

模擬森林火災下における地温変化の解析

Analysis of temperature changes in soils under simulated wildfire

○ 小渕敦子・溝口勝・西村拓・井本博美・宮崎毅

A. Obuchi, M. Mizoguchi, T. Nishimura, H. Imoto, and T. Miyazaki

東京大学 大学院農学生命科学研究科

Abstract

黒ぼく土を用いて模擬森林火災実験下における地温分布変化を測定した。表層土の地温は100°Cで温度が停滞した後、急激に温度上昇した。100°Cを超える深さは体積含水率が小さいほど深く、燃焼時間のルートに比例した。相変化を伴う移動境界値問題とみなして、凍土の分野で知られている Neuman 解を用いて熱解析したところ、適切な熱物性値を与えれば地温の時間変化は良好に予測できるが、温度分布の形状は完全には再現できないことが分かった。より厳密に現象を予測するためには遷移領域における水分移動も考慮したモデル化が必要である。

キーワード：森林火災，地温，潜熱，ノイマン解

Key words: wildfire, ground temperature, latent heat, Neuman's theory

1. はじめに

近年、世界各地で森林火災が発生し、森林の消失による生態系への影響が懸念されている。しかし、燃焼時の土壌温度に関する詳細な研究報告はあまり見当たらない。そこで本研究では、初期水分量の異なる土壌カラムを用いて模擬森林火災時の地温分布変化を測定し、移動境界値問題として熱解析を試みた。

2. 実験方法¹⁾

試料には黒ぼく土を用いた。試料の初期体積含水率を4種類(0.15, 0.32, 0.39, 0.45 m³/m³)に調整し、素焼きカラム(内径15 cm, 高さ30 cm)に乾燥密度0.75Mg/m³で充填した。カラムに熱電対を深さ0, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30 cmに挿入し、炭火を用いてカラムの土壌表面を6時間加熱し、この過程の地温分布変化を測定した。

3. 結果と考察

(1)地温の時間変化 ($\theta = 0.32$ の場合, Fig.1)

表面温度はいずれの試料でも600~700°Cに上昇した。各深さの地温は100°C付近で温度が停滞した後、急激な温度上昇が見られた。100°Cを超える深さは体積含水率が小さいほ

ど大きく、燃焼時間のルートに比例した (Fig. 2)。その比例定数と初期体積含水率の関係を Fig. 3 に示す。

(2)地温分布 ($\theta = 0.32$ の場合, Fig.4)

地温は100°Cを境にして100°C以上の高温領域、ほぼ100°Cの遷移領域、100°C以下の低温領域の3領域に分かれた変化パターンを示した。6時間での温度分布をみると、高温領域は、初期水分量が小さい方が厚くなったが、10cm以下の温度分布は初期水分量には依存しなかった。

4. Neuman 解による解析

相変化を伴う非定常熱伝導現象とみなして、凍土の分野で知られている Neuman 解²⁾を適用してみる。

いま初期温度 T_0 の半無限の土層の表面が T_s になったと仮定すると、 $T_f=100^\circ\text{C}$ 以上の高温領域と100°C以下の低温領域について、それぞれ以下の熱伝導式が成り立つ。

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \quad 0 < x < \xi \quad \dots(1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_2 \cdot \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \quad x > \xi \quad \dots(2)$$

ここで、 T : 温度 α : 熱拡散率 x : 深さ t : 時間、添字 1,2 は高温および低温領域、 ξ は境界の位置を表す。境界では以下の熱収支式が成り立つ。

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{1}{Q_L \cdot \rho_s \cdot w} \cdot \left[K_1 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=\xi} - K_2 \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=\xi} \right] \dots (3)$$

ここで、 Q_L は蒸発潜熱、 K は熱伝導率である。

(1)(2)(3)を以下の初期条件と境界条件：

$$x > 0, t = 0, T_1 = T_0 = \text{const}$$

$$x = 0, t \geq 0, T_1 = T_s$$

$$x \rightarrow \infty, t \geq 0, T_2 \rightarrow T_0 = \text{const}$$

$$x = \xi, t > 0, T_1 = T_2 = \text{const} = T_f = 100^\circ\text{C}$$

$$T_f = \text{evaporating temperature}$$

で解くと、次の解析解が得られる。

$$T_1 = T_s + (T_f - T_s) \cdot \frac{G\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_1 t}}\right)}{G\left(\frac{m}{2\sqrt{\alpha_1}}\right)} \dots (4)$$

$$T_2 = T_0 + (T_0 - T_f) \cdot \frac{\left[1 - G\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_2 t}}\right)\right]}{\left[1 - G\left(\frac{m}{2\sqrt{\alpha_2}}\right)\right]} \dots (5)$$

$$\xi = m \cdot \sqrt{t} \dots (6)$$

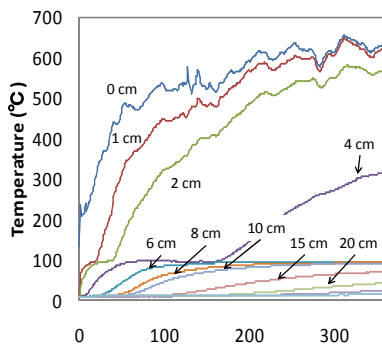


Fig.1 地温の時間変化 (実測値)

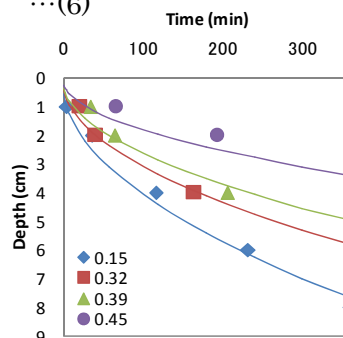


Fig.2 各初期水分量における 100°C

を超える深さと時間の関係

(実線：(6)式による近似)

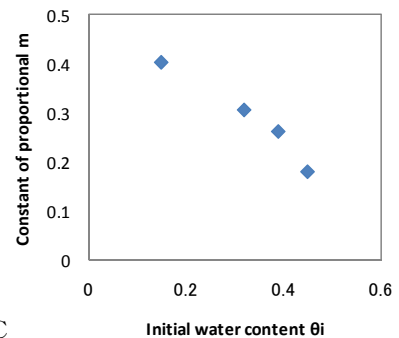


Fig.3 (6)式の係数 m と初期水分量

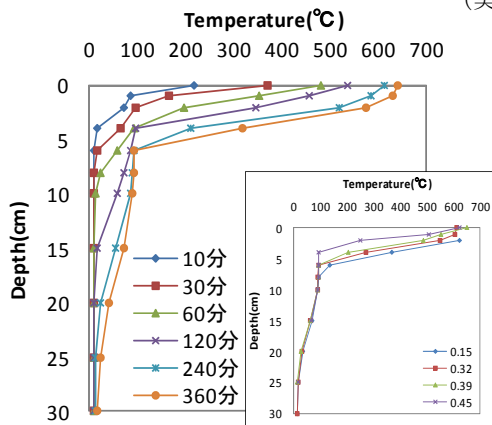


Fig.4 地温分布 (実測値)

左: $\theta = 0.32$ 右: 360 分後 (各 θ)

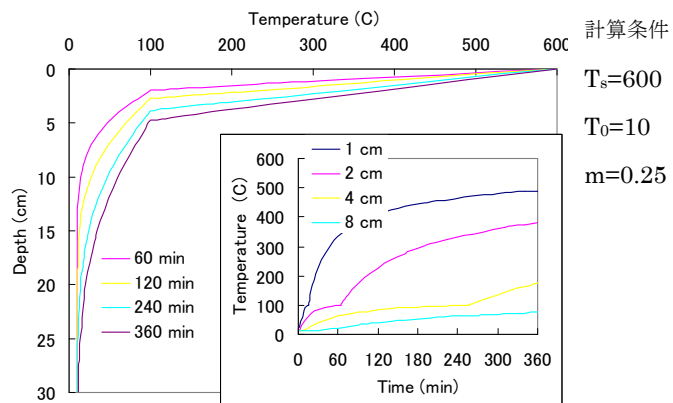


Fig.5 Neuman 解による地温 (計算値)

左: 地温分布 右: 時間変化

ここで、 G は以下の誤差関数である。

$$G(X) = G(x\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{x\eta} (e^{-\beta^2}) \cdot d\beta$$

Fig.5 は(4)(5)の解析解を用いて計算した地温変化である。ただし、 $\theta = 0.32$ に対するパラメータとして、 $\alpha_1, \alpha_2 = 0.12, 0.18$ [cm^2/min], $m = 0.25$ (Fig.3 の実測値) を用いた。

地温は Fig.1 と同じように 100°C で一度停滞した後、急激に上昇した。しかしながら、温度分布に関しては、Fig.4 のような 100°C の遷移領域は現れなかった。これは、この領域で水分移動と蒸発が激しいためと推察される。より厳密に現象を予測するためにはこの遷移領域をうまくモデル化する必要がある。

文献: 1) 小淵ら(2007), 農業農村工学会講演要旨集, 1-41, pp.230-231 2) Jumikis, A. R(1996), Thermal Soil Mechanics, Rutgers Univ. Press, New Brunswick, pp.236-246