

## 論文 (Original article)

## 九州・沖縄地域の森林土壌の保水特性 —堀田 (1997) の孔隙データの解析—

釣田 竜也<sup>1)\*</sup>、阪田 匡司<sup>2)</sup>、小林 政広<sup>1)</sup>

## 要旨

九州・沖縄地域に分布する主要な森林土壌の保水特性を明らかにするため、堀田 (1997) の学位論文の付表にある513の森林土壌の孔隙解析データにvan Genuchtenモデルをあてはめ、保水曲線の孔隙径分布の広さを表すパラメータ $m$ と孔隙径分布のピークの孔隙径を表すパラメータ $\psi_0$ 、さらにvan Genuchtenモデルから算出される重力水分量、易有効水分量の4つの保水特性値を抽出し、8つの土壌タイプに分けて保水特性値の違いを比較した。その結果、赤・黄色系褐色森林土タイプと赤・黄色土タイプは重力水分量も易有効水分量も少ないこと、黒色土タイプは易有効水分量は多いが重力水分量は少なく、また孔隙径分布が広く分散的であること、海岸砂丘砂を母材とする未熟土タイプは特に下層土の重力水分量が多く、他の土壌タイプより小さい孔隙径に分布のピークを持ち、そこに分布が比較的集中した孔隙特性を持つこと、褐色森林土では適潤性タイプの方が乾性タイプより易有効水分量が多く、孔隙径分布が広く分散的であること等の特徴が整理された。気候変動が山地の水流出や樹木成長等に及ぼす影響の予測精度を高めるには、地域ごとに特徴ある森林土壌の保水性データを関数化し、降雨流出モデルや樹木成長モデルに活用することが不可欠である。そのため今後も様々な地域・母材・土壌型の保水性データの収集・整備を進めていく必要がある。

キーワード：森林土壌、保水曲線、九州・沖縄地域、van Genuchtenモデルパラメータ、重力水分量、易有効水分量

## 1. はじめに

森林生態系において土壌層は、短期間に降った雨を一時的に保持しながら下方浸透させる過程で、植物の生育に必要な水分を確保するとともに、系外へ流出する水量を平準化させる極めて重要な働きを持つ。この働きを支配するのが土壌の厚さと土壌孔隙の組成である。土壌孔隙は、孔隙サイズに応じた吸水力(マトリックポテンシャル：通常負圧であり、-kPaの圧力単位で示される)で水を保持している。この原理を応用すると、水で飽和した土壌に少しずつ圧力を加えながら脱水させ、土壌の体積含水率の推移を観測することにより、特定の範囲の吸水力(土壌のマトリックポテンシャル)ごとの孔隙量を測定することができる。この結果を土壌のマトリックポテンシャルと体積含水率の関係としてプロットした土壌の保水曲線(水分特性曲線ともいう)は、土壌の透水性を表す不飽和透水係数とともに不飽和土壌中の水移動特性を与える重要な物性値である(坂井・取出 2009)。土壌の保水曲線は、土壌水のマトリックポテンシャルの測定範囲によって、砂柱法、加圧板法、吸引法、遠心法、サイクロメータ法などの異なる手法で測定されるが(土壌環境分析法編集委員会 1997)、いずれにしても土壌水のマトリックポテンシャルと体積含水率の関係が段階的に数点プロットされた離散的なデータである。この離散的な保水性データを適切な数式モデルに当てはめ、関数化する

ことにより、任意のマトリックポテンシャルに対する土壌の体積含水率の計算(またはその逆の計算)が可能になる。土壌の保水性の数式モデルは土壌保水性モデルと呼ばれ、これまでに様々な土壌保水性モデルが提案されている(代表的な土壌保水性モデルの特徴や適用条件については、坂井・取出(2009)に詳しい)。

離散的な保水性データを土壌保水性モデルへ変換することは、不飽和水移動を表現するリチャーズ式を数値解析して土壌中の水移動を予測する上でも不可欠であり、例えば水移動の数値解析ソフトであるHYDRUS 2D(Šimůnek et al. 2018)では、解析に先立ち土壌情報として土壌保水性モデルのパラメータを入力する必要がある。このような土壌中の水移動予測モデルは、対象範囲の土壌の保水性を適切にモデルに組み込むことで予測精度が高まる。

土壌の保水性を考慮した水移動予測モデルは、水そのものの動きの予測だけでなく、Biome-BGCモデル(University of Montana 2010)などの生物地球化学シミュレーションモデルの中の水文サブモデルとして生態系の物質動態の長期変動予測にも利用される。近年このようなシミュレーションモデルを使って、気候変動が植物の生育に及ぼす影響の評価が行われている(例えばEastaugh et al. 2011, Hlásny et al. 2014, Yoshida et al. 2015, Toriyama et al. 2021)。農林水産省は2015年に策定(2023年に改定)

原稿受付：2024年4月23日 原稿受理：2024年8月19日

1) 森林総合研究所 立地環境研究領域

2) 森林総合研究所 震災復興・放射性物質研究拠点

\* 森林総合研究所 立地環境研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1、E-mail: tatuya@ffpri.affrc.go.jp

した気候変動適応計画 (農林水産省 2023) において「将来の気候変動がスギやヒノキ等の主要造林樹種の成長に及ぼす影響の評価が必要」としており、生物地球化学シミュレーションモデルは評価手法の1つとして有効と考えられる。今後このようなモデルにより将来の気候変動がスギ等の生育適地に及ぼす影響の評価を行っていくためには、気象要素の将来シナリオの高空間解像度での整備に加えて、森林土壌の保水性についても高空間解像度での整備を全国的に進めていく必要がある。

日本の森林土壌の保水性情報については、真下 (1960) が報告した、東北南部、関東、東海の10ヶ所 (合計114断面) の褐色森林土と黒色土の土壌調査の結果が基盤情報として挙げられる。これには吸引法 (有光 1972) により6段階 (マトリックポテンシャル = -0.1, -1.0, -3.1, -4.9, -9.8, -31 kPa) で測定された保水性データが付表として数値で記載されていたため、土壌保水性モデルをあてはめて土壌構造と土壌保水性モデルのパラメータとの関係の解析や (Kosugi 1997)、水移動予測モデルに組み込んで土壌構造の違いが雨水の貯留・移動特性に及ぼす影響の評価 (小杉 1999a, b, 2005) に用いられるなど利用価値の高いデータとなった。一方、真下 (1960) 以降も、森林土壌の保水性は、流域試験地の土壌の保水容量の評価 (有光ら 1995, 荒木ら 1997, Ohnuki et al. 1997, 1999)、土壌中の水移動の解析 (梁ら 2006)、土壌の保水・透水性の空間分布の解析 (Hendrayanto et al. 1998, 1999, 大貫ら 2014, 2020)、土壌の構造発達解析 (Hayashi et al. 2006)、森林施業が土壌に与える影響評価 (荒木ら 2002, 2005, 篠宮ら 2012) など、様々な目的で測定・報告されてきた。しかし、これらの多くは保水曲線の図のみ示されていたり、保水性データから算出した保水容量 (土壌の孔隙量に土壌深をかけた値 (藤枝 2007) で、土壌の保水機能を定量化した指標の一つ) の結果のみ示されていたりして、保水性の数値データそのものが利用しやすいかたちで公表されていない。また過去には「民有林適地適木調査 (1954-1972 (当初予定))」 (概要については久保 (1969) を参照) や、農林省林業試験場 (現森林総合研究所) の「林地の生産力に関する研究 (1963-1967)」 (成果としては井上ら (1973) など) において全国的な土壌調査が行われたが、保水性の測定に関しては吸引板 (素焼き板) を用いた簡易手法 (真下1961, 有光 1970) であり、これでは保水性の実測値が2点 (マトリックポテンシャル = -0.1, -49.1 kPa) しかないため土壌保水性モデルの有効なあてはめが不可能である。今後、日本の森林土壌の保水性データの整備にあたっては、多段階で測定された公表済みの保水曲線の数値データを収集するとともに、図で公表されたものについても数値データを入手するなどして、真下 (1960) のデータに加えて拡充していく必要がある。とりわけ、真下 (1960) のデータセットには含まれない関西以西のデータの充実が求められる。

真下 (1960) を上回る断面数の森林土壌の保水性データを用いた研究として、堀田 (1997) の学位論文がある。

これは、九州・沖縄地域で採取した様々な土壌の保水性データと土壌断面の厚さ情報から保水容量を算出し、これを土壌群毎に整理して九州・沖縄地域の主要な土壌群の保水容量の違いを主に明らかにした論文であり、この解析に用いられた九州・沖縄地域の36地点 (合計142断面) の土壌の保水性データが付表データとして掲載されている。この付表データを見ると、真下 (1960) のデータには含まれない土壌型、すなわち赤・黄色土群や未熟土群等の断面のデータが比較的多く含まれている。また、真下 (1960) 以降の測定技術の進歩を反映した加圧板法 (森林立地調査法編集委員会 1999) により、真下 (1960) のデータのマトリックポテンシャルの測定範囲よりも低ポテンシャル側がより広い範囲まで、9段階 (マトリックポテンシャル = -0.1, -1.0, -2.5, -6.2, -16, -31, -62, -98, -155 kPa (一部例外あり)) で測定されており、有用性が高いデータセットと考えられる。しかしこの付表データには、飽水時 (マトリックポテンシャル = -0.1 kPa) から各ポテンシャル段階までの体積含水率の変化量 (孔隙量に相当) は示されているが、飽水時の体積含水率の記載がない (私信: 堀田氏に問い合わせたが不明とのこと)。そのため、マトリックポテンシャルに対する体積含水率の絶対値が定まらず、そのままでは土壌保水性モデルのあてはめを行うことができない。1つの解決策として、仮の飽水時体積含水率を1つ決めてやれば、そこを起点に仮の体積含水率とマトリックポテンシャルとの関係 ( $\theta$ - $\psi$ 関係) がプロットされる。これに土壌保水性モデルのあてはめを行えば、仮の $\theta$ - $\psi$ 関係からその土壌固有の保水性モデルパラメータを得ることができる。この時、仮の飽和体積含水率の設定が土壌保水性パラメータの推定値に与える影響が限定的であれば、上記の解析により、九州・沖縄地域の森林土壌の保水特性の解明、および土壌の保水性に関わるモデルパラメータの整備が進展する可能性が高い。

そこで本研究では、堀田 (1997) の付表データに仮の飽水時体積含水率を与えて作った保水曲線に、代表的な土壌保水性モデルの1つである van Genuchten (1980) のモデルのあてはめを行い、孔隙径分布の広さを表すパラメータ  $m$  と孔隙径分布のピークの孔隙径を表すパラメータ  $\psi_0$  を抽出する。また得られたモデル式から保水性に関わる水分量として重力水分量 (gravitational water content, 以下記号で  $GW$ ) と易有効水分量 (readily available water content, 以下記号で  $AWr$ ) を算出する。これら4つの保水特性値を褐色森林土、赤・黄色系褐色森林土、赤・黄色土、黒色土、未熟土等の土壌タイプに分けて比較検討することにより、九州・沖縄地域に分布する主要な森林土壌の保水特性の解明を試みる。

## 2. 材料と方法

### 2.1 解析対象データ

堀田 (1997) の学位論文の付表データを解析対象とした。これは九州本島一円および屋久島、奄美大島、沖縄

本島の36地点 (Fig. 1)、合計142断面から400 cm<sup>3</sup>の採土円筒で採取された不かく乱試料の孔隙解析結果のデータである。この142断面を林野土壌分類 (土じょう部 1976) の土壌群で区分すると多い順に、褐色森林土群55断面 (褐色森林土亜群49断面と、赤色系および黄色系褐色森林土亜群6断面)、黒色土群28断面、赤・黄色土群27断面、未熟土群17断面、ポドゾル群3断面、グライ群1断面、その他区分不能11断面 (深度2m以上の深層土採取用断面) となっている (Table 1)。各断面の鉱質土層の表層 (A, AB層)、下層 (B, BC, C層、埋没層)、また深層土採取用断面では深さ2m以上から試料を採取しており、孔隙解析結果のデータ数は全部で513である。各データに対し、飽水時 (円筒下端から1 cm付近に水位を維持した状態。マトリックポテンシャル = -0.1 kPaに相当) から各ポテンシャル段階 (原典の圧力単位であるpFを本稿では kPaに変換) までの体積含水率 (%) の変化量が「孔隙量」として記載されている (例えばFig. 2の小林軍谷P2のA層では、飽水時からマトリックポテンシャル = -1.0 kPa (pF1.0) までの体積含水率の変化量は6.7%、飽水時からマトリックポテンシャル = -2.5 kPa (pF1.4) までの体積含水率の変化量は15.5%など)。また「土壌型」「層位」「採取深さ」「層厚」等も併せて

記載されている (Fig. 2)。

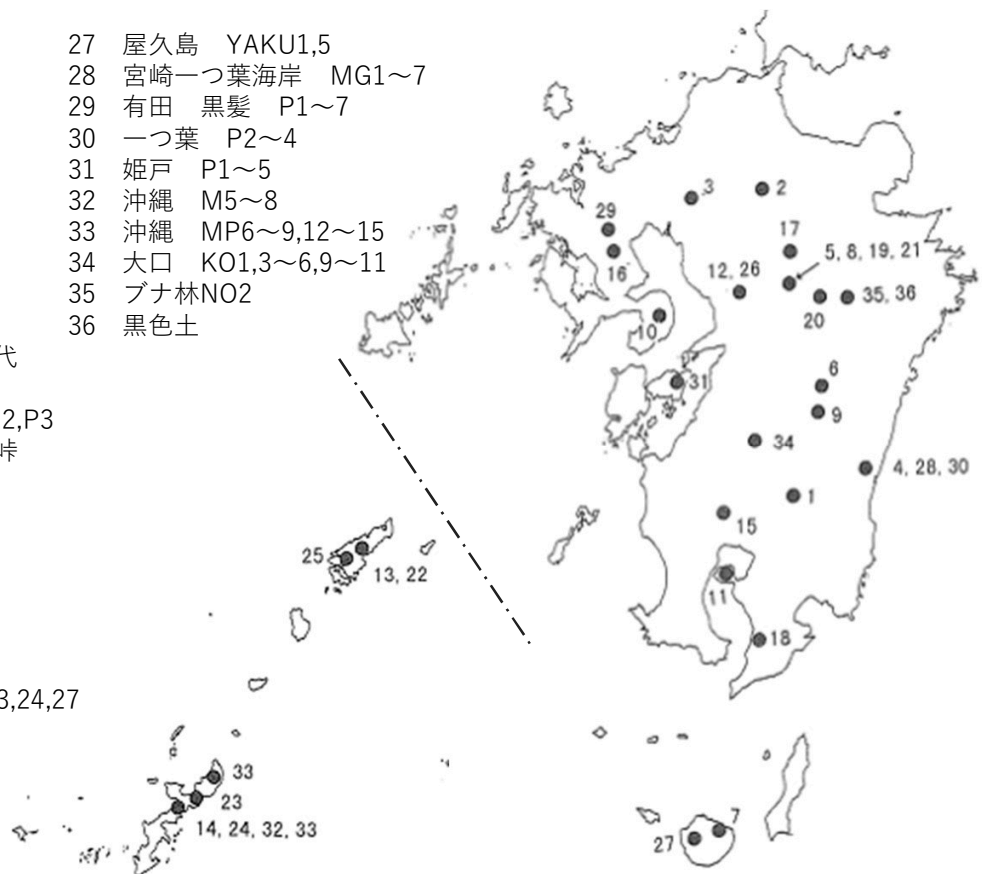
## 2.2 仮の保水曲線への土壌保水性モデルあてはめ方法

513の全データに対して、van Genuchten (1980) のモデル (以下、VGモデル) のあてはめを行った。VGモデルでは、土壌の保水曲線 ( $\theta$ - $\psi$ 関係) は次式で与えられる。

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

ここで、 $S_e$ は有効飽和度 (-)、 $\theta$ は体積含水率 (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)、 $\theta_r$ は残留体積含水率 (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)、 $\theta_s$ は飽和体積含水率 (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)、 $\psi$ は土壌のマトリックポテンシャル (cm: 水頭表示、圧力単位の kPaではないことに注意)、 $\alpha$  (cm<sup>-1</sup>)、 $n$  (-)、 $m$  ( $= 1 - 1/n$ ) は曲線の形状を決めるパラメータ ( $0 < \alpha < 1$ 、 $1 < n$ ) である。なお本研究では、飽和体積含水率 ( $\theta_s$ ) を  $\psi = 0$  kPaの時の $\theta$ と定義し、 $\psi = -0.1$  kPaの時の $\theta$ である飽水時体積含水率 ( $\theta_{max}$ ) と区別した。関数のあてはめでは、仮の $\theta_{max}$ を決めるとプロットされる9点の $\theta$ - $\psi$ 関係 (一部7、8点のものを含む) を対象として、各点の $\psi$ に対応する体積含水率 ( $\theta_{Obs}$ ) と、各点の $\psi$ に対して式1のVGモデルの変形式 ( $\theta = (1 + |\alpha\psi|^n)^{-m} (\theta_s - \theta_r) + \theta_r$ ) から計算され

- プロット名
- |                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| 1 小林軍谷 P1~3          | 27 屋久島 YAKU1,5     |
| 2 福岡大藪 P1~5          | 28 宮崎一つ葉海岸 MG1~7   |
| 3 福岡田代 P1~2          | 29 有田 黒髪 P1~7      |
| 4 一つ葉 P1~3           | 30 一つ葉 P2~4        |
| 5 菊池 T-2,7,10        | 31 姫戸 P1~5         |
| 6 住友 84P1~6          | 32 沖縄 M5~8         |
| 7 屋久島                | 33 沖縄 MP6~9,12~15  |
| 8 菊池 P1~5,7          | 34 大口 KO1,3~6,9~11 |
| 9 住友 85P1,3,5~7      | 35 ブナ林NO2          |
| 10 雲仙 B9,10,山畑,神代    | 36 黒色土             |
| 11 桜島 8m,P2~4        |                    |
| 12 立田山風化層 P2-1,2,P3  |                    |
| 13 奄美 56P1~6,朝戸峠     |                    |
| 14 沖縄 OM1,2          |                    |
| 15 川内 P1~7           |                    |
| 16 波佐見 P1,2          |                    |
| 17 南小国 P1,2          |                    |
| 18 大根占 P1,2          |                    |
| 19 菊池 I~V            |                    |
| 20 阿蘇 草原             |                    |
| 21 菊池肥培試験地 P23,24,27 |                    |
| 22 奄美 55P1~8         |                    |
| 23 沖縄高江              |                    |
| 24 沖縄明治山             |                    |
| 25 奄美湯湾岳             |                    |
| 26 立田山 P1~3          |                    |



プロット名の、例えばP1~3は、データを採取した土壌断面が3つあることを示す。

For example, P1-3 in the plot name indicates that there are three soil profiles from which data were collected.

Fig. 1. 堀田 (1997) から土壌試料採取地点の地図転載 (一部修正)  
Location of soil sampling plots (Excerpts from Hotta (1997))

**Table 1. 堀田 (1997) の付表データの内訳**  
**Classification of data in appendix tables in Hotta (1997)**

土壌群 (*1)	亜群 (*1)	断面数	土壌型・亜型	層位数 (表層 + 下層)	土壌のタイプ分け (*2)
B 褐色森林土 Brown forest soils	B 褐色森林土	13	B <sub>A</sub> , B <sub>B</sub> , B <sub>C</sub>	43 (16+27)	Bdry 褐色森林土乾性タイプ
	r B 赤色系褐色森林土	36	B <sub>D</sub> , B <sub>D</sub> (d)	121 (56+65)	Bwet 褐色森林土適潤性タイプ
	y B 黄色系褐色森林土	6		28 (8+20)	r B y B 赤・黄色系褐色森林土タイプ
Bl Black soils		28		134 (51+83)	Bl 黒色土タイプ
RY Red and Yellow soils		27		106 (44+62)	RY 赤・黄色土タイプ
Im Immature soils		17		51 (14+37)	Im 未熟土タイプ
P Podzolic soils		3		12 (4+8)	P ポドゾルタイプ
G Gley soils		1		4 (2+2)	G グライタイプ
その他 (深度 2m 以上の深層土採取用断面)		11		14	
Total		142		513 (195 + 304 + 14)	

\*1: 林野土壌の分類 (土じょう部 1976) による分類 Classification of forest soil in Japan (Forest Soil Division 1976).

\*2: 今回の解析での 8 つの土壌タイプ分け Classification of the 8 soil types in this analysis.

B<sub>A</sub>: 乾性褐色森林土 (細粒状構造型); B<sub>B</sub>: 乾性褐色森林土 (粒状・堅果状構造型); B<sub>C</sub>: 弱乾性褐色森林土; B<sub>D</sub>: 適潤性褐色森林土; B<sub>D</sub>(d): 適潤性褐色森林土 (偏乾亜型)

B<sub>A</sub>: Dry brown forest soil (loose granular structure type). B<sub>B</sub>: Dry brown forest soil (granular and nutty structure type). B<sub>C</sub>: Weakly dried brown forest soil; B<sub>D</sub>: Moderately moist brown forest soil. BD(d): Moderately moist brown forest soil (drier subtype)

表層データは A, AB 層から、下層データは B, BC, C 層および埋没層から、深層データは 2m 以上の深度から採取されたデータ。

Topsoil data: Data taken from A, AB layer. Subsoil data: Data taken from B, BC, C and buried layer. Deep soil data: Data taken from depths greater than 2m.

**褐色森林土**

サンプル名	土壌型	層位	採取 深さ cm	層厚 cm	孔隙量 (%)	積算 層厚 cm							
						(pF)	1.0	1.4	1.8	2.2	2.5	2.8	3.0
小林軍谷 P2	BA	A	2	5	6.7	15.5	28.6	35.0	38.2	41.4	44.2	47.6	5
		B	10	10	5.6	19.4	32.4	40.3	44.6	48.0	50.3	53.2	15
		BC	28	25	4.6	6.5	13.1	17.7	20.6	23.0	24.1	25.0	40
立田山 P1	BB	B1	6	12	3.8	15.1	17.7	23.8	27.1	29.7	31.2	33.0	12
		B2	25	28	4.3	22.7	26.3	31.3	33.6	35.6	36.8	38.3	40
		C	55	30	1.8	13.9	17.0	21.8	24.2	26.3	27.5	29.0	70

**Fig. 2. 堀田 (1997) の付表から一部転載**

**Excerpts from the appendix tables in Hotta (1997).**

Fig. 1 の「1 小林軍谷 P2」と「26 立田山 P1」に該当するデータを一部転載。

The data corresponding to “1 Kobayashi Ikusadani P2” and “26 Tatsuda-yama P1” in Fig. 1 are shown.

る体積含水率 ( $\theta_{VG}$ ) の差の二乗 ( $(\theta_{obs} - \theta_{VG})^2$ ) の総和が最小になるように式1の4つのパラメータ ( $\theta_r, \theta_s, \alpha, n$ ) を最適化した。最適化には、Microsoft Excel 2019のソルバー機能を用いた。なお計算に際しては、 $0 < \alpha < 1$ 、 $1 < n$ の制約条件に加え、「 $\theta_s$ は $\theta_{max}$ 以上 (かつ1以下)」、「 $\theta_r$ は加圧板試験終了時 ( $\psi = -155$  kPa (一部のデータは-98 kPa))の体積含水率以下 (かつ0以上)」の制約条件も加えた。4

つのパラメータの初期値については、 $\theta_r$ は加圧板試験終了時の体積含水率、 $\theta_s$ は飽水時体積含水率 ( $\theta_{max}$ ) に設定し、 $\alpha, n$ については便宜的にそれぞれ0.1、1.01に設定して最初の計算を行うとともに、初期値を変えた ( $\alpha$ や $n$ をより大きな値に設定するなど) 再計算を何度か行い、結果が変わらないことを確認して確定値とした。

## 2.3 仮の飽水時体積含水率の決定

Fig. 3aに $\theta_{max}$ を仮に0.9、0.8、0.6、0.5としたときに堀田(1997)の付表データの褐色森林土乾性タイプのデータの1つから作成される保水曲線と、それへのVGモデルのあてはめ結果の一例を示す。またこれを式(1)により $S_e$ とマトリックポテンシャルとの関係( $S_e$ - $\psi$ 関係)に変換したものをFig. 3bに示す。 $\theta_{max}$ が小さくなるにつれ $\theta$ - $\psi$ 関係は下方に平行移動していくが(Fig. 3a)、これらにVGモデルをあてはめて得られるパラメータ $\alpha$ 、 $n$ は $\theta_{max} = 0.5$ のときを除いて同じになった(Table 2)。また、 $\theta_{max}$ が異なれば $\theta_s$ 、 $\theta_r$ はそれぞれ異なるが、 $\theta_s - \theta_r$ は $\theta_r$ が0となった $\theta_{max} = 0.5$ のときを除いて同じとなり、また $\theta = \theta_{max}$ のときの $S_e$ も $\theta_{max} = 0.5$ のときを除いて同じになった(Table 2)。これらを $S_e$ - $\psi$ 関係で示すと $\theta_{max} = 0.9$ 、0.8、0.6のときの各点と各VGモデル曲線は一致していた(Fig. 3b、図では $\theta_{max} = 0.9$ 、0.8のデータ点とラインは $\theta_{max} = 0.6$ の下に重なっている)。このことは、あてはめの結果として $\theta_r$ が0より大きい条件では、仮の $\theta_{max}$ の値に依存せずにデータ固有のモデルパラメータ( $\alpha$ 、 $n$ など)が得られ、 $S_e$ - $\psi$ 関係で表すと同じになることを示している。なお $\theta_{max} = 0.5$ では、得られる $\alpha$ 、 $n$ などのパラメータが変化し、 $S_e$ - $\psi$ 関係も変化した。これは $\theta_{max}$ が小さくなりすぎると、それまでと同じモデル曲線の形状を維持するには $\theta_r$ が負の値をとる必要があるが、 $0 \leq \theta_r$ の制約条件があるので、それまでよりも縦につぶれた形状のモデル曲線になるためと考えられる。このことから、 $\theta_{max}$ を0.9、0.8などの大きな値としてVGモデルのあてはめを行うことで、より適切にデータ固有のモデルパラメータが得られると考えられる。真下(1960)の褐色森林土データ(79断面分)では、 $\theta_{max}$ は、最大値が0.76で多くは0.5~0.7の間であり、 $\theta_{max} = 0.9$ よりは $\theta_{max} = 0.8$ を与える方が妥当と考えた。

次に別の事例として、堀田(1997)の付表データの黒色土データの1つに対し $\theta_{max}$ を0.9、0.8、0.6、0.5としたときに作成される仮の保水曲線とそれへのVGモデルのあてはめ結果(Fig. 4a)と、式(1)により $S_e$ - $\psi$ 関係として示した結果(Fig. 4b)を示す。この事例では $\theta_{max}$ が小さくなるにつれ $\theta$ - $\psi$ 関係が下方に平行移動していくとともに(Fig. 4a)、VGモデルをあてはめて得られる $\alpha$ 、 $n$ などのパラメータは順次変化し(Table 3)、 $S_e$ - $\psi$ 関係も順次変化した(Fig. 4b)。これは $\theta_{max} = 0.9$ という十分大きな場合でもVGモデルのあてはめで得られる $\theta_r$ が0なので(Table 3)、 $\theta_{max}$ が0.9より小さくなるほどモデル曲線がそれまでより縦につぶれた形状になり、対応して $\alpha$ 、 $n$ などが変化するためと考えられる。この場合、仮の $\theta_{max}$ の値に依存して $\alpha$ 、 $n$ などが変化するため、仮の $\theta_{max}$ からデータ固有のモデルパラメータを得ることができない。このような事例は、加圧板法の脱水試験後半(保水曲線で $-150 \leq \psi \leq -60$  kPaの領域)の $\theta$ の変化が大きい傾向を持つ黒色土のデータで比較的多く認められた。真下(1960)の黒色土データ(34断面分)では、 $\theta_{max}$ は、最大値が0.83で多くは0.7~0.8の間であった。し

たがってVGモデルのあてはめで $\theta_r = 0$ となる事例については、 $\theta_{max} = 0.7 \sim 0.8$ を与えることにより、厳密には固有のモデルパラメータではないがそれに近い値が得られるものと考えた。以上の検討をふまえ、本研究では堀田(1997)の全データに対して $\theta_{max} = 0.8$ を与えることとした。

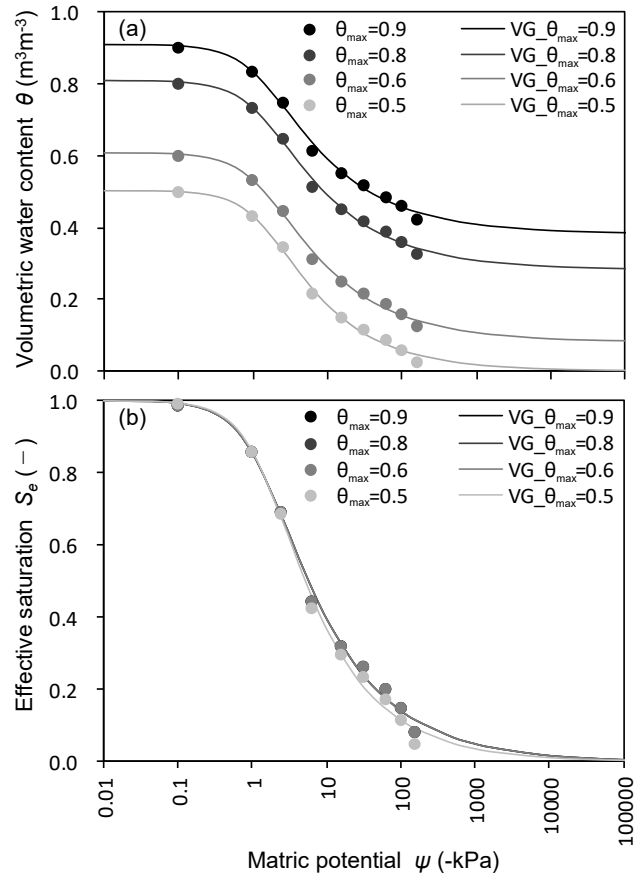


Fig. 3. 仮の保水曲線へのVGモデルのあてはめ結果(事例1)

VG-model fitting to temporary water retention curve (Case 1).

(a)  $\theta$ - $\psi$  relationships, (b)  $S_e$ - $\psi$  relationships.

事例1: 褐色森林土乾性タイプのデータへのあてはめ結果

$\theta_{max}$ は $\psi = -0.1$  kPaの時の $\theta$ (飽水時体積含水率)で、例えば $\theta_{max} = 0.9$ のプロットは、 $\psi = -0.1$  kPaの時の $\theta$ を仮に0.9とした場合に決定される土壌の保水性を表す。

Case 1: Fitting to one of the Brown forest soil dry type data.

$\theta_{max}$  is  $\theta$  at  $\psi = -0.1$  kPa (volumetric water content at saturation). For example, a plot with  $\theta_{max} = 0.9$  represents the soil water retention curve determined if  $\theta$  were hypothetically 0.9 at  $\psi = -0.1$  kPa.

Fig. 3bでは、 $\theta_{max} = 0.9$ 、0.8のデータ点とラインが $\theta_{max} = 0.6$ の下に重なっている。

In Fig. 3b, the data points and lines with  $\theta_{max} = 0.9$  and 0.8 overlap below those with  $\theta_{max} = 0.6$ .

Table 2. 事例 1 (Fig. 3) のあてはめで得られた VG モデルのパラメータ  
VG-model parameters obtained by fitting case 1 (Fig. 3)

$\theta_{max}$ 飽水時含水率	$\theta_s$ ( $m^3m^{-3}$ )	$\theta_r$ ( $m^3m^{-3}$ )	$\theta_s - \theta_r$ ( $m^3m^{-3}$ )	$S_e(\theta=\theta_{max})$ (-)	$\alpha$ ( $cm^{-1}$ )	$n$ (-)	$m$ (-)	$\psi_0$ (cm)
0.9	0.906	0.380	0.526	0.988	0.075	1.452	0.311	-5.99
0.8	0.806	0.280	0.526	0.988	0.075	1.452	0.311	-5.99
0.6	0.606	0.080	0.526	0.988	0.075	1.452	0.311	-5.99
0.5	0.504	0.000	0.504	0.992	0.069	1.511	0.338	-7.12

$\psi_0$  の値は、VG モデルのパラメータの  $\alpha$  と  $m$  を  $\psi_0 = -m^{1-m}/\alpha$  (小杉 2007) に代入して算出した。  
The value of  $\psi_0$  was calculated by substituting the VG model parameters  $\alpha$  and  $m$  into  $\psi_0 = -m^{1-m}/\alpha$  (Kosugi 2007).

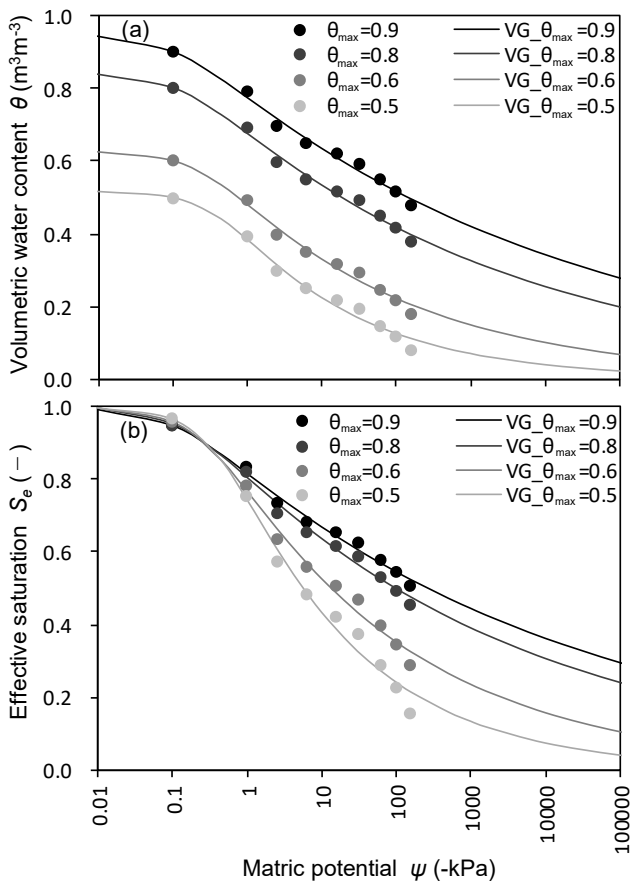


Fig. 4. 仮の保水曲線への VG モデルのあてはめ結果 (事例 2)

VG-model fitting to temporary water retention curve (Case 2).

(a)  $\theta-\psi$  relationships, (b)  $S_e-\psi$  relationships.

事例 2: 黒色土タイプのデータへのあてはめ結果  
 $\theta_{max}$  は  $\psi = -0.1$  kPa の時の  $\theta$  (飽水時体積含水率) で、例えば  $\theta_{max} = 0.9$  のプロットは、 $\psi = -0.1$  kPa の時の  $\theta$  を仮に 0.9 とした場合に決定される土壌の保水性を表す。

Case 2: Fitting to one of the Black soil type data.

$\theta_{max}$  is  $\theta$  at  $\psi = -0.1$  kPa (volumetric water content at saturation). For example, a plot with  $\theta_{max} = 0.9$  represents the soil water retention curve determined if  $\theta$  were hypothetically 0.9 at  $\psi = -0.1$  kPa.

2.4 土壌の保水特性値の抽出

本研究では、小杉 (2007) の VG モデルのパラメータに対する検討を参考に、土壌の保水性に関わるパラメータとして  $m$  と  $\psi_0$  を抽出した。 $m$  は  $m = 1 - 1/n$  によって  $n$  と関係付けられる数値で、 $1 < n < \infty$  ( $n$  の制約条件) を代入すると  $0 < m < 1$  となり、取り得る範囲が  $0 \sim 1$  になるように規格化されていて保水曲線の特徴づける指標として  $n$  より適している (小杉 2007)。 $m$  が  $0$  に近いほど孔隙径分布が分散型で保水曲線の傾き ( $\psi$  の変化に対する  $\theta$  の変化) が緩やかになり、 $m$  が  $1$  に近いほど孔隙径分布が集中型で保水曲線の傾きが急になる。Fig. 3a と Fig. 4a の VG モデル曲線 ( $\theta_{max} = 0.8$  のとき) の比較でも、 $m$  がより  $0$  に近い Fig. 4a のモデル曲線 ( $m = 0.096$ ) の方が Fig. 3a のモデル曲線 ( $m = 0.311$ ) よりも曲線の傾きが全体的に緩やかであることが分かる。 $\psi_0$  は VG モデルの S 字型の保水曲線の変曲点に対応するマトリックポテンシャルの値であり、 $\psi_0 = -m^{1-m}/\alpha$  によって算出される (小杉 2007)。 $\psi = \psi_0$  で保水曲線の傾き ( $d\theta/d\psi$ ) は最大 (孔隙径分布のピーク) となり、 $\psi_0$  が大きいほど大きい孔隙径に分布のピークを持ち、 $\psi_0$  が小さいほど小さい孔隙径に分布のピークを持つ保水曲線であることを示している。Fig. 3a と Fig. 4a の VG モデル曲線 ( $\theta_{max} = 0.8$  のとき) の比較では、 $\psi_0$  がより大きい Fig. 4a のモデル曲線 ( $\psi_0 = -0.17$ ) の方がより小さい Fig. 3a のモデル曲線 ( $\psi_0 = -5.99$ ) よりも大きい孔隙径に分布のピークを持つ。

また土壌の保水性に関わる水分量として、あてはめで得られた VG モデル曲線式から重力水分量と易有効水分量を算出した。重力水分量 ( $GW$ ) は保水曲線の最大容水量 (土壌が完全に飽水した時の  $\theta$ ) と圃場容水量 ( $\psi = -3 \sim -10$  kPa のときの  $\theta$ ) との差である (波多野 1997)。本研究では最大容水量を  $\theta_{max}$ 、圃場容水量を有光ら (1995) と同じ  $\psi = -4.9$  kPa のときの  $\theta$  として  $GW$  を算出した。 $GW$  は降雨停止後に重力により速やかに排出されやすい孔隙中の水分量で、植物の水利用の点からは有効とは言えない水分量である。易有効水分量 ( $AWr$ ) は、圃場容水量と植物がしおれて枯死する水分量である永久しおれ点 ( $\psi = -1500$  kPa のときの  $\theta$ ) との差で算出される有効水分量の中の、圃場容水量と成長阻害水分点 ( $\psi = -98$  kPa のときの  $\theta$ ) との差で算出される部分の土壌水分量である (土壌物理学会 2002, 宮崎ら 2005)。有効水分量は植物が有効に利用できる土壌

Table 3. 事例2 (Fig. 4) のあてはめで得られた VG モデルのパラメータ  
VG-model parameters obtained by fitting case 2 (Fig. 4)

$\theta_{max}$ 飽水時含水率	$\theta_s$ ( $m^3m^{-3}$ )	$\theta_r$ ( $m^3m^{-3}$ )	$\theta_s - \theta_r$ ( $m^3m^{-3}$ )	$S_e (\theta = \theta_{max})$ (-)	$\alpha$ ( $cm^{-1}$ )	$n$ (-)	$m$ (-)	$\psi_0$ (cm)
0.9	0.948	0.000	0.948	0.949	0.870	1.089	0.082	-0.12
0.8	0.842	0.000	0.842	0.951	0.698	1.107	0.096	-0.17
0.6	0.627	0.000	0.627	0.958	0.388	1.175	0.149	-0.51
0.5	0.517	0.000	0.517	0.967	0.255	1.256	0.204	-1.11

$\psi_0$  の値は、VG モデルのパラメータの  $\alpha$  と  $m$  を  $\psi_0 = -m^{1-m} / \alpha$  (小杉 2007) に代入して算出した。  
The value of  $\psi_0$  was calculated by substituting the VG model parameters  $\alpha$  and  $m$  into  $\psi_0 = -m^{1-m} / \alpha$  (Kosugi 2007).

水分量と定義されるのに対し、 $AWr$  はその中でも作物に容易に利用され正常生育を保証する土壌水分量と定義され、日本の畑地用水計画の指標としても用いられている (土壌物理学会 2002)。本研究では樹木の生育基盤としての森林土壌を対象とするが、 $AWr$  の算出では、作物と同じ成長阻害水分点 ( $\psi = -98$  kPa のときの  $\theta$ ) を用いた。以上の4つの保水特性値 ( $m$ 、 $\psi_0$ 、 $GW$ 、 $AWr$ ) を堀田 (1997) の付表の全513データから抽出した。

## 2.5 土壌タイプ間での保水特性値の違いに関する解析

4つの保水特性値 ( $m$ 、 $\psi_0$ 、 $GW$ 、 $AWr$ ) のそれぞれを、表層土データ (A, AB層)、下層土データ (B, BC, C層、埋没層)、深層土データ (採取深度2m以上) の3つに分け、土層間で相対度数分布を検討した。なお  $\psi_0$  については絶対値を自然対数変換した値 ( $\ln|\psi_0|$ ) にすると正規分布に近くなったので  $\ln|\psi_0|$  を用いて検討した。表層土と下層土のデータについては、土壌群を基本とするがデータ数の多い褐色森林土群を褐色森林土乾性タイプ、褐色森林土適潤性タイプ、赤・黄色系褐色森林土タイプの3つに細分した8つの土壌タイプに分けた (Table 1)。なお、赤・黄色系褐色森林土は東海、近畿、中国、四国、九州地方の低海拔高の山地地域に主に分布する土壌であるが (河田 1993)、保水性に関する既往の報告例が少ないこともあり、今回独立した1タイプとした。これら8つの土壌タイプについて、各保水特性値の相対度数分布を検討するとともに平均値の差の有無の検定を行い、土壌タイプ間の保水特性の違いを検討した。

検定に際しては、各土壌タイプのデータが等分散で正規分布に従うとは言えなかったため、正規分布や等分散性を前提としないノンパラメトリック多重比較検定である Steel-Dwass 法を用いた (Microsoft<sup>®</sup> Excel<sup>®</sup> 2019 アドインソフト Statcel4 (柳井 2015) を使用)。

## 2.6 解析データの詳細情報

解析対象とした堀田 (1997) の付表の513の孔隙解析データについて、各マトリックポテンシャル段階での有効飽和度 ( $S_e$ - $\psi$ 関係) として整理したものを補足電子資料 Table S1 にまとめた。Table S1 には、飽水時含水率を全データ0.8として作成した仮の  $\theta$ - $\psi$  関係に VG モデルをあて

はめて得られたモデルパラメータ ( $\theta_s$ 、 $\theta_r$ 、 $\alpha$ 、 $n$ 、 $m$  ( $= 1 - 1/n$ )) の値も記載した (このパラメータを式 (1) の変形式 ( $\theta = (1 + |\alpha\psi|^n)^{-m} (\theta_s - \theta_r) + \theta_r$ ) に代入すれば、VG モデルのあてはめを行った飽水時含水率が0.8の仮の  $\theta$ - $\psi$  関係に変換される)。また、堀田 (1997) に記載されている513データの土壌型 (林野土壌の分類 (土じょう部 (1976) に従う)、採取した層位、採取深度、層厚等の土壌情報とデータ採取プロットの標高、傾斜、地形、表層地質、林相情報等の立地情報を補足電子資料 Table S2 にまとめた。

## 3. 結果

### 3.1 $m$ の相対度数分布

各土層の  $m$  の相対度数分布を見ると、最頻値の階級は表層土より下層土で1階級小さくなったが、深層土は表層土と同じ階級 (0.1~0.2) であり、 $m$  の相対度数分布に深さ方向への顕著な変化は認められなかった (Fig. 5a, 5b, 5c)。

表層土の各土壌タイプの相対度数分布を見ると、褐色森林土群の中では、最頻値の階級は、褐色森林土乾性タイプ > 褐色森林土適潤性タイプ > 赤・黄色系褐色森林土タイプの順に小さくなった (Fig. 5d)。また全体の中では赤・黄色土タイプで最頻値の階級が小さく、褐色森林土乾性タイプとポゾドルタイプで最頻値の階級が大きかった。また未熟土タイプは  $m$  が小さい階級と大きい階級に複数のピークを持って分布していた。

下層土の各土壌タイプの相対度数分布を見ると、褐色森林土群の中では、褐色森林土乾性タイプ > 褐色森林土適潤性タイプ  $\approx$  赤・黄色系褐色森林土タイプの順に最頻値の階級が小さくなった (Fig. 5e)。また全体の中では、黒色土タイプや赤・黄色土タイプや赤・黄色系褐色森林土タイプで最頻値の階級が小さく、未熟土タイプで最頻値の階級が大きかった。また未熟土タイプは  $m$  が小さい階級と大きい階級に複数のピークを持って分布していた。

### 3.2 各土壌タイプの $m$ の平均値

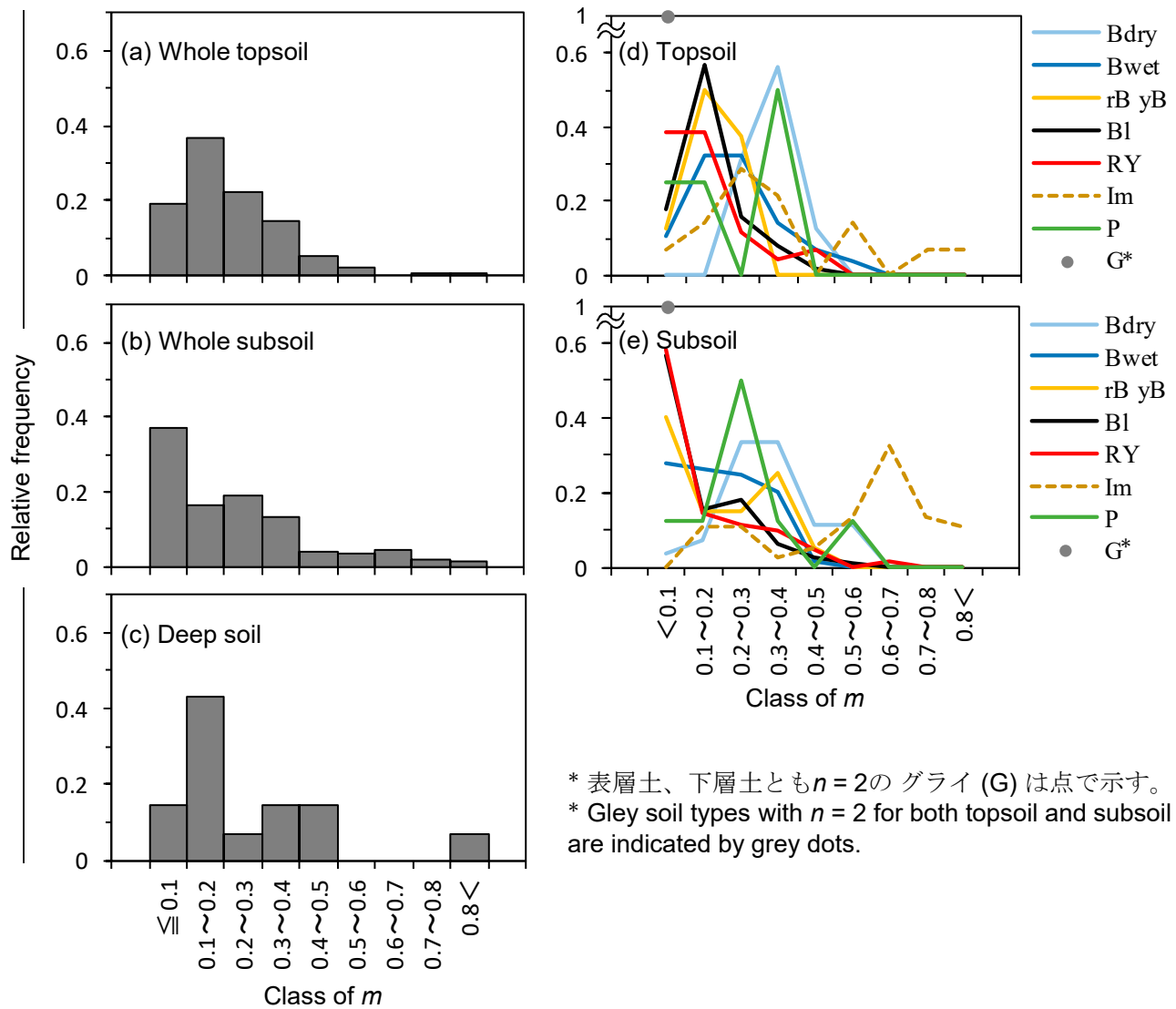
表層土の  $m$  の平均値は、褐色森林土群の中では、褐色森林土乾性タイプ > 褐色森林土適潤性タイプ > 赤・黄色系褐色森林土タイプの順に小さく、褐色森林土乾性タイプは褐色森林土適潤性タイプと赤・黄色系褐色森林土タイプ

プより有意に大きかった (Fig. 6a)。また全体の中では未熟土タイプで最も大きく、赤・黄色土タイプで最も小さかった ( $n = 2$ のグライタイプを除く)。未熟土タイプと褐色森林土乾性タイプは赤・黄色土タイプと黒色土タイプより有意に大きかった (Fig. 6a)。

下層土の  $m$  の平均値は、褐色森林土群の中では、褐色森林土乾性タイプ > 褐色森林土適潤性タイプ > 赤・黄色系褐色森林土タイプの順に小さく、表層土と同様に褐色森林土乾性タイプは褐色森林土適潤性タイプと赤・黄色系褐色森林土タイプより有意に大きかった (Fig. 6b)。また全体の中では表層土と同様に未熟土タイプで最も大き

く、赤・黄色土タイプで最も小さかった。未熟土タイプは2番目に大きい褐色森林土乾性タイプより有意に大きかった (Fig. 6b)。

このように、未熟土タイプは表層土・下層土とも全体の中で  $m$  が最も大きく、孔隙径分布が特定の孔隙径に集中する特徴を示した。一方、赤・黄色土タイプは表層土・下層土とも全体の中で  $m$  が最も小さく、孔隙径分布が広く分散的な特徴を示した。また褐色森林土では、表層土・下層土とも適潤性タイプの方が乾性タイプより  $m$  が小さく、孔隙径分布が広く分散的な特徴を示した。



\* 表層土、下層土とも  $n = 2$  のグライ (G) は点で示す。  
 \* Gley soil types with  $n = 2$  for both topsoil and subsoil are indicated by grey dots.

Fig. 5. 各保水特性値  $m$  の相対度数分布

**Relative frequency distribution of the value  $m$ .**

左側：表層土全体 (a)、下層土全体 (b) および深層土 (c) の相対度数分布を示す。

右側：表層土の土壌タイプ毎 (d)、下層土の土壌タイプ毎 (e) の相対度数分布を示す。

Left side: Relative frequency distribution in Whole topsoil (a), Whole subsoil (b) and Deep soil (c).

Right side: Relative frequency distribution for each soil type in Topsoil (d) and Subsoil (e).

Bdry は褐色森林土乾性タイプ、Bwet は褐色森林土適潤性タイプ、rB yB は赤・黄色系褐色森林土タイプ、Bl は黒色土タイプ、RY は赤・黄色土タイプ、Im は未熟土タイプ、P はポドゾルタイプ、G はグライタイプを表す。

Bdry : Brown forest soil dry type. Bwet : Brown forest soil moist type. rB yB : Reddish and Yellowish Brownforest soil type. Bl : Black soil type. RY : Red and Yellow soil type. Im : Immature soil type. P : Podzolic type. G : Gley type.

### 3.3 $\ln|\psi_0|$ の相対度数分布

各土層の $\ln|\psi_0|$ の相対度数分布を見ると、表層土と下層土の間に明瞭な違いが見られなかったが (Fig. 7a, 7b)、深層土は $\ln|\psi_0|$ の最頻値の階級が表層土や下層土より大きく、 $\ln|\psi_0|$ が大きい方向に全体的にシフトしていた (Fig. 7c)。 $\psi_0$ は負の値なので $\ln|\psi_0|$ が大きいことは $\psi_0$ が小さいことを意味しており、深層土の保水曲線は表層土や下層土に比べて小さい孔隙径に分布のピークを持つ傾向があることを示した。

表層土の各土壌タイプの相対度数分布を見ると、褐色森林土群の中の3タイプの最頻値の階級に違いはなかった (Fig. 7d)。また全体の中では赤・黄色土タイプで最頻値の階級が小さく、未熟土タイプで最頻値の階級が大きかった。下層土の各土壌タイプの相対度数分布は、表層土とほぼ同様の結果を示した (Fig. 7e)。

### 3.4 各土壌タイプの $\ln|\psi_0|$ の平均値

表層土の $\ln|\psi_0|$ の平均値は、褐色森林土群の中では、褐色森林土乾性タイプ>褐色森林土適潤性タイプ>赤・黄色系褐色森林土タイプの順に小さくなったが、この3タイプ間に有意差は認められなかった (Fig. 8a)。また全体の中では未熟土タイプで最も大きく、赤・黄色土タイプで最も小さかった ( $n=2$ のグライタイプを除く)。未熟土タイプは褐色森林土乾性タイプと褐色森林土適潤性タイプより有意に大きかった (Fig. 8a)。また褐色森林土乾性タイプと黒色土タイプは赤・黄色土タイプより有意に大きかった。

下層土の $\ln|\psi_0|$ の平均値は、褐色森林土群の中では表層土と同様に、褐色森林土乾性タイプ>褐色森林土適潤性タイプ

イプ>赤・黄色系褐色森林土タイプの順に小さく、褐色森林土乾性タイプは褐色森林土適潤性タイプより有意に大きかった (Fig. 8b)。また全体の中では表層土と同様に未熟土タイプで最も大きく、赤・黄色土タイプで最も小さかった。未熟土タイプはポゾドル以外の全ての土壌タイプより有意に大きく (Fig. 8b)、赤・黄色土タイプはポゾドルと赤・黄色系褐色森林土以外の全ての土壌タイプより有意に小さかった ( $n=2$ のグライタイプを除く)。

このように、未熟土タイプは、表層土・下層土とも全体の中で $\ln|\psi_0|$ が最も大きく、他の土壌タイプより比較的小さい孔隙径に分布のピークを持つ特徴を示した。一方、赤・黄色土タイプは表層土・下層土とも全体の中で $\ln|\psi_0|$ が最も小さく、他の土壌タイプより比較的大きい孔隙径に分布のピークを持つ特徴を示した。

### 3.5 重力水分量 (GW) の相対度数分布

各土層のGWの相対度数分布を見ると、最頻値の階級は表層土 (0.13~0.17) が最も大きく、下層土 (0.05~0.09)、深層土 (0.05以下) と深くなるにつれて少なくなるとともに、そのばらつきも小さくなる傾向を示した (Fig. 9a, 9b, 9c)。

表層土の各土壌タイプの相対度数分布を見ると、褐色森林土群の中では、褐色森林土適潤性タイプ>褐色森林土乾性タイプ>赤・黄色系褐色森林土タイプの順に最頻値の階級が小さくなった (Fig. 9d)。また全体の中では黒色土タイプで最頻値の階級が小さく、ポゾドルタイプで最頻値の階級が大きかった。未熟土タイプはGWが小さい階級と大きい階級に複数のピークを持って分布していた。

下層土の各土壌タイプの相対度数分布を見ると、褐色

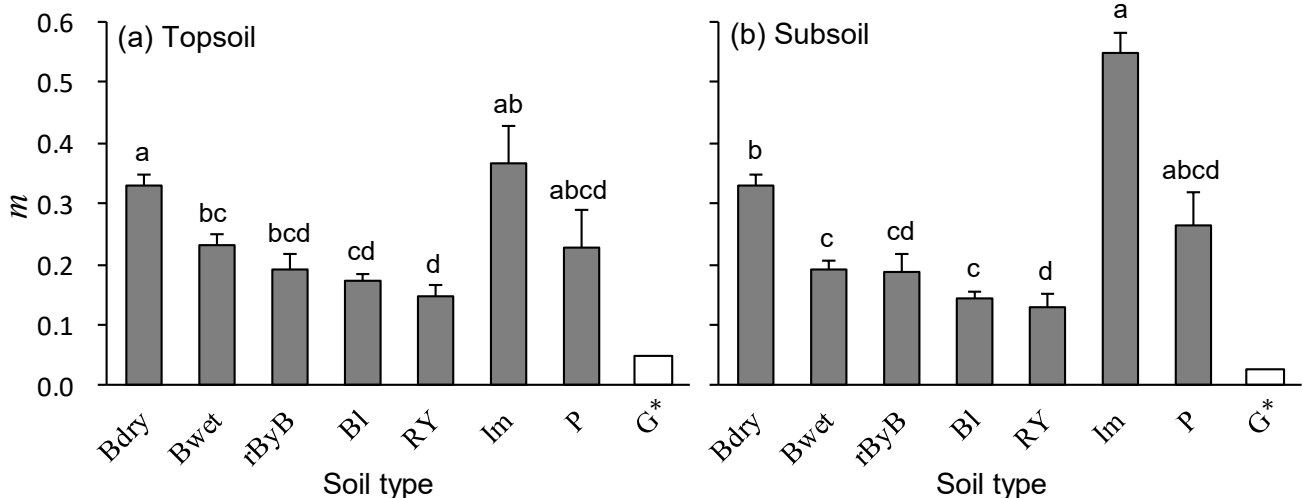


Fig. 6. 表層土 (a) と下層土 (b) の土壌タイプ毎の  $m$  の平均値 (+ 標準誤差)

Mean (+ standard error) of  $m$  for each soil type in Topsoil (a) and Subsoil (b).

異なる記号の土壌タイプ間には有意差があることを示す (Steel-Dwass test;  $P < 0.05$ )

Different letters indicate significant difference in each soil type (Steel-Dwass test;  $P < 0.05$ ).

土壌タイプの略号は Fig. 5 の脚注を参照。

See footnote to Fig. 5 for soil type abbreviations.

\* 表層土、下層土とも  $n=2$  のグライ (G) は平均値のみ示す。

\* Gley soil types with  $n=2$  for both topsoil and subsoil show mean values only.

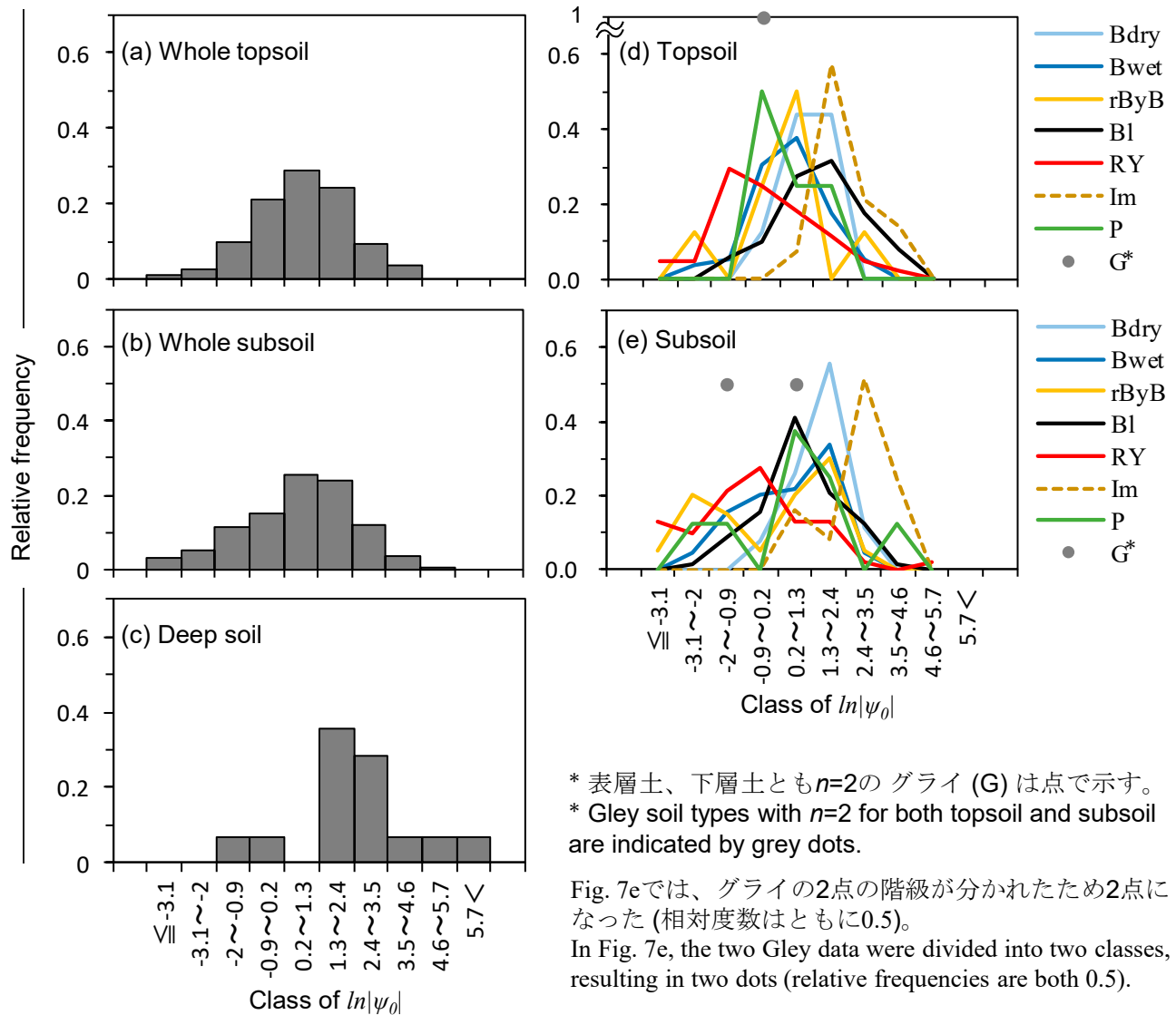
森林土群の中の3タイプの最頻値の階級に違いはなかった (Fig. 9e)。また全体の中では赤・黄色土タイプで最頻値の階級が小さく、未熟土タイプで最頻値の階級が大きかった。

3.6 各土壌タイプの重力水分量 (GW) の平均値

表層土のGWの平均値は、褐色森林土群の中では、褐色森林土乾性タイプ>褐色森林土適潤性タイプ>赤・黄色系褐色森林土タイプの順に小さく、赤・黄色系褐色森林土タイプは褐色森林土の乾性タイプと適潤性タイプより有意に小さかった (Fig. 10a)。また全体の中ではポドゾルタイプの平均値が最も大きく、赤・黄色系褐色森林土タイプが最も小さかった ( $n = 2$  のグライタイプを除く)。赤・

黄色土タイプと黒色土タイプも褐色森林土の乾性タイプと適潤性タイプより有意に小さかった。

下層土のGWの平均値は、褐色森林土群の中では、表層土と同様に褐色森林土乾性タイプ>褐色森林土適潤性タイプ>赤・黄色系褐色森林土タイプの順に小さく、赤・黄色系褐色森林土タイプは褐色森林土の乾性タイプと適潤性タイプより有意に小さかった (Fig. 10b)。また全体の中では未熟土タイプで最も大きく、赤・黄色土タイプで最も小さかった。未熟土タイプはポドゾル以外の全ての土壌タイプより有意に大きかった (Fig. 10b)。また赤・黄色土タイプは赤・黄色系褐色森林土以外の全ての土壌タイプより有意に小さかった。



\* 表層土、下層土とも  $n=2$  のグライ (G) は点で示す。  
 \* Gley soil types with  $n=2$  for both topsoil and subsoil are indicated by grey dots.

Fig. 7eでは、グライの2点の階級が分かれたため2点になった (相対度数はともに0.5)。  
 In Fig. 7e, the two Gley data were divided into two classes, resulting in two dots (relative frequencies are both 0.5).

Fig. 7. 保水特性値  $\ln|\psi_0|$  の相対度数分布

Relative frequency distribution of the value  $\ln|\psi_0|$ .

左側：表層土全体 (a)、下層土全体 (b) および深層土 (c) の相対度数分布を示す。

右側：表層土の土壌タイプ毎 (d)、下層土の土壌タイプ毎 (e) の相対度数分布を示す。

Left side: Relative frequency distribution in Whole topsoil (a), Whole subsoil (b) and Deep soil (c).

Right side: Relative frequency distribution for each soil type in Topsoil (d) and Subsoil (e).

凡例の略号は Fig. 5 の脚注を参照。

See footnote to Fig. 5 for abbreviations in the legend.

このように、赤・黄色土タイプと赤・黄色系褐色森林土タイプは、表層土・下層土とも全体の中でGWが少ない特徴を示した。またこれらに次いで、黒色土タイプもGWが少ない特徴を示した。一方、未熟土タイプは特に下層土のGWが全体の中で顕著に多い特徴を示した。

### 3.7 易有効水分量 (AW<sub>r</sub>) の相対度数分布

各土層のAW<sub>r</sub>の相対度数分布を見ると、最頻値の階級は表層土 (0.08~0.11) が下層土 と深層土 (ともに0.05~0.08) よりも1階級大きかった (Fig. 11a, 11b, 11c)。また、表層土は下層土や深層土に比べてAW<sub>r</sub>が大きい階級の分布割合が大きい傾向を示した。

表層土の各土壌タイプの相対度数分布を見ると、褐色森林土群の中では、褐色森林土適潤性タイプ>褐色森林土乾性タイプ>赤・黄色系褐色森林土タイプの順に最頻値の階級が小さくなった (Fig. 11d)。また全体の中では赤・黄色系褐色森林土タイプや赤・黄色土タイプで最頻値の階級が小さく、黒色土タイプで最頻値の階級が大きかった。

下層土の各土壌タイプの相対度数分布を見ると、褐色森林土群の中では、褐色森林土適潤性タイプ≒褐色森林土乾性タイプ>赤・黄色系褐色森林土タイプの順に最頻値の階級が小さくなった (Fig. 11e)。また全体の中では表層土と同様に赤・黄色系褐色森林土タイプや赤・黄色土タイプで最頻値の階級が小さく、黒色土タイプや未熟土タイプやポドゾルタイプで最頻値の階級が大きかった。未熟土タイプやポドゾルタイプはAW<sub>r</sub>が小さい階級から大きい階級まで複数のピークを持って分布していた。

### 3.8 各土壌タイプの易有効水分量 (AW<sub>r</sub>) の平均値

表層土のAW<sub>r</sub>の平均値は、褐色森林土群の中では、褐色森林土適潤性タイプ>褐色森林土乾性タイプ>赤・黄色系褐色森林土タイプの順に小さく、褐色森林土適潤性タイプは褐色森林土乾性タイプより有意に大きかった (Fig. 12a)。また全体の中では黒色土タイプで最も大きく、赤・黄色土タイプで最も小さかった。黒色土タイプはポドゾル以外の全ての土壌タイプより有意に大きかった (Fig. 12a)。赤・黄色土タイプは褐色森林土適潤性タイプと黒色土タイプと未熟土タイプより有意に小さかった。

下層土のAW<sub>r</sub>の平均値は、褐色森林土群の中では、褐色森林土適潤性タイプ>褐色森林土乾性タイプ>赤・黄色系褐色森林土タイプの順に小さく、赤・黄色系褐色森林土タイプは褐色森林土の乾性タイプと適潤性タイプより有意に小さかった (Fig. 12b)。また全体の中ではポドゾルタイプで最も大きく、表層土と同様に赤・黄色土タイプで最も小さかった ( $n = 2$ のグライタイプを除く)。赤・黄色土タイプは2番目に小さい赤・黄色系褐色森林土以外の全ての土壌タイプより有意に小さかった。また黒色土タイプは褐色森林土乾性タイプと赤・黄色系褐色森林土タイプと赤・黄色土タイプより有意に大きかった。

このように、赤・黄色土タイプと赤・黄色系褐色森林土タイプは、表層土・下層土ともAW<sub>r</sub>が全体の中で少ない特徴を示した。一方、黒色土タイプは表層土・下層土とも全体の中でAW<sub>r</sub>が多い特徴を示した。また褐色森林土では、表層土・下層土とも適潤性タイプの方が乾性タイプよりAW<sub>r</sub>が多い特徴を示した。

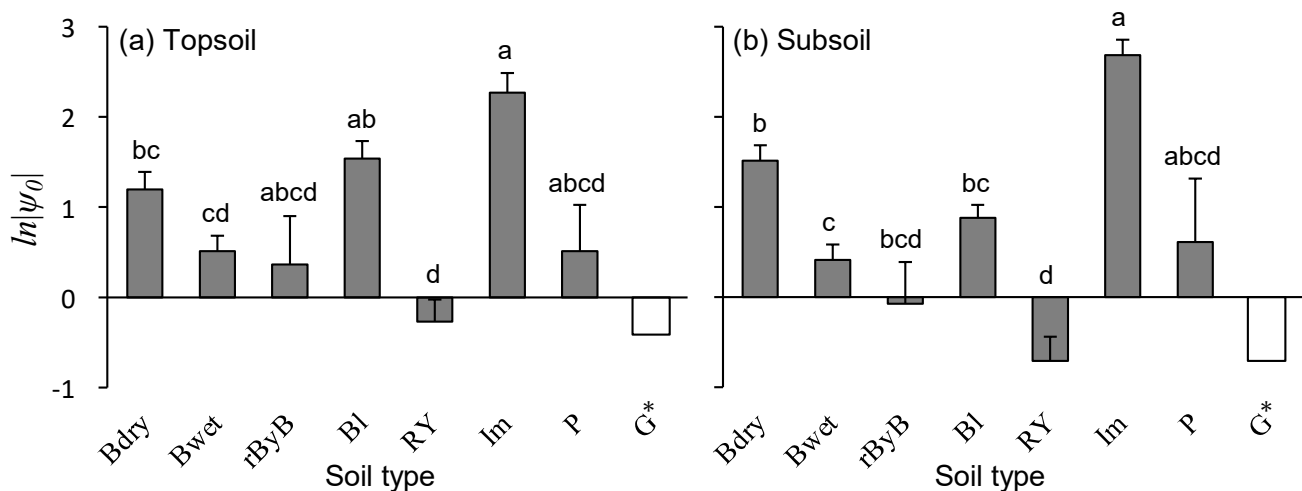


Fig. 8. 表層土 (a) と下層土 (b) の土壌タイプ毎の  $\ln|\psi_0|$  の平均値 (+ 標準誤差)

Mean (+ standard error) of  $\ln|\psi_0|$  for each soil type in Topsoil (a) and Subsoil (b).

異なる記号の土壌タイプ間には有意差があることを示す (Steel-Dwass test;  $P < 0.05$ )

Different letters indicate significant difference in each soil type (Steel-Dwass test;  $P < 0.05$ ).

土壌タイプの略号は Fig. 5 の脚注を参照。

See footnote to Fig. 5 for soil type abbreviations.

\* 表層土、下層土とも  $n = 2$  のグライ (G) は平均値のみ示す。

\* Gley soil types with  $n = 2$  for both topsoil and subsoil show mean values only.

4. 考察

本研究の目的は、九州・沖縄地域の主要な森林土壌の保水特性を明らかにすることであった。そのために、堀田 (1997) の513の土壌保水性データに土壌保水性モデル (VGモデル) をあてはめて4つの保水特性値 ( $m$ ,  $\psi_0$ , 重力水分量 ( $GW$ ), 易有効水分量 ( $AWr$ )) を抽出し、8つの土壌タイプ (Table1右端のタイプ分け) に分けて保水特性値の違いを比較した。以下の考察では、主に $GW$ と $AWr$ の違いに基づいて8つの土壌タイプの保水特性を整理するとともに、 $m$ や $\psi_0$ の値が特徴的な土壌タイプについてはこれにも触れて考察する。

4.1 重力水分量 ( $GW$ ) も易有効水分量 ( $AWr$ ) も小さい土壌タイプ

赤・黄色土タイプ (断面数27) と赤・黄色系褐色森林土タイプ (断面数6) は、表層土・下層土とも全体の中で $GW$ が少なかった (Fig. 10a, 10b)。またこれらは、表層土・下層土とも $AWr$ が全体の中で少なかった (Fig. 12a, 12b)。このことは、赤・黄色土タイプと赤・黄色系褐色森林土タイプは、 $GW$ も $AWr$ も少ない保水特性を持つことを示している。今回解析した赤・黄色土タイプの土壌は主に奄美大島と沖縄本島で収集されたものであり、赤・黄色系褐色森林土タイプの土壌はその周辺プロットから得ら

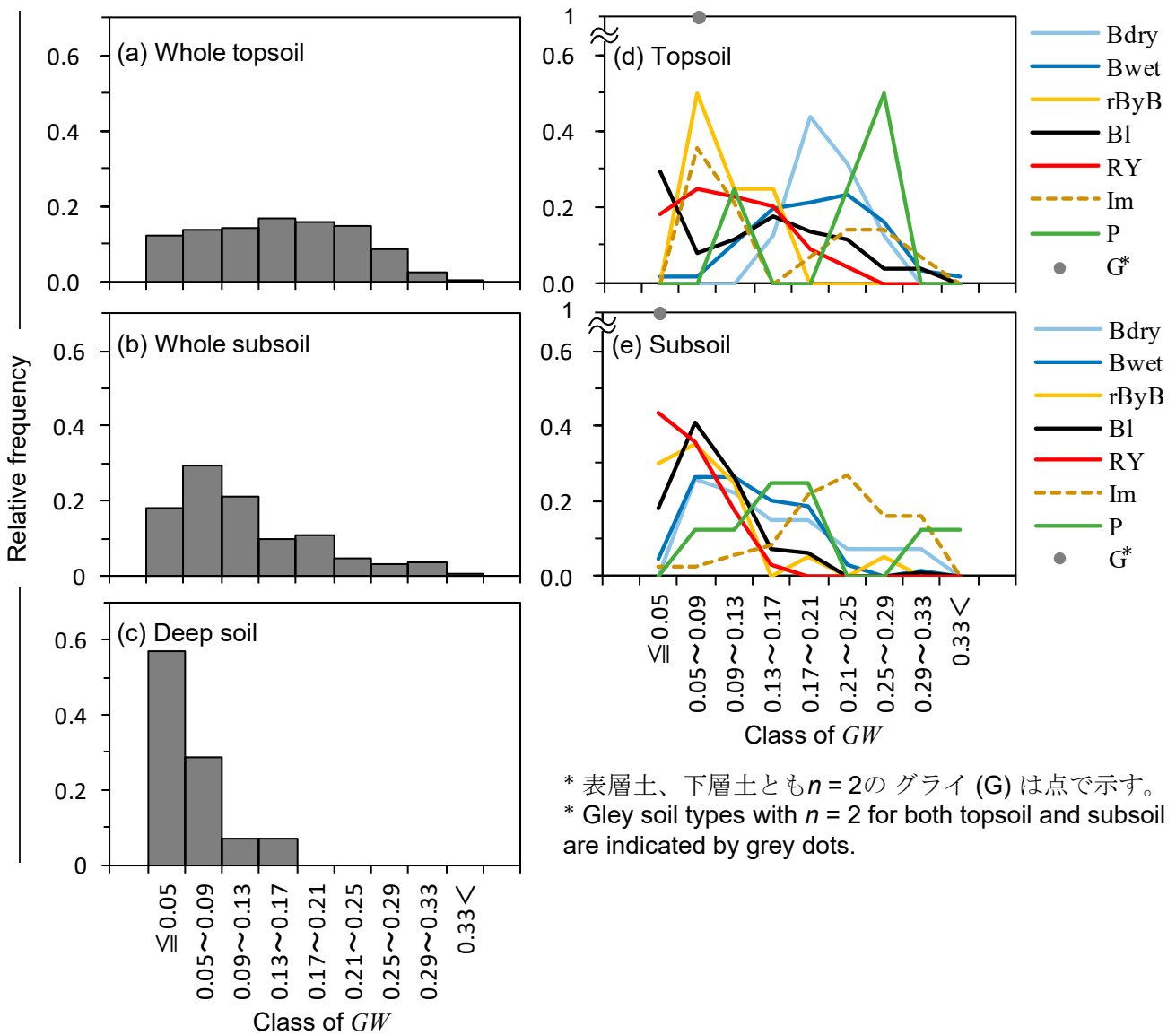


Fig. 9. 重力水分量 ( $GW$ ) の相対度数分布

Relative frequency distribution of the gravitational water contents ( $GW$ ).

左側：表層土全体 (a)、下層土全体 (b) および深層土 (c) の相対度数分布を示す。

右側：表層土の土壌タイプ毎 (d)、下層土の土壌タイプ毎 (e) の相対度数分布を示す。

Left side : Relative frequency distribution in Whole topsoil (a), Whole subsoil (b) and Deep soil (c).

Right side : Relative frequency distribution for each soil type in Topsoil (d) and Subsoil (e).

凡例の略号は Fig. 5 の脚注を参照。

See footnote to Fig. 5 for abbreviations in the legend.

れたものである。そのためどちらも亜熱帯地域に分布する赤・黄色土の特性を反映したと考えられる。赤・黄色土は一般的に粘土質で緻密な土層を形成する形態の特徴を持つ(河田 1993)。沖縄本島の南明治山の赤・黄色土の多点調査でも、最表層以外は容積重が $1.0 \text{ Mg m}^{-3}$ を超える緻密な土層が連続することが報告されている(Ohnuki et al. 1997)。また、黒鳥・大政(1963)は土塊の薄片観察から赤色土は他の土壌より孔隙量が少ないだけでなく細孔隙にも乏しく団粒化の程度が少ないことを報告している。このような土壌が緻密で孔隙量が少ない特徴を反映して、赤・黄色土タイプは他の土壌タイプに比べてGWもAWrも少ない保水特性を示したと考えられる。また、赤・黄色土の周辺プロットから得られた赤・黄色系褐色森林土タイプの土壌もこの特徴を反映した結果、同じ褐色森林土群の褐色森林土乾性タイプや適潤性タイプよりGWもAWrも少ない保水特性を示したと考えられる。

そのほかに、赤・黄色土タイプは表層土・下層土とも全体の中で $m$ が最も小さく、孔隙径分布が広く分散的であるととも( Fig. 6a, 6b)、 $\ln|\psi_0|$ が小さく( $\psi_0$ が大き)、大きい孔隙径に分布のピークがある特徴を示した( Fig. 8a, 8b)。また赤・黄色系褐色森林土タイプも、赤・黄色土タイプと黒色土タイプに次いで $m$ が小さいとともに、 $\ln|\psi_0|$ が小さい( $\psi_0$ が大き)特徴を示した。これらの土壌タイプは、少ない孔隙量の中に様々な孔隙径のものが分散的に分布した孔隙特性を持つと考えられる。また、 $\psi_0$ が大きく、他の土壌タイプより大きな孔隙径に分布のピークがあるが、孔隙径分布が広く分散的であるため、大きな孔隙の絶対量は他の土壌タイプよりも少なく、このため $\psi_0$ が大きくても重力水分量は少なかったと考えられる。

#### 4.2 重力水分量 (GW) が小さく易有効水分量 (AWr) が大きい土壌タイプ

黒色土タイプ(断面数28)は表層土・下層土とも全体の中でAWrが多い特徴を示した( Fig. 12a, 12b)。また黒色土タイプは、GWが赤・黄色土タイプと赤・黄色系褐色森林土タイプに次いで少ない特徴を示した( Fig. 10a, 10b)。このことは黒色土タイプは、AWrは多いがGWは少ない保水特性を持つことを示している。有光(1987)は駿豆地域(天城・富士・箱根)の黒色土において、全孔隙量の中で細孔隙( $\psi < -49 \text{ kPa}$ の孔隙量)が占める割合が大きく、粗孔隙( $-49 \text{ kPa} \leq \psi$ の孔隙量)が占める割合が小さいことを報告している。これを本研究のGWの定義( $-5 \text{ kPa} \leq \psi$ の孔隙量)を用いて再計算した場合、粗孔隙の割合はさらに小さくなることが予想される。AWrは多いがGWは少ないという保水特性は全国の黒色土に共通する特徴であることが示唆される。

そのほかに、黒色土タイプは $m$ が表層土・下層土とも赤・黄色土タイプに次いで小さく、孔隙径分布が広く分散的な特徴を示した( Fig. 6a, 6b)。黒色土タイプは易有効水分に相当する孔隙径の範囲を主体に様々な孔隙径が分散的に分布した孔隙特性を持つと考えられる。

#### 4.3 重力水分量 (GW) が大きい土壌タイプ

未熟土タイプ(断面数17)は表層土・下層土とも全体の中で $m$ が最も大きく、孔隙径分布が特定の孔隙径に集中していた( Fig. 6a, 6b)。また未熟土タイプは、表層土・下層土とも全体の中で $\ln|\psi_0|$ が最も大きく、他の土壌タイプより比較的小さい孔隙径に分布のピークを持っていた( Fig. 8a, 8b)。これらのことは、未熟土タイプは他の土

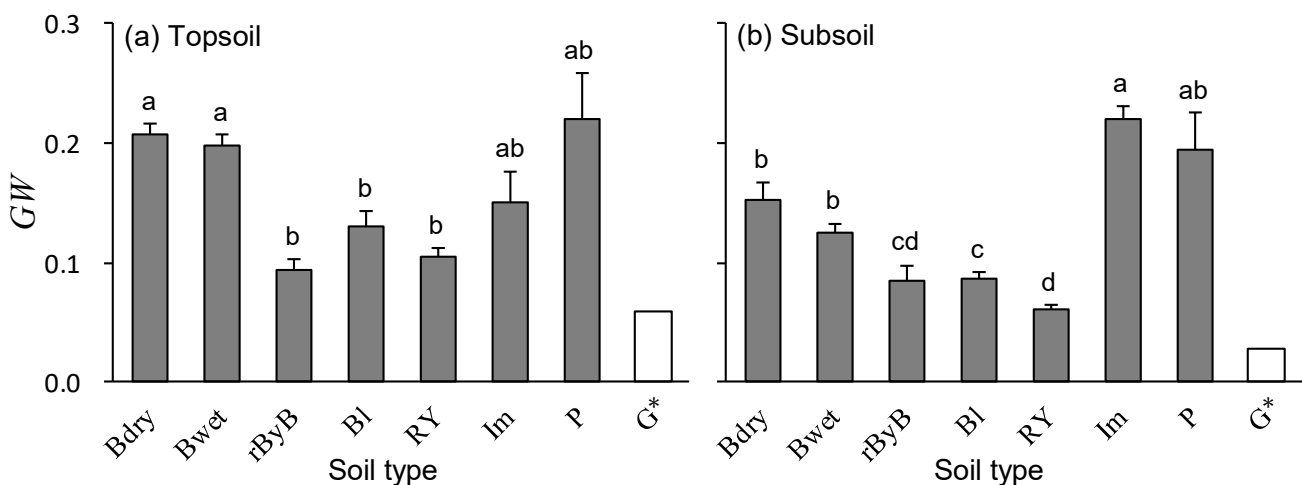


Fig. 10. 表層土 (a) と下層土 (b) の土壌タイプ毎の重力水分量 (GW) の平均値 (+ 標準誤差)

Mean (+ standard error) of gravitational water contents (GW) for each soil type in Topsoil (a) and Subsoil (b).

異なる記号の土壌タイプ間には有意差があることを示す (Steel-Dwass test;  $P < 0.05$ )

Different letters indicate significant difference in each soil type (Steel-Dwass test;  $P < 0.05$ ).

土壌タイプの略号は Fig. 5 の脚注を参照。

See footnote to Fig. 5 for soil type abbreviations.

\* 表層土、下層土とも  $n = 2$  の グライ (G) は平均値のみ示す。

\* Gley soil types with  $n = 2$  for both topsoil and subsoil show mean values only.

壤タイプに比べて小さい孔隙径に分布のピークを持ち、かつそこに分布が比較的集中した孔隙特性を持つことを示している。今回解析した未熟土タイプの土壌は主に海岸砂丘性の未熟土で、各層位とも粒径のそろった砂で構成されている(堀田 1997)。この母材の特徴を反映した結果、砂の間隙に相当する孔隙径に分布が集中する保水特性を示したと考えられる。なお未熟土タイプの $\psi_0$ の平均値は表層土で-13.4 cm、下層土で-21.7 cmであり、他の土壌タイプより小さい孔隙径に分布のピークがあるとはいえ、重力水分に相当するマトリックポテンシャルであつ

た。また未熟土タイプは特に下層土のGWが全体の中で顕著に多かった (Fig. 10b)。これは重力水分に相当する孔隙径への分布の集中が、表層土よりも下層土で顕著なことを示している。飯村ら (1995) は、30~160年生のクロマツ林下の砂丘性未熟土には、堆積有機物層の下に無機物と腐食が混合した黒褐色の薄い (概ね10 cm以内の) A層が形成されており、このA層では土粒子の細粒化 (シルトの増加と粘土の生成) が認められることを報告している。今回解析した砂丘性未熟土の表層土は、海岸の松林や広葉樹林の深さ0~5 cmから採取されたものであり、植生から

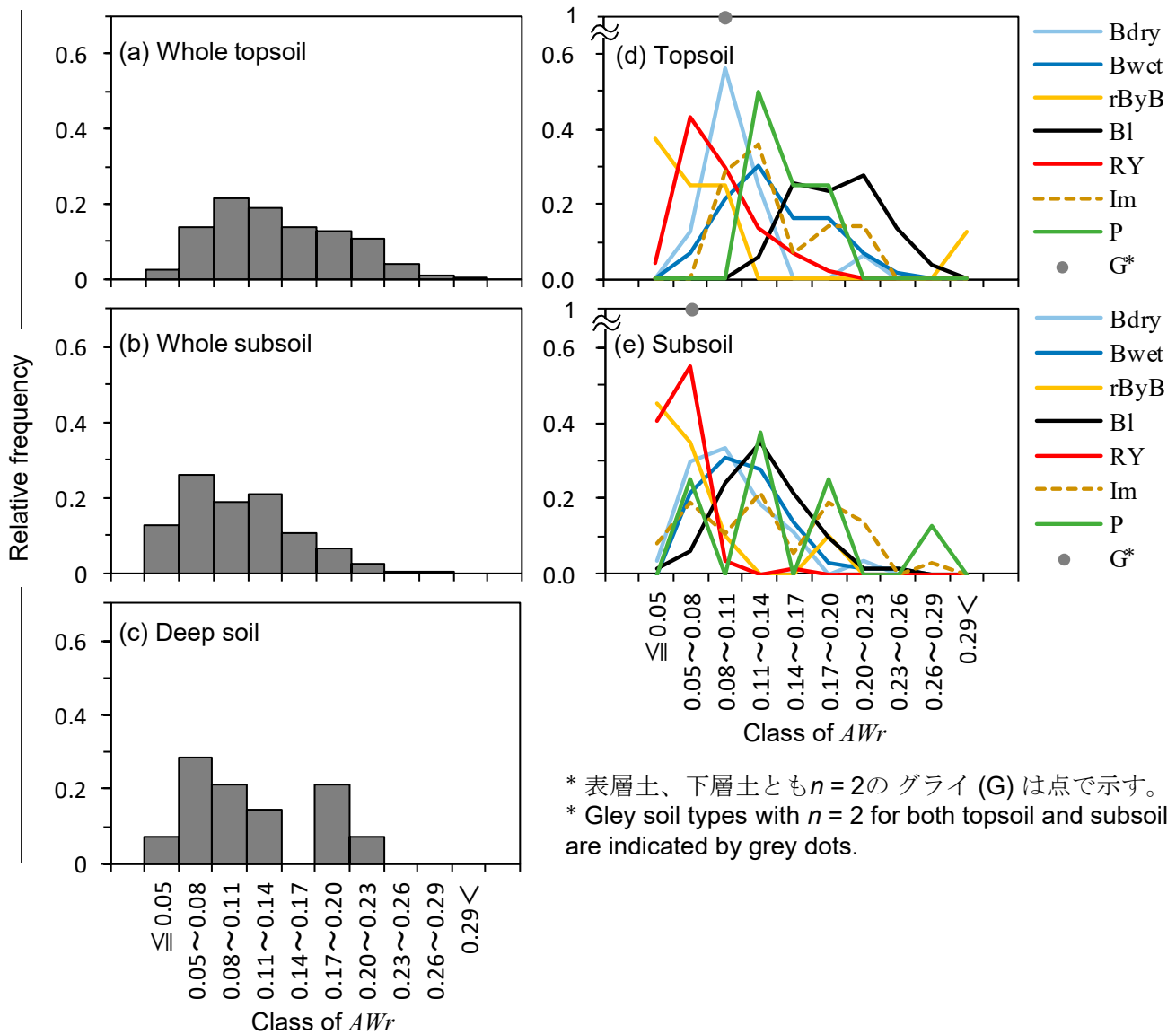


Fig. 11. 易有効水分量 ( $AWr$ ) の相対度数分布

Relative frequency distribution of the readily available water contents ( $AWr$ ).

左側：表層土全体 (a)、下層土全体 (b)、および深層土 (c) の相対度数分布を示す。

右側：表層土の土壌タイプ毎 (d)、下層土の土壌タイプ毎 (e) の相対度数分布を示す。

Left side : Relative frequency distribution in Whole topsoil (a), Whole subsoil (b) and Deep soil (c).

Right side : Relative frequency distribution for each soil type in Topsoil (d) and Subsoil (e).

凡例の略号は Fig. 5 の脚注を参照。

See footnote to Fig. 5 for abbreviations in the legend.

の有機物供給の影響を下層土より強く受けて一様な砂の孔隙分布から変化したと考えられる。これに対し下層土は、植生からの有機物供給の影響が表層土より少なく、母材である海岸砂丘砂の一様な孔隙分布特性を維持しているため、このような表層土と下層土の違いが生じたと考えられる。なお、未熟土タイプの表層土と下層土の $\psi_0$ の平均値に対応する間隙径( $2r$ )を、毛管半径( $r$ : cm)と毛管吸引圧( $\psi$ : cm)の関係式 $r = 0.15/\psi$ (宮崎ら 2005)を用いて計算すると、表層土で0.022 cm、下層土で0.013 cmとなり、表層土の間隙径の方が1.7倍大きかった。

そのほかに、未熟土タイプは $m$ 、 $GW$ 、 $AWr$ の相対度数分布で小さい階級から大きい階級まで複数のピークを持って分布していた(Fig. 5d, 5e, 9d, 9e, 11d, 11e)。これは未熟土タイプの中に桜島の火山放出物を母材とする未熟土も一部(全体の約1/4)含まれていたためと考えられる。桜島の未熟土は火山灰を母材とした黒色土に比較的近い孔隙特性であり(堀田 1997)、同じ未熟土でも海岸砂丘性の未熟土とは保水特性が異なると考えられる。今回の解析ではデータ数が少ないこともあり未熟土タイプをひとまとめにして解析したが、今回の海岸砂丘砂や火山放出物母材のものほかに花崗岩母材の未熟土の保水性が報告されている(荒木ら 1997)。今後も様々な地域・母材の未熟土の保水性データの収集を進め、未熟土の保水特性の母材による違いを検討していく必要がある。

#### 4.4 重力水分量( $GW$ )と易有効水分量( $AWr$ )が中間的な土壌タイプ

褐色森林土の乾性(断面数13)と適潤性(断面数36)の2タイプは、特に表層土の $GW$ が全体の中で多い特徴を示したが(Fig. 10a, 10b)、そのほかは全体の中で中間的な値を示した。乾性タイプと適潤性タイプの比較では、表層土・下層土とも適潤性タイプの方が乾性タイプより $m$ が小さく、孔隙径分布が広く分散的な特徴を示した(Fig. 6a, 6b)。また $AWr$ は表層土・下層土とも適潤性タイプの方が乾性タイプより多い特徴を示した(Fig. 12a, 12b)。褐色森林土の土壌型とスギ・ヒノキの成長はよく対応しており、適潤性タイプ( $B_D$ ,  $B_D(d)$ )の方が乾性タイプ( $B_A$ ,  $B_B$ ,  $B_C$ )より成長が良い(脇 1993)( $B_A \sim B_D(d)$ の記号の説明はTable 1.の脚注を参照)。適潤性タイプの方が乾性タイプより $AWr$ が多いことがこの要因の一つになっていると考えられる。褐色森林土群はわが国で最も広く分布する土壌である。今後は、今回データのなかった $B_E$ ,  $B_F$ などの湿性タイプの褐色森林土の保水性データを収集してその保水特性を明らかにする必要がある。また、褐色森林土には火山灰の影響を強く受けたものや受けていないものが全国各地に分布している。火山灰の影響の有無が褐色森林土の保水特性に及ぼす影響についても今後評価していく必要がある。

ポドゾルタイプ(断面数3(表層土4、下層土8データ))は、データが少ないためか4つの保水特性値ともばらつきが大きく、他の土壌タイプに対して明瞭な特徴を見出せなかった。またグライタイプ(断面数1(表層・下層とも2データ))については統計処理ができなかった。これら

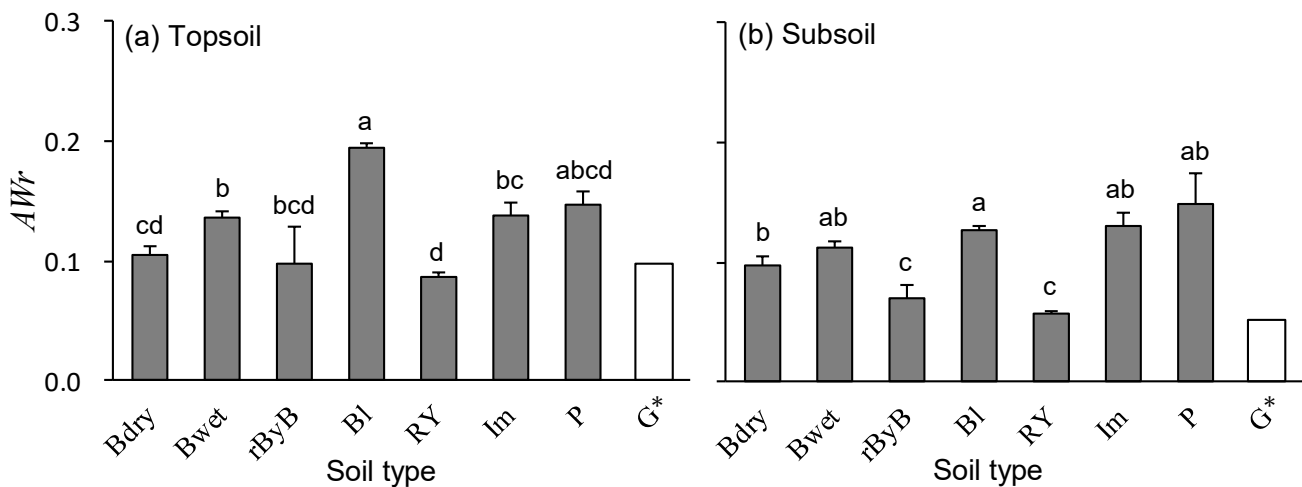


Fig. 12. 表層土 (a) と下層土 (b) の土壌タイプ毎の易有効水分量 ( $AWr$ ) の平均値 (+ 標準誤差)

Mean (+ standard error) of readily available water contents ( $AWr$ ) for each soil type in Topsoil (a) and Subsoil (b).

異なる記号の土壌タイプ間には有意差があることを示す (Steel-Dwass test;  $P < 0.05$ )

Different letters indicate significant difference in each soil type (Steel-Dwass test;  $P < 0.05$ ).

土壌タイプの略号は Fig. 5 の脚注を参照。

See footnote to Fig. 5 for soil type abbreviations.

\* 表層土、下層土とも  $n = 2$  の グライ (G) は平均値のみ示す。

\* Gley soil types with  $n = 2$  for both topsoil and subsoil show mean values only.

の土壌タイプは、出現頻度は低い、それぞれ日本の森林土壌を構成する土壌群の一つとして重要な位置づけにある。真下 (1960) のデータにもポドゾル土とグライ土はなく、今後も保水性データの収集を進めていく必要がある。

#### 4.5 森林土壌の保水性データの整備に向けた今後の課題

日本の森林土壌の保水性の基盤情報として位置づけられる真下 (1960) のデータは、東北南部、関東、東海地域の褐色森林土と黒色土のデータであったが、今回解析した堀田 (1997) のデータには、九州・沖縄地域の褐色森林土と黒色土のデータに加え、真下 (1960) にはない、赤・黄色土や未熟土等のデータが含まれている。今後、真下 (1960) のデータにも本研究と同じ手法を適用し、堀田 (1997) のデータと併せて再解析することは、日本の森林土壌の分類体系を土壌の保水性の観点から見直すという点で、意義があると考えられる。同様の着想に基づく予備的解析は行われており、結果が公開されている (Yamashita et al. 2021)。日本の森林土壌の保水性データベースの整備・拡充に向け、堀田 (1997) や真下 (1960) のデータに加え、そのほかの公表済みの保水曲線データからも土壌の保水性パラメータを抽出し、これらを統合したデータベースを作成していく必要がある。

今回、堀田 (1997) のデータから作成した保水曲線は、不明である飽水時体積含水率 ( $\theta_{max}$ ) を全てのデータで 0.8 とした場合の仮の保水曲線であり、 $\psi$  に対応する  $\theta$  の絶対値を明らかにしたものではないことに注意する必要がある。また、細土が密に詰まっている砂丘性未熟土に対して  $\theta_{max} = 0.8$  は大きすぎるなど、一律の値で解析したことが特定の土壌タイプの不確実性を高めている可能性もある。それでも、仮の飽水時体積含水率を設定した土壌保水性モデルのあてはめによって、主要な土壌タイプの保水性を特徴付けることができた意義は大きい。

今回解析した堀田 (1997) のデータのポテンシャル測定範囲 (-0.1~-150 kPa) は、真下 (1960) のポテンシャル測定範囲 (-0.1~-31 kPa) より大幅に広いが、農業分野で広く求められる永久しおれ点 ( $\psi = -1500$  kPa) までは測定されておらず、圃場容水量と永久しおれ点との  $\theta$  の差である有効水分量の算出はできなかった。従来の日本の降雨条件下で、野外観測した森林土壌のマトリックポテンシャルが -1500 kPa 以下になることが想定されることはなかった。しかし、将来の気候変動による降水の極端化がスギ・ヒノキの成長に及ぼす影響を評価するためには、樹木の乾燥ストレスの発現に影響する -150 kPa から永久しおれ点 (-1500 kPa) までの土壌の保水性を、生物地球化学シミュレーションモデルに組み込むことが重要になる。土壌保水性の実測データが -150 kPa まででも、あてはめた VG モデルを非実測範囲まで外挿することにより永久しおれ点までの保水性の推定値を得ることは可能であるが、 $\theta_p$  など低ポテンシャル側の値は実測範囲のわずかな変化

で容易に変化することが指摘されている (Nimmo 1991)。そのため本研究では、外挿により推定される永久しおれ点までの保水性については精度が不明確と考え、これを用いた有効水分量の解析は行わなかった。農耕地では気候変動が作物に及ぼす影響の広域評価に向け、有効水分量を含む土壌物理環境データベースの作成が進められている (滝本ら 2017)。これまでの森林土壌の保水性測定では加圧板法による -150 kPa までの測定 (荒木 1999) が一般的であった。今後は農耕地土壌で一般的に用いられている低マトリックポテンシャル (-1500 kPa) 用の加圧板を用いた保水性測定 (土壌環境分析法編集委員会 1997) や、永久しおれ点付近の土壌のポテンシャルの高精度測定が可能な鏡面冷却露点計を用いた保水性測定 (関ら 2023) 等を併用し、速く・高い精度で飽水時から永久しおれ点までの森林土壌の保水性が測定できる手法を確立する必要がある。また日本の森林土壌の保水性情報の高空間解像度での整備に向けては、このような測定手法の高度化とともに、粘土含量、乾燥密度、有機物含量等の土壌の基礎的な物性値から保水特性値を推定するペドトランスファー関数による手法 (Schaap et al. 1998, 滝本ら 2017) や、この手法への機械学習の応用、土壌中の  $\theta$  や  $\psi$  の変動過程の観測値から逆解析によって保水特性値を推定する手法 (Eching and Hopmans 1993, 坂井・取手 2007, 中村ら 2016) (水移動予測モデルに必要な保水特性値と不飽和透水係数を同時に推定できる利点がある) なども効率的なデータ整備手法として期待できる。これらの手法についても今後検討を進めていく必要がある。

#### 5. おわりに

堀田 (1997) の付表にある九州・沖縄地域の 513 の森林土壌の孔隙解析データに van Genuchten モデルをあてはめて 4 つの保水特性値 ( $m$ ,  $\psi_0$ , 重力水分量 ( $GW$ ), 易有効水分量 ( $AWr$ )) を抽出し、主要な土壌タイプに分けて保水特性の違いを検討した。その結果、九州・沖縄地域の土壌の保水特性が概ね以下のように整理された。1) 赤・黄色系褐色森林土タイプと赤・黄色土タイプは、 $GW$  も  $AWr$  も少ない特徴を持つ。2) 黒色土タイプは、易有効水分量  $AWr$  は多いが  $GW$  は少なく、また孔隙径分布が広く分散的な特徴を持つ。3) 海岸砂丘砂を主な母材とする未熟土タイプは、特に下層土の  $GW$  が多く、他の土壌タイプより小さい孔隙径に分布のピークを持ち、そこに分布が比較的集中した孔隙特性を持つ。4) 褐色森林土の適潤性タイプと乾性タイプでは、適潤性タイプの方が乾性タイプより  $AWr$  が多く、孔隙径分布が広く分散的である。森林土壌の保水性データを降雨流出モデルや樹木成長モデルに活用して気候変動が山地の水流出や樹木の成長等に及ぼす影響の予測精度を高めるため、データが少なく解析が不十分だったポドゾルやグライなどを含め、今後も様々な地域・母材・土壌型の保水性データの収集・整備を進めていく必要がある。

本論文で解析を行った堀田 (1997) の全513データの孔隙情報を補足電子資料Table S1に、データ採取地点の立地情報を補足電子資料Table S2にまとめた (詳細は2.6「解析データの詳細情報」を参照)。今後これらのデータの降雨流出予測モデルへの活用や、土壌・立地情報を用いた空間統計学的解析への活用が期待される。

### 謝辞

本稿の執筆にあたり、堀田庸博士 (元森林総合研究所森林環境部立地環境科科长) が学位論文 (堀田 1997) の付表として残した貴重な土壌孔隙特性データを解析に使用させていただいた。荒木誠博士には堀田庸博士に連絡を取っていただき、データの詳細について確認していただいた。三浦覚博士には堀田 (1997) の学位論文の電子入力データを提供していただいた。橋本昌司博士には研究のとりまとめに際し有益なご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。なお、本研究は農林水産省委託プロジェクト研究「農林水産分野における気候変動対応のための研究開発」の支援を受けた。

### 引用文献

- 荒木 誠 (1999) 11土壌孔隙解析. 森林立地調査法編集委員会編「森林立地調査法」. 博友社, 37-40.
- 荒木 誠・加藤正樹・小林繁男・有光一登 (2005) ヒノキ林の間伐による枝条放置が土壌の水分動態に与える影響. 森林立地, 47 (1), 47-55.
- 荒木 誠・加藤正樹・宮川 清・小林繁男・有光一登 (2002) ヒノキ林における皆伐および間伐が表層土壌水分状態に及ぼす影響. 森林立地, 44 (2), 1-8.
- 荒木 誠・鳥居厚志・金子真司・吉岡二郎 (1997) 花崗岩山地小流域における保水容量と保水量の変動. 森林応用研究, 6, 49-52.
- 有光一登 (1970) 吸収板による土壌の孔隙解析. 森林立地, 12 (1), 31-35.
- 有光一登 (1972) 8. 林野土壌—留意点と円筒試料による物理性測定法—. 土壌物理性測定法委員会編「土壌物理性測定法」. 養賢堂, 465-477.
- 有光一登 (1987) 森林土壌の保水のしくみ. 創文, 199pp.
- 有光一登・荒木 誠・宮川 清・小林繁男・加藤正樹 (1995) 宝川森林理水試験地における土壌孔隙量をもとにした保水容量の推定—初沢小試験流域1号沢および2号沢の比較—. 森林立地, 37 (2), 49-58.
- 土じょう部 (1976) 林野土壌の分類 (1975). 林業試験場研究報告, 280, 1-28.
- 土壌物理学学会 (2002) 新編 土壌物理用語事典. 養賢堂, 183pp.
- 土壌環境分析法編集委員会 (1997) 土壌環境分析法. 博友社, 427pp.
- Eastaugh, C. S., Potzelsberger, E. and Hasenauer, H. (2011) Assessing the impacts of climate change and nitrogen deposition on Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Austria with BIOME-BGC. *Tree Physiol.*, 31, 262v274.
- Eching, S. O. and Hopmans, J. W. (1993) Optimization of hydraulic functions from transient outflow and soil water pressure data. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 57, 1167-1175.
- 藤枝基久 (2007) 森林流域の保水容量と流域貯留量. 森林総合研究所研究報告, 6 (2), 101-110.
- van Genuchten, M. Th. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- 波多野隆介 (1997) 7. 土壌の物理性. 久馬 一剛編「最新土壌学」. 朝倉書店, 96-117.
- Hayashi, Y., Kosugi, K. and Mizuyama, T. (2006) Changes in pore size distribution and hydraulic properties of forest soil resulting from structural development. *J. Hydrol.*, 331, 85-102.
- Hendrayanto, Kosugi, K. and Mizuyama, T. (1998) Field determination of unsaturated hydraulic conductivity of forest soils. *J. For. Res.*, 3, 11-17.
- Hendrayanto, Kosugi, K., Uchida, T., Matsuda, S. and Mizuyama, T. (1999) Spatial variability of soil hydraulic properties in a forested hillslope. *J. For. Res.*, 4, 107-114.
- Hlásny, T., Barcza, Z., Barka, I., Merganičová, K., Šedlmák, R., Kern, A., Pajtik, J., Balázs, B., Fabrika, M. and Churkina, G. (2014) Future carbon cycle in mountain spruce forests of Central Europe: Modelling framework and ecological inferences. *For. Ecol. Manag.*, 328, 55-68.
- 堀田 庸 (1997) 森林土壌及び流域の保水容量に関する研究. 京都大学学位論文, 177pp.
- 飯村康二・本名俊正・山本定博・岡崎宏樹・沖田 智 (1995) 鳥取県の砂丘における土壌生成 I 砂丘土壌の断面及び理化学的特性. ペドロジスト, 39, 73-83.
- 井上輝一郎・岩川雄幸・吉田桂子 (1973) 四国地方の林地土壌の生産力に関する研究. 林業試験場研究報告, 258, 61-148.
- 河田 弘 (1993) 4 森林土壌の分類. 森林土壌研究会編「森林土壌の調べ方とその性質」, 改訂版. 林野弘済会, 65-99.
- Kosugi, K. (1997) A new model to analyze water retention characteristics of forest soils based on soil pore radius distribution. *J. For. Res.*, 2, 1-8.
- 小杉賢一朗 (1999a) 森林土壌の雨水貯留能を評価するための新たな指標の検討. 日林誌, 81, 226-235.
- 小杉賢一朗 (1999b) 森林の水源涵養・洪水緩和機能と土壌孔隙特性—森林土壌の孔隙特性が雨水流出に及ぼす影響—. 水利科学, 250, 29-59.
- 小杉賢一朗 (2005) 森林における水循環研究への土壌物理学の応用. 土壌の物理性, 100, 15-26.
- 小杉賢一朗 (2007) 古典を読む Y. Mualem著「不飽和多孔

- 質体の透水係数を推定する新たなモデルについて」ならびにM. Th. van Genuchten著「不飽和土壌の透水係数を推定する閉形式解について」. 土壌の物理性, 106, 47-60.
- 久保哲茂 (1969) わが国土壌調査事業の現状と問題点. 森林立地, 10 (1-2), 2-9.
- 黒鳥 忠・大政正隆 (1963) 赤色土壌の研究II 九州地方の赤色土とこれにともなう黒色土壌について. 林野土壌調査報告, 13, 1-88.
- 梁 偉立・小杉賢一朗・林 祐妃・水山高久 (2006) 雨水鉛直浸透に関わる土壌水分特性パラメータの特定手法に関する考察. 砂防学会誌, 59 (3), 3-12.
- 真下育久 (1960) 森林土壌の理学的性質とスギ・ヒノキの成長に関する研究. 林野土壌調査報告, 11, 1-182.
- 真下育久 (1961) 土壌の理化学性-吸収板による簡単なpF 値の測定とこれによる土壌水および孔隙の区分-. 森林立地, 3 (1), 32-34.
- 宮崎 毅・長谷川周一・粕渕辰昭 (2005) 土壌物理学. 朝倉書店, 138pp.
- 中村公人・大串祥子・池浦康広・田中宣多 (2016) 畑地用水計画のためのHYDRUS-1Dを用いた土壌水分移動解析における土壌水分特性パラメータの推定例. 土壌の物理性, 134, 25-40.
- Nimmo, J. R. (1991) Comment on the treatment of residual water content in "A consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface" by L. Luckner et al. *Water Resour. Res.*, 27, 661-662.
- 農林水産省 (2023) "農林水産省気候変動適応計画", <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/adapt/attach/pdf/top-4.pdf>. (参照2023-12-21).
- 大貫靖浩・小野賢二・安田幸生・釣田竜也・森下智陽・山下尚之 (2020) ブナ林土壌の保水機能の二面的定量評価-岩手県安比高原を対象として-. 森林立地, 62, 91-100.
- Ohnuki, Y., Terazono, R., Ikuzawa, H., Hirata, I., Kanna, K. and Utagawa, H. (1997) Distribution of colluvia and saprolites and their physical properties in a zero-order basin in Okinawa, southwestern Japan. *Geoderma*, 80, 75-93.
- Ohnuki, Y., Yoshinaga, S. and Noguchi, S. (1999) Distribution and physical properties of colluvium and saprolite in unchannelized valley in Tsukuba experimental basin, Japan. *J. For. Res.*, 4, 207-215.
- 大貫靖浩・吉永秀一郎・釣田竜也・荒木 誠・伊藤江利子・志知幸治・松浦陽次郎・小野賢二・岡本 透 (2014) 桂試験地における土層厚の分布と土壌物理特性. 森林総合研究所研究報告, 13 (2), 43-59.
- 坂井 勝・取出伸夫 (2007) 砂質土と団粒土に対する水分移動特性関数の検討. 土壌の物理性, 107, 63-77.
- 坂井 勝・取出伸夫 (2009) 水分保持曲線と不飽和透水係数の水分移動特性モデル. 土壌の物理性, 111, 61-73.
- Schaap, M. G. and Leij, F. J. (1998) Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Sci.*, 163, 765-779.
- 関 勝寿・岩田幸良・柳井洋介・亀山幸司 (2023) 団粒構造が発達した土壌の水分特性曲線の回帰手法の改良-dual-van Genuchten モデルのパラメータ決定の自動化に向けた取り組み-. 土壌の物理性, 155, 35-44.
- 篠宮佳樹・稲垣善之・野口麻穂子・奥田史郎・宮本和樹・伊藤武治 (2012) 強度間伐したヒノキ人工林の表層土壌の物理性. 森林総合研究所研究報告, 11 (3), 175-180.
- 森林立地調査法編集委員会 (1999) 森林立地調査法. 博友社, 284pp.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th. and Šejna, M. (2018) The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Technical Manual, Version 3.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, pp. 274.
- 滝本貴弘・高田祐介・桑形恒夫 (2017) 土壌温度・水分変動を予測するための都道府県別土壌物理環境データベースの作成. 土肥誌, 88, 309-317.
- Toriyama, J., Hashimoto, S., Osone, Y., Yamashita, N., Tsurita, T., Shimizu, T., Saitoh, T. M., Sawano, S., Lehtonen, A. and Ishizuka, S. (2021) Estimating spatial variation in the effects of climate change on the net primary production of Japanese cedar plantations based on modeled carbon dynamics. *PLoS ONE*, 16 (2), e0247165.
- University of Montana (2010) "Biome BGC version4.2: Theoretical Framework of Biome-BGC", [https://www.umt.edu/numerical-terradynamic-simulation-group/files/biome-bgc/golinkoff\\_biomebgcv4.2\\_theoreticalbasis\\_1\\_18\\_10.pdf](https://www.umt.edu/numerical-terradynamic-simulation-group/files/biome-bgc/golinkoff_biomebgcv4.2_theoreticalbasis_1_18_10.pdf). (参照 2023-12-21).
- 脇 孝介 (1993) 12 林木の成長と土壌との関係. 森林土壌研究会編 "森林土壌の調べ方とその性質", 改訂版. 林野弘済会, 303-332.
- 柳井久江 (2015) 4Stepsエクセル統計, 第4版. オーエムエス出版, 309pp.
- Yamashita, N., Tsurita, T., Toriyama, J. and Hashimoto, S. (2021) A spatial dataset of soil physical properties in Japanese forest [Data set]. <https://zenodo.org/record/4505671>.
- Yoshida, R., Fukui, S., Shimada, T., Hasegawa, T., Ishigooka, Y., Takayabu, I. and Iwasaki, T. (2015) Adaptation of rice to climate change through a cultivar-based simulation: A possible cultivar shift in eastern Japan. *Clim. Res.*, 64, 275-290.

補足電子資料

Table S1. 堀田 (1997) の附表データの各マトリックポテンシャル段階のときの有効飽和度およびVGモデルをあてはめて得られたモデルパラメータ

Table S2. 堀田 (1997) の附表データの土壌情報および立地情報

## Water retention property of forest soils in Kyushu-Okinawa region -Analysis of soil water retention data in Hotta (1997)-

Tatsuya TSURITA<sup>1)\*</sup>, Tadashi SAKATA<sup>2)</sup> and Masahiro KOBAYASHI<sup>1)</sup>

### Abstract

To clarify the water retention characteristics of forest soils in the Kyushu-Okinawa region, we applied the van Genuchten model to 513 pore distribution analyses from the appendix of Hotta's 1997 Ph. D thesis, extracting four water retention property values ( $m$ ,  $\psi_0$ , gravitational water content, readily available water content). We then compared these values among eight soil types. The results indicated that the Reddish/Yellowish Brown and Red and Yellow soil types exhibited low gravitational and readily available water contents, while the Black soil type showed high readily available water content but low gravitational water content and a dispersed pore size distribution. The Immature soil type consisting of coastal dune sand, had a smaller peak pore size and a more concentrated pore size distribution. Comparing the Dry and Moist Brown forest soil types revealed that the latter had a higher readily available water content and a more dispersed pore size distribution. To enhance the accuracy of models predicting the effects of climate change on catchment runoff, tree growth using forest soil water retention data, ongoing collection and development of such data across various regions, parent materials, and soil types are essential.

**Key words** : forest soil, water retention curve, Kyushu-Okinawa region, van Genuchten model, gravitational water content, readily available water content

---

Received 23 April 2024, Accepted 19 August 2024

1) Department of Forest Soils, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Center for Forest Restoration and Radioecology, FFPRI

\* Department of Forest Soils, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687 JAPAN; E-mail: [tatuya@ffpri.affrc.go.jp](mailto:tatuya@ffpri.affrc.go.jp)