

粒子フィルタに基づくヒステリシスを考慮した土壤水分特性のデータ同化

Data Assimilation of Soil Hydraulic Characteristics Considering Effects of Hysteresis
based on the Particle Filter

伊藤真一	Shinichi ITO	(大阪大学大学院工学研究科)
小田和広	Kazuhiro ODA	(大阪大学大学院工学研究科)
櫻谷慶治	Keiji SAKURADANI	(西日本高速道路株式会社)
藤本彩乃	Ayano FUJIMOTO	(大阪大学大学院工学研究科)
横川京香	Kyoka YOKOGAWA	(大阪大学工学部)

豪雨時の斜面崩壊の発生には、斜面内の水分状態が大きく影響するため、現地斜面における土壤水分特性の把握は重要である。筆者らはこれまでに、粒子フィルタを用いて現地計測結果に基づく土壤水分特性のデータ同化を行い、その有用性を明らかにしてきた。しかし、既往の研究では、土壤水分特性におけるヒステリシスの影響を考慮していなかった。本研究では、粘土質シルトで構成された斜面において現地計測された体積含水率の時系列データを用いて、ヒステリシスの影響を考慮した土壤水分特性のデータ同化を実施した。その結果、現地計測結果に対して、より再現性の高い土壤水分特性を推定できることが明らかになった。

キーワード：ヒステリシス、土壤水分特性、データ同化、粒子フィルタ、現地計測
(IGC : E13)

1. はじめに

日本では、毎年全国各地で豪雨による斜面崩壊が発生している。豪雨時の斜面崩壊の主な発生要因として、雨水浸透に伴うすべり土塊自重の増加、サクシジョンの消失によるせん断強度の低下、地下水位上昇に伴う浸透力の増加などが挙げられる¹⁾。つまり、豪雨時の斜面崩壊には、斜面内の水分状態が大きく影響している。

斜面内の水分状態を把握することを目的として、地盤中に土壤水分計やテンシオメータといったセンサを埋設し、体積含水率や土壤水分吸引水頭を現地計測するシステムが開発されている^{例えば 2)}。さらに、無線通信技術の発達により、計測されたデータを遠隔地でリアルタイムに把握することも可能となっている³⁾。このような現地計測システムの継続的な運用は、現時点における斜面内の水分状態の正確な把握だけでなく、計測結果の膨大な蓄積も生み出す。しかし、現地計測結果を用いて議論することができる時間的な範囲は過去から現在までに限られる。このため、これまでに経験したことがない異常降雨による斜面崩壊を未然に予測して、未来の災害を軽減するためには、松尾ら⁴⁾が提案した現地計測とシミュレーションとを有機的に結びつける防災システムが必要である。具体的には、過去から現在までに膨大に蓄積された現地計測結果に基づいて、シミュレーションに必要な土壤水分特性を適切に推定することができれば、その推定された土壤水分特性を用いて短時間予測雨量と連動したシミュレーションを行うことで、未経験の異常降雨時における斜面内の水分状態も予測

できると考えられる。

現地計測結果に基づいて実斜面における土壤水分特性の推定を試みた既往の研究を以下に概観する。梁ら⁵⁾や片山⁶⁾らは、同一深度における体積含水率と土壤水分吸引水頭を同時に計測して、水分特性曲線を直接的に推定した。それに対して、体積含水率、もしくは土壤水分吸引水頭のどちらかの計測結果を用いて、逆解析的に土壤水分特性を求める方法もある。外狩ら⁷⁾、笹原ら⁸⁾、臼木ら⁹⁾は、体積含水率の現地計測結果を用いた土壤水分特性の推定を試みた。逆解析手法として、外狩らは最尤法を、笹原らはパラメータを試行錯誤で与える繰り返し探索法を、臼木らは最適化手法の一種である Levenberg-Marquardt 法¹⁰⁾をそれぞれ適用し、目的関数(現地計測結果と解析結果の残差平方和)を最小にするパラメータの探索を行った。しかし、これらの既往の研究では、推定された土壤水分特性を用いたシミュレーションを行って、現地計測結果を適切に再現できない場合が多い。

筆者らはこれまでに、逐次型データ同化手法の一種である粒子フィルタ(Particle Filter)^{例えば 11)}を用いて、体積含水率の現地計測結果に基づく土壤水分特性のデータ同化を行ってきた¹²⁾⁻¹⁴⁾。その結果、現地計測結果に基づく土壤水分特性の推定に対しては、粒子フィルタのアルゴリズムとして Sampling Importance Resampling(以下、SIR と呼ぶ)が有効であること¹²⁾、弱い降雨時の現地計測結果に基づいて SIR により推定された土壤水分特性を用いると、データ同化に用いたものよりも強い降雨時の現地計測結果も高精度に再現できること¹³⁾、様々な降雨時の現地計測結果を用

いてデータ同化を行うことで、より現地の状態に近い土壌水分特性へと更新できること¹⁴⁾などを明らかにした。

ところで、一般に、不飽和状態にある土では、土が吸水する過程(体積含水率が上昇する段階)と排水する過程(体積含水率が下降する段階)では水分特性曲線が異なり、それによって吸水時と排水時における土の保水性が異なることが知られている。すなわち、土壌水分特性はヒステリシス¹⁵⁾を有している。ヒステリシスの発生には、間隙のくびれに起因するインクピン効果、吸水時と排水時における流体の接触角の変化、流体の流動に伴う多孔体の膨潤などの様々なメカニズムが関わっていると説明されている¹⁶⁾。筆者らがこれまでに行ってきた土壌水分特性のデータ同化では、ヒステリシスの影響を考慮していなかった。したがって、ヒステリシスを考慮できる浸透解析モデルを用いれば、より適切な土壌水分特性のデータ同化が可能になると考えられる。

本研究では、粘土質シルトで構成された斜面において現地計測された体積含水率の時系列データを対象として、粒子フィルタに基づく土壌水分特性のデータ同化におけるヒステリシスの影響について議論する。具体的には、ヒステリシスを考慮しないモデルを用いてシミュレーションを行う解析ケース(以下、No-hysteresisと呼ぶ)と、ヒステリシスを考慮したモデルによってシミュレーションを行う解析ケース(以下、Hysteresis-seepageと呼ぶ)において、それぞれデータ同化を実施する。そして、各解析ケースのデータ同化により推定された土壌水分特性に基づく再現解析をそれぞれ行い、その結果を比較することで、ヒステリシスの影響について議論する。

2. 解析手法

2.1 飽和不飽和浸透流解析

本研究では、シミュレーションモデルとして飽和不飽和浸透流解析を用いる。不飽和状態での雨水浸透は重力方向の流れが卓越する¹⁷⁾ため、本研究では、不飽和土中の連続式であるリチャーズ式¹⁸⁾を式(1)に示すように鉛直1次元状態に簡略化し、有限要素法を用いて解いている。

$$C \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \quad (1)$$

ここに、 C は比水分容量($=\partial\theta/\partial\Psi$)であり、 θ は体積含水率、 Ψ は土壌水分吸引水頭を表している。 t は時間、 z は上向き正の鉛直座標、 k は不飽和透水係数である。また、水分特性曲線モデルとしては式(2)に示す van Genuchten モデル¹⁹⁾、不飽和透水係数モデルとしては式(3)に示す Mualem モデル²⁰⁾を用いている。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + (-\alpha \cdot \Psi)^n} \right\}^{1-\frac{1}{n}} \quad (2)$$

$$k = k_s \cdot S_e^{0.5} \cdot \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1-\frac{1}{n}} \right\}^2 \quad (3)$$

ここに、 S_e は有効飽和度であり、 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。

2.2 ヒステリシスを考慮した水分特性曲線モデル

本研究では、ヒステリシスを考慮した水分特性曲線モデルとして、菊本ら²¹⁾が提案したモデルを採用した。このモデルは、任意条件下にある土の水分保持特性を体積含水率 θ 、土壌水分吸引水頭 Ψ 、水分履歴パラメータ I_w によって全て統一的に表現できるため、水分特性曲線における副走査曲線を計算する必要がないという特徴がある。

まず、体積含水率 θ と土壌水分吸引水頭 Ψ の一義的な関係を与える水分特性曲線モデル(例えば、van Genuchtenモデル¹⁹⁾)を用いて、飽和体積含水率 θ_s から排水して得られる主排水曲線 $f_d=0$ と、残留体積含水率 θ_r から吸水して得られる主吸水曲線 $f_w=0$ を表現する。排水側および吸水側の両極に位置する2つの主曲線は次のように表される。

$$f_d(\theta, \Psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left\{ 1 + (\alpha_d \cdot \Psi)^n \right\}^{\frac{n}{n-1}} - \theta = F_d(\Psi) - \theta = 0 \quad (4)$$

$$f_w(\theta, \Psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left\{ 1 + (\alpha_w \cdot \Psi)^n \right\}^{\frac{n}{n-1}} - \theta = F_w(\Psi) - \theta = 0 \quad (5)$$

ここに、 α_d は排水時の α 、 α_w は吸水時の α を表している。 α は土壌水分吸引水頭 Ψ の逆数の次元を持つパラメータであるため、 $\alpha_d < \alpha_w$ とすることで、同一の土壌水分吸引水頭 Ψ に対応する体積含水率 θ は主吸水曲線より主排水曲線上で常に大きくなり、主排水・吸水曲線が交差しないことが保証される。

次に、ヒステリシスを考慮した水分特性曲線モデルを表現する。土の水分保持状態 (θ, Ψ) は、常に主排水曲線と主吸水曲線で囲まれた領域内を移動するため、ヒステリシスの影響を反映する状態変数として、式(6)に示す水分履歴パラメータ I_w を定義できる。

$$I_w = \frac{\theta - \theta_w}{\theta_d - \theta_w} \quad (6)$$

ここに、 θ_d 、 θ_w は現在の土壌水分吸引水頭における主排水曲線および主吸水曲線上の体積含水率の値であり、式(4)、(5)より求まる。水分履歴パラメータ I_w は主吸水曲線上では0、主排水曲線上では1となる変数であり、 $0 \leq I_w \leq 1$ を満たす。この水分履歴パラメータと式(4)、(5)を用いると、任意条件下にある水分保持特性は、式(7)に示す1つの関数 $f(\theta, \Psi, I_w)=0$ で統一的に表すことができ、この関数が描く面は水分特性曲面と呼ばれる。

$$f(\theta, \psi, I_w) = I_w \cdot f_d(\theta, \psi) + (1 - I_w) \cdot f_w(\theta, \psi) \quad (7)$$

$$= I_w \cdot F_d(\psi) + (1 - I_w) \cdot F_w(\psi) - \theta = 0$$

図-1 に示すように、任意の水分保持特性 (θ, ψ) は、常にこの水分特性曲面 $f(\theta, \psi, I_w)=0$ 上に位置する。

水分履歴パラメータ I_w は、排水過程 $(d\theta \leq 0)$ においては単調増加して 1 に収束し、吸水過程 $(d\theta > 0)$ では単調減少して 0 に収束する。この関係を満足する水分履歴パラメータの発展則は幾つか考えられるが、本研究では、菊本ら²¹⁾が用いている式(8)の関係を採用した。

$$dI_w = h(I_w) d\theta \quad (8)$$

$$= \begin{cases} -\xi \cdot (1 - I_w)^3 \cdot d\theta & \text{when } d\theta \leq 0 \\ -\xi \cdot I_w^3 \cdot d\theta & \text{when } d\theta > 0 \end{cases}$$

ここに、 ξ はヒステリシス特性を考慮するための材料パラメータであり、 $h(I_w) (=dI_w/d\theta)$ は $h(0)=h(1)=0$ かつ $0 < I_w < 1$ を満たす関数である。

本研究では、体積含水率 θ を現地計測結果として用いているため、時刻 $t=0$ における土壌水分吸引水頭 Ψ の値は未知数である。そこで、時刻 $t=0$ における初期の $\alpha_{t=0}$ と排水時の α_d を未知パラメータとして与え、時刻 $t=0$ における水分履歴パラメータは $I_w=0.5$ と仮定することで、吸水時の α_w を算出した。つまり、本研究では、 θ_s, θ_r 、時刻 $t=0$ における $\alpha_{t=0}, n, k_s$ 、排水時の α_d, ξ を未知パラメータとして、粒子フィルタを用いて各パラメータの確率分布をそれぞれ推定することとした。

2.3 粒子フィルタ

粒子フィルタは、システムの時間発展をシミュレーションモデルで計算しながら観測データを取り込んでいく逐次型データ同化手法の一種である。逐次型データ同化手法は、カルマンフィルタ (Kalman Filter)²²⁾ から発展し、現在では、アンサンブルカルマンフィルタ (Ensemble Kalman Filter)²³⁾ や粒子フィルタ^{11), 24)} が代表的な手法として挙げられる。本研究では、その中でも実装が容易な粒子フィルタをデータ同化手法として採用し、粒子フィルタのアルゴリズムとしては SIR を用いた。

粒子フィルタは、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 (アンサンブル) 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評価するデータ同化手法である²⁴⁾。それぞれの粒子は、数値解析モデルの情報 (パラメータ、初期条件、境界条件) と、それぞれのモデルにおいてシミュレーションを行って算出される各時刻の物理量を情報として有している。図-2 は SIR の概念を示している。SIR では、3 つの計算ステップ (1 期先予測、フィルタリング、リサンプリング) を繰り返して、粒子の時間推移を評価する。粒子数を N 個とすると、1 期先予測では時刻 $t-1$ から t までのシミュレーションを N 通り実施する。つまり、粒子数分の順解析を行い、各時刻における全粒子に対する物理量を算出す

る (図-2(a))。次に、観測データに基づいてフィルタリングを行う。1 期先予測により、ある観測データに対して N 通りのシミュレーション結果が得られている。フィルタリングでは、ベイズの定理を用いて、各粒子に与えられる重みを算出する。つまり、時刻 t における観測データとシミュレーション結果の誤差が小さい粒子に対しては大きな重みが与えられ、誤差が大きい粒子に対する重みは小さくなる (図-2(b))。最後に、各粒子の重みを再度統一するために、リサンプリングを行う。この際、フィルタリングの段階で大きな重みが与えられた粒子は複製され、与えられた重みが小さい粒子は消滅する (図-2(c))。このリサンプリングにより、次の時刻の 1 期先予測を行うことができ、なおかつ、フィルタリングにより算出された各粒子の重みを次の時刻の計算にいかすことができる。このように、SIR では 3 つの計算ステップを逐次繰り返すことで、観測データとの適合度が高い粒子を推定する。

粒子フィルタの計算式の導出過程を示す。まず、離散時刻における一般状態空間モデルを考える。式(9)はシステムモデル、式(10)は観測モデルと呼ばれる。

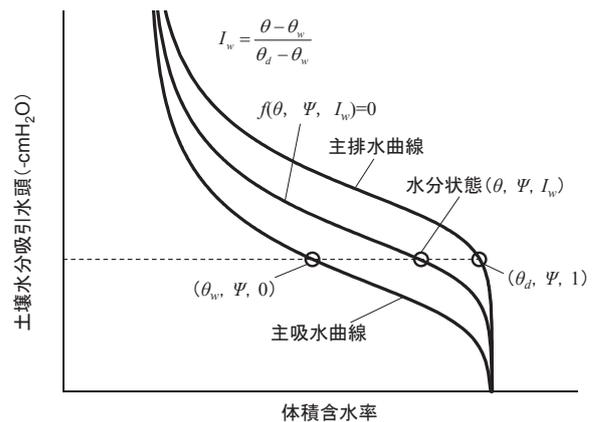


図-1 排水・吸水の履歴を反映する水分履歴パラメータ I_w と現在の水分特性を通る水分特性曲面 $f=0$ ²¹⁾

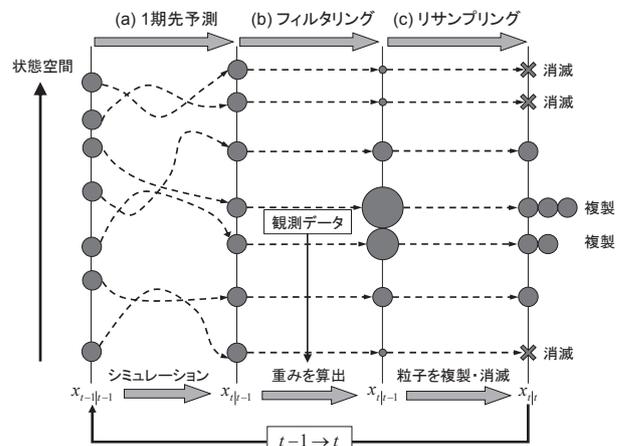


図-2 SIR の概念

$$x_t = f_t(x_{t-1}) + v_t \quad (9)$$

$$y_t = h_t(x_t) + w_t \quad (10)$$

ここで、 x_t は各離散時刻におけるシステムの状態、すなわち、粒子を表しており、 y_t は観測データである。ベクトル v_t と w_t はそれぞれシステムノイズと観測ノイズを表しており、お互いに無相関な任意の確率分布を設定できる。 f_t は時刻 $t-1$ から t までの非線形状態遷移関数であり、本研究では、飽和不飽和浸透流解析がこれに該当する。 h_t は観測演算子であり、システムの状態 x_t と観測データ y_t の間の関係を表している。つまり、式(9)は時刻 t における状態 x_t が、時刻 $t-1$ における状態 x_{t-1} に基づいてシミュレーションを行って得られる確率分布とシステムノイズ v_t の和に等しいことを意味しており、式(10)は時刻 t における状態 x_t と時刻 t における観測データ y_t の間の誤差が観測ノイズ w_t の確率分布に従うことを意味している。

時刻 $t-1$ までの観測データ $y_{1:t-1}$ に基づいた時刻 t における状態 x_t の分布は予測分布 $p(x_t|y_{1:t-1})$ と呼ばれ、時刻 t までの観測データ $y_{1:t}$ に基づいた状態 x_t の分布はフィルタ分布 $p(x_t|y_{1:t})$ と呼ばれる。粒子フィルタでは、状態 x_t に関する確率分布は多数の粒子による実現値集合(アンサンブル)で近似的に表現される。そのため、粒子数 N のアンサンブル $\{x_{t-1}^{(i)}\}_{i=1}^N, \{x_t^{(i)}\}_{i=1}^N$ を用いて、予測分布 $p(x_t|y_{1:t-1})$ は式(11)、フィルタ分布 $p(x_t|y_{1:t})$ は式(12)のように表現される。

$$p(x_t | y_{1:t-1}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - x_{t-1}^{(i)}) \quad (11)$$

$$p(x_t | y_{1:t}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(x_t - x_t^{(i)}) \quad (12)$$

ここで、 δ はディラックのデルタ関数を表している。

SIR の 3 つの計算ステップ(1 期先予測、フィルタリング、リサンプリング)における計算式を示す。まず、1 期先予測では、式(9)を用いて予測分布 $p(x_t|y_{1:t-1})$ は式(13)のように求められる。

$$\begin{aligned} p(x_t | y_{1:t-1}) &= \int \{ \{ p(x_t | v_t, x_{t-1}) \cdot p(v_t) dv_t \} p(x_{t-1} | y_{1:t-1}) dx_{t-1} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\int \{ \{ p(x_t | v_t, x_{t-1}^{(i)}) \\ &\quad \cdot \delta(x_{t-1} - x_{t-1}^{(i)}) dx_{t-1} \cdot \delta(v_t - v_t^{(i)}) dv_t \} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [p(x_t | v_t^{(i)}, x_{t-1}^{(i)})] \end{aligned} \quad (13)$$



図-3 対象斜面におけるセンサの設置状況

次に、フィルタリングでは、ベイズの定理を用いて、時刻 t における予測分布 $p(x_t|y_{1:t-1})$ と観測データ y_t から、それぞれの予測粒子が得られる確率 $p(x_t=x_{t-1}^{(i)}|y_{1:t})$ を計算する。

$$\begin{aligned} p(x_t = x_{t-1}^{(i)} | y_{1:t}) &= \frac{p(y_t | x_{t-1}^{(i)}) p(x_{t-1}^{(i)} | y_{1:t-1})}{\sum_{j=1}^N p(y_t | x_{t-1}^{(j)}) p(x_{t-1}^{(j)} | y_{1:t-1})} \\ &= \frac{w_t^{(i)} \cdot \frac{1}{N}}{\sum_{j=1}^N w_t^{(j)} \cdot \frac{1}{N}} \\ &= \frac{w_t^{(i)}}{\sum_{j=1}^N w_t^{(j)}} = \tilde{w}_t^{(i)} \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 $w_t^{(i)}=p(y_t|x_{t-1}^{(i)})$ であり、 i 番目の予測分布 $p(x_t|y_{1:t-1})$ が与えられた状態での観測データ y_t が得られる確率、すなわち、尤度を表している。状態 $x_{t-1}^{(i)}$ も観測データ y_t も所与であるため、式(14)より、各粒子の相対的な重み $\tilde{w}_t^{(i)}$ を算出できる。

最後に、リサンプリングでは、フィルタリングによって算出された各粒子の相対的な重み $\tilde{w}_t^{(i)}$ に基づいて、粒子の複製・消滅を行う。リサンプリングを行うことで、それぞれの粒子の重みは、次の時刻の 1 期先予測を行う前には $1/N$ となる。この $1/N$ の重みを持つ粒子の個数によって表現される確率分布が、時刻 t におけるフィルタ分布 $p(x_t|y_{1:t})$ である。

以上のようにして、SIR では、3 つの計算ステップ(1 期先予測、フィルタリング、リサンプリング)を逐次繰り返すことで、フィルタ分布 $p(x_t|y_{1:t})$ を観測データ y_t との適合度が高くなるように更新していく。

3. 現地計測結果

本研究の対象斜面は、粘土質シルトで構成された道路沿いの切土斜面である²⁵⁾。図-3は対象斜面におけるセンサの設置状況を示している。この斜面には複数地点に土壌水分計が設置されており、体積含水率を10分間隔で計測している。また、現地の降雨量も転倒枳型雨量計により10分間隔で計測している。本研究では、図-3におけるS-7地点の深度45cmの深さで計測された体積含水率の時系列データを現地計測結果として用いる。図-4は本研究で用いた現地計測結果を示している。最大時間雨量39(mm/h)の激しい降雨に伴って体積含水率が急激に上昇しているが、その後の無降雨期間では体積含水率の下降が非常に遅い。つまり、保水性の高い土で構成された斜面であることが分かる。また、センサを設置した地点では簡易動的コーン貫入試験が行われており、本研究で対象とした地点の基盤は深度45cmよりも遥かに深いことが確認されている。

4. 解析結果

4.1 解析モデル

図-5は本研究で用いた1次元解析モデル(節点数74, 要素数36)を示している。モデル上部には降雨境界, モデル側面には非排水境界, モデル下部には自由排水境界を設定した。降雨境界には, 現地の転倒柵型雨量計で計測された降雨量を全て与えた。自由排水境界は, 境界上の節点と境界の下に位置する節点の圧力勾配を0として, 位置水頭の差によって排水を行う境界条件であり, 基盤の位置が深い場合には有効な排水境界である。初期条件に関しては, 時刻 $t=0$ (min) において深度45cmで計測された値を用いた。

4.2 データ同化の条件

本研究では, ヒステリシスの影響を考慮しないNo-hysteresisと, ヒステリシスの影響を考慮するHysteresis-seepageの2つの解析を実施する。表-1は2つの解析ケースにおける各パラメータの変動幅を示している。本研究では, 各パラメータに関する明確な事前分布が得られていないため, この範囲内で一様乱数により5,000個の粒子を作成した。すなわち, No-hysteresisでは $\theta_s, \theta_r, \alpha_{r=0}, n, k_s$ の5つのパラメータ, Hysteresis-seepageでは合計7種類のパラメータ($\theta_s, \theta_r, \alpha_{r=0}, n, k_s, \alpha_d, \xi$)について, それぞれ一様乱数に基づいて変動幅内で値を決定した。また, 粒子フィルタの尤度計算には観測ノイズ w_t が大きく影響する。本研究では, 試行錯誤の末, 両解析ケースにおいて観測ノイズ w_t として正規分布 $N(\mu=0, \sigma^2=0.005)$ を仮定し, システムノイズ v_t に関しては, 正規分布 $N(\mu=0, \sigma^2=0.0001)$ を設定した。

4.3 データ同化結果

図-4に示す現地計測結果に基づいて, No-hysteresisとHysteresis-seepageにおけるデータ同化を行った。図-6はHysteresis-seepageのパラメータ n に関する粒子の分布の経時変化を一例として示している。 $t=720$ minまでの段階では粒子の複製・消滅は発生しておらず, 全ての粒子は1つずつである。 $t=1440$ minとなると粒子の複製・消滅が発生しているが, 複製される粒子は n が大きいものが多い。van Genuchtenモデルにおいて, n は水分特性曲線の形状に影響を与えるパラメータであり, n が大きいほど吸水性が高く, 保水性は低いという傾向がある。このため, 激しい降雨による急激な体積含水率の上昇を再現するために, 吸水性の高い n が大きい粒子が多く複製されたと考えられる。しかし, その後は時間の経過に伴って, n が小さい粒子の方が数多く複製されている。これは, n が大きい粒子は保水性が低くなるため, 1440min以降の無降雨期間において体積含水率が高い状態を保っている現地計測結果を再現できないためであると考えられる。このように, 粒子フィルタによるデータ同化では, それぞれの未知パラメータは粒子によって近似的に確率分布として表現され, その確率分布は逐次変化する。表-2は解析の最終時刻において推定された確率分布に基づく各パラメータの平均値を, 表-3はその

標準偏差を示している。2つの解析ケースにおいて共通する5種類のパラメータ($\theta_s, \theta_r, \alpha_{r=0}, n, k_s$)に関しては, 平均値も標準偏差もそれほど大きな違いがないことが分かる。図-7は各パラメータの平均値より決定された水分特性曲線を示している。Hysteresis-seepageでは, 吸水する過程における水分特性曲線と排水する過程におけるそれとが顕著に異なっている。また, No-hysteresisでは, Hysteresis-seepageの主排水曲線と主吸水曲線の間を通るような唯一の水分特性曲線が決定されている。

4.4 推定された土壌水分特性に基づく再現解析結果

ここでは, 2つの解析ケース(No-hysteresis, Hysteresis-seepage)において, データ同化を実施してそれぞれ推定された各パラメータの確率分布を用いて, 2通りの再現解析を行い, その結果を比較することで土壌水分特性のデータ同化におけるヒステリシスの影響について議論する。

まず, データ同化によって推定された各パラメータの確率分布に基づいて, モンテカルロシミュレーション(Monte Carlo Simulation, 以下MCSと呼ぶ)を実施して, 現地計測結果に対する再現性を確率論的に比較する。各粒子に対する誤差の評価方法としては, 式(15)に示す平均絶対誤差(Mean Absolute Error, 以下MAEと呼ぶ)を採用した。誤差の指標としては二乗平均平方根誤差(Root Mean Square Error)が用いられることが多いが, 本研究では, 計測結果に対する平均的な誤差の程度を直感的に理解しやすいMAEを用いて誤差の評価を行った。

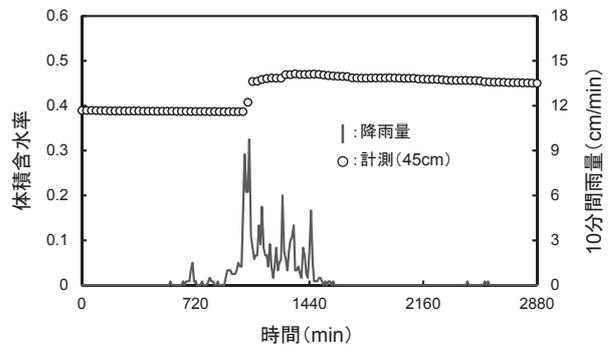


図-4 現地計測結果

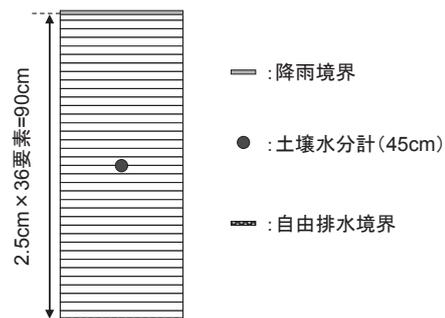


図-5 1次元解析モデル

表-1 各パラメータの変動幅

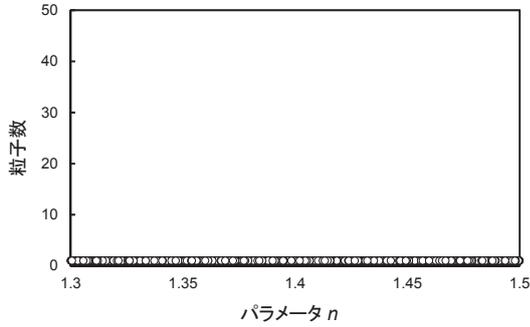
	θ_s	θ_r	$\alpha_{t=0}$ (1/cm)	n	k_s (cm/s)	α_d (1/cm)	ξ
No-hysteresis	0.51~	0.29~	0.04~	1.30~	0.0083~	/	/
Hysteresis-seepage	0.55	0.33	0.07	1.50	0.0333	0.01~ 0.03	10.00~ 40.00

表-2 推定された分布に基づく各パラメータの平均値

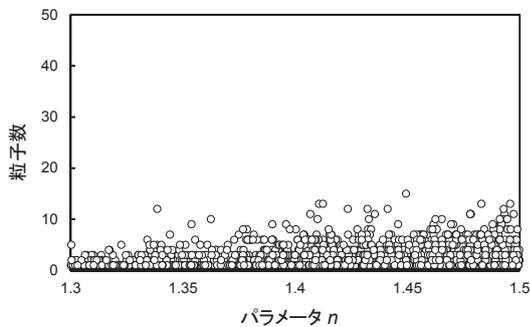
	θ_s	θ_r	$\alpha_{t=0}$ (1/cm)	n	k_s (cm/s)	α_d (1/cm)	ξ
No-hysteresis	0.517	0.307	0.063	1.464	0.018	/	/
Hysteresis-seepage	0.520	0.311	0.059	1.363	0.018	0.015	25.243

表-3 推定された分布に基づく各パラメータの標準偏差

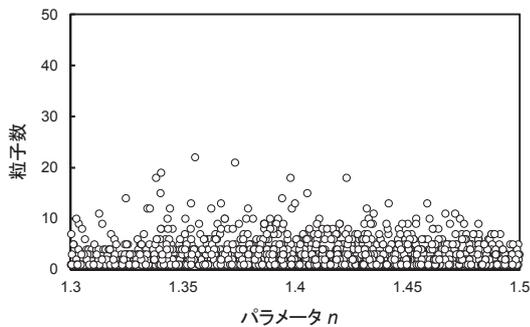
	θ_s	θ_r	$\alpha_{t=0}$ (1/cm)	n	k_s (cm/s)	α_d (1/cm)	ξ
No-hysteresis	0.0079	0.0103	0.0082	0.0416	0.0049	/	/
Hysteresis-seepage	0.0079	0.0112	0.0084	0.0531	0.0046	0.0022	8.2098



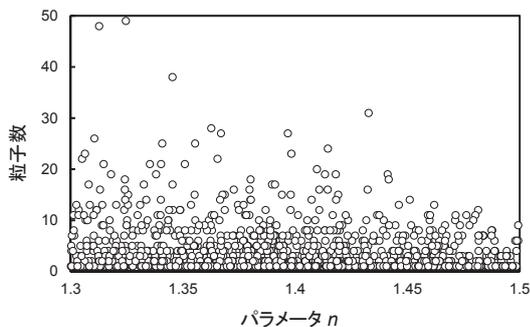
(a) 720min



(b) 1440min



(c) 2160min



(d) 2880min

図-6 粒子の分布の経時変化
(Hysteresis-seepageのパラメータn)

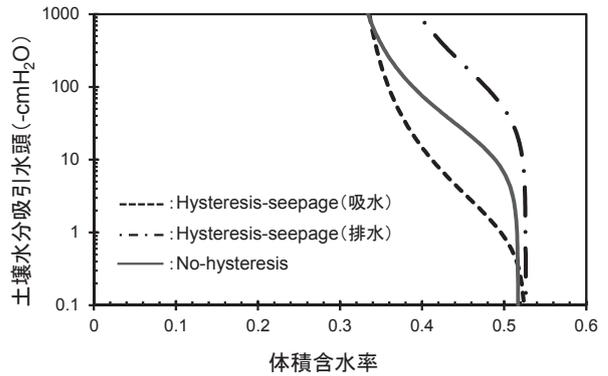


図-7 平均値により決定された水分特性曲線

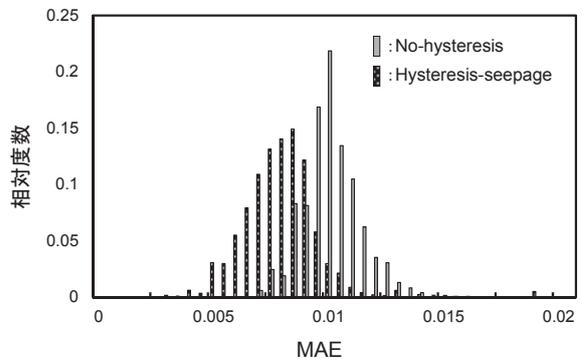


図-8 2つの解析ケースにおいてMCSを行って得られた
MAEのヒストグラム

$$MAE = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |\theta_{cal}^{(i)} - \theta_{obs}^{(i)}| \quad (15)$$

ここに、 θ_{cal} は体積含水率の解析値、 θ_{obs} は体積含水率の計測値、 M は計測結果の個数を表している。図-8は2つの解析ケースにおいてMCSを行って得られたMAEのヒストグラムを示している。MAEの値が小さいほど、計測結果と解析結果の誤差が小さいことを意味している。ヒステリシスを考慮したモデルを用いてデータ同化を行ったHysteresis-seepageの方が、ヒステリシスを考慮していないNo-hysteresisよりも、分布が左側に寄っていることから、

Hysteresis-seepageの方が現地計測結果に対する誤差の小さい粒子が多く複製されているといえる。このことから、ヒステリシスを考慮して粒子フィルタによるデータ同化を行うことで、現地計測結果をより適切に再現できる土壌水分特性の確率分布を推定できることが明らかになった。

次に、表-2に示す各パラメータの平均値を用いて、現地計測結果に対する再現解析を実施した。つまり、各パラメータの平均値を同定されたパラメータとして決定論的に扱った場合の計測結果に対する再現性を比較した。図-9はNo-hysteresisにおける再現解析結果を、図-10はHysteresis-seepageにおけるそれを示している。両者を比較すると、降雨ピーク時の体積含水率が上昇するタイミングや上昇後の体積含水率の値にはそれほど大きな差はない。No-hysteresisは1本の水分特性曲線で表現されているのに対してHysteresis-seepageは2本の水分特性曲線で囲まれた領域内を現在の水分状態が移動するため、吸水時の体積含水率の再現解析結果にも若干の違いはあるものの、解析結果の差は排水時の方が明らかに大きい。降雨終了後における体積含水率の経時変化を比較すると、Hysteresis-seepageでは降雨終了後も体積含水率は緩やかに下降しており、対象斜面の保水性の高さを良く表現できているのに対して、No-hysteresisでは降雨が終了してすぐに体積含水率が下がり始め、最終時刻では大きな誤差が発生している。これは、本研究で用いた現地計測結果のように、降雨ピーク時には体積含水率が急激に上昇し、降雨終了後には体積含水率が緩やかに下降するという土壌水分特性を1本の水分特性曲線で表現することが難しいためであると考えられる。そのような場合には、ヒステリシスを考慮したモデル化を行い、主排水曲線と主吸水曲線で囲まれた領域内の土壌水分特性をシミュレーションに反映できるという条件の下でのデータ同化によって、現地計測結果との適合度が高いパラメータを推定する必要があるといえる。

5. まとめ

本研究では、粘土質シルトで構成された斜面において現地計測された体積含水率の時系列データを対象として、粒子フィルタに基づく土壌水分特性のデータ同化におけるヒステリシスの影響について議論した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 現地計測結果に基づいて、粒子フィルタ(アルゴリズムはSIR)を用いたデータ同化を行って、土壌水分特性に関するパラメータの確率分布をそれぞれ算出した。その結果、No-hysteresisとHysteresis-seepageで共通する5種類のパラメータ(θ_s , θ_r , $\alpha=0$, n , k_s)に関しては、平均値も標準偏差もそれほど大きな違いがないことが分かった。また、パラメータの平均値を用いて水分特性曲線を描くと、Hysteresis-seepageでは、主吸水曲線と主排水曲線の間に大きな幅のある水分特性曲線が推定されており、No-hysteresisでは、Hysteresis-

seepageの主排水曲線と主吸水曲線の間を通るような水分特性曲線が推定されていることが分かった。

- (2) データ同化によって推定された各パラメータの確率分布に基づいてMCSを実施して、現地計測結果に対する再現性を確率的に比較した。その結果、No-hysteresisと比較して、Hysteresis-seepageの方が現地計測結果に対する誤差の小さい粒子が多く複製されていることが分かった。このことから、ヒステリシスの影響を考慮して粒子フィルタによるデータ同化を行うことで、現地計測結果をより適切に再現できる土壌水分特性の確率分布を推定できることが明らかになった。
- (3) 各パラメータの平均値を同定されたパラメータとして決定論的に扱った場合の現地計測結果に対する再現性を比較した。その結果、降雨ピーク時の体積含水率が上昇するタイミングや上昇後の体積含水率の値にはそれほど大きな差はないことが分かった。しかし、降雨終了後における体積含水率の経時変化を比較すると、Hysteresis-seepageでは降雨終了後も体積含水率は緩やかに下降しており、対象斜面の保水性の高さを良く表現できているのに対して、No-hysteresisでは降雨が終了してすぐに体積含水率が下がり始め、最終時刻では大きな誤差が発生していることが分かった。これは、降雨ピーク時には体積含水率が急激に上昇し、降雨終了後には体積含水率が緩やかに下降するという土壌水分特性を1本の水分特性曲線で表現することが難しいためであると考えられる。

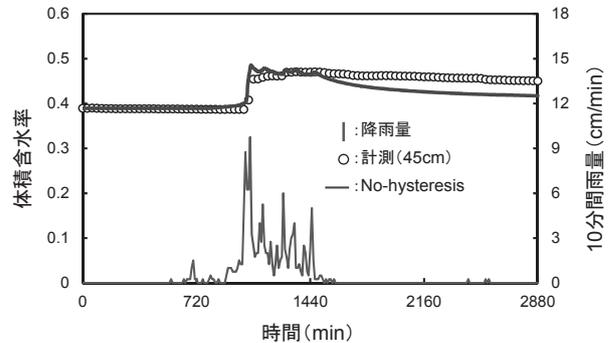


図-9 No-hysteresisにおける再現解析結果

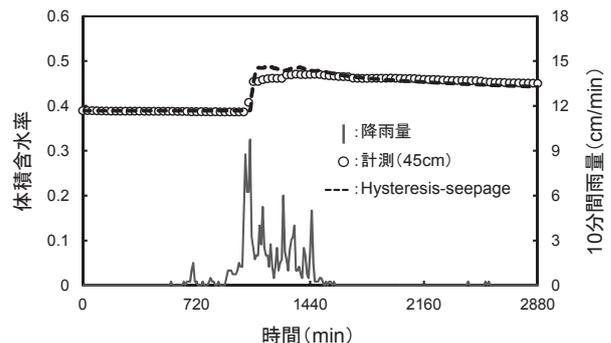


図-10 Hysteresis-seepageにおける再現解析結果

- (4) 以上の結果から、本研究で用いた現地計測結果に基づいて土壌水分特性のデータ同化を行う場合には、ヒステリシスを考慮したモデルを用いて推定を行う必要性があるといえる。

謝辞

本研究は、「NEXCO 西日本高速道路学共同研究講座」における研究の一環として行われた。情報提供や現地計測に便宜をいただいた関係者に深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 八木則男, 矢田部龍一, 山本浩司: 雨水浸透による斜面崩壊, 土木学会論文集, No.330, pp.107-114, 1982.
- 2) 岩田直樹, 中井真司, 片山弘憲, 柳崎剛, 笹原克夫: 平成26年8月の広島県廿日市市において観測された降雨浸透と斜面の変形, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.4, pp.623-634, 2015.
- 3) 小泉圭吾, 藤田行茂, 平田研二, 小田和広, 上出定幸: 土砂災害監視のための無線センサネットワークの実用化に向けた実験的研究, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.69, No.1, pp.46-57, 2013.
- 4) 松尾和昌, 酒匂一成, 北村良介: 斜面崩壊予知戦略—南九州シラス地帯を例として—, 自然災害科学(日本自然災害学会誌), Vol.21, No.1, pp.25-33, 2002.
- 5) 梁偉立, 小杉賢一郎, 林祐妃, 水山高久: 雨水鉛直浸透に関わる土壌水分特性パラメータの特定手法に関する考察, 砂防学会誌, Vol.59, No.3, pp.3-12, 2006.
- 6) 片山弘憲, 小林公明, 笹原克夫, 杉原成満, 渡邊聡, 山部哲: 現地計測データに基づく土壌水分特性を用いた降雨浸透過程の再現計算, 砂防学会研究発表会, pp.A_58-A_59, 2016.
- 7) 外狩麻子, 島村誠, 大野和己: 浸透流解析を応用した盛土内土中水分の推定, 第39回地盤工学研究発表会, pp.2117-2118, 2004.
- 8) 笹原克夫, 谷本守道, 田村圭司: 現地計測データを用いたまさ土斜面の土壌水分特性曲線の同定手法に関する研究, 日本地すべり学会誌, Vol.46, No.3, pp.162-174, 2009.
- 9) 白木陽平, 小田和広, 小泉圭吾, 徳田早映, 伊藤真一, 竹本将, 藤原優, 森下泰: Hydrus による現地計測結果に基づく雨水浸透の逆解析, 第50回地盤工学研究発表会, pp.965-966, 2015.
- 10) Marquardt. R. J. and Quirk. J. M.: An algorithm for least-squares estimation of porous solids, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol.11, No.2, pp.431-441, 1963.
- 11) 樋口知之: 予測にいかす統計モデリングの基本, 講談社, pp.25-120, 2011.
- 12) 伊藤真一, 小田和広, 小泉圭吾: 粒子フィルタによる土壌水分特性パラメータの同定に対するサンプリングの影響, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.72, No.2(応用力学論文集 Vol.19), pp.I_63-I_74, 2016.
- 13) 伊藤真一, 小田和広, 小泉圭吾, 白木陽平: 現地計測結果に基づく土壌水分特性パラメータ同定に対する粒子フィルタの適用, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.72, No.4, pp.354-367, 2016.
- 14) 伊藤真一, 小田和広, 小泉圭吾, 櫻谷慶治, 藤本彩乃: 様々な降雨時の現地計測結果に基づく浸透解析モデルの確率論的更新, 土木学会第72回年次学術講演会, pp.287-288, 2017.
- 15) 社団法人地盤工学会: 不飽和地盤の挙動と評価, 丸善株式会社, pp.27-42, 2004.
- 16) 藤縄克之: 土壌水分特性曲線および不飽和透水係数のヒステリシス表現—多孔体中における不飽和浸透流の研究(1)—, 地下水学会誌, Vol.39, No.4, pp.299-312, 1997.
- 17) 塚本良則: 森林水文学, 文永堂出版, pp.152, 1992.
- 18) Richards, L. A.: Capillary condition of liquids thorough porous mediums, *Physics* 1, pp.318-333, 1931.
- 19) van Genuchten, M.: Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model, Research Report, No.78-WR-08, Princeton Univ., 1978.
- 20) Mualem, Y.: A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, *Water Resources Research*, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 21) 菊本統, 京川裕之, 中井照夫: サクシオン履歴・間隙比・温度の影響を考慮した水分特性曲線モデル, 応用力学論文集, Vol.12, pp.343-352, 2009.
- 22) Kalman, R. E.: A new approach to linear filtering and prediction problems, *Journal of Basic Engineering*, No.82 (Series D), pp.35-45, 1960.
- 23) Evensen, G.: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics, *Journal of Geophysical Research*, No.99, pp.10143-10162, 1994.
- 24) 片山徹: 非線形カルマンフィルタ, 朝倉書店, pp.141-160, 2012.
- 25) 白木陽平, 小田和広, 小泉圭吾, 伊藤真一: 集中豪雨を受ける風化砂岩と風化泥岩の互層斜面における雨水浸透特性, Kansai Geo-Symposium 2014, pp.207-212, 2014.

(2017年6月19日 受付)