

熱パルスセンサーを用いた地表面近傍における土中熱フラックスの測定

515315 尾関健吾 土壤圏循環学教育研究分野

1. はじめに

地温は、植物の発芽率や初期生育速度に影響を与える重要な要素である。気象条件に基づき地温変化を予測するには、地表面熱収支式の一成分である地表面における土中熱フラックス G の把握が大切である。

従来、 G の測定には主に熱流板が用いられており、野外観測で用いられるセンサーは一般的に直径 10 cm 程の円板状である。地表面付近に埋設すると土中水分移動を妨げる恐れがあるため、土中 5 cm 以深に埋設されることが多い。熱流板の測定値に基づき G を推定するには、他のセンサーを使ってその上層の熱貯留量を測定する必要がある。しかし、水分・地温変化が大きい地表面近傍の熱特性の把握は容易ではない。

そこで近年、熱パルスセンサーを用いて、土中熱フラックスを測定する方法が提案されている。熱パルスセンサーは、熱パルスを出力するヒーター線と温度上昇を測定するサーミスタ線からなり、データを解析することで土の熱特性（熱伝導率・体積熱容量・熱拡散係数）を推定する。熱伝導率 λ を推定し、地温 T を測定することで、熱フラックス G_z を求めることができる。

$$G_z = -\lambda(\theta) \frac{\Delta T}{\Delta z}$$

ここで θ は体積含水率、 z は深さである。直径 0.1 cm といったニードル状のセンサーであり、水の流れの阻害が小さいこと、水分量で変化する λ を原位置で測定できることから、地表面近傍の土中熱フラックスの測定に有効だと考えられている。

そこで本研究では、熱パルスセンサーを用いた地表面近傍の土中熱フラックスの測定について検討することを目的とした。そのため、ま

ず水分・地温変化の影響が少ない 5 cm 深における熱パルスセンサーの測定について、熱流板と比較を行った。その上で、1 cm 深に埋設することで、地表面近傍における測定について検討した。

2. 方法

測定は三重大学附属農場内のダイズ栽培圃場で行ったが、本発表は収穫後の裸地状態の測定に注目する。本研究では、1本のヒーター線と4本のサーミスタ線からなる5線式熱パルスセンサー（PHPP）を用いた。ヒーター・サーミスタ間距離は 0.65 cm である。PHPP を中心のヒーター線が 5 cm 深と 1 cm 深になるように埋設した（図 1）。サーミスタで各深さの地温 T を、ヒーターと各サーミスタ間で λ を測定し、熱フラックス G_z を算出した。5 cm 深では深さ 4.35~5 cm と 5~5.65 cm の熱フラックス $G_{4.7}$ と $G_{5.3}$ が求まり、同様に 0.35~1 cm と 1~1.65 cm の熱フラックス $G_{0.7}$ と $G_{1.3}$ が求まる。測定は 1 時間間隔で行った。比較対象として、熱流板を 1 cm 深に 1 つ、5 cm 深には 2 つ埋設した。また、水分センサーで 0~10 cm 深の平均体積含水率 θ 、気象センサーで降雨量や気温、純放射量を測定した。

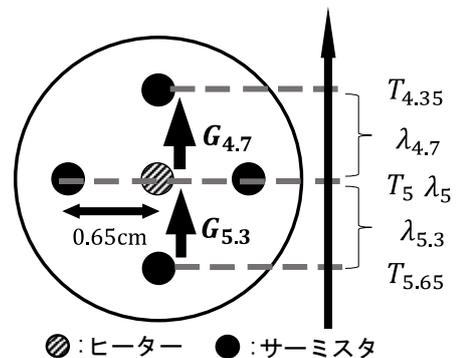


図 1 5cm深のPHPPによる熱フラックス測定

3. 結果と考察

図2に2018/12/11 ($\theta = 0.17$, 21時以降は降雨のため $\theta = 0.23$ まで上昇)の5 cm深における熱フラックス G_z (下向きが負)、温度勾配 $\Delta T / \Delta z$ と熱伝導率 λ の変化を示す。熱パルスセンサーによる測定値は夜間に上向き、日中に下向きという熱流の日変化を捉えることができ、熱流板とほぼ一致した。日中の熱流は通常上層から下層に向けて小さくなるが、測定値は上層の $G_{4.7}$ より下層の $G_{5.3}$ の方がわずかに小さい値を示した。 $\lambda_{4.7}$ と $\lambda_{5.3}$ の値はほぼ一致していたことから、4.7 cm 深の $\Delta T / \Delta z$ の測定値が 5.3 cm 深の値よりわずかに小さいことが原因であると言える。熱流の向きが逆転する夜間も、同様に $G_{4.7}$ と $G_{5.3}$ の大小関係が逆となる結果となった。0.65 cm の狭い対象領域で、温度勾配を正確に測定する難しさを示している。

図3に、12/11の1 cm深における熱フラックス G_z 、温度勾配 $\Delta T / \Delta z$ と熱伝導率 λ の変化を示す。地表面近傍でも熱パルスセンサーの測定値は、熱流の日変化を示した。特に夜間において、測定値は放射冷却による上向きの熱流をよく捉えることができ、地表面に近い $G_{0.7}$ の方が

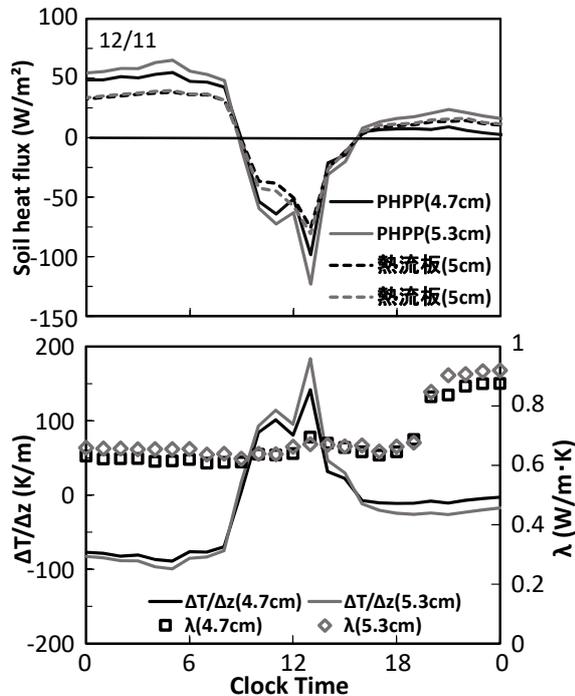


図2 5cm深における熱フラックス G_z 温度勾配 $\Delta T / \Delta z$ 、熱伝導率 λ

大きな値を示した。そして、純放射量の変化に対応した値を示した。一方、5 cm 深の結果と同様に、日中は上層 $G_{0.7}$ より下層 $G_{1.3}$ の方が小さい値を示した。 $\lambda_{0.7}$ と $\lambda_{1.3}$ はほぼ同じ値であったため、0.7 cm 深の $\Delta T / \Delta z$ が 1.3 cm 深より小さいことが原因であると言える。地表面のわずかな凹凸や隙間によって低い気温の影響を受け、0.35 cm 深という地表面近傍での測定温度が低い値を示している可能性が挙げられる。 $\lambda_{0.7}$ の推定値がややばらつくのも(6時の大きな値は霜の影響)、この影響によると考えられる。狭い対象領域での $\Delta T / \Delta z$ の計算に加え、地表面付近における地温測定に課題があると言える。

4. おわりに

熱パルスセンサーを用いることで、地表面近傍の土中熱フラックスの日変化を捉えることができ、特に夜間の上向きの熱流を地表面に近い領域で測定することができた。一方、熱フラックスの測定をさらに正確に行うためには、狭い測定距離における温度勾配の計算や地表面付近の地温測定に工夫が必要だと考えられる。

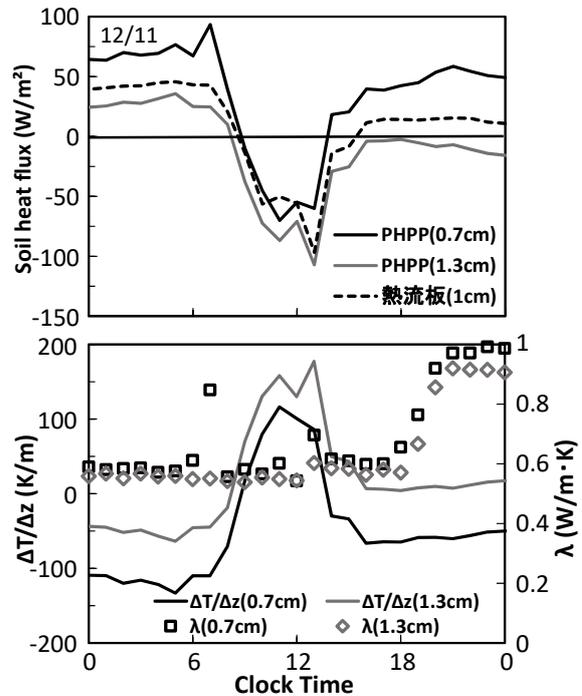


図3 1cm深における熱フラックス G_z 温度勾配 $\Delta T / \Delta z$ 、熱伝導率 λ