

II-1

裸地蒸発に関する一考察

京都大学大学院 学生員 原田 大  
 京都大学防災研究所 正員 石原安雄・下島栄一  
 建設省 正員 美濃部雄人

1. はじめに: 本文は、室内蒸発実験を通して、下方に拘束されない地下水面をもつ裸地が蒸発によって乾燥過程を経る場合、時間とともにどのような蒸発の変化特性を示すようになるかを調べたものである。

2. 実験方法: 比較的均一な平均粒径 0.45 mm の砂を重量計上に設置した内寸で幅 34 cm、長さ 94 cm、高さ 67 cm の容器に一樣になるように充填して砂層を作った。この層内の適当な位置にポラス・カップと温度センサーを容器の側面から差し込んだ。実験では、砂層内に常に地下水面が拘束されない状態で形成されているという条件を設定した。実験開始時には地下水面が砂層表面に一致するようにしたのち、風洞を介して、温度 25.5 °C、湿度約 40 %、風速 150 cm/s の気流を約三カ月間層表面に与え続けた。実験は気流温度とほぼ等しい恒温室で行い、また初期砂層温度は室温とほぼ一致するようにした。

3. 実験結果: 図-1 は実験での蒸発強度(E)、地下水面の深さ(zw)及び砂層内の最低温度点の深さ(ze)の経時変化を示す。蒸発強度(黒丸)は実験開始直後を除外すると、初期段階ではほぼ一定値を示すが、ある時刻より指数関数的に急減<sup>2)</sup>した後、しだいに緩やかな減少を示すようになる。地下水面(破線)の下降は実験開始当初急であるが、時間とともに緩やかな変化へと移行する。最低温度点(白丸)の下降の様子は比較的地下水面のものと同様であるが、ただ実験開始直後の挙動は以下のように解釈すべきである。砂層での最低温度点は蒸発が生起している部分で現れる<sup>2)</sup>ので、この点を蒸発面とみなすことができる。本実験

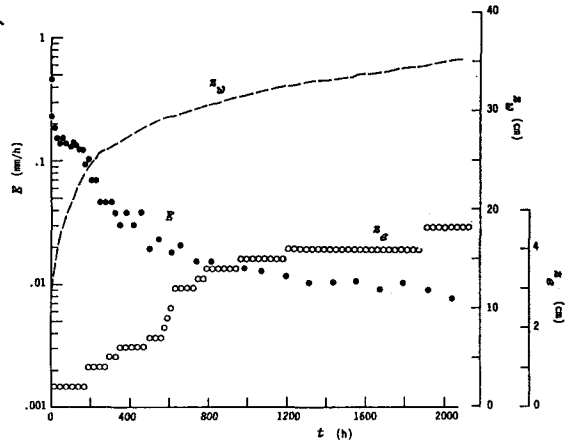


図-1: 蒸発強度、地下水面と蒸発面の深さの経時変化

の温度計測は深さに関して離散的であり、砂層表面に最も近い温度センサーは 0.5 cm の深さに位置している。砂層の初期水分条件より、蒸発は最初層表面で生起するはずであるので、図-1 の ze はある時間まで零とみなすべきである。ze の深さ 0.5 cm までの変化は不明であるが、上記の蒸発強度が指数的に急減する段階では、ze の増加は著しく大きい。

実験終了時 (t = 約 2200 h) に、砂層表面近くの砂を 3 箇所直接採取して、その水分状態を調べた結果が図-2 の実線である。ここに、 $\theta$  は体積含水率、z は層表面からの深さ、砂の飽和体積含水率 ( $\theta_{sat}$ ) は約 0.45 である。図中の破線は地下水面上の砂層の水分分布が脱水平衡になった状態を示す。このような時間での蒸発面は約 4.5 cm の深さ(図-1)に位置している。図-2 で、この深さ付近の水分分布の実測値(実線)は上方に向かって急な勾配で破線より離れて小さくなっている様子が分かる。

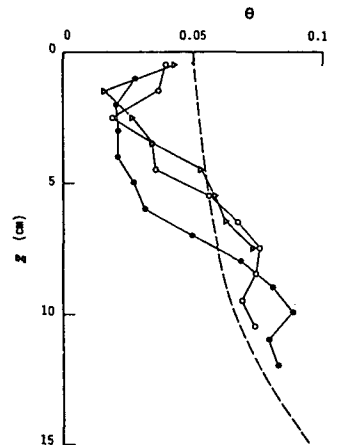


図-2: 砂層表面付近の水分分布

4. 考察: ここで用いた砂の(不飽和)透水係数 K がある体積含水率  $\theta_c$  を境にして、つぎのような関係を満たすものとする。

$$\theta > \theta_c \text{ で } K \gg E, \quad \theta < \theta_c \text{ で } K \ll E \quad \dots \textcircled{1}$$

この関係は比較的均一な多孔質材料で近似的に満足され、また  $\theta_c$  はいわゆる field capacity にほぼ対応すると予想される。 $z_c$  を  $\theta = \theta_c$  となる  $z$  値とすると、 $z > z_c$  の領域での水分分布形状は固定され、その移動速度は地下水面の降下速度で近似できる。よって、水の連続式は次式で近似できよう。

$$E = \{ \theta e + (\theta \text{sat} - \theta c) / r + (1 + 1/r)(\theta c - \theta e) / 2 \} \cdot dz_e / dt \quad \dots \textcircled{2}$$

ここに、 $r = (dz_e / dt) / (dz_w / dt) = dz_e / dz_w \quad \dots \textcircled{3}$

砂層内で蒸発した水蒸気は蒸発面上方の乾燥した部分を通して、砂層上に形成された乱流境界層へと輸送される。これらの輸送が拡散的になされ、また乱流拡散による水蒸気輸送の効果が蒸発面直上では無視できる(蒸発面はかなり深い)という条件下で、つぎの関係が成立する<sup>1)</sup>。

$$E = A / \{ B + ze \} \quad \dots \textcircled{4} \quad \text{ここに、} A = \rho_a / \rho_w \cdot \theta \text{sat} \cdot T \cdot D_{vm} \cdot (q_e - q_b) \quad \dots \textcircled{5}$$

$B$  は気流の動的条件等によって決まる一定値、 $\rho_a$  と  $\rho_w$  は空気と水の密度、 $q$  は比湿、 $T$  は tortuosity、 $D_{vm}$  は水蒸気分子拡散係数、添字  $e$ 、 $b$  は蒸発面と乱流境界層上縁での値を意味する。

$r$  を一定とすると、式②～式④より次式をうる。

$$E = Ge / \{ 2(t + t_0)^{1/2} \} \quad \dots \textcircled{6} \quad z_w = 2A(t + t_0)^{1/2} / (rGe) + \text{const.} \quad \dots \textcircled{7}$$

$$ze = 2A(t + t_0)^{1/2} / Ge + \text{const.} \quad \dots \textcircled{8} \quad \text{ここに、} t_0 \text{ は一定値、}$$

$$Ge = [ 2A \{ \theta e + (\theta \text{sat} - \theta c) / r + (1 + 1/r)(\theta c - \theta e) / 2 \} ]^{1/2} \quad \dots \textcircled{9}$$

式⑥、式⑦の関数形を参考にして、実験での蒸発強度と地下水面の深さの時間変化を整理するとそれぞれ図-3及び図-4をうる。これらの図より、実験値(丸印)はほぼ 1200 h から図中の破線に従って変化すること、すなわちそれらの変化は式⑥、式⑦の関数形に一致することが分かる。なお、 $t_0$  値は図-3より 90 h と決まり(式⑥)、この値が図-4で用いられた(式⑦)。図-3で式⑥右辺の  $Ge/2$  に対応する値と図-4で式⑦右辺の  $2A / (rGe)$  に対する値はそれぞれ  $0.404 \text{ (mm/h}^{1/2}\text{)}$  および  $2.55 \text{ (cm/h}^{1/2}\text{)}$  となる。また、式⑤と式⑨を用いて  $Ge/2$  と  $2A / (rGe)$  の値を計算すると、 $r=1$  のとき、0.31 及び 1.4、 $r=0.5$  のとき、0.42 及び 2.0 となる。ここで計算に必要な値(例えば  $\theta_c$ 、 $\theta_e$ 、 $q_a$  等)は実験値を用い、また蒸発面での水蒸気は飽和とした。このことより、 $r=0.5$  の計算値は実験値とよく合致することが分かる。観測蒸発面については、温度測定精度の関係上式⑨との比較ができなかったが、実験での  $r$  値は少なくとも 1 ではなく、むしろ上で得た値の 0.5 に比較的近いことが推定された。この結果は、蒸発面と地下水面の距離は時間とともに拡大することを意味する。

5. おわりに: 本文では砂層を対象にしたが、赤玉土のように空隙が二重構造(macropore、micropore)をもつ場合には4.の解析が適用できない<sup>3)</sup>。これについては別の機会に報告したい。

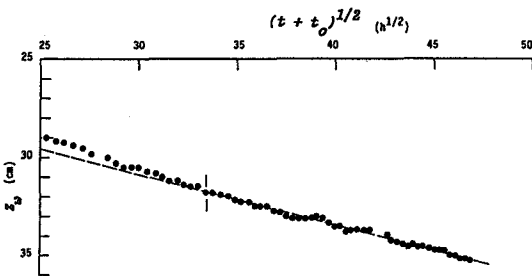


図-4: 地下水面の降下特性

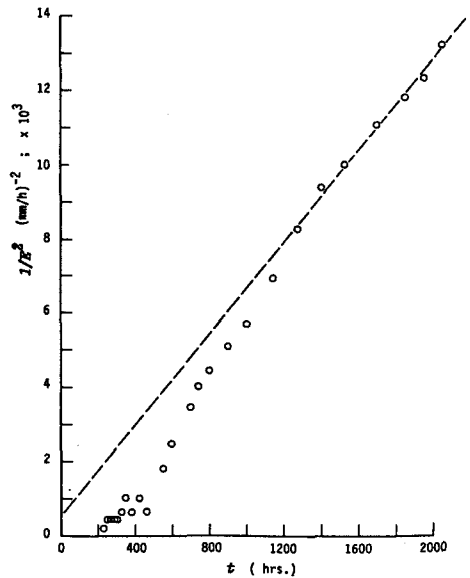


図-3: 蒸発強度の変化特性

<参考文献>1)Ishihara & Shimojima et al:APD-IAHR, 1988.

2)葛葉・石原ら:京大防災研年報, 1988. 3)美濃部:京大工修論,1987.