

II-171

非定常蒸発下における砂層表面と大気間の熱・水分移動特性

—大気安定時の熱・水蒸気移動係数—

福井大学工学部 学生会員 二上 章司
同 上 正 会 員 福原 輝幸

1. はじめに 筆者らは、表面層モデルと称する厚さ数 cm の円筒カラムを用いた蒸発実験を通して、工学的に観て水分および熱的に一様とみなせる土壌表面層厚の合理的な決定方法について検討し^{1),2)}、砂層では $2 \sim 3 cm$ までが表面層厚として適当であることを示した。さらにその結果を用いて表面蒸発実験を行い、大気不安定条件下における砂層表面と大気との間の熱・水分移動特性を調べた。その結果、大気不安定時の熱および水分移動量は、砂層表面と大気との温度差に依存し、それらの移動係数は温度差の累乗に比例することを明らかにした²⁾。

そこで新たに大気安定条件下での砂層表面蒸発実験を行い、大気安定時の熱伝達係数および水蒸気移動係数を求めるとともに、上述した大気不安定条件下の熱・水分移動特性²⁾との比較・検討を行った。

2. 表面層モデルにおける熱収支式と蒸発量推定式 解析の対象となる円筒型表面層モデル（表面層厚 D ）は側面および底面を断熱しており、砂層への熱および水分の出入りは砂層表面のみとなることから、以下に述べるように大気と地表面間の熱・水蒸気移動係数を簡便かつ精度良く求めることができる（Fig. 1 参照）。短波放射を無視できるとき、断熱効果より地中伝導熱 G は考慮しなくても良いことから、熱収支式は次式で示される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\left\{ \rho_w c_w \theta + \rho_s c_s (1 - \varepsilon) \right\} D T_m \right] = \sigma (\varepsilon_a T_a^4 - \varepsilon_s T_s^4) + \alpha_h (T_a - T_s) - \Delta h_v M_v \quad (1)$$

ここに、 t ：時間、 ρ_w ：水の密度、 c_w ：水の比熱、 θ ：層平均体積含水率、 ρ_s ：砂の密度、 c_s ：砂の比熱、 ε ：砂の間隙率、 T_m ：表面層内部温度、 σ ：ステファン・ボルツマン定数、 ε_a ：恒温恒湿室内壁面の射出率（＝1）、 T_a ：砂層上空気温度、 ε_s ：砂層表面の射出率（＝1）、 T_s ：砂層表面温度、 α_h ：熱伝達係数、 Δh_v ：水の気化潜熱、 M_v ：蒸発フラックス密度である。左辺は表面層内部エネルギーの時間的变化率（ ΔU ）、右辺第1項は純長波放射強度（ $R_L^{\downarrow} - R_L^{\uparrow}$ ）、第2項は顕熱フラックス（ S ）、第3項は潜熱フラックス（ L ）である。Fig. 1 中の○と△で示すように、表面層モデルでは式（1）中の顕熱のみが未知量、換言すれば熱伝達係数 α_h のみが未知量となる。

蒸発量の推定式は、バルク式である $\alpha - \beta$ 法を用いて次式で示される。

$$M_v = \beta \gamma_m (\alpha \rho_{vs} - \rho_{va}) \quad (2)$$

ここに、 β ：蒸発効率、 γ_m ：水蒸気移動係数（蒸発バルク係数）、 α ：砂層表面の相対湿度（＝ $RH_s [\%] / 100$ 、 RH_s ：砂層表面相対湿度）、 ρ_{vs} ：砂層表面の飽和水蒸気密度、 ρ_{va} ：砂層上空気の水蒸気密度である。層平均体積含水率 θ により変化するパラメータ α および β は、本実験中において砂層は十分に湿潤していることから $\alpha = \beta = 1$ として計算を行い、式（2）中の唯一の未

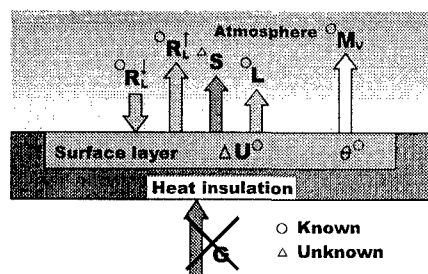


Fig. 1 表面層モデルの熱収支概略図

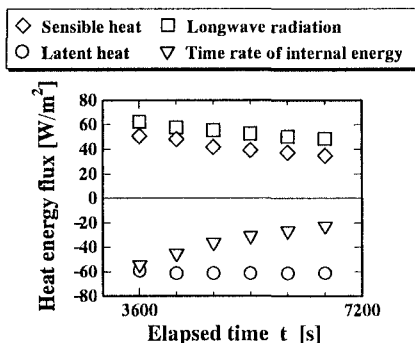


Fig. 2 熱収支の経時変化

キーワード：表面層、非定常蒸発、バルク式、熱・水分移動

〒910 福井市文京 3-9-1 TEL 0776-23-0500 (2809)

FAX 0776-27-8746

知数である水蒸気移動係数 γ_m を求める。

3. 実験概要 非定常蒸発実験は、環境条件を一定（温度 27 °C、相対湿度 50 %）とした恒温恒湿室内で行われる。実験で使用する表面層モデルとしては、表面層厚決定実験²⁾の結果を考慮して直径 10 cm、高さ 2 cm の塩化ビニール製円筒カラムを使用し、砂層表面以外からの熱の出入りを抑制するために、断熱材（発泡スチロール）によりカラム側面および底面を覆う。カラム内部に豊浦標準砂を間隙率 0.4 で充填し、純水を用いて飽和させる。このカラムを温度 15 °C に設定されたインキュベータ内に放置し、砂層内部の温度が一定（砂層初期温度 T_{ini} ）になったことを確認した後、恒温恒湿室内に移す。 T_s および T_m は熱電対により、 RH_s は小型湿度センサーにより、 T_a および空気相対湿度 RH_a の鉛直分布は 5 本の温湿度センサーにより、蒸発量は電子天秤（精度 1 / 1000 g）によりそれぞれ 1 分毎に、2 時間に渡って測定される。

4. 実験結果および考察 Fig. 2 に熱収支の経時変化が示される。ここでは実験初期の不安定性を考慮して、実験開始後 1 時間 ($t = 3600$ s) 以降の結果について示す。潜熱は時間的に変化しないが、長波放射量および顕熱が時間と共に減少することにより、表面層の温度低下が規定される。

Fig. 3 に熱伝達係数 α_h と温度差 $\Delta T (= T_s - T_a)$ の関係を示す。若干のばらつきがあるが、 α_h の ΔT に対する依存性は小さく、以下の式で与えられる。

$$\alpha_h = 6 \quad (-8^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq -4^\circ\text{C}) \quad (3)$$

Fig. 4 に水蒸気移動係数 γ_m と ΔT の関係を示す。 ΔT が大きくなつて γ_m は減少傾向にあるように見えるが、

$$\gamma_m = 0.0035 \quad (-8^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq -4^\circ\text{C}) \quad (4)$$

とみなすことができる。Fig. 5 および Fig. 6 に大気安定時と不安定時の地表面付近（高さ 1 cm）の温度 T の経時変化 $T(t)$ および水蒸気密度 ρ_v の経時変化 $\rho_v(t)$ をそれぞれ示す。 $\rho_v(t)$ は大気安定時に比べて不安定時の方が、変動が大きいことが知れる。 $T(t)$ は $\rho_v(t)$ ほど変動の大きさに顕著な違いはないが、これまでの実験に基づけば ΔT が大きい程、 $T(t)$ の変動は大きくなる。

以上より、(i) 砂層表面と大気間の熱・水分移動は大気不安定時で相対的に活発であり、それらの移動フラックスも大きくなる。(ii) α_h および γ_m はともに大気安定時よりも不安定時で相対的に大きくなるが判る。

参考文献 1) 櫻井里江・福原輝幸：蒸発量推定式 ($\alpha - \beta$ 法) による砂層表面厚の検討、第 51 回土木学会年次講演会概要集、II-397, pp. 794-795, 1996. 2) 二上章司・高野保英・福原輝幸・佐藤邦明：表面層モデルによる砂層表面と大気との間の熱・水分移動特性 - $\alpha - \beta$ 法による砂層表面層厚の検討 -、水工学論文集、第 41 巻, pp. 37-42, 1997.

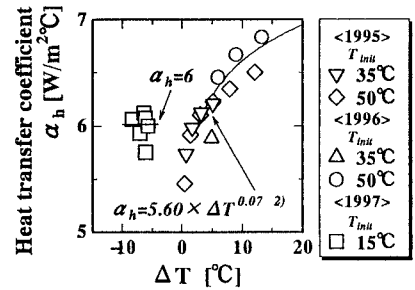


Fig. 3 熱伝達係数と温度差の関係

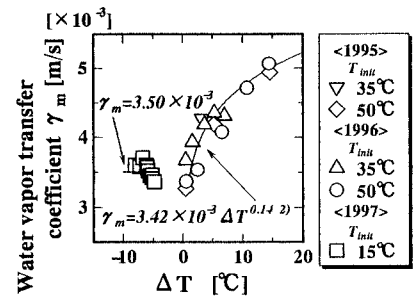


Fig. 4 水蒸気移動係数と温度差の関係

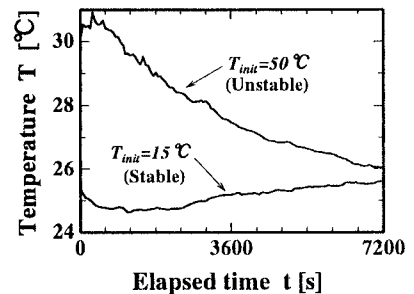


Fig. 5 砂層表面付近の温度時系列

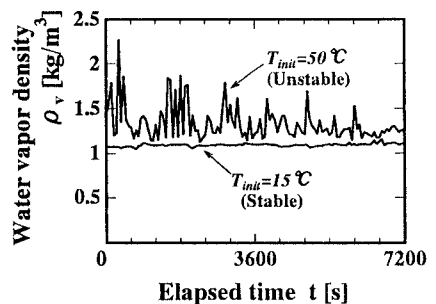


Fig. 6 砂層表面付近の水蒸気密度時系列