

PINNs による成層土の飽和透水係数分布の逆推定

Inverse estimation of saturated hydraulic conductivity of layered soil profiles with physics-informed neural networks

及川航貴¹・斎藤広隆¹

¹東京農工大学大学院 連合農学研究科

要旨(Abstract)

本研究では、計測可能な位置のマトリックポテンシャルから、PINNs による成層土の飽和透水係数分布を逆推定することを目的とした。教師データから浸潤過程のマトリックポテンシャル分布の経時変化および成層構造をもつ飽和透水係数分布を推定することができた。

キーワード：飽和透水係数分布，逆推定，PINNs

Key words: Saturated hydraulic conductivity profile, Inverse problem, PINNs

1. はじめに

飽和透水係数は土中の物質移動を予測するために重要な変数であるが、現場土壌の飽和透水係数は空間的なばらつきが大きい。そのため、計測可能な土壌水分量のデータから、飽和透水係数分布を逆推定する方法が求められる。Physics-informed neural networks (PINNs) は、予測値の誤差（予測損失）だけではなく、予測値が支配方程式や初期・境界条件といった物理条件を満足するかを評価する物理損失も最適化する(Raissi et al., 2019)。そのため、通常の機械学習と比較して必要な教師データ量が少なく、物理条件と矛盾しない予測値を得ることが期待できる。Depina et al. (2022)は、単一土壌カラムの浸潤過程の体積含水率の計測結果から、飽和透水係数および土壌水理特性パラメータを逆推定した。Bandai and Ghezzehei (2022)は、成層土の層ごとに PINNs を作成し、浸潤過程の体積含水率分布と地表面のフラックスの経時変化を予測した。本研究では、計測可能な位置のマトリックポテンシャルから、PINNs による成層土の飽和透水係数分布を逆推定することを目的とした。

2. 方法

HYDRUS でシミュレーションした浸潤過

程のマトリックポテンシャルの計算結果から、PINNs を用いてマトリックポテンシャル分布と飽和透水係数分布を推定した。機械学習のフレームワークは PyTorch とし、ニューラルネットワークの構造は図 1 に示した。HYDRUS では、基底流 (0.1 cm/day) による定常水分流れを初期条件として、2.0 cm/day の一定フラックスによる 6 日間の浸潤を計算した。土層は深さ 500 cm に自由地下水面をもつレイロームとし、下層 50~500 cm は飽和透水係数を上

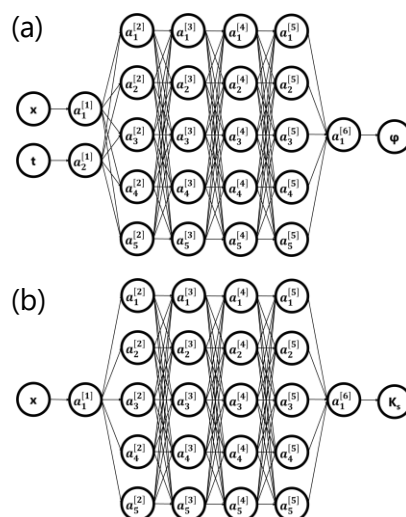


図 1. ニューラルネットワークの構造。
(a)マトリックポテンシャル分布の経時変化の推定，(b)飽和透水係数分布の推定。

層の2倍となる12.48 cm/dayとした。また、この上層と下層を逆にした条件でも実行した。損失関数は以下の3つの項の和で定義した。①予測損失は予測値と深さ10・20・30・40・60・100 cmにおける6日間で887点のマトリックスポテンシャルの計算結果との誤差を評価する。②物理損失は深さ0~200 cm, 時間0~6 dayの中からランダムに抽出した12000点の予測値がリチャーズ式を満たすかを評価する。③上端境界条件は、時間0~6 dayの中からランダムに60点抽出した上端(深さ0 cm)のフラックス値と与えたフラックス値との誤差を評価する。反復回数を20万回とし、この損失関数をPyTorchのAdamの最適化アルゴリズムによって最小化した。この学習したPINNsによって、任意の深さと時間からマトリックスポテンシャルを、任意の深さから飽和透水係数を出力した。

3. 結果と考察

図1(a)に示したPINNsを用いて、浸潤過程のシームレスなマトリックスポテンシャル分布の経時変化を求めることができた。教師データに用いた深さ10・20・30・40・60・100 cmおよび与えていない深さ0・150 cmの予測値とHYDRUSの計算結果を示した(図2)。マトリックスポテンシャル分布の予測値とHYDRUSの計算結果とを比較すると、教師データとして与えた深さおよび0 cmの予測値は計算結果と一致していた(図2)。一方、深さ150 cmはリチャーズ式を満たしているかを評価する物理条件の範囲には含まれているが、HYDRUSの計算結果とは一致しなかった(図2)。図1(b)に示したPINNsを用いて、成層土の飽和透水係数分布を逆推定した(図3)。飽和透水係数分布の逆推定では、成層土に関する情報を与えることなく、成層土の上層・下層の飽和透水係数の値および境界の深さを求めることができた(図3)。

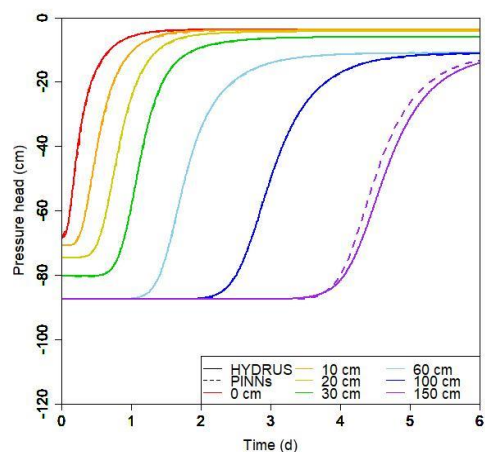


図2. マトリックスポテンシャル分布の予測値とHYDRUSの計算結果の比較。

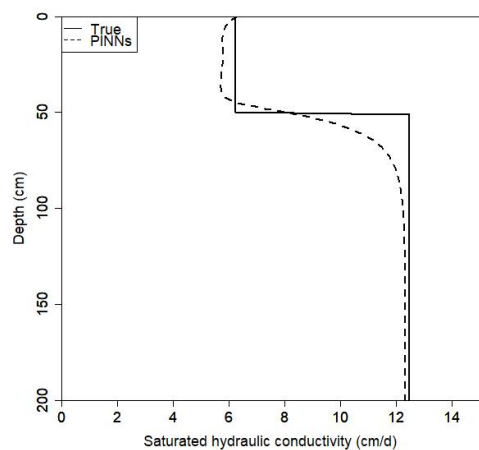


図3. 飽和透水係数分布の予測値と真値との比較。

4. おわりに

PINNsはメッシュフリーであるため、メッシュサイズを決定する必要がなく、かつ連続的に予測値を求めることができる。今後は、飽和透水係数分布だけではなく、土壌水分特性曲線モデルのパラメータ分布も同時に逆推定できるPINNsの開発に取り組む。

参考文献

- Bandai and Ghezzehei, 2022, *HESS*, 26 (16), 4469-4495.
- Depina, et al., 2022, *Georisk*, 16 (1), 21-36.
- Raissi, et al., 2019, *Journal of Computational physics*, 378, 686-707.