

水分移動を考慮した地盤の伝熱シュミレーション

林, 徹夫

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

片山, 忠久

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

塩月, 義隆

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

津々見, 伸広

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

他

<https://doi.org/10.15017/17180>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 12 (1), pp.47-52, 1990-06-01. 九州大学大学院総合理工学研究科

バージョン :

権利関係 :

水分移動を考慮した地盤の伝熱シミュレーション

林 徹夫*・片山 忠久*・塩月 義隆*
津々見 伸広**・北山 広樹***・堤 純一郎****
(平成2年2月28日 受理)

Simulation on Thermal Performance of the Earth Coupling Heat Conduction and Moisture Movement

Tetsuo HAYASHI, Tadahisa KATAYAMA, Yoshitaka SHIOTSUKI
Nobuhiro TSUTSUMI, Hiroki KITAYAMA and Jun-ichiro TSUTSUMI

This report is the succession of our previous report described the details of the observation of heat balance on ground surfaces with five kinds of covering materials. Thermal conductivity and volumetric specific heat of the soil are measured varying the volumetric water content. Thermal performance simulations of ground surface and underground use these values to calculate temperatures and heat flux. Two types of simulation model are compared and examined. One simulates the thermal performance coupling heat conduction and moisture movement (Model A). The other neglects the moisture movement (Model B). Simulation results are compared with measured values. The comparison shows Model A is slightly more accurate than Model B. However, Model B is approximate enough to predict the earth temperatures.

1. はじめに

著者等は都市を構成する主な地被材料と考えられる5種類の供試体を実際の地盤の上に作製し、その表面熱収支及び地盤内伝熱の長期観測¹⁾を行ってきた。地表面熱収支および地盤内伝熱の解析には地盤内の熱のみならず水分の移動にも注意をはらう必要がある。本報では供試体近傍の地盤から採取した土壌の熱物性値を含水率を変えて測定し、その結果をもとに地盤内伝熱の数値シミュレーションを行ったので、ここに報告する。

2. 土壌熱物性値の測定

地表供試体近傍の地盤から採取した土壌を用いて、その熱伝導率、容積比熱を含水率をかえて測定した。なお、ここで言う含水率とは容積含水率である。深さ5, 30, 60cmの土壌を底辺20×20cm、深さ3cmの

アクリル製の箱に形状を破壊しないように各深さとも4個ずつ採取し、試料とした。次に実験室内で各深さの試料を、乾燥状態、含水率10, 20, 30%および飽水状態にした。なお、試料の最大含水率は深さ5cmの土壌で約33%であった。

試料の熱伝導率を平板比較法により測定した。試料の温度を10℃前後から40℃まで4段階に変え、各温度につき4回の測定を行った。この時、土壌の電気抵抗値も測定した。今回の温度範囲では、試料温度の熱伝導率への影響は認められなかったため、以後の解析では熱伝導率の温度依存性は無視した。Fig. 1に熱伝導率と含水率の関係を示す。本土壌の熱伝導率は含水率の増加に伴って大きくなり、絶乾状態と飽水状態では約2倍の違いがある。

試料の容積比熱は、その熱拡散率を推定し、熱伝導率を熱拡散率で除して求めた。試料の熱拡散率は、前述の熱伝導率測定時において試料温度を変える際の過渡応答から推定した。試料上下の表面温度測定値を用いて、熱伝導偏微分方程式のクラック・ニコルソン型差分により試料中央の温度を計算する。その際、熱拡散率を変化させ、試料中央の温度の計算値と実測値が

*熱エネルギーシステム工学専攻

**同上修士課程

***同上博士課程

****東和大学工学部

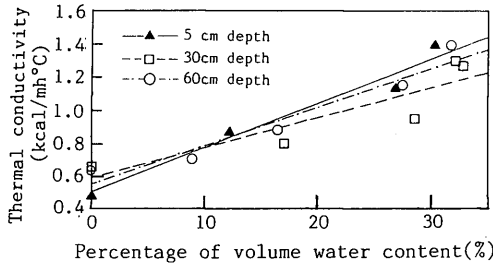


Fig. 1 Thermal conductivity of the soil

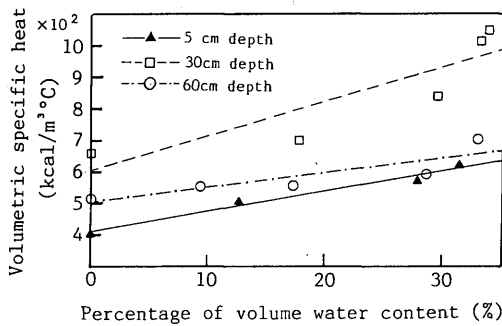


Fig. 2 Volumetric specific heat of the soil

最もよく一致する値を試料の熱拡散率とした。差分の時間間隔は5分、分割幅は1mmである。Fig. 2に容積比熱の推定結果を示す。熱伝導率と同様に、容積比熱も、含水率の増加にともなって大きくなる傾向がある。

3. 水分移動を考慮した地盤内伝熱の計算

平坦で遮蔽物のない地表面およびその下部の地盤内の温度変動を計算する。その際、地盤内の水分移動を考慮するモデルと考慮しないモデルを用い、その結果を比較する。

3.1 計算方法

地表面は平坦な裸地の状態で、地盤内は一律な土壌を仮定する。表面からの水分蒸発、地盤内の水分移動の取り扱いにより2種類のモデルを設定し、計算値と実測値の比較を行う。なお、両モデルともに鉛直方向

のみの一次元である。

a) モデルA

地盤内の熱伝導は、土壌の熱伝導率および容積比熱の含水率依存性を考慮する。地盤内の水分は土壌の含水率勾配により移動する。

地盤内熱伝導

$$\frac{\partial C_v T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

地盤内水分移動²⁾

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \\ + \frac{\partial k}{\partial z}, \quad D = k \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (2)$$

また、地表面では熱および水分の収支は次式である。

地表面熱収支

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T_s}{\partial z} = a \cdot TH + \varepsilon (AH - \sigma T_s^4) \\ + \alpha (T_a - T_s) + L \frac{\alpha}{C_a} (X_a - X_s) \end{aligned} \quad (3)$$

地表面水分収支

$$-\rho \cdot D \frac{\partial \theta}{\partial z} - \rho \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\alpha}{C_a} (X_a - X_s) + W \quad (4)$$

土壌の熱伝導率 λ 、容積比熱 C_v は含水率 θ によって変化する、その値は前述の測定結果中、深さ5cmの値を用いた。また、水分拡散係数 D も含水率 θ の関数として与えられるが、その関数は文献3)中に示される砂質ローム土の水分ポテンシャル ϕ ～不飽和透水係数 k の特性から求めた。計算に用いた水分ポテンシャル、不飽和透水係数、および体積含水率の関係をFig. 3に示す。地表面の絶対湿度 X_s は、地表面近傍の土壌の含水率からその水分ポテンシャルを求め、さらに次の関係を用いた⁴⁾。

$$X_s = 0.622 \frac{P_s}{P - P_{ss}}, \quad \phi = R_v \cdot T_s \cdot \ln \frac{P_s}{P_{ss}} \quad (5)$$

b) モデルB

地盤内の熱伝導を計算する際に、土壌の含水率変動に伴う熱伝導率および容積比熱の変化を考慮せず、これらを定数として取り扱う。

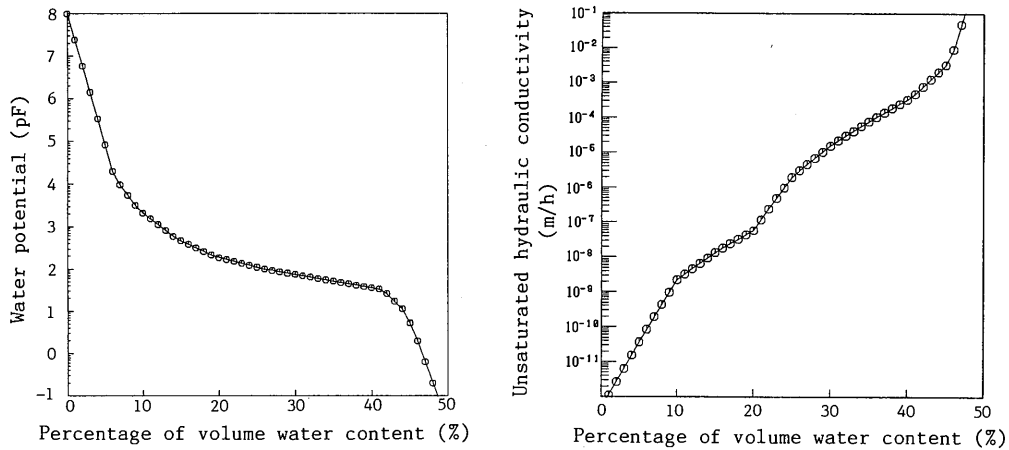


Fig. 3 Relations among water potential, unsaturated hydraulic conductivity and volumetric water content

地盤内熱伝導

$$C_e \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (6)$$

土壤の含水率は全地盤内5%で一定と仮定し、 $\lambda = 0.63 \text{kcal/mhK}$, $C_e = 440 \text{kcal/m}^3\text{K}$ とした。

地表面の熱収支式では水分蒸発潜熱項を考慮する。その際、地表面の絶対湿度を地表面温度における飽和絶対湿度に等しいと仮定して水分蒸発量を求め、蒸発比を乗じて補正する。本報では蒸発比 $K = 0.6$ で一定とする。

地表面熱収支

$$-\lambda \frac{\partial T_s}{\partial z} = a \cdot TH + \epsilon (AH - \sigma T_s^4) + \alpha (T_a - T_s) + K \cdot L \frac{\alpha}{c_a} (X_a - X_{ss}) \quad (7)$$

計算には後退差分で行ったが、その計算条件等を以下に列記する。

1) 計算時間間隔は1時間、地盤内の距離間隔は1cmとした。また、地下2mで断熱、断湿境界とし、3年間の予備計算を行う。

2) モデルAでは土壤の最大含水率を33%とする。降水時、地表面土壌の含水率は最大含水率を越えることなく、余剰な降水は排水される。

3) 入力用の気象データには供試体近傍の5階建て

建物屋上で測定された値、降水量は供試体近傍に設置された雨量計による値を使用する。長期の欠測(3日間以上)がある場合には異なる年の同月同日のデータで補間し、それ以下の場合には前後の日で代用する。

4) 地表面の対流熱伝達率は前述の気象データ中の風速の関数⁵⁾とする。

5) 地表面の日射吸収率 a は乾燥状態で0.67、湿潤状態で0.75とする。また、同放射率 ϵ は0.96とした(値の詳細は文献1)を参照)。

3.2 計算結果と考察

1988年5月から1989年4月までの気象データを用いた計算結果を Fig. 4 に示す。同図は日平均温度の年間変動を計算値と実測値と比較している。A, Bいずれのモデルによる計算結果とも実測値から大きく外れることはないが、モデルAのほうがより実際の温度変動を再現している。特に、深さ80cmでは実測値とモデルBの間に位相差が見られる。これは、測定地盤の地下水位が高く、深さ80cmの土壤の含水率が実際には大きいのに、モデルBでは5%と仮定してその熱物性値を用いたためである。

Fig. 5 に1988年5月15日~19日の気象状況および表面温度を示す。5月15日に総計22mmの降水があり、その後、晴天が続いている。15~17日の表面温度を見れば、実測値および両計算値に大きな差は無い。一方、18日は実測値、モデルA計算値、モデルB計算値の順に温度が高く、19日には実測値とモデルA計算値は一

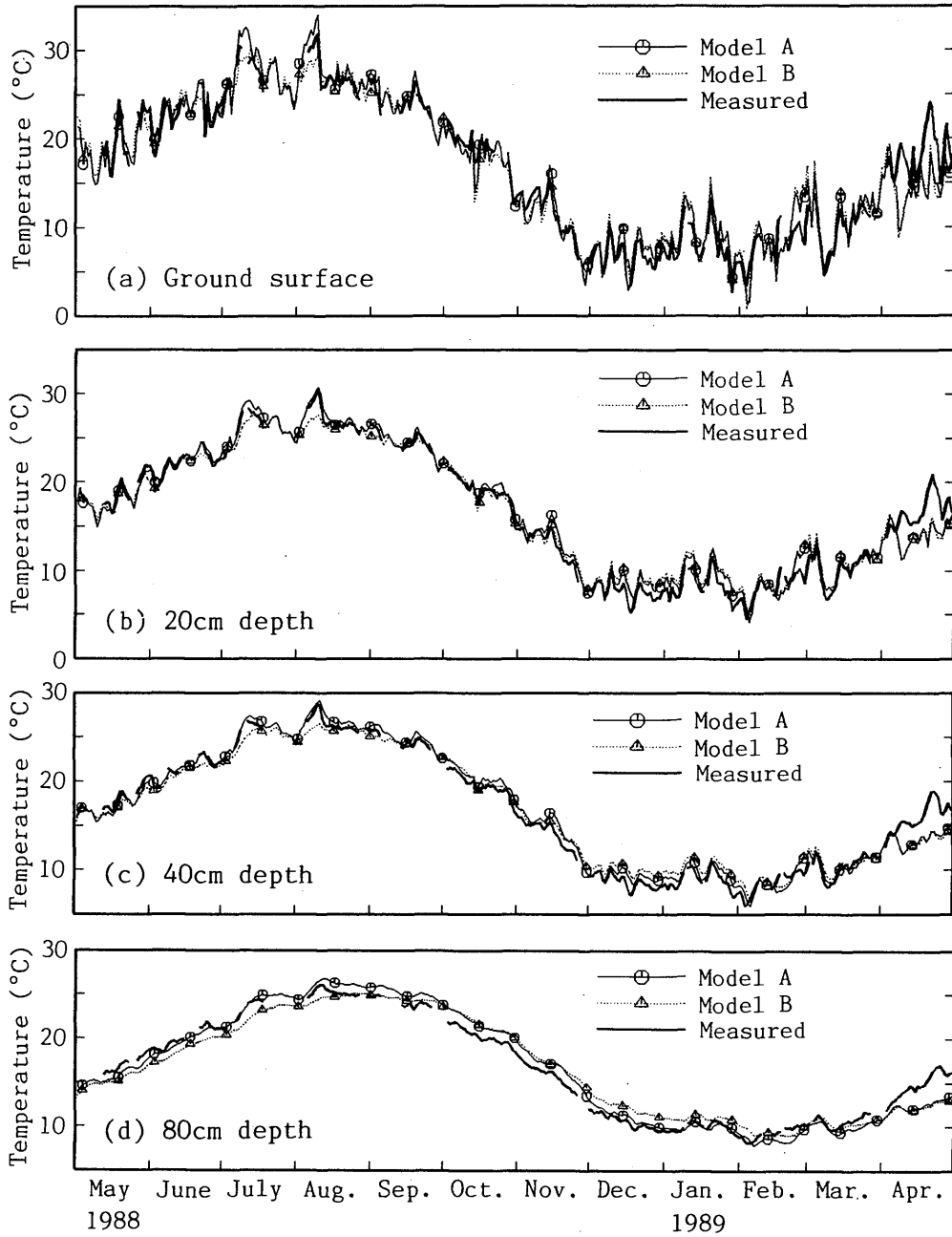


Fig. 4 Annual fluctuations of diurnal average temperature on and in the earth

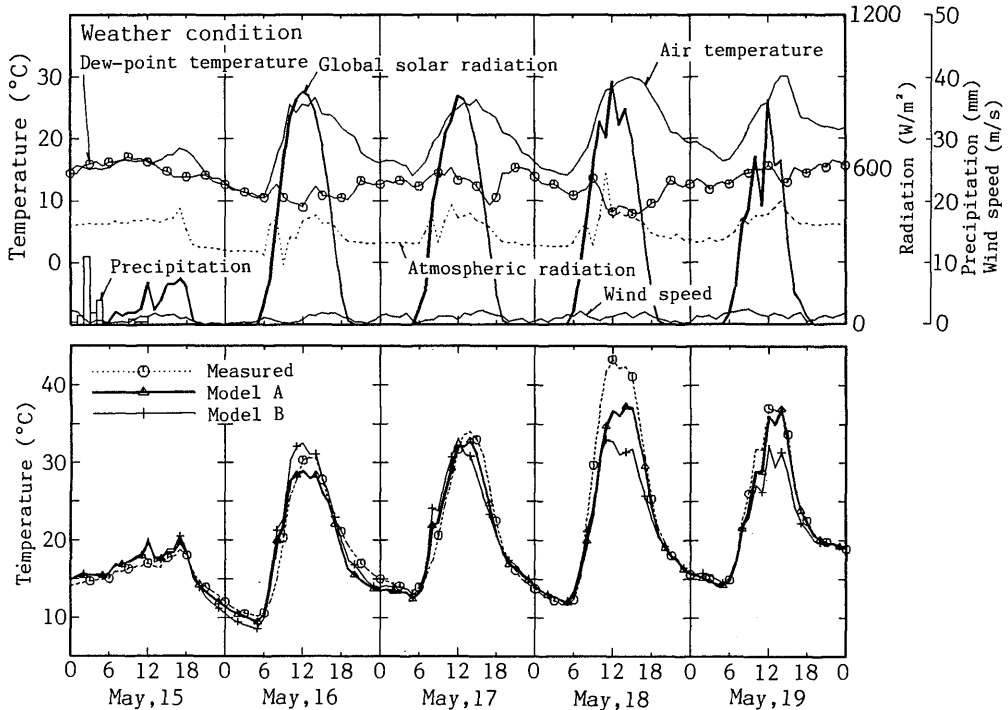


Fig. 5 Diurnal fluctuations of surface temperature

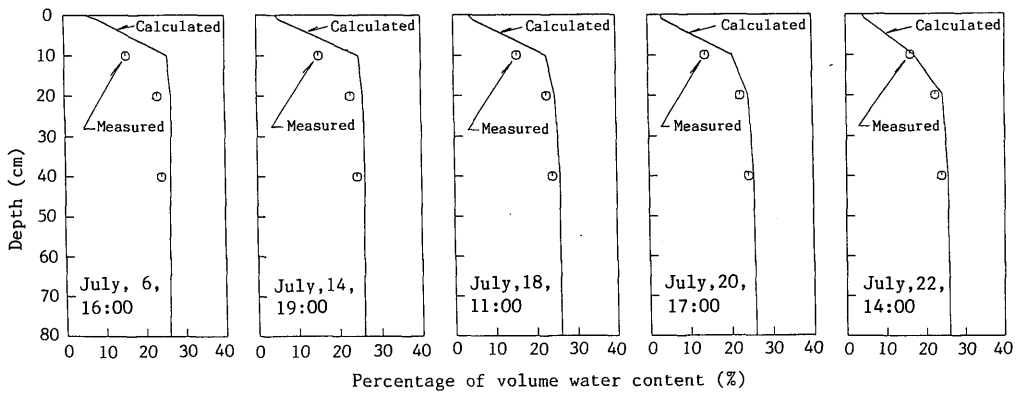


Fig. 6 Vertical distribution of volumetric water content in the earth

致し、モデルB計算値は前者より低い。地表面からの水分蒸発量を土壌の含水率から計算するモデルAと簡易化を行なったモデルBの差異が表れている。

1989年7月における地盤内の含水率の測定値とモデルAによる計算値を Fig. 6 に示す。地盤内の含水率は地盤内に設置した銅製電極による土壌の電気抵抗測定値から求めた。含水率測定点の個数が少ないため計算精度を十分に確認するには至らないが、測定値と計算値は同様の変動を示している。

4. む す び

2種類のモデルを用いて地盤内伝熱の数値シミュレーションを行い、実測値と比較した。その結果、地盤内の水分移動を考慮したモデルは考慮しないモデルに比べて、より正確に現実の地表面での熱収支および地盤内の伝熱現象を再現することを確認した。但し、地盤内の水分移動の影響を考慮せず、地表面での蒸発潜熱を地表面温度および蒸発比から求めるモデルでも、地盤内の温度は実測値から大きく外れることはない。このモデルでも、地表面の日変動の応答性を除いた長期的な変動を予測するには十分な精度といえる。

謝 辞

本研究の一部は昭和63年度文部省科学研究費、一般研究(C)「水分移動を考慮した地表面・地盤内の伝熱解析に関する実験的研究」によることを付記する。

記 号

AH : 大気放射量 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$)
 a : 日射吸収率
 C_a : 空気の湿り比熱 ($\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{K}$)
 C_r : 土壌の容積比熱 ($\text{kcal}/\text{m}^3\text{K}$)
 K : 蒸発比

k : 不飽和透水係数 (m/h)
 L : 水の蒸発潜熱 (kcal/kg)
 P : 大気圧 (mmHg)
 P_i : 土壌中の水蒸気分圧 (mmHg)
 P_{s_i} : 温度 T_i における飽和水蒸気圧 (mmHg)
 R_v : 水蒸気のガス定数 ($\text{mmHgm}^3/\text{kgK}$)
 T : 地中温度 (K)
 TH : 水平面全日射量 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$)
 T_a : 外気温度 (K)
 T_s : 地表面温度 (K)
 t : 時間 (h)
 W : 降水量 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$)
 X_a : 外気の絶対湿度 ($\text{kg}/\text{kg}^\circ$)
 X_s : 地表面の絶対湿度 ($\text{kg}/\text{kg}^\circ$)
 X_{s_a} : 地表面温度における飽和絶対湿度 ($\text{kg}/\text{kg}^\circ$)
 z : 距離 (m)
 α : 地表面の対流熱伝達率 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{hK}$)
 ϵ : 放射率
 θ : 土壌の体積含水率
 λ : 土壌の熱伝導率
 ϕ : 土壌の水分ポテンシャル (kcal/kg)
 ρ_w : 水の比重 (kg/m^3)
 σ : 黒体放射定数 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{hK}^4$)

参 考 文 献

- 1) 林 徹夫, 片山忠久, 塩月義隆, 津々見伸広, 九州大学大学院総合理工学研究科報告, **11**, 313 (1989).
- 2) 土壌物理研究会, 土の物理学, 森北出版, (1979), 239.
- 3) P. J. Camillo and R. J. Gurney, *WATER RESOURCES RESEARCH*, **21**, 997 (1985).
- 4) 松本 衛, 新建築学大系10環境物理, 彰国社, (1984), 109.
- 5) 浦野良美, 渡辺俊行, 日本建築学会論文報告集, **325**, 98 (1983).