

1 山地森林流域からの融雪流出と伐採の影響
2 一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一

3
4
5 阿部俊夫 久保田多余子
6 野口正二 細田育広
7

8
9 目次

- 10 I. はじめに
11 II. 試験地と方法
12 1. 試験地の概要
13 2. 使用データ
14 3. 解析方法
15 III. 結果と考察
16 1. 基準流域における融雪流出の特徴
17 2. 伐採後の融雪流出量，融雪流出の開始日および
18 終了日の変化
19 3. 伐採後の融雪期ピーク流量の変化
20 4. 伐採流域と基準流域との旬流出量の違い
21 IV. おわりに
22

23 (要旨)

24 山形県にある釜淵森林理水試験地を対象に，長期データを用いて，春季の融
25 雪流出に伐採が及ぼす影響を解析した。融雪流出量は，年最大積雪深が大き
26 く，冬季と春季の平均気温が低い水年ほど多い傾向がみられた。融雪流出の開
27 始日は春季平均気温が低い水年ほど遅く，終了日は年最大積雪深が大きく，春
28 季平均気温が低い水年ほど遅い傾向がみられた。伐採後の変化を調べると，融
29 雪流出量は増加し，融雪流出の開始は早まったが，苗木植栽から約 30 年で元
30 に戻ることが明らかとなった。ピーク流量は，2号沢では伐採後に基準流域の
31 約 1.1 倍に増加し，植栽から数十年で元に戻っていた。旬流出量は，伐採後，
32 1月下旬から融雪流出期間（特に前半）にかけて増加したが，後半の流出量が

33 減少することはなかった。現在，地球温暖化により気温上昇しており，今後，
34 春季の融雪流出は減少すると予想される。水資源対策として，適切な森林整備
35 を行うことも検討の価値があると考えられる。

36

37 キーワード：融雪流出，森林伐採，植生回復，地球温暖化，水資源

38

39 I. はじめに

40 積雪寒冷地においては，冬季の降水は多くが積雪として流域内に貯留され，
41 春季の気温上昇にともない融雪水として流出することから，地域の重要な水資
42 源となっている。こういった降水が地表面で長期間貯留されるプロセスは，降
43 水のほとんどが降雨としてもたらされる非積雪地域には見られない積雪寒冷地
44 に特有の現象である。わが国の場合，河川上流域の水源地帯はほぼ森林に覆わ
45 れているが，森林は樹冠が降雪の一部を遮断蒸発させるため，積雪量を減少さ
46 せることが知られている（中井，1996）。林内の積雪量は，一般に落葉広葉樹
47 林よりも常緑針葉樹林で少ないが（中井ら，1993；國崎・甲田，2005；阿部ら，
48 2016），林内の開空度も影響し，開空度が高い林分ほど積雪量や降水樹冠通過
49 率は大きくなる（López-Moreno and Latron, 2007；久野ら，2009；野口・阿
50 部，2024）。

51 融雪流出に対する森林の影響を，国内で流域スケールの伐採試験で明らかに
52 しようとした試みとしては，釜淵森林理水試験地（山形県）の研究事例を挙げ
53 ることが出来る。解析者により若干の違いはあるものの，皆伐後に融雪流出の
54 開始が早まり，融雪流出量は増加したことが明らかになっている（中野・菊谷，
55 1956；小野・川口，1975；玉井，2020）。こういった皆伐後における春季の流
56 出量増加は，海外の研究とも一致する（Ide et al., 2013；Winkler et al.,
57 2017）。なお，宝川森林理水試験地（群馬県）では，皆伐後にも融雪期の流出
58 率が変化しなかったが（志水，1990），これは流域が日当たりの良い南向きで
59 あったためと思われる。この試験地でも，別流域で行われた帯状伐採では，融
60 雪期の流出率が上昇したと報告されている（志水・吉野，1996）。

61 このように，森林の有無は融雪流出に影響を及ぼすと考えられるが，これま
62 での研究では伐採から約 10 年程度までを対象としており，植生回復にともな
63 う長期的な変化は十分に解明されて来なかった。そこで，筆者らは，釜淵森林
64 理水試験地を対象に，より長期間の解析を実施し，その結果を論文として発表

65 した（阿部ら，2023a）。この論文では，年によって異なる積雪量や気温など気
66 象条件の影響を考慮した統計解析も行っている。本稿では，阿部ら（2023a）
67 の成果の一部を紹介するとともに，論文で対象としなかった融雪期ピーク流量，
68 旬流出量の変化などについても新たな解析を行い，皆伐とその後の植生回復が
69 春季の水流出に及ぼす影響を検討した。

70

71 II. 試験地と方法

72 1. 試験地の概要

73 森林総合研究所の釜淵森林理水試験地（以後，釜淵試験地）は，山形県北部
74 の鶴下田沢国有林内（北緯 38°56′，東経 140°15′）にあり，4 流域で構成さ
75 れている（図 1）。地質は第三紀凝灰岩および頁岩質凝灰岩である（丸山・猪
76 瀬，1952）。この付近は，かつて落葉広葉樹を主とした森林で，製炭者による
77 部分的な皆伐が行われていたが，1912～1916 年に伐採跡地へスギやヒノキ
78 が植栽された（丸山・猪瀬，1952）。その後，1939 年に 1 号沢（3.06 ha）
79 と 2 号沢（2.48 ha）の 2 流域で観測が開始され，さらに 1961 年には 3 号沢
80 （1.54 ha）と 4 号沢（1.12 ha）でも観測が始まった（細田ら，2009）。

81 基準流域の 1 号沢では，観測開始から伐採などの人為的かく乱は行われてお
82 らず，現在はブナやコナラなどの落葉広葉樹にスギが混生する針広混交林とな
83 っている。2 号沢は 1947～1948 年に皆伐された後，雪崩が多発するようにな
84 り，1960 年に階段工を設けたうえでスギが植栽された（東北支場山形試験
85 地，1980）。3 号沢と 4 号沢は 1964 年に流域の半分（3 号沢は谷側，4 号沢
86 は尾根側）を伐採した後，1969 年に残り半分の皆伐し，翌 1970 年にスギが
87 植栽された（細田・村上，2007）。写真 1 は，3 号沢の皆伐・植栽が完了した
88 直後に，4 号沢尾根上から撮影された試験地の様子である。

89 気象観測は，主に釜淵試験地から南東へ約 1 km 離れた森林総合研究所山形
90 実験林の気象露場（図 1）で実施されてきた。1970～2000 年の平均値では，
91 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
92 田・村上，2006）。この地域は豪雪地帯対策特別措置法に基づく特別豪雪地帯
93 に指定されており，多雪年の最大積雪深は 2 m を超える。融雪流出は，例年
94 であれば 3 月上旬頃から活発となり，4 月下旬頃まで河川流量の多い状態が継
95 続する（写真 2）。

96

97 2. 使用データ

98 本研究では、原則として 1939 年から 2005 年までの日単位データを使用し
99 た。流出量と降水量に関しては、森林総合研究所森林理水試験地データベース
100 (<https://www2.ffpri.go.jp/labs/fwdb/>) で公開されているデータである。
101 ただし、4 号沢については量水堰の漏水があり、正確な流出量が得られないた
102 め解析対象から除外している。これらのデータの日界は 24 時ではなく、10 時
103 の場合が多いが、時代によって変遷しており、詳細は阿部ら (2023a) を参
104 照されたい。なお、本試験地では例年 10 月が比較的降水量の少ない時期であ
105 ることから、中野 (1971) に従い、前年 11 月 1 日から 10 月 31 日までを 1
106 水年としてデータを整理した (例えば、1940 水年は 1939 年 11 月 1 日～
107 1940 年 10 月 31 日となる)。

108 他に、気象露場で観測された気温と積雪深も解析に使用したが、これらのデ
109 ータは 1998 年頃までデータロガー等による自動観測がなく、職員による定時
110 計測のみであった (9 時または 10 時の場合が多い)。そこで、気温について
111 は、最高・最低温度計で測った過去 24 時間の最高・最低気温から日平均気温
112 を推定した。推定式は、近年の 10 分間隔データから日最高・最低気温の平均
113 と日平均気温をそれぞれ算出し、これらを回帰分析して作成したものである
114 (阿部ら, 2023a)。なお、気温が欠測した期間については、山形測候所 (現
115 山形地方气象台) の気温から推定を行った。

116 さらに、上で求めた日平均気温を基準に、日単位で降水が雨であったか雪で
117 あったかの判別を行った。判別基準の気温としては、小川・野上 (1994) に
118 記載されている東北西部の値を用いた。なお、4 月については記載がないため、
119 3 月の値を使用した。

120

121 3. 解析方法

122 1) 融雪流出期間の開始日, 終了日の判定

123 融雪期になると、溪流の流量は、気温の上昇する日中 (特に正午～日没) に
124 増加し、夜間に減少するといった特徴的な日周変化を示すようになる。小野・
125 川口 (1975) や志水 (1990) は、こういった流量の日周変化を頼りに融雪流
126 出の期間を特定しており、本研究でも同様の方法を採用した。流量の日周変化
127 は、日流出量から判断が出来ないため、融雪流出期間の特定に関してはより時
128 間解像度の高い流量データを利用して行った (図 2)。

129 融雪流出期間の開始日については、午後にピークを持つ流量の日周変化が連
130 続して現れるようになった最初の日、または、この直前で明瞭な出水（例えば、
131 春先の降雨）が起きた日とした。終了日については、上記のような流量の日周
132 変化がみられた最後の日とした。ただし、厳冬期でも暖気の流入で一時的に融
133 雪が活発化することはあるため、その後に融雪流出のない日が2日以上連続し
134 て現れる場合は、融雪流出期間には含めなかった（2日以内なら連続した融雪
135 流出期間と見なす）。なお、融雪期終盤にまとまった降雨があった水年は、融
136 雪に起因した流量変化が判読不能であり、終了日は不明とした。開始日と終了
137 日は、データ解析の際は1月1日を1とする通日で表した。

138

139 2) 融雪流出量の算定

140 上記1)で特定した融雪流出期間に対して、融雪流出量 Q_s を次式で算定した
141 (終了日不明の水年は対象から除外した)。

$$142 \quad Q_s = Q - Q_b - P_r \cdot R$$

143 ここで、 Q は総流出量、 Q_b は基底流出量、 P_r は降雨量、 R は流出率である。
144 この算定方法は、志水（1990）を参考としたものである。基底流出量 Q_b は、
145 開始日および終了日の流出量をハイドログラフ上にて直線で結んで求めた。流
146 出率 R は本来であれば降雨の流出率であるが、降雨と融雪水に起因する流出
147 量を明確に分離できないため、本研究では融雪流出期間全体に対する総流出率
148 を用いた。 R の計算は以下の通りとした。

$$149 \quad R = Q / (P + S)$$

150 ここで、 P は期間中の降水量（雨と雪の合計）、 S は融雪流出開始直前の積雪
151 水量であり、次式で算定される。

$$152 \quad S = 10 \cdot \rho H / \rho_w$$

153 H が開始日前日の積雪深、 ρ と ρ_w はそれぞれ積雪の全層平均密度、水の密度
154 である。釜淵の雪質調査資料によると、融雪開始時期の全層平均密度は 0.35
155 ~0.40 g/cm³ 程度の値を取る場合が多い（防災部雪害研究室編、1953；東北
156 支場山形試験地、1987a；1987b）。そこで、本研究では $\rho = 0.37$ 、 $\rho_w =$
157 1.00 と仮定して計算した。算出された流出率 R は年変動があるものの、平均
158 的には0.9前後であり、小野・川口（1975）の報告と合致した。

159

160 3) 融雪流出に対する気象条件の影響の解析

161 冬季の気象条件は、年によって寒冷多雪傾向や暖冬少雪傾向など変動が大き
162 い。そこで、融雪流出に対する気象条件の影響を調べるため、基準流域1号沢
163 の融雪流出量、融雪流出の開始日、終了日を目的変数として、気象条件の影響
164 をステップワイズ重回帰分析で解析した。説明変数には、各水年の年最大積雪
165 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
166 季降雨量（3月～4月）の5つを用い、 p 値による変数選択を行った。なお、
167 説明変数間の多重共線性に関しては、VIF（分散拡大係数）が3以上の組合せ
168 がある場合、目的変数との相関係数の小さな方を除外し、VIFが2未満にな
169 るように変数選択を調整した。

170

171 4) 伐採後の融雪流出量、融雪流出の開始日、終了日に対する解析

172 伐採により生じた融雪流出量、開始日、終了日の変化については、伐採前の
173 期間における2・3号沢と基準流域1号沢との関係式を使って評価した。すな
174 わち、もし伐採しなかった場合の推定値を1号沢の値から算出し、実際の2・
175 3号沢の観測値との差を求めた。伐採前の関係式は、基本的にノンパラメトリ
176 ック回帰の一種である Passing-Bablok 法で求めたが、計算の詳細について
177 は阿部ら（2023a）を参照されたい。

178 また、伐採後の期間を以下の5年代に区分し、年代による伐採影響の変化を
179 一元配置分散分析で調べた。年代区分はスギ植栽年を基準に、①伐採～植栽、
180 ②植栽後～10年目、③11年目～20年目、④21年目～30年目、⑤31年目以
181 降とした。2号沢では皆伐から植栽まで10年以上あるが、3号沢では流域の
182 半分ずつ2回に分けて伐採し、皆伐後は速やかに植栽を行っているため、①の
183 期間は基本的に流域の下半分が伐採された状態であった。

184

185 5) 伐採後のピーク流量に対する解析

186 森林伐採に起因する融雪流出量の増加は、春季の水資源量の増加につながる
187 可能性がある一方で、融雪期の洪水リスクを高める恐れもあると考えられる。
188 そこで、本研究では、融雪流出期間におけるピーク流量が伐採後にどう変化し
189 たかについても解析した。ピーク流量とは、融雪流出期間における最大瞬間流
190 量（L/s）であり、日単位より時間解像度の高い流量データから求めた。伐採
191 の影響を見るために、2・3号沢のピーク流量に関しては、1号沢との流量比
192 （流域面積比で補正）を計算し、上記4)で説明した5年代ごとの違いを一元

193 配置分散分析で解析した。

194

195 6) 伐採流域と基準流域との旬流出量の差に対する解析

196 伐採によって流域内の融雪が早まった場合、融雪流出も全体に早期化し、融
197 雪期後半には流出量が逆に減少する可能性も考えられる。このような状況は、
198 田植えなどに必要な春季の水資源を確保する上で問題となる。しかし、これま
199 で、伐採によってどの時期の流出量がどう変化するか詳しい解析は行われて来
200 なかった。そこで、本研究では、伐採前および上記 4)の 5 年代ごとに、伐採
201 流域と基準流域との流出量の違いを旬単位で調べた。対象期間は 1 月上旬から
202 5 月下旬までとし、差の検定にはノンパラメトリックの対応 2 試料検定である
203 Wilcoxon 符号付順位和検定を用いた（同じ水年のデータ同士を対応）。

204

205 III. 結果と考察

206 1. 基準流域における融雪流出の特徴

207 まず、施業の行われていない基準流域 1 号沢の融雪流出について、水年ごと
208 の気象条件との関係を重回帰分析によって調べた。その結果、融雪流出量は、
209 年最大積雪深が大きく、春季（3～4 月）や冬季（12～2 月）の平均気温が低
210 い水年ほど多い傾向があることが分かった（表 1，図 3）。これは、冬季の積雪
211 量が多く、気温が低い年ほど、春先の融雪開始時期まで融け残る積雪も多くな
212 るためと考えられる。さらに、春季の気温が低い年では、融雪期の蒸発散が少
213 なくなり、その分、流出量が増加している可能性も考えられる。樹木の蒸散量
214 は、スギでは早春から急増し（Komatsu et al., 2007 ; Saito et al., 2017）、
215 落葉広葉樹では葉の展開後に最大となることが知られている（飯田ら，2006）。
216 本試験地では植栽されたスギのほか、ブナやナラ類などの落葉広葉樹が生育し
217 ており、ブナは融雪期後半には葉が展開するため（阿部ら，2023a）、融雪期で
218 もすでに蒸散は始まっていると考えられる。

219 また、融雪流出期間の開始日は春季平均気温が低い水年ほど遅く、終了日は
220 年最大積雪深が大きく、春季平均気温が低い水年ほど遅い傾向が認められた
221 （表 1，図 3）。融雪流出のタイミングが気温に左右されることは予想通りであ
222 ったが、特に、開始日は春季の気温に強く影響されるようである。終了日に関
223 しては、説明変量の標準回帰係数をみると、春季気温より冬季の積雪量が強く
224 影響していると考えられる。

225 以上より，寒冷多雪年では融雪流出量が多く，遅くまで融雪流出が続くのに
226 対して，温暖少雪年だと融雪流出量が少なく，早期に融雪流出が終了する傾向
227 があるといえる。こういった基本的な傾向は，伐採の行われた 2 号沢と 3 号沢
228 においても同様であった。

229

230 2. 伐採後の融雪流出量，融雪流出の開始日および終了日の変化

231 次に，伐採により生じた融雪流出の変化について検討した。図 4 は，伐採流
232 域の融雪流出量，開始日および終了日について，伐採しなかった場合との差を
233 調べた結果である（阿部ら，2023a）。融雪流出量に関しては，2 号沢，3 号沢
234 とも伐採後に増加しており，スギ植栽後 30 年前後で元のレベルに戻ったこと
235 が明らかとなった。融雪流出期間の開始日に関しては，平均を見れば，伐採後
236 に早まり，植栽から 30 年程度で元に戻る傾向であった。2 号沢は年ごとの値
237 のバラつきが大きく，一元配置分散分析で有意差が認められなかったものの，
238 重回帰分析では 2 号沢，3 号沢ともに植栽後の経過年数が有意な説明変量とし
239 て選択された（阿部ら，2023a）。終了日に関しては，2 号沢でははっきりした
240 変化はなかったが，3 号沢では伐採後にやや遅くなり，31 年目以降は逆に伐採
241 前より早まった。ただし，3 号沢の 31 年目以降については，有効なデータが 4
242 年と少ないため，本当に伐採前より終了が早まるのかは，さらにデータを追加
243 しての検証が必要である。

244 伐採によって融雪流出の開始が早まり，融雪流出量が増加するという結果は，
245 基本的に先行研究と合致したものである（中野・菊谷，1956；小野・川口，
246 1975；玉井，2020）。ここでの伐採は，3 号沢で半分伐採の期間を含むが，基
247 本的には皆伐であり，降雪の樹冠遮断（中井，1996）が無くなったことで，流
248 域内の積雪量が増加し，積雪面まで到達する日射量が増大し融雪が生じやす
249 くなった結果と考えられる。一方で，融雪流出量，開始日とも，スギ植栽から約
250 30 年で元に戻ったことは，筆者らの研究（阿部ら，2023a）で初めて明らかと
251 なった。時間経過に伴う伐採影響の低下は，植栽されたスギや自然に侵入した
252 落葉広葉樹などの樹木の成長に起因したものと考えられるが，流域全体の林分
253 蓄積量は，2 号沢では植栽 23 年目で伐採前の 63%（川口・小野，1983），3 号
254 沢では植栽 35 年目で皆伐時の 73%（細田，未発表）に止まっていた。ただし，
255 樹冠遮断に関係する林分葉量は，スギ林では 20 年程度でピークに達するとい
256 う指摘もあり（只木，1976；村上，2002），葉量の早期回復によって融雪流出

257 への影響が無くなったものと推察される。

258 なお、植栽前の年代については、融雪流出量の増加があまり顕著でなかった
259 が（図 4）、小野・川口（1978）も植栽前の 2 号沢に関して融雪期の総流出量
260 に大きな変化がなかったと報告している。この原因は明らかではないが、2 号
261 沢は皆伐後 10 年以上に渡る刈払いと火入れによって雪崩常襲地となってしま
262 った（東北支場山形試験地、1980）ことが関係しているかもしれない。例えば、
263 土砂を巻き込んだ雪崩により、雪面のアルベドが低下して厳冬期から融雪が進
264 行した可能性も考えられる。また、2 号沢では植栽の 4 年前に、西側に隣接す
265 る林分で伐採が行われ、その後、流域外から風で移入する雪量が増加したとい
266 う記録もある（小野・川口、1967）。3 号沢で植栽前の流出量増加が顕著でな
267 かったのは、流域の上半分がまだ伐採されずに残っていたためと考えられる。

268

269 3. 伐採後の融雪期ピーク流量の変化

270 伐採によって融雪流出期間のピーク流量がどう変化したかを解析した（図
271 5）。2 号沢では、伐採後にピーク流量が 1 号沢よりも 1.1 倍ほど大きかったが、
272 植栽から 30 年前後で 1 号沢と同程度に減少したことが分かった。一方、3 号
273 沢のピーク流量は、平均的にみれば 1 号沢と同程度であったが、植栽から 10
274 年目の年代についてはピーク流量が 1 号沢の約 1.1 倍と大きかった。

275 森林の皆伐が融雪期の洪水氾濫のリスクを高めることは、以前より指摘され
276 てきた（Harr, 1986；伊藤・笹, 1993；Winkler et al., 2017）。このような洪
277 水は、融雪流出に大雨が重なった結果であり（石井, 2012；築場・石井,
278 2019）、本試験地のピーク流量もすべて降雨時に生じていた。どの程の大雨が
279 いつ発生するかは偶然に左右されるが、図 5 では皆伐の完了後にピーク流量が
280 平均 1 割ほど大きくなっており、植栽木が成長するまで 10 年～30 年ほどは、
281 洪水リスクの高い状況であったと考えられる。人間の生活圏を流れる多くの河
282 川は、流域面積が本試験地（数 ha）よりもずっと大きいため、通常、流域全
283 体が無立木状態になることはないが、流域内の皆伐地面積が多い場合は、融雪
284 期の洪水に注意が必要と考えられる。

285

286 4. 伐採流域と基準流域との旬流出量の違い

287 伐採された 2・3 号沢と基準流域 1 号沢とでどの時期の流出量（各旬の総流
288 出量）に差がみられるかを、年代ごとに解析した。2 号沢に関しては、伐採前

289 ほどの時期にも有意差は認められなかったが、伐採後は1月下旬～4月上旬な
290 どで1号沢と有意差が認められることが多かった(図6)。有意差がみられた
291 箇所は、植栽20年目までの年代では、いずれも2号沢の流出量が1号沢より
292 多くなっていた。なお、21年目以降では、1月上旬～下旬や5月下旬などで2
293 号沢の流出量が1号沢より少なくなることがあった。3号沢に関しては、伐採
294 前はデータが3年と少ないために統計検定が出来なかったが、グラフを見る限
295 り1号沢と明瞭な違いはなさそうである(図7)。伐採後については、2月上旬
296 ～4月下旬などで3号沢の流出量が1号沢より多くなる傾向がみられ、2号沢
297 と類似した結果であった。ただし、11年目以降では、1月上旬～2月下旬や5
298 月上旬、5月下旬などで、3号沢の流出量が1号沢より少ないことがあった。

299 旬流出量の季節変化(図6,7)を見ると、例年の融雪流出期間はおおむね3
300 月上旬から5月上旬と考えられ、盛期は4月上旬前後(3月下旬～4月中旬)
301 である。この期間、特に盛期以前の流出量は、上述の通り、伐採後に増加する
302 ことが多かったが、これは伐採による融雪流出量の増加(図4)を反映した変
303 化と考えられる。さらに、伐採後の流出量増加は2月など冬季でも見られ、伐
304 採によって融雪流出が早期化したことが伺える。一方、融雪流出期間の後半に
305 ついては、2号沢では観測期間を通じて1号沢と同等、3号沢では植栽10年目
306 までは1号沢以上の流出量があったことから、融雪が早まっても、期間後半の
307 流出量が減少することはなかったと考えられる。2号沢と3号沢とで結果がや
308 や異なったのは、流域による日当たりの違いを反映したものと推察された。す
309 なわち、3号沢の南には標高の高い1号沢が隣接するが、2号沢の南には特に
310 高い尾根はなく(図1)、太陽が南～南西にある時間帯では日当たりに違いが
311 生じたと考えられる。このため、日当たりのやや悪い3号沢で、遅くまで融け
312 残る積雪が多かった可能性がある。なお、積雪量や積雪期間には標高の効果も
313 知られているが(村上・山野井, 2003; 石田, 2006)、本試験地は低山で流域
314 間の標高差も小さいため、標高の影響はないと考えられる。

315 なお、植栽から時間が経過すると、1～2月や5月で流出量が減少する場合
316 があった(図6,7)。元々、伐採前については1号沢と明瞭な違いは見られな
317 かったものの、回復過程の若い森林と成熟した森林とで蒸発散に違いがある可
318 能性も考えられる。また、気温の低い冬季では、溪流の流出量は積雪と地面の
319 境界における底面融雪に依存しているが(Motoyama, 1987)、森林内では開
320 けた場所(露場)よりも底面融雪量が小さいことが知られている(倉島ら,

321 1999)。冬季の底面融雪に植生回復がどのように影響を及ぼすのかについても、
322 今後、詳しい検討が必要と考えられる。ただし、これらの流出量減少は、春季
323 の流出量全体からみると小さな割合である。

324

325 IV. おわりに

326 地球温暖化により、我が国の平均気温は 100 年あたり 1.24℃のペースで上
327 昇し、冬季の積雪深は減少を続けている（文部科学省・気象庁，2020）。釜淵
328 の観測データでも、詳しい解析はおこなっていないものの、同様の傾向がみら
329 れる（図 8）。近年では 2020 年が記録的な暖冬少雪となったが、秋田県の長坂
330 試験地では 3 月上旬の積雪深が過去最低となり、はっきりした融雪流出も認め
331 られなかったことが報告されている（田村ら，2024）。この年は、本試験地で
332 も類似した状況であった。21 世紀末には、北日本日本海側でも冬季の平均気
333 温が 20 世紀末より 1.8～5.2℃上昇し、最大積雪深は 20 世紀末の 45～80%に
334 減少すると予測されている（文部科学省・気象庁，2020）。このような変化が
335 起きた場合、融雪期の洪水リスクは低減すると考えられるが（田村ら，2024）、
336 田植えなど春季に必要な水資源は、降雨量が増加しない限り不足する恐れがあ
337 る（井上ら，2001；中村ら，2008）。

338 本研究では、森林の伐採（基本的には皆伐）により、融雪流出量が数十年に
339 わたって増加することを明らかにした。間伐のような森林整備では、伐採率が
340 小さいと融雪期を含めて水流出量への影響が認められないこともあるが（阿部
341 ら，2023b）、伐採率が大きければ融雪流出量の増加は期待できると思われる。
342 帯状伐採に関しては、融雪期の流出率が上昇し、融雪流出期間も長くなったと
343 いう報告がある（志水・吉野，1996）。以上のことから、今後、水資源対策と
344 して積極的な木材利用を推進することも検討の価値があると考えられる。もち
345 ろん、大面積の皆伐では土砂流出や雪崩、生物多様性などへの悪影響も懸念さ
346 れるが、伐採規模を 1 ha 以下などの小面積とし、急斜面や溪畔域での施業は
347 控えるといった配慮をすれば悪影響を小さく抑えることは可能と思われる。こ
348 のような森林利用は、カーボンニュートラル達成のため、政府が掲げる「持続
349 可能な木材利用」とも整合するものである（林野庁，2024）。

350 また、森林、特にスギのような常緑樹林には、日射遮断と風速低減により春
351 季の融雪を遅延させる効果もあることが知られている（村上ら，2018）。融雪
352 流出が一時期に集中することなく、遅くまで持続できれば、人間の水利用上も

353 都合が良い。ただし、消雪時期に対する森林の影響は気候によって異なり、よ
354 り温暖な積雪地域では、森林内の方が露場より消雪が早まることが知られてい
355 る (Lundquist et al., 2013 ; Dickerson-Lange, et al., 2017)。これは、日射
356 遮断などの融雪遅延効果よりも、樹冠遮断による積雪量減少や長波放射による
357 融雪促進の効果が大きくなるためと考えられている。本試験地では、現在のと
358 ころ、森林による融雪遅延効果が認められるが (阿部ら, 2016), より南の新
359 潟県十日町市では、森林タイプによらず林外とほぼ同時に消雪することが報告
360 されている (武田, 2020)。融雪に対する森林の影響が、今後、どのように変
361 化していくかに関しても、データを蓄積し、さらなる検討が必要と考えられる。

362

363 参考文献

- 364 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
365 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,
366 東北森林科学会誌 21, 6-10
- 367 阿部俊夫・久保田多余子・野口正二・細田育広 (2023a) : 釜淵森林理水試験地
368 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
369 105, 1-10
- 370 阿部俊夫・久保田多余子・小川泰浩・延廣竜彦・野口享太郎 (2023b) : 釜淵森
371 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
372 本森林学会誌 105, 338-343
- 373 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),
374 林業試験場研究報告 62, 59-124
- 375 Dickerson-Lange, S.E., Gersonde, R.F., Hubbart, J.A., Link, T.E., Nolin,
376 A.W., Perry, G.H., Roth, T.R., Wayand, N.E. and Lundquist, J.D.
377 (2017) : Snow disappearance timing is dominated by forest effects on
378 snow accumulation in warm winter climates of the Pacific Northwest,
379 United States, Hydrological Processes 31, 1846-1862
- 380 Harr, R.D. (1986) : Effects of clearcutting on rain-on-snow runoff in
381 western Oregon: a new look at old studies, Water Resources Research
382 22, 1095-1100
- 383 細田育広・村上亘 (2006) : 釜淵森林理水試験地観測報告 - 1・2 号沢試験流域
384 - (1994 年 1 月 ~ 2000 年 12 月), 森林総合研究所研究報告 398, 99-118

- 385 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
386 ー (1961年1月～2000年12月), 森林総合研究所研究報告 404, 163-213
387 細田育広・村上亘・野口正二 (2009) : 釜淵森林理水試験地観測報告－1・2・
388 3号沢試験流域ー (2001年1月～2005年12月), 森林総合研究所研究報告
389 410, 51-70
- 390 Ide, J., Finér, L., Laurén, A., Piirainen, S. and Launiainen, S. (2013) :
391 Effects of clear-cutting on annual and seasonal runoff from a boreal
392 forest catchment in eastern Finland, *Forest Ecology and Management*
393 304, 482-491
- 394 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
395 流速測定に基づく林分蒸散量の評価, *水文・水資源学会誌* 19, 7-16
- 396 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
397 内の降雪量減少の河川への影響, *地球環境* 6(2), 259-266
- 398 石田仁 (2006) : 富山県の森林帯における年間積雪期間の標高経度ー林床地表
399 面温度からの推定ー, *雪氷* 68, 489-496
- 400 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*
401 42, 101-107
- 402 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
403 性ー北海道北部・問寒別川流域の事例からー, *水利科学* 37(2), 64-81
- 404 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ー釜淵
405 森林理水試験地2号沢の例ー, *日本林学会東北支部会誌大会講演集* 35, 230-
406 231
- 407 Komatsu, H., Kume, T., Yoshifuji, N., Hotta, N. and Suzuki, M. (2007) :
408 Transpiration of a *Cryptomeria japonica* plantation in winter: analysis
409 based on one-year sap flow measurements, *Bulletin of the Tokyo*
410 *University Forests* 117, 1-9
- 411 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
412 定, *岩手大学農学部演習林報告* 36, 57-65
- 413 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
414 評価, *北海道の雪氷* 28, 45-48
- 415 倉島栄一・関基・加藤徹・向井田善朗 (1999) : 開地と森林内の根雪期間にお
416 ける底面融雪の推定と比較ー底面融雪の研究(2)ー, *農業土木学会論文集*

417 202, 87-94

418 López-Moreno, J.I. and Latron, J. (2007) : Influence of canopy density on
419 snow distribution in a temperate mountain range, Hydrological
420 Processes 22, 117-126

421 Lundquist, J.D., Dickerson-Lange, S.E., Lutz, J.A. and Cristea, N.C.
422 (2013) : Lower forest density enhances snow retention in regions with
423 warmer winters: a global framework developed from plot-scale
424 observations and modeling, Water Resources Research 49, 6356-6370

425 丸山岩三・猪瀬寅三 (1952) : 釜淵森林理水試験第 1 回報告, 林業試験場研究
426 報告 53, 1-44

427 文部科学省・気象庁 (2020) : 日本の気候変動 2020—大気と陸・海洋に関する
428 観測・予測評価報告書 (詳細版)

429 Motoyama, H. (1987) : Studies of basin heat balance and snowmelt runoff
430 models, Contributions from the Institute of Low Temperature Science
431 A35, 1-53

432 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
433 よびその水源林管理への応用の可能性, 水文・水資源学会誌 15, 461-471

434 村上茂樹・竹内由香里・庭野昭二 (2018) : 3 種類のスギ林と裸地における融
435 雪係数の比較, 水文・水資源学会誌 31, 292-301

436 村上茂樹・山野井克己 (2003) : 宝川森林理水試験地における積雪水量の高度
437 分布の長期変化, 水文・水資源学会誌 16, 131-141

438 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,
439 京大博士論文, 107pp

440 中井裕一郎・北原曜・坂本知己・斉藤武史・寺嶋智巳 (1993) : 森林における
441 降雪の遮断蒸発, 日本林学会誌 75(3), 191-200

442 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
443 田灌漑用ダムにおける将来の水収支の試算, 寒地土木研究所月報 667, 12-
444 19

445 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
446 業試験場研究報告 240, 1-251

447 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

448 野口正二・阿部俊夫 (2024) : 気候変動と積雪期の樹冠通過降水量, 水利科学

- 449 396, 102-119
- 450 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
451 文・水資源学会誌 7, 421-427
- 452 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, 林業
453 試験場東北支場年報 8, 204-211
- 454 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
455 解析, 林業試験場東北支場年報 16, 114-119
- 456 小野茂夫・川口利次 (1978) : 融雪経過に及ぼす森林伐採の影響—釜淵森林理
457 水試験地の例—, 日本林学会東北支部会誌大会講演集 29, 163-164
- 458 林野庁 (2024) : 令和 5 年度森林・林業白書
- 459 Saito, T., Kumagai, T., Tateishi, M., Kobayashi, N., Otsuki, K. and
460 Giambelluca, T.W. (2017) : Differences in seasonality and temperature
461 dependency of stand transpiration and canopy conductance between
462 Japanese cypress (Hinoki) and Japanese cedar (Sugi) in a plantation,
463 Hydrological Processes 31, 1952-1965
- 464 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
- 465 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
466 響, 雪氷 58(1), 3-10
- 467 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
468 本林学会誌 58, 416-423
- 469 武田宏 (2020) : 新潟県十日町市における森林内の積雪環境, 新潟県森林研究
470 所研究報告 42, 35-43
- 471 玉井幸治 (2020) : 山地森林域における積雪・融雪が森林流域からの流出特性
472 に及ぼす影響—標高による効果と森林樹木の被覆による効果—, 水利科学
473 376, 66-83
- 474 田村浩喜・野口正二・阿部俊夫・飯田真一 (2024) : 稀有な温暖少雪年を含む
475 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
- 476 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
477 域 (1959年1月~1978年12月), 林業試験場研究報告 311, 129-188
- 478 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
479 月, 10 冬季, 林業試験場研究報告 346, 105-140
- 480 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

481 月, 10 冬季, 林業試験場研究報告 348, 109-141
482 Winkler, R., Spittlehouse, D. and Boon, S. (2017) : Streamflow response
483 to clear-cut logging on British Columbia's Okanagan Plateau,
484 Ecohydrology 10(2), e1836. <http://doi.org/10.1002/eco.1836>
485 築場大将・石井吉之 (2019) : 融雪期における土壌乾湿状態の変動と河川流出
486 との関係, 日本水文科学会誌 49, 1-17
487

- 488 図 1 釜淵森林理水試験地の位置および地形
489
- 490 写真 1 1970 年頃の冬季の釜淵試験地
491 森林総研所蔵（撮影者不明）。4 号沢尾根より撮影。
492
- 493 写真 2 (A) 融雪期直前の 1 号沢尾根（2022 年 3 月 1 日），(B) 融雪盛期の
494 1 号沢（2022 年 4 月 6 日）
495
- 496 図 2 融雪期における 1 号沢のハイドログラフの一例（1965 年）
497
- 498 図 3 1 号沢の融雪流出量、流出開始日および終了日と重回帰分析で選択され
499 た説明変量との関係
500
- 501 図 4 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
502 差の年代による違い（平均±SD）
503 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
504 検定， $p < 0.05$ ）。本図は CC ライセンス（CC BY-NC-ND 4.0）に基づき
505 阿部ら（2023a）より引用した。
506
- 507 図 5 1 号沢に対する 2・3 号沢の融雪期ピーク流量比の年代による変化
508 流量比は，流域面積比を乗じて補正した値。異なるアルファベットは平均
509 値が有意に異なることを示す（Tukey HSD 検定、 $p < 0.05$ ）。
510
- 511 図 6 年代ごとの 1 号沢と 2 号沢の旬流出量の比較
512 *，**：それぞれ $p < 0.05$ ， $p < 0.01$ で有意差があることを示す（Wilcoxon
513 符号付順位和検定）。
514
- 515 図 7 年代ごとの 1 号沢と 3 号沢の旬流出量の比較
516 *，**：それぞれ $p < 0.05$ ， $p < 0.01$ で有意差があることを示す（Wilcoxon
517 符号付順位和検定）。
518
- 519 図 8 気象露場における最大積雪深と年平均気温の経年変化

520 平均気温は、日最高・最低気温や気象庁観測所からの推定値を含む。

521

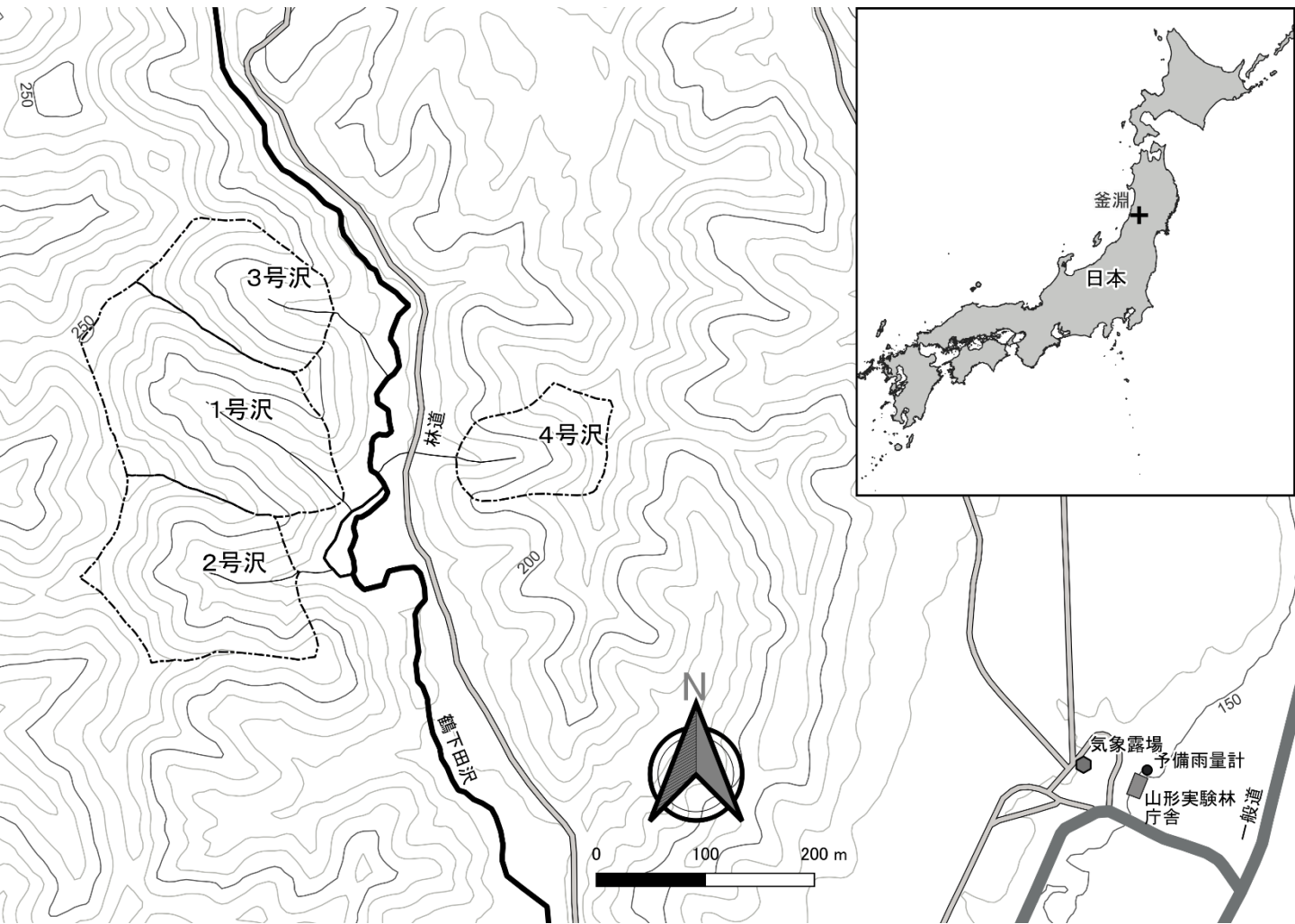


図1 釜淵森林理水試験地の位置および地形



写真2 (A) 融雪期直前の1号沢尾根 (2022年3月1日) ,
(B) 融雪盛期の1号沢 (2022年4月6日)

表-1. 1号沢の融雪流出量，融雪流出の開始日および終了日に対する
ステップワイズ重回帰分析の結果

目的変量	説明変量	標準偏回帰係数	変量 p	重回帰 R^2	重回帰 p
融雪流出量	年最大積雪深	0.744	<0.001	0.875	<0.001
	春季平均気温	-0.185	0.005		
	冬季平均気温	-0.157	0.010		
流出開始日	春季平均気温	-0.567	<0.001	0.322	<0.001
流出終了日	年最大積雪深	0.556	<0.001	0.661	<0.001
	春季平均気温	-0.392	<0.001		

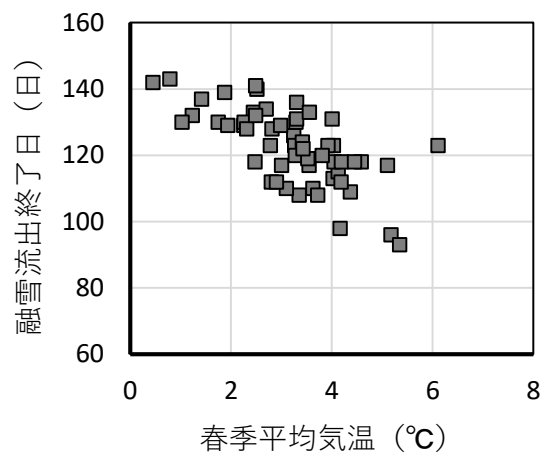
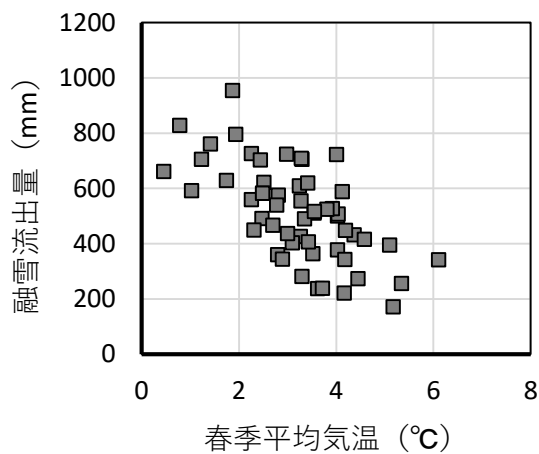
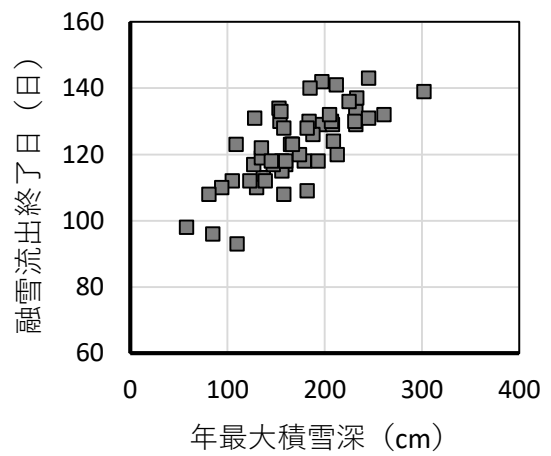
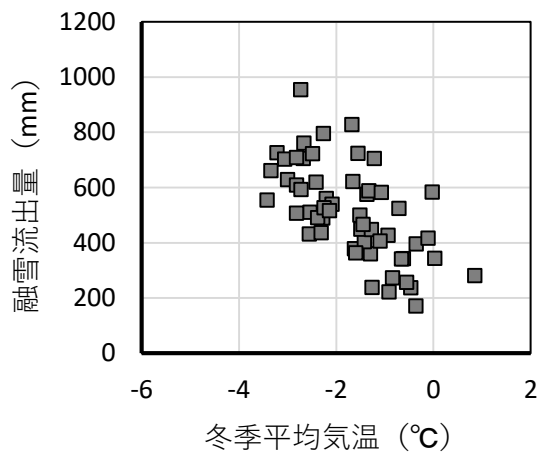
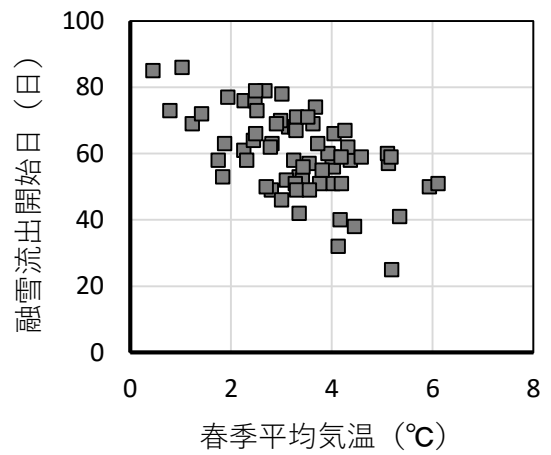
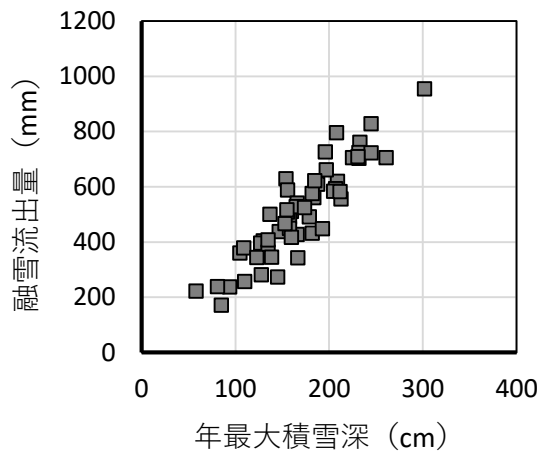


図3 1号沢の融雪流出量，流出開始日および終了日と重回帰分析で選択された説明変量との関係

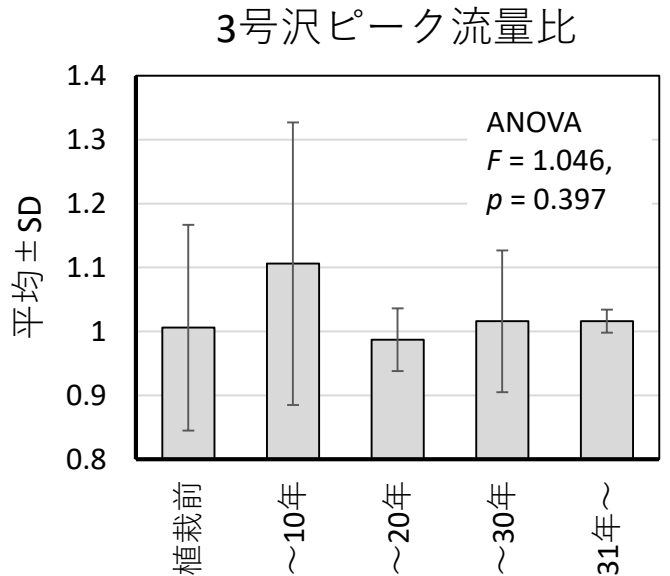
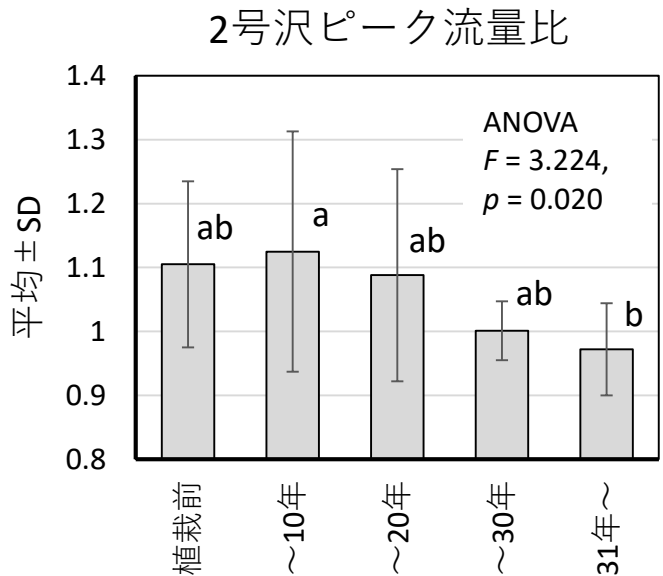


図5 1号沢に対する2・3号沢の融雪期ピーク流量比の年代による変化

流量比は、流域面積比を乗じて補正した値。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、 $p < 0.05$)。

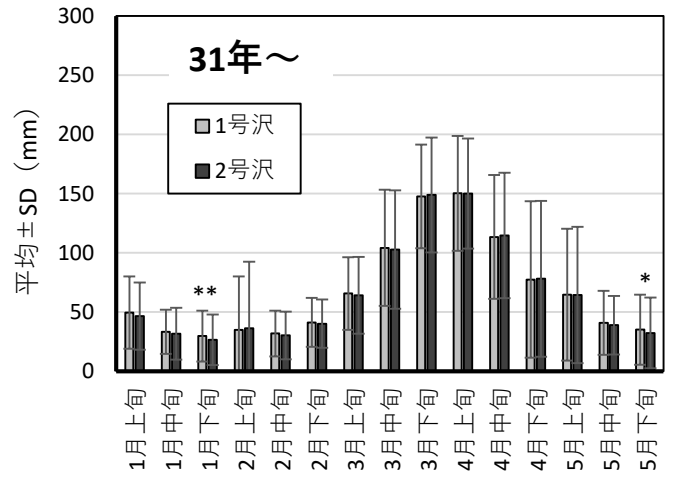
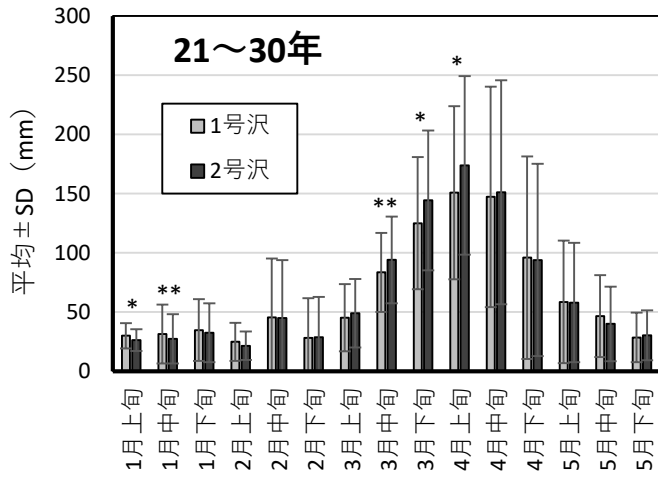
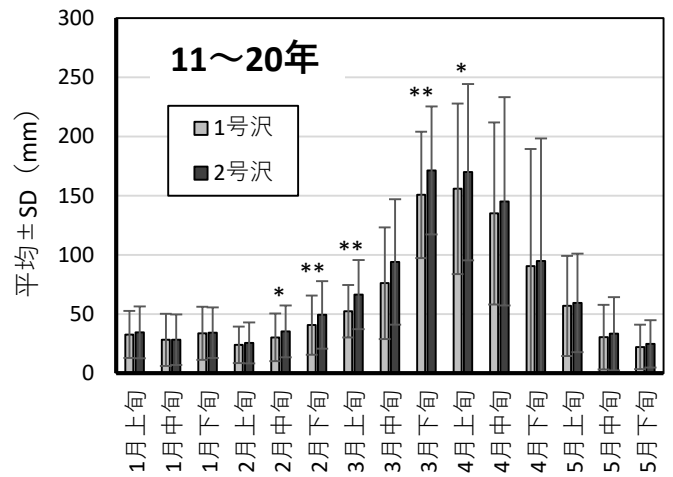
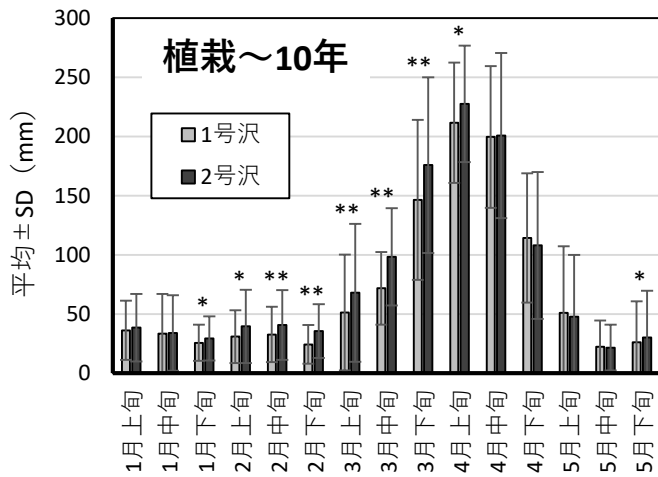
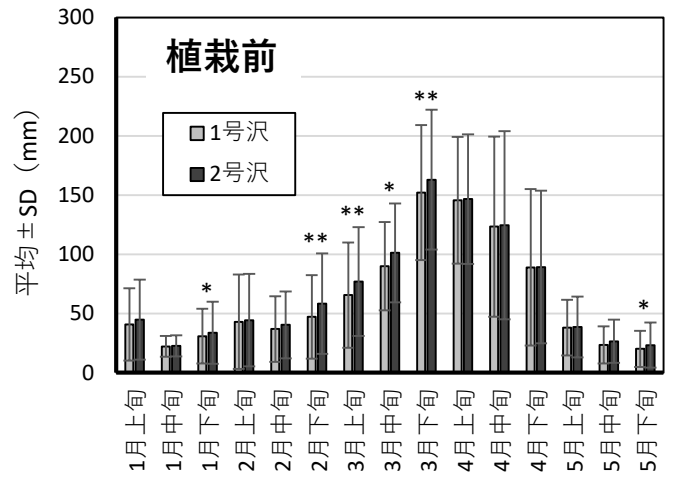
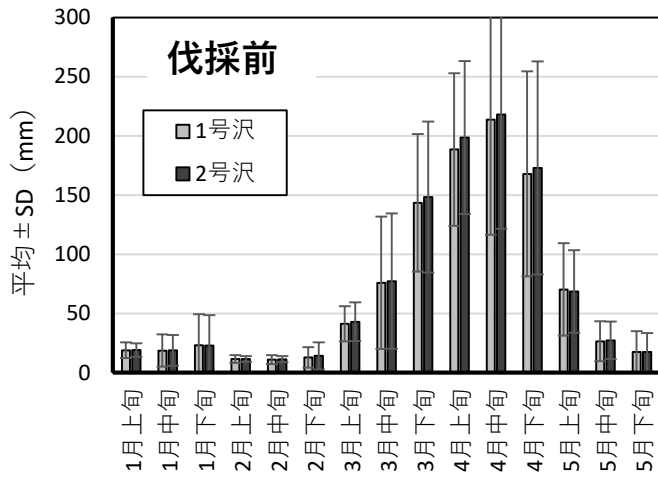


図6 年代ごとの1号沢と2号沢の旬流出量の比較

*, ** : それぞれ $p < 0.05$, $p < 0.01$ で有意差があることを示す (Wilcoxon符号付順位和検定)。

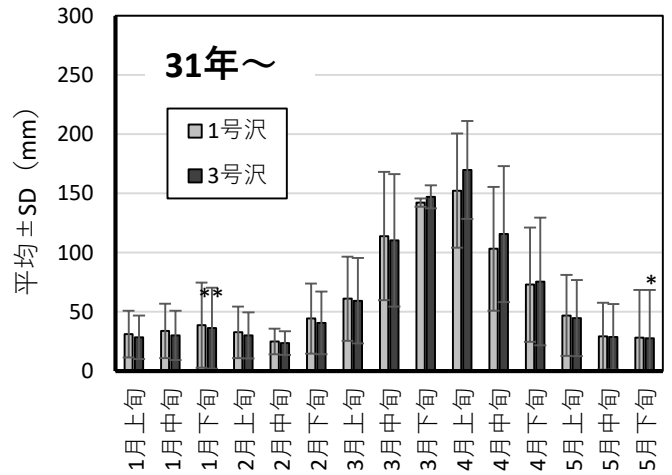
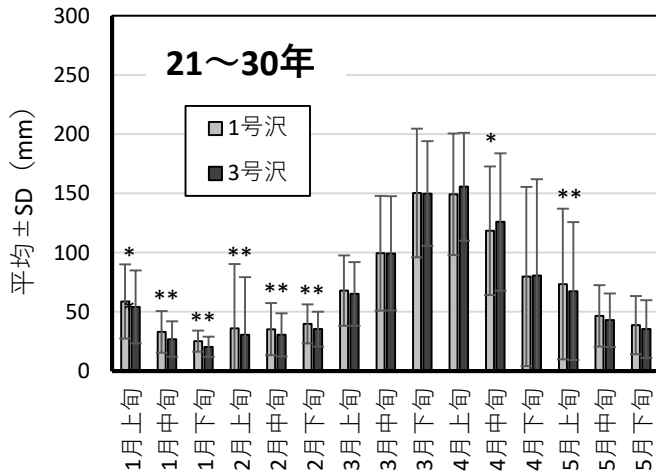
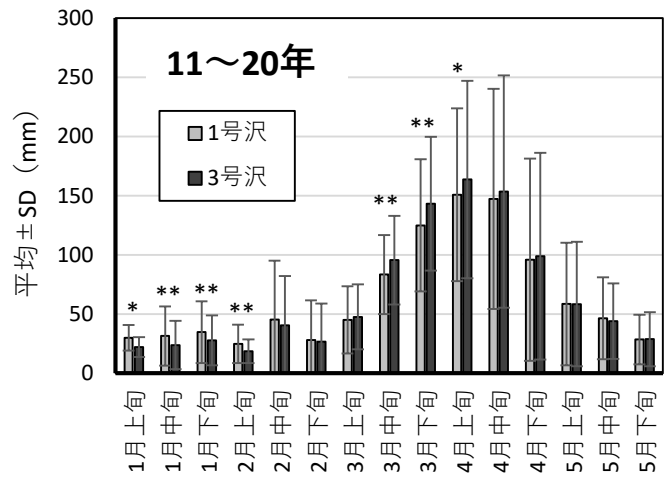
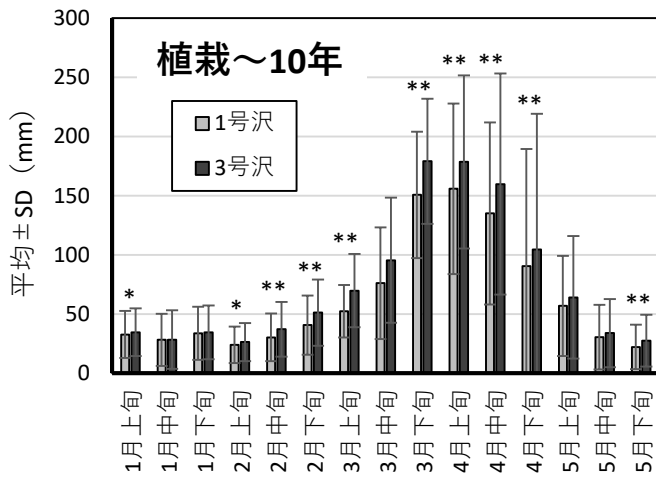
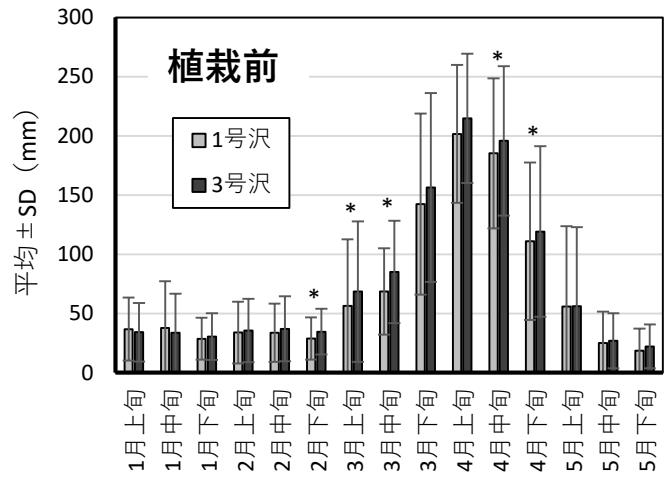
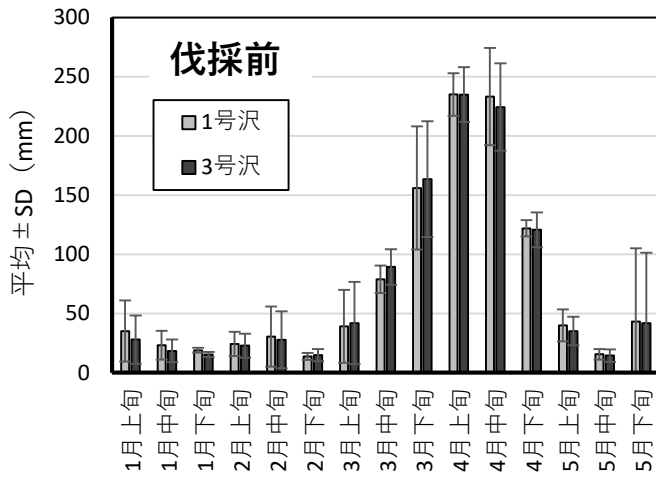


図7 年代ごとの1号沢と3号沢の旬流出量の比較

*, ** : それぞれ $p < 0.05$, $p < 0.01$ で有意差があることを示す (Wilcoxon符号付順位和検定)。



写真1 1970年頃の冬季の釜淵試験地

森林総研所蔵（撮影者不明）。4号沢尾根より撮影。

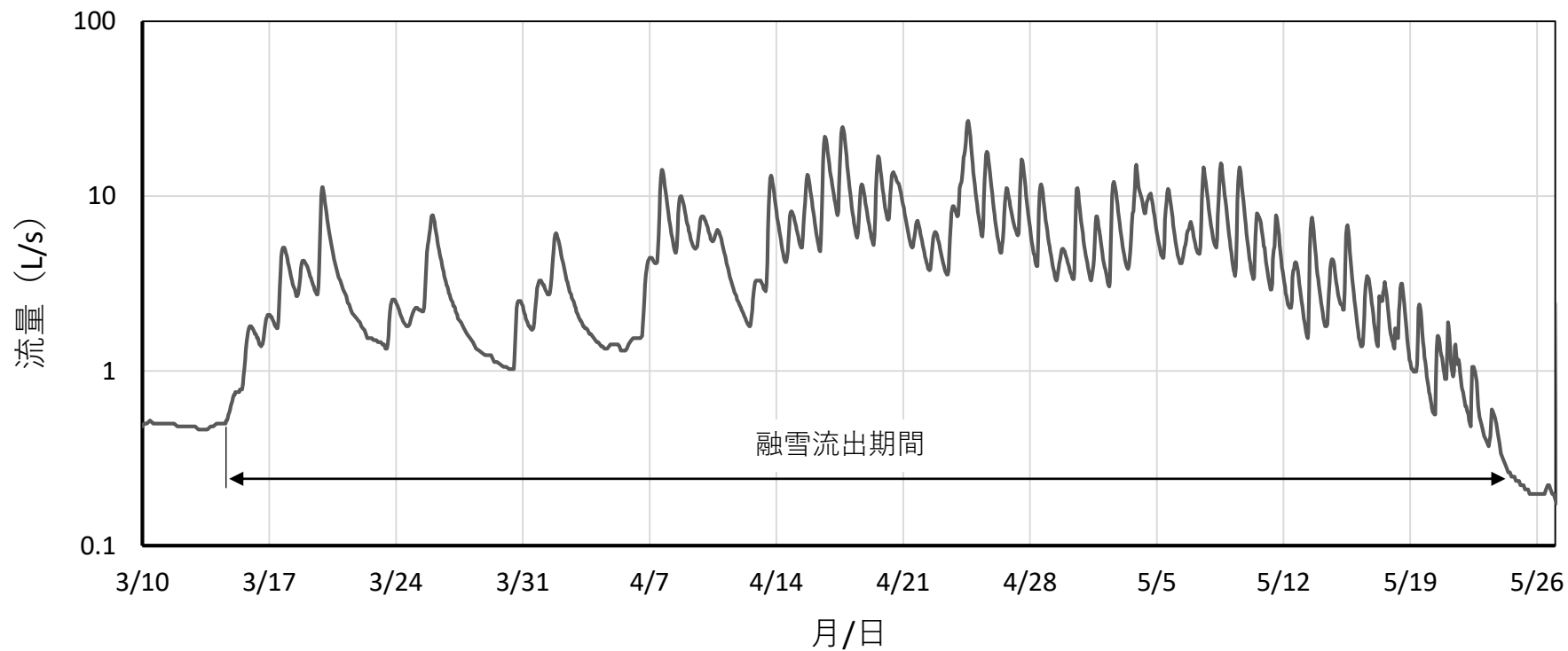


図2 融雪期における1号沢のハイドログラフの一例 (1965年)

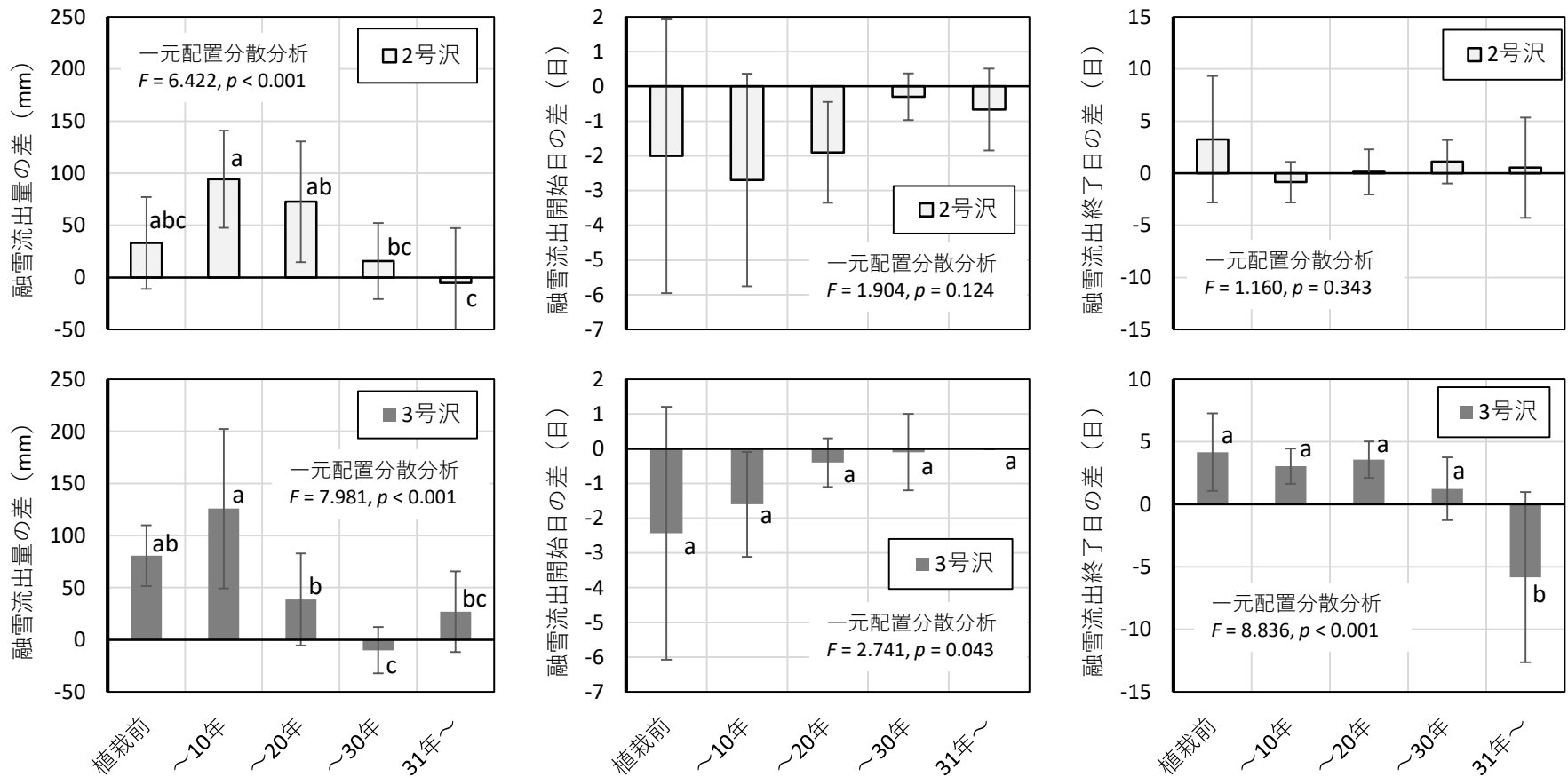


図4 伐採前を基準とした融雪流出量の差，融雪流出期間の開始日・終了日の差の年代による違い（平均±SD）
異なるアルファベットは平均値が有意に異なることを示す（Tukey HSD検定， $p < 0.05$ ）。本図はCCライセンス（CC BY-NC-ND 4.0）に基づき阿部ら（2023a）より引用した。

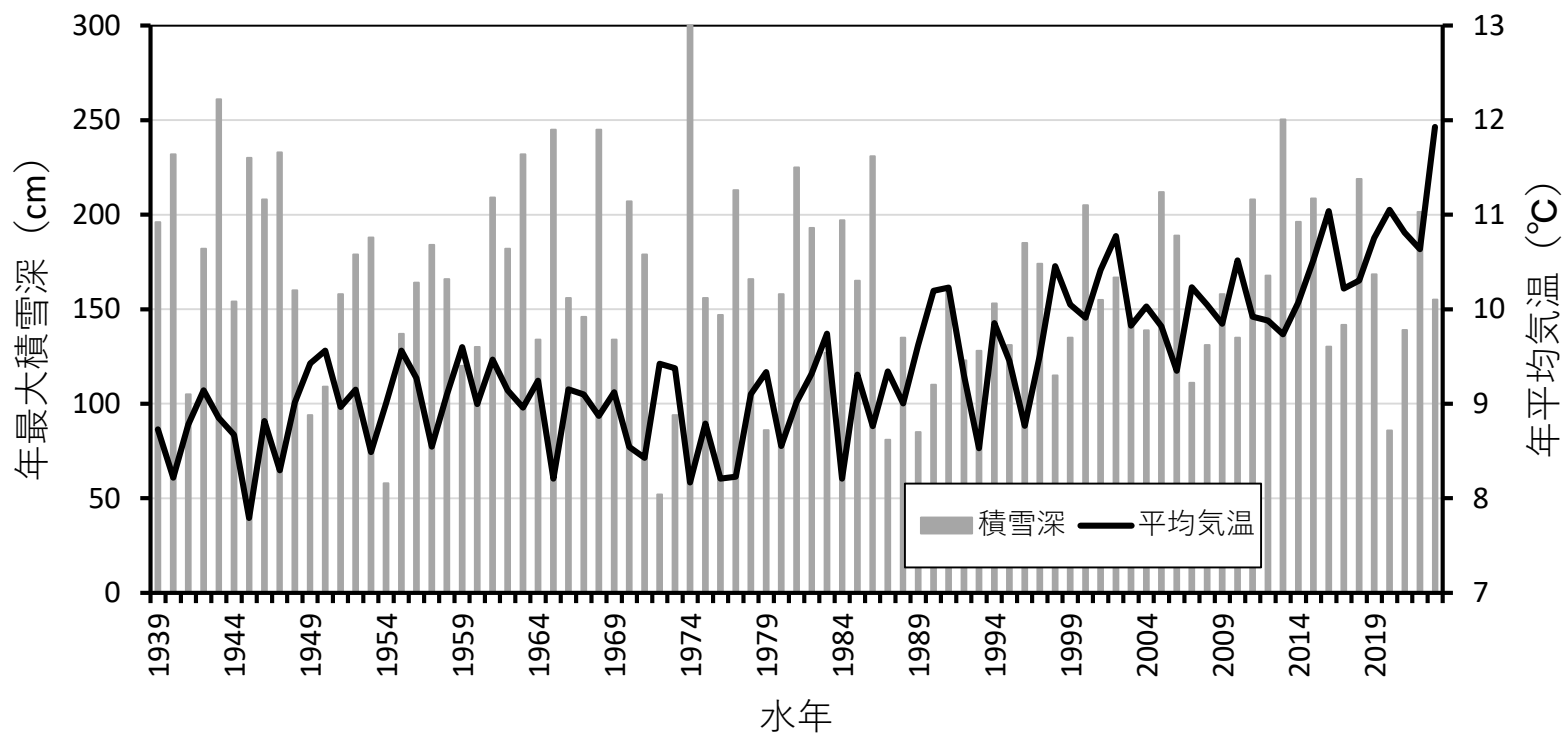


図8 気象露場における最大積雪深と年平均気温の経年変化
 平均気温は、日最高・最低気温や気象庁観測所からの推定値を含む。

