

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K13433

研究課題名（和文）水の滞留時間に着目した高山域の雪氷融解に伴う水資源涵養過程の解明

研究課題名（英文）Recharge process of water resources associated with snowmelt in alpine areas focusing on the residence time of water

研究代表者

榊原 厚一（Sakakibara, Koichi）

信州大学・学術研究院理学系・助教

研究者番号：40821799

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）：本研究は、高山帯源流域の雪氷融解に伴う水涵養・流出機構を明らかにすることを目的とし、森林限界を超える高山地域を対象に水文観測、水試料の採取、それらのトレーサー分析を実施した。高山帯における水流出・水涵養を支配する要因は、短期間の積算降水量と雪氷融解水の供給であることが示唆された。トレーサーを用いた成分分離法の適用により、夏季の雪氷後退に伴い、流出水を構成する成分が雪氷・降水成分から、地下水・土壌水成分に変化することが明らかとなった。さらに、植生部と裸地部の流出水の明確に異なる水質・同位体比から、土地被覆条件により水貯留機能が決定される可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動の影響を受けやすい高山帯は極めて多い降水量を有し、下流域に豊富な水資源を供給する。本研究は、これまで、実測による研究例が少なかった高山帯水文学研究に現地観測を主手法として取り組んだ。水涵養・流出過程の定性的・定量的解析を実施することで、雪氷融解・短期積算降水量・土地被覆が高山帯水循環を主に制御することを示唆した。本研究成果は、水資源賦存量の将来予測技術の向上や近年頻発する土砂災害・洪水の予測・警報システム開発という防災の面に貢献でき、学術的のみならず社会的に意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Hydrological observations, water sampling, and chemical/isotopic analyses were conducted in the alpine area above the forest limit to clarify the mechanism of water recharge and discharge associated with snowmelt in headwaters of the alpine zone. The results suggest that the dominant factors controlling water runoff and recharge in the alpine zone are short-term accumulated precipitation and the supply of snowmelt water. The application of a tracer-based component separation method revealed that the components of runoff water change from snow/ice and precipitation to groundwater and soil water as the snow/ice retreats during the summer season. Furthermore, the distinctly different water quality and isotopic ratios of runoff between vegetated and bare areas indicated that land cover conditions may determine the water storage function in alpine zones.

研究分野：水文学，山岳科学

キーワード：高山帯 雪氷融解 水涵養 水流出 トレーサー 土地被覆

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、地球規模の気候変動や経済発展によって淡水資源の需要と供給は大きく影響され、その持続的利用は喫緊のグローバル課題となった。水の滞留時間情報は、水資源の更新時間や賦存量を検討する上で、極めて重要な水文学的情報であり、水資源涵養過程やそれに対をなす水流出過程の把握には不可欠である。これまでの数多くの研究により、水資源として重要な地下水・湧水の滞留時間は、平野部で数十年～数万年、山地森林で数年～数十年であることが多く (Chen et al., 2005)、地表水の存在と降雨が水資源涵養を支配していることが明らかにされてきた (Ako et al., 2013)。一方、陸域水循環の出発点である高山地域は、降雨に加えて冬の積雪量が総涵養量・総流出量を規定し、春から夏にかけての積雪融解をもたらす気温上昇・降雨イベントとそのタイミングがそれらの経時的变化を支配することになる (Manning et al., 2012)。実際に、国内最大級の積雪量を有する北アルプス・乗鞍岳(標高: 3026 m)で湧水量を連続観測した研究では、融雪期の気温上昇や降雨発生時に湧水量の増加をもたらすと指摘している (清水ほか, 2018)。しかしながら、高山地域における水涵養・流出過程やそれらの融雪による影響については、定量的議論が行われておらず、十分な解明には至っていないことが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、標高 3026 m の乗鞍岳の高山帯源流域を対象とし、水文観測とトレーサー分析を実施することで、次のことを明らかにすることである。

- (1) 水文・気象特性を明らかにすること。
- (2) 高山帯の湧水と流出水の水質・同位体比特性を明らかにすること。
- (3) 高山帯における雪氷融解に伴う水流出・水涵養機構を明らかにすること。

### 3. 研究の方法

研究対象地域は、北アルプス・乗鞍岳の高山帯(標高 2600-3026 m)源流域である。冬季は、厳しい気象・積雪条件のため観測対象外とした。当該流域において、降水量・渓流水位を 5～10 分間隔でデータロガー付き機器によって記録した。渓流水・湧水は現地調査時の手動による方法と自動採水器による方法によって採取した。採取時には、ポータブル水質計によって、水温・pH・EC などの基礎水質項目を測定した。降水試料は蒸発防止機能つきロートとポリ容器を用いて回収し、一定期間ごとに採取した。採取した水試料は実験室に持ち帰り、フィルタリングをし、酸素・水素安定同位体比と主要無機溶存イオン濃度を分析した。2020 年度には上記に加え、雪溪の後退位置を GPS を用いた方法により記録し、後退速度を定量化した。

### 4. 研究成果

#### (1) 高山帯の水文・気象特性

乗鞍岳高山帯(標高 2600 m)の夏季(観測可能な 7 月～9 月)の総降水量は 2019 年で 1581 mm、2020 年で 2756 mm であった。これは、乗鞍岳高山帯から約 40 km 離れている松本市(標高約 600 m)の降水量の約 6 倍であった。高山帯の季節的雪氷がほぼ消失するタイミングで裸地部を流下する恒常的な溪流は涸れ、その後は、降雨時にのみ流出が発生した。降水イベントに伴い、溪流流量は速く、明確に応答し、ピーク降水時間からピーク流出時間までの時間差は、概ね 20 分以内であり、積雪の有無による違いは明確ではなかった。さらに、ピーク流出までのイベント降水量が大きくなるほど、ピーク流出量が増大する傾向にあった。低標高域や森林土壌が卓越する流域において、多くの研究で考慮に入れられる先行降雨指数は、溪流ピーク流量との関連は見られなかった。これらのことは、高山帯の降水時のピーク流出量を規定している要素は、主にピーク流出までのイベント降水量であると考えられた。しかしながら、流域内に積雪が残存する時は、ピーク流出までのイベント降水量が少ない場合でも、ピーク流出量が増大するイベントがみられた。このことは、積雪が流域内に残存する場合、積雪の融解も、流出量を規定する要因の一つであると推察された。

#### (2) 水質・同位体比特性

乗鞍岳高山帯の土地被覆状況により、異なる結果が表れた。裸地部の流出水は、植生部と比較して、降水試料が示すような低い pH と低い EC を示した。また、裸地部流出水の水質は高い硫酸イオン濃度と低い重炭酸イオン濃度に特徴づけられるが、植生部流出水はカルシウムイオンや重炭酸イオン等の地質由来の成分が多い特徴があった。さらに、酸素・水素安定同位体比では、裸地部流出水は、降水の同位体比の時間変化に伴う時間変化を示した。一方、植生部流出水の同位体比は明瞭な時間変化は見られなかった。これらのトレーサー値から、裸地部と植生部では、水の保水機能に違いがあると示唆された。すなわち、裸地部では、透水性の低い基盤岩が露出し

ていることにより、融雪水や降水が迅速に下流方向へ流下し、一方、植生部では、層厚は薄いものの多孔質な土壌が形成されており、低標高地域の森林と同様に水を一時的に保水する機能が存在すると考えられた。

(3) 高山帯の水流プロセス (2020 年度に取得したデータを主に使用)

常に流量があった溪流は 8 月 4 日を境に涸れ、降水イベント時のみ溪流が形成されることが観測された。7 月 17 日から 7 月 30 日にかけて雪渓の末端部が大きく後退したこと、8 月 4 日より前の渓流水の酸素・水素安定同位体比が雪渓の融解水の値に近かったことから、雪渓からの水供給が溪流形成に寄与していることが示唆された。デルタダイアグラム上で、融雪水と夏季降水の回帰直線上に渓流水がプロットされたため、渓流水の起源は降水であると示唆された。また、湧水の酸素・水素安定同位体比は降水や渓流水と比較をし、時間変化が無く、安定していた。このことは、湧水は降水後にすぐに流出する成分ではなく、降水後に地中で一時的に貯留され、混合した結果を反映している成分であることが示唆された。渓流水の  $\text{Cl}^-$  濃度と  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度に着目すると、降水・融雪水・湧水の濃度と比較をして、明らかに高い濃度を有する渓流水が観測された。保存性の高いトレーサーである  $\text{Cl}^-$  濃度においては、渓流水の濃度は、 $\text{Cl}^-$  濃度の高い土壌水に近づく傾向が一部の期間においてみられた。これらのことから、渓流水の端成分は時間とともに種類・寄与率ともに変化していると考えられた。

保存性のあるトレーサーである塩化物イオンと酸素安定同位体比の関係から、渓流水の端成分について検討すると次のようなことが示唆された。

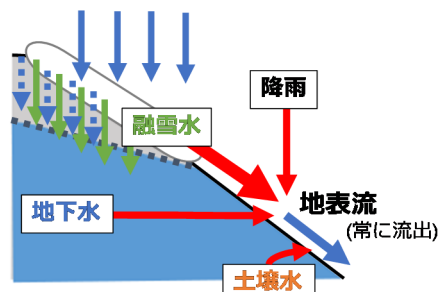
常に流出が発生している主融雪期：主な成分は融雪水であると考えられるが、融雪期以前に地中に貯留されていた地下水の成分も大きく寄与していると示唆された。

主融雪期後 (乾燥期)：依然として、成分は融雪水に近い。そのため、融雪期に一時的に地中に貯留された成分が流出していると考えられた。

主融雪期後 (多雨期)：降水成分と融雪水成分が混合して溪流を形成していると考えられた。

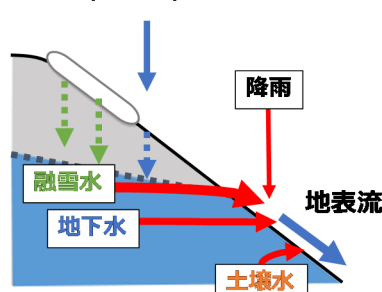
積雪期前：融雪水の渓流水への寄与が小さくなり、土壌水の渓流水への寄与が相対的に大きくなったと判断された。このことにより、渓流水の主要な端成分が降水と融雪水から降水と土壌水へと変化したことが考えられた。

①常に流出が発生している主融雪期

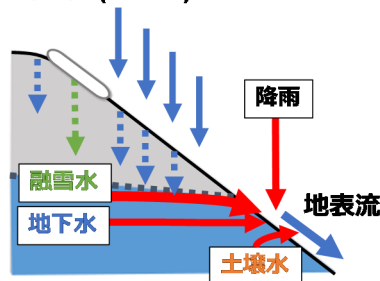


※土壌水：降雨時に飽和した時に寄与

②主融雪期後 (乾燥期)



③主融雪期後 (多雨期)



④積雪期前

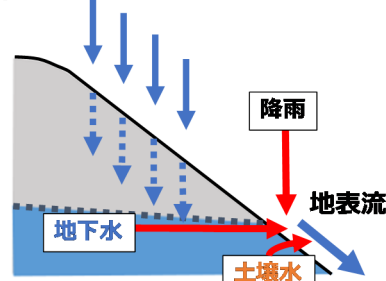


図 乗鞍岳源流域の水文過程の時間変化を表す概念図

REFERENCES:

- ✓ Ako et al., 2013, *Journal of Hydrology* **502**, 156–176.
- ✓ Chen et al., 2005, *groundwater* **43**, 485–493.
- ✓ Manning et al., 2012, *Journal of Hydrology* **460–461**, 13–28.
- ✓ 清水ほか, 2018, 日本水文学会誌 **48**, 71–80.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Koichi Sakakibara, Keisuke Suzuki	4. 巻 42
2. 論文標題 Controlling factors and characteristics of peak runoff in an alpine headwater under the Asian monsoon climate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mountain Research and Development	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1659/MRD-JOURNAL-D-21-00030.1	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 榊原厚一, 鈴木啓助	4. 巻 63
2. 論文標題 名水を訪ねて, 信州・上高地の水	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地下水学会誌	6. 最初と最後の頁 19-27
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 無
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 榊原厚一, 鈴木啓助	4. 巻 50
2. 論文標題 高山源流部・一次流域における水文観測をベースとした水流出・地下水循環研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本水文科学会誌	6. 最初と最後の頁 99-103
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 無
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 榊原厚一	4. 巻 87
2. 論文標題 森林流域の地下水をはかる	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 森林科学	6. 最初と最後の頁 32～33
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 無
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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 堀瑞季, 榊原厚一, 宮原裕一, 鈴木啓助
2. 発表標題 火山性緩斜面流域において流域特性が地下水涵養・流動過程に与える影響
3. 学会等名 日本地下水学会2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長幡嘉健, 榊原厚一, 宮原裕一, 鈴木啓助
2. 発表標題 森林源流域における降雨流出時の河畔部飽和帯を介した水流出過程
3. 学会等名 日本地下水学会2021年秋季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤野真優, 榊原厚一, 鈴木啓助
2. 発表標題 流出水の水質・同位体比特性から推定される高山帯植生部の水貯留機能
3. 学会等名 水文・水資源学会 / 日本水文科学会2021年度研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀瑞季, 榊原厚一, 宮原裕一, 鈴木啓助
2. 発表標題 マルチトレーサーを用いた八ヶ岳西麓から諏訪湖に至る地域地下水流動系の解明
3. 学会等名 日本地下水学会2021年春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榊原厚一, 鈴木啓助
2. 発表標題 北アルプス・乗鞍岳高山帯におけるピーク流出発生の特徴とその制御要因の解明
3. 学会等名 日本地下水学会2021年春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshitake Nagahata, Koichi Sakakibara, Keisuke Suzuki
2. 発表標題 Clarification of cause of temporal tracer variations in spring water, Kamikochi, Shinshu
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mizuki Hori, Koichi Sakakibara, Yuichi Miyabara, Keisuke Suzuki
2. 発表標題 Hydraulic connectivity between groundwater and surface water in Suwa region, Japan
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (JpGU) Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mizuki Hori, Koichi Sakakibara, Yuichi Miyabara
2. 発表標題 Groundwater recharge processes in a complex aquifer system of the Lake Suwa watershed, Japan
3. 学会等名 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長幡嘉健, 榊原厚一, 鈴木啓助
2. 発表標題 上高地湧水における環境トレーサーの時間変化特性の解明
3. 学会等名 日本山の科学会2019年秋季研究大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田暁人, 増本泰河, 伊藤拓生, 林穰, 榊原厚一
2. 発表標題 山岳域から河口に至る信濃川河川水の水質・同位体比の空間分布特性の解明
3. 学会等名 2019年度日本水文科学会学術大会
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------