雨水浸透のサイバーフィジカルモデルの同定における相対誤差の適用性

大阪産業大学　正会員　○小田和広
大阪産業大学　学生会員　清水大雅・加藤諒・綾部大吾
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

Industrial 4.0 や Society 5.0 といった近未来社会の概念には，**サイバーフィジカルシステム**や**デジタルツイン**といった重要な技術がある．これらの技術では，検討対象の事象に対する計測とシミュレーションを密接に連携させ，問題の解決に当たる．斜面の問題を例にとれば，体積含水率，サクション，地下水位，地盤の伸縮，傾斜といった計測される物理量によって，斜面のシミュレーションモデルを逐次更新，すなわち，**データ同化**する．次に更新されたモデルを使って予想される豪雨時における斜面の状況を予測する．それにより，崩壊に対する危険度を高い信頼性を持って見積もることができる．

ところで，異なる種類の計測値が存在する場合，種類毎に計測値に対するシミュレーションの適合度を評価することは容易である．しかし，それらを総合的に評価し，モデル全体の適合度を見積もることは理論的には可能であるが，数学的な取り扱いが非常に難しい．そこで，計測値とシミュレーションの値の差である誤差の代わりに，無次元量である相対誤差を用いることで，計測の種類毎の適合度を統一的に評価することができれば，簡易的な方法として有用であると考えられる．本研究では，その手始めとして，**相対誤差のデータ同化解析に対する適用性**を検証する．

２．解析手法

雨水浸透解析には，赤井らの方法[1)]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[2)]，また，不飽和透水係数モデルとして Mualem モデル[3)]を用いた．

データ同化手法として，融合粒子フィルタ（MPF）[4)]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．適合度を評価する指標は，尤度と呼ばれ，次式で与えられる．

$$w_i = \prod_{j=1}^{m} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{er_{j,i}^{\ 2}}{2\sigma^2}\right) \qquad (1)$$

$$er_{j,i} = y_{j,i} - x_{j,i} \qquad (2)$$

ここに，w_i：i 番目の粒子の尤度，m：計測の個数，σ：観測ノイズの標準偏差，$er_{j,i}$：誤差，$y_{j,i}$：シミュレーションの値および $x_{j,i}$：計測値である．この尤度に基づき，全ての粒子の解析パラメータが尤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．さて，式(1)の値は積の各項のうち，最も小さいものによって支配される．このため，複数の種類の計測が行われていても式(1)と支配するような特定の計測に依存したデータ同化になってしまう可能性がある．本研究では，式(2)に代わり式(3)の相対誤差（$rer_{j,i}$）の適用性を考察する．

$$rer_{j,i} = \frac{y_{j,i} - x_{j,i}}{x_{j,i}} \qquad (3)$$

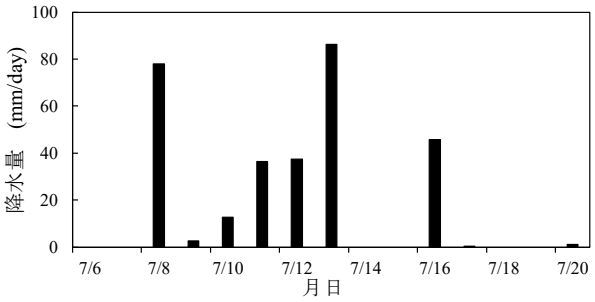
３．解析対象

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[5)]．深度 30cm（上層），70cm（中間層）および 100cm（下層）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．

図−1 は解析対象期間における降雨を示している．2018¥6/7/6 から 7/20 の 15 日間を解析期間とする．7/8 に 78mm/day, 7/13 に 86.25/mm/day, 7/16 に 45.75mm/day に比較的強い降雨があった．

４．データ同化解析

図−2 と**図−3** は尤度の計算に誤差を用いた通常のデー



図−1 解析期間中の降雨

キーワード　サイバーフィジカルシステム，データ同化，雨水浸透，体積含水率，数値解析，
連絡先　〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3 丁目 1−1　大阪産業大学工学部都市創造工学科　TEL 072-875-3001

© Japan Society of Civil Engineers

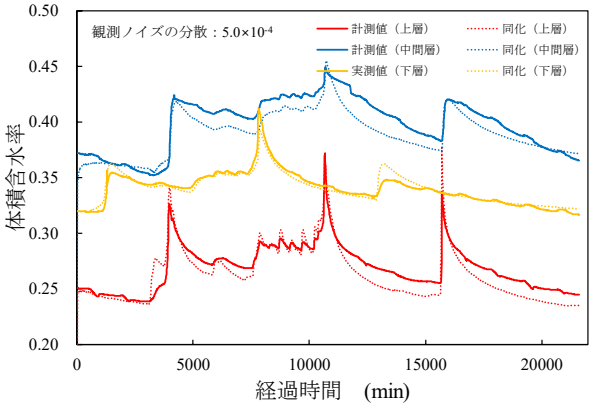


図-2 誤差を用いたデータ同化の結果（観測ノイズの分散，5.0×10^{-4}）

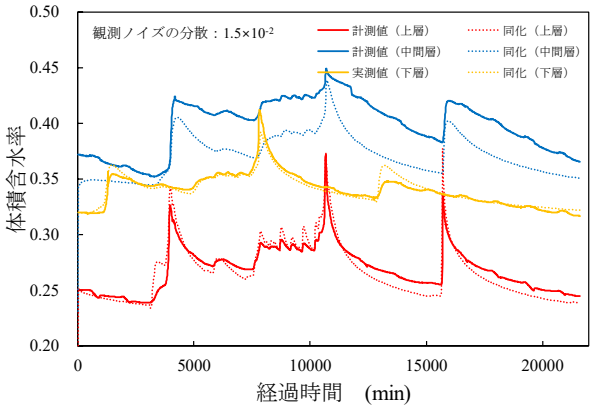


図-3 誤差を用いたデータ同化の結果（観測ノイズの分散，1.5×10^{-2}）

タ同化結果を示している．**図-2** と**図-3** における観測ノイズの分散はそれぞれ 5.0×10^{-4} と 1.5×10^{-2} である．**図-2** と**図-3** を比較すると上層と下層では，計測値とデータ同化結果がほぼ一致している．それに対し，中間層は，観測ノイズが大きい**図-3** よりもそれが小さい**図-2** の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，観測ノイズが小さいほど計測値に近い粒子の高い尤度がつくためである．また，データ同化の適合度は中間層の計測値に対する適合度に依存していることも分かる．

図-4 と**図-5** は尤度の計算に相対誤差を用いた通常のデータ同化結果を示している．まず，相対誤差を用いても適切にデータ同化を行うことができることが分かる．また，**図-2** と**図-3** の関係と同様に，観測ノイズがちいさい方が計測値に対するデータ同化結果の適合性が高い．また，中間層がモデル全体の適合度を支配している．

５．まとめ

本研究の主な知見を以下に取り纏める．

1) 相対誤差はデータ同化に対して適用性があり，それによってもデータ同化を適切に行うことができる
2) 中間層の計測値に対するモデルの適合度によってモデル全体の適合度が支配される

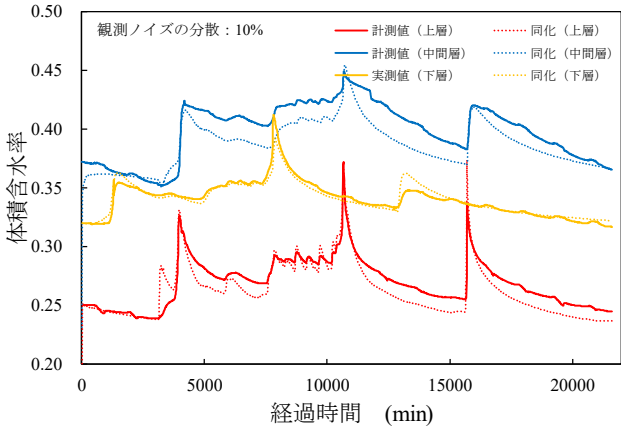


図-4 誤差率を用いたデータ同化の結果（観測ノイズの分散，10%）

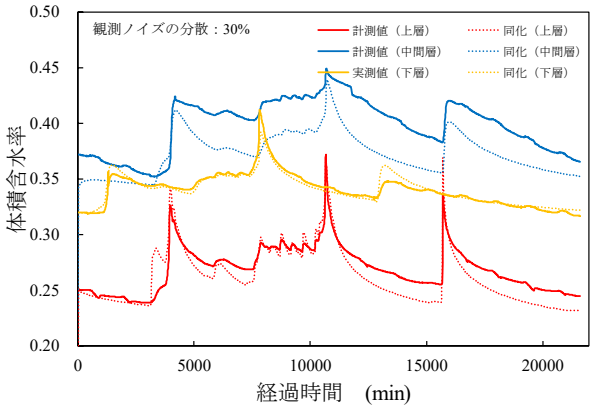


図-5 誤差率を用いたデータ同化の結果（観測ノイズの分散，30%）

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.

© Japan Society of Civil Engineers