

1. はじめに

森林が持つ洪水緩和・渇水軽減機能の定量的評価のためには森林土壌の水分特性曲線(WRC)を把握することが不可欠である。森林土壌は植生・風化・地形の影響を受けているため WRC が均質に分布していない。このように空間分布する WRC を簡単に表現するための手法として、Miller and Miller (1956)が導入したスケーリング手法が用いられてきた。Miller and Miller は、土壌の構造は同一で粒子や孔隙の大きさのみが異なる相似体、すなわち孔隙径分布の孔隙半径のみが異なり分布の幅や孔隙率は同じである多孔質体を対象としてスケーリングを行い、孔隙半径を土壌の構造を特徴付ける代表値すなわちスケーリング係数とした。彼らが対象とした土壌は相似体に限られていたが、その後このような条件を満足しない野外の土壌に対しても孔隙半径をスケーリング係数としてスケーリング技法を適応する試みがなされて来た。そこで本研究では、孔隙径分布の孔隙半径、分布の幅、孔隙率のうち森林土壌の WRC を最も特徴付けているものを検討した。

2.1 WRC のモデル

WRC は LN モデル(Kosugi, 2006)で表した。LN モデルでは、土壌中の孔隙径分布を孔隙半径の対数値 $\ln r$ が正規分布に従うと仮定し次式で表している。

$$f(\ln r) = \frac{d\theta}{d \ln r} = \frac{\theta_s - \theta_r}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(r/r_m)]^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (1)$$

ここで、 r_m は孔隙径分布の中央値、 σ は孔隙径分布の分布の幅を示す。また θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率を示す。 θ_s と θ_r の差は有効孔隙率 θ_e と呼ばれ、水移動に関する土壌孔隙の総量を示す。

毛管圧である圧力水頭 ψ は孔隙管の半径に反比例する(Kutilek and Nielsen, 1994)。

$$r = -\frac{0.15}{\psi} \quad (2)$$

式(2)を仮定すると有効飽和度 S_e と ψ の関係が式(1)から導かれ次式のようにになる。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = Q\left(\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma}\right) \quad (3)$$

ただし、

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (4)$$

ここで、 ψ_m は式(2)により孔隙半径に対応する(i.e., $\psi_m = A/r_m$)。

体積含水率 θ と圧力水頭の関係は $\theta_r = \theta_s - \theta_e$ の関係

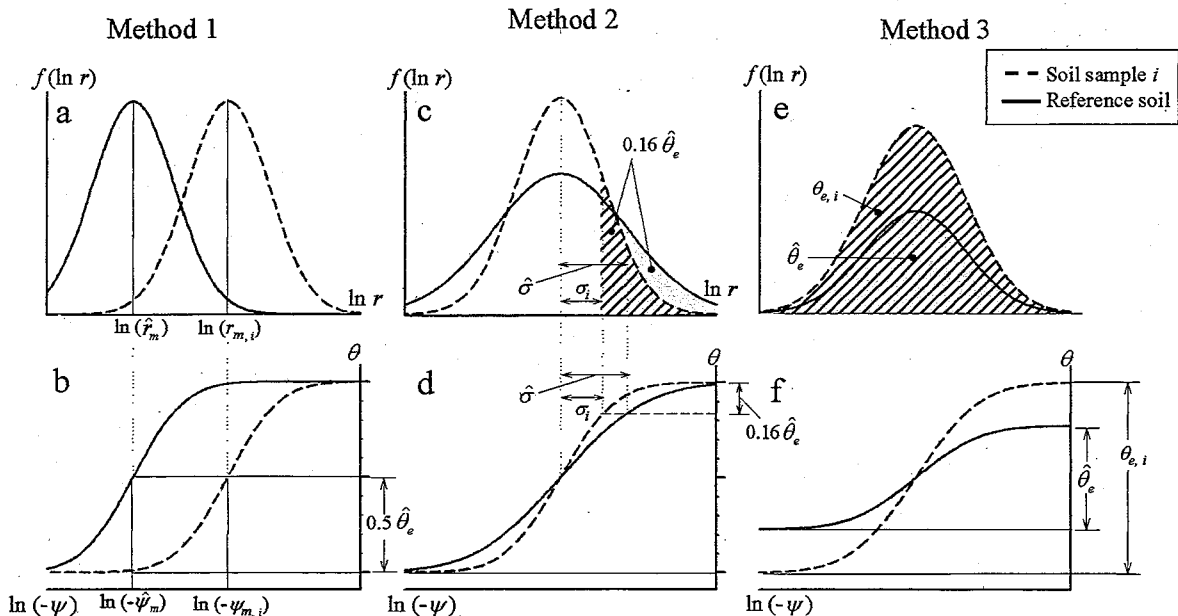


図-1. LN モデルを仮定した場合の土壌サンプル i とレファレンス土壌の孔隙径分布(a, c, e)と WRC(b, d, f) ψ_m, σ, θ_e のパラメータのうち Method 1 は ψ_m のみ, Method 2 は σ のみ, Method 3 は θ_e のみ土壌サンプル i とレファレンス土壌で異なるようにパラメータを設定した。

から次のように表される。

$$\theta = \theta_e Q\left(\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma}\right) + (\theta_s - \theta_e) \quad (5)$$

2.2 スケーリング

Miller and Miller は土壌が相似体をしていると仮定し、スケーリング係数 α_i を土壌サンプル*i*とレファレンス土壌の代表孔隙径の比として定義した。これを応用してKosugi and Hopmans (1998)は ψ_m を用いて α_i を次のように表した。

$$\ln \alpha_i = \ln(-\hat{\psi}_m) - \ln(-\psi_{m,i}) \quad (6)$$

ここで、 $\psi_{m,i}$ は土壌サンプル*i*の、 $\hat{\psi}_m$ はレファレンス土壌の ψ_m を示す。Miller and Miller の手法では ψ_m 以外のパラメータ(σ, θ_e)は土壌サンプル*i*とレファレンス土壌と同じである。土壌サンプル*i*とレファレンス土壌の孔隙径分布は図-1aに WRC は図-1b に示したようになる。これらの図から二つの曲線が σ と θ_e は同一で $\ln r$ 方向に平行にシフトした関係にあることが分かる。本研究ではこのスケーリング手法を Method 1 とした。さらに、野外土壌は相似体をしていないことを考慮して次のようなスケーリング手法を設定した。 σ のみが土壌ごとに異なり他のパラメータ(ψ_m, θ_e)はすべての土壌で共通(図-1c, 1d)と仮定してスケーリングを行う手法を Method 2, θ_e のみが土壌ごとに異なり他のパラメータ(ψ_m, σ)はすべての土壌で共通(図-1e, 1f)と仮定してスケーリングを行う手法を Method 3 とした。

3. 方法

滋賀県南部の風化花崗岩を母材とする天然林斜面において、斜面下方から順に Point 1, 2, 3, 4, 5 の 5 地点について、不攪乱の土壌試料を 100 cc 採土円筒を用いて採取した。鉛直方向には数層の土壌サンプルと基岩層の基岩サンプルを採取した。同じ深度で三回の繰り返しで採取した。pF 試験を行い、WRC を決定した。測定した圧力水頭は、 $\psi = -5, -10, -20, -30, -50, -70, -100, -200, -500, -1000$ cm である。解析では三回繰り返しの WRC の平均値を用いた。実測した WRC に対して Method 1~3 のスケーリングを行った。また LN モデルを仮定した上で最も WRC の空間分布を最もよく再現する場合として、それぞれの土壌に

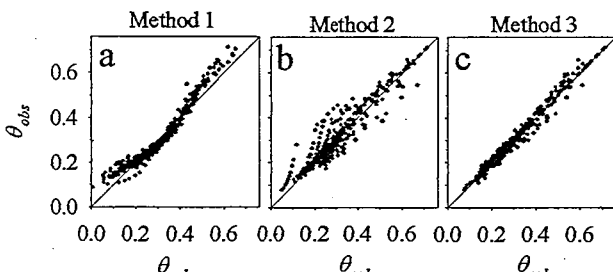


図-2.体積含水率の実測値 θ_{obs} と Method (a) 1, Method (b) 2, Method (c) 3 による計算値 θ_{cal} の比較

ついてパラメータ (ψ_m, σ, θ_e)を決定した(Method IF; individual fitting)。さらに WRC の空間分布を考慮しない場合として、すべての土壌で同じパラメータを決定した(Method UF; universal fitting)。最適化は残差平方和 RSS が最小になるように行った。それぞれの Method の効果を判定するために EOS(effect of scaling)を計算した。

$$EOS = \frac{RSS_{UF} - RSS}{RSS_{UF} - RSS_{IF}} \quad (7)$$

ここで RSS_{IF} は Method IF を用いた時の RSS 値, RSS_{UF} は Method UF を用いた時の RSS 値を表す。

4. 結果・考察

図 2a~2c に Method 1~3 から算出された計算値と実測値の比較を示す。Method 1 では中間領域の θ は 1:1 のライン上に分布しているが、大・小領域の θ は計算値の方が実測値より値が小さかった。Method 1 の RSS は 0.348 であった(表-1)。スケーリングの効果を表す EOS は 0.718 であった。Method 2 では、実測値と計算値は 1:1 のラインから広がって分布した(図-2b)。Method 2 の RSS は 0.527, EOS は 0.562 であった(表-1)。Method 3 では、実測値と計算値が 1:1 のライン上に分布しており(図-2c), RSS は 0.130, EOS は 0.908 であった(表-1)。Method 3 と Method IF はパラメータの値と RSS がともに似た値(表-1)を示したことから、 θ_e のみを空間分布させることで、すべてのパラメータを空間分布させた場合と似た WRC を描くことができることが分かった。

以上から、 θ_e のみを空間分布させた Method 3 は、天然林斜面の WRC の空間分布を表現するのに最も効果が高いことが分かった。すなわち、天然林斜面の孔隙径分布の空間分布は有効孔隙率の空間分布によって特徴付けられていることが分かった。

引用文献 Kosugi,K. 1996. Water Resour. Res., 32, 2697-2703./ Kosugi,K., and J.W.Hopmans. 1998. Soil Sci. Soc. Am.J., 62,1496-1505./ Kutilek,M., and D.R.Nielsen. 1994. Soil Hydrology, Catena Verlag, Cremlingen, Germany./ Miller,E.E., and R.D. Miller. 1956. J.Appl. Phys.,27,324-332.

表-1. レファレンス土壌の水分特性パラメータと RSS と式 (7)から導いた EOS

Scaling Method	Reference paramters			RSS	EOS
	ψ_m (cm)	σ	θ_e (cm ³ cm ⁻³)		
Method IF	(-19.04)	(1.564)	(0.360)	0.025	1.000
Method UF	-18.08	1.546	0.364	1.172	0.000
Method 1	(-50.99)	2.248	0.423	0.348	0.718
Method 2	-15.69	(3.252)	0.373	0.527	0.562
Method 3	-17.38	1.534	(0.357)	0.130	0.908

括弧内にそれぞれの土壌ごとに決定したパラメータの平均値を示した。 ψ_m については幾何平均を算出した。