

水の浸潤にともなう黒ボク土の発熱と地温分布について

516323 川村 宜也 (土壌圏システム学教育研究分野)

1. はじめに

地温は日射や降雨、土壌微生物の活動で変動する。一方、土粒子は水に濡れると発熱する。こうした湿潤熱も土中の温度分布に影響を与えると考えられる。土中で発生した熱は温度勾配によって周囲へ伝導し、水の浸潤によって下方へと運ばれる。また、湿潤熱の発生する要因の大部分が水の吸着によると考えると、土の昇温量は土の比表面積、吸着特性、乾燥密度に依存すると考えられる。また、水の吸着による発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)に依存すると考えられる。ところで、日本の代表的な土壌である黒ボク土は大きな比表面積を持つが、その構造は高温処理により変性されている。こうした変性も地温分布の形成に影響を与えると考えられる。そこで本研究では、水の浸潤にともない発生する黒ボク土中の地温分布の形成メカニズムを明らかにすること、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土粒子表面の吸着水層の厚さと吸着水量あたりの発熱量を推定することを目的とした。

2. 試料と方法

試料には、風乾および炉乾した熊本、長野、三重県産の黒ボク土の2 mmふるい通過分と、風乾した鳥取県産の砂丘砂を用いた。内径5 cm、高さ35 cmの亚克力カラムに初期温度25°C、圧力水頭 -2.2×10^6 cmに調整した試料を一定の乾燥密度で詰めた。表1に試料の乾燥密度 ρ_b 、比表面積 s 、風乾と飽和時の熱伝導率 λ_d 、 λ_w を示す。装置には1~29 cm深に熱電対を14本埋設した。装置上端から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。実験で得られた結果をリチャーズ式(1)と熱伝導方程式(2)で解析した。

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

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

ここで、 K は不飽和透水係数、 h は土中水圧力、 z は深さ、 t は時間、 C_s と C_w は試料と水の熱容量、 T は地温、 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 θ_{Lim} までは濡れる際に発熱し θ_{Lim} 以上の含水率変化では発熱しないと式(2)の発熱項 H_w を式(3)で表した。

$$H_w = \begin{cases} q_w \frac{d\theta}{dt} & (\theta_{Ini} < \theta < \theta_{Lim}) \\ 0 & (\theta_{Lim} < \theta) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 θ_{Ini} は初期含水率、 q_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。また、1分子層目の吸着熱は一般に2分子層目以降より大きい。しかし、本実験の θ_{Ini} は1分子層以上の吸着水を含むため、 q_w は2分子層目以降の吸着熱の平均値と考え、一定値を与えた。

3. 結果

図1(a)に熊本風乾土と三重風乾土の浸潤過程における11、21 cm深の地温変化をマーカーで示す。また、図1(b)にそれぞれの試料の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、初期温度から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。温度が上昇し始め、ピークに達する時間(上昇時間)や初期温度とピークの

表1 各試料の土性

		ρ_b (g/cm ³)	s (m ² /g)	λ_d (W/mK)	λ_w (W/mK)
熊本	風乾	0.79	151.4	0.16	0.75
	炉乾		116.1	0.15	0.72
長野	風乾	0.79	124.3	0.14	0.69
	炉乾		89.5	0.14	0.69
三重	風乾	1.1	60.9	0.19	1.06
	炉乾		49.2	0.17	1.09
	鳥取砂	1.63	9.6	0.24	1.63

温度差（昇温量）、ピークから初期温度まで戻る時間（下降時間）は実験中いずれの深さでも概ね等しかった。試料が異なると、上昇時間、下降時間、昇温量は異なった。図 2 (a) に各試料の上昇時間と乾燥時の熱伝導率、図 2 (b) に下降時間と飽和時の熱伝導率の関係を示す。上昇時間は乾燥時の熱伝導率が高いほど長くなった。一方、下降時間と飽和時の熱伝導率には相関がみられなかった。昇温部の地温分布の形成は熱伝導率に依存するが、降温部の地温分布の形成には伝導に加え移流や分散の影響も大きいと考えられる。また、試料を炉乾すると、熱伝導率が低下し、上昇時間にも影響が生じた。図 3 に各試料の昇温量と比表面積の関係を示す。昇温量は比表面積が大きいほど増加した。比表面積が大きいほど単位面積当たりに吸着できる水分量が多くなり、吸着量に応じて昇温量が高くなったと考えられる。また、試料を炉乾すると、比表面積が小さくなり、昇温量も低下した。炉乾処理により黒ボク土内の団粒構造が破壊され、比表面積が小さくなったと思われる。また、同一試料であっても滴下流量が異なると、昇温量が異なった。図 4 に熊本、三重風乾土の昇温量と滴下流量の関係をマーカーで示す。昇温量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 では小さくなった。低流量時には流量の増加にともなう、単位時間当たりの吸着量の増加により昇温量が増加したと考えられる。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、昇温量が減少したと考えられる。ここで式 (1) ~ (3) を用いてカラム実験を計算した。計算は q_w と θ_{Lim} を適切に与えることで実測をよく再現した(図 1、4 の実線)。そこで比表面積から θ_{Lim} 相当の吸着分子層数を算出し、吸着水量あたりの発熱量との関係を求めた(図 5)。図から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、発熱量は風乾土で2 kJ/mol、炉乾土で1.2 kJ/molとなった。

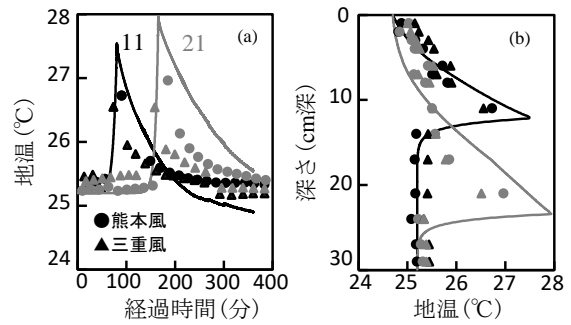


図 1 (a) 地温の経時変化と (b) 温度分布

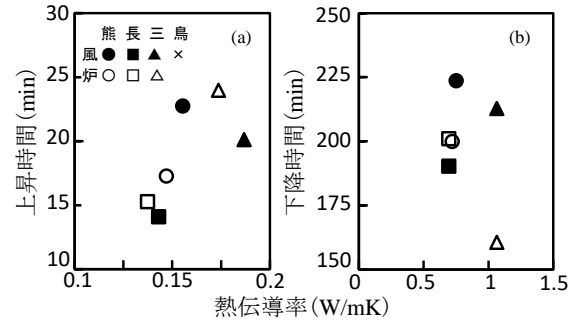


図 2 熱特性の影響 (a) 乾燥時と (b) 飽和時

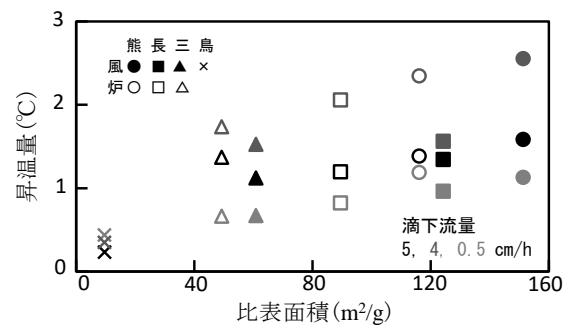


図 3 比表面積と昇温量

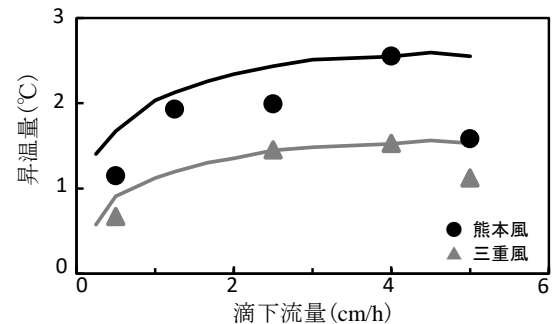


図 4 滴下流量と昇温量

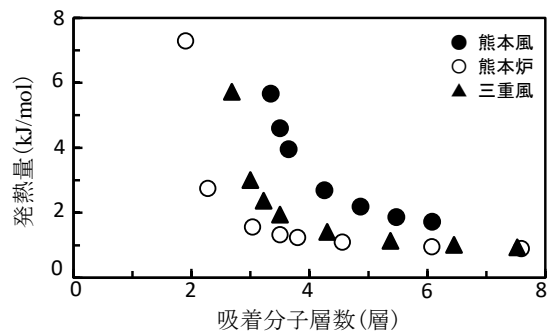


図 5 吸着分子層と発熱量