

浸透・蒸発に伴う砂層表面中の熱・液状水・水蒸気移動に関する実験的研究

福井大学大学院 学生員 大田 悟*
 福井大学工学部 正会員 福原 輝幸*
 近畿大学理工学部 正会員 高野 保英**

1. **はじめに** 灌水からその後の表層浸透・蒸発に至るミクロなスケールの土壌水分収支は、特に植物の播種から生育初期の段階における節水灌漑で重要となる。その把握のためには、散水 - 乾燥過程、すなわち地表面蒸発から内部蒸発に至る蒸発量を正確に予測しなければならない。

筆者らはこれまでに、表面層モデルによる砂層表面蒸発から内部蒸発への移行¹⁾、多孔媒体中の熱、液状水および蒸気状水移動のモデル化²⁾、および中東乾燥地における土壌散水 - 蒸発・乾燥実験³⁾を実施し、乾燥地土壌中の熱・水分移動メカニズムと蒸発量予測手法の検討を行ってきた。

本報では、砂層を用いた散水浸透 - 蒸発・乾燥室内実験の結果を紹介し、散水後砂層の乾燥過程における蒸発量と砂層表面近傍の体積含水率、砂層内温度、土壌空隙相対湿度および蒸気圧の関連性について、表面層モデル蒸発実験結果との比較対応を試みながら考察する。

2. **実験概要** 実験の概要を Fig.1 に示す。実験は恒温恒湿室（温度 20℃，湿度 40%）で行われ、気乾状態の豊浦標準砂を充填した 3 本のアクリル製円筒カラム（直径 0.13m，高さ 0.4m）が使用される。カラム 1 は電子天秤上に設置され、質量変化量から積算蒸発量が、カラム 2 には熱電対および温・湿度センサーが各 14 本挿入され、砂層内の温度 T および土壌空隙相対湿度 RH が、カラム 3 には 11 本の TDR 式水分センサーが挿入され、体積含水率 θ_v がそれぞれ測定される。

各砂層カラム上方 0.35m の位置より赤外線ランプを照射し、砂層内温度が定常になったことを確認した後、20 l の水を散水フラックス密度 $1.9 \times 10^{-2} \text{kg/m}^2\text{s}$ で 11 分間散水する。

3. **実験結果** 以下の図および記述においては、散水開始時刻を基準時刻 ($t=0\text{hr}$) とし、それ以前の時刻には負の符号を付する。

Fig.2 は、散水開始時から 120 時間後 ($t=0 \sim 120\text{hr}$) に亘る単位面積当りの積算蒸発量の経時変化を示す。散水開始時から $t=20\text{hr}$ までは、蒸発フラックス密度がほぼ一定であることから、この期間は恒率蒸発期 (Constant-rate stage) に相当し、蒸発が表面から生じていると判断される。その後、蒸発フラックス密度は漸減し始め、 $t=28\text{hr}$ 以降、蒸発量の増加率はさらに小さくなる。従って、 $t=20 \sim 28\text{hr}$ は第 1 減率蒸発期 (Falling-rate stage)、さらに $t=28\text{hr}$ 以降は第 2 減率蒸発期 (Slow-rate stage) に相当し、蒸発は砂層内部で生じていると考えられる。

Fig.3 は、深度 z (砂層表面を 0m とする鉛直下向きの負の距離) 毎の砂層内温度 T の経時変化を、散水開始 1 時間前から 120 時間後まで ($t=-1 \sim 120\text{hr}$) を示す。まず、表層 0.05m までの変化を観ると、 T は散水の顕熱により急激に低下し、一度上昇に転じた後、蒸発潜熱の影響により再び緩やかな低下を示す。その後、恒率蒸発期が終了する $t=20\text{hr}$ になると、 T は急に上昇を始め、第 2 減率蒸発期が始まる $t=28\text{hr}$ 以降、その上昇は緩やかとなり、やがて一定となる。一方、表層 0.1m 以深の T は、実験期間を通じてほとんど変化せず、散水の影響を受け

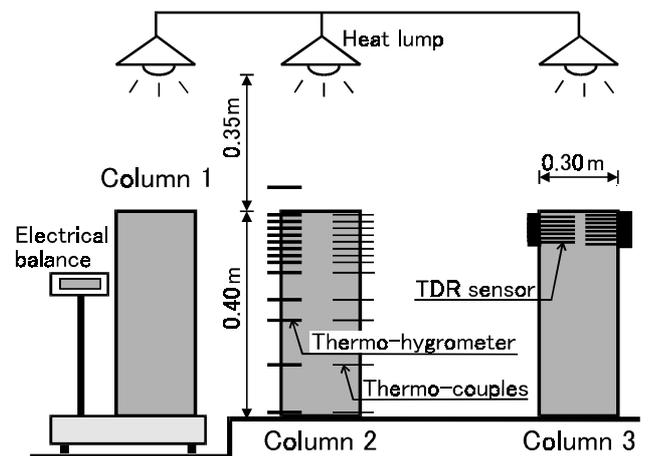


Fig.1 実験装置の概略図

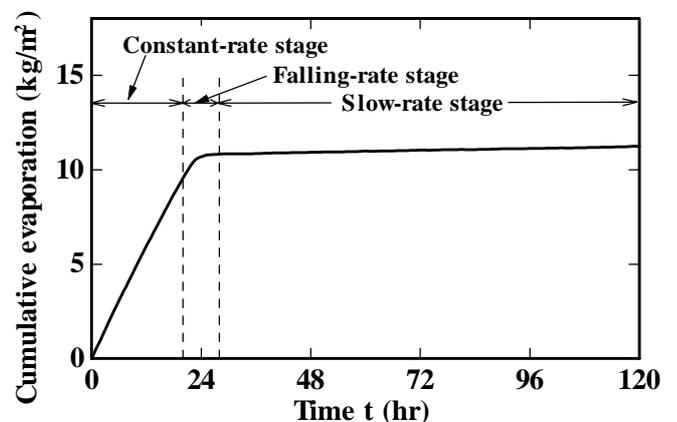


Fig.2 積算蒸発量の経時変化

キーワード：蒸発，土壌中の熱・水分移動，恒率蒸発期，減率蒸発期，浸透

* 〒910-0017 福井県福井市文京 3-9-1 TEL 0776-23-0500 (2809) FAX 0776-27-8746

** 〒577-8502 大阪府東大阪市小若江 3-4-1 TEL 06-6721-2332 FAX 06-6730-1320

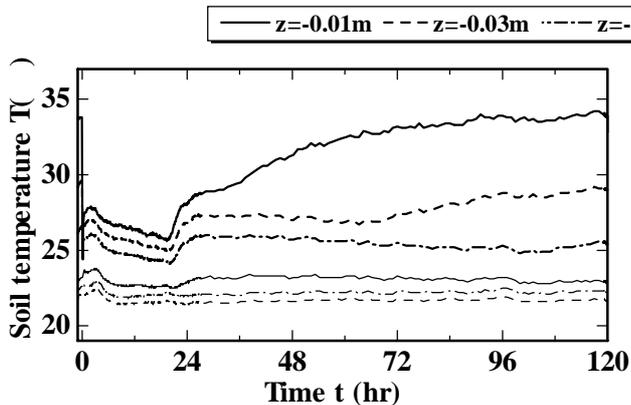


Fig.3 砂層内温度の経時変化

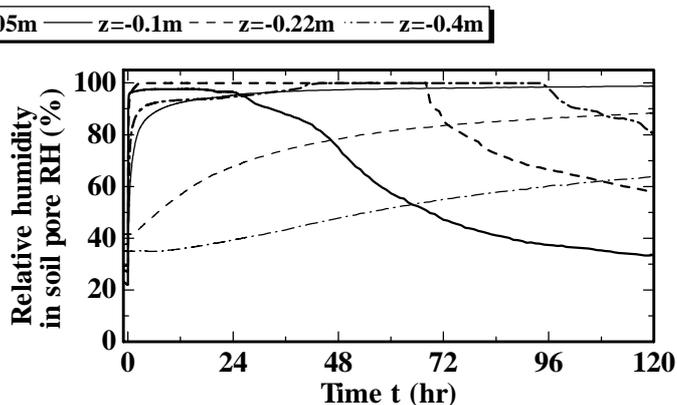


Fig.4 土壤空隙相对湿度の経時変化

ていないと判断される。なお、全ての深度の T について、 $t=1 \sim 5$ hr の間に若干の変動が観られるが、これは実験室内の温度変化が原因であることが判明しており、上述の砂層内温度に関する考察を否定し得るものではない。

Fig.4 は、土壤空隙相对湿度 RH の経時変化を、 T と同じ深度および期間について示す。散水開始直後から表層 $0.1m$ までの RH は急上昇し、飽和あるいはそれに近い状態に達した後、砂層の乾燥に伴って上方より順に低下し始める。例えば、砂層表面に最も近い $z=-0.01m$ の RH は、 $t=20hr$ から低下し始め、この時間は、恒率蒸発期の終了時と一致する。一方、 $z=-0.22m$ の RH は $t=1hr$ から、 $z=-0.4m$ の RH は $t=7hr$ から上昇し始めるが、増加の割合は、表層から離れるに従い小さくなる。以上より、 RH は T に比べてより深い領域まで散水の影響を受ける。

Fig.5 は、砂層表面に最も近い $z=-0.01m$ の体積含水率 θ_v の経時変化を示す。散水後、約 0.29 まで増加した θ_v は、蒸発の進行に伴って直線的に低下し、恒率蒸発期が終了する $t=20hr$ には約 0.05 となる。この θ_v の値は、二上らによる表面層モデル蒸発実験¹⁾より得られた減率蒸発期開始時の層平均体積含水率 ($\theta_v = 0.04$) とほぼ一致する。

Fig.6 は、土壤空隙蒸気圧 P_v の鉛直分布経時変化を示す。表層 $0.1m$ までの P_v の変化について注目すると、散水直後から P_v は急上昇し、砂層表面で最大となる。その後、表面乾燥に伴って、今回の実験では第1減率蒸発期から第2減率蒸発期に移行する時間帯 ($t=26hr$) で、砂層表面近傍の P_v の低下が始まる。ただし、この P_v の低下と乾燥の進行の関係については、さらに実験を重ね検討する必要がある。

4. おわりに 砂層散水後の蒸発量と砂層表面近傍の体積含水率、砂層内温度、土壤空隙相对湿度および蒸気圧の変化の関連性について、実験的に検討を行い、以下のような結果が得られた。

- (1) 第1減率蒸発期開始時の砂層表面近傍における体積含水率は約 0.05 となり、表面層モデル蒸発実験より得られたそれとほぼ一致する。
- (2) また、土壤温度に関しても、表面層モデル実験結果と同様に、第1減率蒸発期開始と同時に砂層表面温度は蒸発潜熱の消失に伴って急に上昇し始め、第2減率蒸発期になると温度上昇は緩やかとなる。

参考文献 1) 二上章司, 高野保英, 福原輝幸, 佐藤邦明: 表面層モデルによる砂層表面と大気との間の熱・水分移動特性 - 法による砂層表面厚の検討 -, 水工学論文集, 第41巻, pp.31-36, 1997.2.

2) 高野保英, 福原輝幸, 佐藤邦明: 乾燥 - 不飽和土壤中の熱・液状水および蒸気状水移動の同時連成解析, 土木学会論文集, No.635/ -49, pp.13-29, 1999.11.

3) 何 超, 福原輝幸, 高野保英: 散水後の Sandy soil の乾燥と蒸発 - アラブ首長国連邦における現地蒸発・乾燥実験 -, 水工学論文集, 第44巻, pp.187-192, 2000.2.

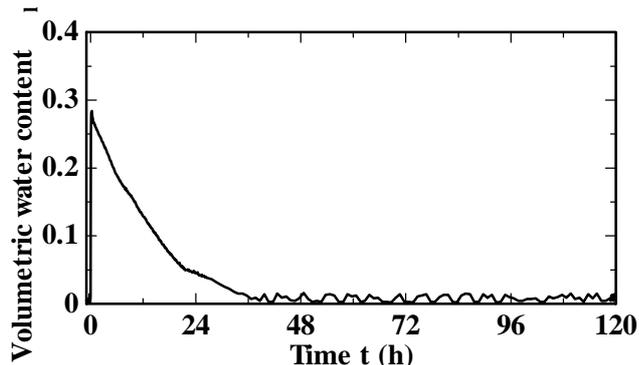


Fig.5 体積含水率 ($z=-0.01m$) の経時変化

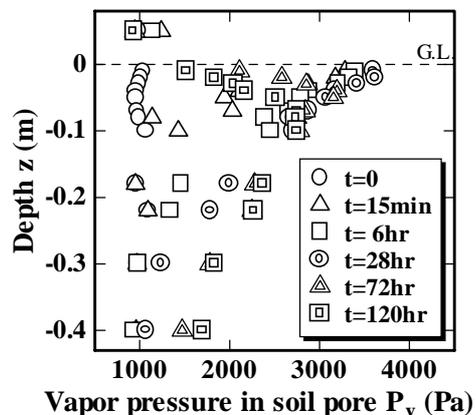


Fig.6 土壤空隙蒸気圧の鉛直分布経時変化