

地温と熱流板を使った原位置における土壌の熱的性質測定

In situ measurement of soil thermal properties using soil temperature and heat flux plate

○登尾浩助*
○Kosuke Noborio*

1. 背景

土壌の熱的性質は様々な分野で重要なパラメータの一つである。1980年代には原位置で測定した地温変化を使って熱拡散係数を推定する方法が提案されている (Horton ら, 1983)。熱伝導率は単一プローブ法を使って実験室ばかりでなく原位置においても測定され、近年では双子プローブ熱パルス (DHP) 法を使った熱的性質 (熱拡散係数、体積熱容量、熱伝導率) の同時測定が報告されている (登尾ら, 2002)。熱拡散係数、体積熱容量、熱伝導率を同時に測定するためには DHP などの特殊なプローブが必要である。一方、農地の蒸発散量をボーエン比法やペンマン法などの熱収支式に依存する測定法では、地中熱流量と地温を同時に測定する機会が多い (Noborio ら, 2012)。ここで測定された地中熱流量と地温を使った原位置における熱拡散係数、体積熱容量、熱伝導率の測定法を提案する。

2. 理論

Fig. 1 に示すようにある深さ $x=l$ に設置した地中熱流板と同じ深さの地温とそこからさらに l だけ深い地点 $x=0$ の地温の差を ΔT とする。熱流板の測定する熱量を G 、土壌の熱拡散係数を κ 、熱伝導率を K とすると、 ΔT の経時的な変化は次式のように表される (Carslaw and Jaeger, 1959)。

$$\Delta T = \frac{Gt}{\rho c l} + \frac{G l}{K} f(l, x, \kappa) \quad (1)$$

ここで、 ρc は土壌の体積熱容量、 x は距離の座標である。 $f(l, x, \kappa)$ の詳細は Carslaw and Jaeger (1959) を参照のこと。式 (1) 中の ΔT と G は一定値となっている時の測定値を使うので既知、さらに地温の差を測定した距離 l も既知であり、定義から $\rho c = K/\kappa$ であるので、式 (1) で計算される ΔT と経時的な測定値 ΔT の差の 2 乗和を最小とする K と κ がこの土壌のもつ熱的性質である。

3. 実験方法と実験材料

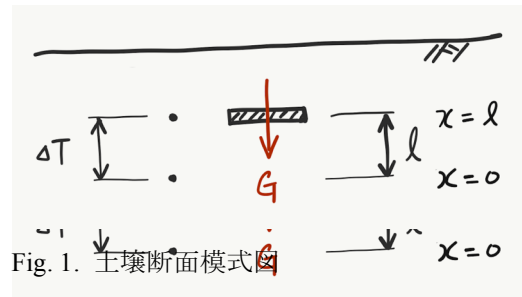


Fig. 1. 土壤断面模式図

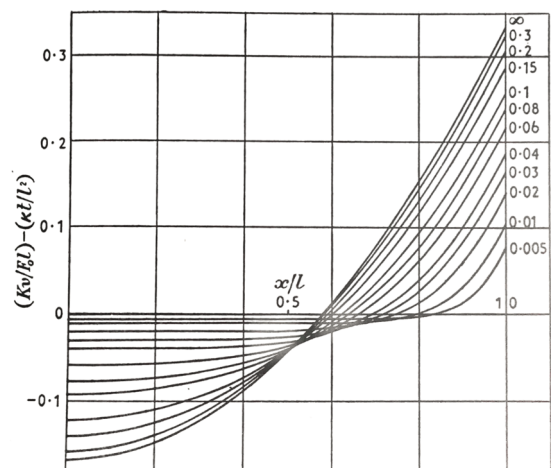


Fig. 2. 式 (1) 右辺第 2 項の関数を示す (Carslaw and Jaeger, 1959)。数値は $\kappa t/l^2$ を表す。

*明治大学農学部 Meiji University, School of Agriculture

Fig. 1 で示される熱流板 (MF-81、EKO 精機) は地表面から深さ 5cm に水平に設置した。深さ 5cm と 10cm の位置に T 型熱電対を設置して地温を測定した。地温と熱流量は毎秒測定し、15 分間隔でデータロガー (CR23X、キャンベルサイエントیفイック) に保存した。実験は岩手県盛岡市近郊のリードキャナリーグラスを栽培している牧草地で行い、牧草地の土壌は黒ボク土であった。実験の詳細は Noborio ら (2012) を参照のこと。

4. 結果と考察

Fig. 3a にはある日の 24 時間分の深さ 5cm と 10cm の地温と深さ 5cm に設置した熱流板で測定した熱流量の経時変化が示される。夜間 0 時から 6 時までは、5cm 深さの地温が 10cm 深さの地温よりも低い状態を保ったままほぼ一定の割合で地温が低下した。この間の熱流量は -16 W/m^2 とほぼ一定の値で推移した。解析には、熱流量がほぼ一定値となっているこの時間帯のデータを使用した。熱流量は 6 時以降は急上昇して 9 時過ぎには正值 (即ち、下方向きの熱流束が発生) となった。熱流量が正值になってしばらくすると深さ 5cm の地温が深さ 10cm の地温よりも高くなった。その後 18 時頃から熱流量は再び負値となり、しばらくすると 5cm と 10cm の地温の大きさが逆転した。

Fig. 3b には、 $\Delta T = T_{10} - T_5$ と深さ 5cm の熱流量の経時変化が示される。熱流量が負の一定値 (即ち、上方向きの熱流束が発生) である夜間 0 時から 6 時までの間に ΔT は徐々に上昇した。Fig. 1 に示すように深さ 10cm の地温を基準に考えると、上向きの熱流束による熱移動により、 ΔT が上昇したことが示される。

式 (1) で計算される ΔT と経時的な測定値 ΔT の差の 2 乗和を最小とするこの土壌の熱的性質 K と κ の具体的な計算例は当日紹介する。

5. 参考文献

- Carslaw, H.S., and J.C. Jaeger. (1959). *Conduction of heat in solids*. Oxford: Clarendon Press, 1959, 2nd ed.
- Horton, R., P.J. Wierenga, and D.R. Nielsen. (1983). Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. *Soil Science Society of America Journal*, 47(1), 25-32.
- 登尾浩助・KJ マクイネス・JL ハイルマン. (2002). 双子プローブ熱パルス法による土壌の熱的性質測定と比較. *土壌の物理性*, (90), 3-9.
- Noborio, K., K. Ono, J. Mano, T. Miura, N. Satta, K. Koga, and Y. Mukaida. (2012). Evaluation of energy-balance-based evapotranspiration in a grass field. *土壌の物理性*, (122), 15-21.

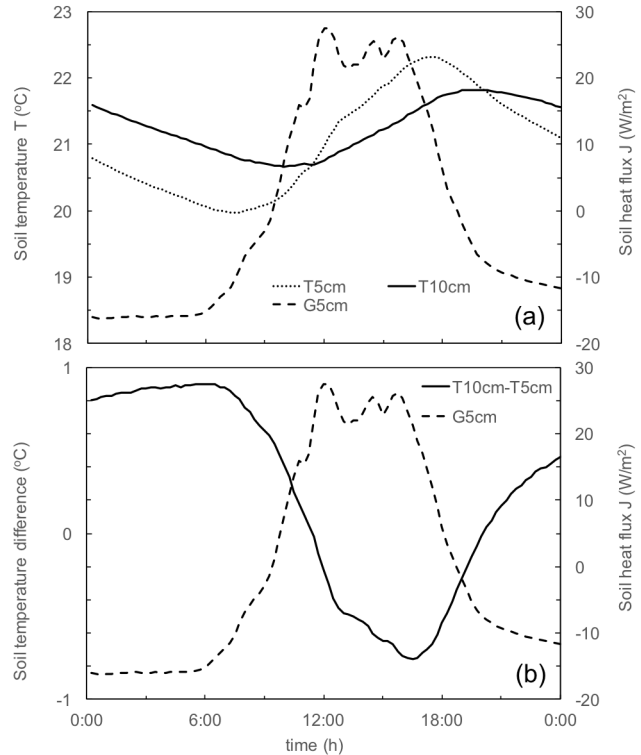


Fig. 3. (a) 深さ 5cm と 10cm で測定した地温 T_5 , T_{10} と深さ 5cm で測定した地中熱流量 G_5 の 24 時間の変化と (b) $\Delta T = T_{10} - T_5$ と G_5 の 24 時間の変化。