

裸地面蒸発における地下水面位置の影響に関する研究

長岡技術科学大学 非会員 ○ 小川 和紀
長岡技術科学大学 正会員 陸 旻皎

1. はじめに

地表面からの蒸発速度は気温や飽差等の気象条件である外部要因と土層内部の水分特性などの内部要因によって決まる。表層が乾燥している土壌と十分に湿潤な土壌では、同じで気象条件であったとしても蒸発速度が違うことが知られている¹⁾²⁾。

植生による蒸散と地下水面位置との間に関係があり、後者から前者を推定できる可能性が小椋(2021)³⁾によって示されており、植生のない裸地面においても地下水面位置が蒸発に影響を及ぼす可能性がある。このことについては早津(2020)¹⁾や小川・陸(2020)⁴⁾などが検討しているが蒸発効率と地下水面位置との関係の定式化やその他の土壌水分特性との関係についての検討を行った例はほとんどない。

本研究では裸地面における蒸発効率と地下水面位置との関係を明らかにするために恒温室内での実験を行って結果を得るとともに土壌水分欠損量という指標を導入することで現象の定式化を試みる。

2. 実験概要

2.1. 実験装置と実験条件

裸地面における地下水面位置の変化による蒸発効率の変化を明らかにするために図-1のような実験装置を作成した。今回土壌再現部には実際の土壌ではなく粗砂(φ mm: 1.7~2.4)・細砂(φ mm: 0.09~0.106)・シルト(φ mm: 0.063~0.075)を仮定したガラスビーズを使用した。外部条件の影響を減らすため恒温室内で実験を行った。また恒温室内でも温度や飽差が一定ではないため、自由水面の装置を作成し土壌再現部からの蒸発量 E_a [mm]と自由水面からの蒸発量 E_w [mm]の比である蒸発効率 $\beta = E_a/E_w$ として比較することで外部条件の影響を無くしている。地下水面位置は給水用ポンプで常時水循環を行い、裸地面蒸発で失われる土壌水分を給水し続けている。図-1の可動部(地下水面位置調整部)を任意の高さにすることで地下水面位置の高さを設定している。蒸発量の測定方法はメスシリンダーを用いてデジタルカメラで定点撮影し、蒸発による体積変化から蒸発量を測定した。

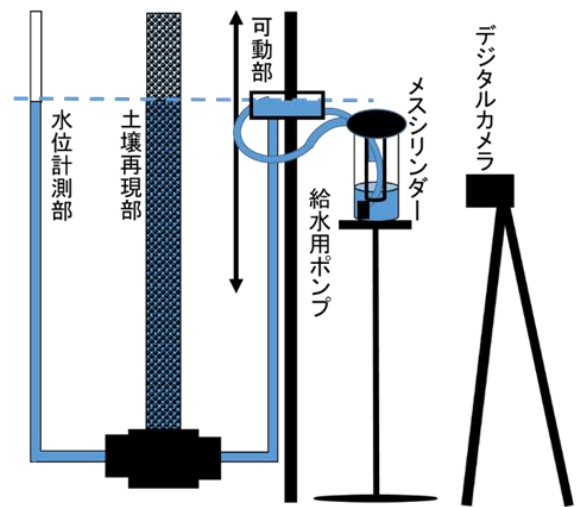


図-1 実験装置図

2.2. 実験手順

- 1) 実験装置の可動部を動かし地下水面を任意の高さに設定する。
- 2) 地下水面を変化させたことで土壌水分の再分布が起こるため、再分布が終了するまで待つ。
- 3) 60分間隔での測定を開始。三日後定点撮影を完了し測定完了

2.3. 実験結果の補正

メスシリンダー内には、給水ポンプや配線等でメスシリンダー内の水の体積が実際よりもかさ上げされているため補正を行った。

- 1) 電子天秤を用いてビーカーに 10g の水を測る。
- 2) 1)で計った水をメスシリンダーに入れてメモリを読み取る。
- 3) 1)~2)を繰り返し、かさ上げされた体積と水の実体積で比率を取り、補正係数とした。

2.4. 有効飽和度について

本研究で使用している有効飽和度は式(1)の van Genuchten (1980)⁵⁾モデルから算出している。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \psi_m)^n} \right]^m \quad (1)$$

ここで S_e は有効飽和度、 ψ_m [mm]は土壌の毛管ポテンシャル、 θ_r は残留体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 α [1/mm]、 n 、 m は水分保持曲線の形状を決定するパラメータであり α [1/mm]は空気侵入圧

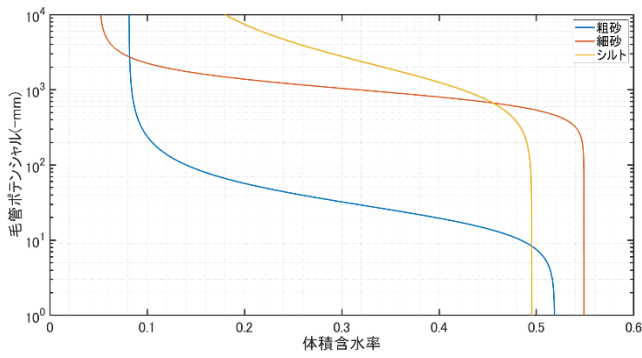


図-2 実験試料の水分特性曲線

表-1 使用した van Genuchten パラメータ

名称	θ_s	θ_r	α [mm ⁻¹]	n [-]	m [-]
粗砂	0.5187	0.0813	0.0449	2.3238	0.5697
細砂	0.5488	0.0512	0.0011	3.5222	0.7161
シルト	0.4952	0.1048	0.000731	1.8221	0.4512

ポテンシャルの逆数， n は孔隙径分布の幅を表すパラメータ， $m = 1 - 1/n$ の関係にある．今回使用する粒径の各パラメータは，西脇(2018)⁶が行った実験結果を使用した．パラメータの値を表-1に示す．実験試料の水分特性曲線を図-2に示す．

本研究では地表面から地下水面までの領域で，土壤水分が静水圧平衡に至った時の地表面の有効飽和度を使って実験結果を検討している．この有効飽和度を地表面有効飽和度 S_{e0} とする．

土壤水分が静水圧平衡に至った際，重力ポテンシャルと毛管ポテンシャルがエネルギー状態において釣り合う．土壌内の全水ポテンシャル ψ [mm]は，地表面を原点としたときの地下水面の座標である Z_g [mm]とつり合い，重力ポテンシャル U [mm]，毛管ポテンシャル ψ_m [mm]，浸透ポテンシャル ψ_c [mm]の和である．その関係は式(2)として表現される．このうち，浸透ポテンシャルは土壌中の化学物質の溶解に関わるものであるため，本研究では無視する．これは，式(3)として表現される．

$$\psi = Z_g = U + \psi_m + \psi_c \quad (2)$$

$$Z_g = U + \psi_m \quad (3)$$

$$\psi_m = Z_g - U \quad (4)$$

地表面では $U = 0$ であるため，式(4)より ψ_m [mm]= Z_g [mm]となる．よって地表面有効飽和度 S_{e0} は式(1)と式(4)によって式(5)のように表現できる．

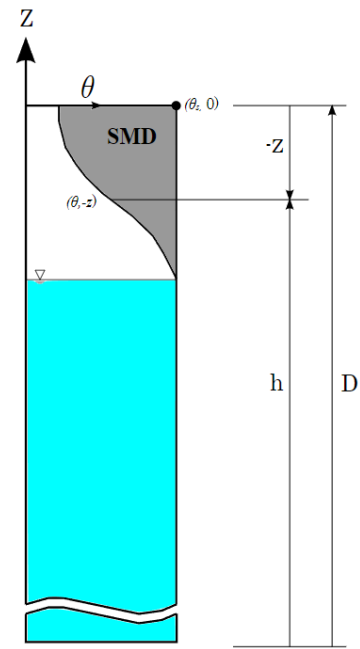


図-3 SMD の概念図

$$S_{e0} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha z_g)^n} \right]^m \quad (5)$$

2.5. 土壤水分欠損量 (SMD) について

SMD は微小な厚さ dz に対して体積含水率の飽和状態 θ_s からの不足分を考え，それを地表面から地下水面位置まで積分したものである．SMD は図-3 や式(6)のように定義される．

z [mm] は鉛直上向きを正とする座標， h [mm] は不透水層表面を原点とした地下水面の座標， D [mm] は土層の厚さである．

$$SMD = \int_{z_g}^0 (\theta_s - \theta) dz \quad (6)$$

式(5)を用いて式(6)を解くと式(7)になり式(8)が得られる．式(8)の ${}_2F_1$ は超幾何関数である．これにより地下水面位置と van Genuchten パラメータから SMD を導出することが可能である．また式(8)から，SMD は地表面を原点としたときの地下水面位置の座標のみを引数とする関数であることがわかる．そして SMD が土層の厚さが未知であっても，土壤水分量を表現することができることが分かる．式(8)を用いて計算した SMD を図-4 に示す．

$$SMD = (\theta_s - \theta_r) \int_{z_g}^0 1 - (1 + (\alpha(z_g - z))^n)^{-m} dz \quad (7)$$

$$SMD = (\theta_s - \theta_r) (z_g - z_g {}_2F_1(m, \frac{1}{n}; 1 + \frac{1}{n}; -(\alpha z_g)^n)) \quad (8)$$

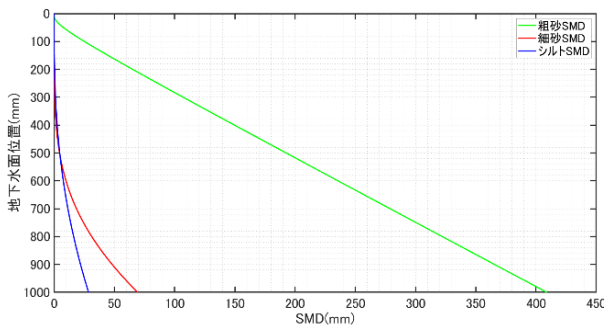


図-4 van Genuchten パラメータから求めた SMD

3. 結果及び考察

地下水面位置と蒸発効率 β の関係及び既存の蒸発効率モデル・地表面有効飽和度 S_{e0} との比較を粒径ごとに図-5, 図-7, 図-8 に示す. 今回比較に用いた蒸発効率モデルはそれぞれ Barton (1974)⁷⁾, Deardorff (1978)⁸⁾, Lee-Pilelke (1992)⁹⁾, Philip (1957)¹⁰⁾ Jacquemin-Noilhan (1990)¹¹⁾, Komatsu (2002)¹²⁾である. 比較に用いた蒸発効率モデルは地表面有効飽和度 S_{e0} と同様に土壤の体積含水率などの内部条件のみを考慮したモデルを選定した. また van Genuchten モデルパラメータから求めた SMD と蒸発効率 β の比較を図-8 に示す.

図-5 より粒径の粗い粗砂では地表面有効飽和度 S_{e0} は比較した蒸発効率モデルより蒸発効率 β と強い相関が見られた. 図-6, 図-7 より粒径の小さな細砂・シルトでもデータが少ないが地表面有効飽和度 S_{e0} は比較した蒸発効率モデルより蒸発効率 β と強い相関が見られた.

図-5, 図-6, 図-7 より比較した蒸発効率モデルは粒径の大小によって精度にばらつきがあることが明らかになった. しかし, 地表面有効飽和度 S_{e0} を用いた予測では粒径や孔隙分布に関するパラメータを含んでいることから粒径の大小による精度のばらつきは見られなかったと考えている.

図-8 より粒径によらず SMD と蒸発効率 β には相関が見られなかった. SMD と地表面有効飽和度 S_{e0} はともに地下水面位置の関数であるため, SMD を無次元化し, 次元を揃えることで何らかの関係が見られると予想される.

4. 結論

1. 粒径の大小に関わらず地表面有効飽和度と蒸発効率 β には相関が見られた.

2. 比較した蒸発効率モデルは粒径の大小によって精度にばらつきがあることが明らかになった.
3. 地表面有効飽和度 S_{e0} を用いた予測では粒径や孔隙分布に関するパラメータを含んでいることから粒径の大小による精度のばらつきは見られなかった.
4. van Genuchten モデルパラメータと地下水面位置を把握することで SMD を算出することが可能であることを示した.
5. SMD と蒸発効率 β には相関が見られなかった.

5. 展望

1. すべての粒径である程度相関が見られたがデータがまだ不十分であるため, 実験データを増やし検討を行う必要がある.
2. 粗砂に関しては蒸発の第三段階が見られた100mm まで実験を行ったがさらに地下水面位置を下げ, 地表面の乾燥が進んだ場合でも地表面有効飽和度や既存の蒸発効率が高い精度で適応可能か検討する必要がある.
3. 現在土壤水分の再分布完了をメスシリンダー内の減少量で判断しているが実際に完了しているか不明であるため, 改善・検討が必要である.
4. 比較した蒸発効率モデルでは粒径によって蒸発効率の予測精度にばらつきが見られたが地表面有効飽和度 S_{e0} を使った予測では粒径によらず, 相関が見られたことから任意の地点の van Genuchten モデルパラメータと地下水面位置を把握することができれば粒径によらず蒸発効率や蒸発量を今回比較した蒸発効率モデルに比べて高い精度で推定することが可能になると考えられる.
5. 今後 van Genuchten モデルパラメータと地下水面位置を用いた裸地面蒸発効率の定式化を試みるため, 地表面有効飽和度 S_{e0} から蒸発効率を算出するために必要な補正項やパラメータを検討する必要がある.

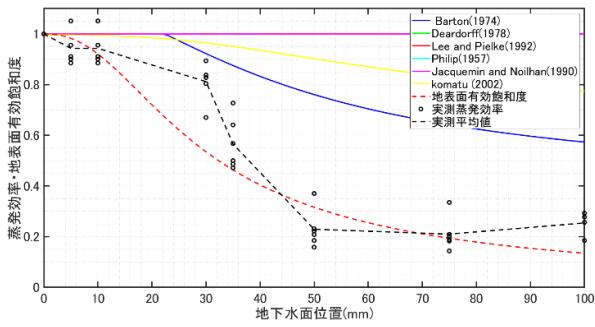


図-5 粗砂の蒸発効率モデル・地表面有効飽和度と実験結果の比較

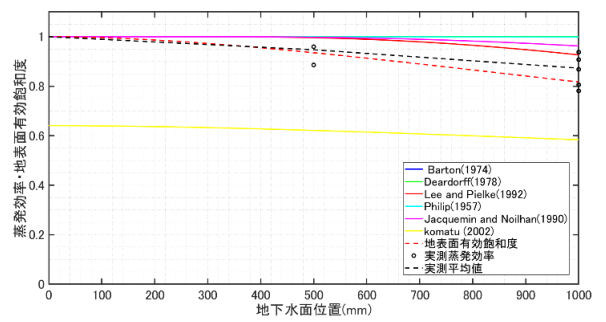


図-7 シルトの蒸発効率モデル・地表面有効飽和度と実験結果の比較

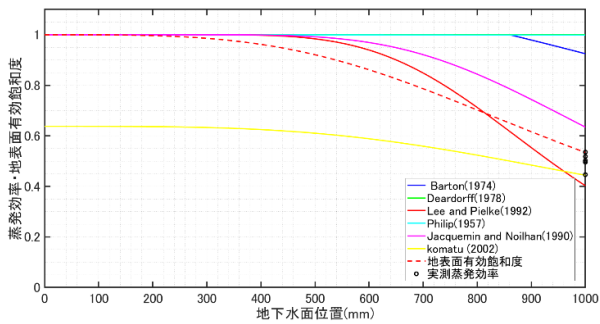


図-6 細砂の蒸発効率モデル・地表面有効飽和度と実験結果の比較

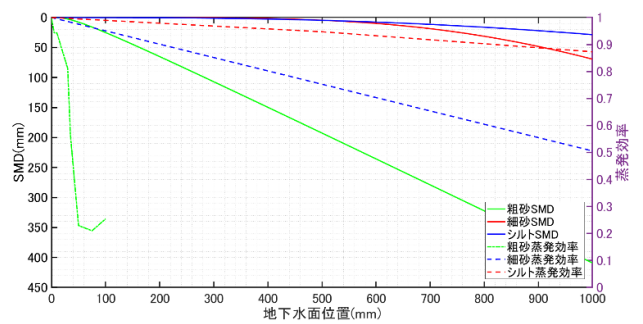


図-8 計算 SMD と実験結果の比較

参考文献

- 1) 早津諒介：地下水面の位置が及ぼす地表面蒸発への影響に関する実験的研究，長岡技術科学大学修士論文，2020.
- 2) M. I. ブディコ（内嶋善兵衛訳）：地表面の熱収支，PP.175-178，成山堂書店，2010.
- 3) 小椋崇弘：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，長岡技術科学大学修士論文，2020.
- 4) 小川和紀，陸旻皎：地下水面位置と地表面蒸発の関係性に関する実験的研究，第38回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集，2020.
- 5) van Genuchten. M.T. : A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Science Society of America Journal, PP.892-898.1980.
- 6) 西脇和希：土壌水分保持特性が土壌の含水率測定に及ぼす影響，長岡技術科学大学学士論文，2018.
- 7) I.J.Barton : Barton I J : A parameterization of the evaporation from non-saturated surfaces, Journal of Applied Meteorology, PP43-47,1979.
- 8) J. W. Deardorff : efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation, journal of geophysical research, VOL.83, PP.1889-1903, 1978.
- 9) T. J. Lee ・ R. A.Pielke : estimating the soil surface specific humidity, journal of geophysical research, VOL.31, PP480-484, 1992.
- 10) J.R.philip : Evaporation, and moisture and heat fields in the soil, VOL.14, PP.354-366, 1957.
- 11) B. Jacquemin ・ J. Noilhan : sensitivity study and validation of a land surface parameterization using the hapexmobility data set, Bound-Layer Meteor, VOL.52, PP93-134, 1990.
- 12) Teruhisa. S. Komatsu : Toward a Robust Phenomenological Expression of Evaporation Efficiency for Unsaturated Soil Surfaces, Journal of Applied Meteorology, VOL.42, PP1330-1334, 2002