

## 水の浸潤にともなう黒ボク土の発熱と地温分布

### Soil temperature profile and heat of wetting during infiltration into Andosols

川村宣也・〇渡辺晋生・坂井勝

Yoshiya Kawamura, Kunio Watanabe and Masaru Sakai

**はじめに** 土に水が浸潤する際、浸潤前線で湿潤熱が発生する。この熱は周囲に伝導するとともに、下方に移流し、独特の地温分布を形成する。湿潤熱の主要因が土粒子表面への水の吸着だとすると、浸潤前線近傍の温度上昇は土の比表面積、吸着特性、乾燥密度に依存する。また、水の吸着熱は吸着層とバルクの水分子のエネルギー差によるため、昇温量は水の吸着量（吸着層の厚さ）にも依存すると考えられる。ところで、黒ボク土は大きな比表面積を持つが、その表面構造は炉乾等の高温処理により変性するとされている。こうした変性も浸潤時の地温分布に違いを及ぼすと思われる。そこで本研究では、水の浸潤にともなう黒ボク土中の地温分布の違いを比較し、土壌の種類や乾燥方法が地温分布に及ぼす影響を評価すること、そして浸潤時の発熱に寄与すると考えられる土粒子表面への水の吸着熱を推定することを目的とした。

**試料と方法** 試料には、風乾および炉乾した熊本、長野、三重県の黒ボク土の2 mmふるい通過分と、風乾した鳥取砂丘砂を用いた。内径5 cm、高さ35 cmのアクリルカラムに初期温度25 °C、圧力水頭 $-2.2 \times 10^6$  cmに調整した試料を一定の乾燥密度で詰めた。Table 1に試料の乾燥密度 $\rho_b$ 、比表面積 $s$ 、風乾と飽和時の熱伝導率 $\lambda_d$ 、 $\lambda_w$ を示す。カラムには1~29 cm深に熱電対を14本埋設した。カラム上端から25 °Cの水を0.5~5 cm/hの一定流量で滴下し、ビデオカメラで浸潤の様子を撮影した。得られた地温 $T$ と含水率 $\theta$ の時間 $t$ と深さ $z$ 変化を式(1)と(2)で解析した。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

$$C_s \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - C_w \frac{\partial q T}{\partial z} + \Phi_w \quad (2)$$

ここで、 $K(h)$ は不飽和透水係数、 $h$ は圧力水頭、 $C_s$ と $C_w$ は試料と水の熱容量、 $q$ は水分フラックスである。また、土は絶乾からある含水率 $\theta_L$ までは濡れるにつれて発熱しそれ以上の含水率変化では発熱しないとして式(2)の発熱項 $\Phi_w$  [W/m<sup>3</sup>]を式(3)で表した。

$$\Phi_w = \begin{cases} \phi_w \frac{d\theta}{dt} \cdots (\theta_1 < \theta < \theta_L) \\ 0 \cdots (\theta_L \leq \theta) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $\theta_1$ は初期含水率、 $\phi_w$ は単位吸着水量あたりの発熱量である。計算には式(2)と(3)を組み込んだHYDRUS-1Dを用いた。発熱量は1分子層目への吸着時に最大となるが、本実験では $\theta_1$ で粒子表面が1層以上の吸着水で覆われているため、 $\phi_w$ には一定値を与えた。

**結果と考察** Fig. 1aに熊本風乾土と三重風乾土の浸潤過程における11, 21 cm深の地温変化を、Fig. 1bに両試料の11, 21 cm深の地温が最高値に達した際の温度分布を示す。地温は浸潤前線が近づくと次第に上昇し、前線到達時にピークに達し、その後下降した。温度が

Table 1 Physical properties of samples

drying way		$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	$s$ (m <sup>2</sup> /g)	$\lambda_d$ (W/mK)	$\lambda_w$ (W/mK)
Kumamoto	air	0.79	151.4	0.16	0.75
	oven		116.1	0.15	0.72
Nagano	air	0.79	124.3	0.14	0.69
	oven		89.5	0.14	0.69
Mie	air	1.1	60.9	0.19	1.06
	oven		49.2	0.17	1.09
Tottori	air	1.63	9.6	0.24	1.63

上昇し始めてからピークに達するまでの時間（上昇時間）や初期温度とピークの温度差（ $\Delta T$ ）、ピークから初期温度まで戻る時間（下降時間）は何れの深さでも等しかった。試料が異なると、上昇時間、下降時間、温度差 $\Delta T$ は異なった。Fig. 2a に各試料の上昇時間と乾燥時の熱伝導率 $\lambda_d$ 、Fig. 2b に下降時間と飽和時の熱伝導率 $\lambda_w$ の関係を示す。上昇時間は $\lambda_d$ が高いほど長くなった。一方、下降時間と $\lambda_w$ の相関は見られなかった。浸潤前線下方の地温分布は主に熱伝導率に依存するが、上方の地温分布は伝導に加え移流や分散の影響も大きいと考えられる。試料を炉乾すると、熱伝導率が低下し、上昇時間も異なった。Fig. 3 に各試料の $\Delta T$  と比表面積  $s$  の関係を示す。 $\Delta T$ は  $s$  が大きいほど増加した。 $s$  が大きいほど吸着できる水分量が多くなり、それに応じて温度上昇が大きくなったと考えられる。試料を炉乾すると比表面積は小さくなり、 $\Delta T$ も低下した。炉乾により黒ボク土の土粒子表面が変性し、比表面積が小さくなったと考えられる。同一の試料であっても滴下流量が異なると $\Delta T$ が異なった。Fig. 4 に熊本と三重風乾土の $\Delta T$ と滴下流量の関係を示す。 $\Delta T$ は滴下流量が増加するとはじめは急激に、その後緩やかに大きくなり、5 cm/h では再び小さくなった。低流量時には流量の増加にともない単位時間当たりの吸着量が増加し温度上昇が大きくなったと考えられる。一方、高流量時には吸着による発熱に対し移流の効果が大きくなり、温度上昇が抑制されたと考えられる。ここで、式 (1) ~ (3) による計算結果を Fig. 1 と Fig. 4 に実線で示す。 $\phi_w$  と $\theta_L$ を適切に与えると計算は実測をよく再現したが、これらの組合せは無数に存在した。そこで、 $s$  から $\theta_L$ 相当の吸着分子層数を算出し、実験を再現する $\phi_w$ との組合せを求めた (Fig. 5)。土粒子への発熱反応に寄与する吸着分子層数は3~7分子層程度と考えられる。そこで、この分子層を3.5層と仮定すると、発熱量は熊本黒ボク土の場合、風乾土で2 kJ/mol、炉乾土で1.2 kJ/molとなった。

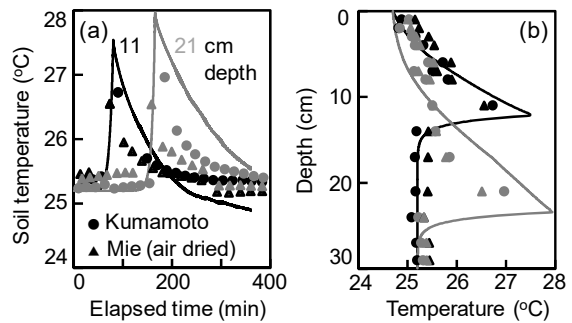


Fig.1 (a) Temperature change and (b) profile.

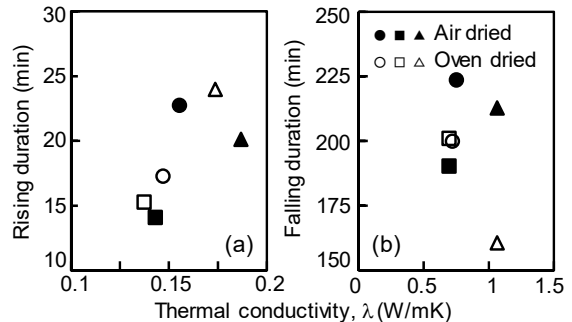


Fig.2 Duration for (a) temperature rise and (b) fall.

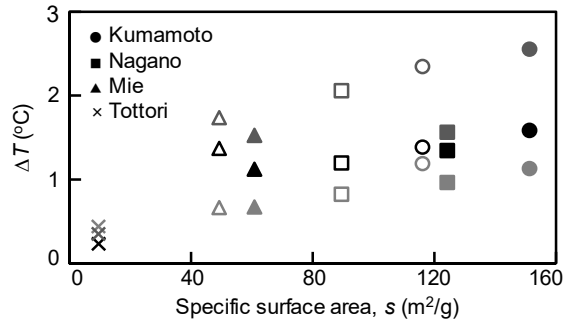


Fig.3  $\Delta T$  and specific surface area.

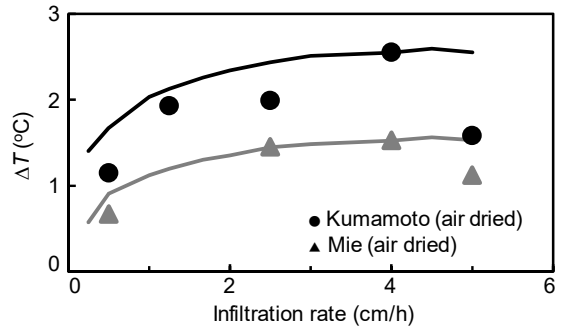


Fig.4  $\Delta T$  and infiltration rate.

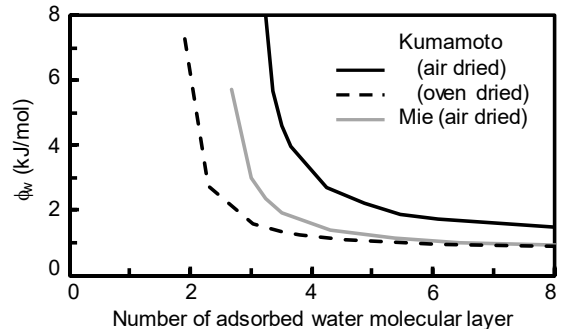


Fig.5  $h_w$  and number of water molecular layer.