

# HYDRUS-2D を用いた逆解析による水分移動特性値の推定 Inverse estimation of Soil Hydraulic Properties with HYDRUS-2D

井上光弘  
Mitsuhiro Inoue

## 1. まえがき

土中の養分、農薬、塩類などの化学物質は、降雨後の浸透に伴う水の流れとともに移動すること、そして、これらの物質移動の予測、土中水の移動予測のために、数値シミュレーションの入力データとして水分・溶質移動特性値（不飽和透水係数、土壌水分保持曲線、分散係数など）が必要であることは周知のことである。本研究は、今回の企画セッション「土中水分・塩分移動予測汎用プログラム HYDRUS を用いた教育・研究と応用について」に参画し、その中で、逆解析による水分移動特性値の推定について話題提供するものである。

## 2. 逆解析による特性値の推定

土中水の移動を予測する場合、まず、対象とする計算領域を設定して、境界条件、初期条件、水分移動特性値の関数パラメータ、計算期間を入力して、計算領域の水分分布、ポテンシャル分布、水分フラックスの経時変化を数値計算で求めることができる。この計算を順解析という。これに対して順解析で出力した経時変化を、別途実験で測定し、この実測値と計算値が一致するように水分移動特性値の関数パラメータを最適化手法で同定する方法を逆解析という。

近年、自動記録が可能な TDR 水分計や圧力変換器付きテンシオメータなどの測器が安価に入手できるようになり、逆解析による特性値の推定が多く報告されるようになった。1次元の数値計算汎用プログラム HYDRUS-1D を用いた逆解析例として、排水法、下降浸潤法、上方浸潤法、ワンステップ加圧流出法、マルチステップ加圧流出法、蒸発法などの室内非定常試験法がある。これに対して、2次元の数値計算汎用プログラム HYDRUS-2D を用いた逆解析例として、単独でも特性値を測定できる現場試験法（定水頭浸潤法、負圧浸入法、円盤透水法）に逆解析を適用した方法、コーン型透水法、多段階吸引抽出法などの原位置試験法がある。

## 3. 逆解析遂行上の留意点

逆解析では、計算領域の境界条件、初期条件を適切に設定して、実験状況を正確にモデル化することが重要である。特に、流れの状況を熟知して有限要素のメッシュの大きさを適切に設定することが計算の精度を左右する。また、逆解析では、(1)式に示すように、実測値と計算値の差の二乗和を目的関数として、これが最小になるようにパラメータを同定する。

$$\begin{aligned}
 OF(b) = & W_Q \sum_{i=1}^N \{w_i [CumQ_m(t_i) - CumQ_o(t_i, b)]\}^2 \\
 & + W_h \sum_{i=1}^{M_1} \{v_i [h_{1m}(t_i) - h_{1o}(t_i, b)]\}^2 \\
 & + W_h \sum_{i=1}^{M_2} \{v_i [h_{2m}(t_i) - h_{2o}(t_i, b)]\}^2 \\
 & + W_j \sum_{j=1}^L \{u_j [\theta_m(h_j) - \theta_o(h_j, b)]\}^2 \\
 & + W_g \sum_{g=1}^G \{y_g [k_m(h_g) - k_o(h_g, b)]\}^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 $OF(b)$ は目的関数で、 $CumQ$ 、 $h$ 、 $k$  は累積抽出（流出）量、圧力水頭、体積含水率、不飽和透水係数で、 $W$ は無次元化係数、 $v$ 、 $u$ 、 $y$ は実験の重み係数、添え字  $m$ は実験測定値、添え字  $o$ は数値計算値を意味する。

水分移動特性値の関数パラメータを最適化する際に、目的関数にどの測定値とどの測定値を採用するか、実験の重み係数をいくらにするか、などを設定する必要がある。さらに、水分移動特性値の関数パラメータを同定する際に、採用する関数の選択が重要である。HYDRUS-2D では、関数として、(2)式、(3)式に示した van-Genuchten-Mualem 式、修正 van-Genuchten 式、Brooks-Corey 式などが準備されている。

$$S_e(h) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \tag{2}$$

$$k(h) = k_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \tag{3}$$

ここで、 $S_e$ : 有効飽和度、 $\theta_s$ : 飽和体積含水率、

$r$  : 残留体積含水率,  $k_s$  : 飽和透水係数,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $l$ ,  $m$ ,  $n$  : 実験係数( $m=1-1/n$ )である。

	Gr	Qs	Alpha	n	Ks	l
Initial Estimate	0.001	0.4	0.0096	1.58	0.016	0.5
Minimum Value	5E-005	0.3	0	1.1	0.001	0
Maximum Value	0.4	1	1.2	5	3.5	0
Fitted ?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				

Fig.1 Water flow parameters

HYDRUS-2Dでは,これらのvan Genuchten式と Mualem式を用いる際の関数パラメータ,  $r$ ,  $s$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $k_s$ ,  $l$ ,  $m$ を, Fig.1に示すように,その初期値と,最小値,最大値を設定でき,逆に固定することもできる。このとき,関数パラメータの初期値の設定が重要である。これは, 解の収束性,非一意性の問題である。つまり, 目的関数を最小にする関数パラメータは,設定した初期値に依存することが知られている。

#### 4. 多段階吸引抽出法

土壌に圧力センサー付き土壌溶液抽出円筒と圃場埋設型ミニテンシオメータ (Fig. 2 参照)を挿入し,湛水飽和する。内部排水の2日後を初期条件として実験開始。上部下部境界条件にゼロフラックス(圃場では下部境界に圧力水頭の経時変化)を採用し,ピューレットの上部から,段階的に吸引する。これに伴って,ピューレットに滴下した累積抽出量を測定する。圧力変換器付きテンシオメータで測定した圧力水頭と累積抽出量の経時変化を目的関数として,逆解析を行った(Inoue et al. 1998)。

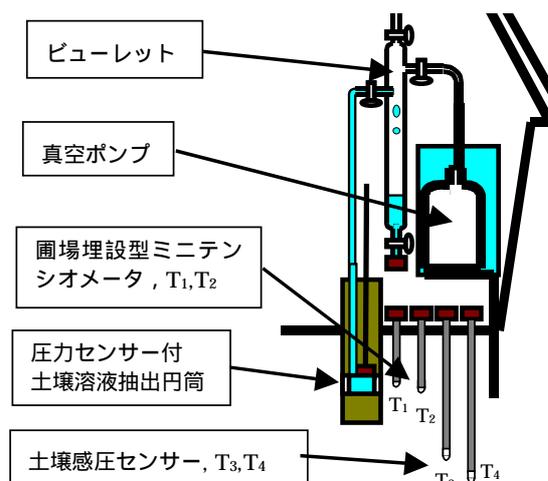


Fig.2 Multi-step extraction device for measuring soil hydraulic properties.

#### 5. コーン型透水法

先端がコーン型に尖った円筒を挿入して,一定水頭の条件で円筒からの浸潤量変化と,円筒に付随した2個の圧力変換器付きテンシオメータで圧力水頭変化を測定する。これらの浸潤量と2点の圧力水頭の経時変化を目的関数として,逆解析によって不飽和透水係数と圧力水頭との関数を求める(Gribb et al. 1998)。

#### 6. 定水頭浸潤逆解析法

圃場に定水頭浸潤計を設置し,実験では,深さ50cmにアンサックを埋設し,直径5cm円筒直下,深さ10,15,20cmに圧力変換器付きテンシオメータを埋設して,圧力水頭の変化を測定した。浸潤量の変化は,マリOTTタンク内の水位を記録した。初期条件は飽和排水後2日目で,実験中5分間の土壌面蒸発は無視した。推定した特性値は,他の方法で得た特性値と比較して妥当であることを確認した。

#### 7. 水分・溶質移動特性値の同時逆解析法

分散係数を求める室内実験法に,浸潤法で得た破過曲線から解析的に求める方法がある。ここでは,電子天秤,4極センサー,電子テンシオメータを用いて,非定常浸潤のフラックス,塩分濃度,圧力水頭の変化を測定し,逆解析から同時に不飽和透水係数と分散長を決定した(Inoue et al. 2000)。

#### 8. あとがき

逆解析による水分・溶質移動特性値の推定を行う場合,実測値を正確に測定できていることが前提条件である。特に,原位置試験の場合には,現場の土壌の不均一性,下部境界条件の設定,初期条件の設定,装置と土壌との密着性,などが推定精度を左右する。目的関数の選択と重み係数の設定も重要である。そして,得られた結果は実測値の測定範囲に限定されることに注意したい。さらに,別途に測定した特性値との比較も有効である。逆解析を普及するには,方法を吟味し,実務に供する装置の開発とノウハウの蓄積が重要である。

最後に,装置の開発にあたって,サンケイ理化(株)と大起理化工業(株)の協力を得た。ここに,謝意を表します。

#### 引用文献

- Inoue et al.: Water Resour. Res. 34 (5) 1035-1050 (1998)  
 Gribb et al.: J. Geotech. Geoenviron. 124(9), 820-829 (1998)  
 Inoue et al.: Adv. in Water Resour. 23, 677-688 (2000)