

透明リングを用いた上方浸潤法による不飽和透水係数の測定

Upward Infiltration Method using Transparent Rings for Determining Unsaturated Hydraulic Conductivity

藤巻晴行* 井上光弘**

FUJIMAKI Haruyuki* INOUE Mitsuhiro

1. はじめに

吸水過程の不飽和透水係数の正確な把握は、点滴灌漑における水分移動の正確な数値予測や、フィンガリング現象の解明等に不可欠である。吸水過程の不飽和透水係数の測定法としては、初期低水分の水平土壌カラムへの浸潤過程を利用するボルツマン変換法(Bruce and Klute, 1956), Sorptivity 法(Dirksen, 1979), やテンシオメータを使用した上方浸潤法(Hudson *et al.*, 1996; Simunek *et al.*, 2001)などが開発されているが、いずれも精度、測定範囲、コストなどの面で課題を残している。そこで本研究ではきわめて簡素な上方浸潤実験を逆解析することにより、風乾から飽和までの広い水分領域の不飽和透水係数を決定する方法を考案し、適用を試みた。

2. 実験方法

上方浸潤実験

実験は基本的に吸水過程の土柱法と同様である。内径 1.53cm の透明アクリルリング(高さ 1cm および 2cm) を連結した高さ 30cm のカラ

ムに、風乾状態のマサ土を 1.60 の仮比重で充填した。下端には金属メッシュをあてた。充填後、上蓋に直径 2.4cm の円形口をもつ断面面積 105cm² のプラスチック容器内の水面下約 2mm に、鉛直に立てたカラムの下端を浸した。なお、カラムはプラスチック容器には接していない。重量変化(積算浸入量)および浸潤前線の経時変化を測定した。浸潤前線が深さ約 5cm まで上昇した時点で輪切り採土し、水分分布を測定した(Fig.1)。

実験終了時までの水位低下は 1.1mm であり、無視できる。また、カラム外壁と上蓋の円形口との隙間も 1cm² 程度であり、湿度を 80% 以上に維持したため、蒸発損失は無視した。

土壌水分保持曲線の測定

圧力水頭が 0 ~ -100cm の範囲を吸引法により、-1,000cm 以下をサイクロメータ法により測定した(Fig.2)。-1,000cm 以下ではヒステリシスはないものと考えた。参考のため、脱水過程の吸引法によるデータも示す。

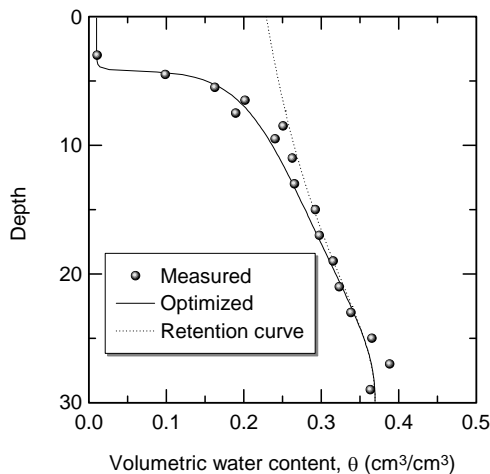


Fig.1 Comparison of measured and optimized water content profiles.

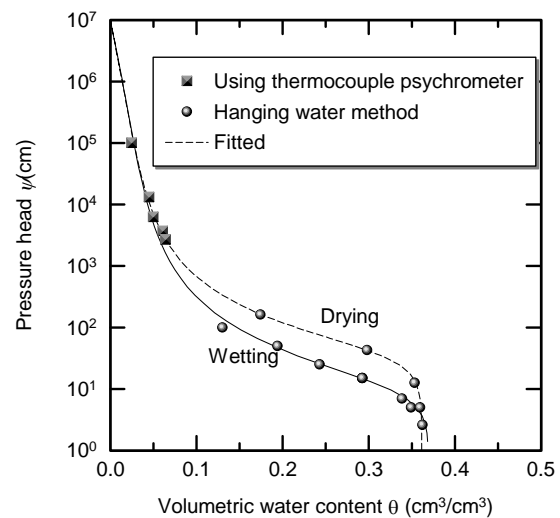


Fig.2 Soil water retention curve for the loamy sand.

* 筑波大学農林工学系 Institute of Agricultural and Forest Engineering, University of Tsukuba

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

キーワード：土壌水分移動，不飽和透水係数，ヒステリシス，浸潤

3. 逆解析の方法

Marquadt 法を用いて、水蒸気移動を含む水分移動の数値解と実測値とのずれを表す目的関数（次式）が最小となるように不飽和透水係数のパラメータを決定した。

$$O(\mathbf{B}) = \sum_{j=1}^3 \left(\frac{1}{n_j \sigma_j^2} \right) \sum_{i=1}^{n_j} [p_{j,i}^* - p_{j,i}(\mathbf{B})]^2 \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{B} ：パラメータベクトル、 j ：測定項目番号、 i ：測定点番号、 n_j ：測定項目 j の測定点の数、 $p_{j,i}^*$ ：測定項目 j の実測値、 $p_{j,i}$ ：測定項目 j の数値解、 σ_j^2 ： $p_{j,i}^*$ の分散である。 $(n_j \sigma_j^2)^{-1}$ は測定項目間の大きく異なる測定点数およびスケールを、測定誤差を考慮しつつ調整するための重み付け係数である。本研究では、測定項目 1 を積算浸入量、測定項目 2 を浸潤前線の深さ、測定項目 3 を採土時における水分分布とした。浸潤前線の深さは、採土時の浸潤前線における体積含水率 0.16 と一致する深さとした。

Richards 式の数値解法には修正 Picard 型差分法を用いた。空間増分は 0.2cm で一定とした。時間増分は 0.05h を上限として各離散時刻における反復回数が 5 回程度になるように自動設定した。

土壌水分保持曲線には、風乾付近まで良好に近似できる次式を用いた(Fig.2)。

$$\theta = \frac{\theta_{sat} - \zeta}{[1 + (-\alpha\psi)^n]^m} + \zeta \left\{ 1 - \left[\frac{\ln(-\psi + 1)}{\ln(\Lambda)} \right]^2 \right\} \quad (2)$$

ここで、 θ ：体積含水率(cm^3/cm^3)、 θ_{sat} ：飽和 θ 、 ψ ：圧力水頭、 ζ 、 n 、 m は土壌固有の実験定数である。不飽和透水係数関数 $K(\text{cm/s})$ には次式を用いた。

$$K = K_{sat} \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}} \right)^\omega \quad \omega = \beta\theta + \gamma \quad (3)$$

ここで、 K_{sat} ：飽和透水係数(cm/s)、 β 、 γ ：フィッティングパラメータである。今回は K_{sat} も最適化の対象とした。

4. 結果と考察

Fig.1 には最適化されたパラメータを用いた水分分布の数値解も示されている。数値解は実測値と良く一致している。積算浸入量および浸潤前線の深さ経時変化の実測値と最適化されたパラメータを用いたそれらの数値解を Fig.3 に

示す。これらもほぼ一致している。得られた不飽和透水係数曲線を Fig.4 に示す。 $K_{sat} = 0.0014\text{cm/s}$ 、 $\beta = 0.44$ 、 $\gamma = 8.7$ であった(UIM)。他の 3 つの方法(SPM:定常浸透法; SEM:定常浸潤法; IPM:瞬時プロファイル法)で測定された脱水過程の不飽和透水係数データとは、 $\theta = 0.1$ 付近以外はかなり近い。 $\theta = 0.1$ 付近での乖離が実験や解析上の誤差によるものなのか、それとも不飽和透水係数のヒステリシスを示すものなのかは現時点では断定できない。

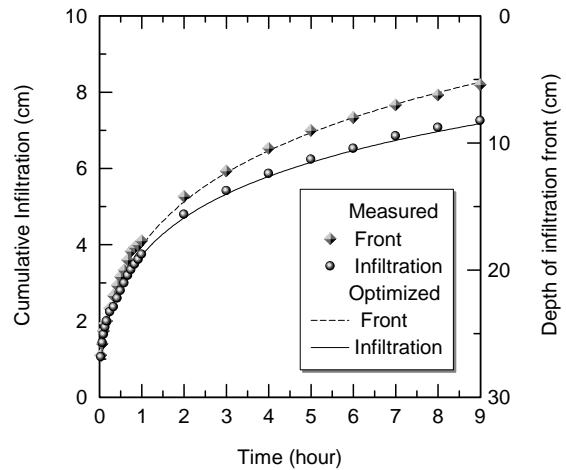


Fig.3 Comparison of observed and optimized time evolution of cumulative infiltration amount and depth of infiltration front.

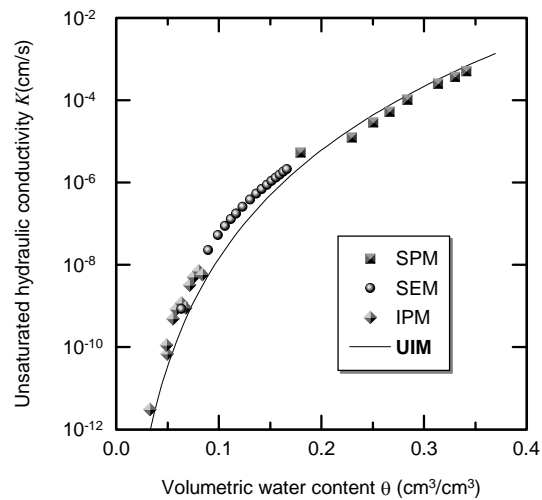


Fig.4 Unsaturated hydraulic conductivity of the loamy sand.

5. まとめ

以上の結果から、本方法は、10 時間程度のきわめて簡素な実験から、広い水分領域の不飽和透水係数を良好な精度で決定できる可能性を有することが明らかとなった。