J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 163, p.3 ～ 14 (2026)

若手特集
研究ノート
Notes

Mualem-van Genuchten（VG）モデルと修正 VG モデルによる土壌水分移動の数値シミュレーション結果の比較：粗大間隙を含む VG パラメータ n が小さい土壌の特性について

池添優樹 [1]・岩田幸良 [2]・柳井洋介 [3]・関 勝寿 [4]・谷口智之 [2]

Comparing results of numerical simulation for soil water movement with the Mualem-van Genuchten (VG) model and the modified VG model — focusing on the characteristics of soil with low VG parameters n and macropores

Yuki IKEZOE[1], Yukiyoshi IWATA[2], Yosuke YANAI[3], Katsutoshi SEKI[4] and Tomoyuki TANIGUCHI[2]

Abstract: This study evaluated the impact of the rapid change in unsaturated hydraulic conductivity near saturation, as described by the van Genuchten (VG) model, on the results of soil water movement simulations. Free drainage simulations from near-saturated conditions were conducted using HYDRUS-1D for four soil types, including soils containing a large amount of macropores, resulting in a small n value of the VG model parameter and large saturated hydraulic conductivity. The results showed that, for soils having a small n value, the VG model significantly reduced unsaturated hydraulic conductivity near saturation. In contrast, the modified VG model with the conventional air-entry pressure setting (−2 cm) suppressed this reduction. However, comparisons with observed data for soil containing macropores and having a small n value showed that the conventional modified VG model overestimated drainage rates. Conversely, setting h_e close to 0 cm allowed the model to reproduce the observed data well. A sensitivity analysis revealed that the effect of pore connectivity parameter, l is much less than that of the air-entry pressure, h_e in modified VG model. Because remarkable improvement on the calculation result was not obtained in spite of the change in l in the VG model, our results indicates the usefulness of modified VG model if we can determine h_e appropriately.

Key Words：HYDRUS, hydraulic conductivity, numerical simulation, soil water characteristic curve, Mualem-van Genuchten model

[1]Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan.
[2]Faculty of Agriculture, Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan. Corresponding Author: 岩田幸良, 九州大学大学院農学研究院.
[3]Institute of Vegetable and Floriculture Science, National Agriculture and Food Research Organization, Kannondai 3-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8519, Japan.
[4]Natural Science Laboratory, Toyo University, 5-28-20 Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606, Japan.
2025 年 9 月 10 日受稿　2026 年 3 月 9 日受理

1. 緒言

シミュレーションソフトの HYDRUS 等を用いて土壌水分動態の解明が実施され，その実用性が広く認識されている（e.g., 岩田ら, 2016; Sakai, 2022）．数値シミュレーションでは，Richards 式を用いて土壌水分移動を計算するのが一般的であり，Richards 式では動水勾配と不飽和透水係数を用いて水フラックスを計算する．ここで，動水勾配の計算に必要なマトリックポテンシャルは，水分特性曲線から求める．従って，水分特性曲線と不飽和透水係数が数値シミュレーションの計算結果に影響を与える物理量である．

不飽和透水係数は土壌水分量に依存するため，水分特性曲線と飽和透水係数からマトリックポテンシャルと不飽和透水係数の関係式を推定する．飽和透水係数と水分特性曲線から不飽和透水係数を推定するモデルがいくつか提案されているが（Brooks and Corey, 1966a; Fayer and Simmons, 1995; Kosugi, 1994; 1996），最も多く使われているのが Mualem-van Genuchten モデル（以下，VG モデル）である（e.g., Kato et al., 2011）．

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha h|^n)^{-m}, \quad m = 1 - 1/n \qquad (1)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{(1/m)}\right)^m\right]^2 \qquad (2)$$

ここで，S_e は有効飽和度，θ_r は残留体積含水率，θ_s は飽和体積含水率，h は圧力水頭，K は不飽和透水係数（以下，K），K_s は飽和透水係数（以下，K_s），l は間隙結合係数，α，n，m はそれぞれ水分特性曲線の形状を決定するパラメータであり，（1）式は水分特性曲線を，（2）式は不飽和透水係数と土壌水分量の関係を表している．

Table 1　Carsel and Parrish (1988) による Clay の VG パラメータ.
VG parameters of clay provisions by Carsel and Parrish (1988).

θ_r	θ_s	α [cm^{-1}]	n	K_s [cm d^{-1}]	l
0.068	0.38	0.008	1.09	4.8	0.5

Sakai and Toride（2009）によると，VG モデルの各パラメータの特徴は以下の通りである．α はその逆数が空気侵入圧に相当し，粗粒な土壌ほど大きい傾向がある．n は水分特性曲線の傾きに影響を与える値である．また，l は通常 0.5 を用いることが多いが，Sakai and Toride（2007）は l の値をフィッティングパラメータとして使用することでより広い圧力範囲での不飽和透水係数が推定できることを示している．

VG モデルは，測定の比較的容易な水分特性曲線から，正確な測定が難しい不飽和透水係数を推定することができることから，広く用いられている．しかし，パラメータ n が小さい（$n \approx 1.1$ 以下）土壌では飽和付近で不飽和透水係数の急激な低下が生じることが知られている（Brooks and Corey, 1966b; Vogel et al., 2000）．例えば，USDA の土壌テクスチャ分類（全 12 種）に基づいて Carsel and Parrish（1988）によって提供され，HYDRUS のソフトウェアパッケージに規定値として収録されている Clay の VG パラメータ（Table 1）を用いると，VG モデルにより計算される K は，$h = 0$ cm では $K\ (= K_s) = 4.8$ cm day^{-1} であるが，$h = -2$ cm のときは $K \approx 0.465$ cm day^{-1} と 1/10 以下になる．しかし，実際の粘質土では飽和近傍での水分量変化は小さく，不飽和透水係数の変化も小さいため，このモデルは物理的妥当性に欠けるといえる．そのような VG モデルをシミュレーションに使用すると，飽和近傍におけるシミュレーション結果に影響を及ぼす可能性がある．また，浸潤前線より上方の飽和状態の透水係数と，乾燥した下方の透水係数の間に大きな差が生じ，結果的に浸潤前線付近の水収支の整合性が取れなくなることで計算が不安定となり，計算結果の収束を妨げる要因となることが指摘されている（Rassam et al., 2004）．この問題に対応すべく，VG モデルを部分的に改良した Vogel and Cislerova（1988）によって，空気侵入圧を設定した VG モデル（以降，mod-VG モデル）が提案され，HYDRUS などのシミュレーションソフトにも採用され最も広く知られている．mod-VG モデルは，以下の 3 式で表される．

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + (\theta_m - \theta_r)(1 + |\alpha h|^n)^{-m}, & h < h_e \\ \theta_s \quad , & h \geq h_e \end{cases} \tag{3}$$

$$K(S_e) = \begin{cases} K_s S_e^l \left[\dfrac{\{1 - F(\theta)\}}{\{1 - F(\theta_s)\}} \right]^2 \quad , & h < h_e \\ K_s \quad , & h \geq h_e \end{cases} \tag{4}$$

$$F(\theta) = \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \tag{5}$$

ここで，h_e は仮想的な空気侵入圧，θ_m は仮想的な飽和体積含水率である．$\theta = \theta_s$ となる h が h_e となるように，VG モデルよりも大きな飽和体積含水率 θ_m を設定し，各パラメータを再度設定する．このモデルでは，$h > h_e$ で θ が θ_s となるために，飽和近傍での透水性の急激な変動が抑えられる．HYDRUS では，mod-VG モデルの h_e のデフォルト値として -2 cm が設定されているが，(3) ～ (5) 式中の θ_m を調整することで，任意の値に変更することができる（Vogel et al., 2000）．このモデルは飽和近傍の不飽和透水係数 K の急激な低下が解消され，数値計算を安定的に行うことができるようになるため，シナリオ解析などでしばしば用いられている（e.g., Nakamura et al., 2016）．一方，n が小さい粘土質の土壌などでは仮想的な空気侵入圧 h_e を設定することで不飽和透水係数が VG モデルに比べて大きくなる特性が指摘されている（Sakai and Toride, 2009）．特に本研究で対象とするような粗大間隙を含む土壌では，慣習的な $h_e = -2$ cm の適用が物理的に妥当かという点に加え，先述の通り l の値が不飽和透水係数の推定に与える影響についても考慮する必要がある．

不飽和透水係数の相違は，Richards 式でこの値を使用して計算される水フラックスにも影響し，土壌水分移動のシミュレーションにおける計算結果に大きく影響する可能性がある．

mod-VG モデルを用いたシミュレーションが VG モデルを用いた場合とどのような相違があるか示した例として，Vogel et al.（2000）の数値実験がある．この例では，いくつかの土壌タイプごとに，初期条件の圧力水頭が全層で -1000 cm の均質なカラムに下層及び上層から水が浸透する条件で，VG モデル及び mod-VG モデルの両者によるシミュレーション結果を比較している．この文献では，上方への浸透と下方への浸透のいずれのシミュレーションでも，両モデル間で浸潤前線の位置に著しい違いがみられたことが記されている．しかし，このシミュレーションは初期条件が -1000 cm と比較的乾燥した条件から開始しており，モデルの違いによる不飽和透水係数の違いの影響を最も受けると考えられる飽和付近において mod-VG モデルを適用した際の，VG モデルを用いた場合とのシミュレーション結果の違いについては検討されていない．

一方，Oh et al.（2015）は mod-VG モデルと同様に飽和（圧力水頭 0 cm）から空気侵入圧まで土壌水分量が一定になるような新たなモデルを開発し，開発したモデルにより推定された不飽和透水係数が VG モデルにより推定された値よりも実測値に近いことを示した．しかし，これらの結果は飽和透水係数が 2.38×10^{-4} cm s^{-1} $\sim 1.29 \times 10^{-6}$ cm s^{-1} と比較的小さなときであり，飽和透水係数が高い土壌での検討事例は少ない．

そこで本研究では，飽和透水係数が大きく，粗大間隙が多く含まれ，VG パラメータ n が異なる 4 種の土壌に対して，初期条件が飽和に近い条件での土層からの自由排水を対象に，VG モデル及び mod-VG モデルの両者を用いて HYDRUS-1D により数値シミュレーションを実施した．計算結果を比較することで，VG モデルの飽和付近での不飽和透水係数の急激な低下が数値シミュレーションに与える影響を評価した．この研究の目的は，作土層のように大きな間隙を含み，飽和透水係数の大きい土壌について，VG モデルにおける飽和近傍での不飽和透水係数の急激な低下が計算結果に与える影響を検討し，数値シミュレーションにおけるモデルの選択およびそのパラメータ決定がシミュレーション結果に大きな相違を及ぼす可能性を示すと共に，mod-VG モデルにおいて土壌水分動態を精度よく計算するために重要なパラメータを検討することにある．

2. 方法

2.1 使用データとパラメータセットの決定手法

枠板式高畝栽培によるアスパラガス栽培圃場（岩田ら, 2023）から採取した土壌の物理性データセット（Seki et al., 2023a）から，高畝（作土層）の 4 つの土壌を選定した．データセット中の全ての土壌の水分特性曲線のデータについて，非線形回帰プログラムである SWRC Fit（Seki et al., 2023b）を用いて VG モデルのパラメータを得た．モデルパラメータのうちの n に着目し，解析対象として n が非常に小さい秋田県大仙市（黒ボク土），中程度の香川県綾川町（低地水田土）と茨城県つくば市（黒ボク土），n が大きい福岡県久留米市（真砂土）の計 4 か所のデータを選定した．詳細なパラメータは，3.1 節を参照されたい．得られた水分特性曲線のパラメータと実測した飽和透水係数を用い，式（2）と式（4）から各マトリックポテンシャル（ pF 値）における不飽和透水係数を計算した．各圃場の位置や水分特性曲線の測定方法の詳細については Seki et al.（2023a）を，飽和透水係数の測定方法の詳細については岩田ら（2023）を参照されたい．なお，各土壌とも代表的な土壌物理性データベースである UNSODA の同じ土性の土壌に比べ，飽和透水係数が大きい．これは本論文で用いた土壌のいくつかが黒ボク土であることと，各圃場で畝の形成時に盛り土を行った影響で土中に粗大な間隙が多く含まれたため（岩田ら, 2023）と推察される．

2.2 数値シミュレーション

HYDRUS-1D（Šimůnek et al., 2018）により，上記の 2 つの条件で決定された VG モデルのパラメータを用いて鉛直 1 次元の数値シミュレーションを実施した．計算領域として 100 cm（グリッド間隔 0.5 cm）の土層を設定した．計算日数を 20 日間とし，上端はフラックスなし，下端は自由排水とした．

Schaap and van Genuchten（2006）によれば，VG モデルにおいて不飽和透水係数の急激な低下がみられ，急激な低下が認められない土壌と比べて −4 cm 以上の圧力水頭のときに不飽和透水係数の差が顕著になる．そこで，全シナリオにおいて，圧力水頭が −4 cm よりも大きく，かつ全土壌で数値計算が収束した圧力水頭 −3 cm を初期水分条件とした．

VG モデル（式（1））と mod-VG モデル（式（3）～(5)）を用いてシミュレーションを実施した．mod-VG モデルの適用に当たっては，HYDRUS において計算の安定性向上を目的とした計算オプションとして容易に設定できるために広く用いられている（e.g., Nakamura et al., 2016），空気侵入圧 $h_e = -2$ cm を設定したモデル（以降，mod-VG$_{-2}$ モデル）を，供試したすべての土壌で採用した．さらに，空気侵入圧の設定が計算結果に与える影響を詳細に評価するため，大仙市の土壌については追加検討として，h_e を −1.5 cm，−1 cm，−0.5 cm，−0.1 cm，−0.05 cm，−0.01 cm に設定した mod-VG モデル（以降，mod-VG$_{-1.5}$ モデル，mod-VG$_{-1}$ モデル，mod-VG$_{-0.5}$ モデル，mod-VG$_{-0.1}$ モデル，mod-VG$_{-0.05}$ モデル, mod-VG$_{-0.01}$ モデル；mod-VG モデル群）によるシミュレーションも実施した．なお，これらの mod-VG モデルのパラメータ設定にあたっては，VG モデルと同一のパラメータを用い，(3) 式の h に各 h_e を代入した際の体積含水率 θ が θ_s と等しくなるように，θ_m を逆算して決定した．

計算結果として圧力水頭の鉛直プロファイルおよび特定深度における経時変化を出力し，モデルの違いやパラメータ設定が土壌水分移動の予測に与える影響を比較検討した．

2.3 大仙市の枠板式高畝栽培圃場における土壌水分量の測定と数値シミュレーション結果の検証

供試土のうち，VG モデルと mod-VG$_{-2}$ モデルの不飽和透水係数の差が大きく，pF 値の差が大きかった大仙市（3.1·3.2 節参照）について，大仙市の枠板式高畝栽培圃場で測定された土壌水分量のデータを用いて，どちらのモデルを使った方がより現実の土壌水分動態を再現できるかを検討した．

雨除けハウスを用いたアスパラガスの半促成栽培では，春芽の収穫後に立茎して光合成により根株を養生し，夏 · 秋は常に灌漑しながら若芽を継続的に収穫する．冬には黄化した茎葉を刈り取るが，その後は灌漑を実施しないため，土壌が乾燥する（岩田ら, 2023）．特に秋田のような寒冷な気候では，蒸発散量が少なく，灌漑終了後の高畝内の土壌水分移動は高畝の下端からの自由排水条件に近いと考えられる．そこで，大仙市の圃場において高さ 58 cm の高畝の上端から 10 cm 深に土壌水分計（Meter 社，Teros12）を設置し，灌漑終了後の土壌水分量をデータロガー（Meter 社，ZL6 Basic）に記録した．

Teros12 の出力は，圃場から持ち帰った撹乱土を用いて Iwata et al.（2017）の方法に準じてキャリブレーション式を得て補正した．実験データをフィッティングして

Table 2　各土壌の van Genuchten パラメータ.
Parameters of van Genuchten model for each soil sample.

	θ_r	θ_s	α [cm^{-1}]	n	K_s [cm d^{-1}]	l	土性 *	乾燥密度 [g cm^{-3}]
大仙市	0	0.7022	2.0654	1.092	5246	0.5	Heavy Clay	0.746
綾川町	0	0.5268	0.23447	1.138	598		Clay Loam	1.147
つくば市	0.2695	0.6975	0.18922	1.423	2498		Clay Loam	0.616
久留米市	0.01993	0.3386	0.12754	2.396	45217		Sand	1.229

*土性は国際法に基づく分類である.

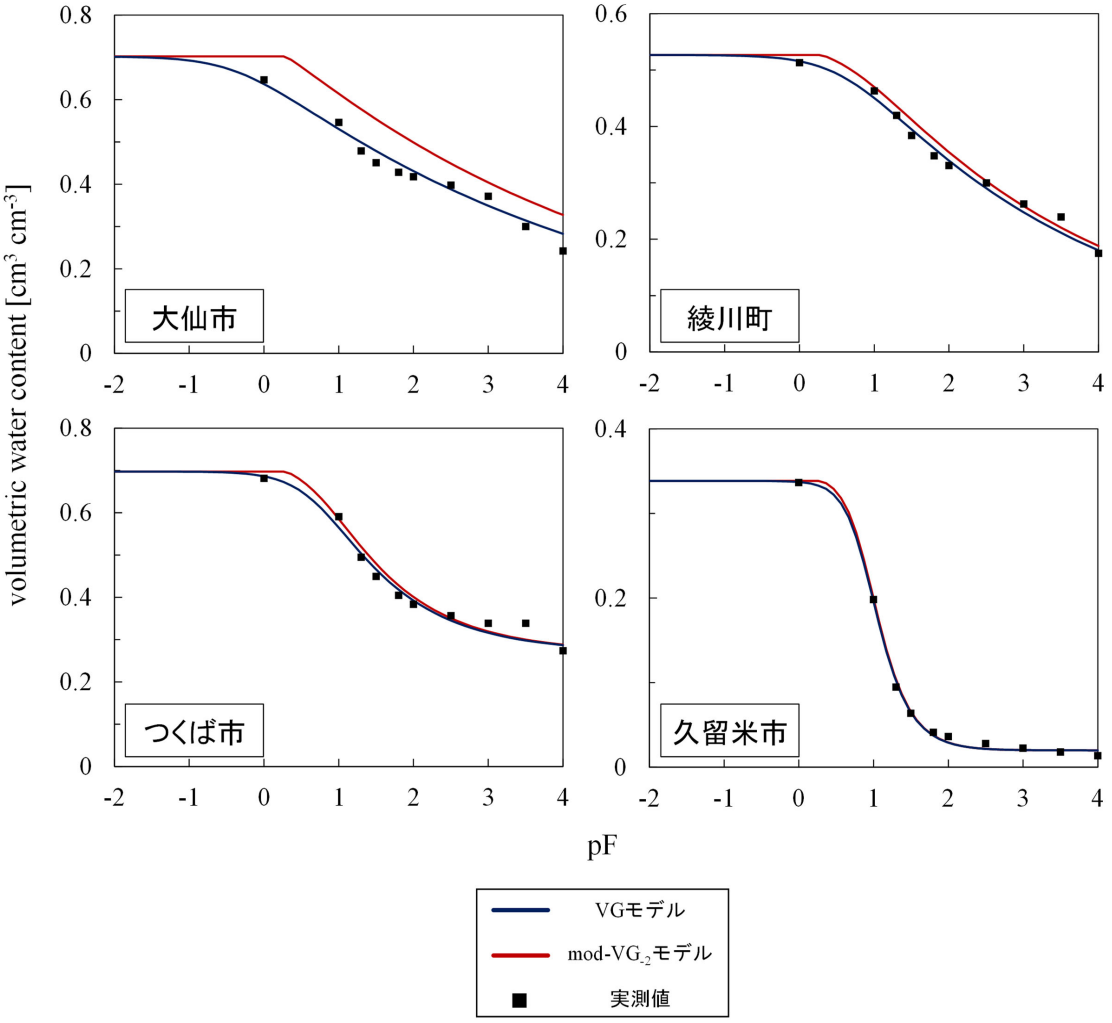


Fig. 1　各土壌の水分特性曲線.
Soil water retention curves of each soil sample.

得られた式（1）を h について解き，土壌水分量を pF 値に換算した．計算領域を高畝の高さである 58 cm とし，初期水分条件を全層で 10 cm 深の水分量の灌漑終了直後の pF 値と同じと仮定した．加えてその他の計算条件を 2.2 節と同じにして，HYDRUS による鉛直 1 次元の土壌水分移動の数値シミュレーションを実施した．

VG モデルと mod-VG モデル群で計算された 10 cm 深の pF 値の推移を実測値から計算した pF 値と比較し，計算結果の妥当性を検証した．加えて，VG モデルと mod-VG$_{-0.05}$ モデルのパラメータ l を −1.0，−0.5，0，0.5，1.0，2.0 に変化させたモデルも用いて，パラメータ l が実測値に及ぼす影響の感度解析を実施した．

3. 結果と考察

3.1　VG パラメータ，水分特性曲線，不飽和透水係数の推定結果の比較

各土壌サンプルの VG パラメータと飽和透水係数，土性と乾燥密度を，Table 2 に示す．大仙市，綾川町，つくば市のサンプルでは n が 1.1 ～ 1.4 と小さかったことに対し，久留米市の n は 2.4 と大きかった．

各土壌の VG パラメータから推定された水分特性曲線

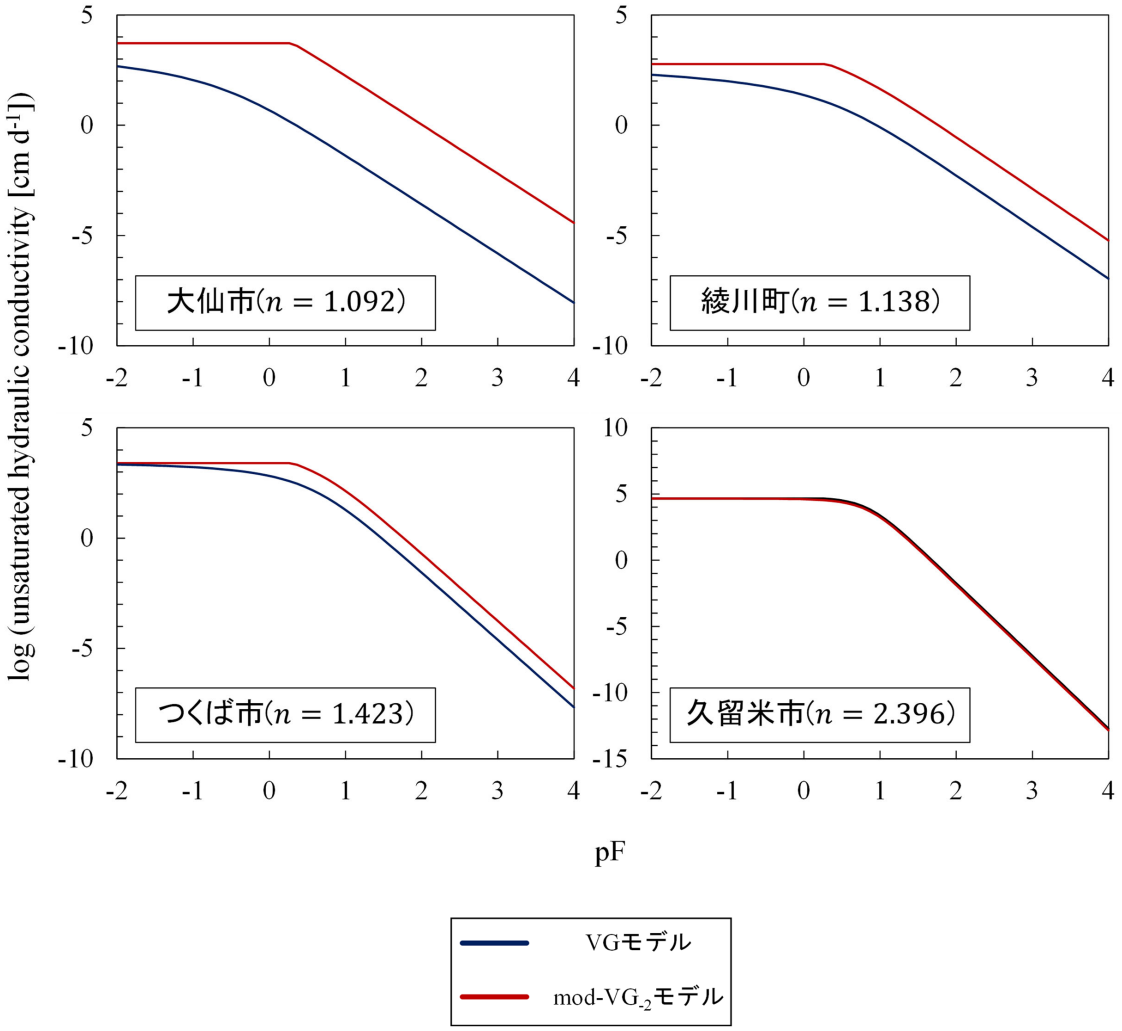


Fig. 2　各土壌の不飽和透水係数（全 pF 領域）.
Unsaturated hydraulic conductivity of each soil sample (of all pF range).

と，$h-\theta$ の実測値を Fig. 1 に示す．n の値が小さい大仙市や綾川町，つくば市のサンプルでは VG モデルと mod-VG$_{-2}$ モデルを用いた場合の体積含水率（θ）の差が大きく，特に大仙市の土壌では最大 0.1 cm^{3}cm^{-3} 程度の θ の差がみられた．これら 3 土壌では，mod-VG$_{-2}$ モデルの曲線は飽和付近（pF 0 ～ 1 程度）で実測値よりも特に高い水分量を維持しており，適合性が低かった．これは，これらの土壌の実質的な空気侵入圧 h_e が −2 cm よりも大きく（0 cm に近く），飽和直後から排水が始まっていることを示している．一方，n が大きい久留米市の土壌ではその差が極めて小さかった．

各土壌の VG パラメータから推定された不飽和透水係数を Fig. 2 に，飽和付近における不飽和透水係数を Fig. 3 に示す．久留米市以外の土壌では VG モデル，mod-VG$_{-2}$ モデル間で不飽和透水係数の差が大きく，水分特性曲線と同様に，n が小さい土壌ほど両者の差が大きかった．一方，久留米市の土壌では水分特性曲線と同様に，不飽和透水係数の差はほとんど見られなかった（Fig. 2）．VG モデルでは n の値が小さな土壌ほど飽和付近で圧力水頭の減少に伴う不飽和透水係数の減少が大きかった（Fig. 3）．VG モデルも mod-VG$_{-2}$ モデルも，モデルの構造として排水により水で満たされた間隙の量が減ることに応じて透水係数が減少する．そのため飽和付近で生じた不飽和透水係数の差が乾燥領域の不飽和透水係数にも影響を与えることから，mod-VG$_{-2}$ モデルの方が VG モデルよりも全水分領域で不飽和透水係数が大きくなったと考えられる．

さらに，mod-VG モデルにおける空気侵入圧 h_e の設定値が不飽和透水係数に与える影響を詳細に検討するため，大仙市の土壌について h_e が 0 cm（通常の VG モデルに相当）から −2 cm（mod-VG$_{-2}$ モデル）まで段階的に変化させるように θ_m を調整した場合の水分特性曲線（Fig. 4）と不飽和透水係数（Fig. 5）の推移を示す．h_e の絶対値が大きくなるにつれて，飽和直後の不飽和透水係数の急激な低下が抑制され，−2 cm 付近まで高い透水性が維持された．しかし，本研究で対象としたような粗大間隙が卓越する土壌では，飽和からわずかな負圧が生じた段階で粗大間隙からの排水が生じ，それに伴い不飽

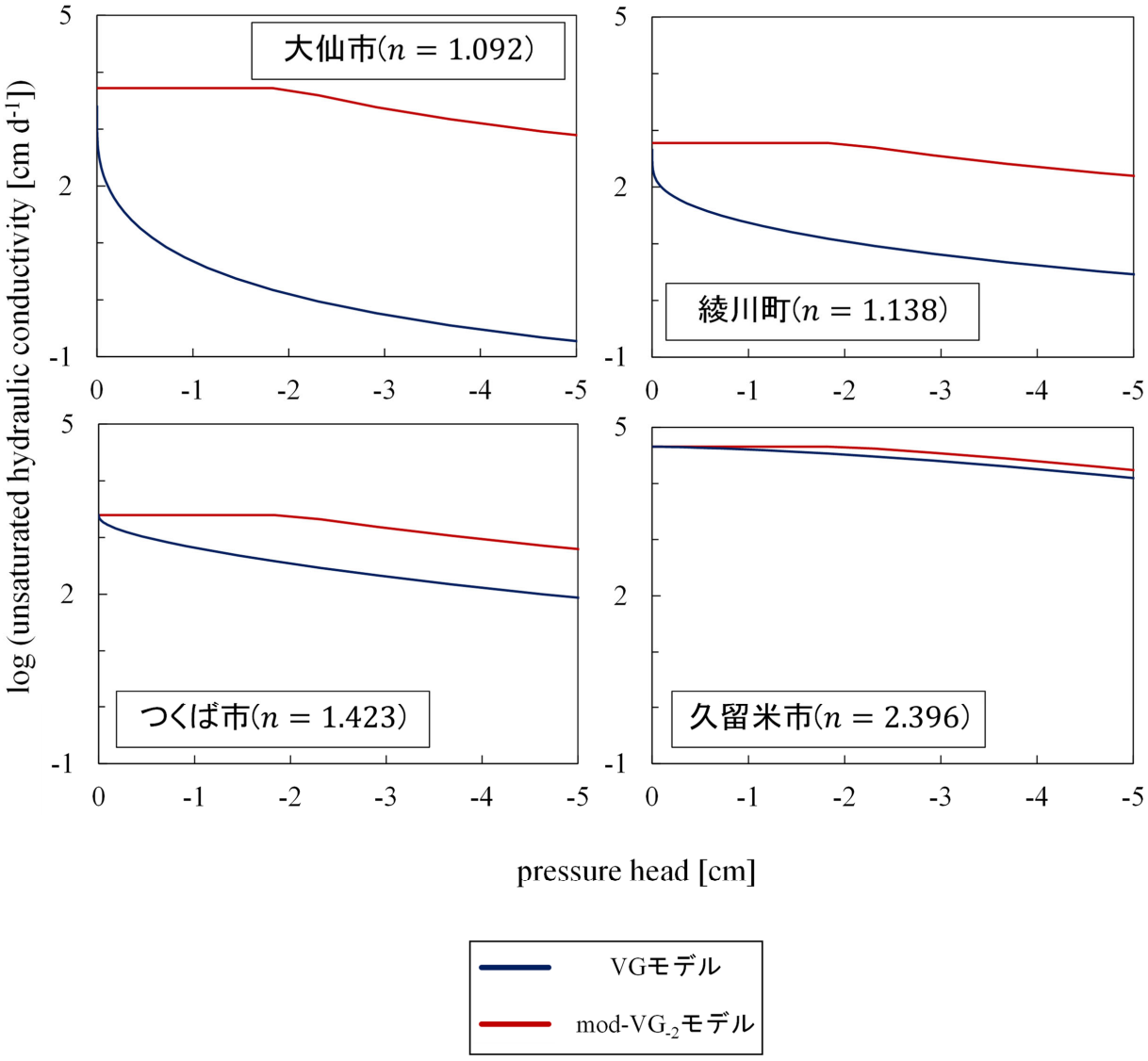


Fig. 3　各土壌の不飽和透水係数（飽和付近）.
Unsaturated hydraulic conductivity of each soil sample (in near-saturation range).

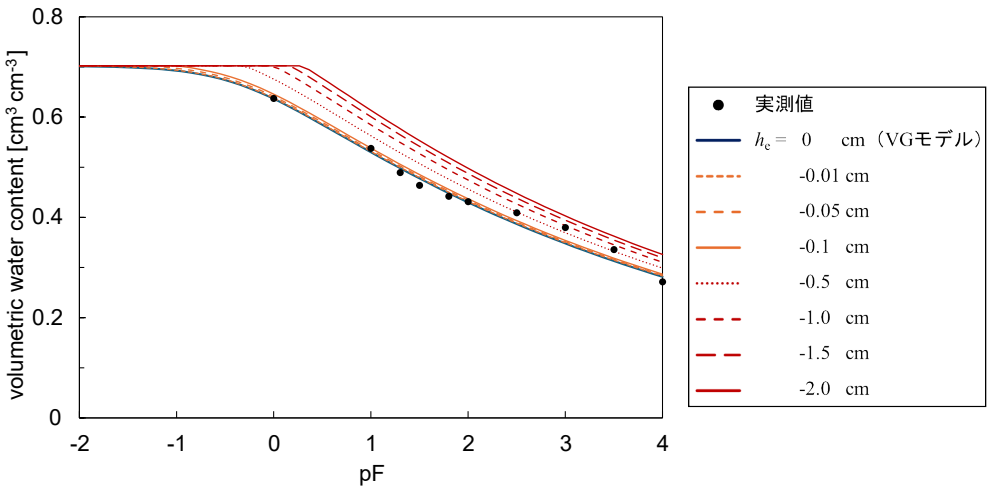


Fig. 4　大仙市の土壌における空気侵入圧の値ごとの水分特性曲線.
Soil water retention curves of the soil in Daisen City for some air-entry pressure values.

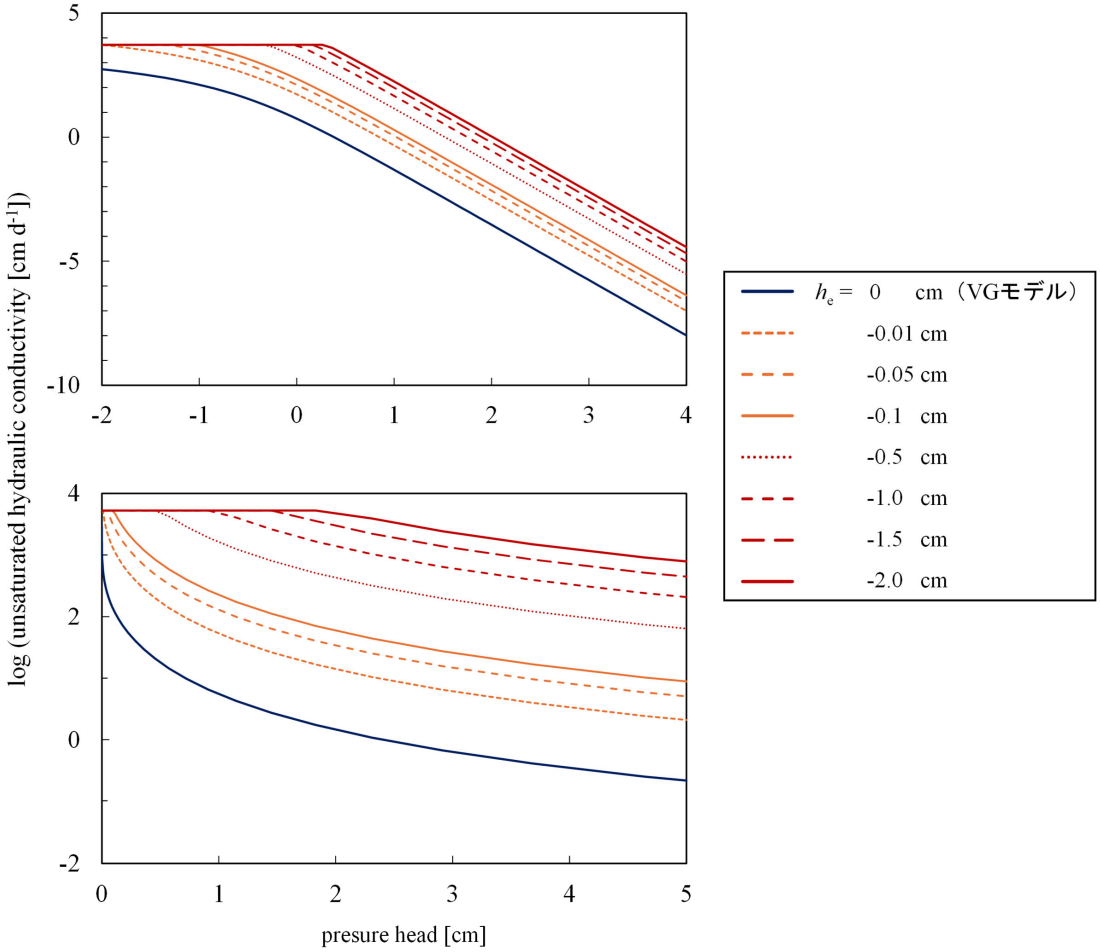


Fig. 5 大仙市の土壌における空気侵入圧の値ごとの不飽和透水係数.
Unsaturated hydraulic conductivities of the soil in Daisen City for some air-entry pressure values.

和透水係数は急激に低下する．したがって，$h_e = -2$ cm の設定は透水係数の低下を過度に補正しており，逆に h_e を限りなく 0 cm に近づける（通常の VG モデルを用いる）方が，粗大間隙の排水特性との整合性が高いことが示唆される．

3.2 数値シミュレーション結果の比較

各土壌パラメータセットにおける 5 日目，10 日目，15 日目，20 日目の圧力水頭の鉛直プロファイルの計算結果を Fig. 6 に示す．n が小さい大仙市，綾川町の土壌では，VG モデルと mod-VG$_{-2}$ モデルによる圧力水頭の計算結果に大きな差が生じており，特に大仙市の VG モデルによる計算結果では，どの期間でも圧力水頭に 7 ～ 10 倍の差が生じた．この結果は，高畝土壌や耕起した作土層のような，粗大間隙が多く含まれ飽和透水係数が大きい土壌においても，VG モデルと mod-VG$_{-2}$ モデルを用いた場合にはシミュレーションの計算結果が大きく異なる場合があることを示唆している．

一方 n が大きい久留米市の土壌ではその差が小さく，圧力水頭差が 1.1 倍以下とほぼ等しくなった．VG モデルと mod-VG$_{-2}$ モデルで推定された不飽和透水係数の差は n が小さいほど大きかった（Fig. 2）．これに対して，シミュレーションにより計算された圧力水頭の差が他の土壌と比べて小さかった久留米市では（Fig. 6），不飽和透水係数の差が小さい（Fig. 2）．これらのことから，VG モデルにおける飽和近傍での不飽和透水係数の非線形性により，VG モデルは mod-VG$_{-2}$ モデルよりも広範囲な pF 値において不飽和透水係数が小さくなり，自由排水条件において VG モデルより mod-VG$_{-2}$ モデルの方が排水が促進されて圧力水頭の計算結果が低く計算されたと考えられる．Sakai and Toride（2009）が指摘する粒径が小さく高い保水性を有する n が小さい土壌のみではなく，本論文で検討した透水係数が高く粗大間隙が多く含まれる土壌についても，n が小さな場合は VG モデルと mod-VG$_{-2}$ モデルで計算結果が異なることに注意する必要があることが示唆される．

3.3 大仙市の土壌における実測値とシミュレーション結果の比較

本論文で検討した 4 つの土壌のうち，最も n が小さく（Table 2）水分特性曲線と不飽和透水係数の差が大きかった（Fig. 2, Fig. 3）大仙市のアスパラガス枠板式高畝栽培圃場における，灌漑終了後の排水過程における数値シミュレーション結果と土壌水分量の実測値から計算

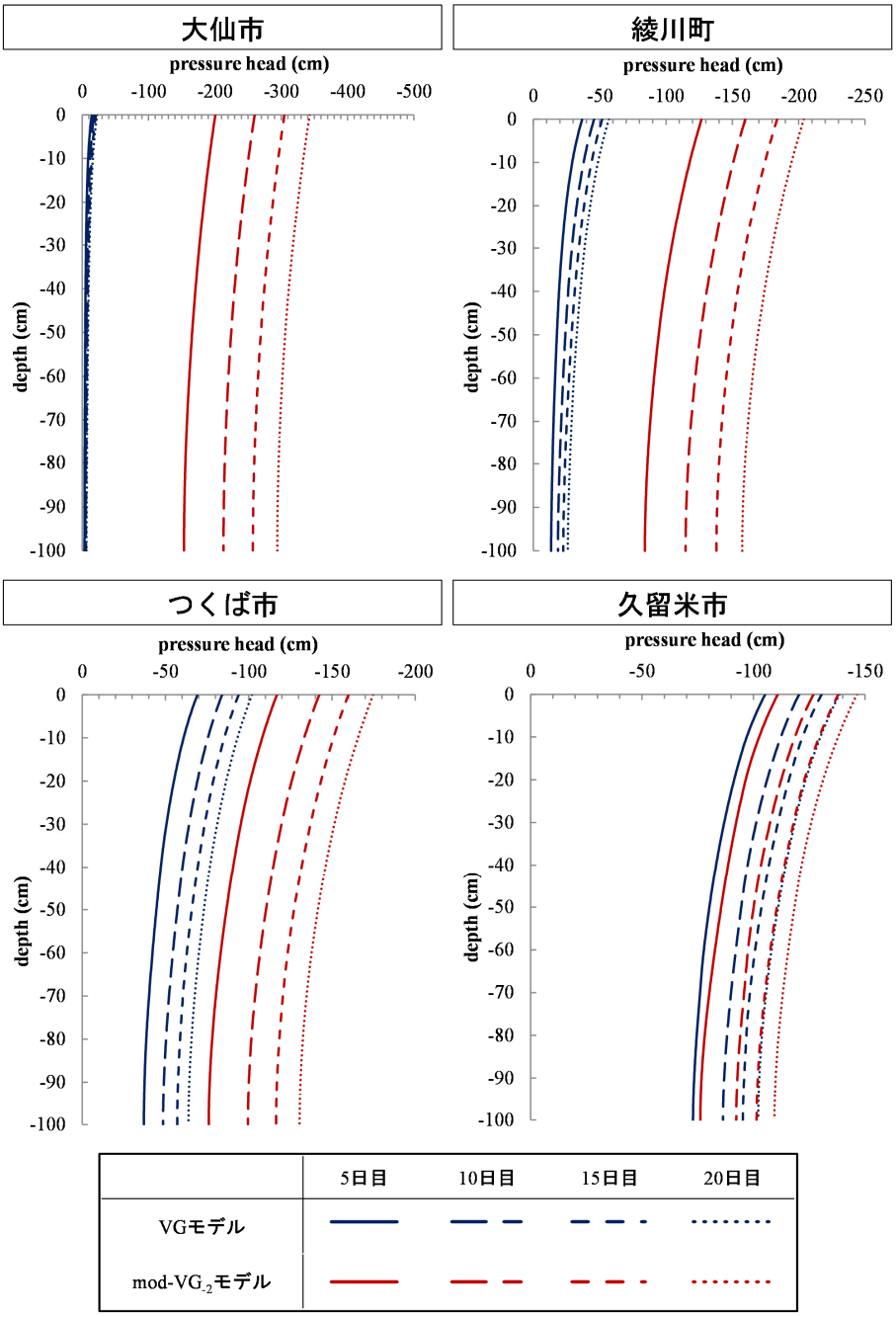


Fig. 6　各土壌における自由排水過程の圧力水頭鉛直プロファイルのモデル間の違い.
Differences between VG and modified VG model of vertical profiles of pressure head in free drainage processes in each soils.

した 10 cm 深の圧力水頭の経時変化を Fig. 7 に示す．実測値（黒実線）では，20 日目の圧力水頭は約 −80 cm までの低下にとどまったのに対し，mod-VG$_{-2}$ モデルでは圧力水頭の低下が著しく，20 日目には約 −400 cm に達し，実際よりもかなり値が小さかった．

ここで，空気侵入圧の設定がシミュレーション結果に与える影響を検証するために，h_e を段階的に 0 cm に近づけた mod-VG モデル群による計算結果も併せて同図に示す．h_e が大きくなり，0 cm に近づくにつれて，圧力水頭の計算結果は大きくなり，実測値に近づく傾向が認められた．特に $h_e = -0.05$ cm に設定したモデルについては，実測値の挙動をおおむね良好に再現した．通常の VG モデルによる計算結果は，わずかに排水を過小評価する傾向はあるものの，mod-VG$_{-2}$ モデルと比較すると実測値に近い結果を示した．

mod-VG モデルにおける h_e は，仮想的なパラメータ θ_m の設定によって決まる．すなわち，θ_m を θ_s に近づけるほど h_e は 0 に近づき，モデルの挙動は通常の VG モデルに収束する．Vogel and Cislerova（1988）は，粘土含量が多く n が小さな土壌では飽和付近でほとんど排水されないことから，空気侵入圧まで $\theta = \theta_s$ で一定とする mod-VG モデルが妥当であるとした．また，Oh et al.

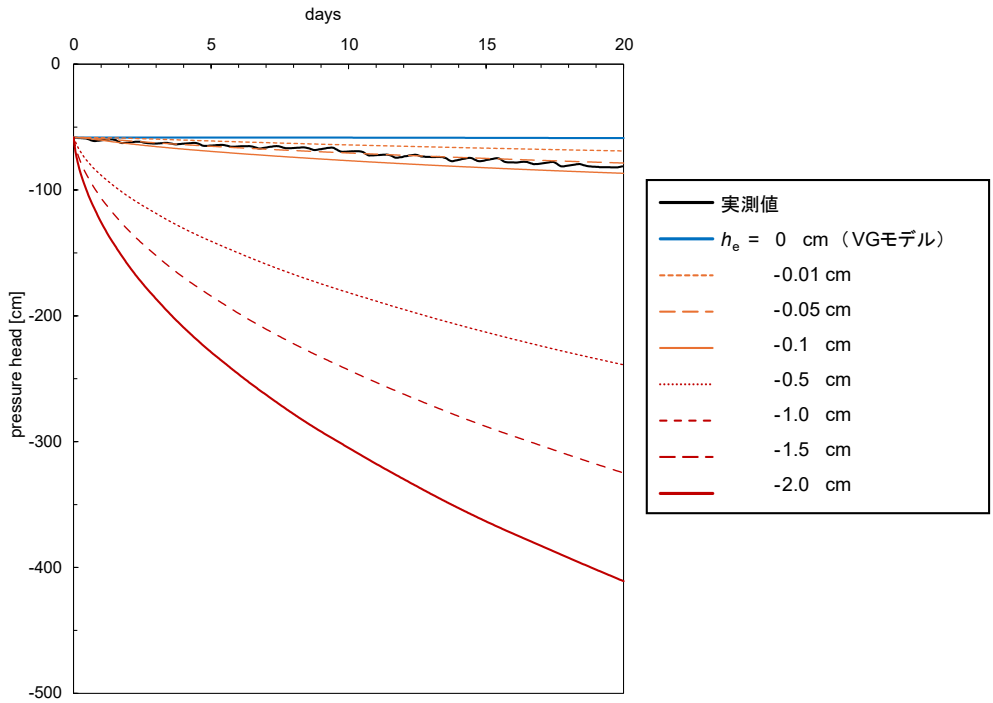


Fig. 7 大仙市圃場の高畝 10 cm 深における圧力水頭の経時変化と異なる空気侵入圧を設定した各モデルによるシミュレーション結果の比較.
Comparison of pressure head over time between observed values and simulation results from eight models with setting different air-entry pressures at 10 cm depth of the Field in Daisen City.

（2015）は飽和透水係数が低い土壌において，mod-VG モデルと同様のモデル構造を採用しつつ，空気侵入圧を土壌や解析目的に応じて定義すべきパラメータとして扱うことで，不飽和透水係数の推定精度を向上できることを示した．しかし，本研究で対象としたような粗大間隙が卓越する土壌においては，HYDRUS でデフォルト値として用いられている $h_e = -2$ cm では過大な水分保持を見積もる要因となり得る．実測値との比較（Fig. 7）から，このような土壌では h_e がより 0 に近い値をとることが妥当であると示唆される．高畝土壌や耕起した作土層のような土壌は粗大間隙を多く含み，飽和から圧力水頭がわずかに低下しただけで θ が急激に低下するため，本研究においては h_e を固定した mod-VG モデルよりも，通常の VG モデルによる計算結果の方が実態を適切に反映したと考えられる．

更に，大仙市土壌において VG モデルと，最も実測値との適合がよかった mod-VG$_{-0.05}$ モデルをベースに，パラメータ l の値を段階的に変更したモデル（不飽和透水係数曲線は Fig. 8）を用いた場合の，計算結果と実測値とを比較した（Fig. 9）．VG モデルでは，l の値を変更しても計算結果に大きな違いは認められず，実測値とは大きく異なった．同様に，mod-VG モデルで l を変化させても計算結果に大きな違いは認められず，h_e に比べパラメータの感度が低かった．また，標準的な値である $l = 0.5$ のときが結局は最も観測値を良好に再現した．Sakai and Toride（2009）は VG モデルにおいて l の値が不飽和透水係数曲線の形状に大きく影響するため，慎重な検討が必要であると指摘している．しかし本研究のような，飽和近くの透水係数が支配的な現象の解析においては，VG モデルにおける l の値の調整よりもむしろ mod-VG モデルにおいて h_e の値を慎重に調整して適用することで十分な予測精度が確保できることが確認された．

以上より，粗大間隙を含み n が小さい土壌の排水解析においては，h_e を適切に与えることで mod-VG により数値シミュレーションによる土壌水分移動の計算精度が向上することが示唆された．

4. おわりに

飽和透水係数が大きく，粗大間隙が多く含まれる土壌について，VG モデルの飽和付近における不飽和透水係数の急激な変化が土壌水分移動の数値シミュレーションに与える影響を評価した．異なる土壌物理性を持つ 4 種類の土壌を対象に，飽和に近い初期条件からの自由排水の数値シミュレーションを実施した．

VG パラメータの n が小さい土壌（，綾川町，つくば市）では，VG モデルと空気侵入圧 -2 cm を設定した mod-VG$_{-2}$ モデル間で不飽和透水係数に大きな差が見られた．

n が最も小さい大仙市におけるアスパラガスの枠板式高畝栽培圃場において測定された土壌水分量の実測値と数値シミュレーションによる計算結果を比較したところ，mod-VG モデルの空気侵入圧（h_e）が飽和に近いとき（$h_e = -0.5$ cm）に実測値に最も近い計算結果になった．このことから， 高畝土壌や作土層のような飽和透

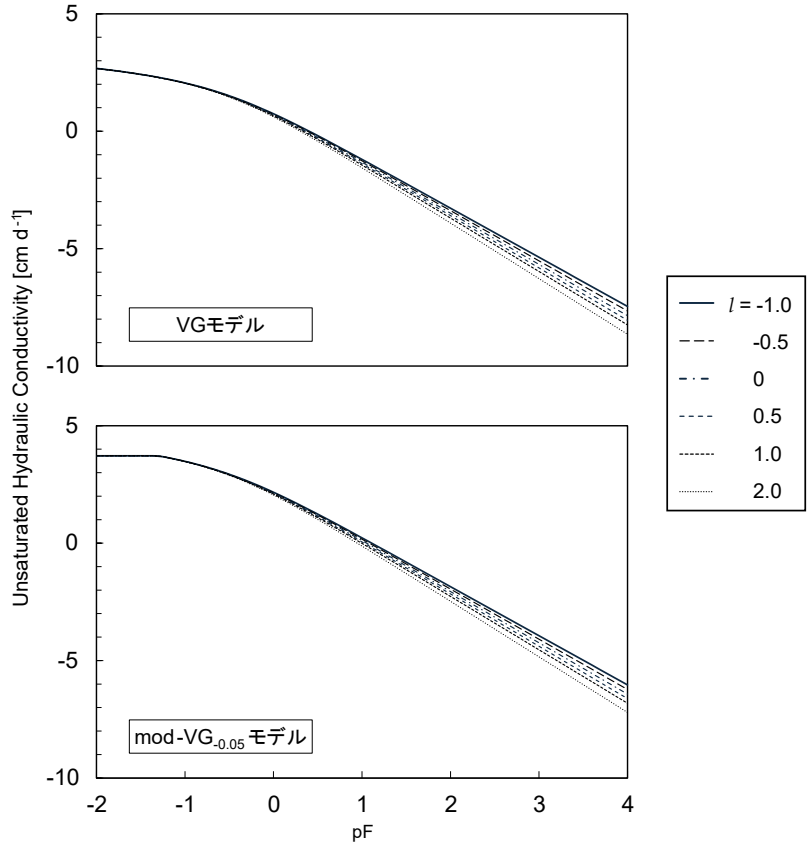


Fig. 8　大仙市の土壌におけるパラメータ l の値による不飽和透水係数.
Unsaturated hydraulic conductivities of models with setting different l values of the field in Daisen City.

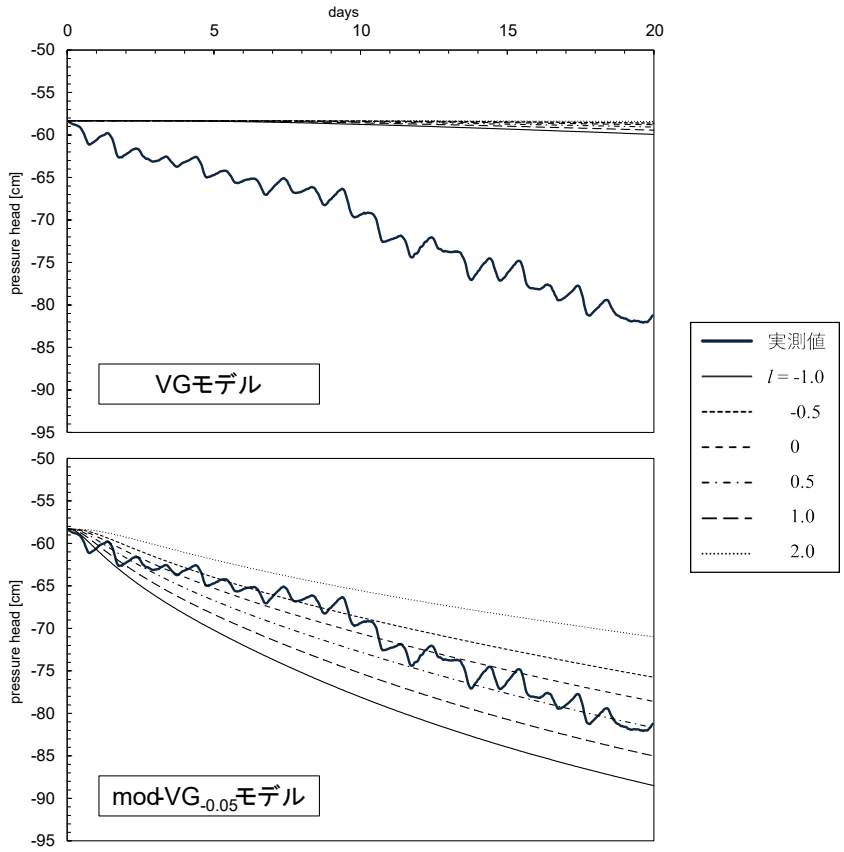


Fig. 9　大仙市の土壌におけるパラメータ l の値による不飽和透水係数および圧力水頭のシミュレーション結果.
Unsaturated hydraulic conductivities and simulation results at 10 cm depth from six models with setting different l values of the field in Daisen City.

水係数が大きく粗大間隙が多く含まれる土壌においては，飽和付近の計算安定性を目的として $h_e = -2$ cm の mod-VG モデルを採用することは推奨されないことが示唆された．そのような設定は保水性を過大評価し，結果として透水性や排水速度の予測に無視のできない誤差を生じさせる可能性がある．また，不飽和透水係数の形状パラメータである間隙結合係数 l について感度解析を行った結果，対象土壌（大仙市）においては VG モデルではほとんど影響が見られず，mod-VG モデルでは影響はあるものの，標準的な値（$l = 0.5$）が実測値を良好に再現した．

以上の結果から，本研究で対象としたような土壌の水分移動解析においては，l を変更するよりも，対象とする土壌の物理的特性（特に粗大間隙の有無）を考慮して mod-VG モデルの h_e を慎重に検討・決定することが，予測精度を確保する上で重要であると考えられる．

謝辞

本研究を実施するにあたり，大仙市のアスパラガス生産者の田口誠毅氏に土壌水分量の測定についてご協力いただいた．土壌水分の補正式の作成の実験において農研機構農村工学研究部門の川上春香氏と筑波大学の佐藤駿介氏にご協力いただいた．三重大学の取出伸夫教授，ならびに 2 名査読者の有益なコメントによりこの論文の質が向上した．本研究は生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」（JPJ007097），（社）畑地農業振興会自主事業，ならびに生研支援センター「スマート農業技術の開発・供給に関する事業」の支援を受けて実施した．ここに記して謝意を示す．

引用文献

Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1966a): Properties of porous media affecting fluid plow. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 92(2): 61–88, doi:10.1061/JRCEA4.0000425.

Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1966b): Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No. 3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

Carsel, R.F. and Parrish, R.S. (1988): Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resources research, 24: 755–769, doi:10.1029/WR024i005p00755.

Fayer, M.J. and Simmons, C.S. (1995): Modified soil water retention functions for all matric suctions. Water Resources Research, 31(5): 1233–1238, doi:10.1029/95WR00173.

Iwata, Y., Miyamoto, T., Kameyama, K. and Nishiya, M. (2017): Effect of sensor installation on the accurate measurement of soil water content. European Journal of Soil Science, 68(6): 817–828.

岩田幸良, 成岡道男, 宮本輝仁, 中村俊治, 松宮正和, 亀山幸司 (2016): 水フラックスの計算による有効土層深決定方法の検討. 農業農村工学会論文集, 84(2): I_175–I_183, doi:10.11408/jsidre.84.I_175.

岩田幸良, 柳井洋介, 山地優徳, 池内隆夫, 吉越 恆 (2023): 水田転換畑でアスパラガスを安定して栽培できる枠板式高畝栽培. 畑地農業, 770: 19–27.

Kato, C., Nishimura, T., Imoto, H. and Miyazaki, T. (2011): Predicting soil moisture and temperature of Andisols under a monsoon climate in Japan. Vadose Zone Journal, 10(2): 541–551, doi:10.2136/vzj2010.0054.

Kosugi, K. (1994): Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. Water Resources Research, 30(4): 891–901, doi:10.1029/93WR02931.

Kosugi, K. (1996): Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. Water Resources Research, 32(9): 2697–2703, doi:10.1029/96WR01776.

Nakamura, K., Ogushi, S., Ikeura, Y. and Tanaka, Y. (2016): A case study on estimating soil hydraulic parameters based on the soil water flow simulation using HYDRUS-1D for upland irrigation planning. J. Jpn. Soc. Soil Phys., 134: 25–40, doi:10.34467/jssoilphysics.134.0_25 (in Japanese with English abstract).

Oh, S., Kim, Y.K. and Kim, J.-W. (2015): A modified van Genuchten-Mualem model of hydraulic conductivity in Korean residual soils. Water, 7(10): Article 10, doi:10.3390/w7105487.

Rassam, D., Šimůnek, J. and van Genuchten, M.Th. (2004): HYDRUS-2D による土中の不飽和流れ計算 (取出伸夫・井上光弘 監訳). 農業土木学会土壌物理研究部会 HYDRUS グループ, 東京.

Sakai, M (2022): Water and heat transport in a root zone during evapotranspiration using the canopy energy budget model. J. Jpn. Soc. Soil Phys., 151: 35–47, doi:10.34467/jssoilphysics.151.0_35 (in Japanese with English abstract).

Sakai, M. and Toride, N. (2007): Soil water hydraulic functions for a sandy soil and an aggregated soil. J. Jpn. Soc. Soil Phys., 107: 63–77, doi:10.34467/jssoilphysics.107.0_63 (in Japanese with English abstract).

Sakai, M. and Toride, N. (2009): Hydraulic property models for water retention and unsaturated hydraulic conductivity. J. Jpn. Soc. Soil Phys., 111: 61–73, doi:10.34467/jssoilphysics.111.0_61 (in Japanese with English abstract).

Schaap, M.G. and Van Genuchten, M.Th. (2006): A modified Mualem – van Genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. Vadose Zone Journal, 5(1): 27–34, doi:10.2136/vzj2005.0005.

Seki, K., Iwata, Y., Yanai, Y. and Kameyama, K. (2023a): Im-

proved regression of the water retention curve for highly aggregated soils: Toward the automation of parameter determination for dual-van Genuchten models. J. Jpn. Soc. Soil Phys., 155: 34–44, doi:10.34467/jssoilphysics.155.0_35 (in Japanese with English abstract).

Seki, K., Toride, N. and van Genuchten, M.Th. (2023b) Evaluation of a general model for multimodal unsaturated soil hydraulic properties. J. Hydrol. Hydromech. 71(1): 22–34, doi:10.2478/johh-2022-0039.

Šimůnek, J., Šejna, M. and van Genuchten, M.Th. (2018): New features of the version 3 of the HYDRUS (2D/3D) computer software package, Journal of Hydrology and Hydromechanics, 66(2): 133–142, doi:10.1515/johh-2017-0050.

Vogel, T. and Cislerova, M. (1988): On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. Transport in Porous Media, 3(1): 1–15, doi:10.1007/BF00222683.

Vogel, T., van Genuchten, M.Th. and Cislerova, M. (2000): Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. Advances in Water Resources, 24(2): 133–144, doi:10.1016/S0309-1708(00)00037-3.

This article is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

How to cite this article: IKEZOE, Y., IWATA, Y., YANAI, Y., SEKI, K. and TANIGUCHI, T. (2026): Comparing results of numerical simulation for soil water movement with the Mualem-van Genuchten (VG) model and the modified VG model — focusing on the characteristics of soil with low VG parameters n and macropores. J. Jpn. Soc. Soil Phys., 163: 3–14, doi:10.34467/jssoilphysics.163.0_3. (in Japanese with English abstract)

要　　旨

土壌水分移動シミュレーションにおける van Genuchten（VG）モデルの飽和近傍での不飽和透水係数の変化の影響を評価した．4 種の土壌を用いた HYDRUS-1D による自由排水解析の結果，n が小さい土壌では，VG モデルが飽和付近で透水係数を著しく低下させるが，慣習的な空気侵入圧 −2 cm を設定した修正 VG モデルではその低下を抑制した．粗大間隙を含み n が小さく飽和透水係数が大きい土壌での実測値との比較では，慣習的な修正 VG モデルが透水係性を過大評価し，通常の VG モデルの方が実測値を良好に再現した．一方修正 VG モデルにおいても，空気侵入圧を 0 に近づけることで再現性が向上した．間隙結合係数の感度解析では予測値へ及ぼす影響は非常に小さかった．以上より，対象としたような土壌では VG モデルを間隙結合係数を検討しつつ使用するよりも，空気侵入圧を検討しつつ修正 VG モデルを用いるべきであると示唆された．

キーワード：HYDRUS，不飽和透水係数，数値計算，水分特性曲線，Mualem-van Genuchten モデル