

融合粒子フィルタによる土壌水分特性と体積含水率の事後分布推定

鹿児島大学 正会員 ○伊藤 真一
 大阪産業大学 正会員 小田 和広
 大阪大学 正会員 小泉 圭吾

1. はじめに

豪雨時の斜面崩壊の発生には、斜面内への雨水の浸透が大きく影響する。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を用いて、現地計測結果に基づく土壌水分特性の推定を行ってきた¹⁾。粒子フィルタでは、数値解析モデルに関する情報(パラメータ、初期条件、境界条件など)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(本研究では、体積含水率など)を、多数の粒子によって近似的に表現する。そして、ベイズの定理を用いて、現地計測結果に対する適合度が高まるようにそれぞれの粒子を修正することで、粒子で近似された事後分布を逐次更新するデータ同化手法である。つまり、適切なパラメータの推定だけでなく、各時刻における体積含水率のバラツキも事後分布として推定することができる。既往の研究¹⁾では、土壌水分特性に関するパラメータの事後分布を推定し、その分布の代表値を用いた場合の現地計測結果に対する再現性を検証してきた。本研究では、粒子フィルタを発展させた融合粒子フィルタ(Merging Particle Filter, 以下、MPF)²⁾を用いて、土壌水分特性だけでなく、物理量である体積含水率の事後分布も推定することで、データ同化過程におけるそれらの事後分布の変化について考察する。

2. 融合粒子フィルタ

MPF は、粒子フィルタの利点を活かしつつも、粒子の退化は起こりにくく、モデルが高次元になっても計算コストがそれほど増大しないという特徴がある。体積含水率の現地計測結果に基づく土壌水分特性の推定問題に対してMPF が有効であることは既に確認している³⁾。本研究では、シミュレーションとして飽和不飽和浸透流解析を用いた。水分特性曲線モデルとしては van Genuchten モデルを、不飽和透水係数モデルとしては Mualem モデルを用いた。

3. 現地計測結果

本研究で対象とした現場は高速道路沿いの新設のり面で、切土間の谷筋を盛土材で埋めて建設された盛土斜面である。対象斜面には土壌水分計が設置されており、体積含水率をリアルタイムに計測している。図-1 は本研究で用いた現地計測結果を示している。本研究では、とある地点の深度 20cm において計測された体積含水率の時系列変化を計測結果として用いてデータ同化を行った。

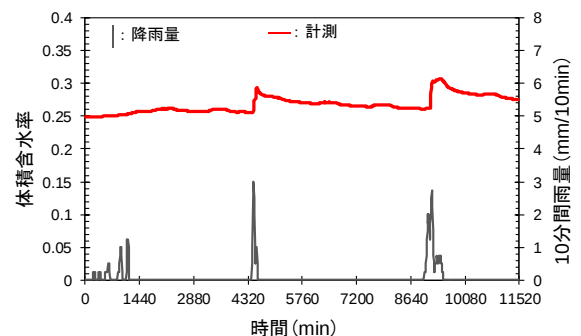


図-1 現地計測結果

4. データ同化結果

図-2 は本研究で用いた 1 次元解析モデルを示している。モデル上部は降雨境界、モデル側面は非排水境界、モデル下部は自由排水境界とした。初期条件としては、深度 20cm で計測された体積含水率の値を全ての節点に与えた。データ同化に用いた粒子数は 500 個である。表-1 は本研究で作成した粒子の変動幅を示している。この変動幅の中で一様乱数により 500 個の初期の粒子を作成した。観測ノイズは正規分布を仮定し、平均 $\mu=0$ 、標準偏差 $\sigma=0.028$ (計測結果の変動幅の 100%) とした。

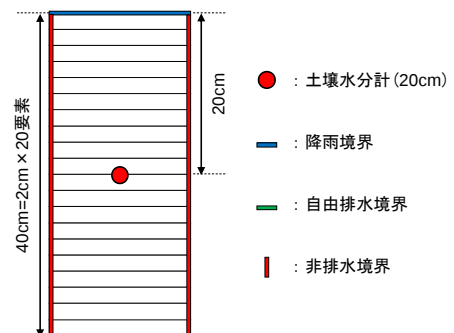


図-2 解析モデル

キーワード 融合粒子フィルタ, 体積含水率, 土壌水分特性

連絡先 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 TEL : 099-285-8471

図-1 に示す現地計測結果を用いて 2 回のデータ同化を行った。図-3 は各データ同化過程におけるパラメータ θ_s の確率分布を、図-4 は体積含水率の事後分布の経時変化を示している。データ同化実施前は、パラメータの事前分布が一様乱数(図-3(a))で与えられているため、体積含水率の解析結果の平均は計測結果と大きく乖離しており、そのバラツキも大きい(図-4(a))。データ同化を行うにつれて、パラメータ θ_s の事後分布は、バラツキの小さい確率分布へと修正されている。それに伴い、体積含水率の事後分布も、計測と解析の誤差は減少し、なおかつ、解析自体のバラツキも小さくなっていることが分かる。

最後に、 $\sigma=0.014$ (計測結果の変動幅の 50%)として再度データ同化を行った。図-5 はその際の体積含水率の事後分布の経時変化を示している。この結果から、観測ノイズの標準偏差を小さくすることで、より計測結果に対する適合度の高いモデルを推定できることが確認された。

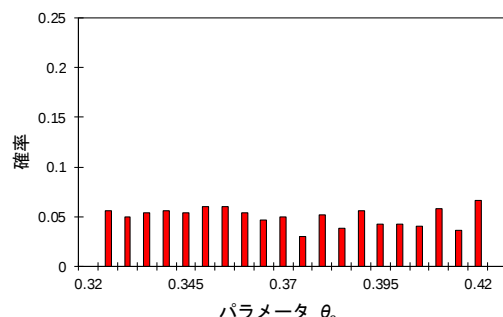
5. まとめ

本研究では、MPF を用いて、土壌水分特性と体積含水率の事後分布をそれぞれ推定することで、データ同化過程におけるそれらの事後分布の変化について考察した。その結果、データ同化を行うにつれて、パラメータの事後分布のバラツキは小さくなり、それに伴い、物理量である体積含水率の事後分布も計測結果との適合度が高まるように修正されていくことが明らかになった。

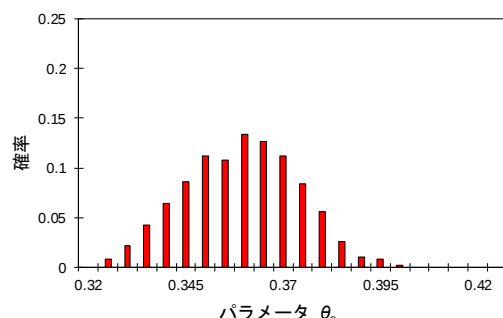
参考文献 1) 伊藤真一ほか：現地計測結果に基づく土壌水分特性パラメータ同定に対する粒子フィルタの適用，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.72，No.4，pp.354-367，2016。 2) 中野慎也ほか：Merging Particle Filter とその特性，統計数理，Vol.56，No.2，pp.225-234，2008。 3) 伊藤真一ほか：現地計測に基づく浸透解析モデルのデータ同化に対する融合粒子フィルタの有用性の検証，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.73，No.2(応用力学論文集 Vol.20)，pp.I_45-I_54，2017。

表-1 粒子の変動幅

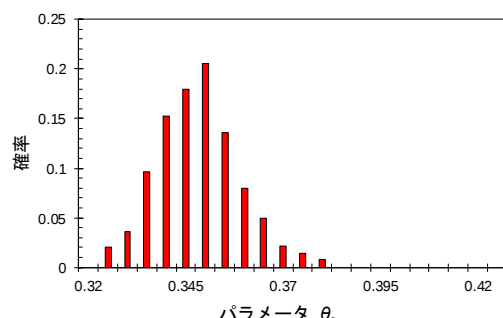
	θ_s	θ_r	α (1/cm)	n	k_s (m/s)
min	0.32	0.13	0.01	1.20	1.00.E-04
max	0.42	0.23	0.11	1.80	1.00.E-03



(a) データ同化実施前(事前分布)

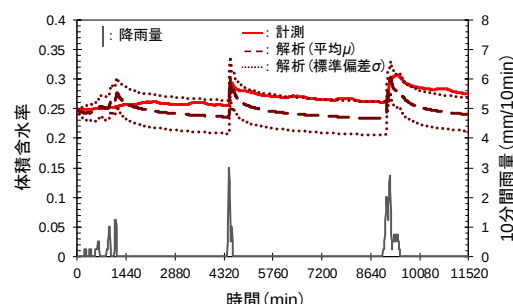


(b) 1 回目のデータ同化後(事後分布)

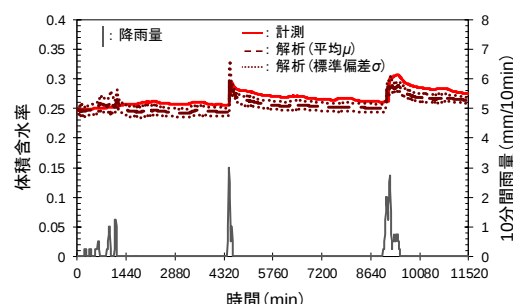


(c) 2 回目のデータ同化後(事後分布)

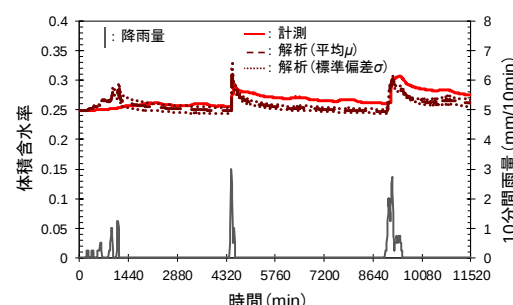
図-3 パラメータ θ_s の確率分布



(a) データ同化実施前



(b) 1 回目のデータ同化後



(c) 2 回目のデータ同化後

図-4 体積含水率の事後分布の経時変化

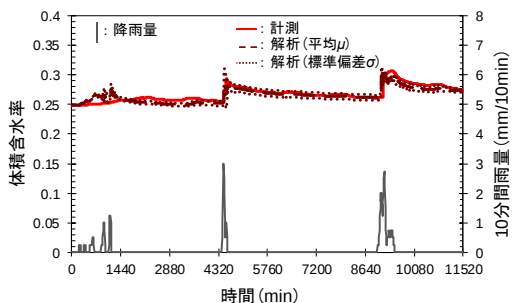


図-5 標準偏差を $\sigma=0.014$ とした場合の体積含水率の事後分布の経時変化