

吸水性織物布設法による砂層内蒸発抑制とそのメカニズム

Control of evaporation in sand layer by Moisture Absorbent Textile Laying Method and its mechanism

福原輝幸*・黒川和男**・高野保英***

By Teruyuki FUKUHARA, Kazuo KUROKAWA and Yasuhide TAKANO

The Moisture Absorbent Textile (MAT) has been developed to control moisture loss from desert, i.e. evaporation. The evaporation quantity from a sand column with MAT, horizontally inserted at a upper part of capillary zone, is 39 % smaller than that from a sand column without MAT. The decrease in the evaporation rate is attributed to the decrease in the vapor gradient over the dry zone. Its mechanism is as follows. Due to the soil moisture, the swollen MAT makes the upward moisture flux across MAT low and the dry zone becomes thick. As a result, the water vapor density gradient over the dry zone, namely the driving force for the upward movement of water vapor decreases.

keyword : *Moisture Absorbent Textile, evaporation control, drying, vegetable-planting*

1. はじめに

地球環境問題の一つに人口爆発がある。それに伴う食糧危機は国情の不安定性を招き、その影響は当事国のみならず周辺の国を次々に巻き込むような地球規模の社会問題を生みかねない。この対策として砂漠の緑化および乾燥地農業の普及は極めて有効である。この乾燥地農業、砂漠の緑化は主として農学、土壌学、農業土木工学、土木工学さらには化学工学の分野を中心に研究が進められている。現在、灌漑水の使用量を節約し、砂漠での安定的な水供給を確保するための方法として、保水剤法、海水淡水化法、地下ダム法等が実際に供用されている。筆者等は吸水性織物 (Moisture Absorbent Textile, MAT と名付ける) に着目して、砂層内に MAT を布設する方法 (MAT Laying Method、以下では MATLM と呼ぶ) を提案し、砂漠緑化の実施に向けた検討を行っている。その結果、MAT の素材や織り方を工夫することにより、砂層中の水分分布および蒸発量の制御が可能となった¹⁾。

本論文では、MAT を砂層中の種々の深さに布設した蒸発実験を長期にわたり行い、MAT の蒸発抑制効果とそのメカニズムについて得られた結果を報告する。

2. 実験方法と実験条件

蒸発・乾燥実験には4つのアクリル樹脂製のカラム (縦0.1m、横0.1m、高さ0.6m) が用意され、Fig. 1 (a) に示されるような4種類の蒸発抑制方法が試みられた。Type-A は何も手を加えない砂層、Type-B は MAT を砂層表面に布設する方法、Type-C は MAT を乾燥帯 (砂層表面下 0.05m、すなわち $z = -0.05m$) に布設する方法、Type-D は MAT を毛管帯 ($z = -0.2m$) に布設する方法、である。MAT は福井県工業技術センターで開発されたものの1つであり、厚さ約 0.25mm の織編物である。地下水位は4つのカラムとも同じ位置 ($z = -0.4m$) になるように定水位タンクで制御されるが、蒸発実験開始後、水供給は停止される。この実験では温度 30℃、相対湿度 45 % の恒温恒湿室に4本のカラムを放置し、150

* 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 3-1-9)

** 正会員、福井県工業技術センター (〒910 福井市河合鷺塚町 61 字北稲田 10)

*** 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 3-1-9)

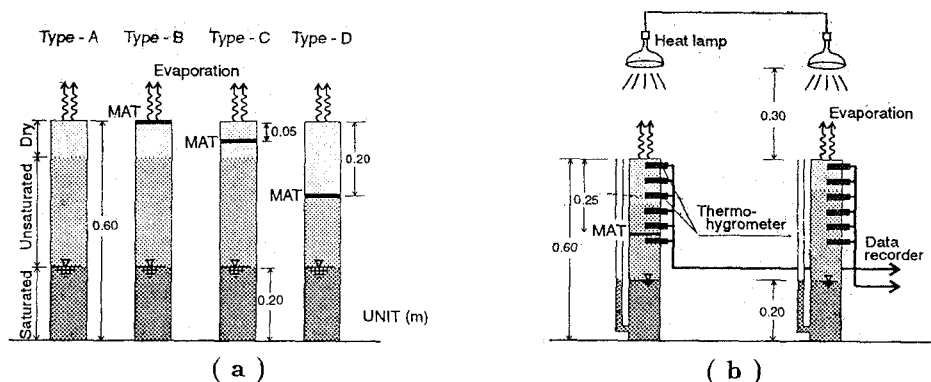


Fig. 1 Appearance of evaporation control experiment using MAT

日間にわたり一定期間毎に水分分布および蒸発量が測定される。なお、水分分布は中性子水分計(精器堂製)により、乾燥帯と毛管帯の内部境界(以下では、界面と呼ぶ)の位置は目視観察により、蒸発量は電子天秤により、それぞれ求められる。

次に、MAT の蒸発抑制のメカニズムを明らかにするために、上述した砂層カラムと同じものを用いて、MAT を地表面下 0.25m ($z = -0.25\text{m}$) に布設したものとそうでないものについて、水蒸気密度分布の違いを調べる。この実験の概要を Fig. 1 (b) に示す。水蒸気密度分布は 10 本の温・湿度センサー (VAISALA 製) により求められる。この実験では蒸発を促進させるために、地表上 0.3m の高さに赤外線放射ランプが設置され、地下水位 ($z = -0.4\text{m}$) は実験を通じて一定に保たれる。

3. 実験結果

3.1 MAT の蒸発抑制効果

150 日間にわたる積算蒸発量の経時変化を Fig. 2 に示す。すべてのタイプで積算蒸発量は直線的に増大しており、蒸発フラックス密度は一定である。同一経過時間に対する積算蒸発量は Type-A、Type-B、Type-C、Type-D の順に減少しており、MATLM を実施したケースは全て蒸発抑制の効果が認められる。Fig. 2 を基に、蒸発フラックス密度 M_v を求める。Type-A の蒸発フラックス密度 $M_{vA} = 1.41 \times 10^{-6} (\text{kg}/\text{m}^2\text{s})$ を基準とし、その他の砂層カラム (Type-B~Type-D) の蒸発フラックス密度 M_{vi} との比 $ER_i = M_{vi}/M_{vA}$ を蒸発比 (添字 $i = B \sim D$, i : タイプ名) と定義する。勿論、蒸発比が小さいほど蒸発抑制は高くなる。各蒸発比は、 $ER_B = 0.82$, $ER_C = 0.72$, $ER_D = 0.39$ となり、乾燥帯よりも毛管帯上部に MAT を布設した方が蒸発抑制効果は高い。Type-B および Type-C の蒸発量減少は、MAT が水蒸気移動を抑制するために生じたと言える。

次に、水分 (体積含水率 θ) 分布の経時変化および界面位置について論じる。Fig. 3 は各カラム内の水分分布の経時変化を表す。Type-D を除く全ケースで水分分布の痩せ細りは毛管帯全域に及んでいる。これは、蒸発により地下水位は低下しているにもかかわらず、界面位置が変化しないことから推察できる。Type-D の水分分布は MAT の下方で水分低下が観察されるが、150 日後でも MAT 上方では水分低下が殆ど認められない。界面の位置は Type-D で最も低い。本実験で設定した地下水位に対して、通常界面は $z = -0.09\text{m}$ 前後に位置するが、Type-D では MAT の布設位置 ($z = -0.2\text{m}$) にくるため、あたかも MAT が界面のように見える。これは MAT が保水することによって膨潤し、MAT の透水係数が砂層のそれよりも小さくなり、水分の上方移動を阻止するためである。ちなみに、MAT を挟んだ砂層の飽和透水係数は

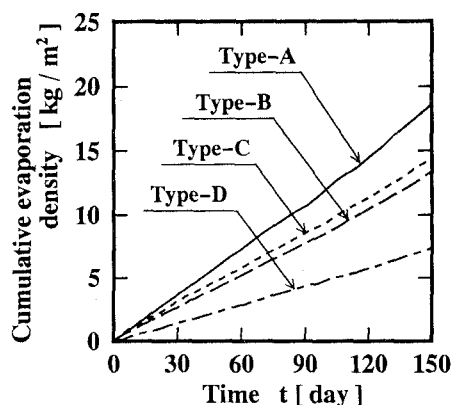


Fig. 2 Cumulative evaporation flux density versus time

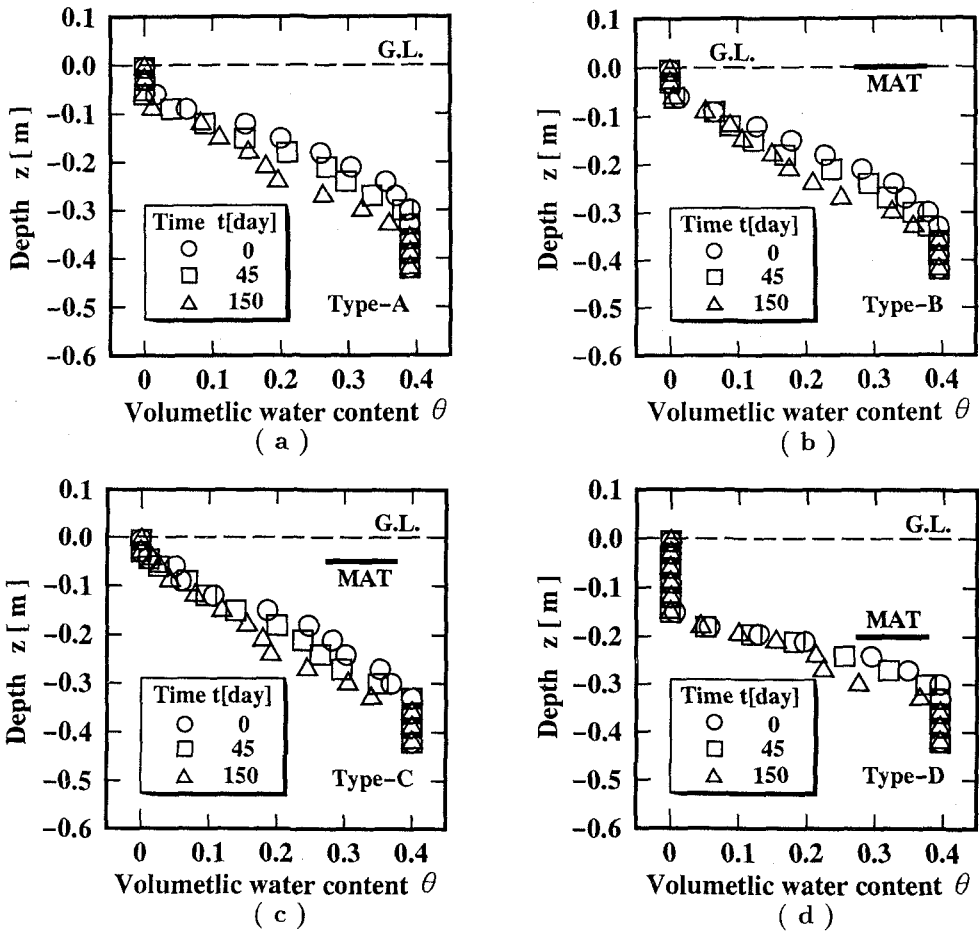


Fig. 3 Time change of volumetric water content profile

MAT を含まないその約 1/5 となる。実際にも、Fig. 3(d) の $z = -0.18\text{m}$ の体積含水率は約 0.05 であり、若干の湿潤状態にあることから、MAT を通じて幾分かの水分移動が認められる。一方、MAT 直下の砂層は体積含水率が約 0.21 であり、十分湿潤している。残りの Type-A、Type-B および Type-C の界面位置はほぼ同じであり、水分分布の経時変化にも大きな差異はない。

3.2 で後述するように界面で蒸発が生起している点を考慮すれば、Type-D に関して MAT 上の $\theta(z)$ の時間的变化が小さいことは、MAT から蒸発量に見合うだけの水分が MAT を通じて MAT 上の砂層に供給されていることを示唆する。このために砂層内の水分量の減少が MAT 下方の不飽和帯に現れたものと思われる。

3.2 MAT の蒸発抑制機能と水蒸気密度分布の関係

以下では、MAT の蒸発抑制機能について赤外線放射ランプによる蒸発乾燥実験から得られた砂層内水蒸気密度分布の構造を基に検討する。

Fig. 4 には温度分布 $T(z)$ および水分分布 $\theta(z)$ を示す。MAT の有無による温度分布の大きな違いはない。水分分布に関しては、3.1 でも述べたように MAT の布設によって界面の位置が下がり、乾燥帯の厚さが増大する。ただし、ここでは 3.1 の Type-D に比べて MAT の位置を下げ、高含水域に MAT を布設したために、MAT を横切る水分フラックスが増大し界面は上昇した。

Fig. 5 には相対湿度分布 $RH(z)$ が、Fig. 6 には水蒸気密度分布 $\rho_v(z)$ がそれぞれ示される。 RH は MAT 布設に関係なく界面で 100 % となり、界面から地表に向かって減少する。 $\rho_v(z)$ には ρ_v の最大値が観られ、その位置も MAT の布設に関係なく界面に現れる。乾燥帯では $d\rho_v / dz < 0$ 、毛管

帯では $d\rho_v/dz > 0$ より、水蒸気拡散の源、すなわち蒸発が活発に起こっている位置は ρ_v が最大となる界面であることが判る。このように界面以深では $d\rho_v/dz > 0$ および $RH \approx 100\%$ より、水蒸気の下方向移動に伴って凝縮が生じていることが推察される。言うまでもなく、この凝縮現象は水分保持の観点からは好ましい。一方、乾燥帯中の $\rho_v(z)$ は従来の通り線形に近い。同図中には周囲空気の ρ_v ($\rho_{va} = 1.1 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$) が矢印 (I) で示されており、乾燥帯の ρ_v は地表に向かうにつれて ρ_{va} に漸近していることも知れる。

次に、蒸発フラックス密度 M_v と $\rho_v(z)$ の関係について考察する。定常蒸発時の砂層内蒸発フラックス密度 M_v は乾燥帯中の水蒸気密度勾配に比例し、次式で与えられる。

$$M_v = \xi D_{atm}^* (\rho_{vD} - \rho_{vs}) / D \quad (1)$$

ここに、 ξ : 蒸発面補正係数、 D_{atm}^* : 砂層空隙内の水蒸気拡散係数、 ρ_{vD} : 界面の水蒸気密度、 ρ_{vs} : 地表付近の水蒸気密度および D : 乾燥帯厚、である。MAT の無い砂層カラムからの蒸発フラックス密度 M_{vo} は $4.0 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 、MAT を布設した場合のそれ M_{vm} は $2.1 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ であり、蒸発比 $M_{vm}/M_{vo} = 0.52$ となる。一方、式(1)に従って計算された蒸発比は $M_{vm}/M_{vo} = 0.47$ であり、計算値と実験値の適合は良い。このことから MAT の蒸発抑制効果は、MAT の保水性と難透水性によって水分の上方移動が抑制されて MAT 上方の乾燥帯が長くなり、地表に向かう水蒸気拡散の駆動力である乾燥帯の水蒸気密度勾配の絶対値が減少したことに起因する。

4. おわりに

乾燥地土壌の保水効果を高める方法として、吸水性繊維物 (MAT) による蒸発抑制方法 (MATLM) を提案し、砂層カラムを用いて MAT の蒸発抑制効果とそのメカニズムを実験的に検討した。結論は以下の通りである。

- (1) MAT の保水性による水分分布の制御 (乾燥帯厚の増大) は、乾燥帯内の水蒸気密度勾配の絶対値を減少させ、蒸発量を減減させる。
- (2) MAT は水蒸気移動に対する遮断効果としても作用し、蒸発量を減減させる。
- (3) MAT の布設位置は保水性と蒸発抑制から観て、毛管帯が望ましいと思われる。今回の結果に農業および植物生育の観点も加味して、MAT の布設位置は決定されるべきであろう。

参考文献

- 1) 黒川和男・村上哲彦・笠島文夫・福原輝幸: 吸水性繊維物布設法による砂層内水分分布制御および蒸発抑制-第2報-、第49回土木学会年次学術講演会講演概要集、pp.250-251, CS-122, 1994.

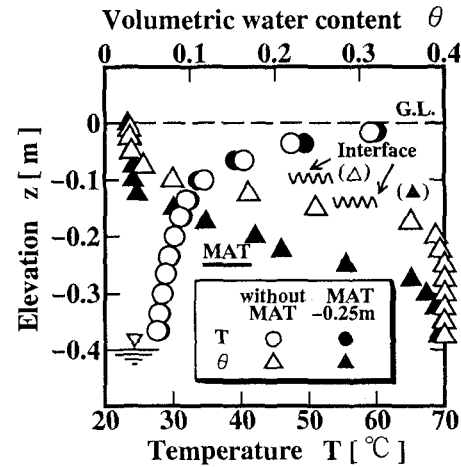


Fig. 4 Profiles of temperature and volumetric water content

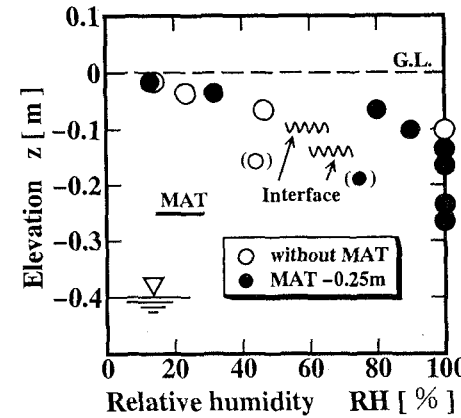


Fig. 5 Profile of relative humidity

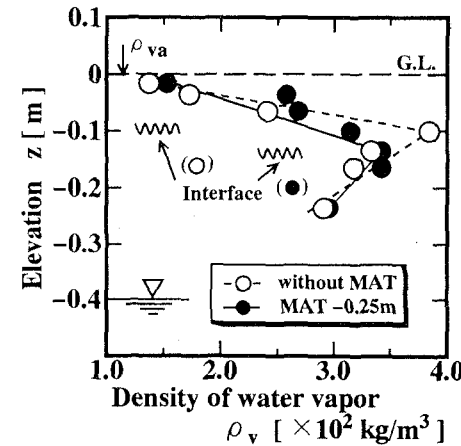


Fig. 6 Profile of water vapor density