

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K15283

研究課題名（和文）改良型蒸発法を用いた森林土壌および風化基岩層の降雨浸透・貯留機構の解明

研究課題名（英文）Investigations of hydrological properties of forest soil and weathered bedrock layers by using improved evaporation method

研究代表者

正岡 直也（Masaoka, Naoya）

京都大学・農学研究科・特定助教

研究者番号：90786568

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）：本研究では山地流域における風化基岩層の水源涵養機能を解明するため、基岩の水文特性を計測し、さらに実際の降雨浸透を観測し検討を行った。第一に、風化花崗岩のボーリングコアに加工を施すことで蒸発法を適用し、不飽和水文特性（保水性・透水性）を計測できることを示した。第二に、新たに蒸発法とワンステップ流出法との組み合わせ手法を開発し、計測の効率化に成功した。第三に、風化基岩露頭における野外水文観測から、浅部の強風化基岩層では亀裂を伝った素早い水流が存在するものの深部までは到達せず、土壌と同様のリチャーズ式に基づくシミュレーションで基岩中の降雨浸透過程を再現できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、山体の風化基岩内における雨水浸透過程の実態が明らかとなった。実測とシミュレーションによる浸透流出予測手法の方向性が示されたことで、森林の持つ水源涵養・防災機能のより実態に即した評価に向け大きく貢献できたといえる。また本研究で新たに開発された装置は迅速かつ実用的であり、普及すれば現在不足している日本の森林土壌の基礎的な水文特性データの蓄積が促され、水文学・砂防学研究を大いに発展させることが期待される。

研究成果の概要（英文）：To clarify the role of weathered bedrock layer on the water reservoir function of forest, we measured hydraulic properties of bedrock and surveyed in-situ processes of rainfall infiltration through bedrock. First, we successfully obtained unsaturated hydraulic properties of granitic bedrock by applying the evaporation method to shaped boring core. Second, we developed new evaporation method combined with the one-step outflow method, which enables quick and effective measurement of hydraulic properties. Third, we conducted hydrological survey at a bedrock outcrop and found that rainwater flows quickly through cracks in shallow bedrock layer. However, the quick flow does not reach deeper layer, indicating that the infiltration process within weathered bedrock layer can be simulated by Richard's equation, as with soil layer.

研究分野：森林水文学、砂防学

キーワード：風化基岩 花崗岩 水源涵養 不飽和水文特性 改良蒸発法 ワンステップ流出法 亀裂流

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 森林土壌が降雨を貯留することで、水源涵養や防災機能を果たすことが広く知られている。しかし、地表面から1~2 mの厚さで分布する土壌だけでなく、その下部に数10 mの厚さで存在する風化基岩層により多くの水が浸透・貯留されることが近年の研究で明らかになってきた。山体深部の弱風化・未風化基岩は透水性が極めて低いが、浅部の強風化を受けた基岩は土壌に近い透水性を持ち、多くの水が土壌同様に岩石組織の間隙内を移動する¹。実際に基岩層の降雨浸透を野外実測した例では、年降水量の35~55%が花崗岩質の風化基岩層に浸透することが報告されている²。そのため旧来の「基岩は不透水」という常識は改められ、森林土壌と風化基岩層の降雨浸透・貯留過程を連続体として捉える必要性が認識されてきている。

このことから、森林土壌だけでなく風化基岩層の雨水浸透特性を表す物理パラメータを解析すれば、森林の持つ水源涵養機能のより実態に即した定量的評価が可能となる。しかしそのような研究は未だ前例がなく、その理由は風化基岩の持つ不飽和水文特性、とりわけ不飽和透水係数に関する知見が不足していることに起因している。

(2) 風化基岩のような低透水性試料の不飽和透水係数を従来の試験法で計測しようとする、供試体上下面の圧力を制御しながらごく微量かつ一定の水を流さねばならないため制御が難しく、時間と手間がかかりすぎるという問題があった。

そこで応募者は試料から水分を自然蒸発させることにより微小な水流を起こす手法「蒸発法」に着目した。これは装置がシンプルで取扱いが容易なうえ、風化基岩のような低透水性の試料に適している。逆に蒸発法では透水性が非常に高い試料（森林の表層土壌など）に適さないという弱点があったが、応募者は装置を改良し他手法への拡張性を持たせることで、湿潤~乾燥の広いレンジで計測できる「改良蒸発法」を開発した³。これを用いれば、今まで計測例のない森林の表層土壌から風化基岩層までの不飽和水文特性を、同一手法で連続的に把握できるという着想に至った。

2. 研究の目的

(1) 本研究では野外の森林土壌および風化基岩の供試体をサンプリングし、改良蒸発法装置を用いて効率的に不飽和水文特性（保水性・透水性）を計測する。計測結果に物理水文モデルをフィッティングしてパラメータ値を導出する。

(2) 蒸発法に共通する問題点として、供試体内に発生する水流フラックスが非常に小さいため湿潤領域の高い透水係数が計測できず、また実験に要する時間が2から7日と長いため多数の供試体計測に手間がかかっていた。上記の問題点を解決するために改良蒸発法の手法をさらに最適化する。

(3) 野外に観測機器を設置し、土壌および風化基岩層内の降雨浸透過程を継続的に観測する。観測結果から風化基岩の物理パラメータの決定方法を最適化する。森林の降雨浸透・貯留機構をより高度に解明し評価する。

3. 研究の方法

(1) 風化花崗岩のボーリングコアに加工を施すことで改良型蒸発法を適用し、不飽和水文特性を計測する新たな手法を開発する。ボーリングコア（直径5 cmの円柱）を一回り大きいアクリルパイプに入れ、シリコンを流し込んで周囲の隙間を埋める。シリコンの硬化後、コアをパイプごとチップソー切断機で長さ6 cmにカットすることで供試体を作製する。これにより岩の構造を崩さず理想的な状態で切断することが可能である。さらに側面からドリルで穴を開け、テンシオメータを挿入して蒸発法試験を行い、不飽和水文特性を計測する。

(2) 改良蒸発法のさらなる迅速化のために、湿潤領域をワンステップ流出法、乾燥領域を蒸発法でそれぞれ計測する組み合わせ手法を開発する。従来法の結果と比較し、精度を検証する。

(3) 上記手法で計測する不飽和水文特性は風化基岩のマトリックス（組織）部分のものであるが、実際に山地の基岩を観察すると多くの亀裂が存在する。風化基岩の亀裂を伝った浸透現象の実態を解明するため、林道工事で掘削された基岩露頭を利用して観測を行う。基岩露頭の横方向からドリルで穴を開け、基岩マトリックス部分と亀裂部分にテンシオメータを挿入し、降雨浸透過程の違いを比較する。

4. 研究成果

(1) 風化花崗岩のボーリングコアを加工して試料を作成し、改良蒸発法により不飽和水文特性（水分特性曲線・不飽和透水曲線）を計測することに成功した。水分特性曲線（図1左）は飽和から-500 cmの圧力レンジで良好に計測され、有効間隙率は0.1以下と非常に小さい傾向を示し、曲線に従来の対数正規分布(LN)モデルをフィッティングすることができた。また不飽和透水曲線（図1右）も同様の圧力レンジで良好に計測された。従来モデル(Mualem, Burdineモデル)から推定した曲線に比べ、実測値は特に乾燥領域で透水性が高い結果となり、土壌を対象とした

従来モデルが風化花崗岩にはそのまま適用できないことが示唆された。

このように独自のサンプリング方法と、改良型蒸発法を応用することで、風化基岩の不飽和水文特性の計測が容易に行えることが示された点に意義がある。本手法を用いた計測を進めていくことで、経験モデルでしか説明されてこなかった基岩層への雨水浸透・貯留過程が、厳密な数値計算により再現可能となる点に大きな重要性がある。

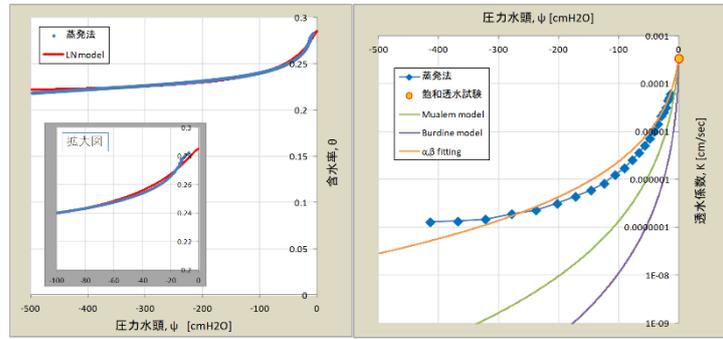


図1 (左) 水分特性曲線 (右) 不飽和透水曲線

(2) ワンステップ流出法と蒸発法を組み合わせた新たな手法である「連続流出蒸発法 (Continuous Outflow Evaporation Method, COFEM)」を開発した (図2)。まず飽和させた土壌サンプラーを図2aのように流出法装置にセットし、ポーラス板を介して ΔH の水頭差を与え排水させる。排水が終わったらサンプラーを軽く持ち上げながらアタッチメントを取り換え、図2bのように蒸発法を行う。

本手法ならびに従来の改良蒸発法 (IEM)、加圧板法 (pF 試験) で得られた水分特性曲線を図3に示す。三手法の結果は良好に一致しており、そのうえで実験に要する日数をIEMで6日のところをCOFEMで3日と約二分の一に短縮することができた。野外で採取した試料に対してこの新手法を用いた計測を進めており、良好なデータが蓄積されてきている。

森林土壌の水分特性だけでなく不飽和透水係数を多点で計測する事例は労力と時間の問題からまれであるが、両者を計測することで水を保持する土壌間隙の連結特性 (間隙径分布・屈曲度等) を算出することができる。本研究では改良型蒸発法ならびに新たな組み合わせ手法により多点計測を迅速に行うことが可能となり、間隙連結特性の空間分布を把握することが可能となった。さらにこれまで計測例が極めて少なかった風化基岩に対しても同様の計測を行うことが可能となった点に大きな意義がある。本手法を用いた計測を進めていくことで、森林の水源涵養機能を決める重要なパラメータでありながら不明な点の多かった間隙連結特性の分布メカニズムを、土壌発達と基岩風化過程の両面から理論的に明らかにできる点に大きな重要性がある。

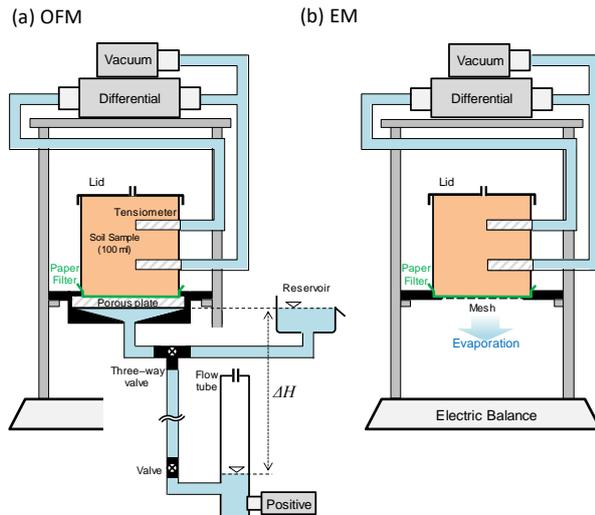


図2 連続流出蒸発法の装置の概要

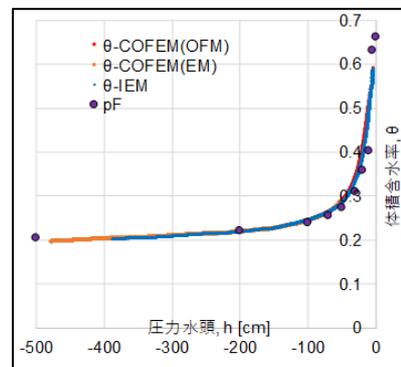


図3 水分特性曲線の比較

(3) 花崗岩山地の強風化基岩の露頭を垂直に整形し、図4左の写真に示す基岩のマトリックス部分 (M1~M3) と亀裂部分 (C1~C4) のそれぞれにハンドドリルで横穴を開けてテンシオメータを挿入した。最も浅いC1, M1地点で地表面からの深度が約100 cm、C2, M2地点で約140 cm、C3, M3地点で約180 cmである。

C1地点 (深度約100 cm) において、雨水が亀裂を伝って素早く流れる様子が確認された (図4右)。この現象は、総雨量40 mmを超える全ての降雨イベントにおいて確認された。しかしC2以深の地点では素早い浸透はみられなかった。深部まで素早い水流が起きなかった原因の考察として、地表近くの強風化基岩では亀裂に土砂化した岩が詰まっているため、亀裂中では開水路流でなく比較的素早い浸透流が起

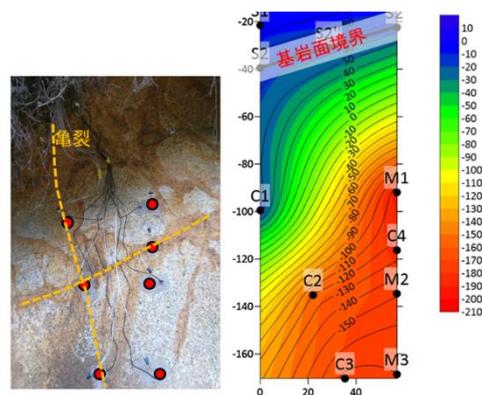


図4 (左) 露頭写真と亀裂の位置 (右) 降雨時の圧力水頭分布

こっていると考えられる。そのため周囲の基岩マトリックス部分に水が吸収・拡散されやすく、基岩深部までの素早い流れが起きなかった可能性がある。

このように花崗岩流域における地表付近の強風化基岩層では、降雨時に確かに亀裂流が存在するものの、深部までは伝わらない可能性が示された。これは、山地全体の降雨流出過程を考えるうえで、表層付近の不飽和浸透過程においては亀裂分布を考慮しなくていいことを示唆している。つまり、従来の土壌と同様のリチャーズ式に基づくモデルで基岩中の不飽和浸透過程を再現できるということであり、非常に重要な知見である。今後、森林の持つ水源涵養機能のより実態に即した定量的評価を進めていくうえで、一つの明確な方向性を示せたところに大きな意義がある。ただし、これは基岩浅部の強風化基岩に限定した話であり、基岩深部ではマトリックス透水係数が極めて小さくなるため亀裂を伝った水流が支配的になると考えられる。浅部と深部の境界における浸透過程の遷移とその取扱いが今後の課題といえよう。

<引用文献>

- (1). Katsura et al. (2006) Saturated and Unsaturated Hydraulic Conductivities and Water Retention Characteristics of Weathered Granitic Bedrock. *Vadose Zone J.*, 5(1), 35-47.
- (2). Kosugi et al. (2006) Water flow processes in weathered granitic bedrock and their effects on runoff generation in a small headwater catchment. *Water Resour. Res.*, 42(2), W02414.
- (3). Masaoka and Kosugi. (2018) Improved evaporation method for the measurement of the hydraulic conductivity of unsaturated soil in the wet range. *J. Hydrol.*, 563, 242-250.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 Naoya Masaoka, Ken'ichirou Kosugi	4. 巻 563
2. 論文標題 Improved evaporation method for the measurement of the hydraulic conductivity of unsaturated soil in the wet range	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Hydrology	6. 最初と最後の頁 242-250
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jhydrol.2018.06.005	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 正岡直也, 小杉賢一朗
2. 発表標題 蒸発法と流出法の組み合わせによる土壌不飽和水分特性の迅速な計測手法
3. 学会等名 砂防学会研究発表会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 正岡直也, 小杉賢一朗, 藤本将光
2. 発表標題 花崗岩山地源流域における流域界を越えた地下水流動の解析
3. 学会等名 砂防学会研究発表会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 正岡直也, 小杉賢一朗, 藤本将光
2. 発表標題 山地源流域における基岩内地下水面形状が水収支に及ぼす影響
3. 学会等名 日本森林学会大会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Naoya Masaoka, Ken'ichirou Kosugi, Masamitsu Fujimoto
2. 発表標題 Monitoring of bedrock groundwater in intensively drilled wells for estimating the process of runoff generation in a headwater catchment
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 正岡直也, 小杉賢一朗, 藤本将光
2. 発表標題 高密度観測データに基づく花崗岩山地の地下水水文過程に関する考察
3. 学会等名 日本森林学会大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 正岡直也
2. 発表標題 風化基岩層の不飽和水文特性計測の試み
3. 学会等名 日本森林学会大会
4. 発表年 2017年～2018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