

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

阿部 俊夫^{*1}・久保田多余子²・野口正二³・細田育広⁴

森林の皆伐とその後の植生等による植生回復が融雪流出に及ぼす影響について明らかにするため、対照流域法による試験が行われた東北地方の釜淵森林理水試験地を対象に、1939～2005年の日水文量のほか、気温や積雪深などの長期データを利用して統計学的分析を行った。伐採流域（2・3号沢）の融雪流出量は、先行研究と同様に、皆伐後に増加する傾向が認められたが、時間経過とともに影響は小さくなった。伐採前と同程度に戻るのには植栽から30年程度かかっていた。また、伐採前を基準とした融雪流出量の差は、年降雪量が多く、春季平均気温の高い水年ほど大きい傾向が認められ、これらは森林の有無による降雪遮断量や蒸発散量の違いが原因と考えられた。皆伐後、融雪流出期間の開始日は早まる傾向であったが、終了日は同程度かやや遅くなった。このように、融雪流出量や融雪流出期間に限れば、皆伐は春季の水資源量を増やすと考えられるが、一方で融雪洪水リスクが高まる恐れも予想される。さらに、2号沢については施業等の履歴が特殊であり、結果の普遍性についても慎重に判断する必要がある。

キーワード：融雪流出、皆伐、降雪量、対照流域法、釜淵森林理水試験地

Toshio Abe,^{*1} Tayoko Kubota,² Shoji Noguchi,³ Ikuhiro Hosoda⁴ (2023) Effects of Clear-cutting and Forest Regrowth on Snowmelt Runoff in the Kamabuchi Experimental Watershed in Northern Japan. *J Jpn For Soc* 105: 1-10 To elucidate the effects of clear-cutting and following reforestation on snowmelt runoff, we analyzed statistically the daily hydrological observation data from 1939 to 2005, also daily air temperature and daily snow depth in the Kamabuchi experimental watershed, where paired-catchment studies had been conducted, in northern Japan. Our analysis revealed that snowmelt runoff during the snowmelt season of the clear-cut watersheds (No. 2 and 3) tended to increase after clear-cutting and then decreased gradually. The time needed to return to the previous state was about 30 years after planting. Differences in snowmelt runoff compared with the prelogging periods tended to increase as annual snowfall and spring average air temperature increased, probably due to snow interception by the forest canopy in winter and evapotranspiration in spring, respectively. Although snowmelt runoff seasons tended to begin earlier after clear-cutting than the prelogging periods, the ending dates after cutting were almost the same or only slightly late. These results indicate that clear-cutting increases water resource availability in the spring in terms of water quantity and the duration of snowmelt runoff, but it is concerned that clear-cutting cause snowmelt-flood. Furthermore, it is necessary to carefully evaluate the results of No. 2 watershed, because the practice history was unusual.

Key words: snowmelt runoff, clear-cutting, snowfall, paired-catchment studies, Kamabuchi experimental watershed


I. はじめに

わが国の多くの地域では山地森林から流出する溪流が主要な水源であり、多雪地域においては冬季の降雪も重要な水資源となっている。森林は樹冠が降雪や日射を遮断することで積雪量や融雪の早さにも影響している（中井ら 1993；中井 1996；Lundquist *et al.* 2013；阿部ら 2016）。このため、森林伐採により降雪遮断がなくなれば、流域内に貯留される積雪水量が増加し、春季の融雪流出も増えることが予想される。海外ではモデルを用いて皆伐を含む様々な森林攪乱が融雪流出にどう影響するかという予測も行われている（Pomeroy *et al.* 2012）。しかし、わが国において流域スケールで森林伐採が融雪流出に及ぼす影響を検証した研究は少ない。森林総合研究所では日本全国の森林理水試験地において長期にわたる水文観測を行っているが（Shimizu *et al.* 2021）、多雪地域にある釜淵森林理水試験地（山形県）と宝川森林理水試験地（群馬県）では過去に皆伐試験が実施さ

れている。宝川森林理水試験地では、等高線に沿った帯状伐採によって融雪期の流出率増加と融雪流出期間の長期化が認められたが（志水・吉野 1996）、皆伐した場合は、融雪流出期間が短くなったのみで融雪期の流出率に変化は認められなかった（志水 1990）という報告がある。釜淵森林理水試験地では、皆伐により融雪期前半の融雪流出量が増加し、後半の融雪流出量は減少した（中野・菊谷 1956）などの報告がある。

また、現在、地球規模での気候変動が進行しており、本州日本海側のように比較的冬季の気温が高い地域では、将来、春季に水不足となることも懸念されている（井上ら 2001；中村ら 2008）。積雪・融雪環境に対する森林の影響は気候によって異なることから（Lundquist *et al.* 2013；Dickerson-Lange *et al.* 2017）、水資源量への気候変動の影響に適応するうえでも、森林伐採が融雪流出に及ぼす影響を各地域で明らかにしておくことは重要と考えられる。

釜淵森林理水試験地は、東北地方の多雪地域に位置し

*連絡先著者（Corresponding author）E-mail: toshioa@fpri.affrc.go.jp  <https://orcid.org/0000-0003-0946-1746>

¹ 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 (Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, 92-25 Nabeyashiki, Shimo-Kuriyagawa, Morioka 020-0123, Japan)

² 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 (Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan)

³ 国立研究開発法人国際農林水産業研究センター 〒305-8686 茨城県つくば市大わし 1-1 (Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 1-1 Ohwashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8686, Japan)

⁴ 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所関西支所 〒612-0855 京都市伏見区桃山町永井久太郎 68 (Kansai Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, 68 Nagaikyutaro, Momoyama, Fushimi, Kyoto 612-0855, Japan) (2022年4月12日受付；2022年10月19日受理；2023年1月20日発行)

80年以上の歴史を有する長期森林理水試験地であり、皆伐後の期間が半世紀に及ぶなど、融雪流出に対する森林伐採とその後の植生回復の影響を調べるには最適といえる。本試験地では、以前にも森林伐採が融雪流出に与える影響の研究が行われているものの(中野・菊谷 1956; 小野・川口 1975, 1978), 解析に用いられたデータは皆伐後の比較的短い期間に限られ、年による降雪量や気温の変動についても検討されていない。そこで本研究では、釜淵森林理水試験地を対象に、2005年までの長期の日水文データや積雪深、気温などのデータを用いて、森林の皆伐とその後の植生回復が春季の融雪流出に及ぼす影響について統計学的分析を行った。特に、植栽からの時間経過にともなう植生回復や、降雪量・気温などの気象要素がどう影響するかに着目して解析を行った。

II. 研究方法

1. 調査地の概要

釜淵森林理水試験地は、森林総合研究所山形実験林(旧山形試験地: 山形県最上郡真室川町大字釜淵)から北西に約1 km離れた鶴下田沢国有林内(北緯38°56′, 東経140°15′)にあり、4流域で構成されている(J-STAGE電子付録付図-1)。まず1939年に1号沢(3.06 ha)と2号沢(2.48 ha)において対照流域法による試験が開始され、その後、1961年に3号沢(1.54 ha)と4号沢(1.12 ha)が追加された(細田ら 2009)。対照流域の1号沢はブナ(*Fagus crenata*)やコナラ(*Quercus serrata*)などの落葉広葉樹にスギ(*Cryptomeria japonica*)が混生する針広混交林であり、観測開始以来、人為的な伐採は行われていない。2号沢は、1号沢と同様の針広混交林が1947~1948年に皆伐、草地化された後、雪崩が頻発するようになり、1960年に階段工を施工した上でスギが植栽された(農林省林業試験場 1961; 東北支場山形試験地 1980)。ただし、管轄する山形森林管理署最上支署の森林調査簿(2018年5月閲覧)によると、更新年は昭和34年(1964年)となっている。おそらく最初に植栽した苗木が雪崩等の被害に遭い、1964年に再植栽を行ったものと推察される。3号沢と4号沢も針広混交林であったが、観測開始前に樹種を揃える伐採が実施され、

観測開始時点ではそれぞれ順に落葉広葉樹林、スギ林となっていた(高橋ら 1960)。3号沢と4号沢は、1964年に流域面積の半分(3号沢は流路沿い、4号沢は尾根沿い)を、1969年に残り半分の皆伐した後、1970年にスギが植栽された(細田・村上 2007)。図-1に1970年頃に4号沢の尾根から撮影されたと思われる冬季の1~3号沢流域の写真を示す。1~3号沢については、いずれも冬季の季節風の風下側(吹き溜まり側)となる東向き流域であり、流域の標高も大きくは異なっていない。

なお、気候条件については山形実験林の気象露場における1970~2000水年の平均で、年平均気温11.1℃、年降水量2405.6 mm、最大積雪深153 cmである(細田・村上 2006)。平均的な年では、降雪は11月中旬~翌年4月中旬に発生し、根雪となるのは12月上旬~中旬、消雪は3月下旬~4月中旬である。地質は第三紀凝灰岩および頁岩質凝灰岩である(丸山・猪瀬 1952)。

2. 解析対象期間および使用データ

本研究では日流出量と日降水量が整理・公表されている1939~2005年(3号沢は1961年~)を解析期間としたが、4号沢については量水堰の漏水があり(細田・村上 2007)、定量的な解析が難しいため対象から除外した。降水量と流出量については基本的に森林理水試験地データベース(<https://www.2.fpri.go.jp/labs/fwdb/>)で公開されている日単位のデータを用いたが(農林省林業試験場 1961; 東北支場山形試験地 1980; 細田ら 1999; 細田・村上 2006; 細田・村上 2007; 細田ら 2009)、次節で説明する融雪流出期間の判定の際は日単位より時間解像度の高い水位データも利用した。日データを集計する際の日界は、戦前の古いデータを除けば、日界は10時ないし9時であり、1959年以降はすべて10時に統一された(J-STAGE電子付録表-1)。降水量は山形実験林気象露場における観測値を基本としたが、欠測の場合は他の地点(庁舎脇や2号沢手前)に設置された予備雨量計のデータを用いた。なお、気象露場は1979年秋に約100 m南西方向へ移転しているが(細田ら 1999)、新旧露場は距離が近く標高差もないため、移転による観測データへの影響はないものと考えた。日水文データは、中野(1971)にしたがひ、前年11月1日~10月31日を1水年として整理した(例えば

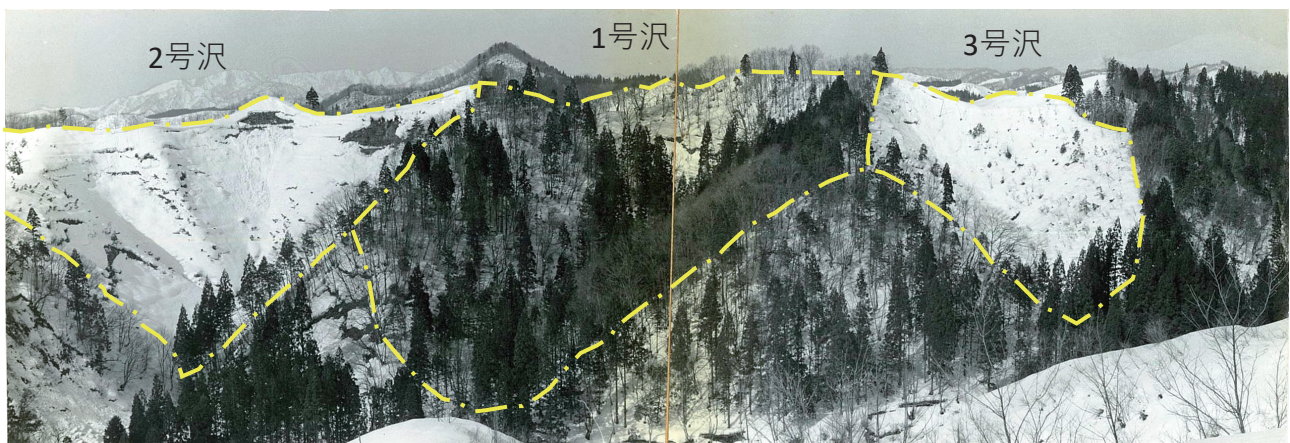


図-1. 1970年頃の冬季の1~3号沢流域の様子

撮影年月日は不明であるが、伐採状況から1970年頃と考えられる。図中の一点鎖線はおおまかな流域界を表している。

1960年11月1日～1961年10月31日を1961水年とする)。

解析には気象露場における積雪深および気温のデータも利用した。時代による計測方法の変遷についてはJ-STAGE電子付録付表-2, 付表-3に記した。1998年3月頃を境にセンサー出力をデジタル記録する方法に切り替わっていったが、これより古い時代は雪尺や最高・最低温度計を職員が毎日定時に計測する方法であった。そのため、解析期間を通じて利用可能なデータは、積雪深では定時計測値、気温では日最高・日最低気温である。各水年の年最大積雪深は、各日の積雪深のなかで最大の値とした。気温については、日最高・最低気温の平均から回帰式を用いて日平均気温を推定した(J-STAGE電子付録付図-2)。日最高・最低気温の平均は、10分間隔データ等から計算した日平均気温より高めであるが、対応は良好であることが知られている(細田ら1992)。なお、戦争のため欠測となった期間(1945年4月～12月, 1946年5月～12月上旬)については、当時の気温データが入手可能な最近傍の観測所である山形測候所(現山形地方気象台)の日最高・最低気温(気象庁2021)を用いて、釜淵の日最高・最低気温の平均を推定した(J-STAGE電子付録付図-2)。

3. 雨雪判別および融雪流出量の推定

例年の降雪状況を考慮して、各水年の11月～4月の日降水量について、日平均気温(推定値)を基準として雨雪判別を行った。判別基準の気温は小川・野上(1994)に記載の東北西部の値を参考とした(4月の値は記載がないが、3月と同じと仮定)。降雪と判別された降水量の合計をその水年の年降雪量とみなした。また3～4月において降雨と判別された降水量の合計も算出した(春季降雨量)。

本試験地において融雪による明瞭な出水は、例年、気温の上昇する2月下旬以降に始まり、年によっては5月まで継続する。融雪流出中は日中に流量が増加し、夜間に流量が減少する特徴的な日周変化を示すが、小野・川口(1975)や志水(1990)、志水・吉野(1996)はこういった流量の日周変化を手掛かりに融雪流出期間を特定しており、本研究も同様の方法を採用した(J-STAGE電子付録付図-3)。融雪流出期間の開始日は、午後(通常は正午～日没)にピークを持つ流量の日周変化が連日生じ始めた最初の日または出水のように明瞭な流量増加が生じた日とし、融雪流出期間の終了日は日周変化が認められた最後の日とした。日周変化の有無については、午後の最大流量/午前最小流量 ≥ 1.1 を目安として判断した。一時的な融雪流出は厳冬期でも起こることはあるが、本研究では春季に利用可能な水資源量に着目する立場から、ほぼ連日、継続的に融雪流出が発生している期間を融雪流出期間と考えた。すなわち、開始日と判定した日以降、融雪流出が認められない日が2日以下であれば融雪流出期間は継続しているとみなし、それより以前の融雪流出は融雪流出期間には含めなかった。なお、融雪末期にまとまった降雨があると、降雨・流出による流量変化に隠れて日周変化が判別できなくなることがあるため、このようなケースは終了日判定を行わず、以降の解析から除外した。

融雪流出量 Q_s に関しては、志水(1990)を参考として

次のように算出した。

$$Q_s = Q - Q_b - P_r \cdot R \quad (1)$$

ここで、 Q は融雪流出期間の総流出量(mm)、 Q_b は融雪流出期間の基底流出量(mm)、 P_r は融雪流出期間の降雨量(mm)、 R は融雪流出期間の流出率である。基底流出量は、融雪流出期間の開始時および終了時の流出量をハイドログラフ上にて直線で結んで求めた。 $P_r \cdot R$ は融雪流出期間の降雨に起因する流出量であり、志水(1990)では $P_r \times 1$ を用いている。しかし、降雨量すべてが流出するとは限らないため、本研究では融雪流出期間の流出率 R を乗じた値を用いた。

融雪流出期間の流出率 R は次式で表される(志水・吉野1996)。

$$R = Q / (P + S) \quad (2)$$

$$\text{ただし、} S = 10 \cdot \rho H / \rho_w \quad (3)$$

ここで、 P は融雪流出期間の降水量(mm)、 S は融雪流出開始直前の積雪水量(mm)、 ρ は全層平均積雪密度(g/cm^3)、 H は融雪流出開始直前の積雪深(cm)、 ρ_w は水の密度(g/cm^3)である。釜淵における雪質調査資料によると、融雪流出開始時期の ρ はおおよそ0.3～0.4の範囲にあり、特に0.35～0.40の値が多い(防災部雪害研究室編1953; 十日町試験地ら1967; 東北支場山形試験地1987a, b)。そこで、本研究では ρ を $0.37 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、 ρ_w を $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ と仮定し、 H には融雪流出期間開始日の前日の積雪深を用いて計算を行った。なお、積雪水量 S や積雪深 H は本来であれば調査流域の値を用いるべきであるが、冬季に急峻な山地でこれらを調査することは困難なため、ここでは気象露場における観測値で代用した。2号沢では、階段工施工後の1961年(多雪年)3月中旬に詳細な積雪調査が行われたことがあるが、流域全体の平均積雪水量は気象露場よりわずかに多い程度であったと報告されている(小野1966; 小野・川口1975)。なお、融雪流出期間の流出率 R は流域や水年により変動するが、平均的には0.9前後であり、小野・川口(1975)の報告とほぼ同じであった。

4. 統計解析

融雪流出量、融雪流出期間の開始日および終了日について、伐採前を基準とした差を求めるため、伐採前の期間における伐採流域(2号沢, 3号沢)と対照流域(1号沢)との関係を調べた(図-2)。伐採前の期間は2号沢では9年間(1939～1947年)、3号沢では3年間(1961～1963年)である。伐採流域(Y)と対照流域(X)の関係はほぼ線形となっており、原則としてノンパラメトリック回帰の一種であるPassing-Bablok法(Passing and Bablok 1983)により関係式を求めた。計算にはR version 4.1.2(R Core Team 2021)および青木(2010)が作成したPassing-Bablok回帰のソースコードを用いた。ただし、3号沢の終了日に関してのみ、回帰係数の推定値が0.20と極端に小さかった。これはデータ数が3と少なく、水年による終了日の違いも小さかったために、信頼できる回帰式が得られなかったもの

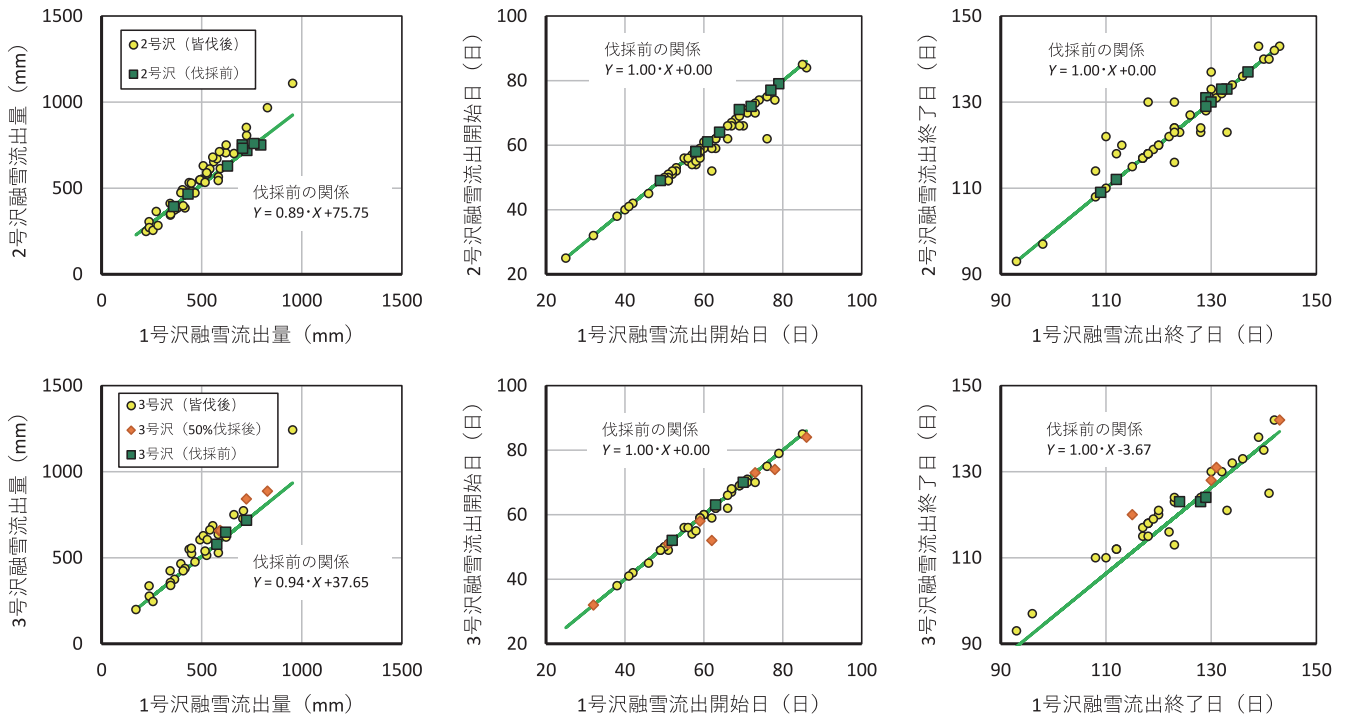


図-2. 対照流域（1号沢）と伐採流域（2・3号沢）の融雪流出量，融雪流出期間の開始日・終了日の関係

開始日，終了日については毎年1月1日を1とする通日で表した。

と考えられる。伐採前の2号沢では回帰式は $Y=1.00 \cdot X + 0.00$ であり，伐採後の3号沢を見てもおおそ同程度の傾きであることから，ここでは回帰係数を1.00と仮定し，最小2乗法でY切片を決定した。

次いで，調査期間を五つの年代に分け，融雪流出および気象要素に関する変量の年代による違いを調べた。年代区分は，2号沢と3号沢それぞれの植栽年を基準として，伐採から植栽前，植栽年～10年目，11年目～20年目，21年目～30年目，31年目以降とした。融雪流出に関する変量（融雪流出量，開始日，終了日）はいずれも伐採前を基準とした差に変換して用いた（伐採がなかった場合の推定値を1号沢の値から回帰式で計算し，皆伐後の値から減じた）。年代による差の調査には一元配置分散分析を用い，差が有意 ($p < 0.05$) な場合には，Tukey HSD 検定による事後比較を行った。

さらに，皆伐後の融雪流出量，融雪流出期間の開始日および終了日に対して影響する要因を調べるため，ステップワイズ重回帰分析を行った。目的変量は前の解析と同様に伐採前を基準とした差に変換した。説明変量としては，年最大積雪深，年降雪量，冬季平均気温（12月～2月），春季平均気温（3月～4月），春季降雨量（3月～4月）といった気象要素に関する変量に，植栽からの経過年数を加えた6変量を用い， p 値を基準に変量選択した。なお，説明変量間の多重共線性については，VIF（分散拡大係数）が5以上となることはなかったが，VIFが3以上の場合には，VIFの大きな変量のうち目的変量との相関の小さな方を除外して解析を行った。統計解析は，R version 4.1.2（R Core Team 2021）上にてEZR ver. 1.55（Kanda 2013）を用いて行った。

III. 結 果

1. 融雪流出と気象要素に関する変量の年代による違い

融雪流出に関する3変量の年代による違いを図-3に示す。融雪流出量については，2号沢，3号沢ともに年代による有意な違いが認められ，植栽～10年目は伐採前を基準とした融雪流出量が大きく，その後は小さくなる傾向であった。融雪流出開始日については，2流域とも伐採前より早まる傾向であったが（開始日の差がマイナス），年代による違いは3号沢のみ有意であった。事後比較では有意ではなかったものの（植栽前と21～30年目の対比で $p = 0.08$ ），年代が新しくなるほど平均値は0に近い値であった。融雪流出終了日については，2号沢では一定の傾向は認められなかったが，3号沢では植栽から30年目までは伐採前より遅く，31年目以降は逆に早まる傾向が認められた。

気象要素に関しては，冬季平均気温は植栽～10年目や11～20年目が低く，21～30年目や31年目以降が高い傾向が認められたが，これ以外の年最大積雪深，年降雪量，春季平均気温，春季降雨量では年代による有意な違いは認められなかった（J-STAGE電子付録付図-4，付図-5）。

2. 融雪流出量，融雪流出期間の開始日・終了日に影響する要因

伐採前を基準とした融雪流出量の差に対するステップワイズ重回帰分析の結果を表-1に，各気象要素および経過年数との関係を図-4に示す。重回帰分析の結果，2号沢，3号沢の両方において植栽からの経過年数，年降雪量，春季平均気温が説明変量として選択され，2号沢ではさらに冬季平均気温も選択された。標準偏回帰係数は目的変量に対する各説明変量の影響の強さを表しているが，その絶対値は植栽からの経過年数と年降雪量が特に大きかった。植

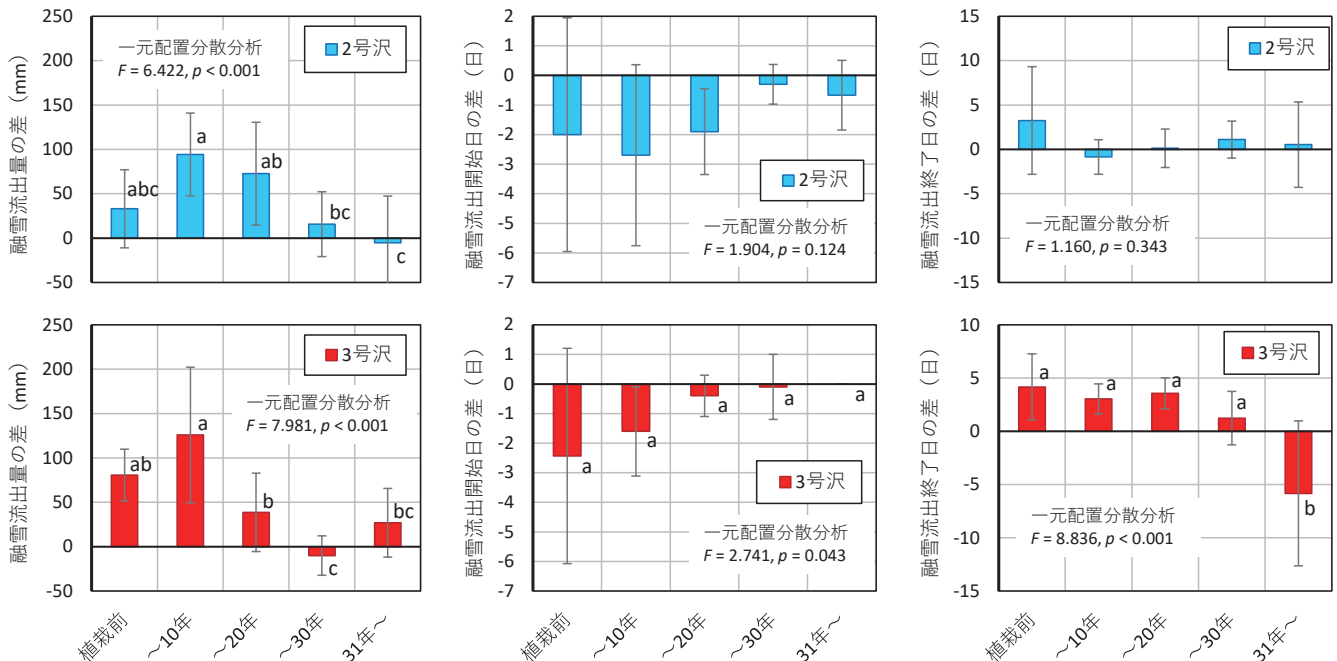


図-3. 伐採前を基準とした融雪流出量の差，融雪流出期間の開始日・終了日の差の年代による違い（平均値±SD）

異なるアルファベットは平均値が有意に異なることを示す（Tukey HSD 検定, $p < 0.05$ ）。

表-1. 伐採前を基準とした融雪流出量の差に対するステップワイズ重回帰分析の結果

流域	説明変量	標準偏回帰係数	変量 p	重回帰 R^2	重回帰 p
2号沢	年降雪量	0.615	<0.001	0.734	<0.001
	植栽からの経過年数	-0.514	<0.001		
	春季平均気温	0.340	0.005		
	冬季平均気温	-0.225	0.043		
3号沢	植栽からの経過年数	-0.812	<0.001	0.716	<0.001
	年降雪量	0.678	<0.001		
	春季平均気温	0.305	0.038		

栽からの経過年数は標準偏回帰係数がマイナスであり，皆伐によって増加した融雪流出量が時間経過とともに減少していく傾向が読み取れる。この点は上述した年代による違い（図-3）と同様である。この傾向に加えて，他の説明変量の標準偏回帰係数は，年降雪量と春季平均気温についてはプラス，さらに2号沢では冬季平均気温がマイナスとなった。このことから，降雪量が多く，春季の気温が高く，冬季の気温が低い年ほど融雪流出量の差が大きくなる傾向のあることが分かった。なお，春季平均気温は，単独では融雪流出量差との間に明瞭な関係は認められないものの（図-4），他の変量とともに重回帰分析に用いると有意であった。

伐採前を基準とした融雪流出期間の開始日・終了日の差に対するステップワイズ重回帰分析の結果を表-2に，各気象要素および経過年数との関係を図-5，6に示す。まず，開始日の差については，2流域とも植栽からの経過年数のみが説明変量として選択され，偏回帰係数はプラスであった。図-3および図-5から，開始日は皆伐後に早まる傾向（開始日の差がマイナス）のあることが分かるが，重回帰分析の結果はこの差が時間経過とともに小さくなっていくことを示している。次に，終了日の差については，2号沢では

有意な説明変量は見つからず，3号沢では植栽からの経過年数のみが説明変量として選択された。3号沢では終了日は皆伐後に遅くなる傾向であったが，植栽からの経過年数の偏回帰係数がマイナスということは，時間経過とともに終了日が早まっていくことを示している。

なお，参考として3流域の融雪流出量，融雪流出期間の開始日・終了日と各気象要素との関係についても J-STAGE 電子付録付図-6，付図-7，付図-8に示す（伐採前の期間も含む）。

IV. 考 察

1. 融雪流出量に対する皆伐と植生回復の影響

融雪流出量は，森林の皆伐によって基本的には増加し，植栽後の時間経過とともに流域内の植生が回復すれば元に戻っていくと考えられた（表-1，図-3，4）。皆伐後に春季の流出量が増加することは，海外でも報告されており（Ide *et al.* 2013；Winkler *et al.* 2017），3号沢と4号沢に関する先行研究（小野・川口 1975）や宝川試験地での帯状伐採（志水・吉野 1996）では，伐採後に融雪流出期間の流出率 R が上昇したことが報告されている。この流出率 R は融雪流出期間中の降雨まで含んだ数値のため，統計解析の目的変量としなかったが，一般的には流出率 R が上昇すれば融雪流出量も増加すると考えられる。本研究においても，皆伐後に流出率 R は上昇していた。森林内では樹冠により降雪が遮断され積雪量が少なくなることが知られているが（中井 1996），皆伐によって降雪遮断がなくなり流域内の積雪量が増加したことが，融雪流出量の増加した大きな原因と考えられる。降雪遮断率については，常緑針葉樹林で30~50%，落葉広葉樹林で2.5~16.3%という報告があり（中井ら 1993；國崎・甲田 2005；久野ら 2009），開空度の上昇とともに積雪量は増加する（López-Moreno and

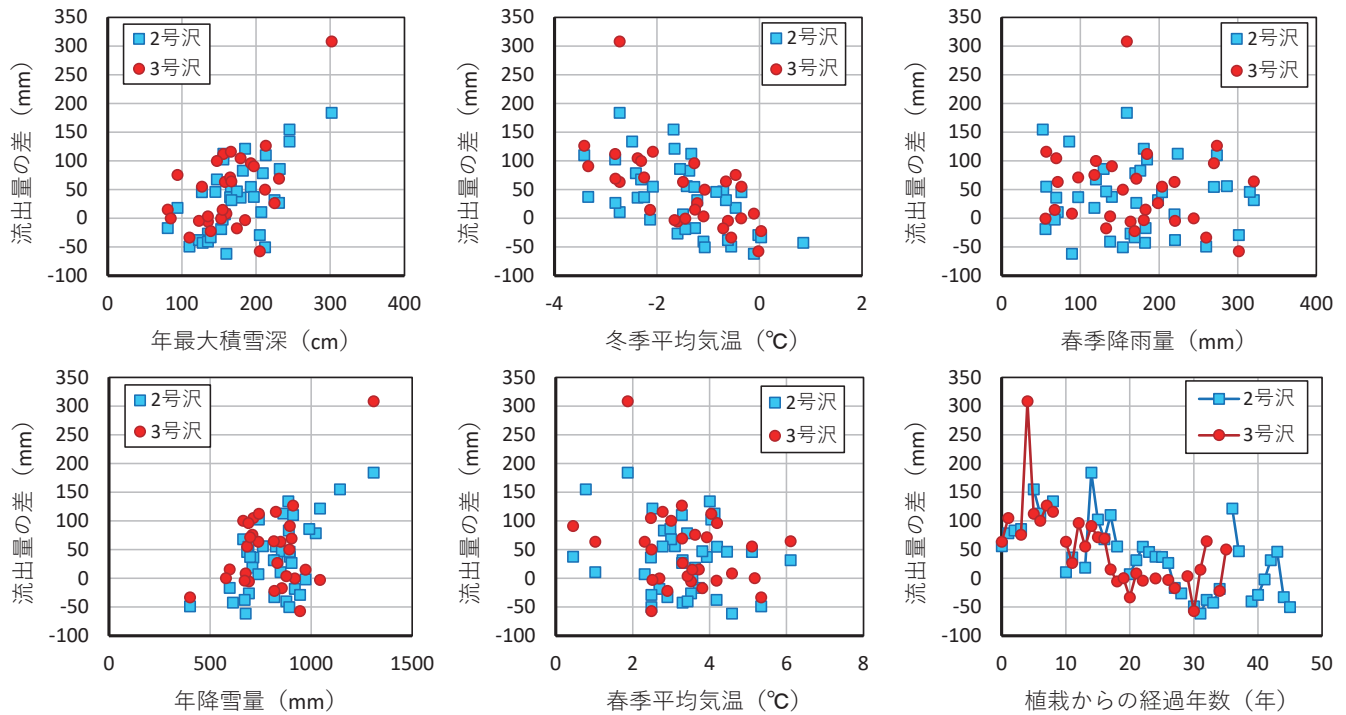


図-4. 伐採前を基準とした融雪流出量の差と、五つの気象要素および植栽からの経過年数との関係

スギの植栽は、2号沢では1960年に、3号沢では1970年に行われた。

表-2. 伐採前を基準とした融雪流出期間の開始日・終了日の差に対するステップワイズ重回帰分析の結果

流域	説明変量	標準偏回帰係数	変量 p	重回帰 R^2	重回帰 p
<融雪流出開始日の差>					
2号沢	植栽からの経過年数	0.424	0.003	0.179	0.003
3号沢	植栽からの経過年数	0.502	0.002	0.253	0.002
<融雪流出終了日の差>					
2号沢	なし	-	-	-	-
3号沢	植栽からの経過年数	-0.546	0.002	0.290	0.002

Latron 2007; 久野ら 2009; 金子ら 2019)。本試験地の気象露場周辺における調査でも、常緑針葉樹林（スギ林）で33.1%、落葉広葉樹林で13.4%と先行研究と同程度の降雪遮断率が得られている（阿部ら 2016）。

融雪流出量が伐採前と同程度へ戻るまでには植栽から30年程度かかったと考えられるが、図-3, 4をみると、2号沢は3号沢よりやや回復が遅いようにも見受けられる。2号沢に関しては、皆伐後の下刈りや火入れによって雪崩常襲地となり（高橋ら 1968; 東北支場山形試験地 1980）、森林の回復が遅れている箇所が長く残った（細田・村上 2006）。こういった経過が融雪流出量の回復に影響を及ぼした可能性も考えられる。国内における同様の研究は極めて少ないが、北海道で針広混交林を伐採後にカラマツを植栽した流域では、植栽から8年目でも融雪流出期間の流出率が高い状態が継続していることが報告されている（野村ら 2011）。フィンランドの北方林でも、植栽から少なくとも14年間は春季の流出量の増加が継続しており（Ide *et al.* 2013）、融雪流出量が元に戻るには時間がかかることが示唆されている。植栽からの時間経過にともなう融雪流出量の変化は、基本的には植栽された樹木の成長による降雪

遮断率の上昇に起因すると考えられる。2号沢の蓄積量は植栽から23年目（1983年）で伐採前の63%に止まっておろ（川口・小野 1983）、3号沢の蓄積量は植栽から35年目（2005年）で、落葉広葉樹主体であった1970年の皆伐時（細田・村上 2007）の73%となっていたが（細田未発表資料）、その8割近くをスギが占めている。スギ林の葉量は植栽後に急速に増加し、20年程度でピークに達することが知られており（只木 1976; 村上 2002）、葉量に依存する降雪遮断率は蓄積量よりも回復が早かったものと推察された。

また、伐採前を基準とした融雪流出量の差は、年降雪量が多い年ほど大きくなる傾向が認められた（表-1, 図-4）。これには流域内の積雪量の差異が関係していた可能性が考えられる。すなわち、降雪量が多い年ほど皆伐地での積雪量は多くなるが、森林地では樹冠により降雪が遮断されるため、森林の有無による積雪量の差が大きくなると予想される。融雪流出量の差には春季平均気温の影響も認められたが、春季の気温が高い年には森林の有無による蒸発散量の差が大きかった可能性が考えられる。常緑のスギ林の蒸散は早春に急増し（Komatsu *et al.* 2007; Saito *et al.* 2017）、落葉広葉樹林では葉の展開後に蒸散量が最大となる（飯田ら 2006）ことが知られている。本試験地の場合、どの流域でも尾根沿いにはブナが生育しており、融雪末期にはブナの開葉が始まる。北方林における研究でも、融雪流出量に対する皆伐の影響は年によって異なることが報告されており、その理由として林冠による降雪遮断や積雪の昇華・蒸発の影響が挙げられている（Schelker *et al.* 2013）。気候変動にともなう平均気温の上昇傾向はすでに本試験地においても確認されているが（Kubota *et al.* 2021）、本研究の解析期間でも1号沢において平均的にみれば60年間で177 mmの融雪流出量の減少が生じていた。今後さらに温

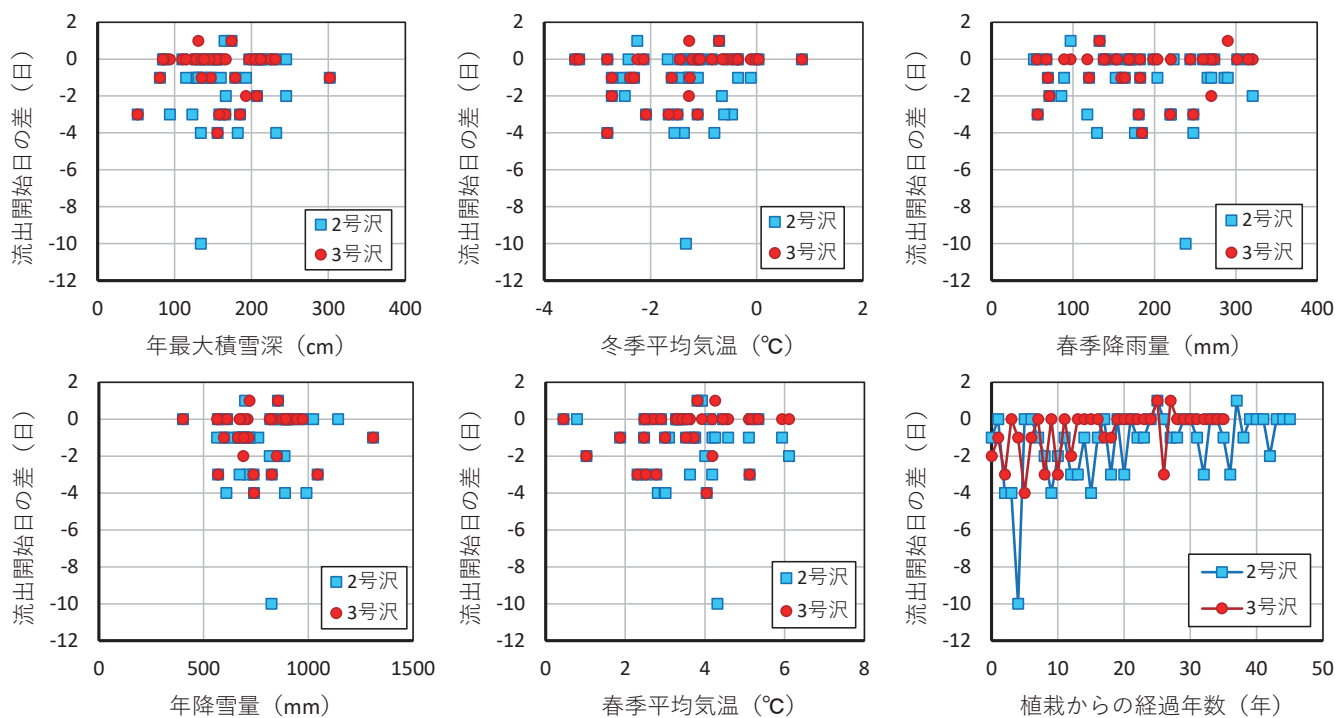


図-5. 伐採前を基準とした融雪流出期間の開始日の差と、五つの気象要素および植栽からの経過年数との関係

スギの植栽は、2号沢では1960年に、3号沢では1970年に行われた。

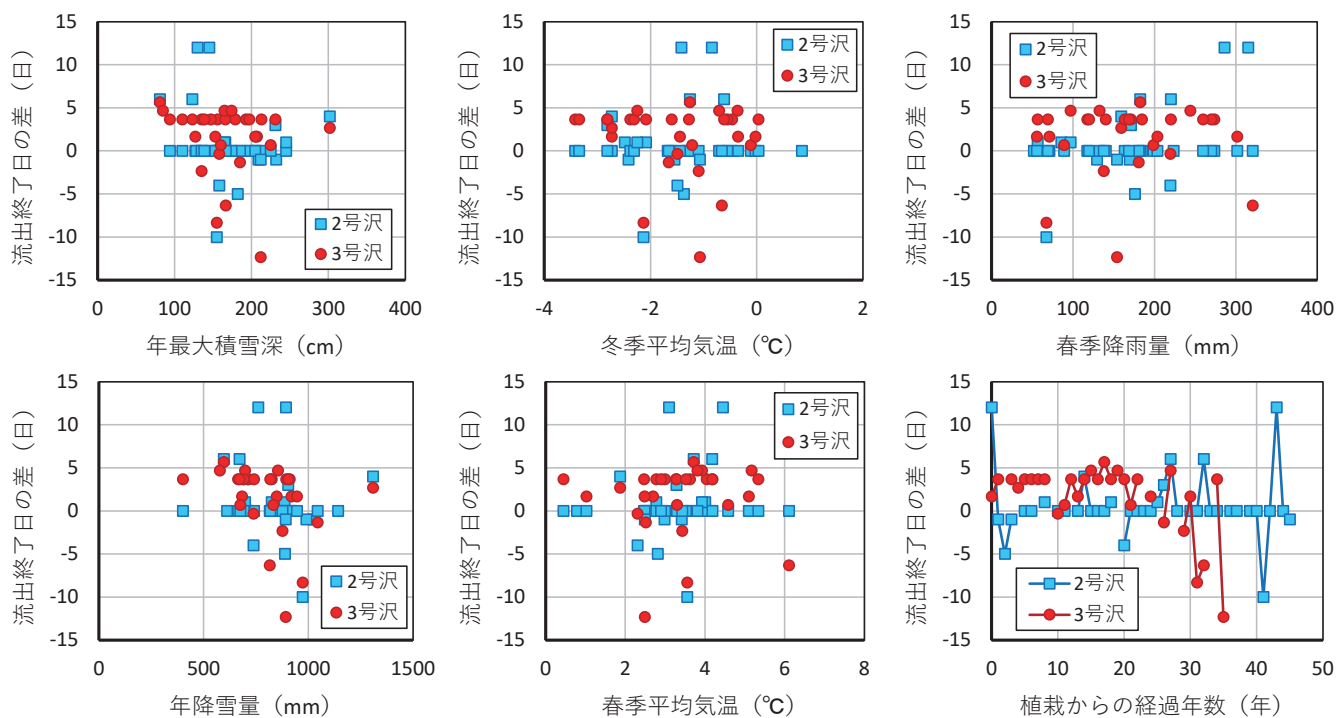


図-6. 伐採前を基準とした融雪流出期間の終了日の差と、五つの気象要素および植栽からの経過年数との関係

スギの植栽は、2号沢では1960年に、3号沢では1970年に行われた。

暖化が進行した場合、冬季～春季の平均気温の上昇によって融雪流出量がこれまでより大幅に減少する恐れも考えられる。

これに加えて、2号沢では、森林回復の遅れた箇所が長く残っており、そうした箇所の積雪が雪崩やグライドにより谷筋へ集積するため、冬季の気温が低いほど谷筋の積雪が維持されると考えられる。このため、2号沢では、冬季

平均気温も融雪流出量の差に弱いながらも有意なマイナスの影響を与えたものと推察された(表-1)。ただし、冬季平均気温は年代によって違いがあるため(J-STAGE電子付録図-5)、融雪流出量差との相関が偶然に生じた恐れも完全には排除できない。

一方、2号沢での先行研究では、皆伐後5年目までを対象とした解析で融雪流出期間の総流出量に大きな変化は認

められていない(小野・川口 1978)。前述のように、2号沢は施業履歴が特殊で植栽前には雪崩が頻発していた(高橋ら 1968; 東北支場山形試験地 1980)。本研究でも、2号沢の植栽前の年代については、融雪流出量がほぼ回復した21~30年目や31年目以降と有意な違いが認められなかった(図-3)。また、皆伐後8年目(1956年)に隣接する流域外の森林が伐採されたことで、流域界の尾根を超えて風上(南西)側から吹き込む雪が増加し、積雪期間の総流出量も増加したことも報告されている(小野・川口 1967)。これは冬季の季節風に対して試験流域が風下側であったためであり、逆に風上側であった場合には吹き払いによって積雪量が減少した可能性も考えられる。このように2号沢は、状況が一般的な対照流域法の試験地とは異なっており、本研究の結果についてもどの程度普遍性があるかは慎重に判断する必要があると考えられる。

また、宝川森林理水試験地でも、皆伐試験による目立った融雪流出量の変化が認められていないが(志水 1990)、流域の向きが釜淵とは異なっていた。宝川については皆伐されたのが南向きの流域であるが、南向き斜面では融雪量が極めて大きいことが知られている(Murray and Buttle 2003)。森林は主に日射量を減少させることで融雪過程に影響を及ぼすが(太田ら 1990; 太田 1993)、南向き流域では皆伐後の日射量増加も他の斜面方位より大きかったと考えられる(宗岡ら 2004; 智和・中村 2020)。このため厳冬期から少しずつ融雪が発生して本格的な融雪流出が始まる前までに積雪水量が減少し、春季の融雪流出量が伐採前とあまり変わらなくなったのではないかと推察される。

2. 融雪流出期間の開始日と終了日に対する皆伐と植生回復の影響

融雪流出期間の開始日は皆伐後に早まる傾向が認められたが、基本的には植栽からの時間経過とともに元に戻っていくと考えられた(図-3, 表-2, 図-5)。皆伐後に融雪流出が早まることは、先行研究の報告と合致しており(中野・菊谷 1956; 小野・川口 1978)、皆伐により積雪面へ到達する日射量が増大し融雪が促進されたためと考えられる。なお、2号沢では、重回帰分析では植栽からの経過年数が説明変量として選択されたものの(表-2)、年代による開始日の違いは有意ではなく(図-3)、時間経過にともなう開始日の回復傾向はやや不明瞭であった。2号沢は、2000年時点でスギを主体とする混交林となっていたが、雪崩により高木の定着が困難な箇所も部分的に広く分布していた。こうした箇所には主に広葉樹低木が生育したが、冬季には積雪下に埋没した(細田・村上 2006; 村上ら 2010)。こういった地点で早期に融雪が生じたため開始日の回復に時間を要した可能性が考えられる。

また、融雪流出期間の終了日については、3号沢では皆伐後にやや遅くなったが、時間経過とともに早まっていく傾向が認められた(図-3, 表-2, 図-6)。終了日が皆伐後に遅くなったのは、皆伐によって流域内の積雪量が増加したためと考えられるが、植栽から31年目以降では、終了日は伐採前よりも逆に早まっていた(図-3)。この理由は明らかではないが、冬季平均気温の違い(J-STAGE 電子

付録付図-5)や植栽木の成長にともなう降雪遮断率の上昇が影響した可能性が考えられる。一方、2号沢では、年代による終了日の違いは認められず(図-3)、有意な説明変量も見つからなかった(表-2)。前述の通り、2号沢は皆伐後に雪崩の常襲地となったが、全層雪崩の発生した斜面では地面が剥き出しとなるため(高橋ら 1968)、周囲の融雪に影響したと考えられる。さらに雪崩による雪塊の日射の弱い谷筋への集積具合、およびそれに付着する土砂の状況が雪塊のアルベドに影響し、終了日が年により大きく変化した可能性も考えられる。

水資源利用という観点からは、融雪流出の総量だけではなく時期も重要であり、融雪流出期間が大幅に早まった場合、春季の農業用水等の利用に支障が出る恐れもある(中村 2008)。本研究の結果、皆伐によって融雪流出期間の開始日が早まる傾向であったことは懸念材料であるが、終了日は皆伐前と同等かやや遅くなる傾向であり、ただちに水資源利用に悪影響が出ることはないと考えられた。森林内における融雪の進行は、林冠の葉面積指数(LAI)が大きいほど遅くなるが(泉ら 2006)、本試験地では皆伐後の植栽により、針広混交林または広葉樹林から常緑のスギ主体の森林に変化したことも融雪流出期間の終了日が早まらなかった原因の一つと推察される。なお、宝川試験地の皆伐では、本研究と逆に融雪流出期間が短くなったという報告(志水 1990)もあるが、前述したようにこの流域は南向きであり、皆伐後の日射量増加によって融雪が進みやすい条件であったことが原因と推察される。同じ宝川試験地の南向き流域でも帯状伐採の場合は林帯の被陰効果によって融雪流出期間が長くなることも報告されている(志水・吉野 1996)。

V. ま と め

本研究では、多雪地域にある釜淵森林理水試験地を対象に、森林の皆伐とその後の植生回復が春季の融雪流出に及ぼす影響について長期データを用いて解析を行った。融雪流出量は皆伐後に上昇する傾向が認められ、先行研究とほぼ合致する結果であった。融雪流出期間については、皆伐後に開始日が早まる点は先行研究と同様であるが、終了日は同等かやや遅くなっていた。こういった皆伐による融雪流出の変化は、基本的には植栽木の成長にともない小さくなっていくと考えられるが、伐採前と同程度へ戻るまでには植栽から30年程度かかっていた。

このように、春季の融雪流出の総量と期間に限ってみれば、皆伐後に利用可能な水資源量は数十年にわたって増える可能性があると考えられるが、一方で融雪流出量の増加は洪水氾濫の危険も増大させることが指摘されており(Harr 1986; 伊藤・笹 1993; Winkler *et al.* 2017)、同一流域内の皆伐面積が大きい場合には悪影響が顕在化する恐れも考えられる。また、本研究では2号沢のように特殊な履歴の流域も含んでおり、皆伐影響に関する結果の普遍性については慎重な判断が必要である。

森林伐採の方法としては、近年では水源林造成事業において小伐区をモザイク状や帯状に配置した小面積分散伐採

も行われており（森林整備センター 2022）、今後はこういった新たな伐採方法や間伐などが春季の融雪流出へ及ぼす影響について研究することも重要と考えられる。

謝 辞

本研究では、森林総合研究所の諸先輩によって観測された貴重な長期データを使用させていただいた。また、本試験地の維持・管理に際しては、山形森林管理署最上支署ならびに当研究所 OB の小野茂夫氏と栗田稔美氏、ご子息の栗田裕之氏らのご協力をいただいた。これらの方々への感謝の意を表します。本研究は JSPS 科研費 JP20K06134 および環境省地球環境保全試験研究費（農 1942）の助成を受けて行われたものである。

なお、本論文に関して開示すべき利益相反はない。

引用文献

- 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 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: 6-10
- 青木繁伸（2010）R による統計処理。http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/R/（参照 2010-08-05）
- 防災部雪害研究室編（1953）雪質の調査資料（雪質、硬度、抗剪力、抗張力）。林試研報 62: 59-124
- 智和正明・中村琢磨（2020）九州大学北海道演習林の異なる斜面方位における気温、積雪深、地温の経時変化。九大演報 101: 7-11
- Dickerson-Lange SE, Gersonde RF, Hubbard JA, Link TE, Nolin AW, Perry GH, Roth TR, Wayand NE, Lundquist JD（2017）Snow disappearance timing is dominated by forest effects on snow accumulation in warm winter climates of the Pacific Northwest, United States. Hydrol Process 31: 1846-1862
- Harr RD（1986）Effects of clearcutting on rain-on-snow runoff in western Oregon: a new look at old studies. Water Resour Res 22: 1095-1100
- 細田育広・大丸裕武・村上 亘・北田正憲・斎藤武史（1999）釜淵森林水試験地観測報告—1・2号沢試験流域—（1979年1月～1993年12月）。森林総研研報 376: 1-52
- 細田育広・村上 亘（2006）釜淵森林水試験地観測報告—1・2号沢試験流域—（1994年1月～2000年12月）。森林総研研報 398: 99-118
- 細田育広・村上 亘（2007）釜淵森林水試験地観測報告—3・4号沢試験流域—（1961年1月～2000年12月）。森林総研研報 404: 163-213
- 細田育広・村上 亘・野口正二（2009）釜淵森林水試験地観測報告—1・2・3号沢試験流域—（2001年1月～2005年12月）。森林総研研報 410: 51-70
- 細田育広・坪山良夫・志水俊夫（1992）簡易式による山地小流域蒸発散量の推定。日林関東支論 43: 127-130
- Ide J, Finér L, Laurén A, Piirainen S, Launiainen S（2013）Effects of clear-cutting on annual and seasonal runoff from a boreal forest catchment in eastern Finland. For Ecol Manag 304: 482-491
- 飯田真一・中谷 壮・田中 正（2006）山地源流域の落葉広葉樹林における樹液流速測定に基づく林分蒸散量の評価。水・水会誌 19: 7-16
- 井上 聡・横山宏太郎・大野宏之・川島茂人（2001）地球温暖化にともなう国内の降雪量減少の河川への影響。地球環境 6(2): 259-266
- 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
- 泉 宏和・風間 聡・沢本正樹（2006）積雪水資源量評価における森林の影響について。水工学論文集 50: 421-426
- Kanda Y（2013）Investigation of the freely available easy-to-use software 'EZR' for medical statistics. Bone Marrow Transplant 48: 452-458
- 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・水会誌 32: 138-147
- 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—釜淵森林水試験地 2号沢の例—。日林東北支誌 35: 230-231
- 気象庁（2021）過去の気象データ・ダウンロード。http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php（参照 2021-11-22）
- Komatsu H, Kume T, Yoshifuji N, Hotta N, Suzuki M（2007）Transpiration

- of a *Cryptomeria japonica* plantation in winter: analysis based on one-year sap flow measurements. Bull Tokyo Univ For 117: 1-9
- Kubota T, Kagawa A, Abe T, Hosoda I（2021）Effects of clear-cutting, meteorological, and physiological factors on evapotranspiration in the Kamabuchi experimental watershed in northern Japan. Hydrol Process 35: e14111. http://doi.org/10.1002/hyp.14111
- 國崎貴嗣・甲田朋子（2005）林冠疎開度による低地帯森林の降雪遮断率の推定。岩手大学農学部演習林報告 36: 57-65
- 久野友靖・兒玉裕二・中井太郎・石川信敬（2009）樹冠による降雪遮断量の評価。北海道の雪氷 28: 45-48
- López-Moreno JI, Latron J（2007）Influence of canopy density on snow distribution in a temperate mountain range. Hydrol Process 22: 117-126
- Lundquist JD, Dickerson-Lange SE, Lutz JA, Cristea NC（2013）Lower forest density enhances snow retention in regions with warmer winters: a global framework developed from plot-scale observations and modeling. Water Resour Res 49: 6356-6370
- 丸山岩三・猪瀬寅三（1952）釜淵森林水試験地第1回報告。林試研報 53: 1-44
- 宗岡寿美・土谷富士夫・辻 修・武田一夫（2004）冬期の気象環境が斜面の積雪・凍結に及ぼす影響。雪氷 66(2): 217-226
- 村上茂樹（2002）スギ・ヒノキ人工林における LAI と蒸発散の林齢依存性およびその水源林管理への応用の可能性。水・水会誌 15: 461-471
- 村上 亘・細田育広・野口正二（2010）多雪山地源流域における流出土砂量の経時変化。地形 31: 171-192
- Murray CD, Buttle JM（2003）Impacts of clearcut harvesting on snow accumulation and melt in a northern hardwood forest. J Hydrol 271: 197-212
- 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
- 中井裕一郎・北原 曜・坂本知己・斎藤武史・寺嶋智巳（1993）森林における降雪の遮断蒸発。日林誌 75: 191-200
- 中村和正・多田大嗣・鶴木啓二・齋藤正美・松岡直基（2008）北海道内の水田灌漑用ダムにおける将来の水収支の試算。寒地土研月報 667: 12-19
- 中野秀章（1971）森林伐採および伐採地の植被変化が流出に及ぼす影響。林試研報 240: 1-251
- 中野秀章・菊谷昭雄（1956）森林伐採と融雪。日林誌 38: 314-316
- 野村 陸・高木健太郎・北條 元・高橋廣行・坂井 励・伊藤欣也・実吉智香子（2011）森林施業流域における融雪流出の経年変化。雪氷研究大会（2011・長岡）要旨集。https://doi.org/10.14851/jcsir.2011.0184.0
- 農林省林業試験場（1961）森林水試験地観測報告（日降水量・日流出量）2。東北支場山形分場（釜淵森林水試験地）（1939年1月～1958年12月）。66-118
- 小川真由美・野上道男（1994）冬季の降水形態の判別と降水量の分離。水・水会誌 7: 421-427
- 太田岳史（1993）森林が表層融雪量に与える影響—観測結果を中心とした検討と問題点—。森林立地 35(1): 15-21
- 太田岳史・橋本 哲・石橋秀弘（1990）表層融雪量に及ぼす森林の影響に関する基礎的検討。雪氷 52: 289-296
- 小野茂夫（1966）2号沢流域内の積雪形態。雪（農林省林業試験場東北支場山形分場）1: 17-20
- 小野茂夫・川口利次（1967）森林伐採が積雪からの流出に及ぼす影響。林試東北支場年報 8: 204-211
- 小野茂夫・川口利次（1975）小流域における貯雪量推定と「森林の影響」の解析。林試東北支場年報 16: 114-119
- 小野茂夫・川口利次（1978）融雪経過に及ぼす森林伐採の影響—釜淵森林水試験地の例—。日林東北支誌 29: 163-164
- Passing H, Bablok W（1983）A new biometrical procedure for testing the equality of measurements from two different analytical methods. J Clin Chem Clin Biochem 21: 709-720
- Pomeroy JP, Frank X, Ellis C（2012）Sensitivity of snowmelt hydrology in Marmot Creek, Alberta, to forest cover disturbance. Hydrol Process 26: 1891-1904
- R Core Team（2021）R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/
- Saito T, Kumagai T, Tateishi M, Kobayashi N, Otsuki K, Giambelluca TW（2017）Differences in seasonality and temperature dependency of stand transpiration and canopy conductance between Japanese cypress (Hinoki) and Japanese cedar (Sugi) in a plantation. Hydrol Process 31: 1952-1965
- Schelker J, Kuglerová L, Eklöf K, Bishop K, Laudon H（2013）

- Hydrological effects of clear-cutting in a boreal forest—Snowpack dynamics, snowmelt and streamflow responses. *J Hydrol* 484: 105-114
- Shimizu T, Tamai K, Hosoda I, Noguchi S, Kominami Y, Abe T, Kitamura K, Kurokawa U, Levia DF, Kubota T, Kabeya N, Iida S, Nobuhiro T, Sawano S, Iwagami S, Shimizu A, Tsuboyama Y (2021) Long-term precipitation and stream discharge records at seven forested experimental watersheds along a latitudinal transect in Japan: Jozankei, Kamabuchi, Takaragawa, Tsukuba, Tatsunokuchi-yama, Kahoku and Sarukawa. *Hydrol Process* 35 : e 14376 . <https://doi.org/10.1002/hyp.14376>
- 志水俊夫 (1990) 森林伐採が融雪流出に及ぼす影響. *雪氷* 52: 29-34
- 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
- 森林整備センター (2022) 事業のリモデルによる未来に向けた水源の森林づくり. https://www.green.go.jp/suigenrin_jigyo/rimoderu/index.html (参照 2022-3-28)
- 只木良也 (1976) 森林の現存量—とくにわが国の森林の葉量について—. *日林誌* 58: 416-423
- 高橋喜平・伊藤浅次・片岡健次郎・小野茂夫・井上栄子・佐藤正平・川口利次 (1960) 林相別による流量の比較試験. *林業試験場東北支場年報* 1: 193
- 高橋喜平・小野茂夫・川口利次 (1968) 伐採跡地のなだれ発生経過. *雪氷* 30(1): 26-30
- 東北支場山形試験地 (1980) 釜淵森林理水試験地観測報告—1・2号沢試験流域 (1959年1月~1978年12月). *林試研報* 311: 129-188
- 東北支場山形試験地 (1987a) 雪質の調査資料 (5) 1965年12月~1975年4月, 10冬季. *林試研報* 346: 105-140
- 東北支場山形試験地 (1987b) 雪質の調査資料 (6) 1975年12月~1985年4月, 10冬季. *林試研報* 348: 109-141
- 十日町試験地・山形分場多雪地帯林業第二研究室・防災部防災科 (1967) 雪質の調査資料 (2). *林試研報* 199: 1-46
- Winkler R, Spittlehouse D, Boon S (2017) Streamflow response to clear-cut logging on British Columbia's Okanagan Plateau. *Ecohydrology* 10 (2) : e1836. <http://doi.org/10.1002/ecco.1836>