

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：82105

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19963

研究課題名（和文）山地斜面内の間隙空気の測定手法と降雨流出過程に及ぼす影響

研究課題名（英文）Pore-air pressure measurement in mountainous slope and its role on rainfall runoff process

研究代表者

岩上 翔（Iwagami, Sho）

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：70612729

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）：本研究において土層内の間隙空気の観測手法として作成した簡易な斜面内圧計の有用性を現地観測において示すことができた。さらに観測井の孔内圧を測定することによって基岩層内の間隙空気の挙動についても把握することができることを示すことができた。封入空気が形成され、間隙空気圧が上昇した降雨イベントを多数観測した。これらについて降水量のパラメータと流出量のピーク流量の関係を、間隙空気圧の上昇が見られたイベントとそうでないイベントで整理した結果、前者の方が大きなピーク流量を示すことが明らかとなった。間隙空気圧とピーク流量に関係性があり、特に斜面下部の浅い地下水における間隙空気圧の効果が大きいことが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

降雨流出プロセスにおいて、斜面内の間隙空気の挙動については主に室内実験において流出現象との関連が指摘されているものの、現地観測によりそのプロセスを示した例は未だほとんど無いと言える。本研究では山地斜面における間隙空気の観測手法について検討し、土層内・基岩層内それぞれにおける間隙空気圧の観測手法の有用性について示すことができた。本研究で得られた斜面内における間隙空気の挙動の実態や流出に影響を及ぼす条件等は新たな知見であるとともに、これらの結果は洪水発生や斜面崩壊とも関連し、災害予測において新しい提言へとつながる可能性がある。

研究成果の概要（英文）： In the present study, we could successfully show that pore-air pressure is not negligible in the field measurement. It is shown that our handmade measurement system was useful for measuring the pore-air pressure in the soil layer, and also the measurement of inner pressure of the borehole was useful for evaluating the pre-air pressure in the bedrock layer. Various rainfall amounts of rainstorm events accompanied with pore-air pressure rising were observed. By sorting the relationship between rainfall parameters and the peak discharge of rainstorm events by pore-air pressure response, it was revealed that the pore-air pressure response has influence on peak discharge. Especially the pore-air pressure response at the shallow bedrock groundwater will make influence on peak discharge.

研究分野：水文学

キーワード：山地源流域 降雨流出プロセス 間隙空気 土壌水 基岩地下水

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

水文学の降雨流出過程に関する研究では、降雨に対する素早い流出応答を生じるプロセスは未だに説明しきれない部分があり、課題となっている。また近年、豪雨災害が顕著に増えており降雨流出過程の理解の深化により精緻化された流出モデルの構築は防災の観点からも急務である。斜面内の間隙空気の挙動については主に室内実験において流出現象との関連が指摘されているものの、現地観測によりそのプロセスを示した例は未だほとんど無いと言える。そこで本研究では山地斜面における間隙空気の観測手法について検討するとともに森林小流域において降雨や流出、地下水位等の水文観測に加えて間隙空気の観測を行い、その流出応答との関係について示す。斜面内における間隙空気の挙動の実態や流出に影響を及ぼす条件等について明らかにすることができれば新たな知見になるとともに、得られた結果は洪水発生や斜面崩壊とも関連し、災害予測において新しい提言へとつながる可能性がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、間隙空気が流出に影響を及ぼすプロセスを以下のように仮定した。すなわち、降雨時に降下浸透する雨水と地下水面あるいは岩盤等の不透水層によって斜面内の間隙空気が封入され、地下水位の上昇等によって加圧されることにより斜面下部における地下水を刺激し流出を後押しする。この仮説のイメージと斜面スケールでの間隙空気の観測のイメージを図1に示す。本研究の目的は、土層中の間隙空気の観測手法について検討を行うこと、その上で山地斜面において土層から岩盤層までを含めた斜面スケールでの間隙空気の挙動について現地観測を行い、斜面内の間隙空気の挙動の実態を示すと同時に流出への影響を示すことである。封入空気の形成には地形・地質条件や気象条件等いくつかの条件が揃うことが必要であると考えられ、それらの条件について明らかにする。

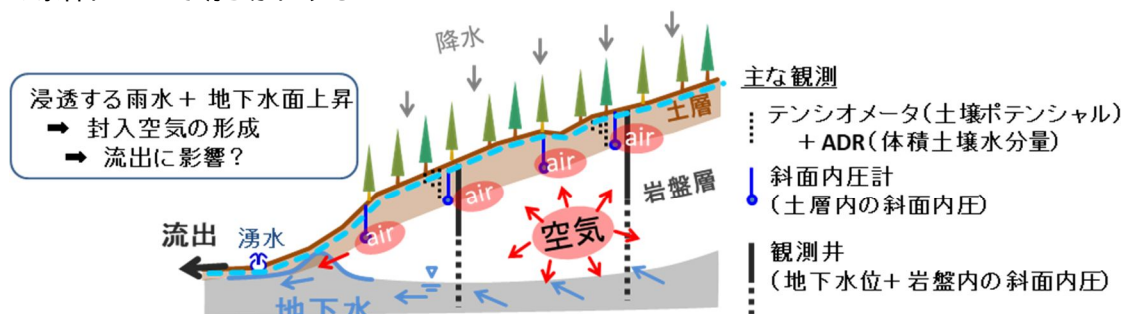


図1. 斜面スケールでの封入空気の観測の概要イメージ

### 3. 研究の方法

本研究では、まず土層内の間隙空気の観測手法を確立するため、間隙空気の挙動を空気圧として捉える簡易な斜面内圧計を作成し、その有用性を現地観測において検討した。さらに地下水位測定用の観測井において孔内圧を測定することで基岩層内の間隙空気についても観測を行うことで、斜面スケールでの間隙空気の挙動の観測を行った。流出応答や地質条件の異なる2つの観測流域(筑波・常陸太田)において、降雨流出応答および斜面内の空気の挙動について観測を行った。

一般的に土層中の水の動きを観測する場合にはテンシオメータを用いるが、テンシオメータによって得られる情報は目的とした深度の水圧と空気圧の和であり、本研究では間隙空気の挙動を捉えるために、空気圧を直接的に測定したい。そのために檀上ほか(2015: 地盤工学ジャーナル, 10(1), 81-92)による土層内の間隙空気圧測定方法を参考にして、目的の深度に開口部(スクリーン)を持つ管を土層に設置し孔内圧を圧力センサーで測定する斜面内圧計を作成した。上部を密閉することで、無降雨時に土壌表面が乾燥している条件下では大気圧と斜面内の間隙空気圧はある程度同期あるいは連動しており、大気圧の変動と孔内圧に連動性がみられると考えられた。一方斜面内に間隙空気が封入された状態では、大気圧と間隙空気圧の連動性が断たれ、間隙空気圧の変動は大気圧の変動と異なる挙動を示すと考えられた。したがって間隙空気圧が大気圧の変動と異なり大気圧以上の応答を示した場合に封入空気が形成されていると判定できる。

また基盤岩内に至る深度に設置された観測井において上部を密閉し内部に圧力センサーを設置し孔内圧を測定することで同様の応答が得られると考えられた。スクリーン部分が水没してしまうと斜面内の間隙空気と孔内の空気が断絶してしまうので地下水位の測定が重要となった。

#### 4. 研究成果

土層内・基岩層内それぞれにおいて、無降雨時・降雨時（封入空気形成時）における想定された間隙空気圧の応答を現地観測で得ることが出来た。また土壌水分量の応答も整合的であった。そのため、それぞれ間隙空気圧の測定方法として有用であることを示すことが出来たと考えられる。

封入空気が形成され、間隙空気圧が上昇した降雨イベントを多数観測することができたため、これらについて降水量のパラメータ、流出量のピーク流量、間隙空気圧の応答について整理した結果、以下のことが明らかとなった。降水量のパラメータとピーク流量の関係を、間隙空気圧に上昇が見られたイベントとそうでないイベントで整理した結果を図2に示す。図2では a)は HA01：斜面下部の土層内の応答、b)は B1(3)：斜面下部の浅い基岩層の応答、c)は B2(20)：斜面中腹の深い基岩層の応答を表す。（HA01, B1(3), B2(20)はそれぞれ観測地点名）

#### 雨量と流量の関係

総降雨量（イベント降雨量）とピーク流量には、ある程度の関係性が見られた。先行降雨量（API）とピーク流量の関係は間隙空気圧の応答しなかったイベントでは見られたが、応答イベントではあまり明確ではなかった。総降雨量 + API で評価するとピーク流量との関係性がより明確となった。

#### 雨と間隙空気圧の関係

降水量のパラメータ（総降雨量 + API）と間隙空気圧の関係は土層では見られるが基岩層では、あまり明確ではなかった。降雨強度との関係も同様に明確ではなかった。土層の間隙空気圧は5分降雨強度との関係よりも1時間降雨強度との関係の方がより明確であった。また林外雨よりも観測地点毎の林内雨を用いるとより明確な関係性が得られた。

間隙空気圧は降水量のパラメータが一定の閾値よりも大きくなると応答しないことが示され、その閾値が a)HA01では 26 mm, b)B1(3)では 56 mm, c)B2(20)では 28 mm であった。

#### 間隙空気圧と流量の関係

間隙空気圧の応答がある場合（図中の赤丸）の方がより大きな流出が生じることが明らかであった（図2）。これは土層内よりも斜面下部の基岩層で明確であった。図3に図2bの横軸をフルレンジ（250）で表示したものを示す。降水量のパラメータが100以上のイベント、あるいはピーク流量の値が5 L/s以上のイベントは全てB1(3)の基岩層内において間隙空気圧の応答があったことが分かる。さらに、間隙空気圧の応答が無かったイベントにおける降水量のパラメータとピーク流量の関係を外挿して示すと（図中の青点線部分）、間隙空気圧の応答があった場合（図中の赤丸）は、これよりも大きなピ

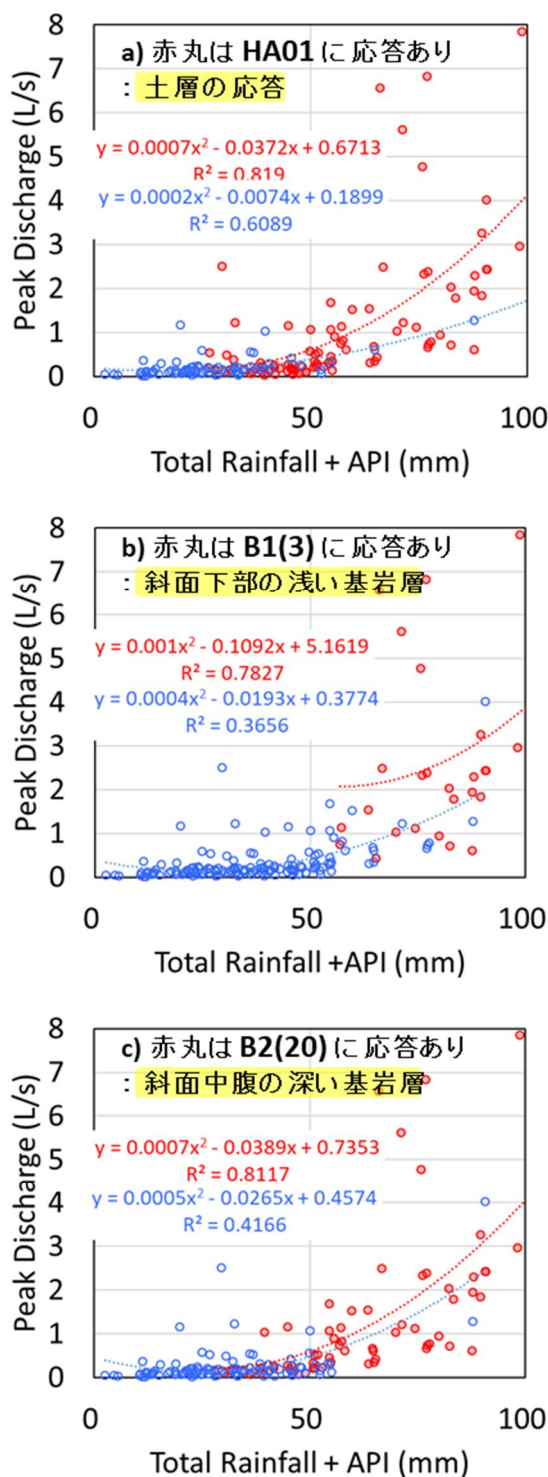


図2. 降雨イベントにおける降水の条件（イベント降雨量 + 先行降雨量）とピーク流出量の関係。a) HA01地点の土層内の応答、b) B1(3)斜面下部の浅い基岩層内の応答、c) B2(20)斜面中腹の深い基岩層内の応答について、間隙空気圧の応答があったイベントとなかったイベントで整理した。

ーク流量を示していることが明らかであった。

### 間隙空気圧と地下水位の関係

土層内・基岩層内、いずれにおいても間隙空気圧の上昇には地表面から浸透する水の濡れ前線が下降することによる効果よりも地下水位が上昇することによる効果が大きいことが示唆され、これはボイルの法則を用いて確認することができた。

また観測井掘削時に得られたボーリングコアの示す地質の情報と照らし合わせることで、基岩層内において間隙空気圧が上昇する箇所を推定することができた。図2を見ても、HA01の土層内・B2(20)の基岩層内の間隙空気圧の応答は降雨条件の閾値が低く、小さい降雨イベントから大きい降雨イベントまで広く降雨流出現象に寄与していることが示唆され、B1(3)の基岩層の間隙空気圧の応答は大きな流出現象が起きるような場合に寄与していることが考えられた。

こうした地下水位の影響や地質のコントロールについては既存の研究においては報告されておらず、新しい知見となった。降雨・土壌水・地下水と連動して間隙空気圧が挙動しており、また地質のコントロールもあるということが示され、間隙空気圧が降雨流出に関わるプロセスについて明らかとなってきた結果となった。

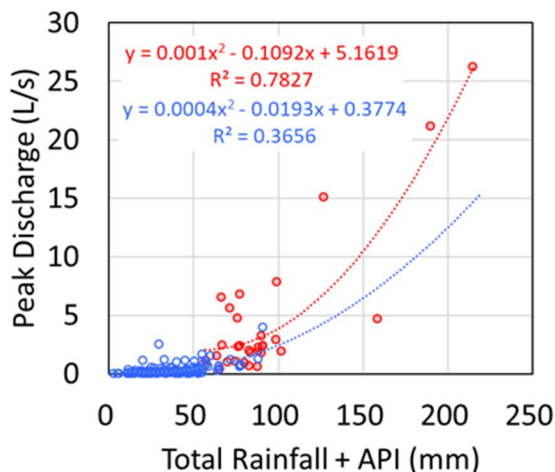


図3. B1(3)における、降雨イベントの降水の条件(イベント降雨量+先行降雨量)とピーク流出量の関係。(間隙空気圧の応答があったイベントとなかったイベントで整理したもの)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0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 岩上翔, 野口正二, 久保田多余子	4. 巻 53
2. 論文標題 Survey of bedrock groundwater in a small forest basin consisting of metamorphic rocks in Hitachi Ohta Experimental Watershed	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences	6. 最初と最後の頁 5~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4145/jahs.53.5	査読の有無 無
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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岩上翔, 久保田多余子, 野口正二
2. 発表標題 変成岩からなる森林小流域における基盤岩地下水の実態調査結果
3. 学会等名 水文・水資源学会 / 日本水文科学会2022年大会
4. 発表年 2022年~2023年

1. 発表者名 岩上翔, 清水貴範, 久保田多余子, 飯田真一, 小田智基, 野口正二
2. 発表標題 Measurement of pore-air entrapment in soil layer in two small headwater catchments.
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2021年~2022年

1. 発表者名 岩上翔, 野口正二, 清水貴範, 久保田多余子, 飯田真一
2. 発表標題 Behavior of pore-air entrapment in unsaturated soil layer in two small headwater catchments with different soil depth.
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2020年~2021年

1. 発表者名 岩上翔, 野口正二, 清水貴範, 久保田多余子, 飯田真一
2. 発表標題 山地斜面における土層中の封入空気の形成と林内雨の関係について
3. 学会等名 第132回日本森林学会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 岩上翔, 久保田多余子, 小田智基
2. 発表標題 Measurement of pore-air pressure change in the bedrock layer in small headwater catchment
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 岩上翔, 清水貴範, 久保田多余子, 飯田真一, 小田智基, 野口正二
2. 発表標題 山地斜面の土層・基岩層における封入空気の形成と地下水位上昇の影響について
3. 学会等名 水文・水資源学会 / 日本水文科学会2023年大会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 岩上翔, 野口正二, 清水貴範, 久保田多余子, 飯田真一, 小田智基
2. 発表標題 山地斜面の土層・基岩層における間隙空気圧の挙動について
3. 学会等名 第135回日本森林学会
4. 発表年 2023年～2024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
---------	---------