

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02995

研究課題名（和文）豪雪地帯の南限に位置する森林流域からの水・栄養塩流出 - 積雪・融雪期に着目して -

研究課題名（英文）Water and nutrient exports from a forested catchment located at the southern limit of heavy snowfall area: focusing on the snowfall and snowmelt season

研究代表者

芳賀 弘和 (Haga, Hirokazu)

鳥取大学・農学部・准教授

研究者番号：90432161

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：中国山地は、冬期気温が比較的高い豪雪地帯に分類される。このような地域では、将来の気候変動による水・栄養塩循環への影響が顕在化しやすい。現在のところ、中国山地での森林の水源涵養機能を評価した研究は限られている。そこで、中国山地の森林流域において、a) 降雪-積雪-融雪-流出の一連の実態を把握し、b) 積雪・融雪期の栄養塩の流出特性について評価することを目的として研究を行った。本研究において、冬期の降雨、融雪、地下水、流量、および窒素濃度のデータセットが得られた。正確な雨/雪判別とマイナス気温下でも常時観測される融雪水の評価は、この地域の水・栄養塩循環の理解にとって極めて重要であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中国山地は、閉鎖性水域（例えば、日本海側の宍道湖や瀬戸内海側の児島湾）につながるいくつかの河川の源流域であり、流域の水利用や水環境を理解する上で重要な場所である。また、中国山地は豪雪地帯に分類されるものの比較的温暖な気候であり、将来の温暖化に対してセンシティブな地域とされる。さらに、中国山地は、降水量が少ない瀬戸内地域の重要な水源域である一方、先の西日本豪雨のように、大雨に対する脆弱性もはらんでいる。これまでの積雪や融雪の研究例は、北海道、東北、北陸に集中しており、中国山地の情報は限定的である。この状況にあって、本研究で収集する水文と水質に関するデータと解析結果は学術的・社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：The Chugoku Mountains are classified as heavy snowfall areas with a relatively high temperature in winter. In such areas, the impacts of future climate changes on water and nutrient cycles can become apparent. However, few studies have evaluated the functions of forests in the water and nutrient cycles in the Chugoku Mountains, and so the research on precipitation to streamflow responses of a forested catchment is needed as a first step approach. The goals of this study are to describe the actual situations of rainfall-snowfall-snowmelt-groundwater-streamflow and to evaluate the characteristics of water and nutrient exports during snow seasons in a forested catchment of the Chugoku Mountains. We obtained those hydrological and water quality data. Results of analyses indicated that the accurate discrimination of rainfall/snowfall and the snow melting evaluation even below zero in air temperature are critical for understanding hydrological and nutrient cycles in the Chugoku Mountains.

研究分野：河流水文学

キーワード：中国山地 地下水 雨/雪判別 融雪 栄養塩 懸濁態 流出

## 1. 研究開始当初の背景

森林から流れ出る水は我々にとって重要な水資源であり、かつ河川や湖沼等の水域生態系にとっても非常に重要な存在である。しかし、森林を取り巻く状況は常に変化するため、その水が量・質ともに安定して下流域へ供給されるかどうかは大きな問題である。過去の拡大造林政策やその後の森林管理の停滞、そして近年の間伐の促進や将来的な温暖化による生態系変化を考えると、それぞれのフェーズに応じて森林から流出する水は変化しうる。このため、森林から流出する水の量と質について近年の状況を把握することは、森林の水源涵養機能を定量的に評価するための材料として重要である。特に、温暖化のように将来の環境影響が懸念される場合、そのことは一層重要である。

森林の水源涵養機能に関する研究は、全国的に見て数十か所北から南まで試験地に着目すると、中国山地に設定されたものは数例にすぎない。中国山地は、豪雪地帯の南限域であり、春から夏にかけての河川水量の維持には融雪水が重要な地域と考えられる。緯度から考えて、中国山地は豪雪地帯の中でも温暖な地域であるため、積雪がピークを迎える最寒期であっても、雪が雨に変わったり一時的に融雪が進んで河川水が増加したりする。このような地域では、将来の温暖化によって春から夏にかけての水利用形態（ダム湖の貯水や放水、用水の取水等）の特徴が変化しやすいと推察される。したがって、中国山地において森林の水源涵養機能について研究する意義は大きく、特に、積雪・融雪期における流出のパターンや過程を気象条件や流域の水文地形条件と併せて把握する意義は大きい。しかし、積雪・融雪期における流出水の研究は、北陸以北の地域に限定的であり（例えば、志知ら、2005；柴田ら、2002）、中国山地での積雪・融雪に関するデータは極めて乏しい。

他方、森林流域から流出する水の質に関する研究、特に、栄養塩の濃度と流出負荷量に関する研究（いわゆる、ノンポイント汚染研究）が、水環境学の分野において俯瞰的に行われるようになった。これは、従来の個別流域での栄養塩の流出負荷量に関する研究成果を統合し、原単位（1年間の単位面積あたりの流出量；kg/ha/y）としてまとめる試みである。水環境学会（2011）の報告によると、森林流域での研究例のうち懸濁態栄養塩の流出を対象としたものは限定的であり、さらに、原単位の妥当性や一般化にとって不可欠な流出過程を考慮したものはわずかであった。懸濁態栄養塩が貯水池や湖沼での沈降、堆積、巻上げ、溶出により栄養塩の二次的な供給源となりうることを考慮すると、このような現状は水質管理上の大きな問題と考えられる。

以上より、中国山地の森林流域において、積雪・融雪期における水と懸濁態栄養塩の流出の実態を明らかにするとともに、それらの流出過程を検討することは、温暖化が懸念される昨今にあって極めて重要な課題である。

## 2. 研究の目的

背景を踏まえ、中国山地の森林流域において次の4つの目的を設定して研究を行った。

- a. 積雪・融雪期における降水と流出の応答について、降雨、降雪、積雪、融雪、および地下水の変動に基づいて把握
- b. 積雪・融雪期における水の流出過程に基づく栄養塩の流出特性の把握
- c. 上述 a と b の知見に基づき、中国山地の水源涵養機能の評価に資する情報について検討
- d. 積雪・融雪過程を組み込んだ水・栄養塩流出モデル作成上の注意点について検討

## 3. 研究の方法

### (1) 調査地

試験地は、鳥取大学蒜山教育研究林に設定された。この上流部の1次谷にある水文試験流域は、面積は5.93 ha、標高は695~790 m、斜面傾斜は30~40°であった。地質は大山凝灰角礫岩層（田中ら、1981）である。研究林内の露頭とボーリング調査の結果（地表から深さ30 mまでの様子）によると、凝灰岩、火砕流堆積物、土石流堆積物と思われる層が複数存在することが確認でき、地質構造は非常に複雑であった。表層土壌は黒色火山灰土（黒ボク土）であった。予備調査では、黒ボク土の層厚は、尾根付近で20~80 cm程度、谷部で100~200 cm程度であった。本研究において実施した0次谷流域の谷線上の土壌調査によると、黒ボク土の下に砂質シルトを主体とする黄色系（黄褐色~淡黄色）の土層があることが確認された。既往の研究（田中、1983）によると、黒ボク土層に比べてこの黄色系の土層は透水性が悪く、飽和透水係数は黒ボク土層で0.016 cm s<sup>-1</sup>、黄色系の土層で0.006 cm s<sup>-1</sup>と報告されている。

植生は、コナラ林を主体とし、流域の下流部右岸側の一部がヒノキ人工林（約40年生）であった。広葉樹林における植生調査によると、コナラの樹高は8~18 m、胸高直径は15~60 cm、立木密度は800本 ha<sup>-1</sup>であった。水文試験流域内の河川は流路長227 m、流路の高低差は30.9 m、流路勾配は10.2%、平均流路幅は1.0 mであった。蒜山演習林の麓にある事務所（標高570 m）の気象データによると、年平均気温は約10.5であり、年最高気温は30を超え、年最低気温は-10を下回る。冬期の積雪深は200 cmを超える年があり、この地域は豪雪地帯に分類

されている。

## (2)積雪・融雪期における降水から流出に至る一連の水文応答

### 降雨量、降雪量

研究林の事務所前の気象露場において、降水量をヒーター付きの転倒マス雨量計で計測した。降雨量と降雪量は、後述の雨・雪判別の方法を適用することにより把握した。データは10分間隔で記録された。

### 雨と雪の判別

気象露場近傍の積雪深をインターバルカメラで4時間おきに撮影した。このとき、地面に立てた測量ポールとその周辺を撮影することで把握できる積雪深の増減とカメラの前を横切る雪の画像に基づいて、雪が降っていた時刻を特定した。そして、その時刻の気温を抽出し、降雪となりうる気温の範囲を特定した。気温がその範囲内にあるときの降水については、降雨センサーの出力がなければ降雪、逆に出力があれば降雨と判定した。気温がその範囲外にあるときの降水については、降雨と判定した。

### 積雪深

伐採跡地、ヒノキ林、マツ林、および落葉広葉樹林において、上述と同様に地面に立てた測量ポールとその周辺をインターバルカメラで撮影した。この画像を用いて積雪深を特定した。

### 融雪水量

積雪下の地表面には、融雪や降雨に伴って積雪層から水が供給される。この水を地表面到達水と定義した。つまり、地表面到達水量から降雨量を引いたものは、融雪水量とみなすことができる。そこで、地表面到達水を集めるために林内の地表面に雨樋を5本設置した。雨樋に入った地表面到達水は、土層を1m掘り下げたところに設置した流量計へと導かれた。流量計は転倒マス方式のセンサーであり、そのデータは10分間隔で記録された。地表面到達水量の観測は、ヒノキ林、マツ林、落葉広葉樹林の3林分で行った。また、Degree-hour法を用いて融雪量を推定した。この推定において必要となる融雪係数は、現地の消雪日が上手く再現できる値とした。

### 地下水位

水文試験流域の最上流部に位置する0次谷の下流端と中央部の谷底において、地下水観測孔を設置し、その中に水位計投入した。下流端と中央部の谷底では、それぞれ土層内(深さ2m)と基岩内(深さ16.5-30.0m)の地下水位が観測された。いずれのデータも20分間隔で記録された。

### 流量

水文試験流域の下流端にあるVノッチタイプの量水堰堤に水位計を設置した。水位データを5分間隔で記録し、水位-流量曲線を介して流量に変換した。

### 流量の増減を決定する要因の分析

積雪・融雪期における地下水位と流量の増減は、降雨、降雪、および融雪のような入力要素によって駆動される。ここでは、地表面が雪で覆われている期間を対象に、地下水位と流量の増減とそれらの要素との対応について経時変化を見ながら定性的に分析し、流量の増減を特徴付ける入力要素を特定した。予備調査により、ハイドログラフの増減の時間スケールは5-7日程度(増加と減少に要する時間はそれぞれ2-3日)であったため、この解析には入力要素(降雨、降雪、融雪)の72時間移動平均値を用いた。

## (3)積雪・融雪期における水と栄養塩の流出特性の把握

### 水の流出特性

上述の(2)で特定された入力要素をもとに、積雪・融雪期の出水イベントを抽出した。各イベントに対して、Hewlett・Hibbert(1967)の方法で直接流出と基底流出を分離し、直接流出率(直接流出量を入力量で割った値)を求め、水の流出特性を調べた。

### 栄養塩の流出特性

直接流出が発生している期間を出水時、それ以外を平水時と定義し、それぞれの期間に河川水として流出した栄養塩の流出量を算出した。溶存態の栄養塩として全窒素(DTN)を分析した。また、濁度に基づいて懸濁物質(SS)を測定し、懸濁態の栄養塩の指標として用いた。積雪・融雪期を通じて、3日に1度の頻度で河川水を採取し、栄養塩分析用の試料を得た。また、濁度計を河川に設置し、1分間隔のデータを記録し、フィルタリングを行って10分間隔のデータとして整理した。濁度は、濁度-SS濃度曲線を介してSS濃度に換算した。

### 解析

水、DTN、およびSSについて、それぞれの流出量の出水時と平水時の割合を求めた。DTNとSSの流出量を算出する際には、それぞれの濃度を出水時と平水時を区別して用いた。

## 4. 研究成果

### (1)雨・雪判別の精度向上

冬期の降水量データを雨と雪に分離する方法は、気温に基づいて行われることが多い。雪と雨の閾値となる温度を設定し、それよりも低ければ一律に雪と判別するものである。本研究では気温に加え雨滴衝撃感知タイプの雨量計(雪は感知しない)のデータを併用し、その閾値よ

り低い温度であっても雨となる場合を判別できるようにした。これにより、積雪・融雪期における降雨量と降雪量の評価精度を高めることができた。地表面が雪で覆われている際の降水において、雨と雪の違いは水の流出を検討する上で非常に重要な違いであり、この方法は温暖な積雪地域における水循環や水資源問題、あるいは防災上の視点から斜面の安定性を検討する上で意義があると思われる。

#### (2)積雪・融雪期における降水 - 流出の応答

流量変動は地下水位変動と調和的であった。特に、基岩内地下水位と非常によく似た変動が見られ、流量を構成する水として基岩内からの流出水の関与が推察された。地表面が雪で覆われている条件での地下水位と流量の増減は、降雪量とは対応がみられなかった。これは、積雪による地表面での水の一時的な貯留を考えると当然の結果である。一方、降雨量、あるいは融雪量（推定値）との対応は見られた。降雨量とこの推定融雪量を入力要素として流出解析を行った結果、積雪・融雪期（2019/12/26 - 2020/3/22）においてインプットが5mm以上のイベントが13回あり、直接流出率の平均値と範囲はそれぞれ0.04、0.00 - 0.30と算出された。これまでに実施済みであった夏期のイベントを対象とした流出解析では、大きな直接流出率(>0.1)の発生に必要な降雨量(Re)は、流域が乾燥するほど多くなることが示されていた。しかし、積雪・融雪期のReは、融雪量を加味しても夏期より著しく少なかった。地表面到達水量の観測によると、気温がマイナスであっても積雪下での地表面温度は2 - 5程度であるため、積雪下では土壌へ融雪水が常に供給されていた。したがって、夏期に比べて積雪・融雪期の地下部は水分の多い状態で維持されていたことが、Reが少なくなった原因と推察された。また、地表面が雪で覆われた状態では、融雪による出水よりも降雨による出水の方が流出率は高くなる場合があった。ただし、解析できたイベントが少なく、今後のデータ収集と分析が必要である。

#### (3)積雪・融雪期における栄養塩の流出特性

積雪・融雪期における河川水のDTN濃度は、概ね一定(平均0.15mg/L)であったが、出水時には上昇する傾向があった(最大0.27mg/L)。降雪が観測された期間(2019/12/26 - 2020/3/20)のうち、出水時の期間、出水時の水流出量、および出水時のDTN流出量が期間全体に占める割合は、それぞれ32、45、60%であった。他方、懸濁物質に着目したところ、積雪・融雪期における流量と懸濁物質濃度の応答は、夏期のそれと比べて緩慢であるものの、一度の降雨イベントで流出する懸濁物質量が積雪・融雪期を通じて流出する量の約7割に相当する結果が得られた。これらは、積雪・融雪期の栄養塩流出にとって、降雨と融雪によってもたらされる1週間程度の時間スケールをもった出水の重要性、特に、積雪条件下での降雨によってもたらされる出水の重要性を示唆している。なお、今回の研究では十分に取り組むことができなかったが、流路内に滞留される懸濁物質の動態は、流出量を左右する重要な項目と考えられる。本調査値での踏査によると、流路内に滞留する倒木や流木によって多くの粒状有機物が捕捉されており、捕捉量は年間を通じて大きく変化していることが見て取れた。懸濁物質の流出量については、このような流路内に滞留される粒状有機物の動態と併せて解析することが必要と思われる。

#### (4)中国山地の水源涵養機能の評価と積雪・融雪過程を組み込んだ水・栄養塩流出モデルの作成に向けて

本調査地が位置する豪雪地帯の南限域では、比較的温暖な気候であることから、積雪・融雪期であっても降雨と降雪の両方がもたらされることが確認された。また、地表面が雪で覆われている条件下において、降雨に伴う出水は、融雪に伴う出水よりも直接流出率が大きくなる可能性が示された。さらに、水と栄養塩の流出にとって1週間程度の時間スケールを持った出水の寄与が大きいことが指摘された。これらは、中国山地の水源涵養機能の評価において、雨と雪を区別可能な状態で降水量を把握することの重要性、および融雪に伴って地中へ供給される水量や地中の水分状態を把握することの重要性を示唆している。

また、調査地のように、気温がマイナスとなる最寒期であっても地表面の温度がプラスで維持される場所では、積雪底面から地表面へと融雪水が常に供給されることが確認された。Degree-day法やDegree-hour法では気温がマイナスの際には融雪が進まないと仮定されることが多いため、このような融雪モデルでは本調査地において常時観測される融雪水(地表面到達水)は表現されない。しかし、この融雪水は積雪・融雪期を通じて地中の水分状態を左右する可能性があり、当該地域の積雪・融雪過程を表現するモデルにおいて考慮される方がよいと思われる。さらに、モデルによって当該地域の積雪・融雪期における水と栄養塩の流出を表現しようとする場合、濃度変動を考慮することが重要であるが、その際に出水時と平水時を区分したモデル化は一つの有効な手法と思われる。

中国山地は、閉鎖性水域(例えば、日本海側の宍道湖や瀬戸内海側の児島湾)につながるいくつかの河川の源流域であり、流域の水利用や水環境を理解する上で重要な場所である。また、中国山地が将来の温暖化に対してセンシティブな地域であることも指摘されている。さらに、中国山地は、降水量が少ない瀬戸内地域の重要な水源域である一方、先の西日本豪雨(2018年7月)のように、豪雨に対する脆弱性も持っている。本研究を通して収集したデータと解析結果は、水文学上は基本的なものばかりであるが、これらの地域的課題の解決にとって不可欠な情報であり、今後の研究につながる一歩になったと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 0件）

1. 著者名 芳賀弘和	4. 巻 74
2. 論文標題 はかる 現地調査・計測(17) 河川生態調査(その1) 河道内に滞留している流木	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 砂防学会誌	6. 最初と最後の頁 55-59
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 Katsuyama, M., Ohte, N., Kosugi, Y., Tani, M.	4. 巻 35
2. 論文標題 The Kiryu Experimental Watershed: 50 years of rainfall runoff data for a forest catchment in central Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Hydrological Processes	6. 最初と最後の頁 e14104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/hyp.14104	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 芳賀弘和、勝山正則、小杉賢一朗
2. 発表標題 火山噴出物由来の地質を持った0次谷における流出継続時間の縦断変化
3. 学会等名 第133回日本森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 芳賀弘和、久保岳大、松下直矢、廣田恭明、堀田紀文
2. 発表標題 拡大造林期に渓岸に植栽された 樹木の流木化とその流路地形への影響
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 勝山正則, 鶴田健二, 村中麻咲, 小杉緑子
2. 発表標題 -ダイアグラムを用いた森林流域内の水移動に伴う安定同位体比変動の解析
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 芳賀弘和, 勝山正則, 尾坂兼一
2. 発表標題 中国山地中部の森林小流域における降雨時の水文・水質応答
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	勝山 正則  (Masanori Katsuyama)  (40425426)	京都府立大学・生命環境科学研究科・教授   (24302)	
研究 分担者	藤本 高明  (Takaaki Fujimoto)  (40446331)	鳥取大学・農学部・准教授   (15101)	

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