

# 原位置における飽和土壌透水係数測定法の評価

## Evaluating Measurement Methods of In-Situ Field Saturated Hydraulic Conductivity

○登尾浩助\*, 井上光弘\*\*

NOBORIO Kosuke\*, and INOUE Mitsuhiro\*\*

### 1 背景

近年の気候変動に伴い降雨時期の変化, 降雨地域の偏在や降雨強度の増加が生じており, 斜面崩壊や河川増水の早期予報が重要になっている。対象地域の水循環をより正確に把握するためには, 土壌に浸透する水を含む土壌水の挙動を把握する必要がある。土壌水の挙動は, 従来からダルシー・バッキンガム法則による水分フラックス密度を使ったリチャーズ式を使って表される。リチャーズ式を屋外の現実的な土壌に適用しようとするとなかなか困難に直面する。その一つが水理特性の決定であろう。近年のシミュレーションモデル(例えば, Hydrus など)は, 現地で測定した土壌水分分布の経時変化を入力することによって, 現地土壌の水理特性を推定する逆解析機能を有している。逆解析で求めた水理特性のうち, 現地で測定して逆解析結果と比較可能なのは恐らく原位置における飽和透水係数(Kfs)であると考えられる。最近, 我々の研究グループは Kfs を簡便に測定する方法を開発してきた(Noborio et al., 2018; Inoue et al., 2023)。本報告では, Noborio と Inoue の方法で求めた Kfs の特徴を評価した。

### 2 実験方法

ここで紹介する2つの測定法に共通するのは, 共に単体の通直な円筒を土壌表面から鉛直方向に挿入し, 円筒内を静かに湛水した後, 水位の時間変化を測定して Kfs を推定する。また, 2つの測定法の大きな違いは, Inoue et al. (2023)は地表面における水分フラックス密度が時間と共に変化する非定常状態であると考えている。一方, Noborio et al. (2018)は微小時間内であれば水分フラックス密度はほぼ一定とみなせる準定常状態と仮定できると考えている。

#### 2.1 Inoue 理論

Inoue et al. (2023)は, 水分フラックス密度を表す式中に現れる水位 H の変化を t=0 から経過時間 t(s)まで積分することで, 以下のような H-Kfs 関係を導いた。

$$H = (H_0 + L_g + \lambda) \exp\left(-\frac{K_{fs}}{L_g} t\right) - L_g - \lambda \quad (1)$$

ここで,  $H_0$  は t=0 s の時の水位(cm),  $L_g$  は円筒挿入のスケーリング長さ(cm),  $\lambda$  はマクロスケールの毛管長さ(cm)である。 $L_g$  は様々な円筒半径と挿入深さに対して数値計算を実施し, 以下のように決定した。

$$L_g = D_1 d + D_2 r + D_3 \quad (2)$$

ここで, d は円筒の挿入深さ(cm), r は円筒半径(cm),  $D_1$  から  $D_3$  は水位変化範囲別に決定した実験定数である。15<H<25cm の水位変化範囲に対しては,  $D_1=0.926, D_2=0.427, D_3=0.446$  cm を提案した。測定した H の時間変化に対して, Kfs と  $\lambda$  を曲線回帰で決定した。曲線回帰にはエクセルのソルバー機能を使った。

\*明治大学農学部 School of Agriculture, Meiji University

\*\*鳥取大学乾燥地研究センター Arid Land Research Center, Tottori University

キーワード: 水分移動, 水理特性, 浸潤, 畑地灌漑, シリンダー法

## 2.2 Noborio 理論

Noborio et al. (2018)は、水位の時間変化を  $H(t)=\alpha t^2+\beta t+\gamma$  で近似し、水分フラックス密度  $i=dH/dt$  を計算し、さらに  $di/dH=1/(t+\beta/(2\alpha))$  を導いて、以下の式から直接  $K_{fs}$  を計算した。

$$K_{fs} = G \frac{di}{dH} = G \left| \frac{1}{t+\frac{\beta}{2\alpha}} \right| \quad (1)$$

ここで、 $G$  は Reynolds et al. (2002)に提案した円筒の挿入深度、円筒半径、土壌毛管力、重力の影響を加味した実験係数で以下のように表される。

$$G = c_1 d + 2c_2 r \quad (3)$$

ここで、 $5 < H < 25 \text{ cm}$  及び  $0.1 < d/(2r) < 0.5$  に対して  $c_1=0.993$ ,  $c_2=0.289$  である。

## 3. 結果

Fig. 1 に豊浦砂(A)と不耕起関東ローム農地土壌(B)に対する測定水位の経時変化と式(1)を使って曲線回帰した結果を示す。測定時間間隔が均等でなくても守備よく曲線回帰ができた。表

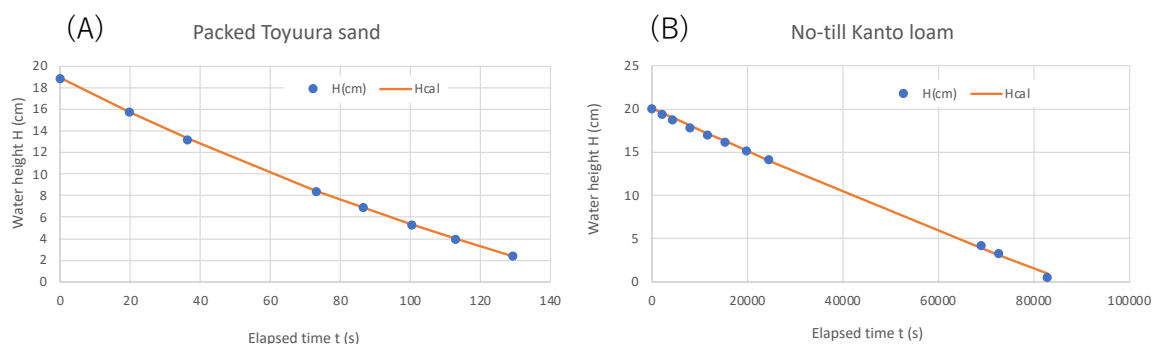


Fig. 1. Temporal changes in measured water heights for (A) Toyoura sand packed in a container and (B) no-till Kanto loam in the field. The dots indicate measurement and fitted lines with Eq. (1).

1には、Inoue と Noborio の方法で推定した  $K_{fs}$  と 100cc サンプラで採土して室内で変水位法を使って測定した  $K_s$  を比較した。豊浦砂では、Inoue 法の方が室内実験に近い値となった。豊浦砂では5回目

の浸潤実験時の水変化を使って計算した。一方、不耕起圃場での測定は、両方とも室内実験より小さい値となったが、これは1回目の浸潤実験時の水変化を使ったせいであると考えられる。また、室内実験での標準偏差が非常に大きいことは、採土位置による変動が大きいことを意味しており、不耕起土壌での測定の困難さを示唆している。

### 参考文献

- Inoue, M., Saito, H., Fujimaki, H., Noborio, K., Inosako, K., Simunek, J., 2023. Repeated falling-head method for in situ measurements of saturated hydraulic conductivity using a single cylinder. *Geoderma*, 435, 116511. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116511>
- Noborio, K., Ito, Y., He, H., Li, M., Kojima, Y., Hara, H., Mizoguchi, M., 2018. A new and simple method for measuring in situ field-saturated hydraulic conductivity using a falling-head single cylinder. *Paddy Water Environ.*, 16, 81–87. <https://doi.org/10.1007/s10333-017-0617-8>.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E., Young, E.G., 2002. Ring or cylinder infiltrometers (Vadose zone). In: J. H. Dune, and G. C. Topp, editors, *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical methods*. SSSA, Book Ser. 5. SSSA, Madison, Wisconsin p.818-843.

表1 飽和透水係数 Inoue 法, Noborio 法, 変水位室内実験の比較

	Inoue et al. $K_{fs}$ (cm/s)	Noborio et al. $K_{fs}$ (cm/s)	変水位法 (室内) $K_s$ (cm/s)
Toyoura sand	0.0261	0.0320	$0.0218 \pm 0.00236$
No-till Kanto loam	$1.40 \times 10^{-5}$	$1.34 \times 10^{-5}$	$4.30 \times 10^{-4} \pm 2.13 \times 10^{-4}$