

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

— α - β 法による砂層表面層厚の検討 —

Heat and moisture transfer between sand surface and atmosphere by surface layer model

— Consideration of thickness of sand surface layer by α - β method —

二上章司*・高野保英**・福原輝幸***・佐藤邦明****

By Shoji FUTAGAMI, Yasuhide TAKANO, Teruyuki FUKUHARA and Kuniaki SATO

In the case of field measurement of heat and moisture transfer, a surface layer is treated as a finite thickness to obtain the surface temperature and soil moisture content caused by experimental difficulties. Since the discussion of the surface layer from the viewpoint of engineering is not matured, it is customary that when the energy or mass balances at the soil surface are evaluated, the thickness of soil sampling and set-up depth of soil heat flux plate depend on each researchers experience.

This paper aims to propose an appropriate thickness of the soil surface layer by applying α - β method to a surface layer model and present the characteristics of heat energy and mass balances of the surface layer model under the drying process.

Keywords: drying, evaporation, heat and mass transfer, surface layer, α - β method

1. はじめに

野外における蒸発量の評価は、地表面の熱および水分収支式に基づいて行われるのが一般的であり、そのためには気象データに加えて地表面の水分量や温度、相対湿度等を測定する必要がある。例えば、土壌サンプリングによって地表の含水率を求める場合、薄い層からのサンプリングではデータの精度が悪くなり、厚い層からでは表面含水率としての扱いが難しくなる。また、土中伝導熱フラックスを求めるための熱流計の設置については、地表に近いほど地温勾配の変化率は大きいために、その設置深度によって伝導熱フラックスも大きく変わることになり、熱収支の誤差を生みやすくなる。このように実際には、地表面を有限な厚さを持つ層（表面層）として捉えざるを得ない。ただし、表面層は熱・水分的に一樣とみなされる厚さであることが望ましい。しかしながら、表面層の扱いは研究者毎に異なっているのが現状であり、これが互いのデータの引用や比較を難しくさせる。一方、数値計算を行う際、地表の要素の大きさの採り方によって、土壌内の温度分布や水分分布は変わってくる。特に、大気循環モデルでは大気と地盤を結びつける地表面での熱および水分収支が計算精度の鍵を握るが、表面含水率と蒸発量との関係は限られた資料や経験に基づいて与えられる場合も少なくない。

* 学生会員 福井大学大学院工学研究科博士前期課程 (〒910 福井市文京 3-9-1)

** 学生会員 福井大学大学院工学研究科博士後期課程 (〒910 福井市文京 3-9-1)

*** 正会員 工博 福井大学教授 工学部環境設計工学科 (〒910 福井市文京 3-9-1)

**** 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部地盤水理実験施設 (〒388 浦和市下大久保 255)

そのため筆者らは、表面層モデルと呼ばれる厚さ数 cm のカラムを用いた蒸発実験より、砂層の表面層厚の合理的な決定方法について検討している^{1)~3)}。

本研究では、気象条件を変えた表面層モデルの追加実験から、 $\alpha - \beta$ 法による表面層厚の決定を試みると同時に、大気と砂層表面間の熱伝達係数および水蒸気移動係数の特性を明らかにする。

2 実験概要

以下に述べる実験は、福井大学地域共同研究センター内の恒温恒湿室（温度：10~30℃、相対湿度：40~70%の範囲で制御可能）で行われる。なお、実験環境は温度27℃、相対湿度50%で一定とする。

2.1 表面層厚決定実験

本実験では、砂層カラムの高さ（表面層厚 D ）の違いによる温度、相対湿度および蒸発量の変化を調べ、表面層厚の決定を試みる。

実験装置の概要を **Photo. 1** に示す。実験に使用した円筒砂層カラムは内径 10 cm 、肉厚 0.3 cm の塩化ビニール製であり、高さが 1、2、3 および 5 cm の 4 種類である。カラム内部に豊浦標準砂（平均粒径 0.02 cm 、密度 2.64 $\times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ ）を平均間隙率 0.4 で充填し、純水を用いて飽和させる。その後、恒温恒湿室内に設置し、蒸発により表面層が気乾状態になったことを確認した時点で実験終了とする。砂層表面の温度 T_s 、表面層中間温度 T_m および表面層の底部温度 T_b は熱電対により、砂層表面の相対湿度 RH_s は砂層表面に設置した小型湿度センサー（ヴェイサラ製）により、蒸発量は電子天秤（ザルトリウス製、精度 1/1000 g ）により、砂層周辺空気の温度 T_a および相対湿度 RH_a は温湿度センサー（ヴェイサラ製）により、それぞれ自動計測される。サンプリング間隔はいずれも 5 分である。なお、小型湿度センサーは、砂層の湿度のみを計測するように工夫される。また、層平均体積含水率 θ は初期水分量から蒸発量を差し引いた値をカラム体積で除することにより、砂層表面の体積含水率 θ_s は測色計（ミノルタ製）から得られる色差 ΔE^* ¹⁾ より、それぞれ求められる。 ΔE^* のサンプリング間隔は 0.5~1 時間毎である。なお、恒温恒湿室内の循環風の影響を防ぐために、実験装置の周囲に風避けを設置する。

2.2 大気的不安定条件下における表面層モデルからの蒸発実験

本実験は、大気的不安定条件下における砂層表面と大気との間の水蒸気移動係数および熱伝達係数の特性を明らかにすることを目的とする。上述した表面層厚決定実験の結果を考慮して、表面層モデルとして直径 10 cm 、高さ 2 cm の円筒砂層カラム（2.1 と同じ塩化ビニール製）を使用する。実験装置の概要を **Photo. 2** に示す。カラムの内部に豊浦標準砂を同じ間隙率で充填し、純水を用いて飽和させる。このカラムを温度 35℃ および 50℃ 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（砂層初期温度 T_{ini} ）が一定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、砂層上の温度 T_a および相対湿度 RH_a の鉛直(z)分布は 5 本の温湿度センサーにより、蒸発量は電子天秤により、それぞれ測定される。各値は 1 分毎に自動計測され、2 時間に渡って測定される。これらを 1 つのカラムで測定することは困難であるため、実験では T_s 、 T_m 、 T_a 、 RH_s および RH_a 測定用カラム（T-RH カラム）、蒸発フラック

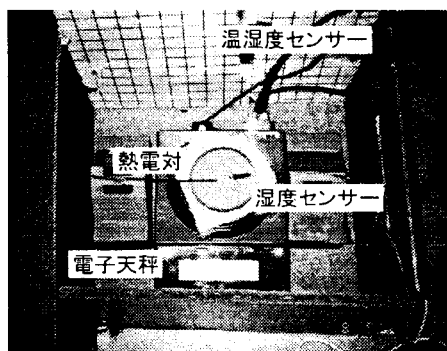


Photo. 1 表面層厚決定実験装置外観

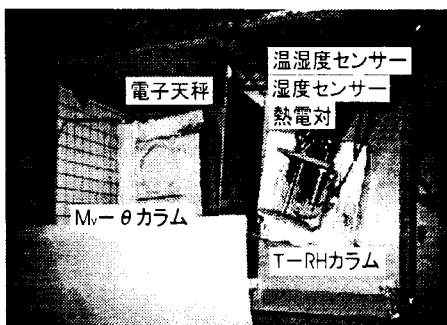


Photo. 2 大気的不安定条件下における蒸発実験装置外観

ス密度 M_v および θ 測定用カラム ($M_v - \theta$ カラム) の 2 種類を用いる。また、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 (発砲スチロール) によりカラム側面および底面を覆う。

3. 蒸発量推定式 ($\alpha - \beta$ 法)

本研究で用いた砂層表面からの蒸発量推定式 $\alpha - \beta$ 法は一種のバルク式であり、次式のように定義される。

$$M_v = \beta \cdot \gamma_m (\alpha \cdot \rho_{vs} - \rho_{va}) \quad (1)$$

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 ($= RH_s [\%] / 100$)、 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。係数 α および β は次のように物理的に解釈される。

α : 乾燥の進行に伴って変化する地表面の相対湿度

$RH_a / 100$ (乾燥) $\leq \alpha \leq 1$ (飽和) の範囲で変化

β : 乾燥の進行に伴う地表面の蒸発面積や水蒸気移動抵抗の変化に関する係数

0 (乾燥) $< \beta \leq 1$ (飽和) の範囲で変化

表面層モデルが飽和状態の時 $\alpha = \beta = 1$ であるから、 γ_m は実験により求められた飽和時の蒸発量を用いて、式 (1) より決定される。これより同式中の未知量は β のみとなり、乾燥の進行により変化する β は、同式より求まる。

4. 表面層モデルの熱収支式とその特性

本研究で用いた表面層モデルにおける熱収支式は次式で定義される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\{ \rho_w c_w \theta + \rho_s c_s (1 - \varepsilon) \} D \cdot T_m \right] = \sigma (\varepsilon_a T_a^4 - \varepsilon_s T_s^4) + \alpha_h (T_a - T_s) - \Delta h_v M_v \quad (2)$$

ここに、 t : 時間、 ρ_w : 水の密度、 c_w : 水の比熱、 ρ_s : 砂の密度、 c_s : 砂の比熱、 ε : 砂の間隙率、 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 ($= 1$)、 ε_s : 砂層表面の射出率 ($= 1$)、 α_h : 熱伝達係数、 Δh_v : 水の気化潜熱、である。左辺は表面層内部エネルギーの時間的变化率、右辺第 1 項は純長波放射強度、第 2 項は顕熱フラックス、第 3 項は潜熱フラックスである。表面層モデルにおいては、熱の出入りは砂層表面のみであり、底面が断熱されているために、実砂層とは違って表面層底部を横切る地中熱伝導フラックスを考慮する必

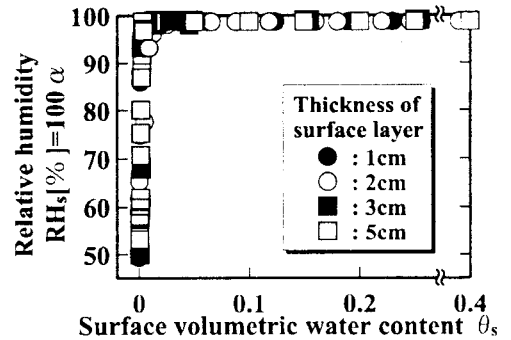


Fig. 1 表面体積含水率と相対湿度の関係

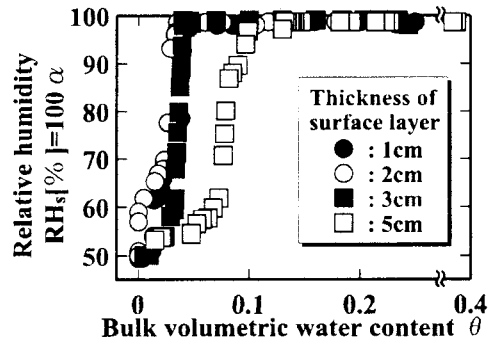


Fig. 2 層平均体積含水率と相対湿度の関係

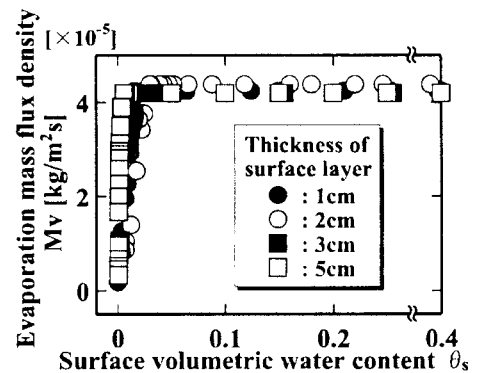


Fig. 3 表面体積含水率と蒸発フラックス密度の関係

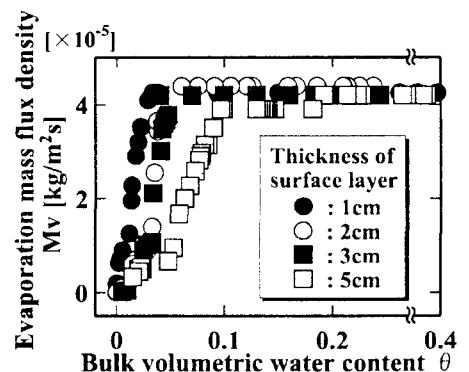


Fig. 4 層平均体積含水率と蒸発フラックス密度の関係

要は無い。このように熱収支式を簡単化できる点に、表面層モデルの特徴がある。よって、各項のうち唯一直接測定できない頭熱フラックス、換言すれば熱伝達係数 α_h は式 (2) より容易に求まる。

5. 実験結果

5.1 表面層厚決定実験結果

Fig. 1 は θ_s と RH_s ($= 100 \alpha$ [%]) の関係を、Fig. 2 は θ と RH_s の関係をそれぞれ示す。表面層厚 D に関係なく、 θ_s の減少に伴う RH_s の低下は、 $\theta_s \approx 0.01$ から始まる。一方、 θ の減少に伴う RH_s の低下は $D=1, 2, 3 \text{ cm}$ では $\theta \approx 0.04$ 、 $D=5 \text{ cm}$ では $\theta \approx 0.1$ から始まり、 RH_s が 100 % から減少し始める θ_s と θ には大きな違いがある。しかしながら、いずれのケースも最終的に RH_s は周囲空気の相対湿度 RH_a に漸近する。

Fig. 3 は θ_s と M_v の関係を、Fig. 4 は θ と M_v の関係をそれぞれ示す。Fig. 4 から、 θ の減少に伴う M_v の低下（減率蒸発期間の始まり）は $D=1, 2, 3 \text{ cm}$ では $\theta \approx 0.04$ から、 $D=5 \text{ cm}$ では $\theta \approx 0.1$ から起こることが知れる。 M_v が減少し始める θ_s は D に殆ど依存せず、先の値よりも小さい約 0.02 である。この時砂層表面ではすでに乾燥が始まっていることから、土粒子数個分の表層が乾燥しても層全体からの蒸発は依然として活発であるため、 θ_s が十分に小さくならない限り、 RH_s および M_v は共に低下しないと考えられる。このように表面層厚が 1、2 および 3 cm のケースと 5 cm のケースでは恒率蒸発期間から減率蒸発期間へ移行する限界体積含水率が異なる。

こうして得られた α と θ の関係 (Fig. 2) および M_v と θ の関係 (Fig. 4) を用いて、式 (1) より β を求める。Fig. 5 に、すべてのケースについて θ と β の関係を示す。Fig. 5 より、 $D=1, 2, 3 \text{ cm}$ の β の変化と $D=5 \text{ cm}$ のそれでは分布傾向が大きく異なることが判る。まず、 $D=1, 2, 3 \text{ cm}$ のケースでは $\theta \approx 0.05$ より β が 1 から減少し始めるのに対して、 $D=5 \text{ cm}$ のケースでは $\theta \approx 0.08$ から β が変化し始める。さらに、 $D=5 \text{ cm}$ のケースでは $\beta > 1$ という不自然な現象が生じる。これは、 $D=5 \text{ cm}$ と $D=1, 2, 3 \text{ cm}$ とでは蒸発・乾燥にともなう M_v と RH_s の減少過程に違いが生じたことに起因する。このように表面層厚の違いによって α および β と θ の関係は異なることは興味深い。

次に $D=2 \text{ cm}$ のケースについて、 M_v 、 RH_a および RH_s の経時変化を Fig. 6 に、 T_a 、 T_s 、 T_m および T_b の経時変化を Fig. 7 にそれぞれ示す。 M_v が線型的に変化している恒率蒸発期間 ($t=0 \sim 48 \text{ hr}$) では、 T_s 、 T_m および T_b は共に初期温度（空気温度）よりも 3.5 °C 低い約 24 °C で一定であり、蒸発潜熱による温度低下の効果が判れる。その後、 M_v は減少し、減率第 1 段階期間 ($t=48 \sim 78 \text{ hr}$) に移行するのに伴い、 T_s 、 T_m および T_b はすべて同じ時間より急激に上昇し始め、空気温度 T_a に近づく。それと同時に、 RH_s は 100 % から空気の相対湿度

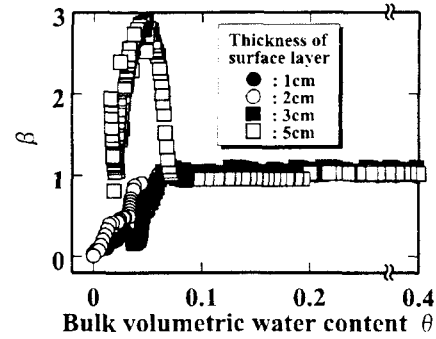


Fig. 5 層平均体積含水率と β の関係

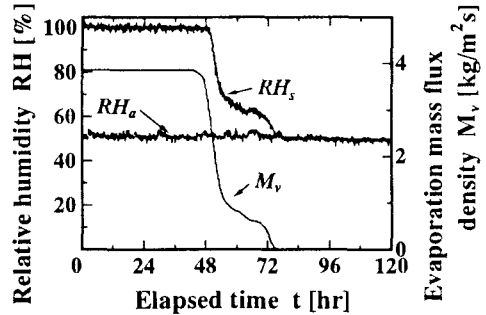


Fig. 6 蒸発フラックス密度と相対湿度の経時変化 ($D=2 \text{ cm}$)

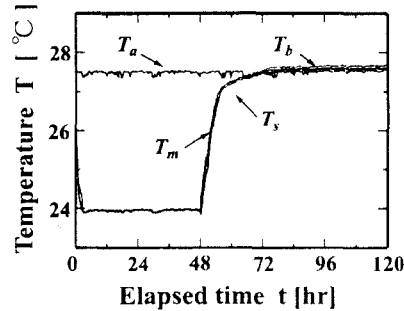


Fig. 7 温度の経時変化 ($D=2 \text{ cm}$)

RH_a に減少する。ここで注目すべきは、 RH_s と M_v の減少過程が酷似している点であり、単調に減少するのではなく、 $t \approx 66 \text{ hr}$ で観られるように下に凸から上に凸に移行する様な分布を呈することである。減率第2段期間 ($t > 78 \text{ hr}$) になると温度および相対湿度とも空気のそれと等しくなり、熱的平衡状態に向かう。Fig. 7より表面層内のどの深度の温度もほとんど差異はなく、しかも時間的応答に違いもないことから、表面層厚 2 cm までは熱的層一様性の条件に適合していると考えられる。本来は表面層の水分一様性の検証という観点から、水分量についても同様に測定する必要性がある。

5.2 表面層厚に関する考察

ここで工学的に見て 5.1 で述べたように、表面層厚は数 cm のオーダーであると思われるが、一体どの程度の厚さまでが合理的かという問題が生じる。表面層の乾燥が始まることで、恒率蒸発期間から減率蒸発期間へ移行するという解釈をすれば、少なくとも $D = 5 \text{ cm}$ での限界体積含水率 ($\theta \approx 0.1$) は、経験的に高い含水状態と思われる (D を大きくすればするほど表面層モデル内の体積含水率の一様性は崩れ、限界体積含水率はさらに高い値へ移行する)。

本実験から総合的に判断して、 α および β と θ の関係で観られるような蒸発・乾燥挙動は $D = 1, 2, 3 \text{ cm}$ と $D = 5 \text{ cm}$ で異なることから、 $D = 3 \text{ cm}$ までが表面層厚としてみなして良いと考える。

5.3 不安定条件下における表面層モデルの蒸発実験結果

砂層初期温度 T_{ini} が 50°C のケース ($D = 2 \text{ cm}$) について蒸発フラックス密度 M_v の経時変化を Fig. 8 に示す。実験開始から $t \approx 1800 \text{ sec.}$ まで急激に M_v は減少し、その後 $t \approx 4500 \text{ sec.}$ から恒率蒸発期間に入る。同時に Fig. 9 には地上水蒸気密度 ρ_v の鉛直分布 $\rho_v(z)$ の経時変化を示す。同図より、 ρ_v の境界層厚は 2 cm 程度であることがわかる。また Fig. 8 との対応から判るように、地表における水蒸気密度勾配の絶対値 $|d\rho_v/dz|_s$ は M_v と相関が強く、蒸発フラックス密度が大きい程 $|d\rho_v/dz|_s$ も大きい。

Fig. 10 は式 (1) より求められた水蒸気移動係数 γ_m を、砂層表面温度 T_s と大気すなわち境界層外縁 ($z = 3 \sim 5 \text{ cm}$) の温度 T_a との差 $\Delta T (= T_s - T_a)$ の関数として表したものである。 ΔT は大気的不安定性の指標として考える。同図には昨年度の実験結果⁴⁾ も併示される。同図より、 γ_m は大気の不安定な条件下では、 ΔT が増加するにつれて上に凸のような分布を呈しながら増大する。この γ_m と ΔT の関係は、図中の実線で示され、次式で近似される。

$$\gamma_m = 3.42 \times 10^{-3} \Delta T^{0.14} \quad (1^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 20^\circ\text{C}) \quad (3)$$

ただし、この実験では表面層は飽和に近い含水状態ゆえに、 $\alpha = \beta = 1$ として γ_m は計算される。

Fig. 11 に、 T_{ini} が 50°C のケース ($D = 2 \text{ cm}$) について式 (2) より求めた熱収支式中の各要素の経時変化を示す。表面層から放出されるエネルギー要素の内、潜熱フラックス (図中○印) が最も大きく、総じて純

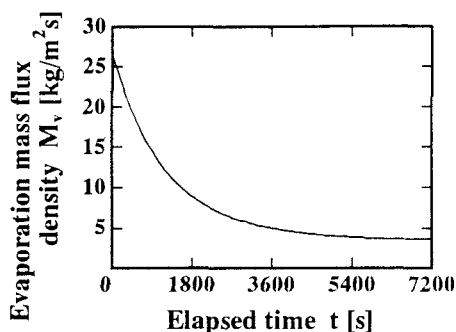


Fig. 8 蒸発フラックス密度の経時変化 ($T_{ini} : 50^\circ\text{C}$)

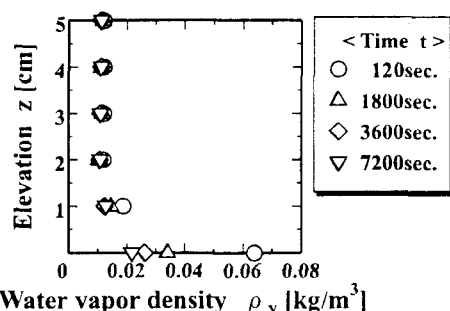


Fig. 9 地上の水蒸気密度の経時変化 ($T_{ini} : 50^\circ\text{C}$)

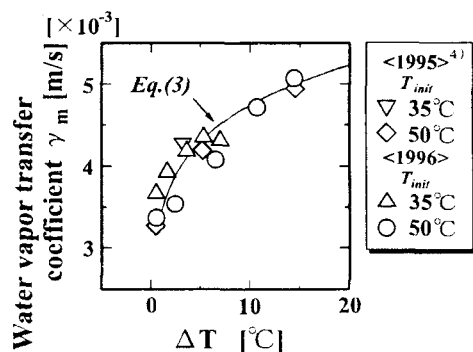


Fig. 10 水蒸気移動係数と温度差の関係

長波放射強度 (□)、顕熱フラックス (◇) となるが、両者の値はほぼ等しい。当然のことながら、これらのエネルギー損失の総和により、内部エネルギーの時間変化率 (▽) が規定される。内部エネルギーの時間変化率は、実験開始後に急激に減少し、時間の経過と共に 0 に近づく。上述したように顕熱フラックスは唯一測定不可能な項目であるため、式 (2) の熱収支式より求めた値を示している。

顕熱フラックスより求められる熱伝達係数 α_h と温度差 ΔT の関係を、昨年度の実験結果⁴⁾と併せて Fig. 12 に示す。同図より大気が不安定な条件下では α_h は ΔT が大きくなるにつれて増加し、その分布形状は γ_m と類似であることが知られる。 α_h と ΔT の関係は、図中の実線で示され、次式で与えられる。

$$\alpha_h = 5.60 \times \Delta T^{0.07} \quad (1^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 20^\circ\text{C}) \quad (4)$$

熱流体力学的な次元解析や相似則を利用すると、 ΔT の指数は 0.25 ~ 0.4 となることが知られているが⁵⁾、ここでは 0.07 と小さい。これより風速が殆どなく、風速分布も相似性が存在し難いような状況下では、 α_h に対する ΔT の依存性は小さいと推察される。

6. おわりに

表面層モデルを用いた蒸発実験を通して、 $\alpha - \beta$ 法および工学的見地から表面層厚の決定と、大気の不安定条件下における砂層表面と大気との間の熱・水分移動特性について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 表面層モデルにより蒸発・乾燥に関わる係数 α 、 β と θ の関係が明らかになった。しかし、表面層厚が大きくなると限界体積含水率は増大し、 $\beta > 1$ という不自然な現象が生じた。
- (2) 豊浦標準砂を用いた表面層厚は、2 ~ 3 cm までが適当である。
- (3) 大気が不安定な条件下においては、水分移動係数 γ_m と熱伝達係数 α_h は砂層表面と大気との温度差 ΔT に依存し、 α_h は ΔT の 0.07 乗に比例し、 γ_m は ΔT の 0.14 乗に比例する。

今後はロームなど他の土壌を用いた表面層厚の決定や、砂層表面に風速を与えた場合における熱伝達係数および水分移動係数について検討する。

参考文献

- 1) 福田和代・福原輝幸：砂層表面蒸発量の推定式 ($\alpha - \beta$ 法) に関する考察、第 50 回土木学会年次学術講演会概要集、II-34, pp. 68-69, 1995.
- 2) 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 回土木学会年次学術講演会概要集、II-397, pp. 794-795, 1996.
- 3) 二上章司・福原輝幸：日周期的な放射変化を受ける砂表面層と大気との間の水分移動、第 51 回土木学会年次学術講演会概要集、II-398, pp. 796-797, 1996.
- 4) 櫻井里江：砂層表面と大気との間の熱・水分伝達に関する実験的研究、福井大学卒業論文、1996.
- 5) 西川兼康・藤田恭伸：機械工学基礎講座 伝熱学、理工学社、1985.

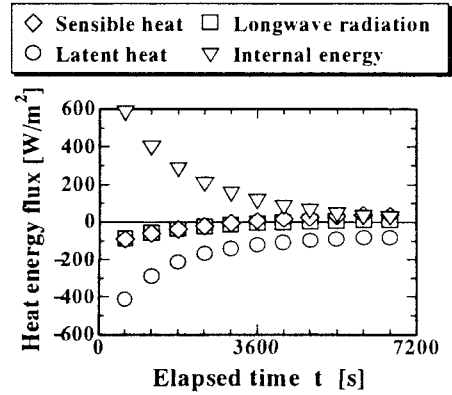


Fig. 11 エネルギーフラックスの経時変化 ($T_{init} : 50^\circ\text{C}$)

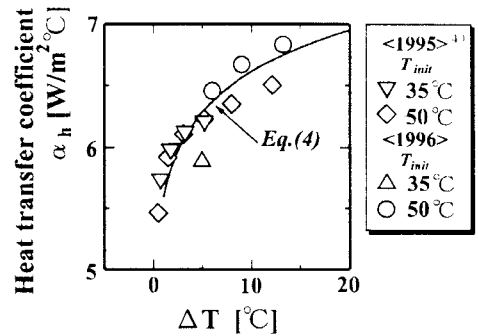


Fig. 12 熱伝達係数と温度差の関係