

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K06134

研究課題名（和文）多雪地域の森林における間伐後の水・土砂流出過程の解明

研究課題名（英文）The impact of small-scale practice on water and fine sediment runoff in a forested watershed in a heavy snowfall area

研究代表者

阿部 俊夫（Abe, Toshio）

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等

研究者番号：10353559

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：多雪地域の釜淵森林理水試験地において、2018年に行われた小規模施業による水・土砂流出量などの影響を調べた。本施業の伐採率は極めて小さく、水流出量については明らかな影響は認められなかった。ただし、浮遊土砂流出については、谷近くへ作業道を開設した4号沢で施業翌年まで流出量の多い状況が見られた。水の安定同位体比から降水の平均滞留時間を算出したところ192日であった。降雨イベントの解析では、総流出量に占める地中水成分は約28%であった。

さらに長期データを用いた解析から、皆伐は融雪流出量を増加させるが、スギ植栽から約30年で元に戻ることも明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工林の整備では間伐が欠かせないが、間伐のような小規模施業が水・土砂流出へ与える影響はこれまで十分に解明されてこなかった。本研究では、水流出への影響がほとんど無い小規模施業でも、谷近くでの作業道開設により浮遊土砂流出が一時的に増加することを明らかにした。伐採そのものよりも、作業道の設計に注意が必要であることを示している。また、皆伐の場合であるが、春季の水資源として重要な融雪流出量の増加が約30年も継続することを初めて明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The impact of small-scale practices in 2018 on water and fine sediment runoff were investigated in the Kamabuchi Experimental Watershed in a heavy snowfall area. No obvious impact was observed on water runoff because thinning rate of this practice was very small, and, However, suspended sediment runoff increased in No. 4 watershed, where a spur road was constructed near the valley, until the following year of the practice. The average residence time of precipitation was estimated at 192 days based on stable isotope ratios of water. The groundwater component of total runoff was approximately 28% during the rainfall event.

Furthermore, analysis using long-term data showed that clearcutting increased snowmelt runoff, but that it returns to previous level about 30 years after planting.

研究分野：森林水文学

キーワード：小規模施業 作業道開設 水流出 浮遊土砂 安定同位体比 融雪流出

### 1. 研究開始当初の背景

間伐などの森林施業には水流出を増やす効果が期待できる<sup>1)</sup>。多雪地域では融雪水が春季の重要な水資源となっているが、間伐や帯状伐採で融雪水をより長期間利用できる可能性も指摘されている<sup>2),3)</sup>。温暖化で融雪水が減少すると予想される地域では、このような施業は水資源対策の一つになり得る。一方で、施業は地表かく乱を伴うことも多い。近年は作業道を開設して、林業機械で木材を搬出することが一般的であり、土砂流出や水質悪化も懸念される。このような中、多雪地域で長期水文観測を行っている釜淵森林理水試験地で、作業道開設を伴う施業が実施された。これを好機とし、施業が多雪地域の水・土砂流出におよぼす影響の解明を試みた。

### 2. 研究の目的

本研究では、多雪地域の森林流域において、森林施業が水・土砂流出におよぼす影響の解明を主な目的とした。特に、冬季の積雪量および春季の融雪流出量などに関する影響を明らかにする。また、施業が溪流の浮遊土砂流出におよぼす影響についても明らかにする。なお、今回の施業では、施業位置が尾根沿い(2号沢)、谷近く(4号沢)と分かれており、施業位置の違いがどう影響するかにも着目して解析をおこなった。

### 3. 研究の方法

#### (1) 調査地

釜淵森林理水試験地(以下、釜淵試験地)は、山形県真室川町の国有林内に位置する。1939年に1号沢(3.06ha)と2号沢(2.48ha)の観測が開始され、1961年から3号沢(1.54ha)、4号沢(1.12ha)が追加された。基準流域の1号沢以外は一度皆伐された後、スギが植栽された。現在は、スギの他、ブナやコナラなどの落葉広葉樹も生育している。地質は第三期凝灰岩および頁岩質凝灰岩で、地形は急峻である。冬季の最大積雪深は2mを超える年もある。

本研究で対象とした施業は2018年10月下旬に2号沢(尾根沿い)と4号沢(谷近く)で実施された。両流域とも作業道がそれぞれ1本開設され、その周囲で小規模な間伐が行われた(図-1)。当初予定された列状間伐(1伐3残)から大幅に縮小されており、伐採面積率は2号沢4.3%、4号沢6.3%、材積伐採率は2号沢3.5%、4号沢4.4%と推定された。

#### (2) 観測および試料採取

水文観測は、従来からの観測<sup>4)</sup>を継続した。流出量は、45°三角堰に水位計を設置して観測した。降水量は、試験地から約1km離れた気象露場に雨雪量計を設置して観測した。気象露場では、ほかに気温、積雪深などの観測や、降水試料の採取も実施した。

溪流の浮遊土砂については、2018年10月より、濁度計と自動採水器を併用して観測を行った。濁度計は全流域に設置したが、自動採水器は4号沢と1号沢に設置し、主に降雨による出水時に溪流水の試料を採取した。試料は、一部を同位体や水質分析用に取り分けた後、吸引ろ過により浮遊土砂濃度を分析した。

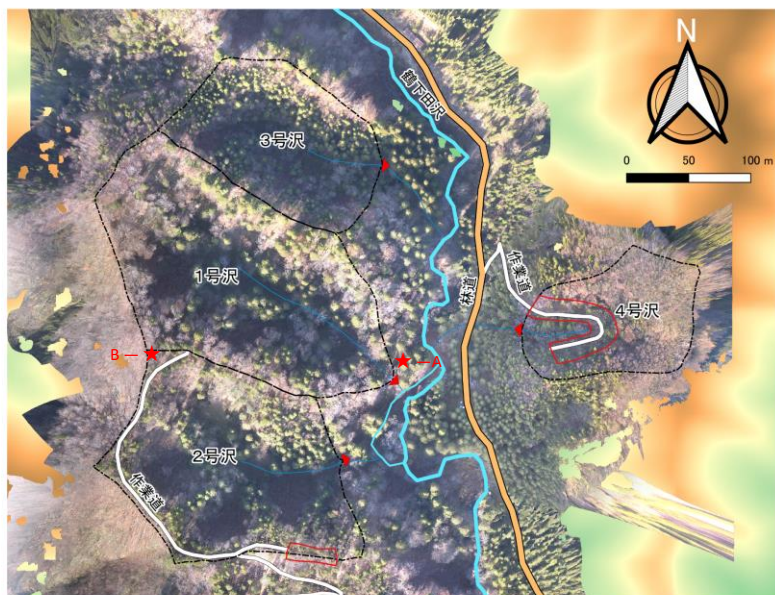


図-1. 施業後の空中写真(2018年11月26-27日、小川泰浩撮影)  
赤線で囲った箇所が、おおよその間伐区域である。

#### (3) 冬季の積雪調査

融雪流出に関わる積雪深分布を調べるため、冬季にUAVを用いた写真測量(SfM解析)を試みた。積雪深は、SfM解析で求めたDSMと無積雪期のDEMとの比較から算出した。また、別途、タイムラプスカメラやスノーサンプラーを用いた積雪調査も併せて実施した。

#### (4) 安定同位体比および水質

降水や溪流水などの試料について、水移動のトレーサーとして、水素・酸素の安定同位体比をH<sub>2</sub>O(水/水蒸気)同位体比アナライザーで分析した。また、イオンや溶存炭素・窒素など水質の

分析も行った。水質分析には、イオンクロマトグラフシステム、全有機炭素計、ICP 発光分光分析装置などを用いた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 水流出量への影響

施業前後で水流出量に変化があるかを、施業前5年間、施業後4年間の月単位データを用いて解析した。基準流域1号沢に対する流出量比を月ごとに比較したところ、2号沢では8月の流出量比が施業後で高かったが (Mann-Whitney  $U$ 検定、 $p < 0.05$ )、これは施業のない3号沢にも共通する傾向であった。8月の流出量比は、理由は不明であるが経年的に漸増しており、施業の影響ではないと結論された。4号沢では、6月の月流出量比が施業後で高かった (Mann-Whitney  $U$ 検定、 $p < 0.05$ )。経年変化を調べると、4号沢では降水量の多い年に流出量比が高くなるようであった。4号沢は以前より漏水が指摘されており、雪の影響がない時期では、月流出量比と月降水量に正の相関がある ( $r = 0.491$ ,  $p < 0.001$ )。これは、降雨時のように多量の水が流出する状況では、漏水の影響が小さくなることを意味している。したがって、施業前後の4号沢流出量比の違いも、施業に起因したものではなく、降水量の違いを反映したものと考えられる。さらに、1年を厳寒期 (12~2月)、融雪期 (3~4月)、暖候期 (6~10月) の3つに区分し、時期ごとにも1号沢と他流域との月流出量の関係を調べてみた (図-2)。しかし、共分散分析 (ANCOVA) の結果、いずれの時期も、施業前後での差は認められなかった ( $p > 0.05$ )。

本数間伐率50%などの強度間伐では水流出量の増加が報告されているが<sup>1), 5), 6), 7)</sup>、より小規模な施業では研究事例は少ない。本数間伐率32%<sup>8)</sup>と17%<sup>9)</sup>の施業では流出量が増加したという報告もあるが、材積間伐率6.35%の施業では直接流出やピーク流出に変化は認められていない<sup>10)</sup>。本試験地の施業は、材積伐採率3.5~4.4%という極めて小規模なものであり、流域スケールの流出量にはっきりした変化をおよぼすほどではなかったと考えられる。

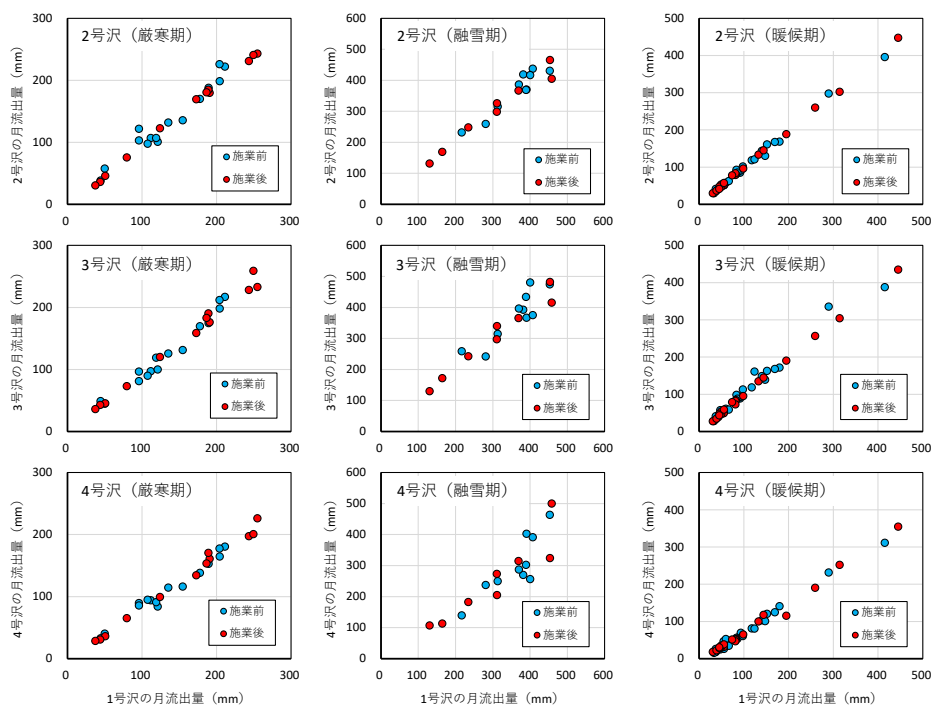


図-2. 厳寒期, 融雪期, 暖候期における各流域と1号沢の月流出量の関係

##### (2) 浮遊土砂流出量への影響

谷近くを施業した4号沢では、施業の行われた2018年秋、特に施業期間中に著しい浮遊土砂流出が生じていたが、尾根沿いを施業した2号沢では顕著な浮遊土砂流出は認められなかった。施業のない3号沢を基準として、2号沢、4号沢の浮遊土砂流出量を年ごとに比較すると、4号沢では翌2019年までは大雨時などに浮遊土砂流出量が多い傾向であったが、2020年以降は施業前と同様な関係に戻っていた (図-3)。一方、2号沢では、観測期間中、浮遊土砂流出量に明らかな変化は認められなかった。

未舗装路の開設が溪流への土砂流出をもたらすことは知られており<sup>11), 12)</sup>、4号沢での浮遊土砂流出量増加も源頭部近くへ作業道を開設したことが原因と考えられた。ただし、浮遊土砂流出も翌々年には元に戻っており、これにはリターや植生による作業道の被覆増加<sup>13), 14)</sup>が影響したと推察される。2号沢作業道でも、施業当年や翌年には濁水発生があったと思われるが、作業道が溪流から離れているため、濁水は林床でろ過されたと推察された<sup>15), 16)</sup>。

なお、1号沢は、浮遊土砂濃度が1000mg/Lを超えることがあり、人為的攪乱のない森林流域としては特異的に土砂流出が多い<sup>17)</sup>。この原因ははっきりしないが、溪岸侵食・小規模崩壊や溪流内の倒木による土砂貯留が多いことが指摘されている<sup>18)</sup>。本試験地は傾斜が急で積雪も多いため、雪崩が発生することがあり、これが土砂生産に影響している可能性も考えられる。

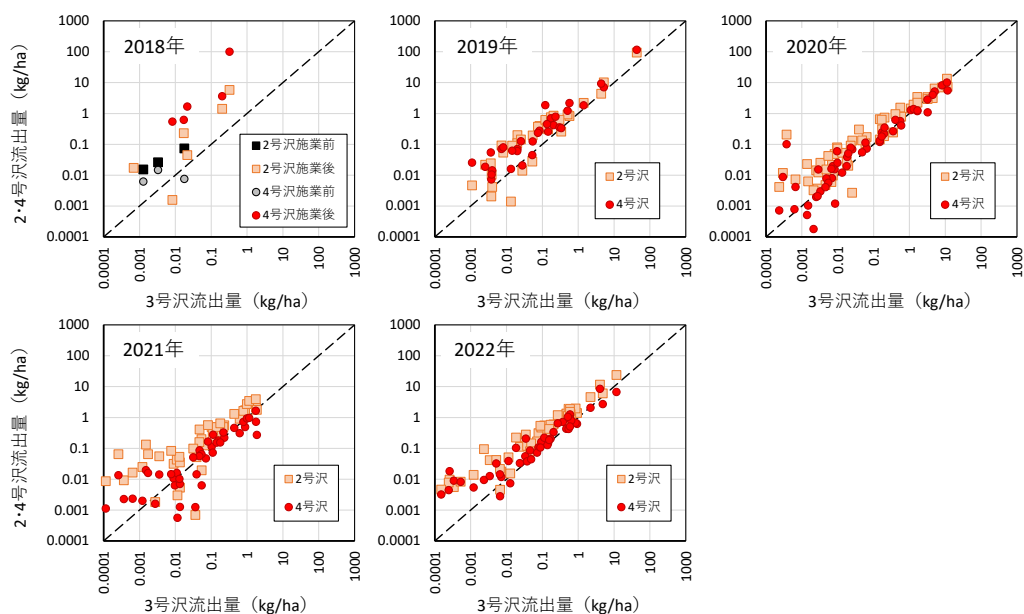


図-3. 3号沢に対する2・4号沢の降雨イベント時の浮遊土砂流出量の関係  
総降水量5 mm以上の降雨イベントを対象とした。図中の破線は $Y=X$ のラインを表す。

### (3) 冬季の積雪調査

UAVによる積雪深推定については、標定点を設置できる箇所が少なく、冬季は電波状態も悪いという問題があり、成功には至っていない。標定点は3つ設けたものの、2021年と2022年に実施したGPS測量では、座標が水平方向に6~18cmずれており、標定点の積雪深もSfM推定値と実測値に最大で約1mの誤差が生じていた。このため、比較的条件的の良い2号沢でも、標定点のない左岸側斜面では積雪深の推定値がマイナスになった。積雪深分布の推定には、高精度な位置情報を持つRTK搭載UAVが必要と考えられる。

積雪深は、谷部スギ林(図-1のA地点)と尾根部落葉広葉樹林(B地点)にも雪尺を設置してタイムラプスカメラで撮影を試みた。雪と低温によるカメラのトラブルが多かったが、2020/2021年冬季に関しては観測に成功した(図-4)。同じ降雪量であれば、落葉広葉樹林の方が、スギ林より積雪深は大きいはずであるが<sup>3)</sup>、B地点は尾根上で極めて風が強く、雪が飛ばされている様子であった。消雪日は、尾根部落葉広葉樹林は気象露場より7日早かったが、谷部スギ林では逆に14日も遅かった。これは、日当たり具合や積雪量の違いに起因すると考えられる。

### (4) 水の安定同位体比および水質

降水の同位体比 $\delta^{2}\text{H}$ と $\delta^{18}\text{O}$ は、世界全体で見れば、 $\delta^{2}\text{H} = \delta^{18}\text{O} + 10$ で近似されるが<sup>19)</sup>、式の切片はd-excessと呼ばれ、日本では冬に大きく、夏は小さくなる<sup>20)</sup>。降水と河川水のd-excessを用いて、水の平均滞留時間を推定したところ、1号沢で191.7日(約6.4ヶ月)と推定された。また、融雪期には、渓流水の $\delta^{2}\text{H}$ は夕方の流量増加時に大きく、朝の流量減少時に小さくなる日周変化を示しながら、徐々に上昇することが明らかとなった。これは、積雪が融解と再凍結を繰り返すうちに、残った積雪の同位体比が大きくなっていくためと考えられる<sup>21)</sup>。降雨時の流出では、地中流成分が約28%に止まり、降雨成分が比較的速やかに流出することも明らかとなった。

水質については、4号沢では2019年は他の年に比べ $\text{NO}_3^-$ 負荷量が大きいのに見られたが、1号沢では年による明らかな違いは見られなかった。DOC負荷量は、1号沢、4号沢とも、年による違いは認められなかった。得られた試料が少ないため、明確なことは言えないが、4号沢では施業により谷近くの樹木が減少しており、一時的に $\text{NO}_3^-$ 吸収量が減少した可能性も考えられる。また、日当たりの改善で地温が上昇し、枝条など有機物の分解が促進されることも想定されるが、

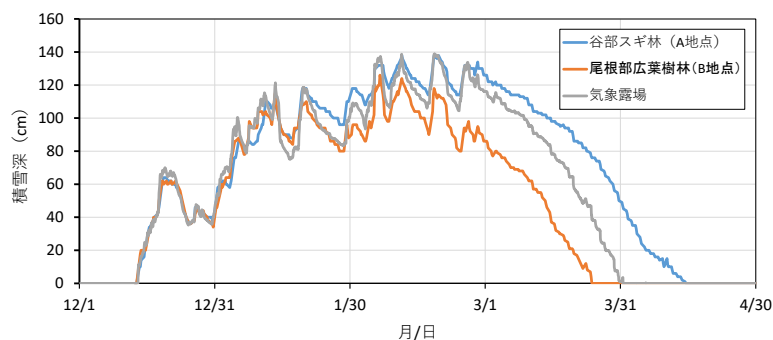


図-4. 2020/2021年冬季の積雪深の変化

DOC 負荷量の増加が認められないことから、残滓による大きな影響はなかったと考えられる。

(5) 皆伐が春季の融雪流出におよぼす影響

当初の目的にはなかったが、皆伐が春季の融雪流出におよぼす影響についても、既存の長期データを利用して統計的な解析を行った。ここでは、融雪流出量、融雪流出の開始日・終了日の変化を解析対象とし、皆伐により生じた変化は、伐採前における伐採流域（2号沢、3号沢）と基準流域（1号沢）の関係式から予測される値と実際の観測値との差で評価した。

伐採流域の融雪流出量は、先行研究<sup>22), 23), 24)</sup>と同様、皆伐後に増加したが、スギ植栽から30年ほどで伐採前と同程度に戻っていた（図-5）。融雪流出量の増加は、年降雪量が多く、春季平均気温の高い年ほど大きく現れる傾向のあることも明らかとなった。森林では樹冠が降雪を遮断するため、無立木地に比べて積雪量は減少するが<sup>25)</sup>、この差が年降雪量の多い年ほど大きくなるためと考えられる。さらに、ブナは融雪期から開葉を始めるため、春季の気温が高い年では蒸散による影響も生じると考えられる。融雪流出の開始日も、皆伐後に早まる傾向であったが、約30年で元に戻っていた（図-5）。開始日が早まったのは、皆伐によって積雪面に到達する日射量が増大したため<sup>26)</sup>と考えられる。終了日には、統計的な違いは見られなかった。皆伐後の融雪流出量は、植栽から8年<sup>27)</sup>や14年<sup>23)</sup>でも多い状態が継続していたという報告はあるものの、いつ元に戻るかはよく分かっていなかった。蓄積量は30年では回復していないと考えられるが、スギの葉量は植栽から20年程度でピークに達することが知られている<sup>28), 29)</sup>。融雪流出が約30年で元に戻ったのは、森林の葉量増加によって、降雪遮断が回復したためと推察された。

<引用文献>

- 1) Kubota T et al. (2018) Bull FFPRI 445: 63-73
- 2) 志水俊夫・吉野昭一 (1996) 雪氷 58: 3-10
- 3) 阿部俊夫ら (2016) 東北森林科学会誌 21:6-10
- 4) 久保田多余子ら (2023) 森林総研研報 464: 305-335
- 5) 山本哲也・池田作太郎 (2005) 広島県林技セ研報 37: 15-33
- 6) Dung BX et al. (2012) J Hydrol 444-445: 51-62
- 7) 金子智紀ら (2019) 東北森林科学会要旨集 24: 42
- 8) 武田育郎ら (2009) 農業農村工学会論文集 263: 41-48
- 9) 白木克繁ら (2020) 水・水会誌 33: 47-55
- 10) Abu Farah Md Anisur Rahman et al. (2005) Pak J Biol Sci 8: 259-266
- 11) 佐藤弘和・寺澤和彦 (2004) 日林誌 86: 349-357
- 12) Ziegler AD et al. (2004) Agric Ecosyst Environ 104: 145-158
- 13) 初磊ら (2010) 日林誌 92: 261-268
- 14) 海虎ら (2012) 日林誌 94: 167-174
- 15) 大野泰宏・落合博貴 (2010) 日林誌 92: 171-175
- 16) 阿部俊夫ら (2020) 東北森林科学会誌 25: 1-9
- 17) 佐藤弘和 (2006) 水・水会誌 19: 401-412
- 18) 村上亘ら (2010) 地形 31: 171-192
- 19) Craig H (1961) Science 133: 1702-1703
- 20) 芳村圭・一柳錦平 (2009) 水・水会誌 22: 262-276
- 21) 橋本重将ら (2002) 雪氷 64: 163-172
- 22) 小野茂夫・川口利次 (1975) 林試東北支場年報 16: 114-119
- 23) Ide et al. (2013) For Ecol Manag 304: 482-491
- 24) Winkler R et al. (2017) Ecohydrology 10: e1836. <http://doi.org/10.1002/eco.1836>
- 25) 中井裕一郎 (1996) 京大博士論文
- 26) 太田岳史ら (1990) 雪氷 52: 289-296
- 27) 野村睦ら (2011) 雪氷研究大会要旨集
- 28) 只木良也 (1976) 日林誌 58: 416-423
- 29) 村上茂樹 (2002) 水・水会誌 15: 461-471

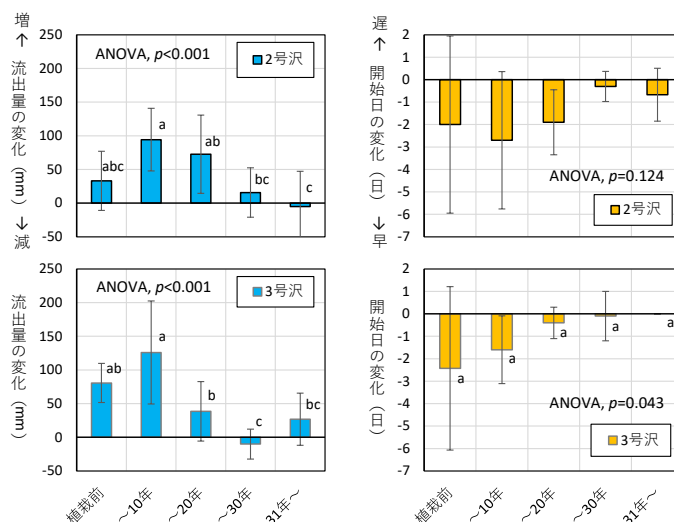


図-5. 皆伐による融雪流出量と流出開始日の変化（平均±SD）  
異なるアルファベットは平均値異なることを意味する（Tukey HSD検定、 $p < 0.05$ ）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 阿部俊夫、久保田多余子、野口正二、細田育広	4. 巻 105
2. 論文標題 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およぼす影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本森林学会誌	6. 最初と最後の頁 1～10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4005/jjfs.105.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 久保田多余子、阿部俊夫、小川泰浩、伊藤優子、釣田竜也ほか	4. 巻 74
2. 論文標題 釜淵森林理水試験地における降水・河川水の酸素・水素安定同位体比の特徴	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 関東森林研究	6. 最初と最後の頁 97～100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 阿部俊夫、久保田多余子、小川泰浩、延廣竜彦、野口享太郎	4. 巻 105
2. 論文標題 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	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本森林学会誌	6. 最初と最後の頁 338-343
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4005/jjfs.105.338	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 阿部俊夫、久保田多余子、野口正二、細田育広
2. 発表標題 皆伐後の森林回復過程における融雪期の流出 釜淵森林理水試験地での解析
3. 学会等名 第134回日本森林学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 久保田多余子、阿部俊夫、小川泰浩、伊藤優子、釣田竜也ほか
2. 発表標題 多雪地域にある釜淵森林理水試験地における積雪・融雪期の流出機構
3. 学会等名 第134回日本森林学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 久保田多余子、阿部俊夫、小川泰浩、伊藤優子、野口享太郎ほか
2. 発表標題 釜淵森林理水試験地における降水・河川水の酸素・水素安定同位体比の特徴
3. 学会等名 第12回関東森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部俊夫、久保田多余子、小川泰浩、村上亘
2. 発表標題 釜淵森林理水試験地における間伐から3年目までの浮遊土砂流出量
3. 学会等名 第26回東北森林科学会大会（オンライン）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 延廣竜彦、阿部俊夫
2. 発表標題 作業道開設を伴う間伐における作業道および間伐斜面からの濁水流出
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川泰浩、阿部俊夫、久保田多余子、延廣竜彦、村上亘
2. 発表標題 森林小流域においてUAV写真測量により推定された積雪深の検討
3. 学会等名 日本緑化工学会大会研究交流発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 阿部俊夫、久保田多余子、小川泰浩、延廣竜彦、野口享太郎
2. 発表標題 多雪地域における小規模施業前後の月流出量の比較
3. 学会等名 第28回東北森林科学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 阿部俊夫、久保田多余子、小川泰浩、延廣竜彦、野口享太郎、村上亘
2. 発表標題 釜淵森林理水試験地における小規模施業後の浮遊土砂流出
3. 学会等名 第135回日本森林学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 久保田多余子、阿部俊夫、小川泰浩、村上亘
2. 発表標題 釜淵森林理水試験地における間伐が融雪水量および融雪期間に及ぼす影響
3. 学会等名 第131回日本森林学会大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 阿部俊夫、久保田多余子、小川泰浩、村上亘
2. 発表標題 釜淵森林理水試験地における間伐後1年間の浮遊土砂流出
3. 学会等名 第131回日本森林学会大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	久保田 多余子  (Kubota Tayoko)  (70353670)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等   (82105)	
研究分担者	小川 泰浩  (Ogawa Yasuhiro)  (50353628)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等   (82105)	
研究分担者	釣田 竜也  (Tsurita Tatsuya)  (30353775)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等   (82105)	2020年度まで
研究分担者	伊藤 優子  (Ito Yuko)  (60353588)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等   (82105)	2021年度より参画(釣田から交代)

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	延廣 竜彦  (Nobuhiro Tatsuhiko)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等  (82105)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関