右) (和田・金子 (2012b) を一部改変)

【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)。

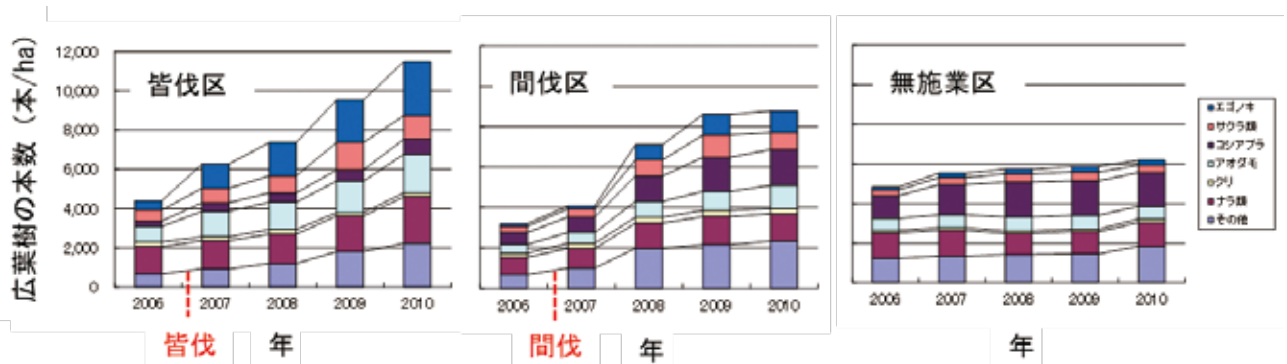


図 29. 間伐後の広葉樹の定着本数の推移 (和田・金子 (2012a) を一部改変)

【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。

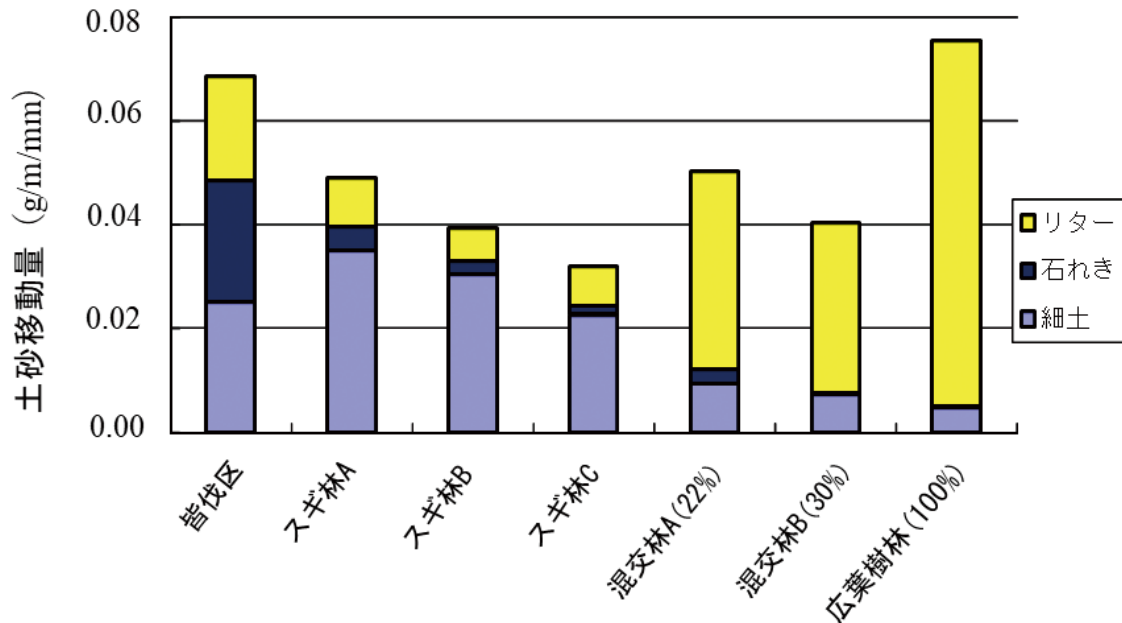


図 30. 林相別の年間土砂移動量（和田・金子（2012a）を一部改変）

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。

3章 積雪特性の観測と森林管理への応用

3-1 積雪深の観測と少雪化の長期変動傾向

【積雪深の観測】

冬期に降雪として地上にもたらされた雪は、堆積して積雪を形成します。積雪の観測としては、積雪の深さ（積雪深）の測定があります。その方法は、昔は雪尺を使用して積雪深を定時に目視観測しました。冬期シーズンの最大積雪深を簡便に知る方法として、最深積雪指示計があります（高橋 1968）。雪尺の目盛に 10 cm 刻みでアルミニウムピン（長さ：10 cm、径：3 mm）を水平になるよう差し込んだもので、消雪後にピンが曲がった高さから最大積雪深がわかります（図 31A）。現在、積雪深の観測にあたり測定機器が導入され、自動化・高精度化が進んでいます。釜淵森林理水試験地ではレーザー積雪深計（図 31BC）で、長坂試験地では超音波雪積深計で積雪深を測定しています。超音波積雪深計（図 31D）は、消費電力が小さいため無電源地域での測定が可能です。機器は高価です。安価な方法として、感温式積雪深計があります（図 31F）。感温式積雪深計は、小型温度センサー（図 31G）が設置された高さまでの積雪日と消雪日を知ることができます（野口ら 2010）。また安価なインターバルカメラ（図 31E）が入手可能となり、雪尺などを自動撮影して積雪深の変化を知ることができます（野口 2011）。



- A：森林流域に設置された最大積雪深計
- B：レーザー式積雪深計
- C：レーザー式積雪深計データ処理装置
- D：超音波式積雪深計（○印）
- E：インターバルカメラ
- F：感温式積雪深計による積雪深測定の様子
- G：小型温度センサー

図 31. 様々な積雪深の観測機器

【積雪深の変化に関する用語】

観測された積雪深の変化に関する用語（小島 1966）について、図 32 に示します。寒候期に地上に積雪があった最初の日と最後の日およびその期間をそれぞれ積雪初日、積雪終日（消雪日）および積雪期間と呼びます。また積雪が 1 ヶ月以上の場合を根雪と呼び、その最初の日と最後の日およびその期間をそれぞれ根雪初日、根雪終日および根雪期間と呼びます。さらに寒候期中に最も深く積もった積雪の深さとその積雪深が記録された日を最大積雪深と最大積雪深起日と呼びます。

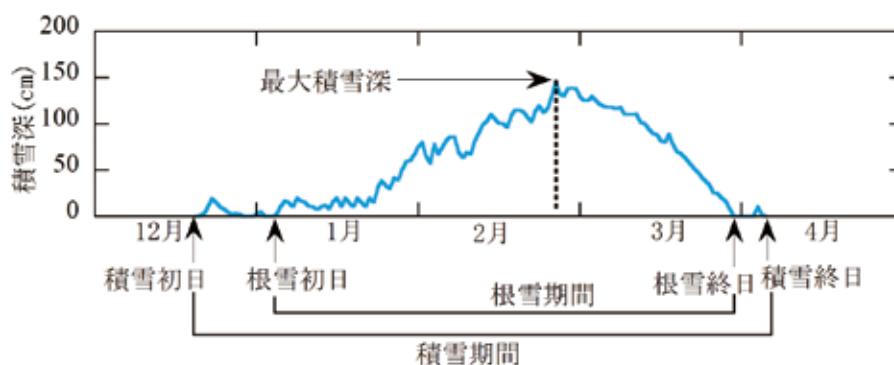


図 32. 積雪深の変化に関する用語

【積雪深の長期変化】

山形県新庄市では、1936年に「積雪研究委員会」及び「雪の会」を組織し、雪と農家経済の関係について調査がされました。この雪の研究が「日本雪氷学会（現公益社団法人日本雪氷学会）」発足とつながっています（新庄市 2025）。その新庄市における積雪観測データから、長期変動のトレンド解析をしました（野口ら 2010）。解析はノンパラメトリック法である Mann-Kendall 検定を用いて、 $p < 0.05$ の場合に長期的な変動傾向があると判断します。ここでは11月1日からの日数を計算すると、根雪終日は72日目（1月11日）～175日目（4月24日）となり、根雪終日は年々早くなる傾向があります。根雪期間は36日間～155日間を示し、根雪期間は短縮化する傾向があります。最大積雪深は44～250 cmを示し、長期的に減少する傾向があります。新庄市では根雪終日の早期化、根雪期間の短縮化と最大積雪深の減少による少雪化が生じています（図 33）。

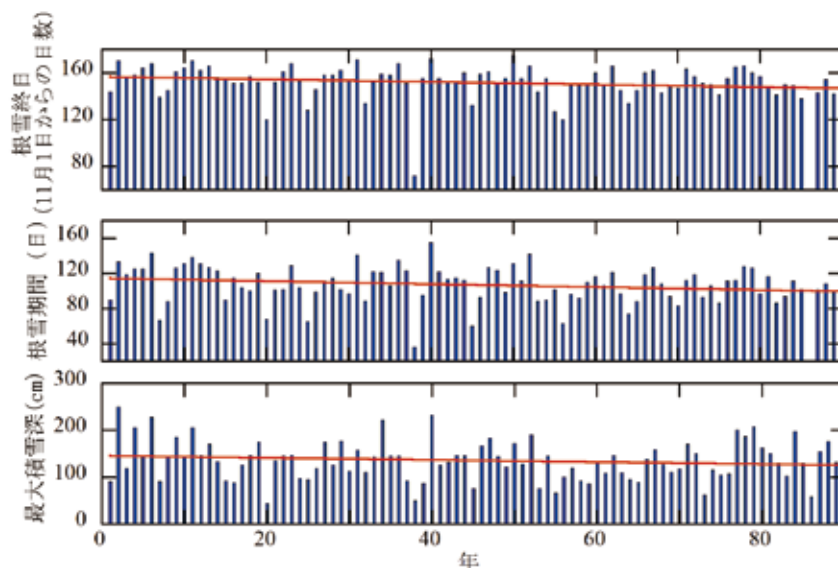


図 33. 91 冬期（1934/35 年～2024/25 年）における根雪終日、根雪期間および最大積雪深の長期変動（データは野口ら（2010）と気象庁（2025）に基づく）

釜淵森林理水試験地では1939年から積雪特性を観測中で、新庄市と同様な積雪の減少傾向を確認しています。今後、温暖化が春先の水資源の安定確保に影響を及ぼすかどうか明らかにするために、積雪特性の観測を継続するとともに、積雪特性の長期変動が森林流域からの融雪流出に及ぼす影響について明らかにすることが肝要です。

3-2 スギ林・落葉広葉樹林における積雪深の比較

秋田県長坂試験地のスギ林において、間伐区と無間伐区を選定して2014-2015年冬期に積雪深を測定しました(図34)。また、山形県山形実験林において、スギ林と落葉広葉樹林を選定して2012-2013年冬期に積雪深を測定しました(図34)。林内の積雪深は、インターバルカメラを用いて測定しました。測定期間中にレンズ氷結が影響して、スギ林において2013年2月23日～27日、落葉広葉樹林において2013年1月26日～30日の期間で欠測となりました。積雪深の測定は雪尺を林内の樹木に固定して測定しています。融雪期の林内の積雪は、輻射熱の影響で樹木周辺がより顕著に融雪するため、インターバルカメラによる積雪深の測定値は、積雪調査結果より過小傾向となるため注意が必要です。



図34. 積雪期のスギ林と落葉広葉樹の様子(左)と各林相における林内の全天空写真(右)

【スギ林の間伐区と無間伐区における積雪深の比較】

2014-2015冬期の長坂試験地において、気象露場の最大積雪深は161cm(2月16日)を記録しました。間伐区と無間伐区の最大積雪深は、どちらも2月15日にそれぞれ119cmと89cmを記録しました。ここで、2月15日の前後を積雪の堆積期と融雪期と区分します。堆積期の積雪深は、無間伐区<間伐区となります(図35)。一方で融雪期の積雪深は、無間伐区より間伐区の方が早く低下します。積雪深の大小関係は、3月18日に逆転して間伐区<無間伐区となり、間伐区が早く消雪します(図35)。間伐によって樹冠開空度が増加して林地に到達する降水が増加するため(図40)、堆積期は間伐区の方が無間伐区より積雪深が早く増加します。一方、林内に到達する日射量は、無間伐区より間伐区の方が高いことから、融雪期において間伐区の方が積雪深の低下が早いと考えられます。積雪深の変化は、立木密度によって異なります。

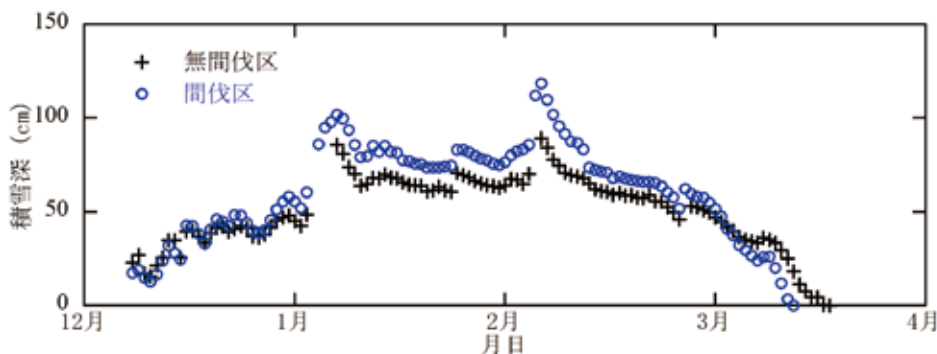


図35. スギ林の間伐区と無間伐区における積雪深(秋田県)(野口(2015))を一部改変)

【スギ林と落葉広葉樹林における積雪深の比較】

2012-2013年冬期の釜淵森林理水試験地の山形実験林において、気象露場の最大積雪深は2月24日と26日に250 cmを記録しました。一方でスギ林の積雪深は、2月23日～27日は欠測でしたが、2月25日に205 cmと実測しており（図36+印）、最大積雪深の値もほぼ同様と考えられます。落葉広葉樹林の積雪深は、2月24日に最大積雪深241 cmを記録しました。ここで、2月24日の前後を積雪の堆積期と融雪期と区分します。堆積期の積雪深は、スギ林<落葉広葉樹林となります（図36）。一方で融雪期の積雪深は、スギ林より落葉広葉樹林の方が早く低下します。積雪深の大小関係は、3月18日に逆転して落葉広葉樹林<スギ林となり、落葉広葉樹林が早く消雪します（図36）。落葉広葉樹林の方がスギ林よりも樹冠開空度が大きく林地に到達する降水が増加するため（図40）、堆積期は落葉広葉樹林の方がスギ林より積雪深が早く増加します。一方、林内に到達する日射量は、スギ林より落葉広葉樹林の方が高いことから、融雪期において落葉広葉樹林の方が積雪深の低下が早いと考えられます。積雪深の変化は、樹種によって異なります。

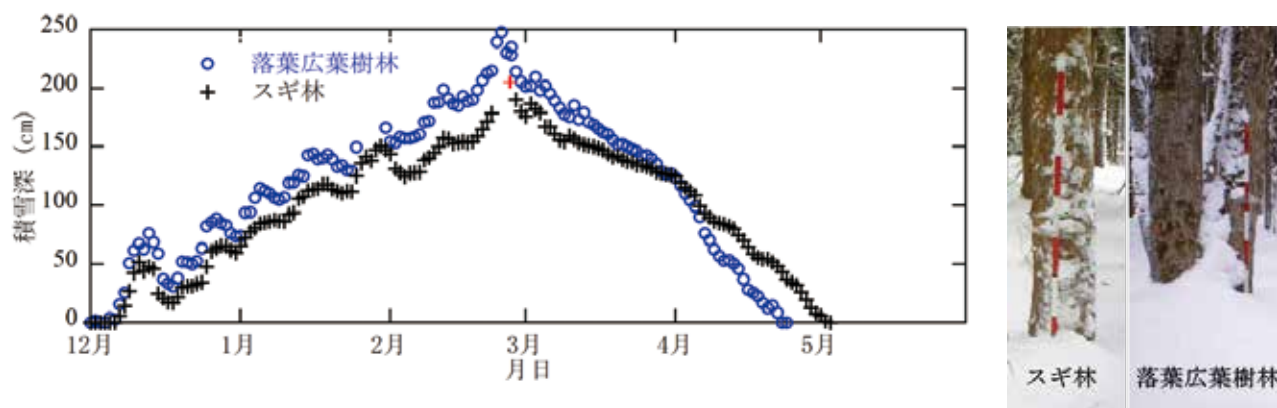


図36. スギ林と落葉広葉樹林における積雪深（山形県）（左）、インターバルカメラによる積雪深の測定の様子（右）（野口（2015）を一部改変）

日本の国土は森林の水源涵養機能の適切な発揮に向けて、間伐や主伐後の再生林等の森林整備を確実にしつつ、自然条件等に応じて、複層林化、長伐期化、針広混交林化や広葉樹林化を推進するなど、多様で健全な森林へ誘導されています（林野庁 2025）。しかし、林内の積雪深は、森林の状態（立木密度や樹種の違い）だけでなく、立地環境（標高、斜面方位・傾斜など）や気象環境（風向・風速、日射量など）が複雑に影響しています。そのため、どのような森林の状態が水源涵養機能の適切に発揮するか、さらなる研究が必要です。

3-3 スギ林・落葉広葉樹林における冬期の樹冠通過降水量の比較

【積雪期における樹冠通過降水量の測定】

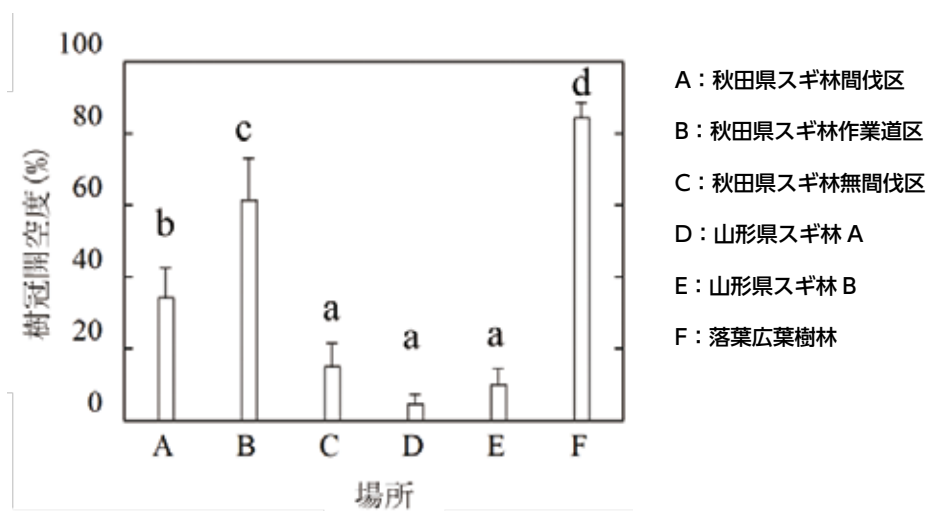
森林構造は複雑で不均質なため、林床に到達する降水量（樹冠通過降水量）は、測定することが困難です。特に冬期の降水は、個体降水（雪）として森林に降り、樹冠に長く貯留されるため、樹冠通過降水量を測定することがより難しくなります（図 37 左）。ここでは、ポリバケツ（直径 480 mm、高さ 565 mm、容量 75 L）を大型貯留式雨雪量計として使用しました（図 37 中央）。林内・林外に大型貯留式雨雪量計を設置後、およそ 2 週間間隔で貯留された降水の重量を計測します（図 37 右）。



図 37. 林内において樹冠に貯留されていた雪が落ちる瞬間の様子（左）、大型貯留式雨雪量計を使用して冬期の樹冠通過降水量を測定している様子（中央・右）

【スギ林と落葉広葉樹林における樹冠開空度の比較】

林況の違いが樹冠通過降水量に及ぼす影響を評価するため、円周魚眼レンズを装着したデジタルカメラを用いて、林内の各貯留式雨雪量計の直上で全天空写真（図 34 右）を撮影しました。樹冠開空度は、解析ソフトを用いて全天空写真から計算します。樹冠開空度は、落葉広葉樹林の方がスギ林より有意に大きくなります（図 38）。また、スギ林の樹冠開空度は、間伐によって有意に大きくなります（図 38）。

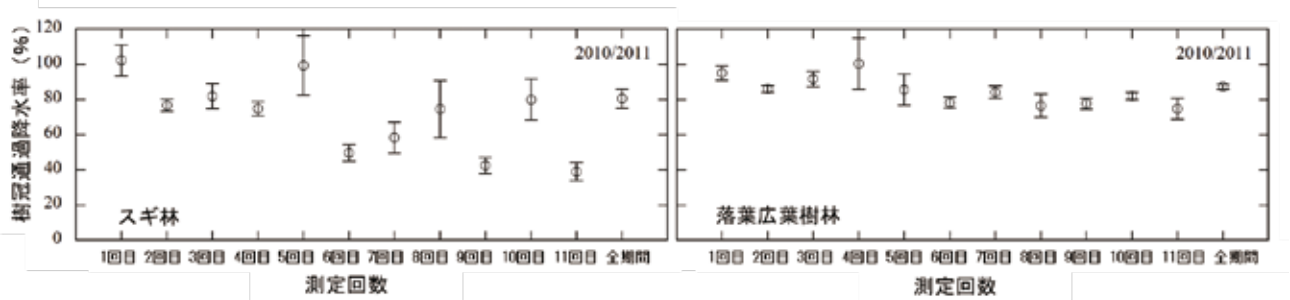


棒グラフとエラーバーは全測定値の平均値と標準偏差を示し、異なるアルファベットは 5% 水準で有意差があることを示す (Tukey の HSD 検定)。

図 38. 樹冠開空度の比較 データは野口・阿部 (2024) に基づく

【積雪期のスギ林と落葉広葉樹林における樹冠通過降水量の比較】

スギ林と落葉広葉樹林における林外降水量に対する樹冠通過降水量の割合（樹冠通過降水率）を比較します。スギ林における樹冠通過降水量の割合（樹冠通過降水率）の平均値は、39.0～102.2%の範囲を示し、全観測期間の樹冠通過降水率は、 $71.6 \pm 4.9\%$ （平均値 \pm SD）です（図39左）。落葉広葉樹林における樹冠通過降水率の平均値は、74.8～100.4%の範囲を示し、全観測期間の樹冠通過率は $84.7\% \pm 1.1\%$ （平均値 \pm SD）です（図39右）。樹冠通過降水率は、スギ林では落葉広葉樹林より小さく、変動が大きくなります。その要因は、スギ林の方が落葉広葉樹林より樹冠開空度の値が小さく（図38）、林縁で集中的な落雪が生じる（図37左）など、葉の有無や樹形の違いが影響していると考えられます。



エラーバーは標準偏差を示す。

図 39. スギ林 (左)・落葉広葉樹林 (右) における樹冠通過率の測定結果（データは野口（2012）に基づく）

【スギ林における間伐の影響と落葉広葉樹林との比較】

冬期のスギ林における樹冠通過降水率は、樹冠開空度の増加に伴い増加する傾向を示します（図40）。両者の関係は、対数曲線に対して当てはまりが良く、式 $y = 19.3 \cdot \log(x) + 54.3$ ($R^2 = 0.432$) の関係を示します。ここで、 x は樹冠開空度(%)、 y は樹冠通過降水率(%)です。スギ林では間伐によって樹冠開空度が増加し、樹冠通過降水率は無間伐区<間伐区<作業道の順番で大きい割合を示します。落葉広葉樹林において、樹冠開空度はスギ林よりも高いものの、上記スギ林における樹冠開空度に対する樹冠降水率の推定値より小さい傾向を示します（図38）。

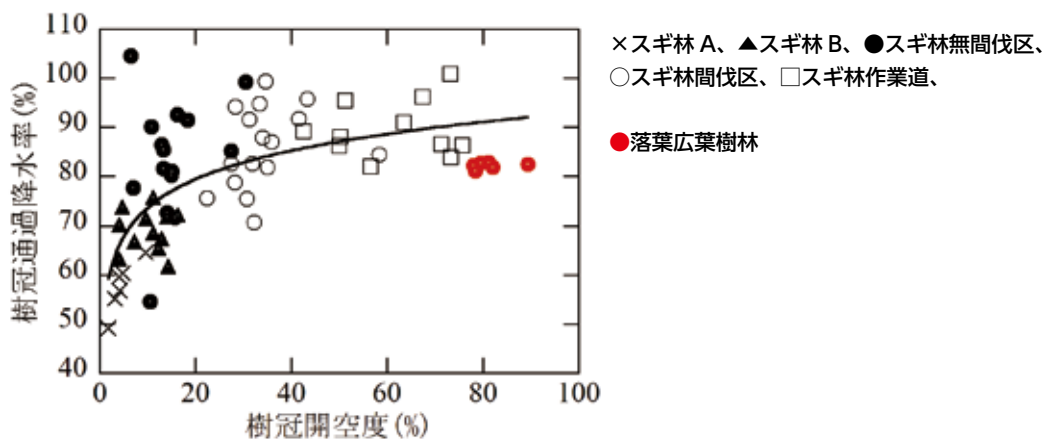


図 40. 樹冠開空度に対する冬期の樹冠通過降水率（データは野口・阿部（2024）に基づく）

【降水形態（雨量・雪量）が樹冠通過降水率に及ぼす影響】

降水形態の違い（雪・雨）が樹冠通過降水率に及ぼす影響を検討するため、冠雪による樹冠通過降水率の誤差が小さいと判断され、降水の雪量・雨量の割合が異なる2つの測定期間を選択して比較します。雨・雪の判別は、降水が記録されたときの気温の観測値を用いて行います。選定された2つの測定期間は、2009年1月22日から2月4日までの降雪量の割合が高いとき（雨量：4.3%、雪量：95.7%）と2009年3月3日から3月17日までの降雪量の割合が低いとき（雨量：48.8%、雪量：51.2%）となります。降雪量の割合が高いときの樹冠通過降水率は、無間伐区で66.4%、間伐区で75.6%、作業道で83.8%でした（図41）。降雪量の割合が低いときの樹冠通過降水率は、無間伐区で83.9%、間伐区で88.4%、作業道で93.3%でした（図41）。樹冠通過降水率は、どちらの期間においても樹冠開空度の増加とともに増加する傾向がみられます。興味深い点は、降雪量の割合が増加すると、樹冠通過降水率が減少することです（図41）。今後、気候変動による冬期の気温上昇に伴い、降雨頻度が高くなり冬期の樹冠通過降水量が増加することが考えられます。

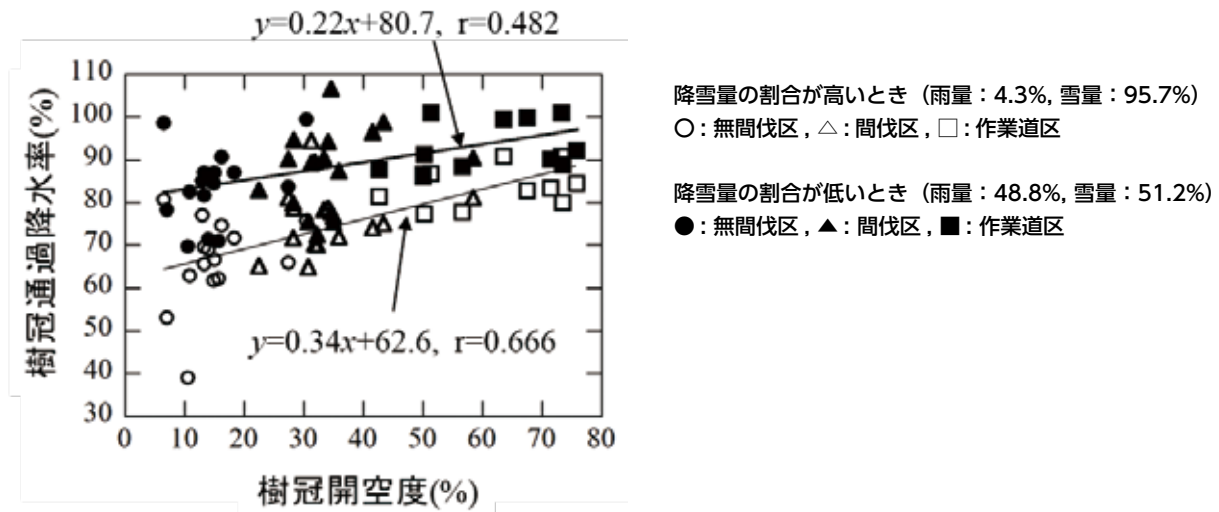


図 41. 樹冠通過降水率と樹冠開空度の関係（データは金子ら（2019）に基づく）

森林の水源涵養機能の持続的な発揮に向けて間伐等を着実に行いつつ、自然条件等に応じて、針広混交林化や広葉樹林化を推進しています（林野庁 2025）。樹冠通過降水量は、森林の状態によって変化します。冬期の樹冠通過降水量が少なくなれば、春の融雪流出などに影響を及ぼします。年々の積雪特性は多雪年や少雪年と変動がある環境下で（文部科学省・気象庁 2025）、長期的に森林の水源涵養機能の効果を維持・高めるために、適切な森林整備が必要です。

4章 その他（災害関連）

4-1 積雪期間の短縮により予測される林野火災発生危険日数の増加

積雪地域での森林では、冬季に林床が根雪によって覆われます。林野火災の発生件数は、非積雪地域に比べて積雪地域では少なくなります。その原因は、林床に達した雨水は即座に林床土壤に浸透するため雨が止んだ直後から林床可燃物の乾燥が始まるのに対し、雪は林床に達した後も積もって林床表面を被覆し続けるためです。積雪は、林床可燃物を湿らせて不燃状態に保ちます。気候変動の進行により、日本でも降雪量の減少や積雪期間の短縮化が予想されています。そのため現在の気候では2、3月は積雪期間中であるため林野火災発生の危険性が低い地域でも、気候変動によって積雪期が短縮化して林床可燃物の乾燥が進むと、積雪地域でも林野火災発生危険日数が増加すると予想されます。そこで林床可燃物の含水状態の変動を予測するモデルを用いて積雪地域の森林を対象に、12月～翌4月に雪ではなく雨のみが降った場合での林野火災発生危険日を判定しました。

【林床可燃物の含水状態を予測するモデルと様々な森林における林床面日射量】

林床可燃物の含水状態を予測するモデルは、林床可燃物をバケツとみなして作成したモデルを使います(図42)。バケツ内の水量の多寡が林床可燃物の含水状態を表します。降水がバケツに溜まり、バケツ内の水量が増えます。バケツが満水になると降水はあふれて、森林土壤に流下します。降水が止んだ後には、林床可燃物に含まれている水が蒸発し、バケツ内の水量は次第に減少します。なおモデル上のバケツの最大貯留量は林床可燃物の量によって変わると考えます。

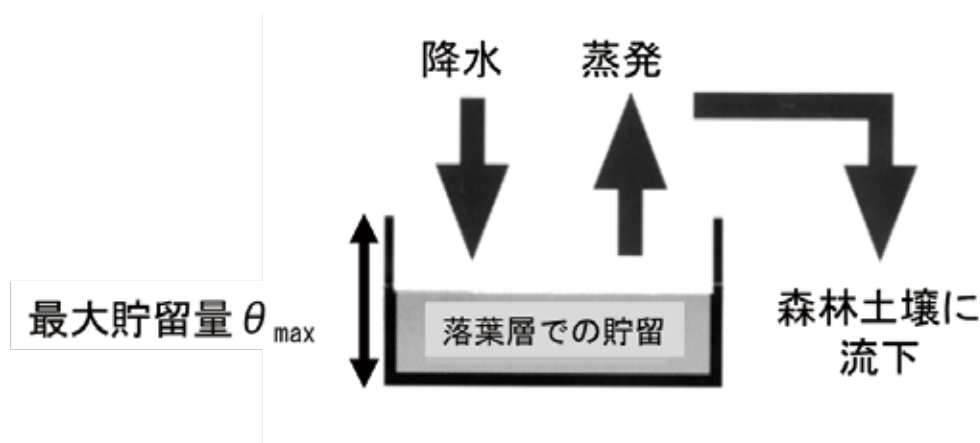


図42. 林床可燃物の含水状態の変動を予測するモデルの概要（玉井・後藤（2020）を一部改変）

ここでは、皆伐地、スギ無間伐林、スギ間伐林、スギ再間伐林、ヒノキ若齢林、落葉広葉樹林およびアカマツ林を対象として予測を行いました。この予測には、林床可燃物の含水状態を予測するモデル（図42）、各対象地の林床面日射量観測値、最寄りのアメダスにおける降水量観測値を用いました。スギ無間伐林から皆伐地へと、樹冠層が疎になるにつれて林床面日射量は増加します（図43）。

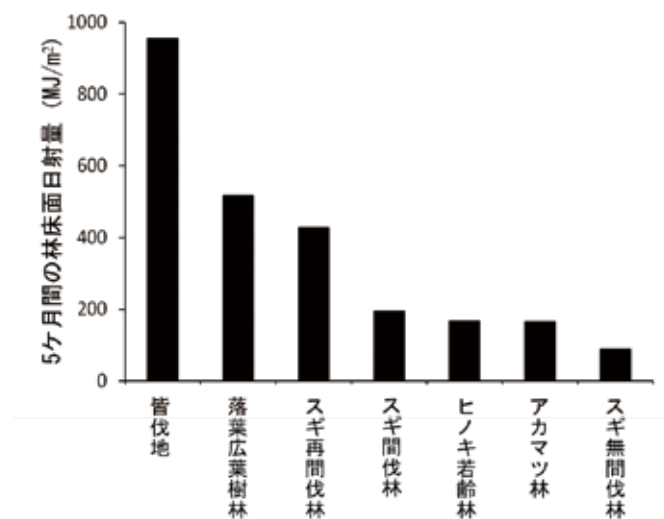
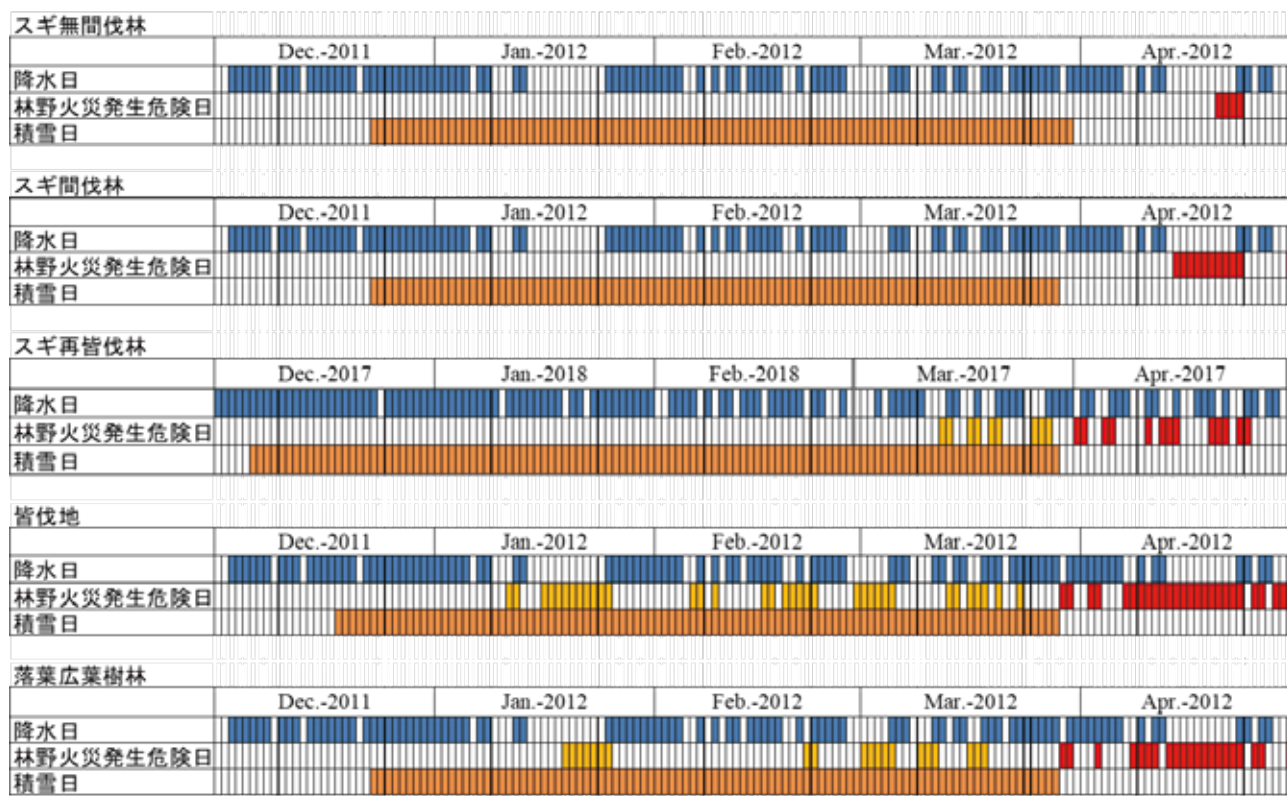


図 43. 対象とした森林における観測期間中（12月～翌4月）の林床面日射量（玉井・後藤（2020）を一部改変）

【積雪期における無積雪の場合での林野火災発生危険日を推定】

ここではモデルを使って積雪期の林野火災発生危険日の推定を行いました。林野火災発生危険日は林床可燃物の含水量が小さくなる日とみなします。実際には雪として降った場合でも雨が降ったと仮定して、12月～翌4月の積雪期における林床可燃物の含水状態の変動をモデルによって推定したところ、積雪期間中でも林野火災発生危険日と判定される日がありました（図 44）。



降水日（青色）、林野火災発生危険日（赤：無積雪期間に判定された日、黄色：積雪日に危険日と判定された日、白色：危険日と判定されなかった日）、積雪日（橙色）

図 44. 観測期間中に判定された林野火災発生危険日と降水日、積雪日（データは玉井・後藤（2020）に基づく）

【予測された林野火災発生危険日数と林床面日射量、降水量の関係】

積雪地域で条件の異なる森林の違いについてモデルを使って比較しました。林野火災発生危険日数は、12月～翌4月に林床面日射量の多いスギ再間伐林、落葉広葉樹林、皆伐地や、12月～翌4月に積雪地でありながら降水量の少ない群馬県高山村のヒノキ若齢林で多い結果となりました（図45）。このことは、降水量が同程度であった森林では林床面日射量が多いほど林野火災発生危険日は多く、林床面日射量が同程度であった森林では降水量が少ないほど林野火災発生危険日は多いことを示しています。このことから今後の気候変動により積雪期間が短くなった場合には、樹冠層の発達していない人工林や積雪期間中に落葉する広葉樹林、積雪地でありながら降水量の少ない地域の森林において、林野火災発生危険日数が増加すると予測されました。

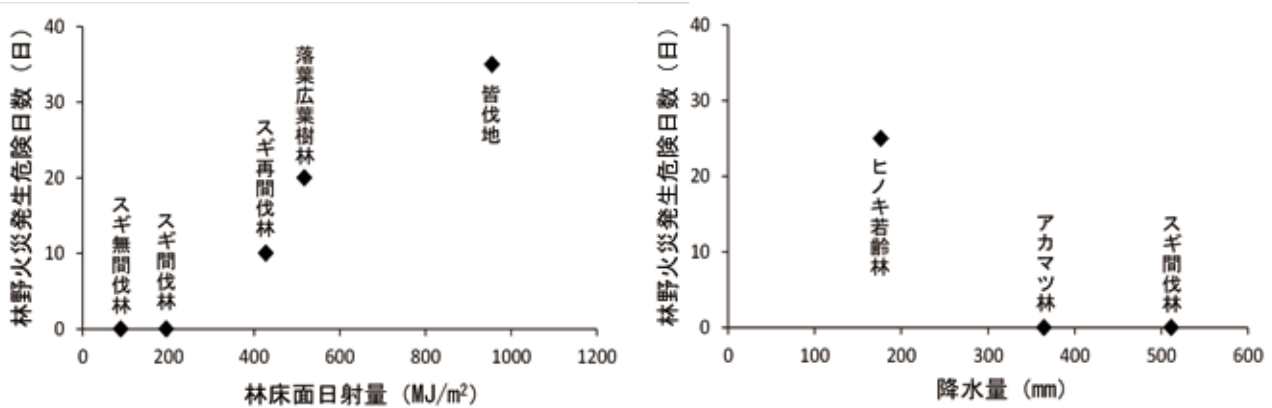


図 45. 積雪期間中に判定された林野火災発生危険日数と林床面日射量（左）および林野火災発生危険日数と降水量の関係（右）データは玉井・後藤（2020）に基づく

2025年2月26日に岩手県大船渡市で発生した山林火災（大船渡市山林火災）は、延焼面積が3400 haに達して（林野庁 2025）、平成以降で日本最大規模の山林火災となりました。大船渡市は傾斜が急な山地という延焼のしやすい地形であったこと、火災発生時は風が強かったことなどの悪条件が重なりました。中でも、出火当時の30日間前までの降水量が3.5 mmと非常に少なく、さらに、出火後にまとまった降雨があったのは8日目のことであり（気象庁 2025）、林床の乾燥が延焼の大きな要因の一つと考えられました。

従来では積雪により林野火災の発生が稀であった地域でも、積雪期間の短縮により林床が乾燥して林野火災が発生するリスクが高まる可能性が示されました。林野火災予防を啓発する際の科学的根拠となる成果です。

4-2 岩手・宮城内陸地震災害地における土壌の水分状態の特徴

【岩手・宮城内陸地震による土砂災害】

2008年6月14日に岩手県奥州市と宮城県栗原市において、マグニチュード7.2（最大震度6強）の地震（岩手・宮城内陸地震）が発生しました。この大地震によって、荒砥沢ダムでの大規模地すべりをはじめ、耕英地区での山腹崩壊群、積雪が残る東栗駒山頂近くの山腹崩壊とドゾウ沢での土石流、一迫川上流域での大規模な岩盤崩壊・深層崩壊など、震源地周辺の山地で無数の中・小規模の斜面崩壊が発生しました（林野庁東北森林管理局 2009, 三森ら 2010, 2012）。中でもドゾウ沢での土石流や河道閉塞などの災害は、災害時の土壌の水分状態が被害の程度を左右したと考えられます（図46）。地震によって緩んだ地盤は地震前よりも降雨によって崩壊地が拡大しやすく、また積雪地域では融雪によって一層荒廃が進んだことが報告されています。そこで、地震が発生したときの震源地周辺の山地の土壌水分はどのような状態（土壌湿潤）だったのかを調べます。先行降雨指数（antecedent precipitation index: API）は、過去の日降雨量の重み付き総和で計算され、直接土壌水分が測定できない場合の土壌水分の指標として幅広い研究分野に採用されています。積雪地域において寒候期の降水は、固体として地表に一時的に留まります。そこで、融雪量を考慮した先行土湿指数（antecedent soil moisture index: ASI）によって、震源地周辺の山地の土壌湿潤を評価します。



図46. 市野々原地すべり（朝日航洋撮影）（右）、ドゾウ沢土石流（左）（三森ら,2012）

【先行降雨指数と先行土湿指数】

先行降雨指数（antecedent precipitation index: API）は、直接土壌水分が測定できない場合の土壌水分の指標として幅広い研究分野に採用されており、過去の日降雨量の重み付き総和で計算します：

$$API_n = \sum_{i=1}^n P_i / i$$

ここで、 i は対象とする日からさかのぼった日数、 P_i は対象とする日から*i*日前の日降水量（mm）、 n はさかのぼる日数です。

積雪地域において寒候期の降水は、雪として地表に積もります。そのため、この期間の土壌の水分状態を評価するためには、積もった雪が溶けて地表から浸透する融雪量を考慮する必要があります。そこで、ここでは融雪量を考慮した先行土湿指数（antecedent soil moisture index: ASI）

を次式で計算します：

$$ASI_n = \sum_{i=1}^n (M_i + P_i) / i$$

ここで、 M_i は対象とする日から i 日前の日融雪量 (mm) です。日融雪量は、日平均気温データから改良型ディグリー・デー法 (河島・和泉 2008) で計算しました。 P の値について雪と判断された場合は 0 とし、雨と判断された降水はその日の内に地表へ浸透すると仮定しました。積雪期間全体で考えると、観測された降水量の総和は、雨と判断された降水量と雪と判断されて気温から計算された融雪量の総和と等しくなるはずですが、実際に算出された値と観測値の間には差が生じることから、この差を計算された日融雪量に応じて比例配分して補正を行いました。

【震源地近傍の AMeDAS 祭時における先行土湿指数の季節変化】

本研究では $n = 30$ とし、震源地近傍の AMeDAS 祭時 (標高：320 m) の 27 年間の気象データを利用して、 ASI_{30} を計算します (図 47)。月別 ASI_{30} の平均値は、厳冬期の 2 月に最も小さい値 (6.9 mm) を示し、最も高い値は 4 月 (34.9 mm) で、次いで 9 月 (34.5 mm) と 7 月 (31.9 mm) の順となります。これは、融雪期である 4 月と梅雨前線が北上する 7 月および秋雨前線が活発になりやすい 9 月の降雨によって ASI_{30} が大きくなるためと考えられます。また、100 mm を超える ASI_{30} は、2 月を除く各月で得られ、8 月 (26 回) に一番頻度高く記録しました。さらに 200 mm を超える ASI_{30} は、8 月 (3 回)、9 月 (2 回) および 10 月 (1 回) に記録しました。地震発生日の ASI_{30} は、20 mm 以下と小さく、融雪期や豪雨直後の湿潤な状態でなかったことが災害時の被害の低減につながったと考えられます。さらに、その後 6 月下旬まで乾燥した状態が継続します (図 47)。乾燥状態が継続したことは、復旧作業を進めるために好都合な気象条件だったと考えられます。

【高山地帯の先行土湿指数の変動】

この地震で崩土が長距離移動した土石流はドゾウ沢のみです (三森ら 2010)。2007-2008 年における高山地帯 (標高 1300 m) の ASI_{30} は 3.5 ~ 295.6 mm (60.5 ± 71.4 mm) と推定され、祭時 (標高：320 m) の ASI_{30} (3.1 ~ 136.4 mm ; 19.6 ± 18.3 mm) と比較して高い値を示します (図 48)。高山地帯では融雪期において、継続的に 50 mm を超える降雨が融雪水に加算され ASI_{30} が高くなっています。地震発生日の高山地帯の ASI_{30} は 195.6 mm で、祭時の ASI_{30} (18.0 mm) と比較して非常に湿潤な状態でした。アメダスメッシュ化データを利用した解析からも、災害地における 2008 年の積雪水量は 2007 年よりも多く、特に標高 1000 m 以上の高標高地域において顕著でした (安田ら 2012)。

気象庁は、全国のアメダス 1,316 か所 (約 17 km 間隔) で降水量を観測しています。このうち、946 か所ではさらに気温も観測しています (気象庁 2026)。先行降雨指数 (API)・先行土湿指数 (ASI) は、アメダスによる観測データで計算できるため、観測地周辺の土壌の水分状態を知るための有益な指標となります。

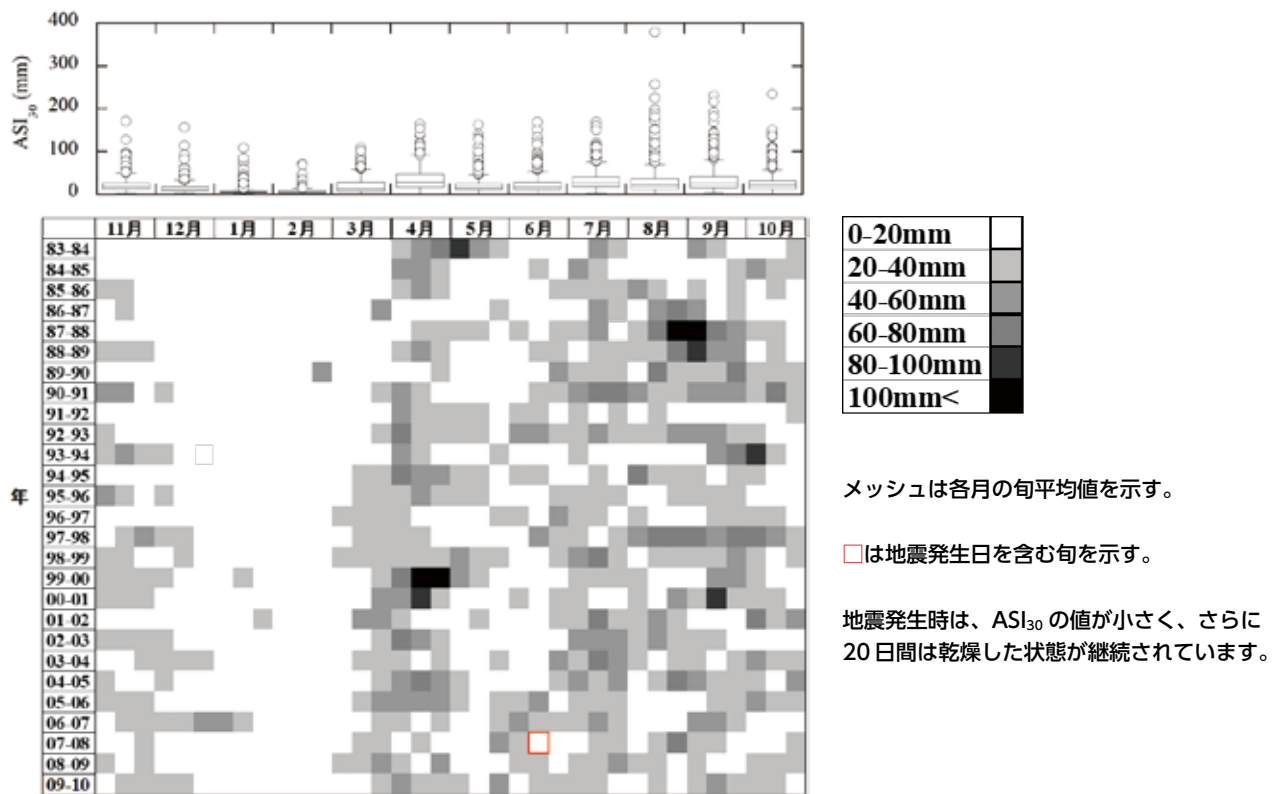


図 47. 祭時における 27 年間 (1983 年 11 月～ 2010 年 10 月) の ASI₃₀ の変化 (野口ら (2012) を一部改変)

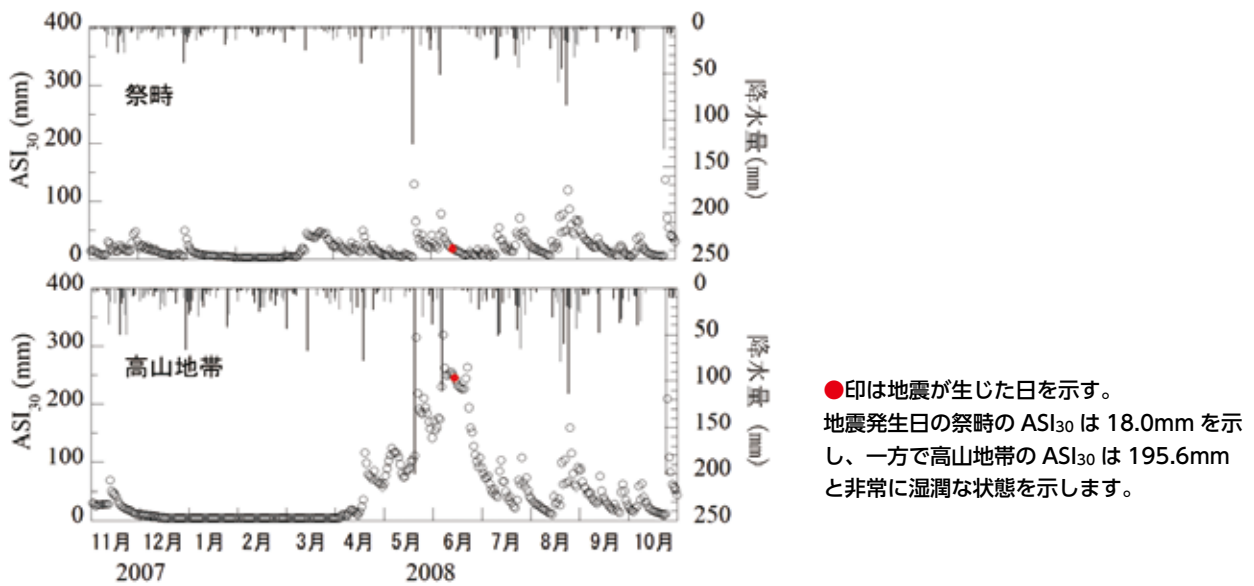


図 48. 祭時 (標高: 320m) と高山地帯 (標高: 1300m) の日降水量と先行土湿指数 (ASI₃₀) の変化 (野口ら (2012) を一部改変)

4-3 海岸林の再生に向けた地下水位変動の重要性

2011年（平成23年）3月11日に日本の三陸沖の太平洋を震源として、日本の観測史上最大規模のマグニチュード9.0（最大震度7）の地震（東北地方太平洋沖地震）が発生しました。この超巨大地震は太平洋沿岸に甚大な津波被害をもたらし、海岸林は倒伏、幹折れ、根返りなどの壊滅的な被害を受けました（田村 2012, 坂本 2012）。津波災害に強い新しい海岸林を造成するには、樹木の根系が土壌深くまで健全に発達する必要があると、それには、地下水からある程度高い地盤を確保することが望ましいと提言されています。このように海岸林の再生のため、地下水位の変化の情報は重要ですが、その実態は明らかではありませんでした。そこで、津波による被害が甚大であった宮城県仙台市宮城野区の海岸林で、マツの被害状況を調べるとともに、地下水位の変化を詳細に観測しました。

【被害を免れたマツ林と被害が顕著なマツ林の立地環境比較】

貞山堀の堤防は地盤高が3 m程度と高く、この堤防上に生育するマツは（図49上左）、根系が土壌深くまで発達していたため（図49上右）、津波の被害を免れました。一方、貞山堀より内陸側では地盤高が1 m程度と低く湿地になっており、ここに生育していたマツは、津波によって根返り被害を受けました（図49下左）。そのような場所の地下水位は高く、根系が十分に発達していません（図49下右）。また、過湿であるため班鉄層が形成されていました（図49下中央）。これまでの知見と同様に、マツの根系の発達は、地下水位が高いと悪く、地下水位の深さに依存することが確認できます。

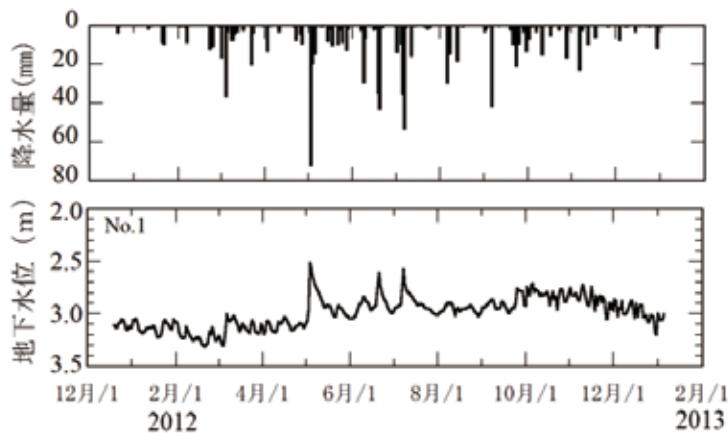


図 49. 宮城県仙台市宮城野区の海岸林と土壌断面（野口ら（2014）を一部改変）

被害を免れた貞山堀近くのマツ林（上左）と土壌断面の様子（上右）および根返りによる被害を受けたマツ林（下左）、過湿による班鉄層（○印）（下中央）、土壌断面の様子（下右）。

【海岸林における地下水位の変動】

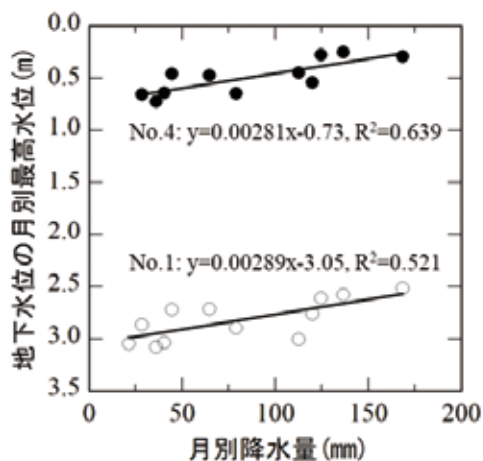
海岸林における地下水位の観測によると、地下水位は降水量に応答しており、降水量が少ない冬期に低く、7月から10月の降水量が多い夏期に高い季節変化を示します（図50）。



地下水位は、地上高を 0m として地上から地下水面までの距離として、値が小さくなると水位が高くなることを示す。

図 50. AMeDAS 名取の日降水量と海岸林の地下水位 (No.1) の変化 (野口ら (2014) を一部改変)

毎月の降水量と地下水位の最大値には、高い相関関係があります（図51）。この関係を使って、過去10年間の月別最高地下水位を推定した結果、マツの根返りの被害があった地点では、地下水位は地面の高さより $-0.30 \sim 0.73$ m（平均値：0.46 m）となり、地下水位が高いため根系の発達に障害が生じる立地環境となっていました。盛土などを行って、根系の成長に必要な立地環境を確保する必要があります。津波の被害を免れたマツが存在する貞山堀の堤防での地下水位は、 $1.99 \sim 3.05$ m（平均値：2.77 m）と推定され、根系が十分に発達できる立地環境です。



地下水位は、地上高を 0 m として地上から地下水面までの距離として、値が小さくなると水位が高くなることを示す。

No.1 は被害を免れた貞山堀近くのマツ林での地下水位で、No.4 は被害を受けたマツ林での地下水位を示す。

図 51. 月別降水量と地下水位の月別最高水位の関係 (野口ら (2014) を一部改変)

地下水位の観測から、降水量から過去に溯って地下水位の季節変動を推測できることがわかりました。この関係を使えば、地面の掘削や通年の観測を行わなくとも、根系の発達可能な深度が推測でき、健全な根系の発達に必要な盛土の高さが計算できます。この成果は、津波に強い海岸林を造成することに役立つと期待されます。

1 章 森林流域試験による水源涵養機能の評価

1-1 森林流域試験

- 阿部俊夫・久保田多余子・小川泰浩・延廣竜彦・野口享太郎（2023）釜淵森林理水試験地における作業道開設と小面積間伐が月流出量に及ぼす影響. 日本森林学会誌, 105 (11), 338-343.
- 金子智紀・武田響一・野口正二・大原偉樹・藤枝基久（2010）積雪地帯の近接したスギ人工林3小流域における流出特性の比較. 日本森林学会誌, 92 (4), 208-216.
- 金子智紀・岩谷綾子・和田 覚・野口正二（2011）秋田県長坂試験地における水文観測－間伐が水流出に及ぼす影響の解明を目指して－. 砂防学会誌, 64 (2), 65-68.
- 久保田多余子・野口正二・阿部俊夫（2013）森林総合研究所釜淵森林理水試験地. 砂防学会誌, 66 (4), 56-59.
- 中野秀章（1985）森林と水－流出の平準化と総量と－. 水利科学, 29 (1), 1-34.
- 野口正二・藤枝基久（2007）森林流域試験と今後のあり方. 森林総合研究所研究報告, 6 (2), 111-125.
- 森林総合研究所（2025）森林と水の謎を解くQ 4-1 森林からの水の流出はどのようにして調べますか（水の流出）. <https://www.ffpri.go.jp/qa/moritomizu/documents/q4-1.pdf> (2025/12/20 参照)
- 森林総合研究所（2026）森林理水試験地データベース（FWDB）. 釜淵森林理水試験地. <https://www2.ffpri.go.jp/labs/fwdb/sites/kamabuchi.htm> (2026/1/18/ 参照)

1-2 春季の融雪流出に対する皆伐とその後の植生回復の影響

- 阿部俊夫・久保田多余子・野口正二・細田育広（2025）山地森林流域からの融雪流出と伐採の影響－釜淵森林理水試験地の長期観測から明らかとなったこと－. 水利科学, 68 (6), 93-114.
- 阿部俊夫・久保田多余子・野口正二・細田育広（2023）釜淵森林理水試験地における皆伐とその後の植生回復が融雪流出に及ぼす影響. 日本森林学会誌, 105 (1), 1-10.
- 川口利次・小野茂夫（1983）雪崩地への階段造成及び天然更新の経過－釜淵森林理水試験地2号沢の例－. 日本林学会東北支部会誌, 35, 230-231.
- 中井裕一郎（1996）森林における降雪の樹冠遮断蒸発量に関する実証的研究. 京大博士論文, 107pp.
- 中野秀章・菊谷昭雄（1956）森林伐採と融雪. 日本林学会誌, 38 (8), 314-316.
- 志水俊夫・吉野昭一（1996）等高線にそった帯状伐採が融雪流出に及ぼす影響. 雪氷, 58 (1), 3-10.
- 細田育広・村上 亘（2007）釜淵森林理水試験地観測報告－3・4号沢試験流域－（1961年1月～2000年12月）. 森林総合研究所研究報告, 404, 163-213.

1-3 森林伐採が冬季～春季の水流出量に与える影響

- 阿部俊夫・久保田多余子・野口正二・細田育広（2025）山地森林流域からの融雪流出と伐採の影響－釜淵森林理水試験地の長期観測から明らかとなったこと－. 水利科学, 68 (6), 93-114.
- 阿部俊夫・久保田多余子・野口正二・細田育広（2026）皆伐・植栽から50年以上経過した釜淵森林理水試験地における旬流出量の変化. 関東森林研究, 77, 印刷中

- 石井吉之 (2012) 降雨と融雪が重なって生じる融雪出水. 日本水文科学会誌, 42 (3), 101-107.
- 伊藤晶子・笹賀一郎 (1993) 土地利用と保全事業の歴史的経過と今後の方向性－北海道北部・間寒別川流域の事例から－. 水利科学, 37 (2), 64-81.
- 志水俊夫 (1990) 森林伐採が融雪流出に及ぼす影響. 雪水, 52 (1), 29-34.

1-4 温暖少雪年における森林流域からの水流出特性

- 阿部俊夫・久保田多余子・野口正二・細田育広 (2026) 皆伐・植栽から 50 年以上経過した釜淵森林理水試験地における旬流出量の変化. 関東森林研究, 77, 印刷中
- 気象庁 (2020) 2020 年冬の天候の特徴とその要因について～異常気象分析検討会の分析結果の概要～. <https://www.jma.go.jp/jma/press/2004/14b/kentoukai20200414.pdf>. (2022.8.29 参照)
- 田村浩喜・野口正二・阿部俊夫・飯田真一 (2024) 希有な温暖少雪年を含む 3 寒候期のスギ人工林小流域からの流出特性. 日本水文科学会誌, 54, 13-23.
- 中野秀章 (1971) 森林伐採および伐跡地の植被変化が流出に及ぼす影響. 林試研究報告, 240, 1-251.
- Shimizu T., Tsuboyama Y., Hosoda I. (1994) Effects of contour-line strip-cutting on streamflow (I) Long-term runoff characteristics during the warm season. Journal of the Japanese Forestry Society, 76 (5), 393-401.

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

- 飯田真一・野口正二・清水貴範・金子智紀 (2017) 東北地方に生育するスギの胸高直径と辺材面積ならびに樹皮幅の関係. 日本水文科学会誌, 47 (1), 3-9.
- Iida S., Levia D. F., Shimizu A., Shimizu T., Tamai K., Nobuhiro T., Kabeya N., Noguchi S., Sawano S., Araki M. (2017) Intrastorm scale rainfall interception dynamics in a mature coniferous forest stand. Journal of Hydrology, 548, 770-783.
- 飯田真一・玉井幸治・野口正二・小林政広 (2019) 森林における水文過程の解明: プロットから流域スケールの手法による知見と今後の展望. 日本水文科学会誌, 49 (3), 135-159.
- 鶴田健二・小松 光・篠原慶規・久米朋宣・市橋隆自・大槻恭一 (2011) 樹液流計測に基づいたスギとヒノキの林分蒸散量算定のための辺材面積推定式. 水文・水資源学会誌, 24 (5), 261-270.

2-2 間伐がスギ林の蒸発散量に及ぼす影響

- Iida S., Noguchi S., Levia D.F., Araki M., Nitta K., Wada S., Narita Y., Tamura H., Abe T., Kaneko T. (2024) Effects of forest thinning on sap flow dynamics and transpiration in a Japanese cedar forest. Science of the Total Environment, 912, 169060.
- 飯田真一・荒木誠・阿部俊夫・野口正二・Delphis F. Levia・新田響平・和田 覚・田村浩喜・成田義人・金子智紀 (2024) 森林の間伐が水循環に与える影響の評価に向けて: スギ林の樹液流速測定から分かったこと. 日本水文科学会誌, 54, 79-83.

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

Hosoda, K. and Iehara, T. (2010) Aboveground biomass equations for individual trees of *Cryptomeria japonica*, *Chamaecyparis obtusa* and *Larix kaempferi* in Japan. *Journal of Forest Research*, 15, 299-306.

岩谷綾子・金子智紀・和田 覚・野口正二 (2013) スギ人工林における間伐が樹冠通過雨量に及ぼす影響－秋田県長坂試験地における無積雪期間の事例－. *東北森林科学会誌*, 18 (2), 38-42.

岩谷綾子・野口正二・金子智紀・澤野真治 (2015) スギ針葉における雨水遮断損失量に関する予備実験. *水文・水資源学会誌*, 28 (6), 291-297.

岩手県 (2023) 岩手県森林作業道作設指針. 岩手県, 9pp.

Noguchi S., Kaneko T., Iwaya A., Iida S., Tamura H. (2022) Estimates of interception losses associated with Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) foliage of logging residues in two thinned watersheds. *Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences*, 52 (3), 93-105.

玉井幸治・服部重昭 (1994) 落葉広葉樹林における林床面蒸発のモデル化と流域への適用. *日本林学会誌*, 76 (3), 233-241.

林野庁 (2025) 令和6年度森林及び林業の動向. 林野庁, 244pp.

森林総合研究所 (2012) 森林作業道開設の手引き－土砂を流出させない道づくり－. 森林総合研究所 第3期中期計画成果2 森林機能発揮－1 19p.

2-4 スギ林における間伐による林床面蒸発量の変化

玉井幸治・吉藤奈津子・飯田真一・勝島隆史・荒木 誠・金子智紀・野口正二 (2020) 秋田県大館市のスギ林における間伐による林床面蒸発量のモデルによる変動評価. *関東森林研究*, 71-1, 141-144.

2-5 作業道における表面流の発生と植生回復

野口正二・金子智紀・北田正憲・鈴木秀典 (2014) 開設された作業道における表面流の発生－現地踏査と植生調査の解析－. *日本森林学会誌*, 96 (6), 342-347.

大政康史・野口正二・岡田康彦・飯田真一 (2018) 森林資源循環利用の推進に向けた森林整備の取り組み. *水文・水資源学会誌*, 31 (5), 414-427.

森林総合研究所 (2012) 森林作業道開設の手引き－土砂を流出させない道づくり－. 森林総合研究所 第3期中期計画成果2 森林機能発揮－1 19p.

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

和田 覚・金子智紀 (2012a) V 土壌保全機能の維持向上と評価 2. 落葉広葉樹の定着と土壌保全機能. 広葉樹林化ハンドブック 2012－人工林を広葉樹林へと誘導するために－「広葉樹林化」研究プロジェクトチーム. pp.30-31.

和田 覚・金子智紀 (2012b) V 土壌保全機能の維持向上と評価 3. 伐採の影響 (スギ林). 広葉樹林化ハンドブック 2012－人工林を広葉樹林へと誘導するために－「広葉樹林化」研究プロジェクトチーム. pp.32-33.

3章 積雪特性の観測と森林管理への応用

3-1 積雪深の観測と少雪化の長期変動傾向

- 阿部俊夫・久保田多余子・野口正二（2016）東北地方の多雪地帯における 2013 / 2014 年冬季の落葉広葉樹林、スギ林の降雪遮断特性および融雪特性. 東北森林科学会誌, 21 (1), 6-10.
- 気象庁（2025）過去の気象データ. <https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/>（2025/12/25 参照）
- 小島忠三郎（1966）森林の雪害と雪の気候. 森林立地, 7 (2), 11-24.
- 野口正二・阿部 修・小杉健二・根本柁樹・望月重人・佐藤 威（2010）新庄における日積雪深の長期変動. 雪氷研究大会講演要旨集 雪氷研究大会（2010・仙台）, 158.
- 野口正二（2011）インターバルカメラを使用した林内の積雪深の観測. 東北の雪と生活, 26, 67-68.
- 野口正二・金子智紀・和田 覚・石川具視（2010）スギ林における間伐区と無間伐区の積雪深の比較. 水文・水資源学会誌, 23 (4), 339-346.
- 高橋喜平（1968）最深積雪指示計について. 雪氷, 30 (4), 111-114.
- 新庄市（2025）雪の里情報館. <https://www.city.shinjo.yamagata.jp/li/030/020/050/index.html>（2025/12/25 参照）

3-2 スギ林・落葉広葉樹林における積雪深の比較

- 阿部俊夫・久保田多余子・野口正二（2016）東北地方の多雪地帯における 2013 / 2014 年冬季の落葉広葉樹林、スギ林の降雪遮断特性および融雪特性. 東北森林科学会誌, 21 (1), 6-10.
- 阿部俊夫（2016）雪融け水はどっちが多い？ - 落葉広葉樹林とスギ林との比較 - . 岩手の林業, 702, 6-7.
- 野口正二（2011）森林内の積雪深を左右する要因. みどりの東北, 88, 4.
- 野口正二（2015）特集 森林と水循環 森林に積もる雪と溶ける雪を探る. 季刊森林総研, 30, 4-5.
- 野口正二・金子智紀・和田 覚・石川具視（2010）スギ林における間伐区と無間伐区の積雪深の比較. 水文・水資源学会誌, 23 (4), 339-346.

3-3 スギ林・落葉広葉樹林における冬期の樹冠通過降水量の比較

- 阿部俊夫・久保田多余子・野口正二（2016）東北地方の多雪地帯における 2013 / 2014 年冬季の落葉広葉樹林、スギ林の降雪遮断特性および融雪特性. 東北森林科学会誌, 21 (1), 6-10.
- 金子智紀・野口正二・和田 覚・新田響平・澤野真治（2019）間伐を実施したスギ林における冬期樹冠通過降水量の評価. 水文・水資源学会誌, 32 (3), 138-147.
- 文部科学省・気象庁（2025）日本の気候変動 2025. 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書. 86pp.
- 野口正二・阿部俊夫（2024）「雪の研究」シリーズ 気候変動と積雪期の樹冠通過降水量. 水利科学, 396, 102-119.
- 野口正二・西園朋広（2010）積雪期の常緑針葉樹林と落葉広葉樹林における樹冠通過降水量の比較. 日本森林学会誌, 92 (1), 29-34.
- 林野庁（2025）令和 6 年度森林及び林業の動向. 林野庁, 244pp.

4章 その他（災害関連）

4-1 積雪期間の短縮により予測される林野火災発生危険日数の増加

気象庁（2025）過去の気象データ. <https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/>（2025/12/25 参照）

農林水産省（2025）岩手県大船渡市の林野火災に起因する農林水産関係の被害状況（第31報）.
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/hogo/yamakaji/attach/pdf/iwateoofunato-45.pdf>（2025/12/25 参照）

玉井幸治・後藤義明（2020）積雪期間の短縮により予測される林野火災発生危険日数の増加. 水利科学, 64 (5), 19-31.

4-2 岩手・宮城内陸地震災害地における土壌の水分状態の特徴

河島克久・和泉薫（2008）改良型でディグリー・デー法による日融雪量推定の精度検証. 新潟大学災害復興科学センター年報, No. 2, 119-124.

気象庁（2026）地域気象観測所一覧（適用日：2026年3月24日）. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/kaisetsu.html>（2026/3/24 参照）

野口正二・三森利昭・多田泰之・安田幸生（2010）2008年岩手・宮城内陸地震前後における災害地周辺の先行土湿. 砂防学会誌, 63 (1), 39-43.

野口正二・安田幸生・多田泰之・三森利昭（2012）2008年岩手・宮城内陸地震災害地周辺の先行土湿の季節変動. 森林総合研究所研究報告, 424, 151-160.

林野庁東北森林管理局（2009）山地災害の記録 平成20年岩手・宮城内陸地震. 30pp.

三森利昭・大丸裕武・黒川潮・岡本隆・村上亘・多田泰之・岡田康彦・野口正二・安田幸生・浅野志穂・大野泰宏（2010）シリーズ「近年の土砂災害」2008年岩手・宮城内陸地震による土砂災害. 水利科学, 54 (3), 105-127.

三森利昭・多田泰之・村上亘・大丸裕武・安田幸生・野口正二（2012）平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震による土砂災害の概要とその特徴. 森林総合研究所研究報告, 11 (3), 97-120.

安田幸生・野口正二・三森利昭（2012）岩手・宮城内陸地震災害地における2008年の気象と山地積雪水量分布の特徴. 森林総合研究所研究報告, 11 (3), 135-150.

4-3 海岸林の再生に向けた地下水位変動の重要性

野口正二・新山馨・田村浩喜・田中三郎・久保田多余子・安田幸生（2014）宮城県宮城野区海岸林における地下水位の変動. 日本森林学会誌, 96 (3), 150-154.

田村浩喜（2012）仙台平野の海岸林における根返り被害. 森林科学, 66, 3-6.

坂本知己（2012）津波によって被災した海外林の再生にむけて. 水利科学, 56 (3), 39-61.

執筆者一覧 (50音順)・担当トピック

阿部 俊夫 (森林総合研究所 森林防災研究領域) ……	1-1, 1-2, 1-3, 3-3
飯田 真一 (森林総合研究所 北海道支所) ……	1-1, 2-1, 2-2, 2-3
金子 智紀 (秋田県林業労働対策基金) ……	2-6
玉井 幸治 (森林総合研究所 森林防災研究領域) ……	2-4, 4-1
田村 浩喜 (秋田県林業研究研修センター) ……	1-1, 1-4, 4-3
野口 正二 (森林総合研究所 東北支所) ……	1-1, 1-4, 2-3, 2-5, 3-1, 3-2, 3-3, 4-2, 4-3
和田 覚 (秋田県林業研究研修センター) ……	2-5, 2-6

本冊子に関するお問い合わせは、下記までお願い致します。

国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所 東北支所

〒020-0123 岩手県盛岡市下厨川字鍋屋敷 92-25

編集・発行 国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所 東北支所

編集責任者 野口正二・飯田真一・阿部俊夫

発行日 2026（令和8）年3月31日

お問い合わせ先 広報普及科編集刊行係

電話 029-829-8373

E-mail: kanko@fpri.go.jp

本書の引用記載 森林総合研究所 東北支所（2026）積雪地域の森林流域における水土保全機能—現地観測と調査データに基づく森林管理に向けて— 国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所 東北支所，45pp.

※掲載記事及び写真の無断転載を禁じます。



この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。



古紙パルプ配合率60%再生紙を使用

