

# 一般化多峰性不飽和水理水分移動性モデルの HYDRUS-1D への導入 Numerical analysis of unsaturated water flow in soils with generalized multimodal hydraulic property models using HYDRUS-1D

幸喜 烈\*, 斎藤 広隆\*

Retsu KOKI, Hiroataka SAITO

## 1. はじめに

不飽和土中水の圧力水頭 $h$ に対する体積含水率 $\theta$ の関係である水分保持曲線 $\theta(h)$  (WRF)および $h$ に対する不飽和透水係数 $K(h)$  (HCF)を関数として表すモデルは、不飽和水分移動の数値解析において重要である。これまでに単峰性の間隙径分布に基づき $\theta(h)$ を推定する WRF として Brooks and Corey (BC), van Genuchten (VG) モデル, Kosugi (KO) モデルなどが提案されてきた(Brooks and Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Kosugi, 1996 など)。これら WRF は連結した間隙に対して等価間隙径を仮定した Mualem モデル(Mualem, 1976)と組み合わせることで HCF を推定できるため、土壌の保水性と透水性を少ないパラメータ数で表現できる有用なモデルとして活用された。

しかし、単峰性 WRF・HCF は団粒構造が発達し多峰性の間隙径分布を持つ黒ボク土に対する適用性が悪く、また砂質土において乾燥領域での $K(h)$ を極端に過小評価するなどの課題が指摘されている。その克服のため、複数の単峰性モデルを線形結合させたモデルが提案された(Priesack and Durner, 2006; Seki et al., 2022)。これらの多峰性モデルは様々な土壌に柔軟に適合することが期待される一方、汎用不飽和水分移動解析モデルへの実装は進んでおらず、不飽和水分移動解析に適用した事例は限られている。そこで、本研究では一般化多峰性モデルを汎用不飽和土中水分・熱・溶質移動解析プログラム HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2008)へ実装し、蒸発法(Šimůnek et al., 1998)に基づくパラメータ推定によりモデルと修正 HYDRUS プログラムの性能評価を行った。逆解析には汎用逆解析ソフトウェア PEST (Doherty, 2015)を活用した。

## 2. 方法

一般化多峰性モデルの WRF は BC・VG・KO をサブモデルとし、任意の個数・組み合わせで線形結合することで与えられる(Priesack and Durner, 2006; Seki et al., 2022)。なお、WRF として $\theta(h)$ ではなく有効飽和度 $S(h)[-]$ を用いる。

$$S(h) = \sum_{i=0}^n w_i S_i(h) \quad (1)$$

ここで、下付き文字はサブモデル番号、 $S_i(h)$ はサブモデル  $i$  の WRF、 $w_i[-]$ はサブモデル  $i$  の重みである。また、(1)式と一般化 Mualem モデルから以下のように $K(h)$ が推定される。

$$K(h) = K_s S(h)^p \left[ \frac{\sum_{i=0}^n w_i A_i(h)}{\sum_{i=0}^n w_i B_i} \right]^r \quad (2)$$

ここで、 $K_s [L \cdot T^{-1}]$ は飽和透水係数、 $p[-]$ は間隙結合係数である。なお、式(1)・(2)中の関数  $A_i(h)$ 、 $B_i$ および $S_i(h)$ はサブモデルの種類に依る(表1)。

\*東京農工大学 Tokyo University of Agriculture and Technology キーワード：水分移動、水理特性モデル

表 1. 各サブモデルの  $S_i(h)$ 、 $A_i(h)$ 、 $B_i$   
 Functions  $S_i(h)$ ,  $A_i(h)$ ,  $B_i$  of each submodels

サブモデル名	$S_i(h)$	$A_i(h)$	$B_i(= A_i(0))$
BC	$\begin{cases} (h/H_i)^{-n_i} & , h < H_i \\ 1 & , h \geq H_i \end{cases}$	$\begin{cases} B_i(h/H_i)^{-n_i-q} & , h < H_i \\ B_i & , h \geq H_i \end{cases}$	$H_i^{-q} \frac{n_i}{n_i+q}$
VG	$[1 + (h/H_i)^{n_i}]^{-1+\frac{q}{n_i}}$	$B_i [1 - \{1 - S_i(h)^{\frac{n_i}{n_i-q}}\}^{1-\frac{q}{n_i}}]$	$H_i^{-q}$
KO	$\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\ln(h/H_i)}{\sqrt{2n_i}}\right)$	$\frac{B_i}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\ln(h/H_i)}{\sqrt{2n_i}} + \frac{q_i n_i}{\sqrt{2}}\right)$	$H_i^{-q} \exp\left(\frac{q^2 n_i^2}{2}\right)$

(補足) ・  $\operatorname{erfc}(x)$  は相補誤差関数 ・  $H_i$ [L]、 $n_i$ [-] はサブモデルごとのパラメータ

これらの式に基づいて HYDRUS-1D のソースコードを編集し、一般化多峰性モデルに基づく土中水移動解析を可能とした。実装後の改良プログラムに対して蒸発法に基づく逆解析を行い、性能を評価した。蒸発法は水分蒸発に伴う土試料の乾燥過程における土中水圧力の時間変化データなどを用いて WRF や HCF のパラメータ逆推定を行う方法である。本研究では黒ボク土と砂丘砂におけるデータを用いた (坂井および取出, 2007)。また、水分移動解析では同じ単峰性モデル 2 つを結合させた一般化多峰性モデル (BC-BC, VG-VG, KO-KO) と、比較対象として単峰性モデル (VG) を用いた。なお PEST は任意の数値モデルに対して最小二乗法に基づく逆解析を行い、パラメータを推定するプログラムである。

### 3. 結果

一般化多峰性モデルは単峰性モデル (VG) と比較して、黒ボク土における圧力時間変化をよく表現した。砂質土においては両者の差がより顕著であり、一般化多峰性モデルは 2.5(d) 以降の急激な圧力低下を表現した (図 1)。これは、単峰性モデルの砂質土における低圧力帯の  $K(h)$  過小評価が一般化多峰性モデルでは改善されたためである。

### 4. まとめ

本研究ではサブモデル数 4 個までの一般化多峰性モデルを HYDRUS-1D に実装し、これに基づく土中水移動数値解析を可能とした。また、改良プログラムと PEST を用いたパラメータ逆解析により改良プログラムが正常に動作することを確認し、また一般化多峰性モデルの黒ボク土・砂質土に対する適合性の高さが示された。

#### 引用文献

- Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1964). Hydrol. Pap. No. 3. Colorado State Univ. Fort Collins.  
 Doherty, J. (2015). Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia.  
 Kosugi, K. (1996). Water Resource Research J. **32**(9). 2697-2703.  
 Mualem, Y. (1976). Water Resource Research J. **12**(3). 513-522.  
 Priesack, E., Durner, W. (2006). Vadose Zone J. **5**(1). 121-124  
 坂井勝・取出伸夫 (2007), 土壌の物理性, **106**, 33-46.  
 Seki, K., Toride, N., Th. van Genuchten, M. (2021). Vadose Zone J, **21**(1), e20168.  
 Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th. (2008). Vadose Zone J, **7**(2), 782-797.  
 Van Genuchten, M.Th. (1980), SSSAJ, **44**(5), 892-898.

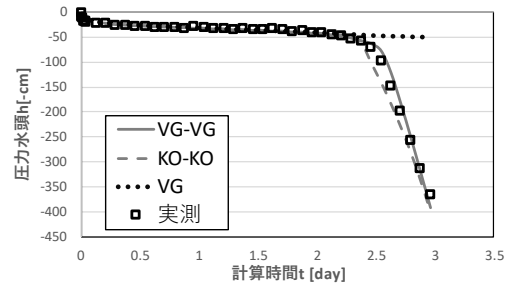


図 1. 砂質土の深さ 1(cm) 地点における土中水圧力経時変化  
 Pressure heads time-related change at 1 cm depth in sand.