

シラス地盤における水分特性曲線および不飽和透水係数の関数の推定

工学部 伊藤 真一

1. はじめに

鹿児島県に広く分布しているシラスは、多孔質であるため土粒子密度が小さく水が浸透すると安定性を失いやすい。さらに、鹿児島県は降雨量が多いため、豪雨による斜面崩壊発生リスクが高いといえる。豪雨時の斜面崩壊の発生を未然に予測して被害を軽減するためには、地盤内への雨水の浸透挙動を適切に把握する必要がある。そのためには、不飽和浸透特性（水分特性曲線および不飽和透水係数の関数）に関するパラメータの推定が重要となる。シラスは鹿児島県特有の土であるため、その不飽和浸透特性を調査した事例が少ないことに加えて、現場のシラスと一度乱したシラスではその性質が大きく異なるため、現地のシラス地盤における不飽和浸透特性の推定は鹿児島県の防災にとって重要である。本研究の目的は、現地のシラス地盤における体積含水率の現地計測を行い、その計測データに基づいてデータ同化を行うことで、シラス地盤における不飽和浸透特性を推定し、その特徴を把握することである。

2. 現地計測データ

本研究では、鹿児島県鹿児島市東俣町の土取場(写真-1)に雨量計とプロファイル土壌水分計(写真-2)を設置して現地計測を行なった。プロファイル土壌水分計の設置に関しては、簡易貫入試験機とオーガを用いて掘削を行い、その穴にプロファイル土壌水分計を設置した後に、0.075mmのふるいを通した現地土で隙間を埋めて、水を流し込み締め固めた。体積含水率は深度10cmから40cmまでを10cm間隔で計測した。降雨量と体積含水率の計測間隔は10分であり、現地計測を行った期間は令和3年6月2日から7月28日までである。図-1は降雨量と体積含水率の現地計測データを示している。深度40cmで計測された体積含水率は他の深度で計測された体積含水率よりも著しく低く、降雨に対してもほとんど反応していないことがわかる。これは、土壌水分計と孔壁の間に隙間があったことが原因だと考えられる。土壌水分計の設置方法に関しては今後も改良が必要であるが、本研究では、深度10cm, 20cm, 30cmで計測された体積含水率のデータを用いてこれ以降の分析を行うこととした。



写真-1 現地計測の様子



写真-2 プロファイル土壌水分計

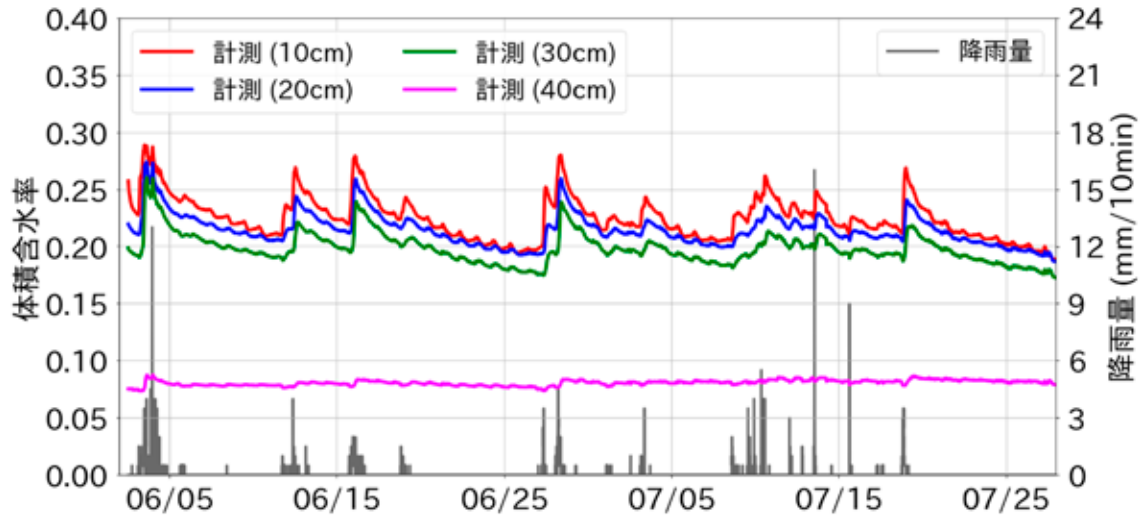


図-1 現地計測データ

3. 解析手法

(1) 不飽和・飽和浸透流解析

不飽和・飽和浸透流解析で用いた支配方程式は次式である 1)。

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \rho_w k(\psi) \bar{\nabla}(\psi + x_3) \\ = \left(n S_r \frac{d\rho_w}{d\psi} + \rho_w S_r \frac{dn}{d\psi} + \rho_w n \frac{dS_r}{d\psi} \right) \frac{\partial \psi}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 ρ_w は水の密度、 $k(\psi)$ は不飽和透水係数、 ψ は圧力水頭、 x_3 は位置水頭、 n は間隙率、 S_r は飽和度、 t は時間である。ここで、水の密度 ρ_w と間隙率 n が圧力水頭 ψ によって変化しないと仮定し、体積含水率 θ が $\theta = n S_r$ で表されること、間隙水の流れが一次元的であることを考慮すると、式(1)は式(2)に変形できる。

$$C \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} \left\{ k(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_3} + 1 \right) \right\} \quad (2)$$

水分特性曲線モデルとしては式(3)に示す van Genuchten モデル 2)を、不飽和透水係数モデルとしては式(4)に示す Mualem モデル 3)を用いた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + (-\alpha \cdot \psi)^n} \right\}^{1-\frac{1}{n}} \quad (3)$$

$$k(\psi) = k_s \cdot S_e^{0.5} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1-\frac{1}{n}} \right\}^2 \quad (4)$$

ここに、 S_e は有効飽和度、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率である。また、 α と n は水分特性曲線の形状を与えるパラメータであり、 k_s は飽和透水係数を表している。本研究において推定すべき不飽和浸透特性に関する未知パラメータは θ_s 、 θ_r 、 α 、 n 、 k_s の5種類である。

モデルに降雨を与える境界条件としては、斜面への雨水の浸透能を考慮した次式 4)を用いた。

$$IR = \omega \tanh(R / \omega) \quad (5)$$

ここに、 IR は浸透能(Infiltration Rate)、 ω は降雨強度を十分に大きくした場合の浸透能、 R は降雨強度である。上述の不飽和浸透特性に関する未知パラメータに加えて ω もデータ同化によって推定することとした。

(2) 融合粒子フィルタ (MPF)

データ同化手法として融合粒子フィルタ⁵⁾ (Merging Particle Filter, 以下 MPF) を用いた。MPF はシステムの状態に関する確率分布を粒子と呼ばれる多数の実現値集合で近似的に表現し、ベイズの定理を応用して各粒子の時間推移を数値的に表現するデータ同化手法である。それぞれの粒子は、数値解析モデル(初期条件, 境界条件, パラメータなど)に関する情報と各モデルにおいて数値解析を行って算出される各時刻の物理量(本研究であれば体積含水率)を情報として有している。図-2 は MPF の概念図を示している。MPF では、(a)Prediction, (b)Filtering, (c)Resampling, (d)Merging という 4 つの手順を逐次繰り返す。粒子数を N 個とすると、(a)Prediction では、時刻 $t-1$ から t までのシミュレーションを N 通り行う。つまり、本研究では、未知パラメータの情報が異なる多数の不飽和・飽和浸透流解析を並列に行う。(b)Filtering では、観測データに対する各粒子の解析結果の適合度に基づいて各粒子に対する尤度を計算する。(c)Resampling では、各粒子の尤度に基づいて復元抽出を行い、粒子を複製・消滅させる。この際に MPF では、 $I \times N$ 個 (I は 3 以上の整数)のサンプルを復元抽出する。最後に、(d)Merging を行い、 $I \times N$ 個のサンプルを、 I 個ずつの組にして、それぞれの組ごとに重み付き和をとることで、 N 個の粒子を再度生成する。この手順を逐次繰り返すことで、事後分布が更新され、計測データとの適合度が高い数値解析モデルへと修正されていく。

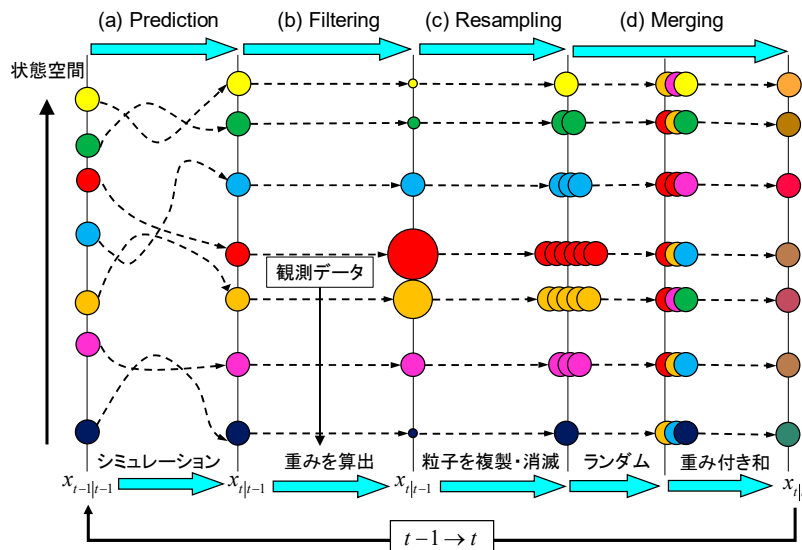


図-2 融合粒子フィルタ (MPF) の概念図

4. 解析結果と考察

図-3 は本研究で用いた解析モデルを示している。深度 15cm と 25cm を境界として 3 層に分割し、モデル上面の境界条件は降雨境界、モデル底面の境界条件は自由排水境界に設定した。降雨境界には上述した浸透能 ω を導入し浸透量を調節した。データ同化に関しては、粒子数 500 個であり、一様乱数によって初期粒子を作成した。観測ノイズは 3 次元正規分布を仮定し、平均は各時刻の体積含水率の計測値、標準偏差は各深度の現地計測データの変動幅の 60%、共分散は 0 とした。なお、データ同化期間は計測期間の最初の 7 日間として、その後の計測データは推定されたパラメータを用いた場合の予測性能を評価するための期間とした。図-4 は各深度における解析結果を示している。上述のように、最初の 7 日間でデータ同化を行い、その後の 49 日間は推定されたモデルに対して降雨データを与えてシミュレーションを行なっている。図中の実線は計測データ、破線は体積含水率の事後分布の平均値 μ 、点線は平均値から $\pm\sigma$ の範囲を示している。これらの結果から、データ同化によって推定されたパラメータ (水分特性曲線および不飽和透水係数の関数) を用いると、データ同化に用いた期間の体積含水率の挙動を再現できるだけでなく、未学習の降雨時の浸透挙動も概ね予測できていることがわかる。図-5 はデータ同化によって推定された水分特性曲線の事後分布を示している。今後は、この推定された水分特性曲線と保水性試験によって得られる水分特性曲線との関係について分析する予定である。

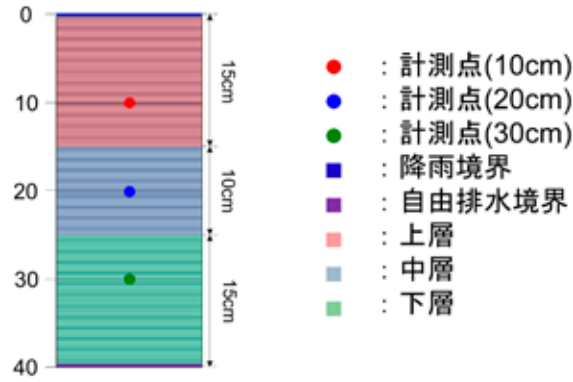
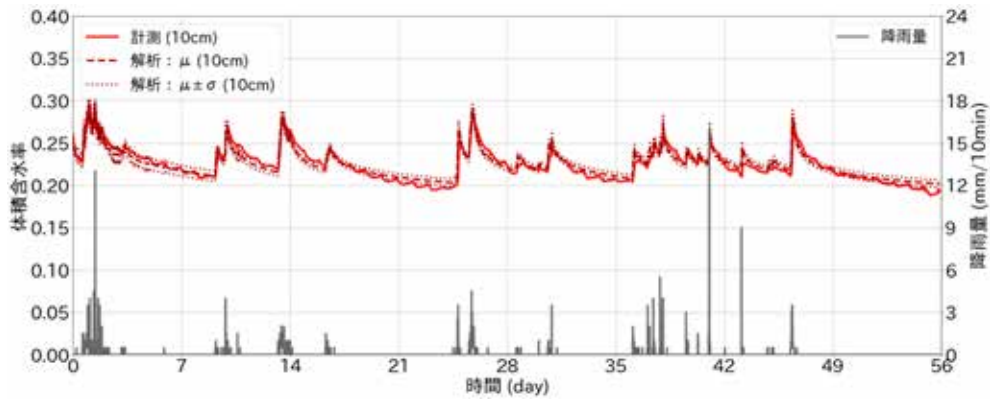
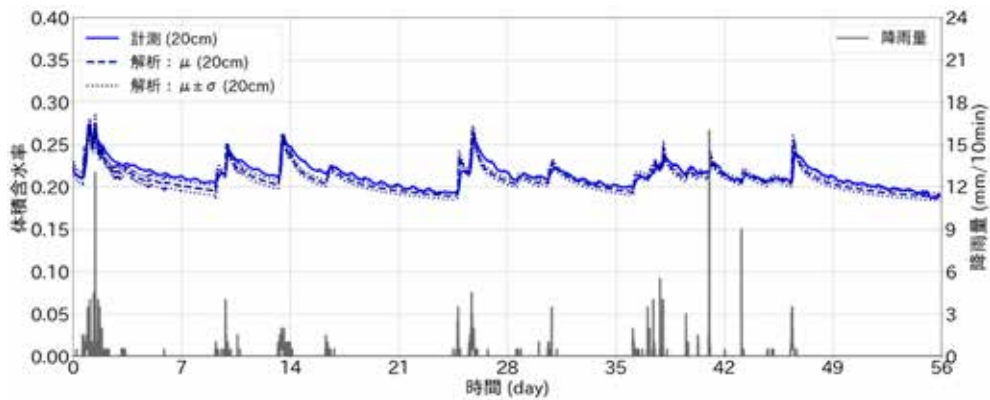


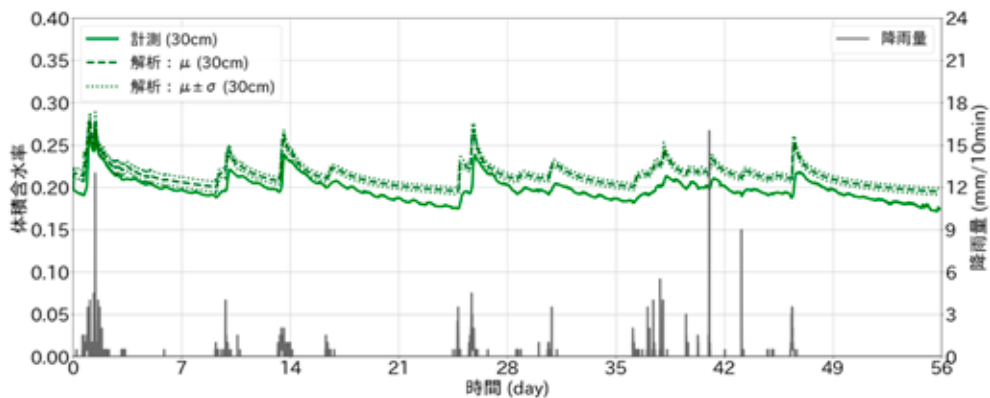
図-3 一次元解析モデル



(a) 深度 10cm



(b) 深度 20cm



(c) 深度 30cm

図-4 解析結果

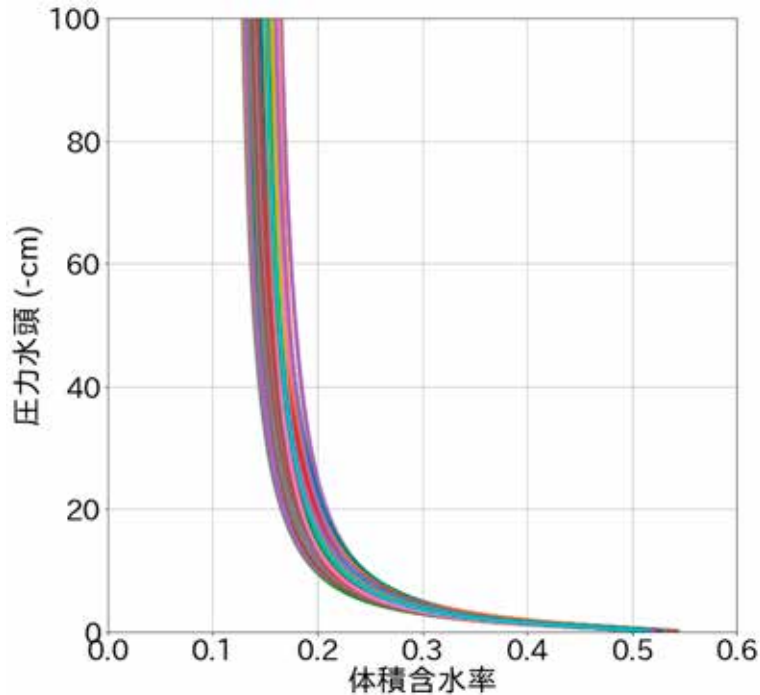


図-5 データ同化によって推定された水分特性曲線の事後分布

5. まとめ

本研究では、不攪乱状態でのシラスの不飽和浸透特性の推定を目的として、シラス地盤における現地計測を行い、それによって得られた体積含水率の計測データに基づく不飽和浸透特性のデータ同化を試みた。その結果、現地計測データを良好に再現できる不飽和浸透特性を推定できることがわかった。今後の展開としては、本研究でデータ同化により推定した不飽和浸透特性と同じ現場で採取した土試料を用いた保水性試験によって推定される不飽和浸透特性を比較し、それらの差異の有無や程度について分析する予定である。

参考文献

- 1) 赤井浩一，大西有三，西垣誠：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，No.264，pp.87-95，1977.
- 2) van Genuchten, M.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, No. 5, pp. 892-898, 1980.
- 3) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water resources research, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 4) 宮田 秀介，恩田 裕一，五味 高志，水垣 滋，浅井 宏紀，平野 智章，福山 泰治郎，小杉 賢一郎，Sidle Roy C., 寺嶋 智巳，平松 晋也：森林斜面におけるホートン型表面流の発生に影響を与える要因—地質および降雨特性の異なる3サイトにおける観測結果の解析—，日林誌，Vol.91，pp.398-407，2009.
- 5) Nakano, S., Ueno, G., Higuchi, T.: Merging particle filter for sequential data assimilation, Nonlinear Processes in Geophysics, Vol.14, pp.395-408, 2007.