

# 土壌水分欠損量に基づく森林の蒸散量推定に関する研究

長岡技術科学大学大学院 非会員 ○小椋崇弘  
長岡技術科学大学 正会員 陸 旻皎

## 1. はじめに

我が国の国土面積に占める森林の割合は約 67%であり、新潟県に限ってみても約 68%が森林に覆われている<sup>1)</sup>。また、国土面積に占める山地の割合は約 61%であり、これに丘陵地を加えると約 73%となる<sup>2)</sup>。すなわち、我が国はその大部分が森林かつ斜面である。この斜面の多さという国土の特徴から多くの人々が土砂災害のリスクに曝されている。我が国で主流の土砂災害リスク評価手法<sup>3)</sup>では、土壌の種別と森林の存在を考慮していないが、これらの問題の解決を試みたモデルとして、土壌の種別を反映させることが可能な中山・陸 (2020) のモデルが提案されている<sup>4)</sup>。しかし、このモデルは、蒸発散について極めて簡単に扱っており、また、森林の影響も考慮していないため、モデルの長期的な運用を考える上で問題がある。そこで、本研究では、土砂災害のリスク評価に応用可能な、森林の蒸散量推定を行うためのモデルを構築することを目的とする。手法として、土壌水分の存在量を表現するモデルと、根系による土壌水分の吸水量を表現するモデルを同時に考えることで、森林の蒸散量を推定することを試みる。

## 2. 1. 土壌水分欠損量

土壌水分の存在量は体積含水率を用いて表現することができるが、その飽和量は体積によって一意的に定まるため、体積当たりの水分の絶対量だけではなく、その飽和状態からの不足量を考えることもできる。これを土壌水分欠損量 (SMD [cm]) として式 (1) のように定義する<sup>4)5)</sup>。模式的には、土壌鉛直カラムにおいて図-1 のように表現される。図中において、 $D$ [cm] は土層厚さである。

$$SMD = \int_{z_g}^0 (\theta_s - \theta) dz \quad (1)$$

ここで、 $z$ [cm] は上向きを正とする鉛直方向の座標、 $z_g$ [cm] は地表面を原点としたときの地下水面の座標、 $\theta_s$ [cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>] は飽和体積含水率、 $\theta$ [cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>] は体積含

水率である。式(1)について、式(2)の Brooks and Corey のモデル<sup>6)</sup>を用いて土壌の体積含水率を毛管ポテンシャルと関連付ける。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda & \psi < \psi_b \\ 1 & 0 > \psi \geq \psi_b \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $\theta_r$ [cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>] は残留体積含水率、 $S_e$ [-] は有効飽和度、 $\psi$ [cm] は毛管ポテンシャル、 $\psi_b$ [cm] は空気侵入圧、 $\lambda$ [-] は土壌の種別に依存するパラメータである。また、土壌水分再分布が完了した後は、地表面から地下水面までの領域で重力ポテンシャルと毛管ポテンシャルが釣りあうため、式(3)が成り立つ。

$$\psi + z = z_g \quad (3)$$

これらを利用して式(1)を解くと、 $z_g < \psi_b$  の領域では式(4)のようになる。

$$SMD = C_s \left[ \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \left(\frac{z_g}{\psi_b}\right)^{1-\lambda} - 1 \right\} - \frac{z_g}{\psi_b} + 1 \right] \quad (4)$$

$$C_s = \psi_b (\theta_s - \theta_r)$$

それ以外の地表面下の領域では  $SMD = 0$  cm である。式(4)の示す通り、SMD は土壌の種別が定まったとき、 $z_g$  のみを独立変数とする関数となり、測定や推定の困難な  $D$  を考慮しなくとも土壌水分量を表現することができる。

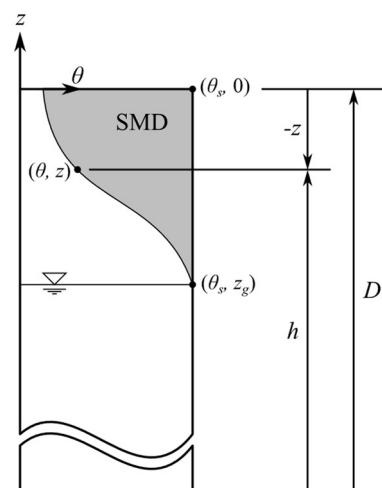


図-1 SMD の模式図

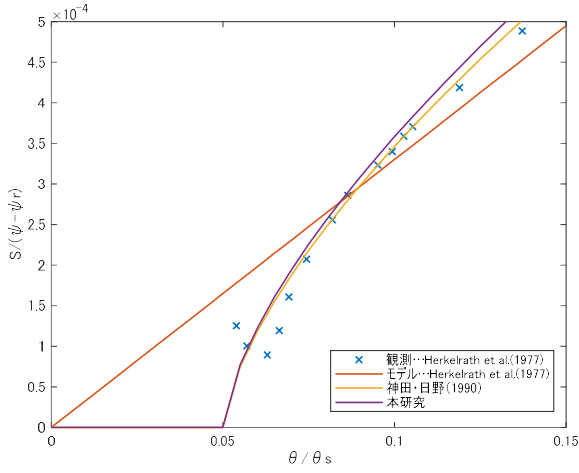


図-2 観測値と各モデルとの比較

## 2. 2. 根系吸水量

根系による吸水を表現するモデルは多数存在し、そのアプローチも様々であるが、今回は前述の SMD と組み合わせる上で最も相性が良いと考えられる Herkelrath *et al.* (1977) の Root Contact Model<sup>7)</sup>を採用した。このモデルは根系内外の水ポテンシャル差、土壌の含水率、植生の種別に依存するパラメータから吸水量を算定するというもので、式(5)で表される。

$$S = \frac{\theta}{\theta_s} \rho L (\psi - \psi_r) \quad (5)$$

ここで、 $S[\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}]$ は単位体積あたりの吸水強度、 $\rho[\text{cm s}^{-1}]$ は根の透過係数、 $L[\text{cm cm}^{-3}]$ は根密度、 $\psi_r[\text{cm}]$ は根の水ポテンシャルである。神田・日野(1990)は、根系による土壌水分の吸収が根の表面で生じるとして、含水率に体積と表面積の比として  $2/3$  を乗し、かつ、植物の利用できる土壌水分量の下限  $\theta_R[\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}]$ を導入して、式(5)を式(6)のように修正した<sup>8)</sup>。

$$S = \left( \frac{\theta - \theta_R}{\theta_s} \right)^{\frac{2}{3}} \rho L (\psi - \psi_r) \quad (6)$$

本研究でも式(6)の修正を採用すると同時に、 $\theta_R$ が $\theta_r$ に一致すると仮定することで式(2)との接続を可能にした。それにより、式(7)を得た。また、この式を Herkelrath *et al.* (1977) の実験による観測結果<sup>7)9)</sup>、式(5)、式(6)と比較し、修正に問題がないことを確認した。この結果を図-2 に示す。

$$S = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{2}{3}} \rho L (\psi - \psi_r) = S_e^{2/3} \rho L (\psi - \psi_r) \quad (7)$$

根系を有する土壌鉛直カラムを鉛直方向の微小領域に分割した際、 $L$ は式(8)で表される。 $f(z)$ は根系の鉛直方向の体積分布を表現する関数であり、本研究では式(9)のガンマ分布を仮定した。

$$L = L_0 f(z) dz \quad (8)$$

$$f(z) = \frac{1}{\mu \Gamma(\nu)} \left( -\frac{z}{\mu} \right)^{\nu-1} \exp\left(\frac{z}{\mu}\right) \quad (9)$$

ここで、 $\Gamma(x)$ はガンマ関数、 $\mu$ はガンマ分布の尺度パラメータ[-]、 $\nu$ はガンマ分布の形状パラメータ[-]、 $L_0$ は根系の体積分布を単位土壌体積あたりの根長とする定数 $[\text{cm cm}^{-3}]$ である。以上のことから、根系吸水量  $T[\text{cm s}^{-1}]$ は式(10)で表される。

$$T = \int_{-\infty}^0 S_e^{2/3} \rho L_0 f(z) (\psi - \psi_r) dz \quad (10)$$

土壌の全層が飽和状態にある時の根系吸水量は、 $f(z)$ にガンマ分布を仮定していることから、これを全層において積分した結果が1となり、また、飽和領域で $S_e = 1$ かつ $\psi = 0$ であることを仮定すると、式(11)となる。式(10)を式(11)で除すことにより、無次元根系吸水量 $T_*[-]$ として式(12)を得る。

$$T_0 = -\rho L_0 \psi_r \quad (11)$$

$$T_* = -\frac{1}{\psi_r} \int_{-\infty}^0 S_e^{2/3} f(z) (\psi - \psi_r) dz \quad (12)$$

式(12)を式(2)、式(3)を考慮して解くことで、式(13)を得る。ここで、 $Q(a, x)$ は正則化した不完全ガンマ関数である。なお、式(13)の $\zeta$ を解くには数値積分を用いる必要がある。

## 3. 結果と考察

米国 MathWorks 社製の数値解析ソフトウェア MATLAB R2020b を用いて式(4)、式(13)を計算した。数値積分には大域適応求積法を用いた。また、裸地との比較のため、地表面における $S_e$ を式(2)、式(3)から計算した。計算条件は表-1 に示す2種類の土壌条件と表-2 に示す2種類の根系条件を掛け合わせた4通

$$T_* = -\frac{1}{\psi_r} \left\{ \zeta + \mu \nu Q\left(\nu + 1, -\frac{z_g - \psi_b}{\mu}\right) - \mu \nu Q\left(\nu + 1, -\frac{z_g}{\mu}\right) + (z_g - \psi_r) Q\left(\nu, -\frac{z_g - \psi_b}{\mu}\right) - z_g Q\left(\nu, -\frac{z_g}{\mu}\right) \right\} \quad (13)$$

$$\zeta = \frac{1}{\mu \Gamma(\nu)} \left\{ (z_g - \psi_r) \int_{z_g - \psi_b}^0 \left( \frac{z_g - z}{\psi_b} \right)^{-\frac{2}{3}\lambda} \left( -\frac{z}{\mu} \right)^{\nu-1} \exp\left(\frac{z}{\mu}\right) dz - \int_{z_g - \psi_b}^0 \left( \frac{z_g - z}{\psi_b} \right)^{-\frac{2}{3}\lambda} z \left( -\frac{z}{\mu} \right)^{\nu-1} \exp\left(\frac{z}{\mu}\right) dz \right\}$$

りとした。表-1の土壌の水分特性曲線を図-3に、表-2の根系の体積分布を図-4に示す。また、式(4)、式(13)の計算結果を図-5、図-6に、地表面における $S_e$ の計算結果を図-7に示す。なお、 $z_g$ が根系体積のほとんど存在しない深さにあるとき、 $T_*$ が負となることがある。これは $\psi_r$ を定数としたためであると考えられる。根系から土壌への水分移動量は無視できるほどに小さい<sup>10)</sup>と考えられること、この深さでは $L \approx 0$ であることから、 $T_*$ が負の時は $T_* = 0$ とした。

表-1 土壌の条件設定<sup>6)</sup>

項目	土壌 1	土壌 2
$\theta_s$	0.41	0.46
$\theta_r$	0.057	0.034
$\psi_b$	-5.2	-38.7
$\lambda$	0.95	0.32

表-2 根系の条件設定

項目	根系 1	根系 2
$\mu$	10.0	7.5
$\nu$	6.5	3.5
$\rho^{10)}$	$2.0 \times 10^{-9}$	
$L_0^{10)}$	10.0	
$\psi_r$	-100	

図-5と図-6において、 $SMD = 0$  cmのときに $T_*$ は最大値の近傍に存在し、 $SMD$ が増大することに伴って減少する傾向が見られた。両者はともに $z_g$ のみの関数であるという一意的な対応関係が存在するため、 $T_*$ が計算できれば、水分が土壌中から植物体内へと移動する過程を定量的に示すことができ、同時に、 $SMD$ の増大過程も計算できることになる。

図-6と図-7において、 $S_e$ は $z_g < \psi_b$ 下で急速に減少している。それに対して、 $T_*$ は $\psi_b > \psi_r$ であるので、 $z_g > \psi_b$ 下においても減少が生じ始めるものの、減少速度としては $S_e$ ほど急激ではなく、むしろ緩慢である。例えば、 $z_g = -50$  cmであるとき、土壌1と比較すると、根系1では $T_* = 0.886$ 、根系2では $T_* = 0.367$ であるのに対して、 $S_e = 0.117$ である。裸地においては、地表面の土壌が乾燥することによる蒸発抑制が直ちに作用するのに対して、植生はその根系

が湿潤な土壌中に存在している限り、地表面付近の土壌が乾燥状態にあっても、より深い位置の土壌水分を利用することができることから、この差異が生じたと考えられる。また、この傾向が表現されたことにより、 $T_*$ は根系の吸水がもたらす土壌の脱水過程、すなわち、蒸散を定性的に再現したと考えられる。

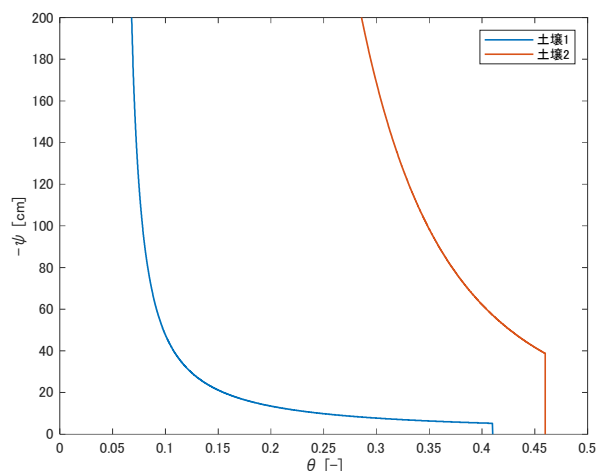


図-3 水分特性曲線

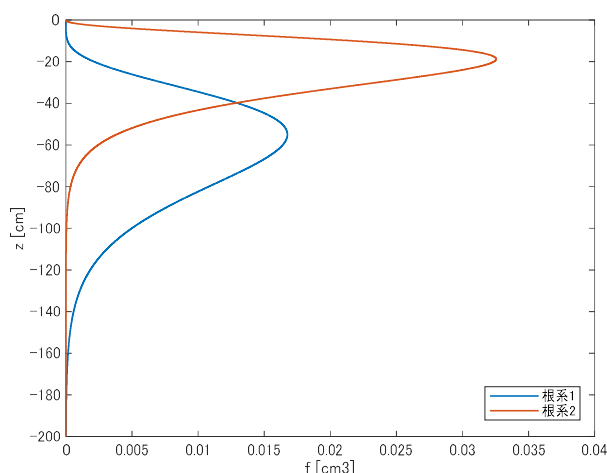


図-4 根系の体積分布

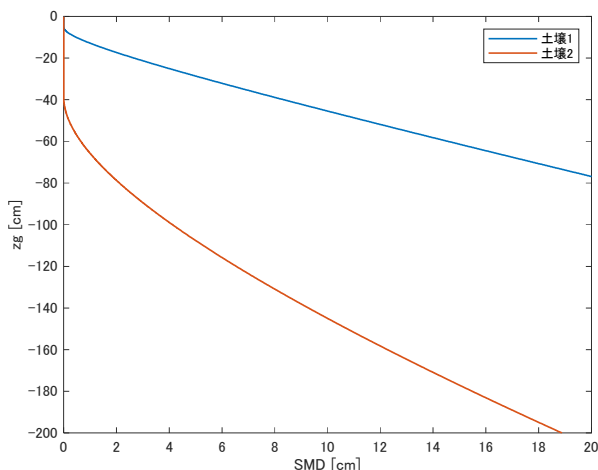


図-5 SMD

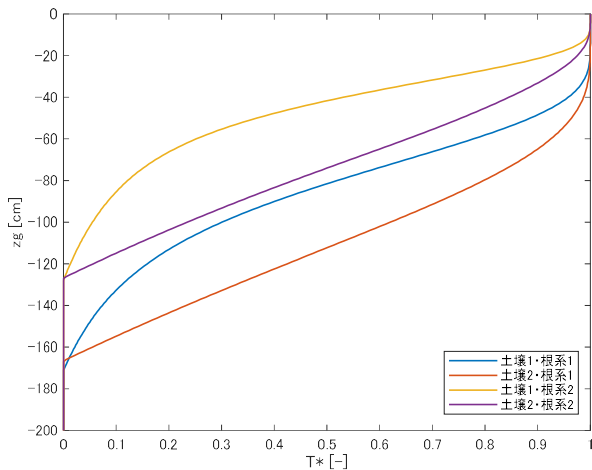


図-6 無次元根系吸水量

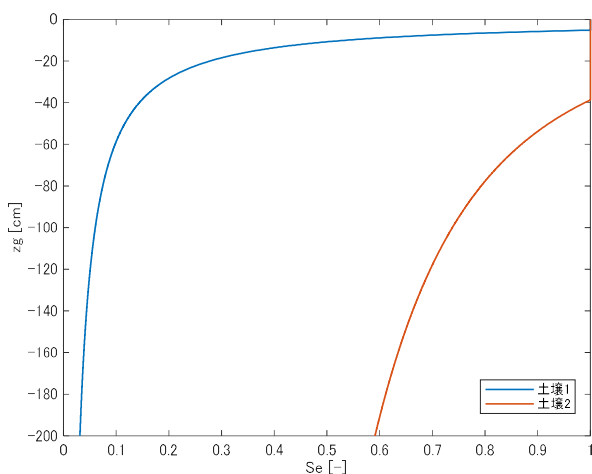


図-7 地表面の有効飽和度

#### 4. おわりに

本研究では、土砂災害のリスク評価に応用可能な、森林の蒸散量推定を行うためのモデルを構築することを目的として、土壌水分欠損量と根系吸水量を組み合わせて蒸散量を推定することを試みた。本モデルによって、地下水面位置から森林の蒸散量を推定することが可能であることが示され、また、このモデルが植生に由来する SMD の欠損増大過程を表現する手法となりうることを示された。しかし、実際には植生による吸水は定常的ではなく、樹冠を中心とした植物生理に支配されている。したがって、今後は根系による土壌水分の吸水と、樹冠による植生体内の水分の大気中への拡散とを同時に考え、その相互的關係を一体的に表現するモデルへと拡張することを試み、単木スケールだけでなく、流域スケールにおいても適用可能なモデルへと改良するとともに、モデルの有効性の検証を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) 林野庁，都道府県別森林率・人工林率（平成 29 年 3 月 31 日現在）：  
<<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h2/9/1.html>>, (accessed 2020.10.13).
- 2) 国土技術研究センター，国土を知る / 意外と知らない日本の国土：  
<<http://www.jice.or.jp/knowledge/japan/commentary/07>>, (accessed 2020.10.13).
- 3) 気象庁，土壌雨量指数：  
<<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojos/hisu.html>>, (accessed 2020.10.13).
- 4) 中山航志：土壌水分欠損量を用いた土砂災害リスク評価に関する研究，長岡技術科学大学修士論文，2020.
- 5) 金子真郷，陸旻皎：土壌水分が流出に与える影響について，土木学会関東支部新潟会，2008.
- 6) 坂井勝，取出伸夫：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 号，p. 61-73，2009.
- 7) Herkelrath, W.N., Miller, E.E. and Gardner, W.R.: Water Uptake By Plants: II. The Root Contact Model. Soil Science Society of America Journal, Vol. 41: 1039-1043, 1977.
- 8) 神田学，日野幹雄：大気—植生—土壌系モデル (NEO SPAM) による数値シミュレーション，水文・水資源学会誌，Vol. 3, No. 3, p. 37-46, 1990.
- 9) Herkelrath, W.N., Miller, E.E. and Gardner, W.R.: Water Uptake by Plants: I. Divided Root Experiments. Soil Science Society of America Journal, Vol. 41, 1033-1038, 1977.
- 10) 靱井和朗，野坂治朗，矢野友久：植物の根による吸水モデルに関する比較検討，水文・水資源学会誌，Vol. 5, No. 3, p. 13-21, 1992.