

II-88

地面蒸発に関する実験的研究

建設省

正員 美濃部雄人

京大防災研究所 正員 石原安雄・下島栄一

1. はじめに 本報告は、地面蒸発の機構を解明するために、重量計上に設置された水槽（幅34cm、長さ94cm）内に水や多孔質媒体を入れ、その上面に風洞を介して湿度、温度、風速が一定な気流を与えて、蒸発量、水槽中の温度や水圧を計測しつつ実験を行ない、その結果と既報の実験結果を介して風のある大気中や地中での水蒸気の輸送機構を考察したものである。実験での初期水面は水槽上縁と一致し、また、多孔質層の場合、蒸発により地下水位は自然に低下するが、自由水面の場合は変化しない様になっている。

2. 地表面上での水蒸気の輸送 地表面上の風は、乱流境界層を形成しており、そこでの速度分布は中立で、地表面上のある範囲を除くと次式に従う。²⁾

$$\bar{u}/u_* = \frac{1}{\kappa} \ln(z/z_0) \quad \text{---- (1)}$$

ここに z は地表面から鉛直上方にとった位置座標、 u_* は摩擦速度、 $\bar{u}$ は平均風速、 κ はKarman定数、 z_0 は u_* や地表面の状態によって決まる定数である。また、水蒸気も同様な機構により輸送されると仮定すると、乱流境界層内の比湿の分布は次式で与えられる。²⁾

$$q_s - \bar{q} = \frac{\rho_w E}{\rho u_* \alpha_v \kappa} \ln(z/z_{0q}) \quad \text{---- (2)}$$

ここに E は蒸発強度、 ρ_w は水の密度、 ρ は空気の密度、 $\bar{q}$ は平均比湿、 q_s は $z=0$ での $\bar{q}$ 、 α_v は運動量と水蒸気の混合距離の比である。通常 α_v の値は1～1.13と言われている。今、 $\alpha_v=1$ とおき、 $z_0=z_{0q}$ が近似的に成り立つと考えると、式(1)と式(2)より、次式を得る。

$$u_* = \sqrt{\rho_w E \bar{u} / \rho (q_s - \bar{q})} \quad \text{---- (3)}$$

図-1は、水面の上で計測した風速分布であり、かなり広い範囲にわたってデータが直線に乗っており、式(1)が成立していることを示している。図-2は $\bar{u}$ 、 $\bar{q}$ として境界層外縁の値を、 E は実測値を式(3)の右辺に代入した値 u_* と風速分布の直線部分の傾きから計算した u_*/κ の関係を水槽内部の物質や、気流条件をいろいろに変えた場合について示している。ここにsandK-5, sandK-8はそれぞれ粒径がほぼ0.48mm, 0.24mmの細砂であり、また赤玉土は3-6mmの粒径をもつ。いずれの場合も、層表面は充分湿っていたので、 q_s は地表面付近の温度に対応する飽和比湿を代入している。図中の破線は、境界層の外縁領域での κ の値であり、実験値は、蒸発源の表面が滑らかな場合、破線とよく合致している。なお、赤玉土（表面が粗い場合）の場合は明確でない。

3. 地表面下での水蒸気の輸送 今、地表面下のある深さまで充分に乾いていると考え、そこでの水蒸気の

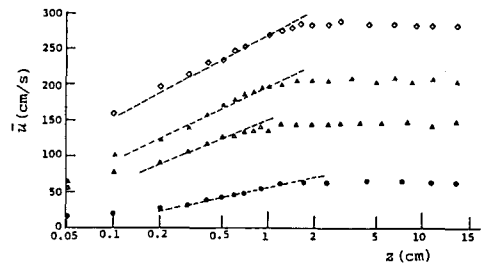


図-1 水面上の風速分布

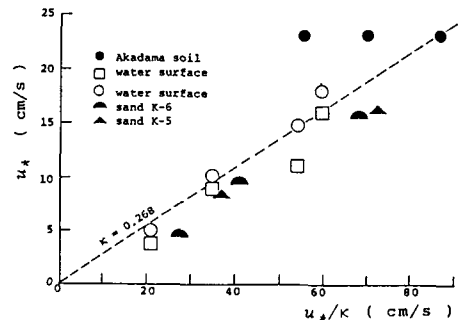
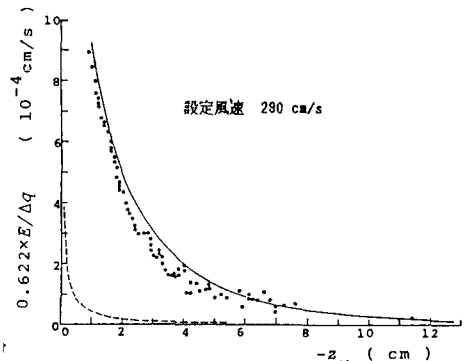
図-2 u_* と u_*/κ の関係

図-3 蒸発面の位置と蒸発強度の関係（ビー玉の場合）

輸送は、乱流拡散（ $\rho \overline{w'q'}$ ）と分子拡散によってなされたとすると蒸発強度は次式で与えられる。なお蒸発はここで対象としている領域より下方で起っているものとする。

$$\rho_w E = \theta_{sat} (\rho \overline{w'q'} - \tau_e D_{atm} \frac{d\bar{q}}{dz}) \quad \text{---- (4)}$$

ここに θ_{sat} は間隙率、 q' 、 w' はそれぞれ比湿と風速の z 軸方向成分の平均値からの変動量、 τ_e は tortuosity、 D_{atm} は空気中での水蒸気の分子拡散係数である。空隙中では混合距離（ l_p ）は一定で、 $\rho \overline{w'q'} = \rho l_p^2 \frac{d\bar{u}}{dz} \frac{d\bar{q}}{dz}$ で与えられるとし、また、ここで対象としている多孔質媒体中の風速分布を canopy 中での結果を参照して次式で与えられるものとする。

$$\bar{u} = \bar{u}_H \exp(z/z_*) \quad \text{---- (5)}$$

$$1/z_* = (C_D B / 2 l_p^2)^{1/3}$$

ここに $\bar{u}_H$ は $z=0$ での平均風速、 C_D は抵抗係数、 B は単位体積中の砂粒子の表面積である。式(5)を式(4)に代入し、 $z=0$ から蒸発面の深さ（ z_e ）まで積分すると次式を得る。

$$\frac{\rho_w E}{\rho (\bar{q}_s - q_{sat})} = \frac{D_m / z_*}{\ln(D_{eff})_{z=0} - \ln(D_{eff})_{z=z_e} + z_e / z_*} \quad \text{---- (6)}$$

ここに $D_{eff} = D_m + D_t$

$$D_m = \theta_{sat} \tau_e D_{atm}, \quad D_t = \theta_{sat} l_p^2 \bar{u} / z_*$$

図-3は、ビー玉の場合の $E/\Delta q$ と地下水面の位置（ $-z_w$ ）との関係を示したものである。ここに Δq は $z=z_e$ での比湿と、あたえた気流の比湿との差である。地下水面の位置での比湿は飽和であるとしている。ビー玉のばあい毛管上昇が非常に小さいので、 $z_w = z_e$ と考えてよい。式(3)と式(6)から q_s を消去し、 z_e と $E/\Delta q$ の関係を求めたのが図中の実線である。ここに C_D の値は完全粗面の抵抗係数0.06/4 (Stan ton の図表より)を、 l_p は粒径(1.2cm)の約半分の0.8cm とし、 $\bar{u}_H$ に実測値を用いた。計算値は多孔質媒体中での水蒸気の移動を分子拡散のみで評価した場合（破線）に比べて、非常によく一致している。このことから、空隙の大きな多孔質媒体中では、水蒸気は主として粒径のオーダーの混合距離を持つ乱流拡散により輸送されることがわかる。図-4はsand K-5 の場合の蒸発強度と温度が一番低かった熱電対の位置との関係を示したものである。蒸発面の位置は温度の最も低い熱電対の付近であると考えられる。図中の破線は多孔質媒体中での水蒸気の移動が分子拡散のみでなされとした場合の計算値であるが、これでは実験結果をうまく説明することができない。しかし、粒径の大きさを考えると、砂の中でビー玉の場合と同様な乱流拡散が起っているとは考えにくい。Farrell⁵⁾らは、大気の大気圧変動によって、地中の空気がDarcy 流として動き、その大きさの程度は深さ方向に指数低減し、またそこでの水蒸気拡散係数が速度の二乗に比例するというを指摘している。そこで、水蒸気の有効拡散係数を $\alpha \exp(z/z_{**}) + D_m$ 、なる関数形（ α, z_{**} ：一定）で与え、 $E/\Delta q$ と z_e の関係を計算し、実験値に合うように α や z_{**} を決めたのが図-4中の実線である。 D_m の値は0.07程度であるから、この程度の粒径、風速で地表面付近での水蒸気輸送能力は、分子拡散のみを考えた場合の10倍程度あり、1/e に減衰するのに数cmかかることが推定できる。

4. 結論 以上のことから、乱流拡散による運動量輸送のアナロジーによる大気中の水蒸気の輸送量の推定方法は境界層の外部領域にも適用できること、また、地表面直下の領域では、水蒸気輸送は乱流拡散と分子拡散の両方でなされるが、前者の効果が大きく、また粒径の大きい場合、その混合距離は粒径のオーダーとなることがわかった。

参考文献 1)下島ら：第40回年講,1985 2)Liu,et al:J.Atmos.Sci.,36,1722-1735,1979. 3)Daily,et al: Fluid Dynamics,Addison Wesley,238,1966.4)Inoue:J.Meteorol.Soc.Japan 41,317-326,1963. 5)Farrell, et al:Soil Sci.,vol.102,no.5,1966.

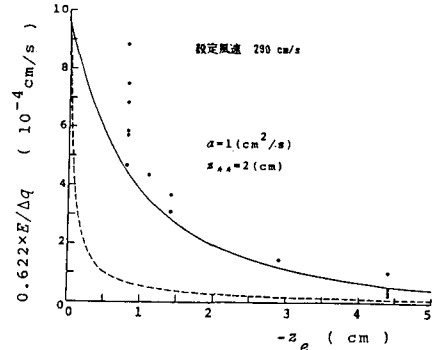


図-4 蒸発面の位置と蒸発強度の関係 (K-5 砂の場合)