

日周期的な気温変化に伴う砂層カラムからの蒸発特性 Evaporation in sand column under diurnal temperature variation

福原輝幸*・高野保英**・佐藤邦明***

By Teruyuki FUKUHARA, Yasuhide TAKANO and Kuniaki SATO

This paper describes the mechanism of evaporation in a sand column under a diurnal temperature variation. Thermo-hygro meters were used to obtain the vertical profile of water vapor density along a sand column. The correlation between air temperature and evaporation rate is positive and the evaporation rate is high when the air temperature is high. There is, however, a time delay between these two time series and it mainly depends on the time change of the water vapor density at the top of capillary zone. As the dry layer becomes thick or the level of groundwater table becomes low, the time delay gets larger. It is concluded that the diurnal evaporation variation can be well explained by the diffusion theory of water vapor.

Keywords : evaporation, heat and mass transfer, meteorology

1. まえがき

砂漠化の主現象である土壌の蒸発・乾燥に関する研究は農業土壌学・気象学・地学あるいは土木工学など、広範囲の分野にまたがって行われている。しかしながら外部気象条件（放射エネルギー・気温・湿度・風速など）に直接支配される地表面蒸発に比べて、砂層内で起こる蒸発および水蒸気移動については、外部気象条件と砂層内部の熱・水分構造との相互作用あるいは蒸発量の算定方法などに関してなお不明な点が多い。実際の砂漠においては砂層表面が乾燥している場合が多く、地表面蒸発よりもむしろ砂層内蒸発が砂漠化の過程において重要となる。砂漠化対策を効率よく進める上で、砂層内蒸発と外部気象条件との相互作用および水蒸気移動の特性について理解することが必要となる。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特性を調べるために、筆者等は日周期的な気温変化を伴う蒸発実験を行っている^{3), 4)}。ここでは地下水位の異なる2種類の砂層について、気象条件、砂層内の温度、相対湿度および水蒸気密度分布の経時変化と蒸発フラックス密度の経時変化との関連性について検討する。

* 正会員、工博、福井大学助教授、工学部環境設計工学科（〒910、福井市文京3-9-1）

** 学生員、福井大学大学院工学研究科博士前期課程（〒910、福井市文京3-9-1）

*** 正会員、工博、埼玉大学助教授、工学部地盤水理実験施設（〒388、浦和市下大久保255）

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内の人工気象室（温度： $T_a = -40^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ 、相対湿度： $RH_a = 30\% \sim 90\%$ 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熱の出入りを抑えるために、発砲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（初期）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 サイクルとして、温度および相対湿度が前サイクルの経時変化と変わらないことを確認しながら、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。定水位タンクには堰が設けられ、恒温水層から送り込まれた地下水を越流させることによって水位を一定に保つ。このようにして地下水位および水温が実験中一定になるよう努めた。

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（ヴァイサラ製）を用いて 30 分毎に同時計測される。こうして得られた温度および相対湿度から、水蒸気密度 ρ_v および蒸気圧 P_v が計算される。蒸発フラックス密度 m_{ve} 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）に砂層カラムの重量減少量を測定することによって得られる。また、砂層の体積含水率 θ は中性子水分計（精器堂製）を用いて高さ方向 0.03 m 毎に測定される。

実験条件は Table - 1 で示される。実験ケースは、地下水位がやや高く乾燥帯が薄い（乾燥帯厚 0.08 m ）US - 1、地下水位が低く乾燥帯が厚い（乾燥帯厚 0.20 m ）US - 2 の 2 通りである。

3. 砂層内温度・水分分布の経時変化

ここでは最終サイクル（US - 1 では第 3 サイクル、US - 2 では第 4 サイクル）における結果を紹介する。

体積含水率 θ の鉛直分布 $\theta(z)$ を Fig. - 2 に示す。地下水位が US - 1 と US - 2 で異なるが、水分分布の形状はほぼ相似であり、地下水供給があるために両ケースとも実験終了後の $\theta(z)$ と初期の $\theta(z)$ に大きな差異はない。なお毛管帯上縁（乾燥帯と毛管帯の境界）の位置は目視観測から得られ、水分分布との対応で見ると含水量は圃場容量に近い。

Fig. - 3 は温度 T の鉛直分布 $T(z)$ の経時変化を示したものである。各分布は 3 時間毎に抽出される（以下、相対湿度および水蒸気密度分布についても同じ）。地下水位の違いに関わらず両ケースとも、温度分布は松田等により砂丘地で測定された温度分布⁵⁾と類似している。

すなわち、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、毛管帯上縁で温度勾配 ∇T ($\nabla \equiv d/dz$) が大きく変化する。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

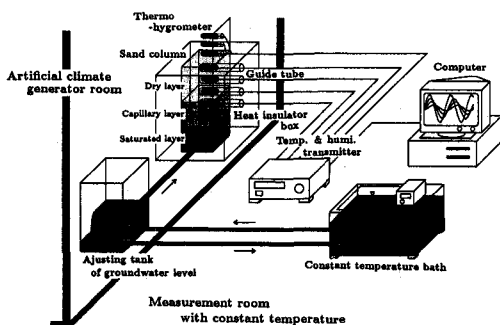
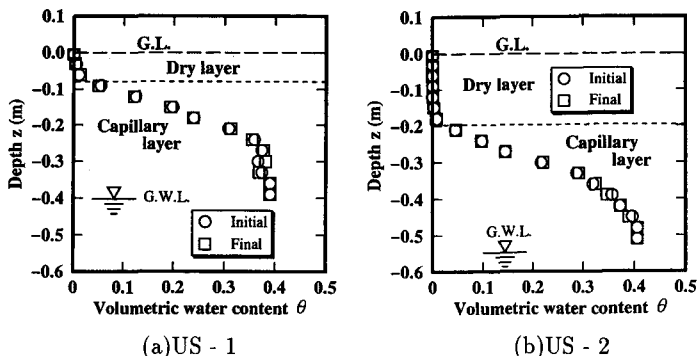


Fig. - 1 Experimental facility

Table - 1 Experimental conditions

CASE	z_w (m)	T_a ($^\circ\text{C}$)	T_w ($^\circ\text{C}$)
US - 1	-0.40	5 ~ 55	25
US - 2	-0.55	5 ~ 55	25

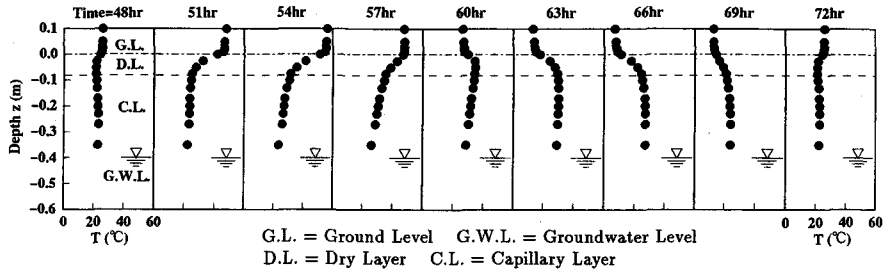
z_w = Depth of groundwater level
 T_w = Temperature of groundwater



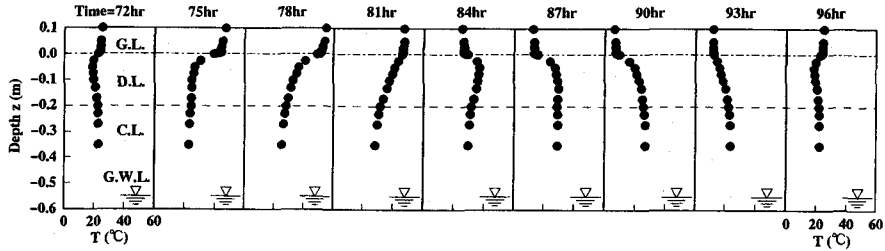
(a) US - 1

(b) US - 2

Fig. - 2 Profile of volumetric water content

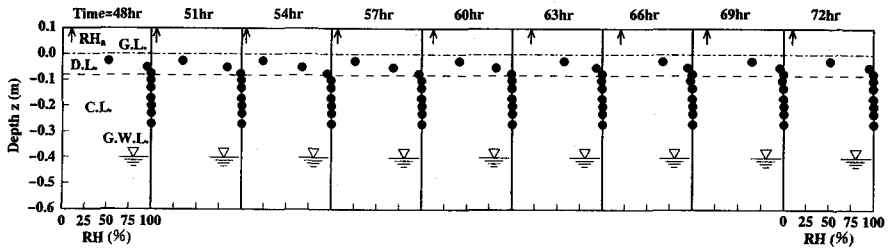


(a) US - 1

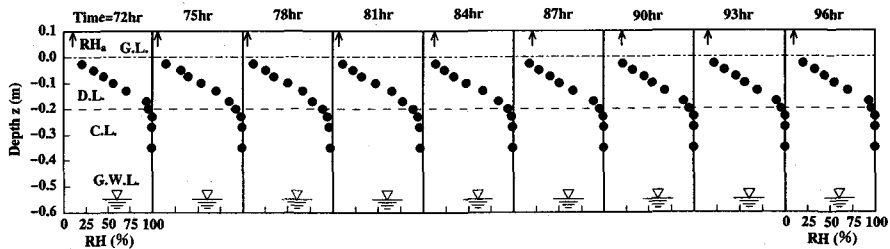


(b) US - 2

Fig. - 3 Time change of temperature profile over last diurnal cycle



(a) US - 1



(b) US - 2

Fig. - 4 Time change of relative humidity profile under diurnal temperature variations

率の違いに起因する。乾燥帯の温度勾配の絶対値 $|\nabla T|$ は、乾燥帯厚の薄い US - 1 の方が US - 2 に比べて大きい。また、定常蒸発では観察されないような現象、すなわち砂層内の熱移動の遅れによって乾燥帯内で温度が最大あるいは最小となるような分布が観察される。US - 1 では地表面下 0.025 ~ 0.05 m の位置で温度は実験開始後 Time 60 hr において最大、Time 48 hr および Time 72 hr において最小となり、US - 2 では同じく Time 84 hr において最大、Time 72 hr および Time 96 hr において最小となる。

Fig. - 4 に砂層内相対湿度 RH の鉛直分布 $RH(z)$ の経時変化および地表面上 0.1 m での相対湿度 RH_s

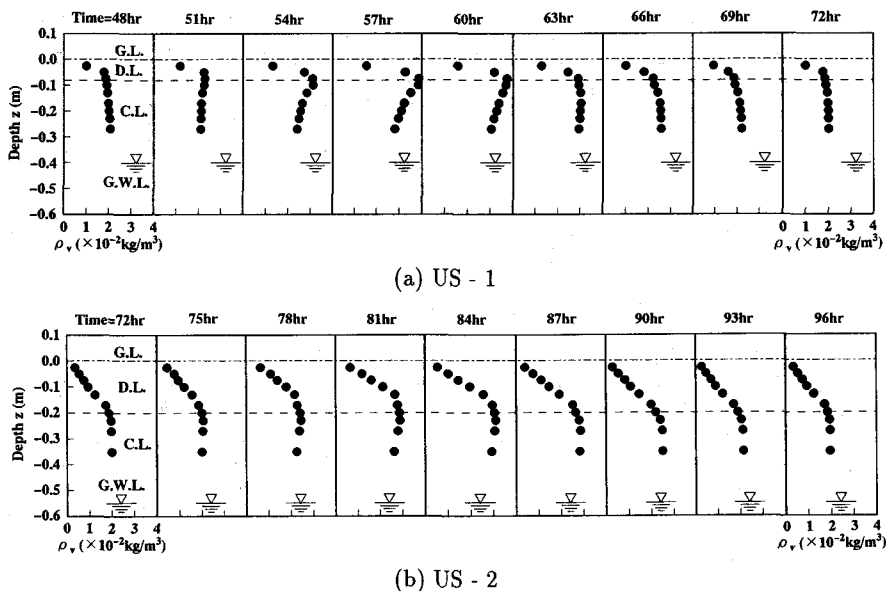


Fig. - 5 Time change of profile of water vapor density under diurnal temperature variations

(矢印で示す)の経時変化がそれぞれ示される。両ケースとも温度分布とは異なり、 $RH(z)$ は常に相似な形状を保ち、 RH は地下水面に向かって100%にまで増大する。毛管带上縁の RH はUS-1では100%に近くほぼ一定であるのに対して、US-2では周期的な変化が明瞭となる。一方、乾燥帯では両ケースとも RH は地上に向かって単調に減少し、高温時よりも低温時に比較的高い。すなわち、相対湿度 RH と温度 T は互いに負の相関関係にある。

Fig. - 5は水蒸気密度 ρ_v の鉛直分布 $\rho_v(z)$ の経時変化である。 $T(z)$ が非線形的な分布を呈しながら時間変化するにもかかわらず、両ケースとも乾燥帯の $\rho_v(z)$ はいつの時点でも線形的である。分布形状の時間的な変化をまずUS-1について観ると、高温時(Time 51 hr ~ 60 hr)の $\rho_v(z)$ は毛管带上縁で最大値を持つような分布になるのに対して、低温時(Time 63 hr ~ 72 hr)の $\rho_v(z)$ は毛管带上縁で最大値を持たず、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。すなわち気温上昇過程で毛管带上縁の ρ_v が最大となるような分布が形成され、その後の気温低下とともに毛管带上縁の ρ_v は減少して、 $\rho_v(z)$ は地表面に向かって単調減少するような分布となる。US-2の $\rho_v(z)$ も同様であり、高温時(Time 75 hr ~ 84 hr)には毛管带上縁で最大値を持つ分布となり、低温時(Time 87 hr ~ 96 hr)に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、乾燥帯の $\nabla \rho_v$ は両ケースとも常に負であり、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 $\nabla \rho_v$ は上述したように高温時には正、低温時には負になりやすい。

これよりどちらのケースも、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、低温時には上方へ向かうことが知れる。このことは毛管带上縁で蒸発が活発に起こっていることを示唆する。なお、毛管带上縁で水蒸気密度が最大となるような現象は地下水位の高いUS-1の方でより明確に現れる。特に、高温時には毛管带上縁の ρ_v の値がUS-2よりもUS-1の方で大きいことおよび乾燥帯厚の違いによって、乾燥帯の $|\nabla \rho_v|$ はUS-2よりもUS-1の方で常に大きくなる。この乾燥帯の $|\nabla \rho_v|$ の値の違いは後に示す蒸発量(蒸発フラックス密度)の違いに結びつく。

なお、蒸気圧分布 $P_v(z)$ は砂層内に渡る温度の違いが大きくないために、基本的には上述の $\rho_v(z)$ と同じような分布および性質を有する⁴⁾ので、 $P_v(z)$ については説明を省略する。

4. 蒸発フラックス密度の周期変化特性

Fig. - 6に気温 T_a 、地表面上0.1 mでの相対湿度 RH_a 、砂層表面付近($z = -0.025$ m)および毛管带上縁(US-1: $z = -0.08$ m、US-2: $z = -0.20$ m)における温度 T 、相対湿度 RH 、水蒸気

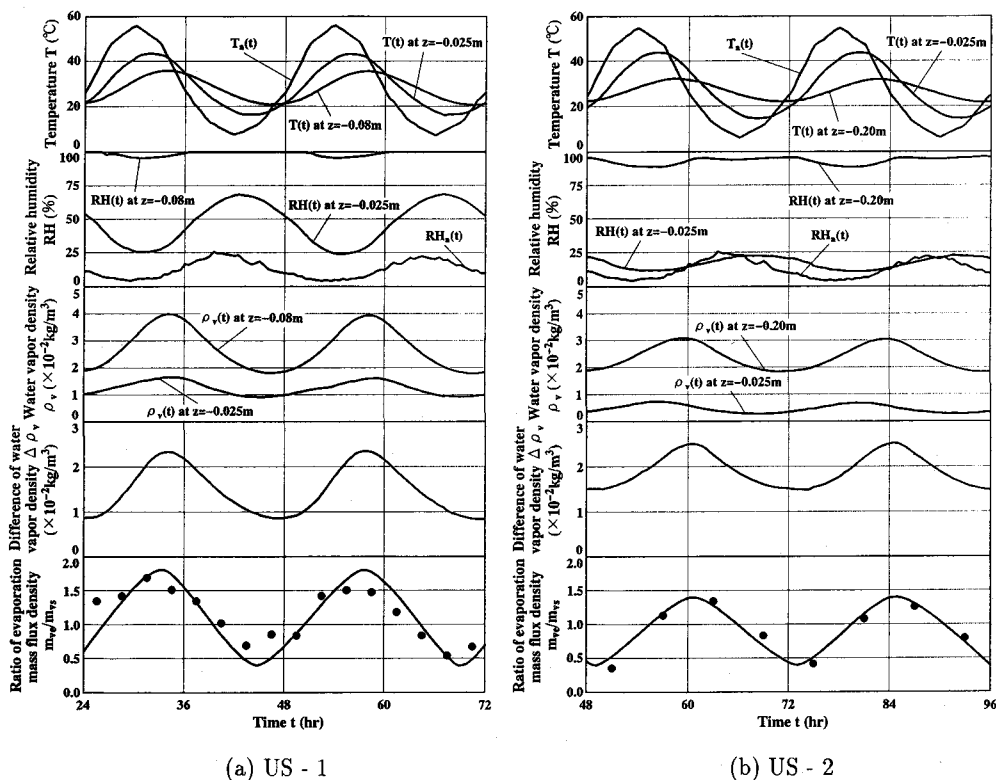


Fig. - 6 Time series of temperature, density of water vapor and evaporation mass flux density

密度 ρ_v および両測点間の水蒸気密度の差 $\Delta\rho_v$ 、さらには蒸発フラックス密度 m_{ve} の時系列が示される。 m_{ve} は人工気象室内で初期の定常蒸発時 ($T_a = 25^\circ\text{C}$ 、 $RH_a = 30\%$) に測定された蒸発フラックス密度 m_{vs} (US - 1: $5.50 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2\text{s}$ 、US - 2: $1.68 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2\text{s}$) で無次元化される。なお、両ケースとも終わりの2サイクル分を示す (US - 1: 第2～3サイクル、US - 2: 第3～4サイクル)。

まず蒸発フラックス密度の時系列を観ると、両ケースとも蒸発フラックス密度は高温時に大きく、低温時に小さい。しかし蒸発フラックス密度の値を比較すると、US - 1の方がUS - 2よりも常に大きく、前者の蒸発量は後者のそれの約5～8倍である。このことは、3. で述べたように乾燥帯の $|\nabla\rho_v|$ の値はUS - 1の方がUS - 2に比べて大きいという事実からも明らかである。この蒸発量の違いは地下水位の高低によるものであり、地下水位の高いUS - 1の蒸発量が大きいため、非定常蒸発においても定常蒸発と同様に地下水位が高くなるほど (乾燥帯が薄くなるほど) 蒸発量が大きくなる。また、気温 T_a の時系列 $T_a(t)$ に対する時間遅れ (位相差) を比べると、蒸発面が相対的に高いUS - 1の方がUS - 2に比べて位相差は小さい (詳細については後述)。

次にUS - 1の各時系列に注目する。気温 T_a と m_{ve}/m_{vs} の時系列を比較すると両者は同位相であるが、後者は相対的に約3時間の遅れがある。また、気温 T_a と毛管帯上縁の温度 T_D の間にも約3時間の位相差があり、Fig. - 3からも明らかなように、砂層深くなるにつれて気温と砂層温度の間の位相差が大きくなる。表面付近では温度 T が大きく変化するにも関わらず、 T とは逆位相的に RH が変化するために、 ρ_v の時系列 $\rho_v(t)$ の時間的な変化 (振幅) は小さい。一方、毛管帯上縁での温度 T_D の時系列 $T_D(t)$ の振幅は表面付近のそれよりも小さいが、毛管帯上縁の RH がほぼ100%で殆ど変化しないために、毛管帯上縁の $\rho_v(t)$ は T_D の変化に追従するような形で周期変化する。結果、毛管帯上縁の $\rho_v(t)$ の振幅は表面付近のそれに比べて大きくなる。このことは同図中の毛管帯上縁における $T_D(t)$ と $\rho_v(t)$ の位相の一致から明白である。よって、表面付近と毛管帯上縁の ρ_v の差 $\Delta\rho_v$ は高温時に大きく、

低温時に小さい。厳密に言えば、 $\Delta\rho_v$ は温度 T_D が最高時に最大、最低時に最小となるように周期的に変化する。 $\Delta\rho_v(t)$ と $m_{ve}/m_{vs}(t)$ に注目すると、2つの時系列は同位相でかつ位相差もない。

以上より、 $m_{ve}/m_{vs}(t)$ と $T_a(t)$ の位相差 (約 3 時間) は $T_a(t)$ と $T_D(t)$ の間の位相差に起因すると思われる。すなわち、地下水位が比較的高い場合では、蒸発量の変化は毛管带上縁の温度の変化に依存すると考えられる。

一方、US - 2 の各時系列を見ると、蒸発量測定の間隔が US - 1 とは異なり 6 時間であるが、 m_{ve}/m_{vs} の時系列は気温 T_a の時系列と同位相で変化し、約 6 時間の位相差がある。しかし、 $T_a(t)$ と $T_D(t)$ の間の位相差は約 4 時間である。

US - 1 の場合と同じように、 T と RH が逆位相で変化するため、温度 T が大きく変化するにも関わらず表面付近の $\rho_v(t)$ の振幅は小さい。毛管带上縁の $\rho_v(t)$ は表面付近の $\rho_v(t)$ に比べて振幅が大きく、また温度 T_D と同位相の変化を示す。しかし、この両者の間には位相差が存在しており、 $\rho_v(t)$ は $T_D(t)$ に完全に追従して変化しているわけではない。その結果、 $\Delta\rho_v(t)$ と $T_D(t)$ の間にも位相差が生じる。これは毛管带上縁の RH が一定でなく周期的に変化するためである。また、表面付近の $\rho_v(t)$ と毛管带上縁の $\rho_v(t)$ を見ると、両者の間の位相差は US - 1 のそれに比べて大きい。 $\Delta\rho_v(t)$ と $m_{ve}/m_{vs}(t)$ を比較すると、US - 1 と同様に両者は同位相でかつ位相差もない。

以上より地下水位が低い場合では、蒸発量の変化は毛管带上縁の温度だけではなく、相対湿度の変化の影響も受けることがわかる。

5. 結論

日周期的に気温が変化する環境下における砂層内蒸発現象を理解するために、人工気象室内で蒸発実験を行い、蒸発フラックス密度の時間的変化と水蒸気密度分布のそれとの関連性について検討を行った。

以下に得られた結果を要約し、列挙する。

(1) 蒸発フラックス密度は地下水位の違いに関わらず、高温時に大きく低温時に小さくなるが、この時系列は気温の時系列に対して時間遅れ (位相差) がある。また、地下水位が高い場合の方が地下水位の低い場合に比べて常に蒸発量が多く、蒸発量と気温の時系列の間の位相差は小さい。

(2) 地下水位の高低に関わらず、乾燥帯の水蒸気密度勾配の絶対値は高温時に大きく、低温時に小さい。また、この絶対値は地下水位の高い場合の方が低い場合に比べて大きくなる。

(3) 気温の上昇とともに水蒸気密度分布は毛管带上縁で最大値をとるような分布となるが、その後の気温低下とともに毛管带上縁の水蒸気密度は小さくなり、水蒸気密度分布は毛管帯から地表面に向かって単調減少するような分布に変わる。この分布形状の変化は、地下水位が高いほど明確である。

(4) (1)、(2) および (3) より、砂層中の水蒸気が大気へ向かうための駆動力は乾燥帯の水蒸気密度勾配であり、その絶対値が低温時よりも高温時の方で大きいために、蒸発フラックス密度は高温時に大きく、低温時に小さいと考えられる。また、この乾燥帯の水蒸気密度勾配は地下水位、外部気象条件から決まる大気の水蒸気密度および毛管带上縁の水蒸気密度 (温度および相対湿度) に依存する。

最後に、本実験の遂行に当たっては福井県工業技術センター黒川和男主任にお世話になった。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 回年次学術講演会概要集、II - 318, pp.686 - 687, 1992.
- 3) 高野保英・福原輝幸：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、土木学会第 48 回年次学術講演会概要集、II - 122, pp.342 - 343, 1993.
- 4) 福原輝幸・高野保英：日周期気温変化を伴う浅層地下水の蒸発機構、1993 年日本地下水学会秋期講演会講演要旨、pp.2 - 7, 1993.
- 5) 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.