

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 **オレンジ点線枠**）。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。

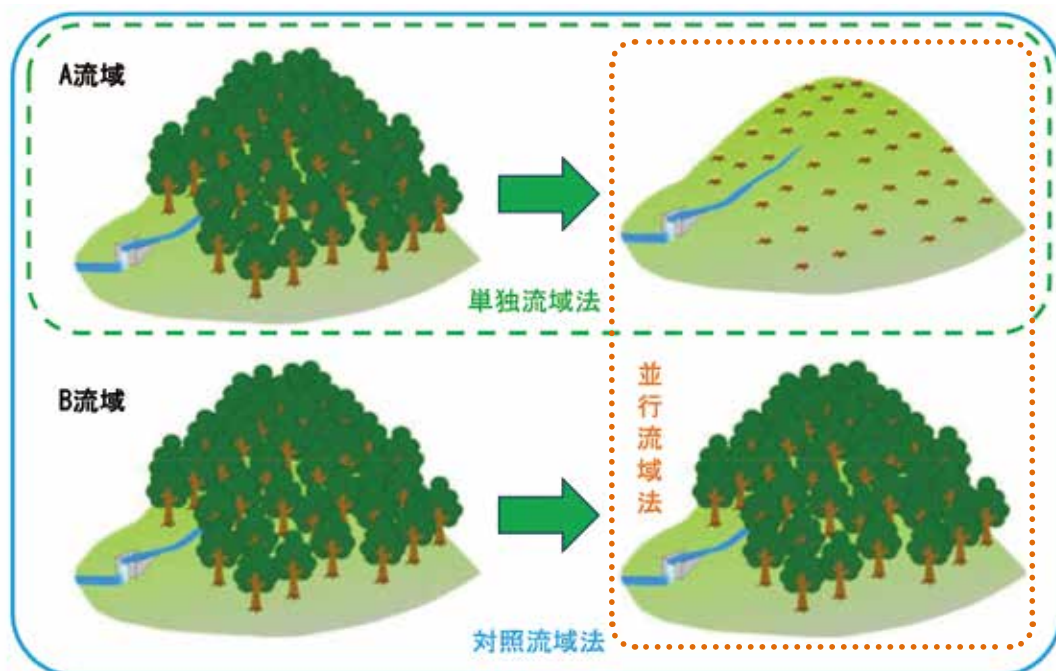


図1. 森林流域試験（森林総合研究所（2025）を一部改変）

【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)。

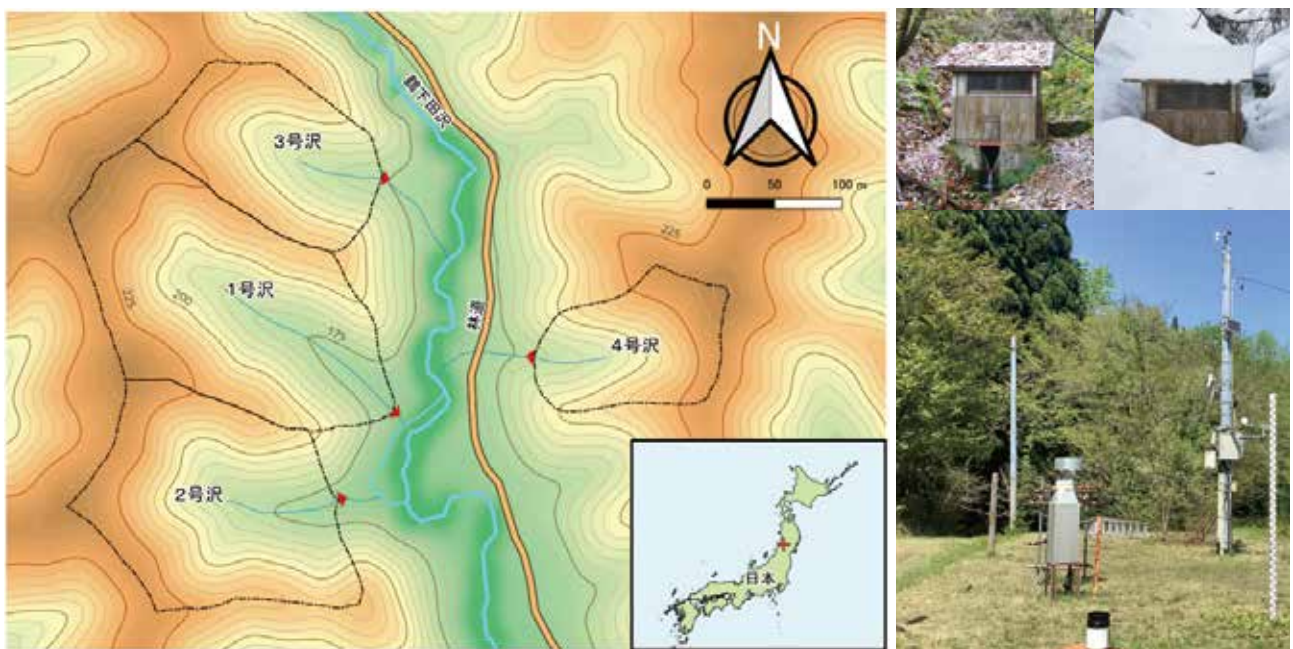


図2. 釜淵森林理水試験地の地形・位置(左)、2号沢量水堰堤と観測小屋(春季・冬季:右上)、山形実験林・気象露場(右下)

【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）。

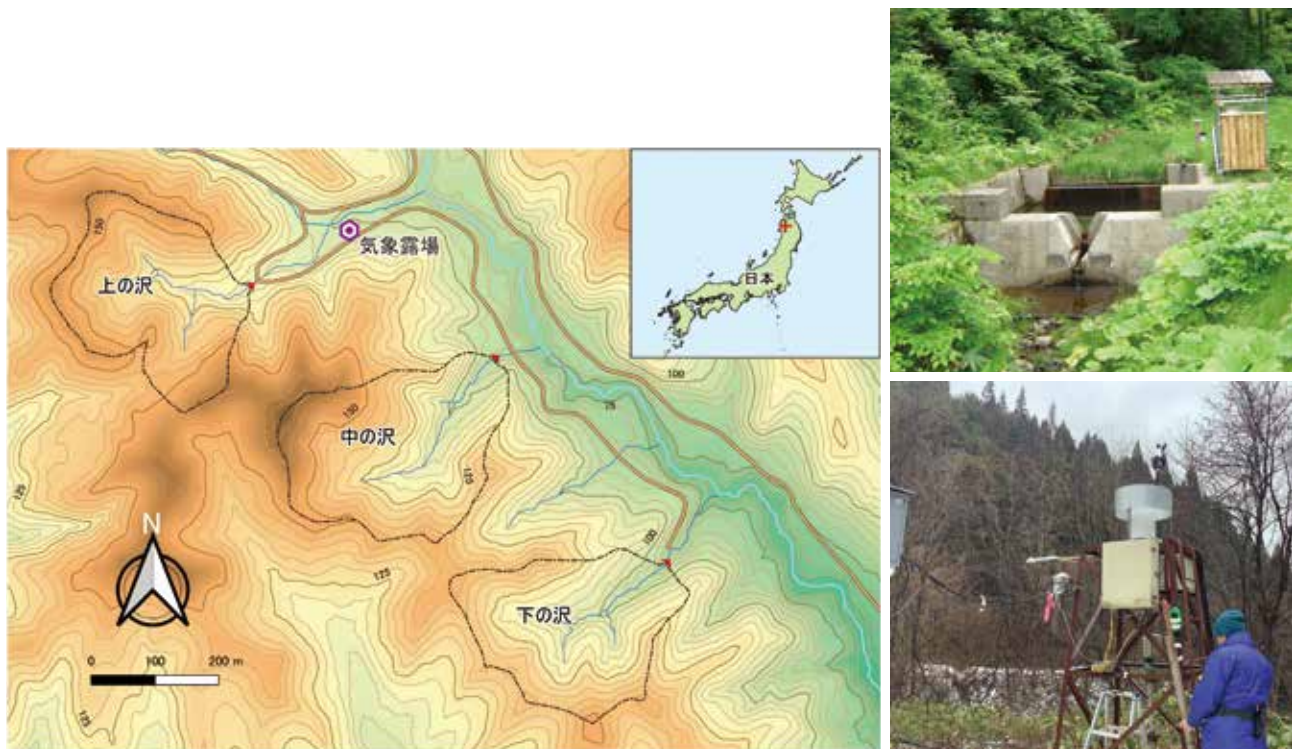


図3. 長坂試験地の地形・位置（左）、上の沢の量水堰堤（右上）、気象露場（右下）

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）。

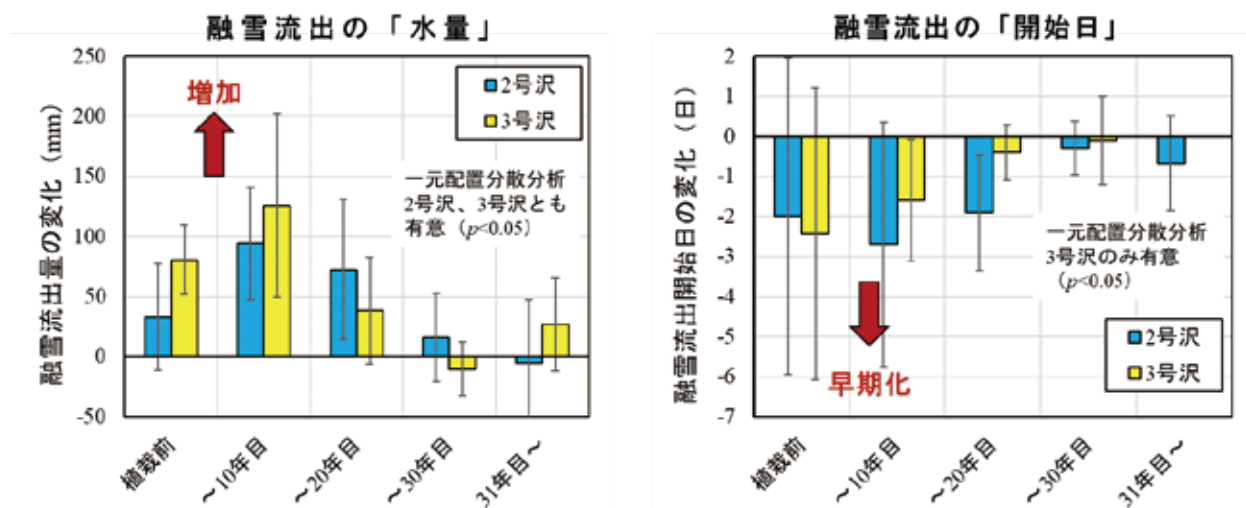


図5. 皆伐後の融雪流出量および開始日の年代による変化
(本図は CC ライセンス (CC BY-NCND4.0) に基づき阿部ら (2023) より改変)

【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)。

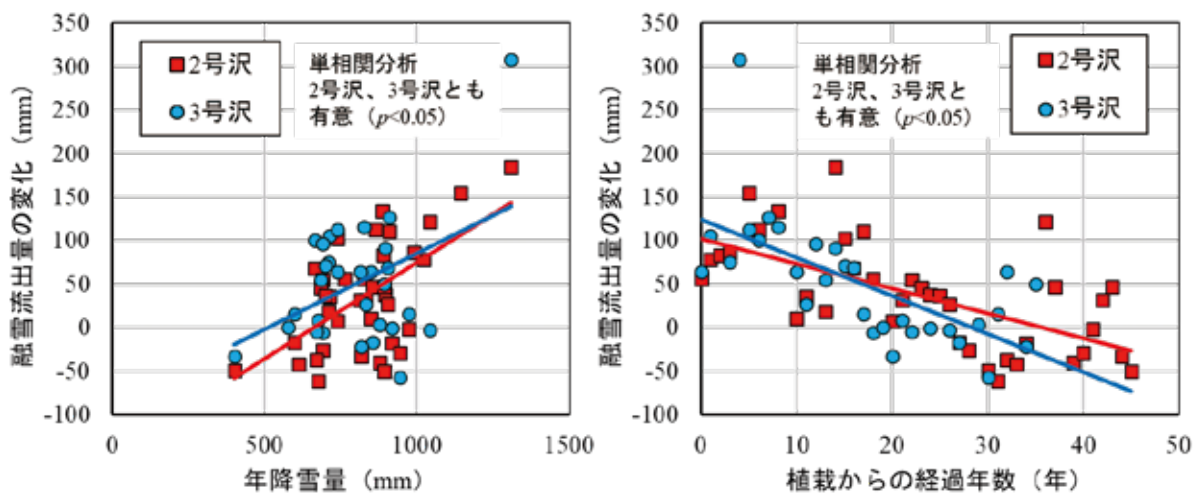


図6. 融雪流出量と年降雪量、植栽からの経過年数との関係
(本図は CC ライセンス (CC BY-NCND4.0) に基づき阿部ら (2023) より改変)

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。

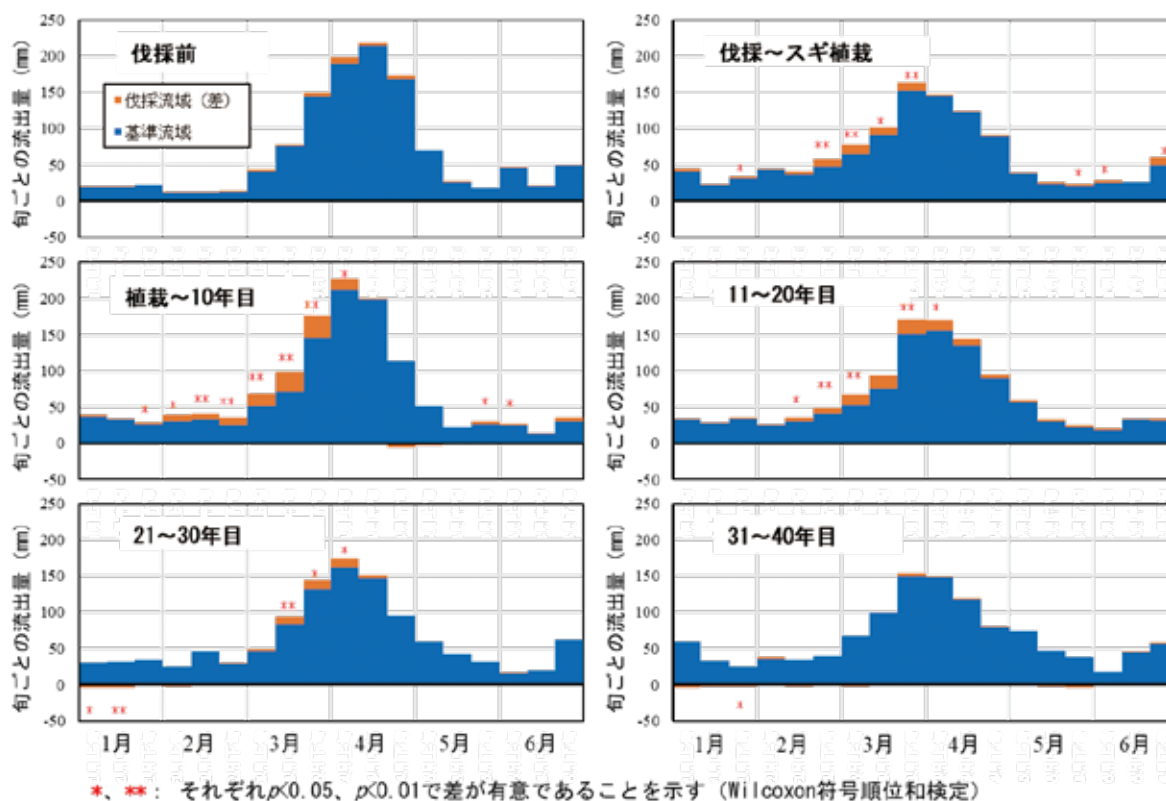


図7. 各年代における伐採流域（2号沢）と基準流域（1号沢）の旬流出量の違い（データは阿部ら（2026）に基づく）

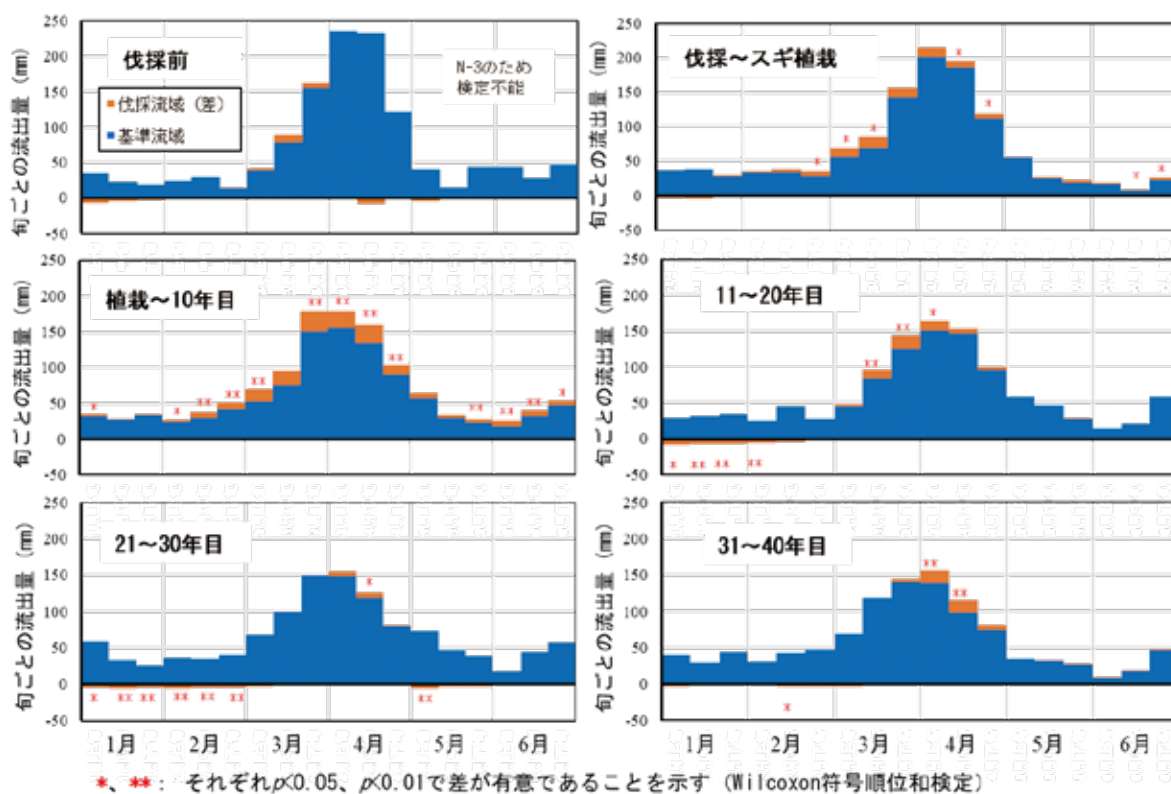


図 8. 各年代における伐採流域 (3号沢) と基準流域 (1号沢) の旬流出量の違い (データは阿部ら (2026) に基づく)

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）。

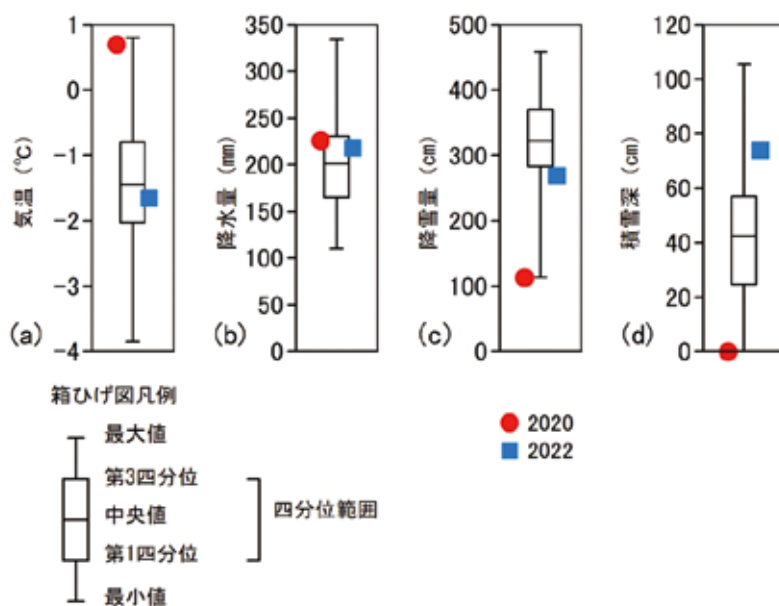


図9. AMeDAS鷹巣における2020、2022年と過去43年間（1980～2022年）の冬季気象状況の比較（田村ら（2024）を一部改変）

【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）。

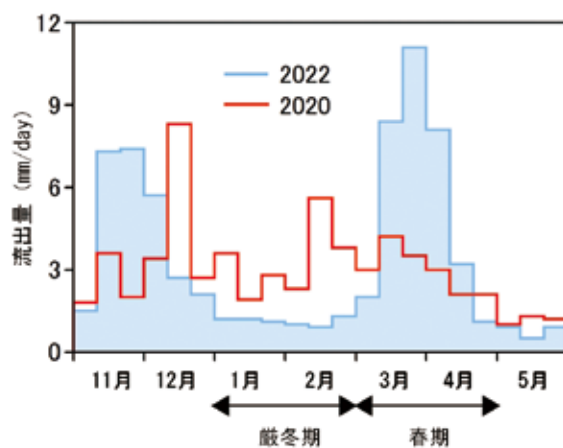


図 10. 寒候期における旬別流出量（田村ら（2024）を一部改変）

【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）。

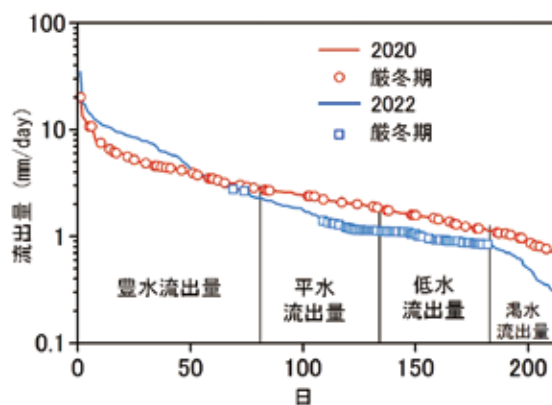


図 11. 寒候期における流況（田村ら（2024）を一部改変）

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。