

雨水浸透のデジタルツインにおけるシミュレーション予測とアンサンブル予測の比較

大阪産業大学 学生会員 ○加藤諒・綾部大吾・清水大雅  
大阪産業大学 正会員 小田和広  
西日本高速道路（株） 正会員 堤 浩志  
鹿児島大学 正会員 伊藤真一  
大阪大学 正会員 小泉圭吾

1. はじめに

Industry 4.0 や Society 5.0 では、IoT による計測値とコンピュータによるシミュレーションを高度に融合させたサイバーフィジカルシステムが主要な技術の一つである。なかでも、デジタルツインとは、SF でのところの平行ワールドであって、サイバー空間上に実現象（フィジカル空間）を再現し、それを使って現実問題を解決しようとするものである。本研究では、そのような考え方を雨水浸透の問題に適用する際の予測解析方法について考察する。すなわち、粒子フィルタによるデータ同化によって同定したモデルによって予測計算を行う際、同定された各モデルにおけるパラメータの平均値を使うシミュレーション予測と粒子毎にシミュレーションを行い、それらの結果の平均を予測値とするアンサンブル予測の比較を通じ、両者の関係について考察する。

2. 解析手法

雨水浸透解析には、赤井らの方法<sup>1)</sup>に基づく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、van Genuchten モデル<sup>2)</sup>、また、不飽和透水係数モデルとして Mualem モデル<sup>3)</sup>を用いた。それぞれを式(1)および(2)に示す。

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) = \left\{ 1 + (-\alpha \psi)^n \right\}^{1-1/n} \tag{1}$$

$$k = k_s \times S_e^{0.5} \left\{ 1 - \left( 1 - S_e^{n/n-1} \right)^{1-1/n} \right\}^2 \tag{2}$$

ここに、 $S_e$ ：有効飽和度、 $\theta_s$ ：飽和体積含水率、 $\theta_r$ ：残留体積含水率、 $k_s$ ：飽和透水係数、 $\alpha$ 、 $n$ ：パラメータ、 $k$ ：透水係数、 $\psi$ ：土壌水分吸引水頭である。

データ同化手法として、融合粒子フィルタ（MPF）<sup>4)</sup>を用いる。MPF では、まず、粒子と呼ばれる多数のシミュレーションモデル、具体的には異なる解析パラメータを持つ解析モデルが準備される。当然、各粒子の解析結果は異なる。その様な状況下で、計測値が適用されると、まず、計測値と解析結果の差（いわゆる誤差）の確率分布（本研究では正規分布）によって各粒子の計測値に対する適合度を評価する。そして、各粒子が持つ適

合度に応じて、全ての粒子の解析パラメータが適合度の高い粒子の解析パラメータに近づくように自動的に更新される。なお、本研究では、相対誤差を用いて適合度を評価する。

3. 解析対象

解析対象斜面は、九州地方の高速道路沿いの切土斜面である<sup>5)</sup>。深度 30cm、70cm および 100cm に土壌水分計を設置しており、体積含水率を 10 分間隔で計測している。データ同化解析は、3 つの計測値全てを用いて行う。表-1 は、van Genuchten モデルと Mualem モデルのデータ同化解析における解析パラメータの変動幅を示している。この範囲内で一様乱数により 100 個の粒子を作成する。

図-1 は解析対象期間における降雨を示している。2018/6/21 から 7/12 の 23 日間を解析期間とする。6/29 に 137mm/day、6/30 に 75mm/day、7/3 に 82mm/day、7/5 に 113mm/day、そして 7/6 に解析対象期間における最大の 338mm/day、12mm/10min の非常に強い降雨があった。

表-1 データ同化における解析パラメータの範囲

|    |     | $\theta_s$ | $\theta_r$ | $\alpha$ | $n$  | $k_s$ |
|----|-----|------------|------------|----------|------|-------|
| 上層 | 最大値 | 0.52       | 0.16       | 0.07     | 1.50 | 4.00  |
|    | 最小値 | 0.46       | 0.11       | 0.05     | 1.40 | 2.00  |
| 中層 | 最大値 | 0.56       | 0.25       | 0.06     | 1.40 | 3.60  |
|    | 最小値 | 0.53       | 0.19       | 0.01     | 1.34 | 2.10  |
| 下層 | 最大値 | 0.48       | 0.23       | 0.06     | 1.40 | 3.50  |
|    | 最小値 | 0.45       | 0.19       | 0.04     | 1.33 | 2.10  |

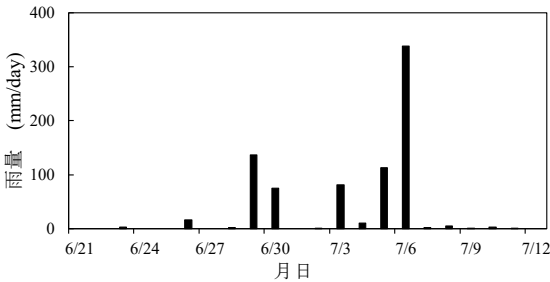


図-1 解析期間中の降雨

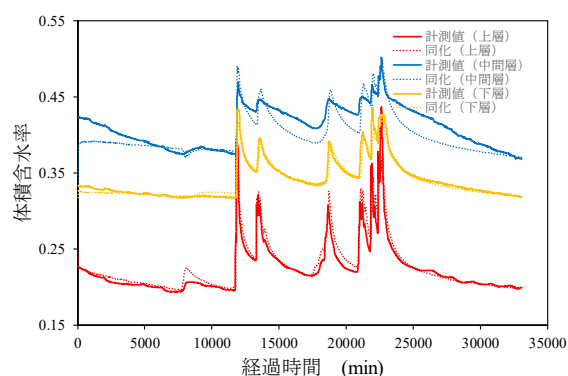


図-2 計測値とデータ同化結果の比較（観測ノイズの分散，5%）

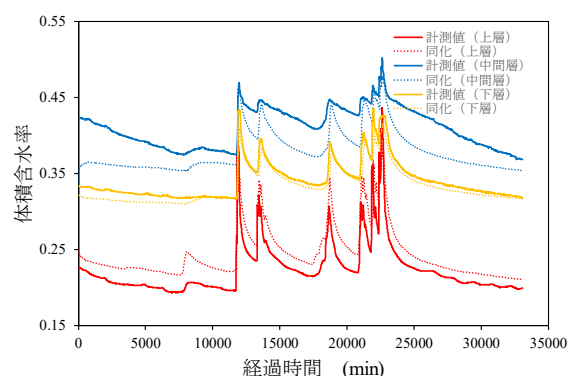


図-3 計測値とデータ同化結果の比較（観測ノイズの分散，20%）

#### 4. データ同化結果

まず，データ同化の適用性を確認するために，全解析期間中を対象としたデータ同化を行った．図-2 と図-3 は計測値とデータ同化結果の比較を示している．7/6 の 338mm/day, 12mm/10min の非常に強い降雨であっても適切なデータ同化が行われている．また，観測ノイズの標準偏差を20%とした場合よりも5%とした方が計測値に対するデータ同化結果の適合度が高い．これは 20%の方が誤差の確率分布が緩やかになり，誤差を許容するためである．

#### 5. シミュレーション予測とアンサンブル予測の比較

次に，6/28 までデータ同化によって同定されたモデルを使って予測シミュレーションを行った．なお，6/21 から 6/28 までの間は 6/26 の 16.5mm/day のごく弱い降雨を除き，ほぼ無降雨である．図-4 と図-5 はそれぞれ観測ノイズの標準偏差が5%と20%におけるシミュレーション予測とアンサンブル予測の比較をしている．両者の違いはほとんど無い．また，特に，観測ノイズの標準偏差が5%のケースでは予測結果は計測値とほぼ一致しており，適切な予測ができることが分かる．

#### 6. まとめ

本研究の主な知見を以下に取り纏める．

- 1) 無降雨期間と 16.5mm/day のごく弱い降雨時の計測

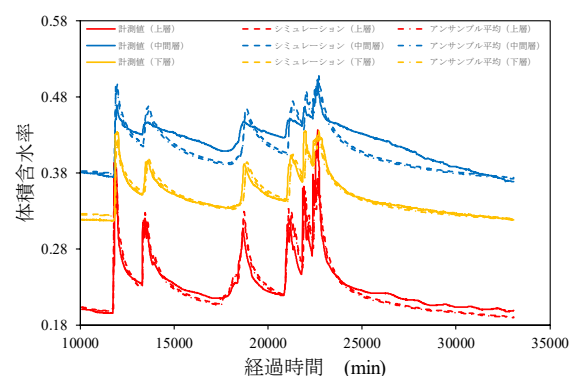


図-4 シミュレーション予測とアンサンブル予測の比較（観測ノイズの分散，5%）

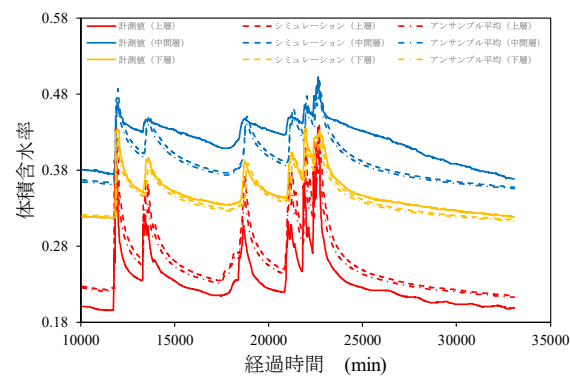


図-5 シミュレーション予測とアンサンブル予測の比較（観測ノイズの分散，20%）

データによって同定されたモデルによって，338mm/day, 12mm/10min の非常に強い降雨時における体積含水率の挙動を予測できる．

- 2) 観測ノイズの大きさに関係なく，粒子のパラメータの平均値を使うシミュレーション予測と粒子毎にシミュレーション結果の平均を使うアンサンブル予測の差はほとんど無い．

#### 参考文献

- 1) 赤井浩一他：有限要素法における飽和-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.: Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model, Research Report, No.78-WR-08, Princeton Univ., 1978
- 3) Mualem, Y.: A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, Water Resources Reserch, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 4) 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, Vol.73, No.2, pp.45-54, 2017.
- 5) 伊藤真一ほか：現地計測に基づく土壌水分特性パラメータの逆解析における粒子フィルタの有用性，Kansai Geo-Symposium 2016 発表論文集，pp. 253-258, 2016.