

砂地地盤における地温が浸透に及ぼす影響

EFFECT OF SOIL TEMPERATURE ON PERCOLATION IN SANDY GROUND

河合 隆行¹・安田 裕²・多田 泰之³・松岡 真吾⁴・井上 光弘⁵
Takayuki KAWAI, Hiroshi YASUDA, Yasuyuki TADA, Shingo MATSUOKA,
and Mitsuhiro INOUE

¹正会員 農博 鳥取大学 プロジェクト研究員 乾燥地研究センター (〒680 鳥取県鳥取市浜坂1390)

²正会員 Ph. D 鳥取大学 准教授 乾燥地研究センター (〒680 鳥取県鳥取市浜坂1390)

³正会員 農博 森林総合研究所 研究員 水土保持研究領域 (〒305 茨城県つくば市松の里1)

⁴農博 日本工営株式会社 環境部 (〒102 東京都千代田区麹町4-2 共同ビル5階)

⁵農博 鳥取大学 教授 乾燥地研究センター (〒680 鳥取県鳥取市浜坂1390)

To evaluate the effect of the soil temperature on percolation in sandy soil, We carried out field observations and numerical simulation of the observed data. The observation was performed at a sand dune in the Arid Land Research Center, Tottori Univ. Soil water content and temperature were measured down to 7.5 m depth from the soil surface. The results showed that percolation rate during rainfall was about double the rate during snowfall. The difference in the percolation rate between rainfall and snowfall events seems to be caused by the temperature dependence of water viscosity. The numerical calculation considering the temperature dependence of the kinetic viscosity showed much better fit with observed results than the calculation ignoring the temperature dependence. These results indicate that the apparent hydraulic conductivity influenced by soil temperature is important to analyze percolation phenomena in sandy soil.

Key Words : Percolation rate , Temperature dependence, Sandy soil

1. はじめに

一般的に砂地地盤は植物等による被覆度が低く、他の土壌と比較して土壌水分量も少ないため、地表面温度の日および年変動が大きい¹⁾。この地表面温度の振幅により、鉛直方向の温度分布の日・年変動も比較的大きく、砂地地盤における水移動現象は地温の影響を多大に受けていると考えられている²⁾。

地温を考慮した砂地地盤の水移動に関する既往の研究は、蒸発散を対象としたものが多い³⁾⁴⁾。これは、蒸発散という現象において、熱収支解析が重要な役割を果たすからである。一方、蒸発散とは逆向きのフラックスである浸透現象においては、地温を考慮した研究はあまり行われていない。特に、数m以深に及ぶ地下深部までの浸透に関しては、砂地地盤ではほとんど研究されていないのが現状である。地中深部までの実際の浸透現象を把握することは、比較的均一な土壌からなる砂地地盤においても観測手法や現場の条件等の制限が多いため、容易ではないからである。

既往の砂地浸透に関する研究では、大型カラムを用いた浸透解析や^{5),6)}、作物根圏までの灌漑水浸透実験⁷⁾等が行われており、ピストン流による浸透形態の確認や浸透波の移動速度などの知見が得られている。また、近年では砂表面の撥水性や選択浸透流^{8),9)}等の研究も行われ、地表面付近の詳細な水移動現象が明らかになっている。しかし、それらの研究においても、砂地地盤の地温が浸透現象に及ぼす影響には言及されていない。

透水性の高い砂地地盤では、地表面付近で生じた汚染等の問題が急速に地下深部まで拡大する。適切な対策を講じるためにも、実際の砂地地盤で生じている浸透現象を詳細な観測によって明らかにし、また、そのメカニズムを解明することが求められている。そこで本研究では、地表面から地下深部までの一連の浸透現象と地温との関係を、実際の砂地地盤での観測結果を用いて確認した。また、観測から得られた知見を用いて、温度を考慮した浸透シミュレーションを行い、地温が浸透に及ぼす影響についての考察を行った。

2. 研究方法

(1) 現地観測

観測は鳥取大学乾燥地研究センター内の、砂移動の少ない平坦な裸地砂丘で行った。観測項目は地表面から深度7.5 mまでの土壌水分および地温の鉛直プロファイルである。観測期間は2003年4月から2004年7月までである。

土壌水分の観測にはDELTA - T社のTheta Probe—ML 2型水分計を、地温の観測にはT型熱電対を用いた。観測深度はそれぞれ、0.2, 0.4, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.1, 6.3, 7.5 mの計10深度である。水分計及び熱電対の埋設には吸引掘削法¹⁰⁾を用い、5分毎の瞬時値をロギングした。なお、観測地点の平均的な地下水位はGL - 10 mから11 mである。また、不飽和帯は全て砂のみで構成されていることを確認している。

(2) 浸透シミュレーション

土壌水分の浸透シミュレーションには、土中水分移動予測の汎用プログラムであるHYDRUS - 2D (ver.2.008) を利用した。シミュレーションの際の土層モデルには、鉛直浸透の他に側方浸透が発生した場合を考慮して、横2.0 m, 深さ8.0 mの2次元砂層を想定した。土層モデル内には地下水面は設定せず、下部境界条件は浸透水が自由排水されるように設定した。また、上部境界条件には、降水時には実際の降水フラックスを1時間単位で、それ以外の期間においては、Three - Layer Soil Model¹¹⁾により計算された蒸発フラックスを1時間単位で与えた。

本研究では、シミュレーションの際の土壌水分特性としてvan Genuchtenによるモデルを用いた。表 - 1に土壌パラメータ、 θ_s , θ_r , α , n , K_s , ρ_b , およびシルト含有率の値を示す。ここで、 θ_s , θ_r , α , n はvan Genuchten¹²⁾による水分特性曲線モデルのパラメータであり、 K_s は温度補正時 (15°C) の飽和透水係数、 ρ_b は砂の乾燥密度、シルト含有率は土壌に占めるシルトの割合である。 θ_s , θ_r , α , n の値は、観測地の砂丘表層からサンプリングした砂の ρ_b , シルト含有率を用いて、Schaap, et al.¹³⁾の砂土壌モデルから算出した。ここで算出した θ_s , θ_r , α , n の値は排水過程のものである。また、今回のシミュレーションでは均一土壌内の鉛直浸透を条件としたため、水分特性曲線のヒステリシスは考慮していない。計算の際の砂層の初期水分条件には、現地

観測の結果より得られた年間平均水分量である $0.08 \text{ m}^3 / \text{m}^3$ の体積含水率を、全層均一に与えた。

3. 結果と考察

(1) 観測結果と考察

図 - 1に夏期・降雨時の、図 - 2に冬期・降雪時の土壌水分鉛直プロファイルを示す。図 - 1中のデータは2003年9月21日 - 10月5日の、図 - 2中のデータは2004年1月12 - 31日に発生した浸透イベントである。土壌水分データには日平均値を用いた。それぞれ、図の上段には降水グラフを、中・下段には8個の土壌水分鉛直プロファイル変化が示してある。ここで、降水グラフは日降水量 (mm) を示している。なお、図 - 2の冬期・降雪イベントでは2004年1月15日に19 cmの積雪深が観測され、積雪はその後1月20日まで観測された。土壌水分プロファイルの各グラフでは、縦軸に深度 (m)、横軸に体積含水率 (m^3 / m^3) をとり、実線と破線の2種類で異なる日付のデータを示している。また、この異なる日付間の土壌水分量の変化を明確にするため、水分の増加部分を色つきのメッシュで示してある。グラフ中に示してある影付き枠の日数は、一連の浸透プロセスのなかで、深度0.2 m地点の土壌水分量が最大になったピーク時 (以後、浸透起日とする) からの経過日数を示しており、最後の土壌水分グラフに示した日数が深度7.5 m地点の土壌水分量が最大になった経過日数である。なお、図中の降水グラフにおいて、矢印で0 dayと示した日が浸透起日である。

図 - 1, 2より、降水イベントの発生後、色つきメッシュで示された土壌水分の増加個所が、時間と共に波状に下方に移動していくことが分かる。このような波状の見かけの浸透形態は、砂地地盤以外でも観測されている^{14), 15)}。以降、本研究ではこの浸透の波を浸透波と呼称する。両図において、土壌水分の増加は、地表面に近いほど増加量が大きく、深度を増すにつれ減少している。これは、浸透波が通過した後の土壌水分量が波の通過以前よりも多くなっていることから明らかのように、浸透波によって移動してきた土壌水分が各深度で再配分され、下方に浸透するにつれ全浸透量が漸減していくからである⁶⁾。なお、両イベントにおいて、地表面の体積含水率の増加量が約 $0.05 \text{ m}^3 / \text{m}^3$ であることから、両イベントによる浸透水量はほぼ同じであると考えられる。

次に浸透波のピークが深度7.5 m地点に到達した日数を降雨と降雪時で比較した。連続降水量が75 mmであった夏期の降水イベントでは、浸透波は9日後に7.5 m地点に達している (図 - 1)。一方、連続降水量が160 mmであった冬期の降水イベントでは、浸透波は17日後に7.5 m地点に達している (図 - 2)。

両者の浸透イベントでは、深度7.5 m地点に浸透波が到達するまでに、降雪時の方が1.9倍の時間を要した。

表-1 浸透シミュレーション時の土層パラメータ

θ_r (%)	θ_s (%)	α	n	K_s (cm / s)	ρ_b (g / cm ³)	シルト含有率 (%)
5.43	39.36	3.08	2.68	1.76×10^{-2}	1.47	0.17

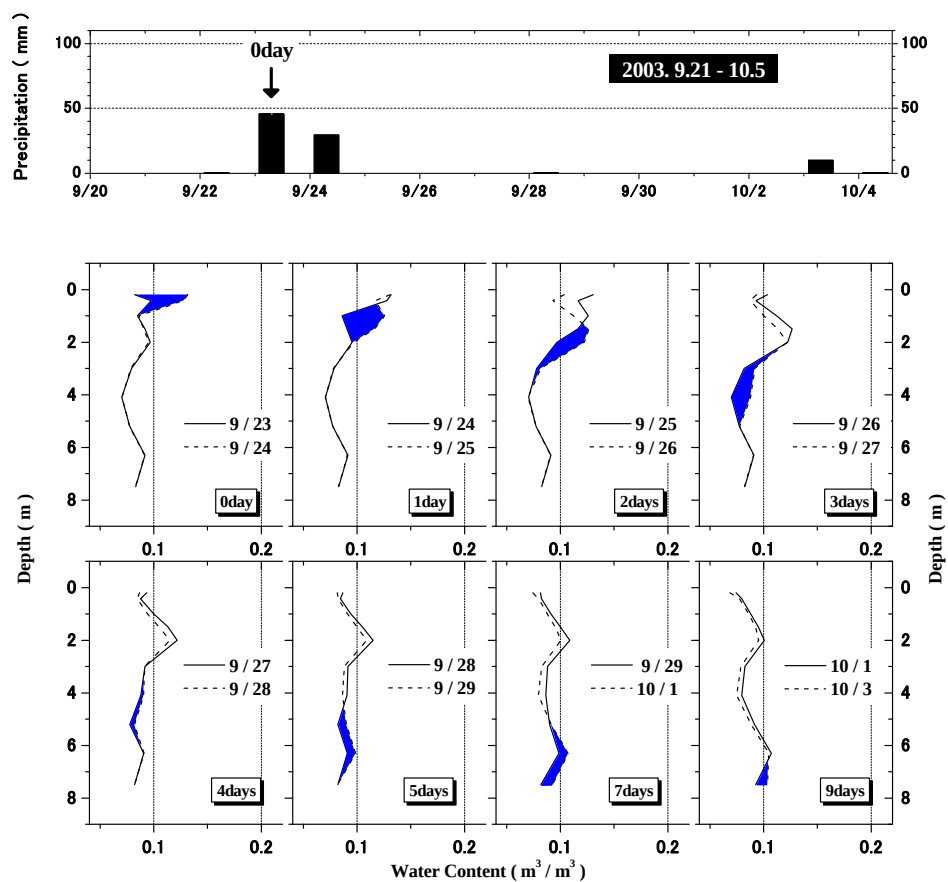


図-1 土壌水分の鉛直プロファイル（夏季・降雨時）

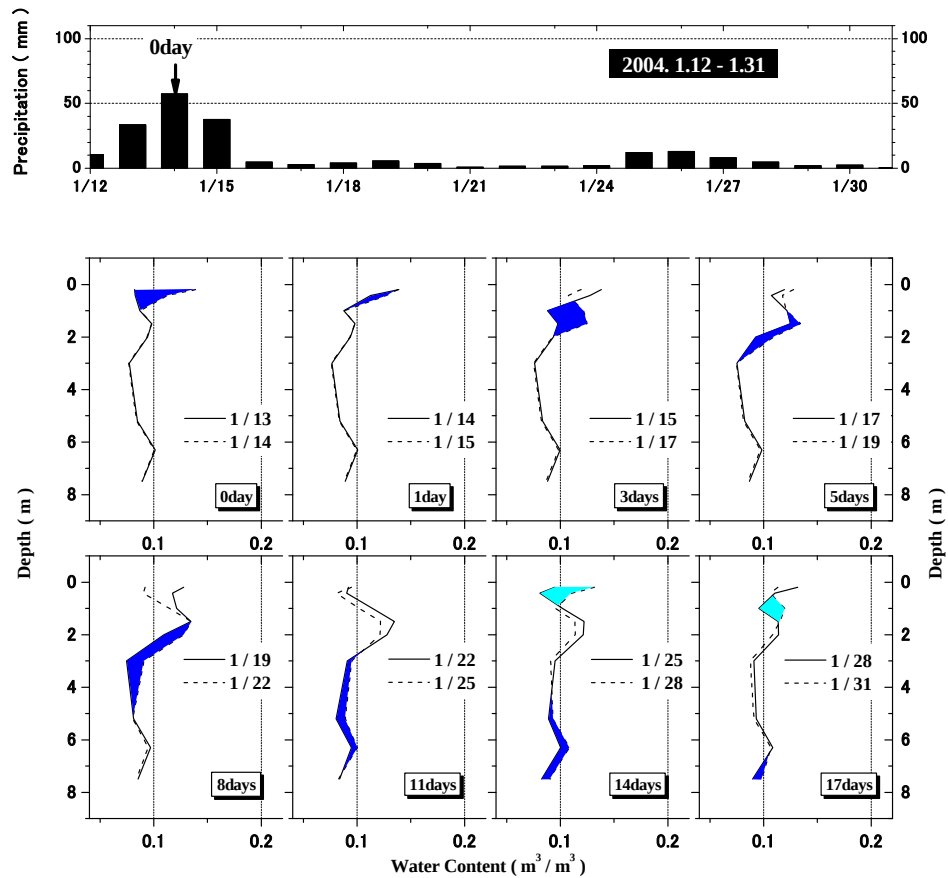


図-2 土壌水分の鉛直プロファイル（冬季・降雪時）

特に深度4.0 m付近までの浸透速度は、降雪時の方が降雨時よりも顕著に遅い。例えば、図 - 1の浸透イベントの場合、深度2.0 m付近に浸透波のピークが到達するのは浸透起日から2日後であり、深度4.0m付近に到達するのは3日後である。一方、図 - 2の場合は浸透波のピークが深度2.0 m付近への到達が5日後、4.0 m付近への到達が8日後であった。降雪期では降雨時と比較して、同じ深度に浸透波が到達するまで2.5 - 2.7倍の時間を要した。

両者の浸透条件を確認すると、連続降水量は降雨時が75 mmで降雪時が160 mmと、降雪時の方が2.1倍多い。また、初期の土壤水分量も両者に大きな差はない。さらに降雨時・降雪時共に、浸透波は単波動で降下している。つまり、図 - 2の土壤水分プロファイルの1月25日から31日に見られるような、複数の浸透波が同時に存在し、上方の浸透波がピストン状に下方の浸透波を押し出すピストン流の影響もない。

夏季の降水、冬季の融雪水と、共に液状水による浸透現象であることを考慮すると、両者で大きく異なるのは地温の鉛直分布である。

（2）地温分布が浸透に及ぼす影響

図 - 3に夏期・降雨時（2003年9月21日－10月5日）と冬期・降雪時（2004年1月12－31日）の日平均地温の鉛直プロファイルを示す。縦軸に深度（m）、横軸に地温（℃）をとり、バツ印の赤線が降雨時の、マル印の

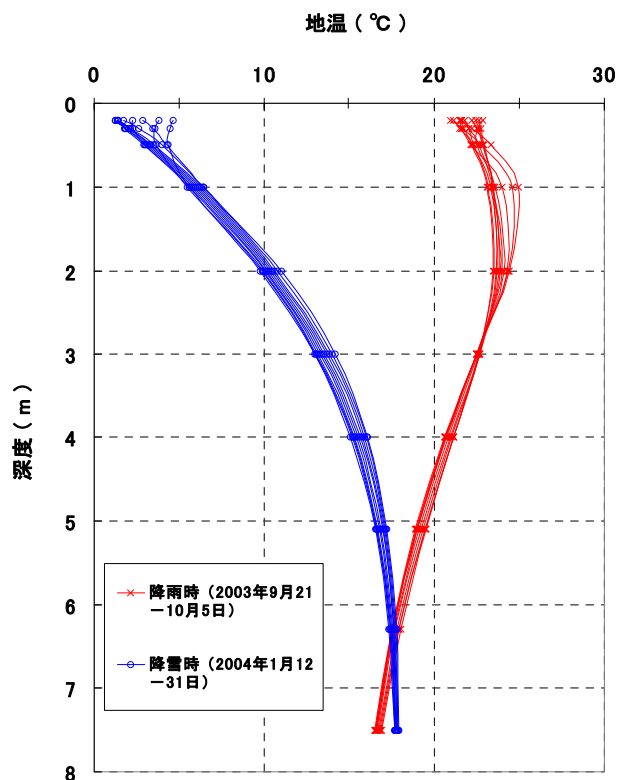


図-3 地温の鉛直プロファイル

青線が降雪時のデータを示している。両者を比較すると、深度6 m以深では地温に大きな差はないが、浅層部では顕著な差が見られる。深度0.2 mでは、降雨時の平均地温は21.9℃、降雪時は2.1℃であり19.6℃の差が生じている。深度4.0 m地点では降雨時の平均地温は20.9℃、降雪時は15.6℃であり5.3℃の差が生じている。

この温度差が浸透現象に与える影響として、透水性の変化が考えられる。例えば、透水係数は以下の式を用いて表すことができる¹⁰⁾。

$$k = \frac{\rho_w g}{\eta} C \frac{e^3}{1 + e} D_s^2 \quad (\text{cm/s}) \quad (1)$$

ここで、 k は透水係数(cm / s), ρ_w は水の密度(g / cm^3), g は重力加速度, η は水の粘性係数(Pa・s), C は定数, e は間隙比, D_s は土粒子直径 (cm)である。

式- 1から分かるように、土壤の透水係数は浸透水の粘性係数 η に反比例する。また、水温が上昇するほど水の粘性係数は低下する。例えば、観測結果から得られた深度0.2 m地点の平均地温を用いて水の粘性係数を比較すると、夏期・降水時の21.9℃と冬期・降雪時の2.1℃では、冬期の粘性係数の方が1.7倍高くなる。ここで、温度差による密度変化は微少であることを考慮すると、夏期の方が約1.7倍の透水係数を示すことになる。さらに、両期間の時間平均地温の極値で比較した場合、夏期・降水時は28.2℃、冬期・降雪時は1.4℃であり、これらの温度差から生じる透水係数の差は約2.1倍である。

このことから、30℃に近い水が浸透する夏期・降雨時と、0℃に近い水が浸透する冬期・降雪時とでは、同じ土壤・水分条件下でも、夏期の方が約2倍の見かけの透水係数を有すると言える。この値は、夏期と冬期で浸透波の進行速度が約2倍違うという、前述した観測結果とよく合致する。このことは、砂地における降水の浸透を考える際に地温の考察が重要であることを意味している。

（3）地温分布を考慮した浸透シミュレーション

地温の影響を考慮した浸透シミュレーションを行い、実際の観測結果との比較を行った。シミュレーションは全層が均一温度と仮定した透水係数を用いた場合（1層モデル）と、各深度の実地温を考慮した透水係数を用いた場合（9層モデル）の2パターンを実施した。

観測・解析期間は2003年7月10－24日である。ただし、

表－2 9層モデル計算時の地温と透水係数

	1層	2層	3層	4層	5層	6層	7層	8層	9層
深度 (m)	0-0.5	0.5-1.0	1.0-2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0
地温 (℃)	30.0	26.6	25.5	23.3	21.2	19.4	17.9	16.7	16.0
透水係数 (10^{-2} cm/s)	2.51	2.35	2.25	2.15	2.05	1.95	1.90	1.85	1.81

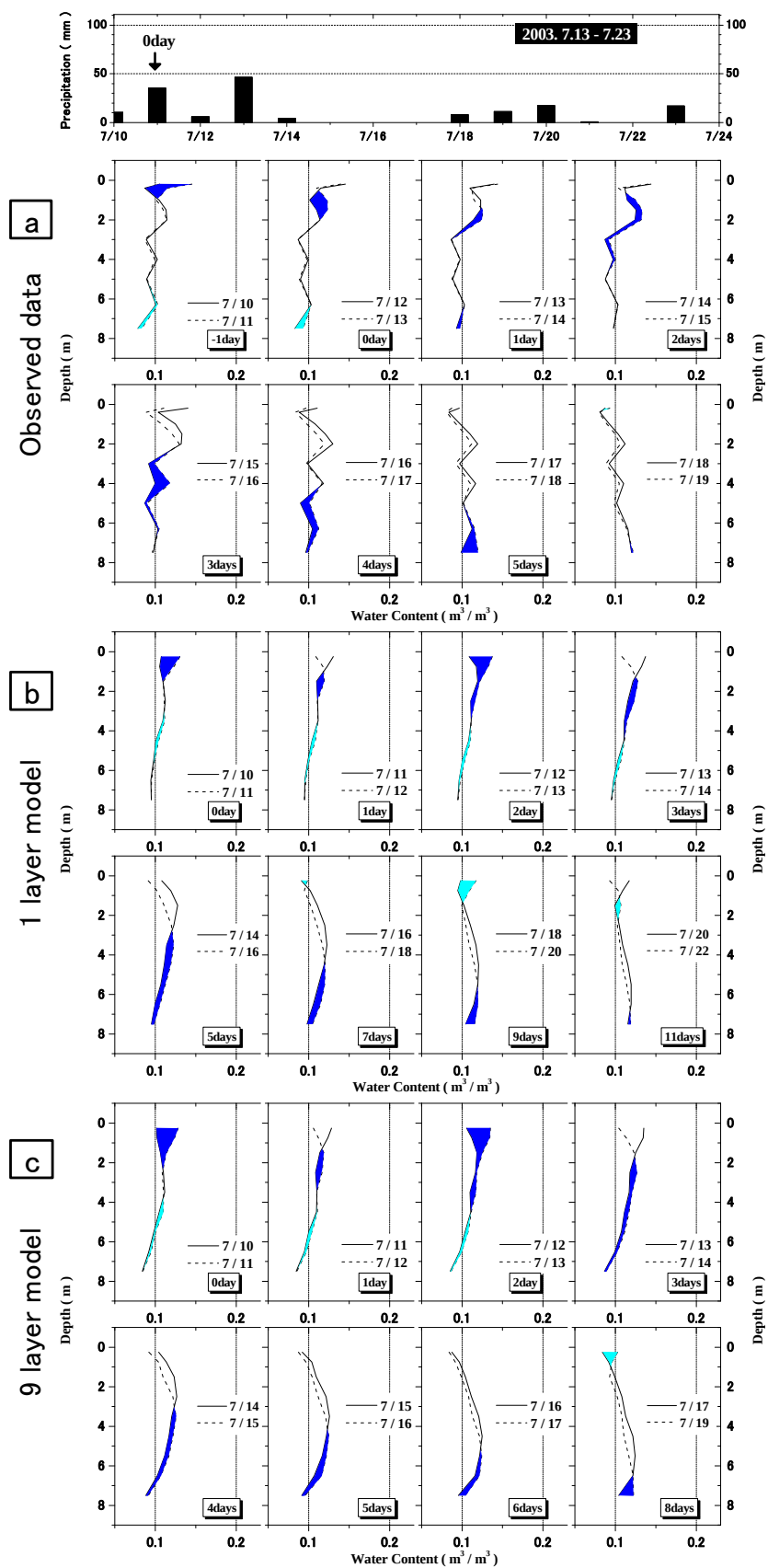


図-4 浸透シミュレーションの結果

シミュレーション結果による浸透が最深部まで到達して
からでないと観測結果との比較を行えないため、解析期
間より約1ヶ月前の2003年6月15日から計算を開始した。

また、1層モデルでは、飽和透水係数の補正温度を15℃
としている日本工業規格 (JIS A 1218 : 1998) に基づき、
全層の透水係数に15℃補正值を用いて計算を行った。9
層モデルでは2003年7月10-24日における各層の実地温
を考慮した透水係数を用いた (表 - 2)。

結果を図 - 4に示す。図の最上段が降水グラフ、a 図
が観測結果、b 図が1層モデル、c 図が9層モデルによ
る計算結果である。図 - 4aの観測結果より、7月11日に
発生した浸透波は、5日後に深度7.5 mに達している。一
方、全層を均一な温度場と仮定して計算したb 図では到
達に11日、各深度の地温分布を考慮したc 図では到達に
8日を要している。地温を考慮しない場合は、実際の浸
透現象とシミュレーション結果で6日の誤差が生じてい
るが、地温を考慮すると、その誤差は3日と半分改善
された。以上のことから、砂地地盤での浸透現象を考え
る場合は、地温分布による見かけの透水係数を考慮する
ことで、より精度良く実現象を再現できることが明らか
になった。

本研究では、均一な土層を仮定して浸透シミュレー
ションを行ったが、今後、鉛直方向の微少な土壌の不均
一性を考慮し実測パラメータを用いることにより、更なる
計算精度の向上が期待される。

4. まとめ

砂地地盤での浸透現象に地温が果たす役割について、
観測及び浸透シミュレーションにより考察を行った。そ
の結果、以下のことが明らかになった。

1. 夏期の降雨イベントと冬期の降雪イベント、それぞ
れの観測結果による浸透波の挙動を比較したところ、冬
期の方が連続降水量が2倍以上であるにも関わらず、浸
透波が深度7.5 m地点まで到達するのに約2倍の時間を要
した。

2. 夏期と冬期の地温差が、水の粘性係数を通じて土壌
の透水係数に与える影響を考察した。両時期の見かけの
透水係数の差は、浸透波の降下時間の差を良く説明して
いた。

3. 各深度の実地温を基に補正した透水係数を用いて、
浸透シミュレーションを行った。地温の影響を考慮しな
い場合と比較して、実際の浸透現象により近い計算結果
が得られた。

以上のことから、砂地地盤の浸透現象に及ぼす地温の
重要性が明らかになった。

たものである。

参考文献

- 1) 野村安治・井上光弘: 散水後の乾砂層の発達とその特性,
鳥取大砂丘研報, 18, pp.27-33, 1979.
- 2) 宮崎毅: 環境地文学, 東京大学出版会, pp.94-95, 2000.
- 3) Yamanaka, T., Yonetani, T.: Dynamics of the evaporation zone in
dry sandy soils, *Journal of Hydrology*, 217, pp.135-148, 1999.
- 4) 竹田 信: 砂丘地における乾砂層の蒸発抑制効果, 地下水学
会誌, 35-3, pp.217-225, 1993.
- 5) 佐倉保夫・谷口真人: 土壌水の移動特性に関するカラムを用
いた降雨浸透実験, 地理学評論, 56-2, pp.81-93, 1983.
- 6) 開発一郎: 定常降雨中および降雨後の不飽和砂層中の鉛直
水分移動, 地下水学会誌, 21-3, pp.111-126, 1979.
- 7) 井上光弘・竹内芳親: 砂ベッド野菜栽培における埋設型土
壌感圧水分センサーによる土壌水分制御, 日本砂丘学会誌,
44-1, pp.30-35, 1997.
- 8) Louis W. D., Stefan H. D., Klaas O., Apostolos K. Z. and Coen J.
R.: Water Repellency and Critical Soil Water Content in a Dune
Sand., *Soil Science Society of America Journal*, 65, pp.1667-1674,
2001.
- 9) Ritsema, Coen J.; Dekker, Louis W.; Heijs, W. J.: Three-
dimensional Fingering Flow Patterns in a Water Repellent Sandy
Field Soil., *Soil Science*, 162(2), pp.79-90, 1997.
- 10) 河合隆行・神近牧男・木村玲二・多田泰之・小玉芳敬・佐
倉保夫: 集塵機を用いた砂地における簡易ボーリング法,
日本砂丘学会誌, 日本砂丘学会, 52-3, pp.91-102, 2006.
- 11) Kimura, R., Kamichika, M., Takayama, N., Matuoka, N., Zhang,
X.: Heat balance and soil moisture in the Loess plateau, China,
J.Agric.Meteorol, 60-2, pp.103-113, 2004.
- 12) van Genuchten, M. Th.: A closed form equation for predicting the
hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of
America Journal*, 44, pp.892-898, 1980.
- 13) Schaap, G. Marcel, G., Feike j. Leij: Using neural networks to
predict soil water retention and soil hydraulic conductivity, *Soil &
Tillage Research*, 47, pp.37-42, 1998.
- 14) 前田真・嶋田純・田中正・榎根勇: 豪雨時における関東
ローム層の水収支, ハイドロロジー, 16-1, pp.1-8, 1986.
- 15) Andersen, L. J., Sevel, T.: Six years' environmental tritium
profiles in the unsaturated and saturated zones, Gronhoi, Denmark.,
Isotope Techniques in Groundwater Hydrology, 1, IAEA, pp.3-
20, 1974.
- 16) 社団法人地盤工学会: 土質試験の方法と解説 (第一回改訂
版), 社団法人地盤工学会, pp.344-345, 2000.

(2009. 9. 30受付)

謝辞: 本研究はグローバルCOEプログラム(乾燥地科学
拠点の世界展望)および科研費 (20580281)の助成を受け