

物理情報を組み込んだ深層学習モデルによる二次元不飽和水分移動の予測
 Prediction of two-dimensional unsaturated water movement using
 physics-informed neural networks

○及川航貴^{*,**}・斎藤広隆^{*}

○OIKAWA Koki, SAITO Hiroataka

1. はじめに

農地の物質循環において、不飽和土中の水分移動が大きな経路を担っている。数値解析手法における現場土壌の水分移動予測では、その土壌の水分状態の初期条件、境界条件、不飽和水分移動特性の分布を正確に設定する必要がある。そこで、現場の計測データと物理則の両方を反映する物理情報を組み込んだ深層学習モデル（Physics-informed neural networks, 以下 PINNs）の体積含水率分布の予測への利用が期待されている。これまでにリチャーズ式を組み込んだ PINNs を一次元での不飽和水分移動の解析に用いて、成層土における土壌水分移動特性の分布が逆推定されている（Oikawa and Saito, 2024）。また、マクスウェル方程式を組み込んだ PINNs は、非破壊計測できる地中レーダの受信波形データから体積含水率と高い相関関係にある比誘電率分布の全波形逆解析が期待されているが、現場では計測困難な地中の高密度の電場・磁場強度データが用いられている（Zheng and Wang, 2023）。そこで、本研究では、マクスウェル方程式を組み込んだ PINNs で地表面と側面の地中レーダデータから体積含水率分布を予測（全波形逆解析）することと、リチャーズ式を組み込んだ PINNs による浸潤過程の二次元不飽和水分移動を予測（順解析）することを目的とした。

2. 方法

本研究で用いる PINNs の構造を図 1 に示した。マクスウェル方程式を組み込んだ PINNs は、位置と時間から電場・磁場強度を予測するものと深さから比誘電率を予測するもの 2 つのニューラルネットワークからなる（Fig. 1a）。地表面に設置した点源の発信アンテナから放射される 1 GHz のパルス波形の電磁波伝播を解析対象とし、地中の二層の比誘電率分布を全波形逆解析する。損失関数は、ラテン超方格サンプリン

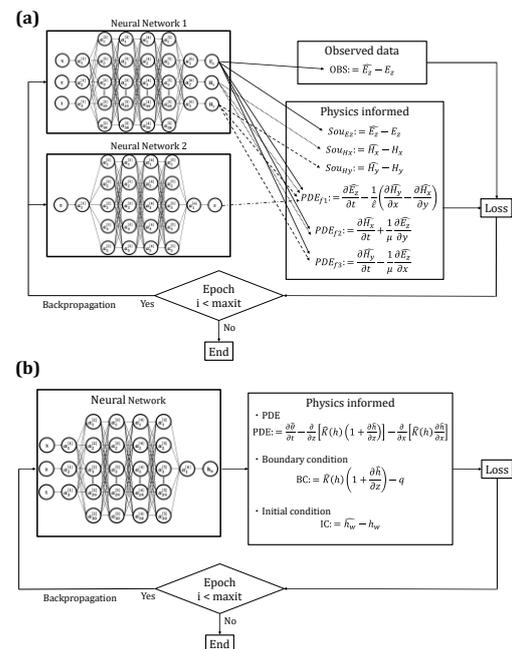


Fig. 1 (a) マクスウェル方程式を組み込んだ PINNs の構造, (b) 二次元リチャーズ式を組み込んだ PINNs の構造

*東京農工大学 Tokyo University of Agriculture and Technology

**日本学術振興会 Japan Society for the Promotion of Science

キーワード: PINNs, 深層学習, 不飽和水分移動

グで選んだ点がマクスウェル方程式を、所定の位置・時間の予測値が初期条件、受信波形を満たすかを平均二乗誤差で評価する項の和として定義した (Fig. 1a). リチャーズ式を組み込んだ PINNs は、位置と時間から土中水圧力を予測する (Fig. 1b). 初期の土中水圧力が均一なクレイロームの 1 m の土層に対して、地表面の X 軸中心から ± 0.05 m に一定フラックス (0.02 m/d) 境界条件を 3 日間与える浸潤現象を解析対象とした. 残りの地表面および側面はゼロフラックス境界条件とした. 損失関数は、ラテン超方格サンプリングで選んだ点がリチャーズ式、初期条件、境界条件を満たすかを平均二乗誤差で評価する項の和として定義した (Fig. 1b). 比較対象として、同様の条件を HYDRUS-2D で順解析した. これらの損失関数を適応的モーメント推定 (ADAM) で最小化するように PINNs モデルを構築した.

3. 結果と考察

PINNs による全波形逆解析では、地表面と側面の受信波形データのみから土層の上層と下層に比誘電率 (体積含水率) およびその境界の深さを予測 (全波形逆解析) した (Fig. 2). 浸潤過程の土中水圧力分布の経時変化の HYDRUS-2D による計算結果, PINNs による予測結果およびその残差を示した (Fig. 3). PINNs の予測結果は全体的にはリチャーズ式、初期条件、境界条件を反映しているが、予測結果が X 軸対称となっていないなど、非合理的部分もみられた. PINNs の予測精度を高めるためには、リチャーズ式を評価する点の選択方法を改善することなどが必要であると考えられる.

4. まとめ

PINNs モデルを用いて受信波形データから体積含水率分布の逆解析や不飽和水分移動を予測した. 今後は、2つの PINNs モデルを統合することで、マクスウェル方程式に基づいて地中レーダによる非破壊計測の受信波形データから土中の比誘電率 (体積含水率) 分布を逆解析するとともに、リチャーズ式に基づいて不飽和水分移動の順解析や土壌の不飽和水分移動特性を逆解析するような PINNs モデルの開発を試みる.

引用文献

- Oikawa, K. and Saito, H. (2024). Inverse analysis of soil hydraulic parameters of layered soil profiles using physics-informed neural networks with unsaturated water flow models. *Vadose Zone Journal*, **23**(6), e20375.
- Zheng, Y. and Wang, Y. (2023). Ground-penetrating radar wavefield simulation via physics-informed neural network solver. *Geophysics*, **88**(2), KS47-KS57

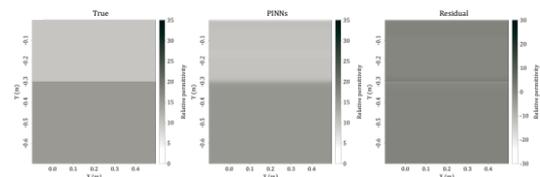


Fig. 2 PINNs の全波形逆解析による比誘電率分布の予測結果およびその残差.

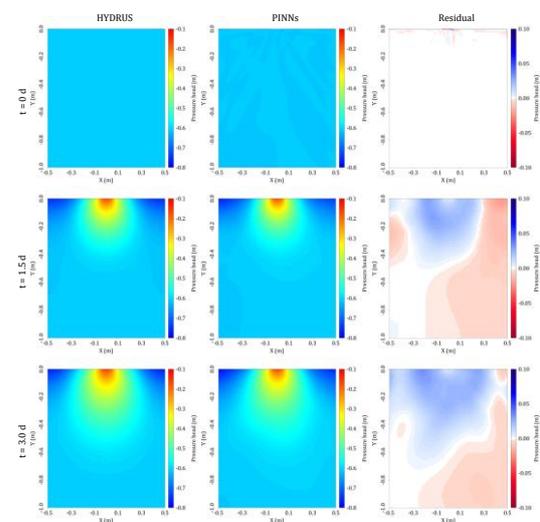


Fig. 3 浸潤過程の土中水圧力分布の経時変化の HYDRUS-2D による計算結果, PINNs による予測結果およびその残差.