

森林における土壌透水性分布が斜面の水文過程に及ぼす影響

京都大学大学院農学研究科 ○柳井鴻太郎 正岡直也 小杉賢一郎

1. 研究の背景と目的

今後増加が見込まれる豪雨災害の被害軽減のためには、災害発生の危険度の高い位置・時刻を事前に予測することが有効な手段である。分布型モデルは実際の物理現象に則ったシミュレーションを行うため高精度な予測が期待できるが、斜面を再現するための土壌水分パラメータには代表値を一律に与えることが多く、本来斜面に存在する不均質性は無視されている。とりわけ土壌の透水性に関しては貫入抵抗値 N_c と飽和透水係数 K_s との相関関係が報告されているが[1][2]、相関がそこまで明瞭でないことや土質によって相関関係が異なること、検討された土質が限られている等の課題がある。また斜面を掘り返してサンプルを採取するという観測手法の労力の大きさから山地斜面における詳細な分布を調べた事例は無く、不均質な透水性分布の実態とそれが斜面の水文過程に与える影響は未知である。本発表では高密度な野外観測に基づく降雨浸透シミュレーションによる解析を行い、不均質な土壌透水性分布が斜面の水文過程に及ぼす影響を検討する。

2. 研究の手法

2.1. 調査地の概要

調査は滋賀県甲賀市信楽水文試験地B流域内の斜面で行った。尾根と谷筋の点を結ぶ測線cラインを設け、cラインの末端部分を調査対象とした(図1)。レーザー式測量器具を用いて地表面の測量を行った。長谷川式土壌貫入計を用いて貫入抵抗値 N_c の鉛直分布を測定した。また $N_c=50$ を基岩面として基岩面標高を求めた。試験地内で 0.5 mm 転倒式ます型雨量計による雨量観測を行った。

2.2. 飽和透水係数の測定及び圧力水頭観測

cライン末端部の3地点においてゲルファーマータ法(以下GP法)[3][4]によって複数深度の飽和透水係数 K_s を測定した。狙いの深さの貫入孔(半径10 mm)をあけてウェルとして使用し、それに適用できるGP法装置を自作して用いた[5]。これらのGP法実施箇所と同じ深度にテンシオメータを設置し圧力水頭 ψ を5分間隔で記録した。

cライン近傍の地点で貫入試験と複数深度での土壌サンプル採取を行った。変水位法によって土壌サンプルの K_s を測定した。これより得られた $N_c \times K_s$ の関係から推定した K_s 分布を後述する降雨浸透シミュレーションのCase1斜面モデルに与えた。

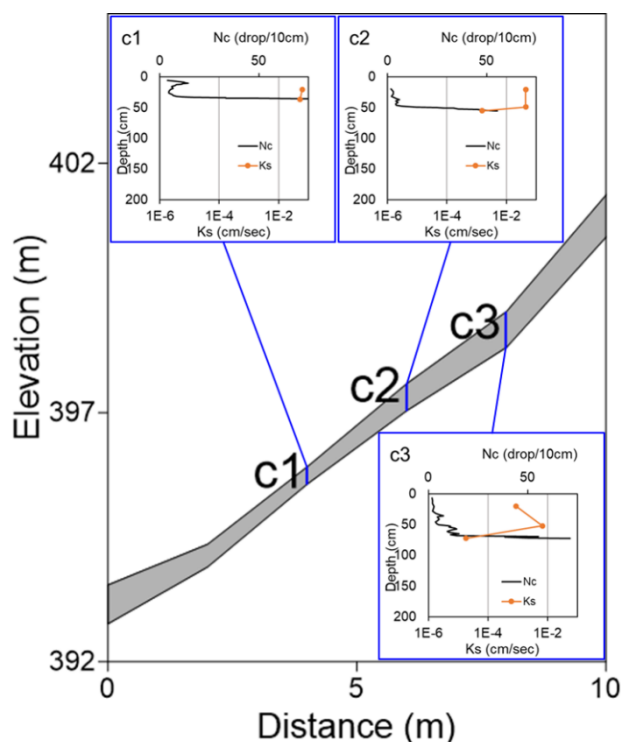


図-1 cライン末端部断面図及びc1-3地点における $N_c \cdot K_s$ の測定結果

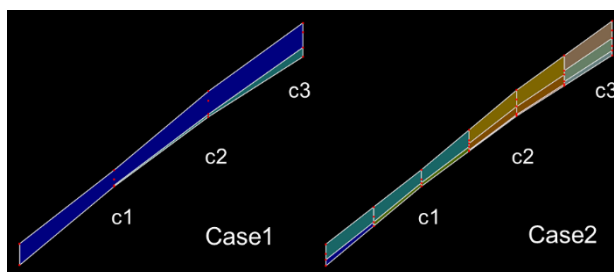


図-2 浸透計算斜面モデル。(左) Case1: N_c から予測した一様な K_s 分布, (右) Case2: GP法による詳細な実測 K_s 分布. 図中の赤点は ψ 測定位置及び領域分割のための境界点を表す. 色分けはそれぞれ対応する K_s を与えた領域を示す.

2.3. 降雨浸透シミュレーション

浸透計算ソフトHYDRUS 2Dを用いた降雨浸透シミュレーションを行った。湧水を示す圧力水頭反応があったc3地点以下の斜面末端部を対象とした。測量データを基に、 K_s をはじめとする土壌パラメータの与え方を変えた2ケースの2D斜面モデルを作成した(図2)。すなわち従来手法である $N_c \times K_s$ 関係より推定した K_s 分布を与えたケース(Case1)と新手法であるGP法で実測した詳

細な K_s 分布を与えたケース (Case2) である。ただし K_s 以外の土壌パラメータは京都府上賀茂試験地及び千葉県袋山沢試験地の森林土壌パラメータ (未発表データ) より推定した。これらの斜面モデルに調査地で観測された降雨イベントを再現する降雨波形・湧水波形の境界条件を与え、浸透計算の結果を比較した。

3. 結果と考察

GP 法で測定した K_s は必ずしも N_c との相関を示さない不均質な分布であった (図 1)。c3 では従来通り N_c と K_s の相関がみられるが、末端に近い c1, c2 においては N_c が 50 近い基岩面上であっても大きな K_s が見られた。なお、土壌サンプルを採取した地点では c3 と同様に N_c と K_s に相関がみられた。

浸透計算について、テンシオメータの設置位置に対応する ψ 変動の計算結果と実測値を比較すると (図 3・4), Case2 において ψ ピークをよく再現していた。特に c2 地点において Case1 が緩やかなピーク波形持つ一方で、Case2 は鋭いピークを再現していた。また Case1 と Case2 の両方で ψ ピーク後の逓減が実測に比べ遅かった。上流端の計算値では逓減の遅れが小さいことから、側方流による斜面上部からの継続的な水供給が遅れの原因であると考えられる。また両ケースで逓減波形の傾きが非常に似通っていることから、サンプルの平均値 2.27 を一律入力した孔隙径分布の幅を表すパラメータ σ [6] が要因となった可能性がある。そこで Case2 において σ を 1.70 に小さくしたモデル (σ 変更モデル) でシミュレーションを行ったところ、逓減の遅れが解消された。特に c2 地点における ψ 波形再現が改善したが、一方で c1 地点においてはピークを過小評価した。以上より、不均質な K_s 分布によって降雨開始時の鋭い ψ ピークが生じることが示唆された。 K_s が小さく水の貯留が少ない領域の周辺で ψ 上昇が大きくなったことや、不飽和浸透の素早い領域が鋭い ψ 上昇に寄与したことが考えられる。いずれにせよ GP

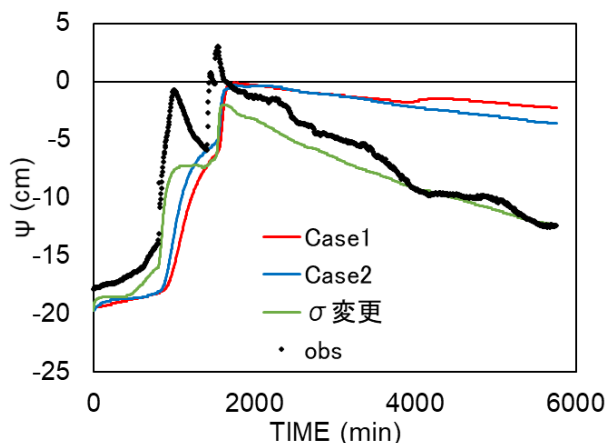


図-3 c1 地点基岩面上のシミュレーション結果と実測値の比較 (圧力水頭)

法によって実測した詳細な K_s 分布を入力することで、一様な K_s 入力では平準化されていた複雑な降雨浸透を再現できたと考えられる。一方で ψ 波形をさらに良い精度で予測するには σ をはじめとする K_s 以外の土壌パラメータを把握する必要があることが示唆された。

4. さいごに

GP 法を用いて詳細な K_s 分布を調査した結果、先行研究における $N_c \times K_s$ 関係は必ずしも成り立たない不均質な分布が明らかになった。

HYDRUS 2D を用いた降雨浸透シミュレーションを行った。従来手法によって N_c から推定した K_s 分布を与えた斜面モデルでは実測した降雨後の鋭い ψ ピークを再現できなかった。一方 GP 法による実測の K_s 分布を与えた斜面モデルではこのピークをある程度再現でき、また一様に代表値を入力した σ を小さくすることでさらに ψ 波形の再現度が向上した。正確な降雨流出・崩壊予測には透水性分布の把握が重要であると考えられる。また σ をはじめ他の土壌パラメータ分布の重要性も示唆された。

今後は対象を流域スケールに拡大し、ハイドログラフに及ぼす影響等を検討する必要がある。

参考文献

- [1] 若月強ら (2007): 砂防学会誌, Vol. 59, No. 6, p. 38 - 46
- [2] 平松晋也, 尾藤顕哉 (2001): 砂防学会誌, Vol. 54, No. 4, p. 12 - 21
- [3] Reynolds W. and Elrick D. (1985): Soil Science, Vol. 140, No. 4, p. 292 - 302
- [4] Zhang Z. *et al.* (1998): Soil and Tillage Research, Vol. 49, p. 219 - 221
- [5] 柳井鴻太郎ら (2022): 令和 4 年度砂防学会研究発表会概要集, p. 565 - 566
- [6] Kosugi K. (1996): Water Resources Research, Vol. 32, No. 9, p. 2697 - 2703

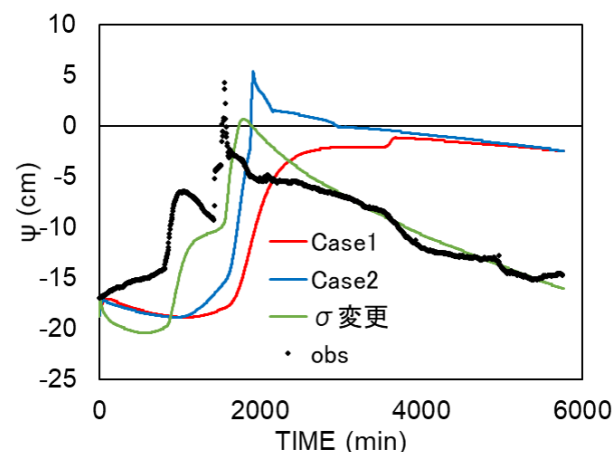


図-4 c2 地点基岩面上のシミュレーション結果と実測値の比較 (圧力水頭)