

裸地における蒸発効率と地下水面位置の関係について

地球環境工学研究室 小川 和紀
指導教員 陸 旻皎

1. 背景・目的

蒸発効率は主に表層数 cm の平均的な体積含水率で表現される事が多い。地下水面位置を固定した場合に地表面の体積含水率、あるいは地表面有効飽和度が蒸発効率をどこまで表現できるかについて検討が十分ではない。本研究では、地下水面位置を任意の位置に固定可能な装置を作成し、恒温室を用いた恒温条件下で地下水面を任意の位置に変化させることで任意の地下水面での蒸発量を計測した。この実験結果を自由水面からの蒸発量で除することで蒸発効率 β とした。これにより地下水面の変化による蒸発抑制を実験的に検討及び考察することができる。また、粒径の異なる粗砂、細砂、シルトの三種類の試料を用いることで粒径の違いによる影響を検討する。そして、0.0 m/s と 3.0 m/s の異なる風速条件下で実験を行い、風速依存性も検討した。実験から得られた蒸発効率と既存の蒸発効率式及び地表面有効飽和度 S_{e0} を蒸発効率式として扱った計算結果を比較することで地表面有効飽和度 S_{e0} を蒸発効率として使用することへの適合性を検討した。

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地下水面を任意の位置で固定にする実験装置を作成した。実験装置の概略図を図-1に示す。今回土壌再現部には実土壌ではなく粗砂・細砂・シルト (ϕ : 1.7~2.0, 0.09~0.106, 0.063~0.075 mm) を仮定したガラスビーズを使用した。また、ポテンシャル蒸発量として水のみが入った同様の装置も使用した。外部条件の影響を減らすため恒温室内で実験を行った。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]の比を蒸発効率 $\beta=E_a/E_w$ として比較している。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。蒸発量の測定方法は装置

内に水を供給しているメスシリンダー内の水の体積変化をデジタルカメラで定点撮影することで蒸発量を測定した。また、外部条件は室温 15°C、水平風速 0.0 m/s と 3.0 m/s の 2 種類で行った。

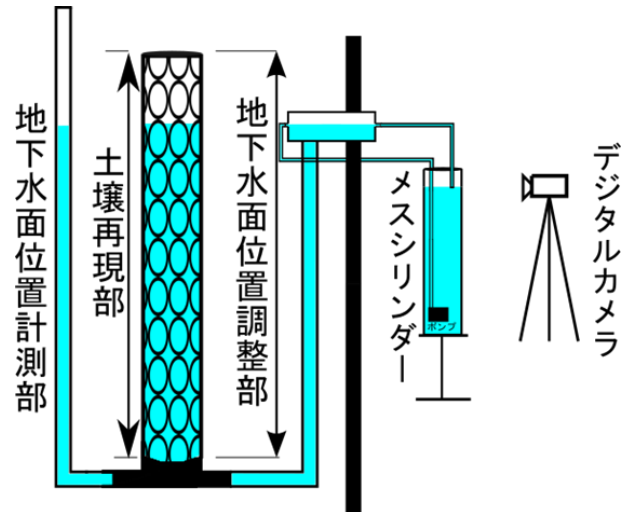


図-1 実験装置

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、測定完了とする。

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。補正値を表-1に示す。

- 1) メスシリンダーのメモリを読み取る。
- 2) 電子天秤を用いて 10.0g ずつの水を測る。
- 3) 10.0g の水をメスシリンダーに入れてメモリを読み取る。
- 4) 1)~3)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。

表-1 メスシリンダー補正係数

	粗砂	細砂	シルト	自由水面
補正值	1.43	1.37	1.48	1.59

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)¹⁾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)²⁾が行った実験結果を使用した. パラメータの値を表-2に示す.

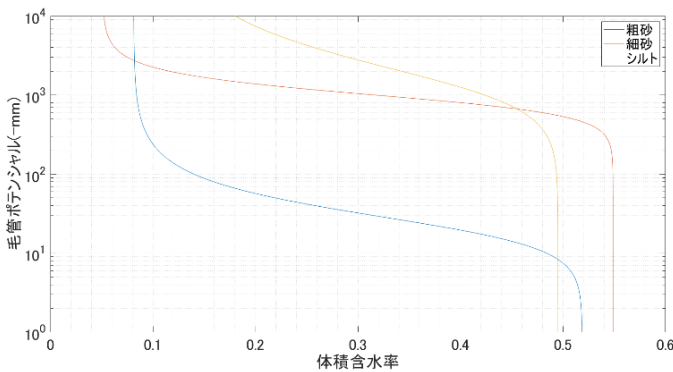


図-2 実験試料の水分特性曲線

表-2 使用した van Genuchten パラメータ

名称	$\theta_s[-]$	$\theta_r[-]$	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

2.5. 地表面有効飽和度について

本研究では地表面から地下水面までの領域で, 土壌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. 土壌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]の和になる. その関係は式(2)として表現される

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

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

地表面では $U = 0$ であるため, 式(3)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(3)によって式(4)のように表現できる.

$$S_{e0} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha z_g)^n} \right]^m \quad (4)$$

2.6. 土壌水分欠損量 (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.

$$SMD = \int_{z_g}^0 (\theta_s - \theta) dz \quad (5)$$

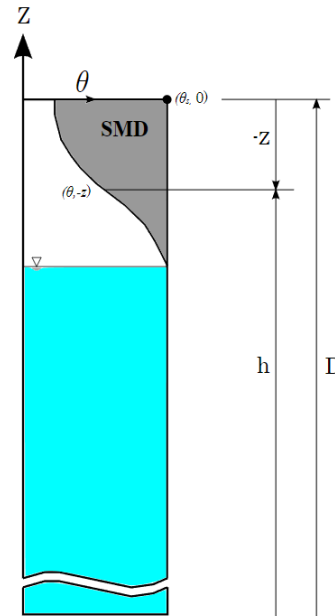


図-3 : 厚さが不明な土層の SMD の定義

式(4)を用いて式(5)を解くと式(6)になり式(7)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、土壌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。

$$SMD = (\theta_s - \theta_r) \int_{z_g}^0 1 - (1 + (\alpha(z_g - z))^n)^{-m} dz \quad (6)$$

$$SMD = (\theta_s - \theta_r)(z_g - z_g {}_2F_1(m, \frac{1}{n}; 1 + \frac{1}{n}; -(az_g)^n)) \quad (7)$$

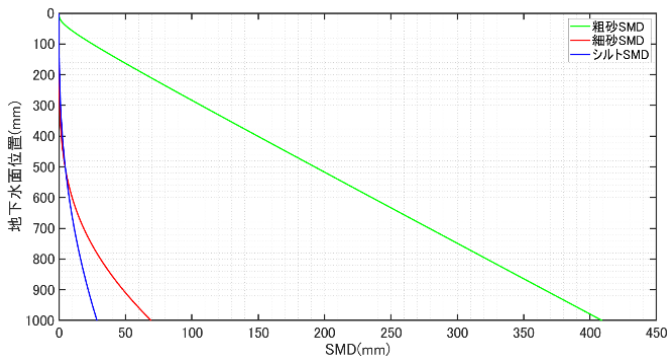


図-4 van Genuchten パラメータから求めた SMD

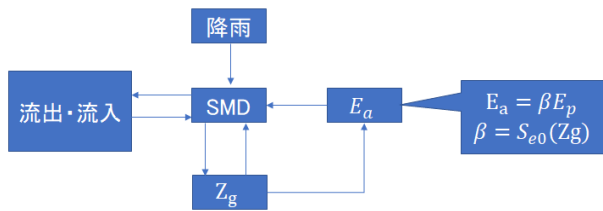


図-5 SMD モデル概略図

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} の計算結果との比較結果を図-6, 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)³⁾, Deardorff(1978)⁴⁾, Lee-Pielke(1992)⁵⁾, Philip(1957)⁶⁾, Jacquemin-Noilhan(1990)⁷⁾, Komatsu (2002)⁸⁾である。また、無風条件下の蒸発効率実験結果と各モデルの計算値を RMSE で評価した結果を表-3 に示す。

結果は風速の違いによって三種類の試料で特徴的な挙動が見られた。無風条件の粗砂を対象とした場合、地表面有効飽和度 S_{e0} は地下水面位置 100 mm 未満までの領域では蒸発効率と非常に近い挙動を示している。しかし、さらに地下水面位置を下げた場合、蒸発効率は 0.2 付近を横ばいに推移しているが地表面有効飽和度 S_{e0} は下がり続けていることから無風条件下においては蒸発の第一段階及び第二段階を十分に表現できる

可能性が高いことを示した。第三段階については地表面有効飽和度 S_{e0} の低含水領域に補正を施すことで表現できると考えられる。無風条件の粗砂を対象とした場合、本実験で評価した蒸発効率モデルの中では地表面有効飽和度 S_{e0} , Barton(1974) の蒸発効率モデルは急激な蒸発効率の減少を表現できていることが確認された。また、地表面有効飽和度 S_{e0} 以外のモデルでは蒸発の第三段階を実験値よりも高含水率で推移すると表現するといった特徴的な挙動が確認された。

無風条件の細砂を対象とした場合、地下水面位置 750 mm を除いた計測範囲では蒸発効率と非常に近い挙動を示した。地下水面位置 750 mm で蒸発効率が大幅に減少しているが他の試料で同一の現象が見られないことから細砂特有の挙動又は実験条件が異なっていることが考えられる。このことから 1000 mm 程度の浅い地下水面かつ無風条件下においては蒸発効率を表現できる可能性が高いことを示した。無風条件の細砂を対象とした場合、地表面有効飽和度 S_{e0} , Jacquemin and Noilhan(1990), Lee and Pielke(1992) の蒸発効率モデルは緩やかな蒸発効率の減少を表現できていることが確認できる。

無風条件のシルトを対象とした場合、地下水面位置 500 mm 以下の領域では蒸発効率と非常に近い挙動を示している。しかし、地下水面を 500 mm 以上下げる場合は、下げるにつれて蒸発効率と地表面有効飽和度 S_{e0} の差は大きくなっている。無風条件のシルトを対象とした場合、地表面有効飽和度 S_{e0} , Jacquemin and Noilhan(1990), Lee and Pielke(1992) の蒸発効率モデルは非常に緩やかな蒸発効率の減少を表現できていることが明らかになった。これらのことから地表面有効飽和度 S_{e0} は本実験で使用した 3 種類の試料に対して 1000 mm 程度の浅い地下水面かつ無風条件下においては蒸発効率を表現できる可能性が高いことを示した。風速 3.0 m/s 条件下の粗砂を対象とした場合、地下水面を 20 mm 以上下げた場合、蒸発効率は蒸発の第三段階に入り、緩やかに減少することが明らかになった。また、地下水面 0 mm ではすべてのモデルで近い値であるが、地下水面 20mm ではすべてのモデルが過大評価していることが確認できる。風速 3.0 m/s 条件下の細砂及びシルトを対象とした場合、全ての蒸発効率モデルで地下水面 0mm から蒸発効率を表現出来ていないことが確認できる。このことから地表面有効飽和度 S_{e0} を

外部条件の縛りなく、蒸発効率として使用するために式に外部条件によって補正を加える必要があると考えられる。また、粒径の小さい程外部条件の変化に敏感であることも明らかとなった。これは粒径が細かいほど空隙径が小さく透水係数が小さいことで地下水面からの水分輸送が困難であるため、蒸発量に地下水面からの供給が間に合わず表層に乾燥帯が形成されることが原因であると考えられる。

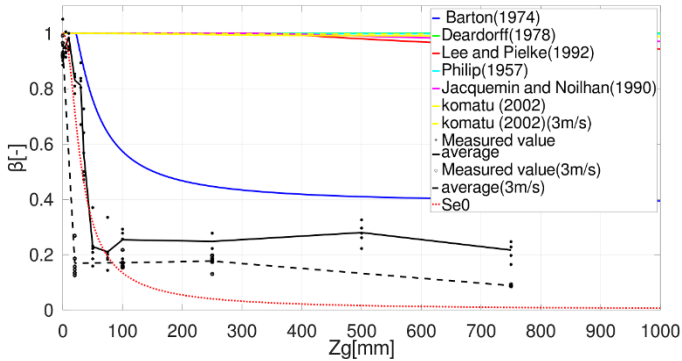


図-6 粗砂の蒸発効率モデル・地表面有効飽和度と実験結果の比較

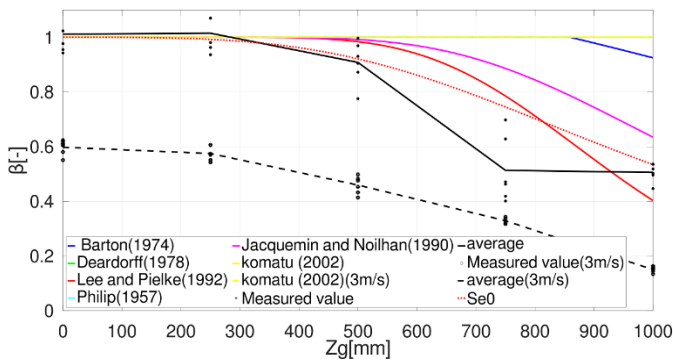


図-7 細砂の蒸発効率モデル・地表面有効飽和度と実験結果の比較

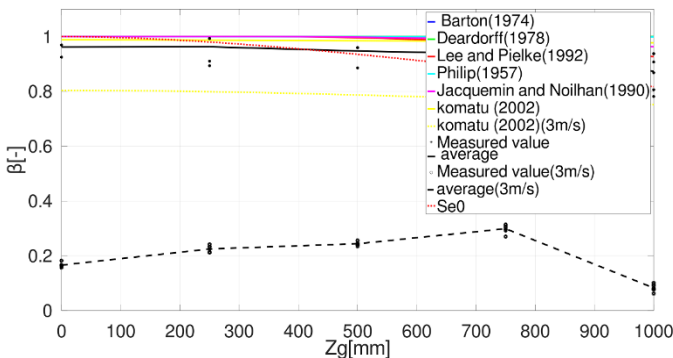


図-8 シルトの蒸発効率モデル・地表面有効飽和度と実験結果の比較

4. 結論

1. S_{e0} は本実験で使用した3種類の試料に対して1000 mm程度の浅い地下水面かつ無風条件下においては蒸発効率を表現できる可能性が高いことが明らかになった。
2. S_{e0} を外部条件の縛りなく、 β として使用するためには式に外部条件による補正を加える必要があることが明らかになった。
3. 粒径の小さい程外部条件の変化に敏感であることが明らかとなった。

5. 今後の展望

1. 本研究では静水圧平衡に至り、土壌水分の再分布が完了したか給水部の水量の増加で判断しているが、地下水面を深く設定した場合は緩やかに給水部の水量が増加するため判断が難しい。そのため、張力計を用いて判断する等の改善の余地があると考えられる。
2. 本研究では粒径の異なる3種類のガラスビーズを使用したがる、粒径区分で粘土に相当する試料は扱っていないことから粘土試料への適合の検討が必要であると考えられる。
3. 透水係数は粒径だけでなく、土粒子の形状や配列によって変化することから実際のフィールドで使用することは、難しいと考えられる。そのため、実際のフィールドで使用するには実土壌での実験やフィールド上での水収支法による検討が必要になると考えられる。
4. 乾燥帯の形成と気象条件である外部条件と土壌特性や地下水面位置等の内部条件の関係についてさらなる検討が必要である。特に大気側の要求量と土壌側の供給量に焦点を当て、検討する必要がある。
5. ポテンシャル蒸発量や土壌特性によって決まる式の適用範囲のしきい値の検討も必要であると考えられる。

6. 参考文献

- 1) 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.
- 2) 西脇和希 : 土壤水分保持特性が土壤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.
- 3) I.J.Barton : A parameterization of the evaporation from non-saturated surfaces, Journal of Applied Meteorology, PP43-47,1979.
- 4) 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
- 5) T. J. Lee • R. A.Pilelke : estimating the soil surface specific humidity, journal of geophysical research, VOL.31, PP480-484, 1992.
- 6) J.R.philip : Evaporation, and moisture and heat fields in the soil, VOL.14, PP.354-366, 1957.
- 7) B. Jacquemin • J. Noilhan : sensitivity study and validation of a land surface parameterization using the hapexmobily data set, Bound-Layer Meteor, VOL.52, PP93-134, 1990.
- 8) Teruhisa. S. Komatsu : Toward a Robust Phenomenological Expression of Evaporation Efficiency for Unsaturated Soil Surfaces, Journal of Applied Meteorology, VOL.42, PP1330-1334, 2002

表-3 無風条件下実験の RMSE

評価指標	土性区分	S_{e0}	barton	Dearoff	Jacquemin	Philip	Lee	komatsu
RMSE[-]	粗砂	0.182	0.267	0.565	0.561	0.561	0.558	0.562
	細砂	0.130	0.300	0.322	0.196	0.321	0.155	0.322
	シルト	0.08	0.09	0.09	0.07	0.08	0.07	0.07