

空隙二重構造をもつ土壌層での蒸発・凝結に関する実験的研究

大同工業大学大学院 学生会員 ○伊藤 大貴

大同工業大学工学部 正会員 下島 榮一

1.はじめに

乾燥・半乾燥地域の非常に乾いた地表面付近では、日周期的に凝結—蒸発が繰り返されている。この過程を明らかにすることは乾燥地での水収支・熱収支や生態環境条件を考究する上で基本となる。本文は、特に地層の空隙が大空隙と小空隙で構成されるような二重構造を有する土壌を対象にして、この空隙系が上記の蒸発、凝結に及ぼす影響を、実験を介して調べたものであるが、そこでは土中の水蒸気の挙動が着目される。

2.実験材料・方法

2-1.土壌層： 空隙二重構造をもつ土壌として、市販の多孔質赤玉土(小粒)を 2.36mm のふるいにかけ、通過しなかったものを対象にしたが、そこでの粒度は、2.36mm～4.8mm に分布し、中央粒径が 3.5mm となった。ここに、対象土壌の field capacity は重量含水率で約 0.5、飽和重量含水率は約 0.81(体積単位で 0.62)、air-entry value は約 0cm である。この気乾状態の赤玉土を、底板を有する直径 10cm、長さ 100cm の PVC パイプに一樣になるように充填して(見かけの密度 0.83 g/cm^3)土壌層を作り、重量計に鉛直に設置した。またこの土壌層表面から深さ 18cm までの間に、表面付近を密にして計 8 本の棒状の温湿度センサー(Vaisala; HMP41)を円筒側面より水平に挿入し固定した。

2-2.大気条件： 凝結過程や蒸発過程の実験として、最初、温度 25°C 、相対湿度(RH)をそれぞれ 20%及び 60%に設定した土壌層の表面を、湿度 60%(実験 A-1)及び 20%(実験 A-2)の大気に開放して実験を行った。これら一連の実験の大気温度は 25°C に固定している。また、両過程の湿度の変動幅の大きさの影響を調べるため、実験 A での RH = 60%～20%を 40%～20%に変えた実験も行った。以下、加湿・除湿過程の場合を、それぞれ実験 B-1 及び実験 B-2 と呼ぶ。

下記第 4 節の実験結果の考察で、比較のため単一の空隙系をもつ砂質土壌層の同様な実験条件での既存の結果¹⁾を引用するが、この土壌は西オーストラリアにある CSIRO の Yalanbee 試験場²⁾のもので、中央粒径は 0.55mm となっている。

3.実験結果

3-1.土壌層内の水蒸気密度の変化

土層内の水蒸気密度 $\rho_v(X,t)$ の変動を、データ整理の都合上、次式に示す無次元化した修正水蒸気密度 ρ_v^* で表す。

$$\rho_v^* = [\rho_v - \rho_{v0}] / [\rho_{v1} - \rho_{v0}] \quad \dots(1)$$

ここに、 X ：土層表面からの深さ、 t ：経過時間、 ρ_{v0} ：実験開始時($t = 0$)での ρ_v 、 ρ_{v1} ：大気の ρ_v であり、またそれぞれに対応する ρ_v^* を $\rho_{v0}^* (= 0)$ 及び $\rho_{v1}^* (= 1)$ と記す。図 1(1)は実験 A-1 の各測定点での ρ_v^* の時間変化を示したものであり、横軸を $X/\sqrt{t}$ にとっている。図より、種々の深さの ρ_v^* のデータは重なっている、 $\rho_v^*(X,t)$ は $X/\sqrt{t}$ の関数で一義的に与えられることが分かる。また、実験 A-2 の同様な実験結果を図 1(2)に示すが、乾燥過程においても $\rho_v^*(X,t)$ は $X/\sqrt{t}$ の関数で与えられ

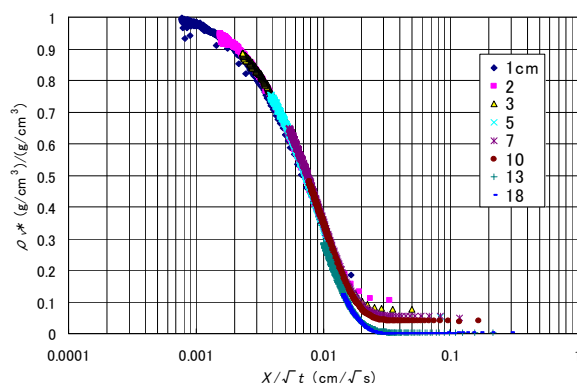


図 1(1) ρ_v^* と $X/\sqrt{t}$ の関係 (実験 A-1)

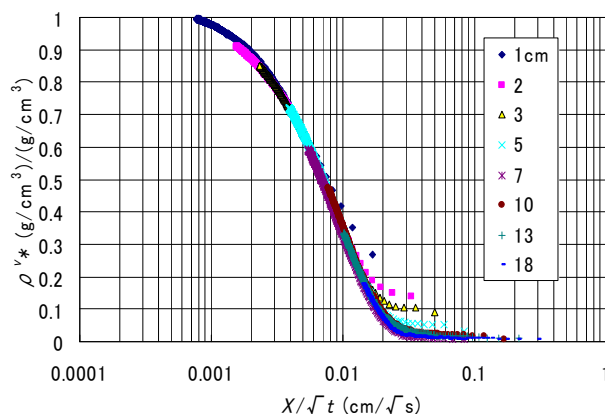


図 1(2) ρ_v^* と $X/\sqrt{t}$ の関係 (実験 A-2)

キーワード：赤玉土層、蒸発、凝結、水蒸気移動、実験

連絡先 〒457-8532 名古屋市南区白水町 40 大同工業大学都市環境デザイン学科 TEL: 052-612-5571 FAX: 052-612-5953

ることが分かる。さらに、両図を比較すると、実験 A-1 と A-2 のデータは重なることが分かったので、加湿(凝結)過程、除湿(蒸発)過程での水蒸気の挙動は可逆過程的であるといえる。

実験 B についても、加湿、除湿の両過程共、 $\rho_v^* \sim X/\sqrt{t}$ のデータは実験 A と同様な特性を示し、またこれらのデータは実験 A でのデータとほぼ重なり同一の曲線を描くことが分かった。即ち、大気湿度条件の変動幅の両過程に及ぼす影響は水蒸気密度を式(1)の様に変換し $X/\sqrt{t}$ に対して調べると、明確な差が現れないことになる。

3-2.加湿過程での凝結量の時間変化

図 2 は実験 A-1 での積算凝結高 I の経時変化を、経過時間の平方根で調べたものである。データは、ほぼ原点を通る直線(傾き: $0.0028\text{mm}/\sqrt{\text{s}}$)に従って分布している。

4.考察

4-1.空隙二重構造による土層の加湿・除湿速度への影響

図 3 は、実験 A と同様な初期・境界条件下($\text{RH}=60\% \sim 20\%$)、上記した砂層を用いた場合の既往の実験結果 ($\rho_v^* \sim X/\sqrt{t}$) と実験 A-1 の場合の比較を示す。ここに、データは表面付近の測点のものをプロットしてある。砂層においても $\rho_v^* \sim X/\sqrt{t}$ の関係は赤玉土と同様な変化特性が認められている¹⁾。赤玉土層のデータは砂層より左側に位置し、加湿(凝結)過程が遅く進行している。これらの様子は除湿(蒸発)実験でも同様に認められた。実際、 $\rho_v^* = 0.5$ となる $X/\sqrt{t}$ 値を比較してみると赤玉土層では $0.007(\text{cm}/\text{s}^{1/2})$ 、砂層では $0.013 \sim 0.015(\text{cm}/\text{s}^{1/2})$ となっており、前者の方が約 1/2 小さくなっている。このことは、深さ X を固定すると、 $\rho_v^* = 0.5$ となるまでの経過時間は赤玉土層の方が約 4 倍長くなっており、これは空隙の二重構造による影響であると考えられる。

4-2.解析: 本実験での初期・境界条件を想定した場合、多孔質層の水蒸気移動は次式で近似的に与えられよう。

$$\partial \rho_v^* / \partial t = D_{v,m} \cdot \partial^2 \rho_v^* / \partial X^2 \quad \dots (2)$$

ここに、初期・境界条件は、 $t = 0, X > 0$ で $\rho_v^* = \rho_{v,0} = 0$; $X = 0, t > 0$ で $\rho_v^* = \rho_{v,1} = 1$ $\dots (3)$

式(2)では、水蒸気は Fick 則に従って移動し、また連続式におけるソース項は見かけの拡散係数 $D_{v,m}$ に次式の通り組み込まれて表されるとしている。

$D_{v,m} = [D_{v,eff}/\theta_a]/(1+\gamma) \quad \dots (4)$ ここに、 $D_{v,eff} = D_{v,0}\tau\theta_a$ で、 $D_{v,0}$: 水蒸気の分子拡散係数、 τ : 屈曲率、 θ_a : 空隙率、 γ : ソース項による補正項で、凝結・蒸発効果が小さいと $\gamma \rightarrow 0$ となる。

いま、 $D_{v,m}$ を一定にした場合、条件式(3)の下、式(2)の解は誤差関数を用いて $X/\sqrt{t}$ の相似解で表せる。そこでは、例えば $\rho_v^* = 0.5$ の場合、 $X/\{2\sqrt{(D_{v,m} t)}\} = 0.475$ となる。砂層の場合、上記より $X/\sqrt{t} = 0.015 \text{ cm}/\text{s}^{1/2}$ (図 3) とすると、 $D_{v,m} = \{X/(2\sqrt{t})/0.475\}^2 = 2.5 \times 10^{-4} (\text{cm}^2/\text{s})$ と計算できる。他方 $D_{v,0} = 0.283 \text{ cm}^2/\text{s}$ (25°C)、 $\tau = 2/3$ とすると $D_{v,eff}/\theta_a = D_{v,0} \times \tau = 1.9 \times 10^{-1} (\text{cm}^2/\text{s})$ となるので、式(4)右辺の値が $2.5 \times 10^{-4} (\text{cm}^2/\text{s})$ となるためには、 γ 値が 10^3 のオーダーになる必要がある。これは、ソース項としての凝結・蒸発現象は拡散過程としての水蒸気輸送に大きな影響を及ぼすことを示唆する。さらには、本実験の赤玉土層では砂層より遅れて吸湿・加湿過程が進行することになる。

5.おわりに: 本研究では赤玉土層を用いた簡単な蒸発、凝結過程の実験を実施し、興味ある水蒸気の挙動に関する知見を得た。今後、水蒸気移動を示す方程式(2)での拡散係数中の凝結・蒸発の補正項の構造を解明する必要がある。

本研究は科研費(基盤研究(C) 課題番号 19560519, H19-20 代表者:下島)の援助を得た。

参考文献: 1) 榎本(2006):大同工大修士論文, 2) 例えば、下島ら(2006):水水学会研究発表会要旨集, pp.186-187.

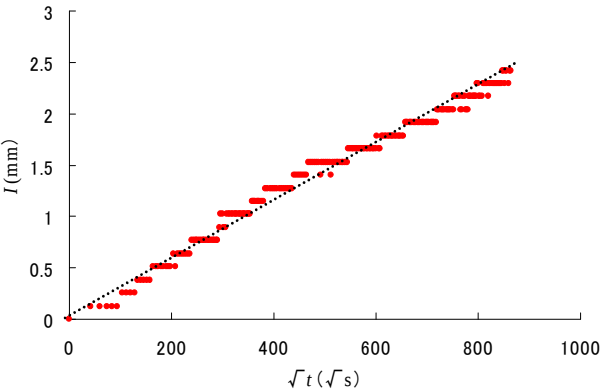


図 2 積算蒸発高の経時変化

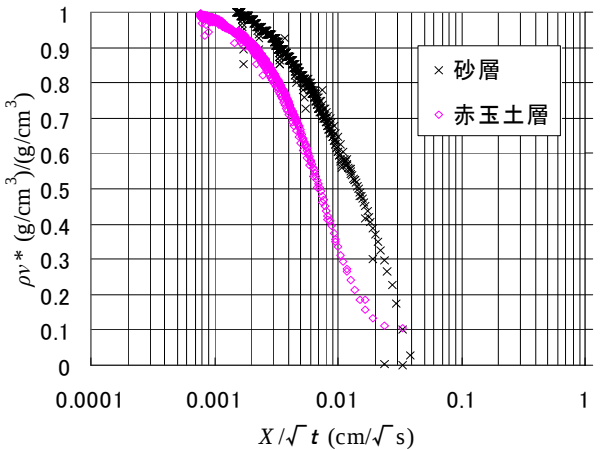


図 3 赤玉土層と砂層での $\rho_v^* \sim X/\sqrt{t}$ の比較(加湿)