

地下水が地表面温度に及ぼす影響に関する熱・水分移動連成解析

大阪大学大学院 正会員 阿部信晴
大阪大学大学院 学生会員 ○水井裕瑛

1. はじめに

これまでヒートアイランド問題に関係して、日射を受ける地表面温度の挙動に関する研究が種々行われてきた。しかし、地盤内部の状態と地表面温度とを関連づけて行われた研究は少なく、両者の関係性について依然明らかでない点が多い。そこで本研究では、地表面において熱放射を受ける地盤の熱・水分の挙動に関して移動連成解析を行い、その結果に基づき地下水と地表面温度の関係について考察を行う。

2. 液状水・蒸気状水・熱移動の移動連成解析モデル

解析モデル 地盤の温度は供給・放出される熱量と水分の挙動、特に蒸発による潜熱効果に大きく関係している。そこで本研究は、乾燥一不飽和地盤を対象として、鉛直一次元液状水、蒸気状水および熱移動連成モデルを用いて解析を行う。モデルの基礎方程式となる液状水・蒸気状水・熱エネルギーの保存方程式は未知量をそれぞれ体積含水率 θ 、蒸気圧 P_v 、温度 T として、以下のようになる¹⁾。

$$\text{液状水} \quad \rho_l \left(\frac{\partial \theta}{\partial \psi_m} \right) \frac{\partial \psi_m}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_l K K_{rl} g}{v} \left(\frac{\partial \psi_m}{\partial z} + 1 \right) \right] - E_v \quad (1)$$

$$\text{蒸気状水} \quad \frac{\partial (P_v(n-\theta)/R_v \bar{T})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{atm} \xi \eta (n-\theta) \frac{\partial (P_v/R_v \bar{T})}{\partial z} \right] + E_v \quad (2)$$

$$\text{熱} \quad \frac{\partial (\rho C) T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} - (\rho_l C_l) V_l T \right) - L E_v \quad (3)$$

ここに、 ψ_m :マトリックポテンシャル(cm)、 K :固有浸透係数(cm^2)、 K_{rl} :相対透水係数、 n :間隙率、 η :屈曲度、 ξ :蒸発面補正係数、 (ρC) :地盤の熱容量(cal/K/cm^3)、 λ :熱伝導率(W/m/K)、 V_l :液状水の流速(cm/s)、 L :蒸発潜熱(cal/g)。さらに内部蒸発量 E_v (g/cm^3)は次のように定式化される。

$$E_v = (n-\theta) K_G (P_{v\text{sat}} - P_v) \quad (\theta \geq \theta_c) \quad (4)$$

ここに、 K_G :内部蒸発係数(s/cm^2)、 θ_c :限界体積含水率(=風乾状態の土の体積含水率)である。地表が乾燥している場合は地盤内部で蒸発が起こる。

解析条件 解析領域は地表面から地下水位までとする。地表面に相当する上部境界条件としては大気温度・相対湿度の値を与え、地下水面に相当する下部境界条件には蒸気圧勾配一定、温度 15°C 一定条件を与える。地盤は、砂質土と粘性土の2種類、地下水位を地表面より -0.5m 、 -1.0m 、 -2.0m 、 -4.0m とする4パターンで計8ケースの解析を行う。解析パラメータは表-1に示すとおりで、そのうち短波放射強度 R_G 、大気温度・相対湿度は日周期変動する値として与える。なお、解析期間は10日間とする。

初期条件 温度、蒸気圧の初期値はそれぞれ全域にわたって 15°C 、 1706Pa ($=15^\circ\text{C}$ における飽和蒸気圧)とする。初期水分状態(図-1)については、地下水位が地盤内の熱・水分にどのような影響を与えるかに着目するため毛管水によるものに限定し、毛管上昇高は砂質土地盤が 0.3m 、粘性土地盤は 3.0m とする。粘性土地盤で地下水位が -3.0m 以浅のケースについては底部を基準として解析領域分の値を当てはめる。

表-1 解析パラメータ

	砂質土	粘性土
限界体積含水率 θ_c	0.04	0.12
固有浸透係数 K [cm^2]	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-13}
間隙率 n	0.4	0.6
土粒子密度 ρ_s [g/cm^3]	2.7	2.85
マトリックポテンシャル ψ_m (θ) [cm]	$-10^{-1} \sim -10^{-2}$	$-10^{-2} \sim -10^{-6}$
熱伝導率 λ (θ) [$\text{W/m}^\circ\text{C}$]	$0.7 \sim 2.2$	$0.7 \sim 1.5$
相対透水係数 K_{rl} (θ)	$10^0 \sim 10^{-9}$	$10^0 \sim 10^{-8}$
水の密度 ρ_l [g/cm^3]	1.0	1.0
水の比熱 C_l [$\text{cal/g}^\circ\text{C}$]	1.0	1.0
土粒子の比熱 C_s [$\text{cal/g}^\circ\text{C}$]	0.26	0.26
重力加速度 g [cm/s^2]	980	980
水蒸気の気体定数 R_v [$\text{cal/g}^\circ\text{C}$]	460000	460000
屈曲度 η	0.67	0.67
蒸発面補正係数 ξ	2.0	2.0
内部蒸発係数 K_G [s/cm^2]	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}
地表-大気間の熱伝達係数 H [$\text{cal/s/cm}^2/^\circ\text{C}$]	1.43×10^{-4}	1.43×10^{-4}
境界厚さ δ [cm]	2.0	2.0
大気温度 T_{air} [$^\circ\text{C}$]	$22.5 \sim 30.8$	$22.5 \sim 30.8$
大気の相対湿度 RH_{air} [%]	$46 \sim 76$	$46 \sim 76$
短波放射強度 R_G [W/m^2]	$0.0 \sim 968.9$	$0.0 \sim 968.9$
長波放射強度 L [W/m^2]	410.0	410.0
アルベド Al	0.4	0.4
水蒸気の拡散係数 D_{atm} ($\bar{T}$) [m^2/s]	$5.82 \bar{T} \times 10^{-11}$	$5.82 \bar{T} \times 10^{-11}$
[$\bar{T}$:絶対温度 [K]]		

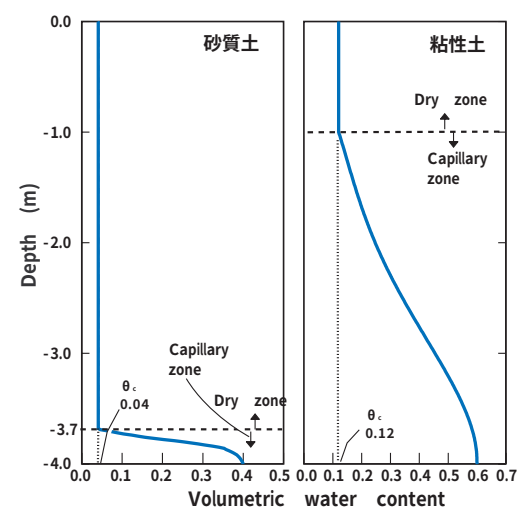


図-1 初期水分状態

キーワード 地表面温度、地下水、ヒートアイランド、蒸発、
連絡先 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 TEL 06-6879-7626

3. 解析結果および考察

図-2 は地下水位-1.0m のケースにおける砂質土地盤と粘性土地盤それぞれの計算 10 日目の体積含水率・蒸気圧・温度および蒸発量分布の日変化を表したものである。体積含水率以外の値には日周期で大きく変動している。また蒸発量分布をみると、砂質土地盤と粘性土地盤ともにある部分で卓越しているが、数値としては地表で主に蒸発が起こっている粘性土地盤の値が砂質土地盤に比べ約 10^2 倍と非常に大きく、潜熱による温度低下の効果が大きいと言える。次に

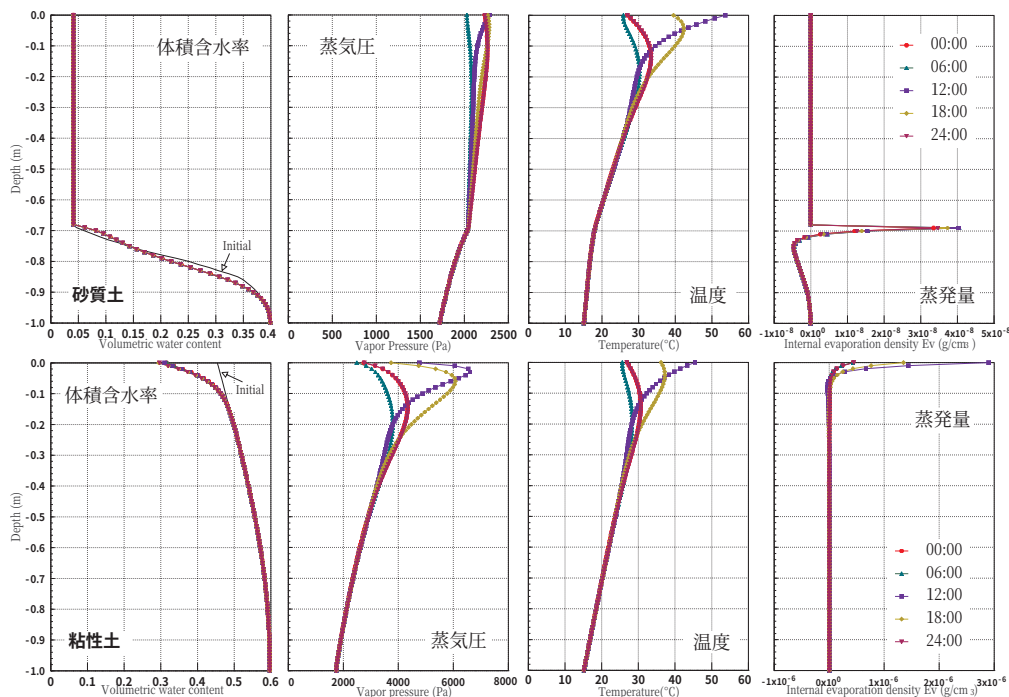


図-2 計算 10 日目における体積含水率・蒸気圧・温度および蒸発量分布

粘性土地盤の場合の蒸気圧分布であるが、温度上昇と蒸発作用により地表面付近で大きな値となっている。ただし、昼間の温度・蒸発量はともに地表で最高値であるのに対して蒸気圧は地表で最大値となっていない。この理由は蒸発により生じた水蒸気が十分な速度で大気へと放出されるためと考えられ、このことから蒸発作用が地表面のみでなく下部のある程度の範囲で起こっていることが分かる。他の 6 つのケースについても、程度の差はあるものの同様の傾向がみられた。図-3 は地表面温度の変化を示したものである。砂質土地盤はケース間の差があまりみられないが、粘性土地盤は昼間の地表面温度にケース間の明確な差が現れている。特に地下水位-2.0m のケースは、3 日目までは-1.0m のケースとの差が 2、3℃程度であったのが、4 日目以降は徐々に差が開き 10 日目には 6℃の差となっている。これは地表付近の初期水分量が少ないため徐々に地表から乾燥し、蒸発の卓越している部分が地盤内部へと移っているためと考えられる。図-4 は全ケースについて 10 日目の地表面最大温度をまとめたものである。粘性土地盤の地下水位-0.5、-1.0m のケースは 10 日間地表面での蒸発が保たれたことと地下水面が高いことから、地表での蒸発が起こっていない砂質土地盤に比べ最大で約 8℃の差が生じた。

4. まとめ

地下水が地表面温度に与える影響について解析による検討を行った。本研究では地盤の保持している水分を毛管水によるものに限定し解析を行ったが、その結果から地下水位が高い地盤には蒸発作用と地下水位の影響により地表の温度上昇を低減させる効果があると推察される。

参考文献

1) 高野保英・福原輝幸・佐藤邦明(1999)：乾燥—不飽和土壌中の熱・液状水・蒸気状水移動の同時連成解析、土木学会論文集 No. 635/II-49、13-29、1999.1

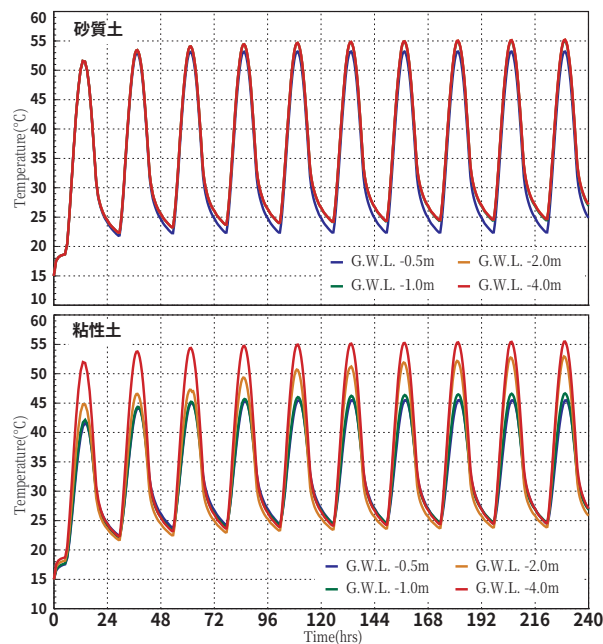


図-3 地表面温度経時変化

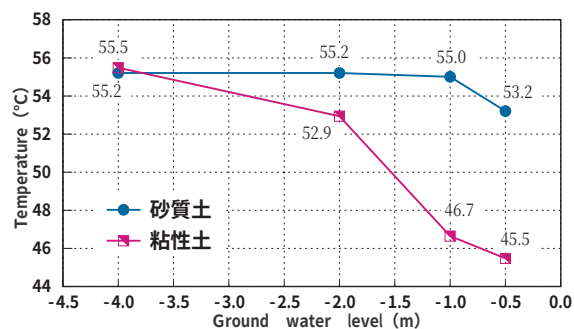


図-4 各ケースの地表面温度最大値