

II - 37

日周期的な放射変化過程における砂層と大気間の水蒸気移動 - 砂の呼吸現象 -

(株) 白石

福井大学工学部

正員 高野保英

正員 福原輝幸

1. はじめに 筆者等は、より現実に近い気象条件下での砂層からの蒸発特性を調べるために、日周期的な気象変化に伴う砂層蒸発実験を行っている。その手始めとして、日周期的な気温変化を伴う砂層蒸発(以下、気温日周期蒸発と称す)実験を行った^{1), 2)}。その結果、気温日周期蒸発においては蒸発フラックス密度は気温高温時に大きく、気温低温時に小さくなること、およびその原因は乾燥層の水蒸気密度勾配の絶対値が低温時に比べて高温時の方で大きくなるためであることが明らかとなった^{1), 2)}。しかし、現実の砂層内温度の日周期変化は太陽輻射量のそれによることから、新たに砂層表面に与えられる放射エネルギーが日周期的に変化する環境下での砂層蒸発(以下、放射日周期蒸発と称す)実験を始めた。

ここでは、放射日周期蒸発過程に見られる砂層と大気間の水蒸気移動特性について報告する。

2. 実験概要 0.1 m × 0.1 m × 0.6 m のアクリル樹脂製カラムに豊浦標準砂を充填した後、温度 20 °C、相対湿度 50 % の恒温恒湿室にカラムを設置し、所定の地下水位を設定(実験期間中一定)する。砂層表面以外からの熱の出入りを抑制するために、ボードタイプのグラスウールがカラム側面および底面を覆う。ヒートランプはカラム上方 0.27 m の位置に設置される。砂層表面に与えられるヒートランプからの放射量 R_g は、電圧コントローラを用いて周期的に変化させる。設定された R_g の日周期変化パターンを Fig. 1 に示す。最初の 16 時間が放射期間(昼間)、その後の 8 時間が非放射期間(夜間)にそれぞれ相当する。24 時間を 1 サイクルとして、実験は 5 サイクルに渡って行われる。

砂層内および砂層表面上の温度 T および相対湿度 RH は、17 本の温・湿度センサー(ヴァイサラ製)を用いて 15 分毎に同時計測される。得られた温度および相対湿度から、水蒸気密度 ρ_v が計算される。蒸発フラックス密度 M_v は電子天秤を用いて 1 時間毎に計測される。地下水位は砂層表面下 0.4 m とし、目視観測より得られた界面(乾燥層と毛管層の境界)位置は地表面下 0.14 m ($z = -0.14$ m)である。

なお、実験の過程で生じる大気から砂層への水蒸気吸着および吐き出し(3. で詳述)を確認するための実験(以下、水蒸気吸着 - 吐き出し実験と称す)も付随して行われる。この実験では、乾燥砂(体積含水率 0.0016)のみを充填した砂層カラムを用意し、その表面に今回の実験と同じ放射量変化を 5 サイクルに渡って与える。その過程における砂層重量の変化を、電子天秤を用いて 1 時間毎に測定する。砂層の厚さは、地下水位を与えた砂層で形成された乾燥層厚と同じ 0.14 m である。

3. 実験結果および考察 以下に砂層と大気間の水蒸気移動に関する結果を集約するが、第 2 サイクル以降の温度、相対湿度、水蒸気密度および蒸発量などの日周期変化に大きな違いが観られないことを、まず述べておく。

Fig. 2 は、第 4 サイクル($t = 72 \sim 96$ hr)の間における水蒸気密度 ρ_v の鉛直(z)分布の経時変化を示す。 $t = 78 \sim 84$ hr の間で、水蒸気密度鉛直分布 $\rho_v(z)$ は界面上方(乾燥層内)の一点($z = -0.1$ m)で ρ_v が最大になるような形状を呈する。一方、気温日周期蒸発の場合でも、乾燥層内の温度が比較的高い時間に $t = 81$ hr で観られるような $\rho_v(z)$ が現れるが、 ρ_v の最大値は界面付近に生じ¹⁾、本結果とは違いが見られる。また、 $t = 90$ hr には砂層表面付近の空気の水蒸気密度 ρ_{va} が砂層内の $\rho_v(z)$ から外挿して求められる砂層表面の ρ_v よりも大きくなる現象が観られる。この現象は、砂層上の空気が静穏な場合

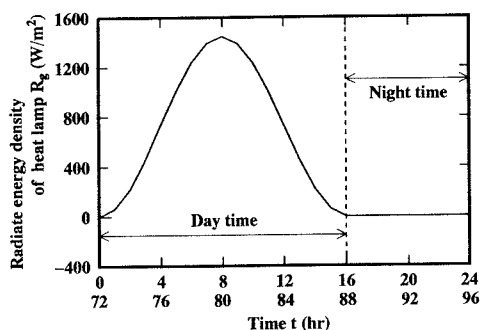


Fig. 1 放射量の日周期変化パターン

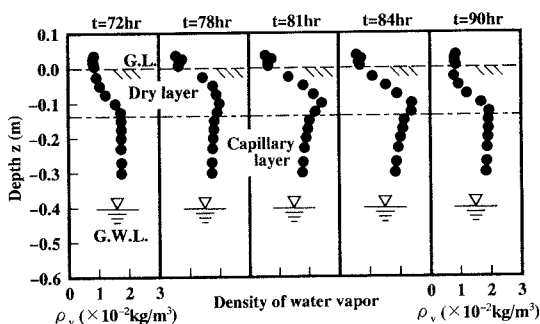


Fig. 2 水蒸気密度鉛直分布の経時変化

においては、砂層内から大気（系外）へ向かっての水蒸気移動が抑制されることを示唆する。図では示されないが、この現象は $t = 83 \sim 96 \text{ hr}$ の間に生じており、気温日周期蒸発では観察されなかった現象¹⁾である。

次に、実験初期の砂層カラム重量と実験開始後の砂層カラム重量の差（単位面積当たりで、以下、積算水分変化量と称す） Q_v の経時変化 $Q_v(t)$ を Fig. 3 に示す。積算水分変化量 Q_v は、実験期間に渡って日周期的な波状変化を繰り返しながら増大している。この波状変化より、砂層の水分損失および水分利得が周期的に発生することが知れる。砂層の水分損失は、砂層内で生じている蒸発に起因する。一方、水分利得の要因は大気から砂粒子への水蒸気吸着、および砂層内で起こる砂粒子への水蒸気吸着が考えられる。このうち、前者による水分利得については以下に述べる水蒸気吸着 - 吐き出し実験から確認された。

水蒸気吸着 - 吐き出し実験から得られた積算水分変化量の経時変化 $\hat{Q}_v(t)$ を Fig. 4 に示す。 $\hat{Q}_v(t)$ は $Q_v(t)$ と同じような波状挙動を呈する。ただし、 $\hat{Q}_v(t)$ には $Q_v(t)$ のようなトレンド的増大は観測されない。これより、気乾状態の砂層では砂粒子から大気への水蒸気の吐き出しと、それに見合う量の大气から砂粒子への水蒸気の吸着が周期的に発生することが知れる。 $\hat{Q}_v(t)$ と $Q_v(t)$ を比較すると、水分利得の発生時間はほぼ同じであり、 $Q_v(t)$ で見られる水分利得は少なくとも大気から砂粒子への水蒸気吸着に起因すると考えられる。

この蒸発と水蒸気吸着が周期的に発生する現象は、例えば「砂の呼吸現象」と呼ぶことができよう。また、水蒸気吸着現象は佐藤らによる岩石試料などの吸湿³⁾と同じような現象であると考えられる。

Fig. 5 は、第4サイクルにおける蒸発フラックス密度 M_v および水蒸気吸着フラックス密度 M_c の経時変化 $M_v(t)$ 、 $M_c(t)$ を示す。なお、図中の実線は R_g の経時変化 $R_g(t)$ である。 M_v および M_c は Fig. 3 に示した $Q_v(t)$ の時間勾配として求められる。従って、 M_v は正の値に、 M_c は負の値になる。 $M_v(t)$ の最大値は $R_g(t)$ の最大値よりも先に現れる。蒸発が生じる期間は $t = 72 \sim 83 \text{ hr}$ である。一方、水蒸気吸着が生じる期間は $t = 83 \sim 95 \text{ hr}$ であり、上述した $\rho_v(z)$ の経時変化特性から、砂層表面付近の空気の水蒸気密度 ρ_{va} が砂層表面の ρ_v よりも大きくなっている期間とほぼ同じであることが知れる。従って、 ρ_{va} が砂層表面の ρ_v よりも小さくなっている期間は蒸発が生じ、その逆の場合には水蒸気吸着が生じていることになる。当然ながら、1 サイクル当たりの蒸発量と水蒸気吸着量を比較すると、前者は後者の約2倍であるために、Fig. 3 のように $Q_v(t)$ はサイクルの経過と共に増大する。

4. おわりに 放射日周期蒸発においては、砂層からの蒸発および大気から砂粒子への水蒸気吸着が周期的に生じることが示され、「砂の呼吸現象」が確認された。今後は、水蒸気吸着の定量的な評価についての検討が必要である。

参考文献 1) 福原輝幸・高野保英・佐藤邦明：日周期的な気温変化に伴う砂層カラムからの蒸発特性、水工学論文集、第38巻、pp.119-124, 1994. 2) 福原輝幸・高野保英：日周期的な気温変化に伴う砂層内の水蒸気移動と蒸発量の特性、地下水技術、第36巻第9号、pp.43-50, 1994. 3) 佐藤邦明・N. V. Hoang・大西敬彰：乾燥多孔媒体中の水分移行・吸湿メカニズムの研究、第49回土木学会年次講演会概要集、II-10, pp.20-21, 1994.

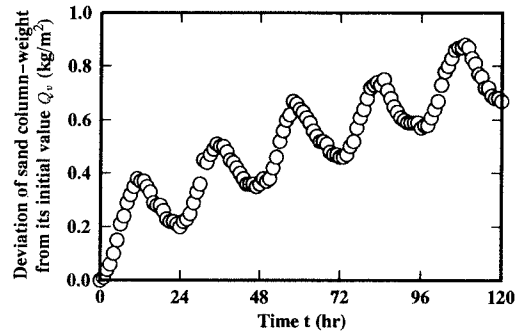


Fig. 3 積算水分変化量の経時変化（地下水位が存在する場合）

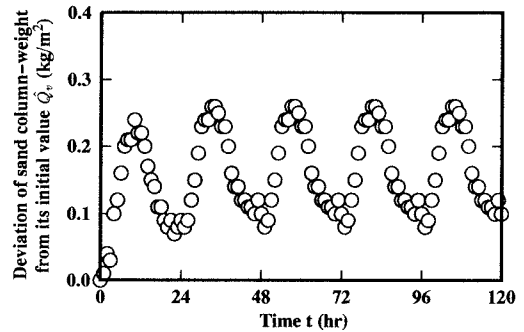


Fig. 4 積算水分変化量の経時変化（乾燥層のみの場合）

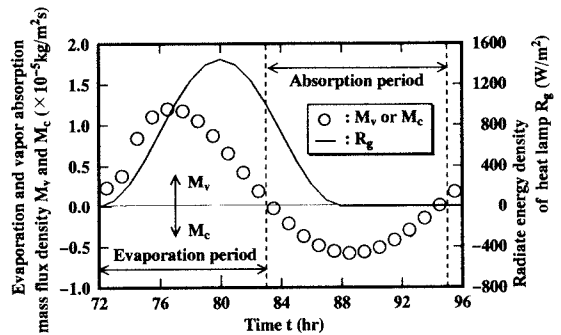


Fig. 5 蒸発および水蒸気吸着フラックス密度の経時変化