

II-122 日周期気温変化にともなう砂層カラム中の熱・水分移動および蒸発特性

福井大学工学部 学生員 高野保英

福井大学工学部 正員 福原輝幸

1. はじめに

筆者等は、砂層内の蒸気圧分布あるいは水蒸気密度分布と砂層からの蒸発量の関係を明らかにするための手始めとして、温度定常下における蒸発実験を行ってきた。その結果、蒸発フラックス密度は乾燥帯の蒸気圧勾配あるいは水蒸気密度勾配に依存すること、および地表に向かって温度が高くなるような正の温度勾配下では、地下水位が高いほど毛管帯で水蒸気の下方向移動が起こり易くなることを明らかにした^{1)、2)}。

そこでさらに、より現実的な気象条件下での蒸発メカニズムを解明するために、日周期気温変化に伴う蒸発実験を開始した。ここでは砂層内の温度分布、相対湿度分布、水蒸気密度分布および蒸発フラックス密度に関する経時変化の特性について報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験は福井県工業技術センターの人工気象室(温度: $-40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度: 30% ~ 90%の範囲で制御可能)内にて、Fig. 1のような砂層カラム、恒温水槽および定水位タンクから成る実験装置を用いて行われる。砂層表面以外からの砂層への熱の出入りを抑えるために、発泡スチロールおよび断熱ボードが使用される。気温は 25°C を基準温度とし、24時間周期の疑似正弦曲線に従って $5^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$ の範囲で変化する。24時間を1サイクルとし、一連の実験は3~4サイクルに渡る。地下水(蒸留水を使用)は人工気象室に隣接する恒温測定室内の恒温水槽から人工気象室内の定水位タンクを経由して、砂層に供給される。このようにして地下水位および水温が一定になるよう努めた。

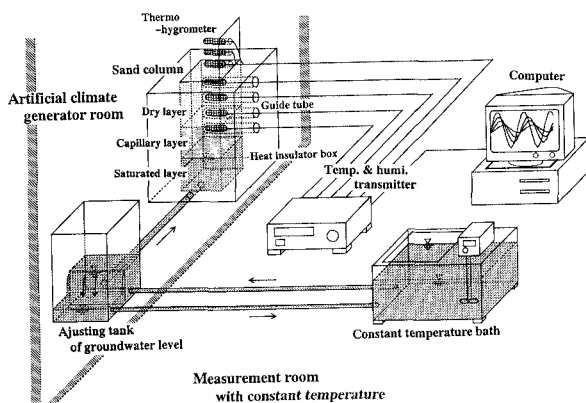


Fig. 1 実験装置の概要

砂層内の温度 T および相対湿度 RH は、10本の温・湿度センサー(ヴァイサラ製)を用いて30分毎に同時計測される。温・湿度変換器を通して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 は測定室内の電子天秤を用いて3時間毎(あるいは6時間毎)に測定される。また、砂層の体積含水率 θ は中性子水分計を用いて測定される。

3. 実験結果およびその考察

地下水位が砂層表面下0.4mの実験ケースについて、最終第3サイクル(実験開始後48~72時間)の温度、相対湿度、および水蒸気密度の鉛直(z)分布の経時変化をFig. 2(a)~(c)に示す。各分布は3時間毎に抽出される。また、Fig. 2(b)には体積含水率の鉛直分布 $\theta(z)$ が併示される。

温度の鉛直分布 $T(z)$ は松田らにより砂丘地で測定された温度分布³⁾と類似している。その類似点の一つに、昼間に相当する気温高温時および夜間に相当する気温低温時(以下、それぞれ高温時、低温時と呼称する)とも、毛管帯上縁(乾燥帯と毛管帯の境界付近)で温度勾配 $\nabla T (\nabla \equiv d/dz)$ が大きく変化することが挙げられる。これは蒸発潜熱による温度低下および水分量による熱伝導率の違いに起因すると考えられる。

相対湿度の鉛直分布 $RH(z)$ の形状は $T(z)$ ほど時間によって大きく変化せず、毛管帯内では常に100%である。乾燥帯の $RH(z)$ は線形的であり、地表に向かって外気の RH に漸近するように減少する。また、乾燥帯内の相対湿度は高温時(例えば、Time 54hr)よりも低温時(例えば、Time 66hr)の方が高く、相対湿度と温度は互いに負の相関関係にある。

水蒸気密度の鉛直分布 $\rho_v(z)$ は、 $T(z)$ が非線形な分布を呈しながら時間的に変化しているにもかかわらず、乾燥帯ではどの時間においても線形的である。高温時(例えば、Time 54hr)の $\rho_v(z)$ は毛管帯上縁で最

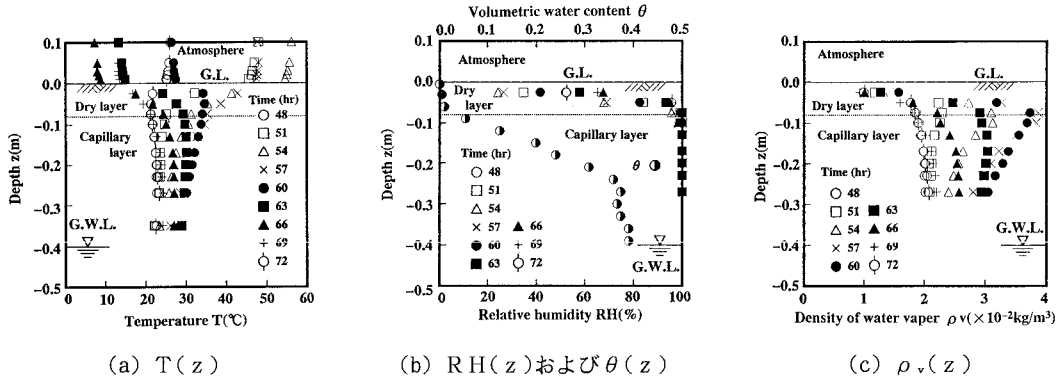


Fig. 2 温度、相対湿度、体積含水率および水蒸気密度分布

大値を持つような分布となるのに対して、低温時(例えば、Time 66hr)の $\rho_v(z)$ は毛管帯から砂層表面に向かって減少するような分布となる。また、高温時、低温時とも ρ_v の鉛直勾配 $\nabla \rho_v$ は毛管带上縁で大きく変化する。乾燥帯の $\nabla \rho_v$ は常に負であり、その絶対値 $|\nabla \rho_v|$ は低温時よりも高温時の方で大きくなる。一方、毛管帯の $\nabla \rho_v$ は高温時には正となり、低温時には負となる。これより、砂層内の水蒸気は、乾燥帯では常に上方へ移動し、毛管帯では高温時には下方へ、低温時には上方へ移動することが知れる。

Fig. 3は任意の時間における砂層内の水蒸気フラックス密度 m_v 分布であり、水蒸気拡散理論を基に式(1)より計算される。

$$m_v = (\epsilon - \theta) \xi D_{atm} \partial \rho_v / \partial z \quad (1)$$

ここに、 ϵ : 間隙率、 ξ : 蒸発面補正係数、 D_{atm} : 砂層空隙中の水蒸気拡散係数、である。図中の●は高温時、■は低温時、▲は基準温度付近の時間の m_v を表す。乾燥帯の m_v は一定かつ常に正(上向き)の値であり、低温時よりも高温時で大きくなる。さらに、 $\xi = 2.6$ で $m_v = m_{ve}$ なる連続条件が満たされる。他方、毛管帯の m_v は上述したように時間的に正または負の値をとるが、その絶対値は乾燥帯の m_v に比べて常に小さい。なお、式(1)では D_{atm} の温度依存性を考慮して m_v は計算される。

以上より、砂層中の活発な蒸発はいつの時点でも毛管带上縁で起こると推定される。

今までの結果を総合して、蒸発フラックス密度 m_v と気温 T_s の関係を最終の2サイクルについて示したものがFig. 4である。なお、 m_{ve} は基準温度下における定常時の蒸発フラックス密度 m_{vs} で除した値、 m_{ve}/m_{vs} (蒸発比)で無次元化される。蒸発比の経時変化は T_s のそれと同位相であり、前者は後者に比べて約1.5時間の位相遅れがある。つまり蒸発量は高温時に多く、低温時に少ない。ちなみにこの実験ケースでは、高温時の m_{ve} は低温時の m_{ve} の約2.1倍となる。これは、砂層中の水蒸気が大気へ向かうための駆動力である乾燥帯の $|\nabla \rho_v|$ が、低温時よりも高温時の方で大きいためと考えられる。

本実験の遂行に際して、福井県工業技術センター中野孝太郎課長、黒川和男主任の多大な協力を得た。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 福原輝幸・佐藤邦明・馬場富夫：砂層カラム内の水蒸気移動と蒸発メカニズム、水工学論文集、第36巻、PP. 453-458、1992
- 2) 今井竜也・福原輝幸：温度勾配下における砂層カラム内の水蒸気移動、土木学会第47回年次学術講演概要集、II-318、PP. 686-687、1992
- 3) 松田昭美・神近牧男・安東登志広：砂丘地の地面付近における温度の垂直分布について、鳥取大砂丘研報、16、PP. 9-13、1977

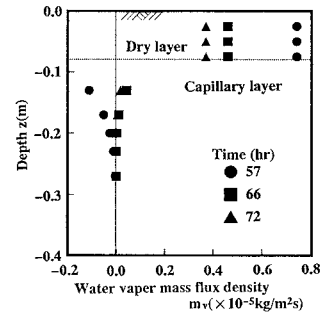


Fig. 3 水蒸気フラックス密度分布

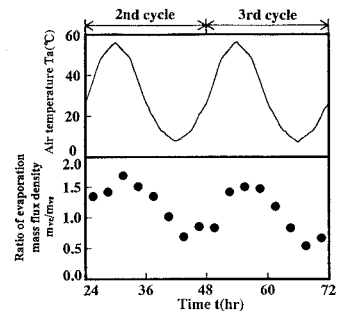


Fig. 4 気温と蒸発比の経時変化