

砂層カラム内の水蒸気移動と蒸発メカニズム

Movement of water vapor in sand column and mechanism of evaporation

福原輝幸*・佐藤邦明**・馬場富夫***

By Teruyuki FUKUHARA, Kuniaki SATO and Tomio BABA

This paper presents an experimental investigation on the movement of water vapor in a sand column, which is comprised of dry, capillary and saturated zones, and the relationship between the vapor pressure profile and evaporation velocity. The vapor pressure is obtained from the simultaneous measurements of temperature and relative humidity. It became clear that the evaporation actively occurred near the capillary fringe and most of the evaporated water vapor moved toward the atmosphere and the remaining water vapor moved downward and then condensed. The experimental results for the vapor pressure profiles well agreed with the theoretical results based on the one way diffusion theory. A comparison between the theoretical and experimental results demonstrated the importance of the effect of the vapor pressure gradient across the dry zone on the evaporation velocity.

Keywords: evaporation, drying, heat and mass transfer, groundwater flow

1. 緒 論

地下水位が浅く砂層表面からの蒸発が起こる場合、その蒸発量（厳密には蒸発速度）の決定は比較的容易である。何故なら、液状水が外気に触れているために蒸発速度が気象因子（放射強度・風速・気温・湿度など）に直接支配されるからである。しかしながら地下水位が深く、砂層内から蒸発が起こる場合には、蒸発量と外部気象因子および乾燥帯（地下水位）が如何に結びつくのかは不明な点が多い。この原因の一つは砂層内の水蒸気移動が明確に把握できていないことにある。例えば、砂層内のどこで蒸発が起こり、どのように拡散しているかといった基本的項目は未だ直接的に測定されていない。鈴木¹⁾、宮崎²⁾の研究は初期含水量が小さく、密閉系での水蒸気移動の測定ゆえ、ここで対象とするような開放系でかつ水分量も飽和から気乾状態と広範囲に変化するような砂層内の蒸発とは水蒸気移動の性状を異にする。そのためのアプローチとして筆者等は砂層カラム中の相対湿度と温度の同時計測を行ない、蒸気圧分布の特性を調べている。³⁾

本研究では蒸気圧分布を基に、地下水位が低く乾燥帯を有する砂層内蒸発のメカニズムを明らかにし、蒸発および水蒸気の移動特性さらに蒸気圧分布と蒸発速度の関係について検討を行なう。

* 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丁目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
(〒338 浦和市下大久保255)

*** 正会員 福井コンピュータ(株)
(〒910 福井市高木中央1-2501)

2. 熱エネルギー方程式

室内実験結果をより正確に把握するために砂層カラムからの熱損失を考慮する。蒸発は毛管帯上縁に集中する⁴⁾ことを考慮して、乾燥帯と毛管帯の熱エネルギー方程式を導く。乾燥帯および毛管帯での水蒸気と液状水による顕熱は無視できるから⁵⁾、定常蒸発の熱エネルギー方程式は次のようになる。

$$\text{乾燥帯} : \lambda \partial^2 T_1 / \partial z^2 - h_a(T_1 - T_a) = 0 \quad (1)$$

$$\text{毛管帯} : \partial(\lambda \partial T_2 / \partial z) / \partial z - h_a(T_2 - T_a) = 0 \quad (2)$$

ここに、 h_a ：カラムを取り囲む断熱材の熱損失係数、 T_a ：大気温度、であり、添字1は乾燥帯、添字2は毛管帯をそれぞれ表す。熱伝導率 λ と体積含水率 θ の関係は非線形⁶⁾であるから、式(1)および式(2)は数値計算(陰的差分法)により解かれる。式(1)および式(2)を同時に解くためには、さらに乾燥帯と毛管帯の間でのエネルギー収支式および質量保存式⁵⁾が必要であり、計算方法は基本的に既往の方法[文献(5)中の図-3のフローチャート]に従う。

3. 蒸発量と蒸気圧分布

土粒子表面上の気液界面から蒸発した水蒸気が温度勾配下の空隙を移動する状態を考える。このとき拡散による水蒸気フラックス m_v' は次式で与えられる。

$$m_v' = - \frac{\xi D_{a,tm}}{R_v T} \frac{\partial P_v}{\partial z} + \frac{\xi D_{a,tm} P_v}{R_v T^2} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

ここに、 P_v ：蒸気圧、 R_v ：水蒸気的气体定数、 ξ ：見かけ(単位面積)の蒸発面と実際のそれとの比、である。 $D_{a,tm}$ は空隙中の水蒸気の拡散係数であり、

$$D_{a,tm} = \varepsilon \alpha D_{a,tm}^* \quad (4)$$

となる。上式中、 ε ：空隙率、 α ：屈曲度、 $D_{a,tm}^*$ ：空気中の水蒸気拡散係数、である。

最終的に、砂層カラムから出て行く水蒸気フラックス m_v は移流効果(移流速度 V)を考慮して

$$m_v = m_v' + \rho_a \cdot V \quad (5)$$

となる。空気の質量フラックスは無視できると仮定し、ガス圧勾配による質量輸送はないことから(すなわち、 $m_a = m_a' + \rho_a \cdot V = 0$ 、 $P = P_a + P_v = P_{a,tm}$ (図-6を参照)、 P_a ：空気圧、 $P_{a,tm}$ ：大気圧、 ρ_a ：空気密度、 m_a' ：式(3)の添字を a に変えて得られる空気フラックス)、速度 V は求まり、式(5)に代入されて

$$m_v = - \frac{\xi D_{a,tm}}{R_v T} \frac{P}{P - P_v} \frac{\partial P_v}{\partial z} \quad (6)$$

を得る。結局、式(6)は見掛け上等温拡散の仮定から導かれる式と同じ表現になる。

後で詳しく説明するが、図-5の蒸気圧分布から判るように毛管フリンジより上側(乾燥帯)で蒸気圧勾配は負となるから、水蒸気は上向きに移動して、最終的に大気中に向う。従って、式(6)は乾燥帯で適用される。 $T(z)$ は式(1)を積分して、

$$T = (c_3 + c_4 z) \exp[(h_a / \lambda) z] + T_a \quad (7)$$

となる。地表面($z=0$)の温度 T_0 および地下水温度は境界条件として与えられる。毛管帯上縁($z=-D$)の温度 T_D は式(1)と式(2)より計算できるから、積分定数 c_3 および c_4 は決まる。すなわち、

$$c_3 = T_0 - T_a, \quad c_4 = -(T_D - T_a - c_3 \cdot \exp[-(h_a/\lambda)D]) / \{D \cdot \exp[-(h_a/\lambda)D]\} \quad (8), (9)$$

$T(z)$ はさらに z で積分可能であるから、 m_v は次式で計算される。

$$m_v = \frac{\xi D_{a \cdot m} P}{R_v F(-D)} \ln \left(\frac{P - P_{v0}}{P - P_{vD}} \right) \quad (10)$$

$$F(z) = [-c_3/(h_a/\lambda) + c_4/(h_a/\lambda)^2 + \exp\{(h_a/\lambda)z\}(c_3 + c_4 z)/(h_a/\lambda) - c_4 \exp\{(h_a/\lambda)z\}/(h_a/\lambda)^2 + (T_a + 273.15)z] \quad (11)$$

ここに、 P_{v0} ：地表面の蒸気圧、 P_{vD} ：毛管フリンジ($z=-D$)の蒸気圧、である。ただし、 $D_{a \cdot m}$ の温度依存性は対象とする温度範囲では小さいので無視される。

さらに式(10)を変形すると、乾燥帯にわたる蒸気圧分布は次式で表現される。

$$P_v = P - (P - P_{v0}) \exp[-m_v R_v \cdot F(z) / \xi D_{a \cdot m} P] \quad (12)$$

4. 実験装置および実験方法

砂層カラム(縦0.1x横0.1x高さ0.6m、厚さ15mmのアクリル透明樹脂)は恒温室内に設置され、周囲は厚さ25mmの高密度ガラスウール製の断熱材で覆われる。熱損失係数は予備実験で $h_a = 6.28 \times 10^{-4} (Kw \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$ となった。カラム内に豊浦標準砂を均一に充填し、蒸留水を所定の位置まで注入した後、放熱ランプによる放熱乾燥の実験を開始した。測定項目は温度、相対湿度、空隙中のガス圧(差圧)、体積含水率および蒸発量である。温度、相対湿度およびガス圧の測定システムを図-1に示す。温・湿度センサー(VAISARA製)は2組使用され、カラム中に埋め込まれた塩ビパイプのゴム栓を素早く取り除き、塩ビパイプに挿入される。計測時間は1箇所当たり30分~1時間を要する。なお、カラム中のパイプ先端はカラム中央に位置する。差圧計(山本電気製作所製)は±1 Paの値を感知する。蒸発量は地下水位調節用タンクの水深低下量から求められ、1日ごとに減少した水分量だけ補給することで、地下水位を一定に保つ。温度、体積含水率分布および蒸発率がほぼ定常に達したと思われる時点(蒸発開始後約

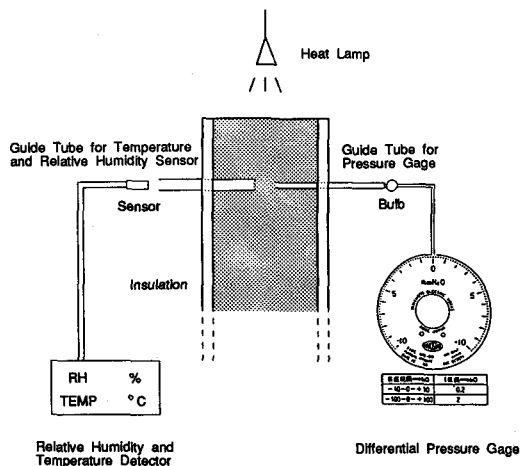


図-1 実験装置の概要

表-1 実験条件

Experimental case		CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
Density of sand	(kg/m ³)	2.462×10 ³	2.462×10 ³	2.462×10 ³	2.462×10 ³
Duration	(Day)	7	7	7	7
Ground water level	(m)	-0.55	-0.55	-0.40	-0.40
Porosity	(-)	0.421	0.421	0.421	0.421
Evaporation rate	(m/s)	1.800×10 ⁻⁹	2.310×10 ⁻⁹	2.310×10 ⁻⁸	2.860×10 ⁻⁸
Lamp height	(m)	0.5	0.5	0.3	0.3

1週間)で、温度、相対湿度およびガス圧が深さ(z)方向に沿って表面より2cmから5cmの間隔(合計10箇所)で測定された。体積含水率の測定には土壌水分計(NORTH HIGHTECH製)が用いられた。本研究では地下水位およびランプ高さ(放熱強度)のそれぞれ異なる4種類の定常蒸発実験を行なった。実験条件を表-1に示す。

5. 計算結果と実験結果の比較・検討

各実験CASEの温度分布 $T(z)$ および水分分布 $\theta(z)$ を図-2および図-3にそれぞれ示す。温度 T は測定平面中央付近の値であり、別途に熱伝対で測定された値と一致する。なお、側壁近傍を除き、 T は横方向にほぼ一様に分布している。さらに、図-2には式(1)、(2)および(10)を同時に満たすときの $T(z)$ および蒸発速度 V_e の計算結果も示されている。熱損失を考慮しなかった計算結果³⁾ に比べると地表付近の $T(z)$ はより実験結果に近づく。 V_e の計算値も表-1中の定常蒸発速度(実験値)とほぼ一致する。従って、外部蒸発能、地下水位および水分分布 $\theta(z)$ が与えられれば、温度分布 $T(z)$ および蒸発速度 V_e は一義的に決まる。

次に、毛管帯上縁部付近(後述するように蒸発が活発な領域)の熱エネルギー輸送状態の定量的評価を試みる。伝熱による熱エネルギーフラックスを Q_{T1} 、蒸発によるそれを Q_{T2} 、熱損失エネルギーを Q_{T3} とすれば、CASE-1では $Q_{T1} : Q_{T2} : Q_{T3} = 1 : 1.83 : 0.07$ 、CASE-2では $Q_{T1} : Q_{T2} : Q_{T3} = 1 : 2.33 : 0.08$ 、CASE-3では $Q_{T1} : Q_{T2} : Q_{T3} = 1 : 1.29 : 0.1$ およびCASE-4では $Q_{T1} : Q_{T2} : Q_{T3} = 1 : 1 : 0.13$ 、となる。これより地下水面が地表に近くて蒸発速度が大きな場合の乾燥過程では、 $T(z)$ に及ぼす蒸発潜熱の影響の大きいことが理解される。また、 Q_{T3} は Q_{T1} および Q_{T2} に比べて1オーダー小さく、熱損失による全熱エネルギー輸送への貢献は小さい。

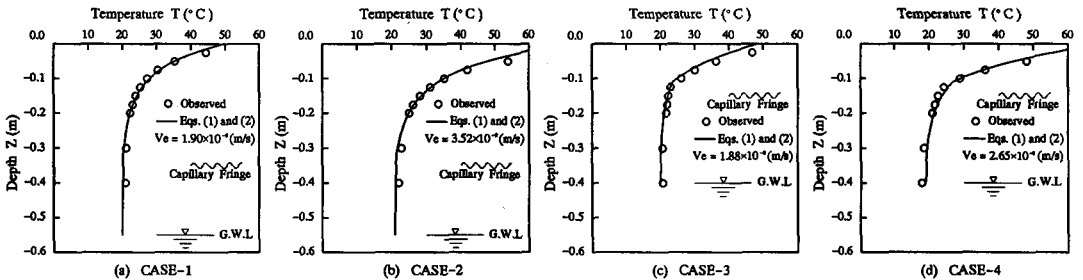


図-2 温度分布

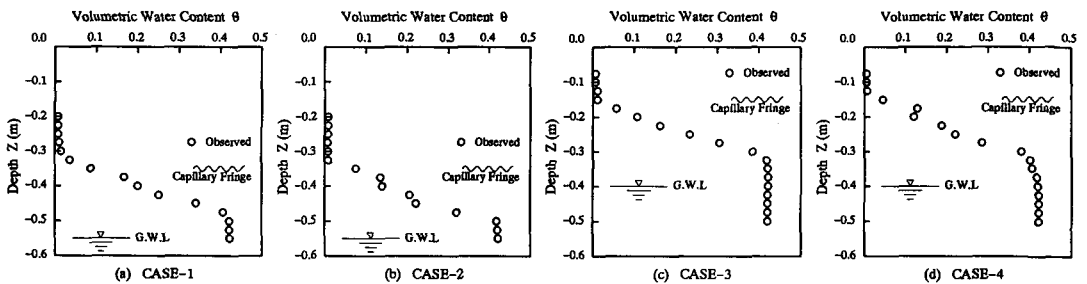


図-3 水分分布

次に、相対湿度分布 $RH(z)$ を図-4に示す。毛管帯の大部分で $RH \approx 100\%$ であり、毛管帯上縁部付近から上方の乾燥帯に向って RH は減少する。地下水位が同じでランプ高さ(放熱強度)の違うCASE-3とCASE-4を比較すると、放熱強度が強く温度の高いCASE-4の方がCASE-3に比べて、同じ z に対する RH の値は小さくなる。

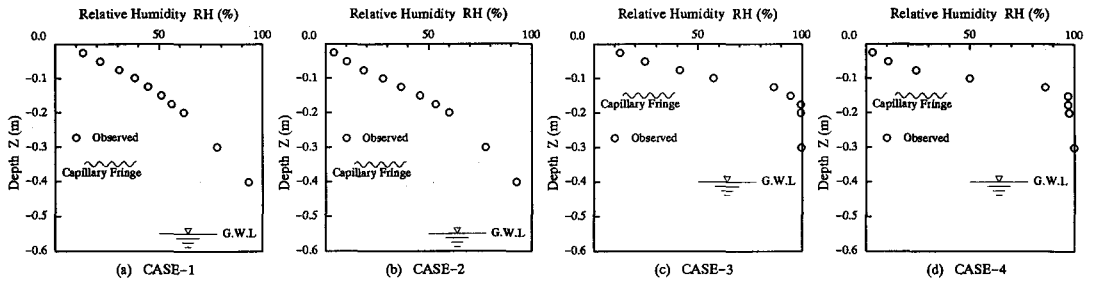


図-4 相 対 湿 度 分 布

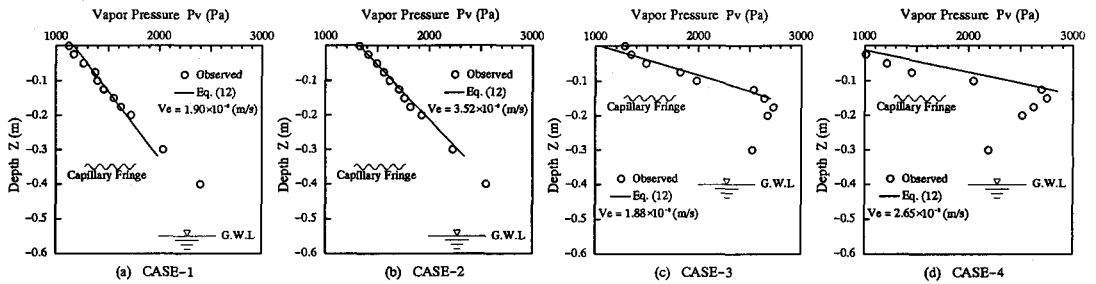


図-5 蒸 気 圧 分 布

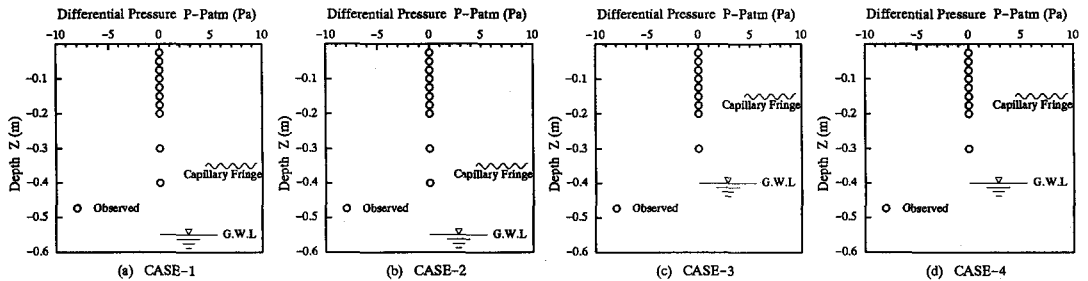


図-6 差 圧 分 布

図-5は蒸気圧分布 $P_v(z)$ である。各CASEとも、 P_v の最大値は毛管带上縁部に位置し、地表面および地下水面に向って P_v はそれぞれ減少する。すなわち乾燥帯では $dP_v/dz < 0$ 、毛管帯では $dP_v/dz > 0$ であり、水蒸気は前者では地表に向って、後者では下方に向ってそれぞれ移動する。これより、砂層内蒸発は毛管带上縁部で活発であることが知れる。このことは毛管带上縁部での塩類集積現象⁴⁾をうまく説明している。さらに蒸発して系外に向う水蒸気フラックス密度は乾燥帯の蒸気圧勾配に依存し、蒸発した水蒸気の一部は再び下方に向い凝縮して液状水になることも理解できる。従って、地下水位が下がる（乾燥帯の厚さが増す）につれて $|dP_v/dz|$ が小さくなり、蒸発速度は減少すると考えられる。また、今回の実験条件では、同じ地下水位でも放熱強度の高い方で $z=-D$ での P_v には差異がないにもかかわらず地表付近の P_v の低下のために $|dP_v/dz|$ が大きくなり、蒸発速度が増大する。毛管帯の dP_v/dz は水蒸気拡散のsourceである毛管带上縁部の P_v とsinkである地表面のそれとの差および乾燥帯厚さに依存するから、蒸発速度は内部因子（多孔媒体の不飽和特性、地下水位など）のみならず、地表面上の外部（気象）因子にも強く依存することが判る。なお、図中の実線

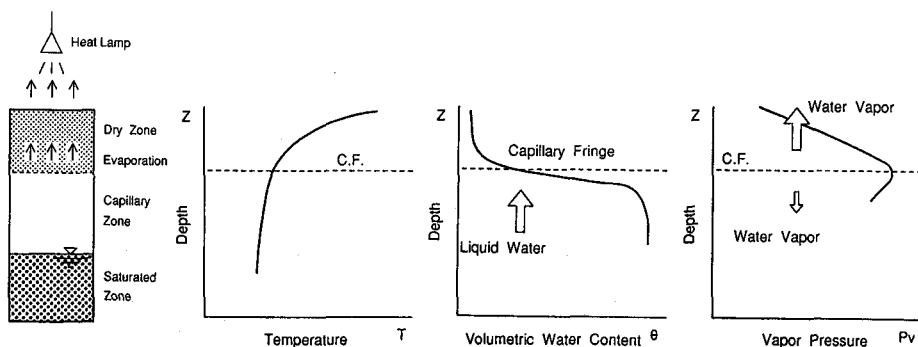


図-7 砂層内蒸発および水分移動の概念図

は式 (12)により計算された $P_v(z)$ であり、実験値と良く一致している。このとき、蒸発面積の補正係数は0.4~0.8の値をとる。

図-6は砂層空隙中の差圧(ガス圧-大気圧)の鉛直分布であり、差圧はほぼ0に等しく、ガス圧勾配により励起される質量輸送は考慮しなくてよい。

以上の結果を基に温度勾配下の砂層内蒸発および水分移動を模式的に示したものが図-7である。同図は毛管力で上昇した液状水マスフラックス密度が毛管帯上縁部で活発に蒸発し、その全てが大気中に向かうのではない(蒸発した水蒸気の一部は再び凝縮して液状水に戻る)ことを表している。このことは定常蒸発量の計算方法として液状水のフラックスを基に蒸発量を計算する方法は厳密には適切でないことを意味する。

6. 結 論

地下水位が比較的高い場合の放熱乾燥過程における砂層内蒸気圧分布特性を基に、砂層内での蒸発および水蒸気移動メカニズムを明らかにすると共に、蒸発速度と蒸気圧分布との関係についてモデル化を行ない、その妥当性を検証した。以下に、得られた結果を要約し、列挙する。

- (1) 砂層空隙中のガス圧は大気圧にほぼ等しく、一方拡散理論による蒸発量モデルは妥当である。
- (2) 相対湿度は毛管帯の大部分で100%に近く、毛管帯上縁付近から乾燥帯に向い急激に減少する。
- (3) 蒸気圧の最大値は毛管帯上縁部に現われ、地表面および地下水面に向って蒸気圧は減少する。
- (4) 蒸発速度は乾燥帯の蒸気圧勾配に依存し、蒸発した一部の水蒸気は凝結して液状水に戻る。

本研究の遂行にあつては、岩谷直治記念財団の補助を得た。また、実験に際しては福井県工業技術センターの協力を得た。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 鈴木義則：温度傾度下における土壌水分の移動、農業気象、第18巻、第3号、pp.10-16、1962
- 2) 宮崎毅：温度勾配下の砂における水蒸気の凝縮と移動、農業土木学会論文集、第61号、pp.1-8、1976
- 3) 馬場富夫・福原輝幸・竹川秀男：砂層カラム中の水蒸気移動メカニズム、土木学会第46回年次学術講演概要集、II-31、pp.102-103、1991
- 4) K. Sato, T. Fukuhara and S. Borjes: Dynamic analysis of heat, mass and solute transfer due to evaporation from a soil surface, 9th International Heat Transfer Conference, Jerusalem, Israel, 1990
- 5) 福原輝幸・佐藤邦明・S. Borjes: 蒸発に伴う乾燥層の発達過程と蒸発量予測のための簡便解法、水工学論文集、第35巻、pp.9-14、1991