

## 5 線熱パルスセンサーによる土中水分フラックスと熱特性の同時推定 Simultaneous Determination of Soil Water Flux and Thermal Properties with a Penta-Needle Heat Pulse Probe

○坂井 勝\*  
Masaru Sakai

Scott B. Jones\*\*  
Scott B. Jones

**はじめに** 熱パルスセンサーを用いることで、熱特性だけでなく土中水分フラックスを推定することができる。しかし、多くの研究は1次元流れが対象であった。そこで本研究では、5線熱パルスセンサーと2次元平面上の解析解を用いて、水分フラックス、熱特性の同時推定を行なった。

**実験** 1本のヒーター線と4本のサーミスターから成る5線熱パルスセンサー(penta-needle heat pulse probe, 以下 PHPP)を作成した(Fig.1, Fig.2)。PHPPを等間隔に3本挿入した内径5cm, 高さ40cmのアクリル鉛直カラムに、工業用ケイ砂を乾燥密度 $1.46 \text{ g cm}^{-3}$ で水中充填した。この時、各PHPPは流れの向きに対して $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ の角度で挿入した(Fig.2)。シリンジポンプ及びぜん動式ポンプを用いてカラム下端から鉛直上向きの飽和定常流れ( $1.2\text{--}33000 \text{ cm d}^{-1}$ )を作成し、上端からの排水量を電子天秤で計測した。PHPP測定では、熱パルス(約 $165 \text{ Wm}^{-1}$ )を8秒間出力し、上昇温度を1秒間隔で120秒間測定した。また、実験開始前の水分静止状態( $0 \text{ cm d}^{-1}$ )においてもPHPPの測定を行ない、ヒーターとサーミスター間の距離のキャリブレーションに用いた。

**水分フラックスと熱特性の推定** 無限長線源を中心とする $x$ - $y$ 平面上の温度上昇の解析解は次式で表される(Fig.2)。

$$T(x, y, t) = \begin{cases} \frac{q'}{4\pi\lambda} \int_0^t s^{-1} \exp\left[-\frac{(x-V_x s)^2 + (y-V_y s)^2}{4\kappa s}\right] ds; & 0 < t \leq t_0 \\ \frac{q'}{4\pi\lambda} \int_{t-t_0}^t s^{-1} \exp\left[-\frac{(x-V_x s)^2 + (y-V_y s)^2}{4\kappa s}\right] ds; & t > t_0 \end{cases}$$

ここで、 $T$ は上昇温度、 $t$ は経過時間、 $q'$ は単位長

さ当りの入力熱、 $t_0$ は熱パルス入力時間、 $\lambda$ は熱伝導率、 $\kappa$ は熱拡散係数、 $V_x$ と $V_y$ は熱フラックスの $x$ ,  $y$ 成分である。解析解をPHPPで測定された温度上昇の測定値に対して適用し、 $\lambda$ ,  $\kappa$ ,  $V_x$ ,  $V_y$ の最適化を行なった。熱フラックス $V$ は次式を用いて、水分フラックス $J$ に変換した。

$$J_x = \frac{C}{C_w} V_x, J_y = \frac{C}{C_w} V_y$$

ここで $C_w$ は水の体積熱容量、 $C$ は土の体積熱容量( $= \lambda/\kappa$ )である。また、 $J_x$ と $J_y$ から水分フラックス

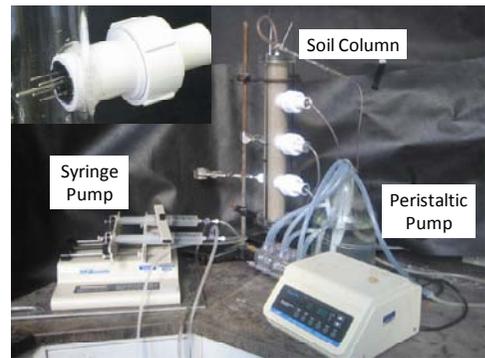


Fig. 1 Experimental setup.

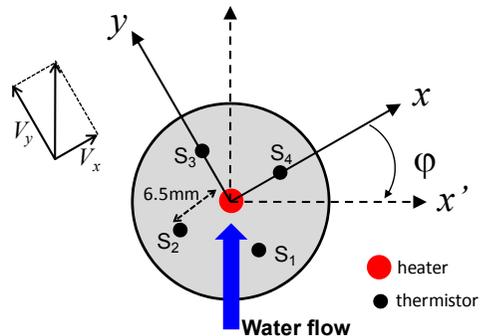


Fig. 2 Schematic illustration of PHPP.

\* 三重大学大学院生物資源学研究所 Graduate school of Bioresources, Mie University

\*\* ユタ州立大学植物・土壌・気象学科 Department of Plans, Soils, and Climate, Utah State University

キーワード: 5線熱パルスセンサー 土中水分フラックス 熱特性

の大きさ $\|\mathbf{J}\|$ と $y$ 軸に対する流れの角度 $\varphi$ が求められる。

$$\|\mathbf{J}\| = \sqrt{J_x^2 + J_y^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{J_x}{J_y}\right)$$

**結果と考察** Fig.3 に流れに対して 30°で挿入した PHPP で推定した $\lambda$ 及び $\kappa$ と水分フラックスの関係を示す。2000  $\text{cm d}^{-1}$ 以下の水分フラックスにおいては、 $\kappa = 7.20 \pm 0.071 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 及び $\lambda = 2.13 \pm 0.025 \text{ J m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ でおよそ一定の値を示した。一方で、2000  $\text{cm d}^{-1}$ 以上では水分フラックスの上昇とともに熱特性値の上昇が見られた。これは熱分散が影響していると考えられる。Fig.4 に PHPP で推定された $J_x$ 及び $J_y$ と、排水速度と PHPP の挿入角度から求めた実水分フラックスの $x$ -、 $y$ -成分の比較を示す。10-7000  $\text{cm d}^{-1}$ の範囲で、PHPP は飽和水分フラックスを精度よく推定できた。推定された $J_x$ と $J_y$ を用いて、水分流れに対する各 PHPP の角度 $\varphi$ を求めた (Fig.5)。 $J_x$ と $J_y$ が精度よく推定できた 10-7000  $\text{cm d}^{-1}$ の範囲では、 $\varphi$ の推定値は実際の水分フラックスの角度をよく再現した。低水分フラックスにおいては、上流側と下流側の温度上昇の差異が小さく、フラックスの正確な推定が困難であった。推定精度の向上のためには、入力熱量を大きくする等の改良が必要だと考えられ

る。今後は、不飽和水分フラックスの測定とフィールドへの適用が課題である。

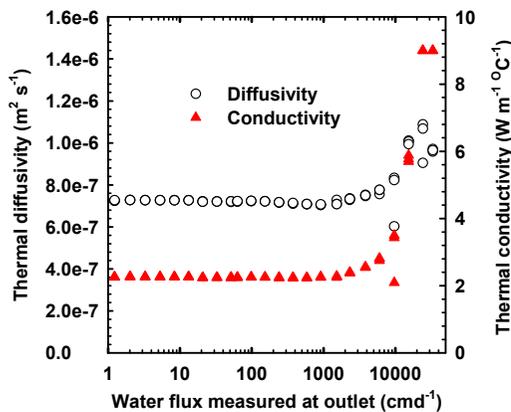


Fig. 3 Thermal diffusivity and thermal conductivity optimized by PHPP as a function of water flux measured at the outlet.

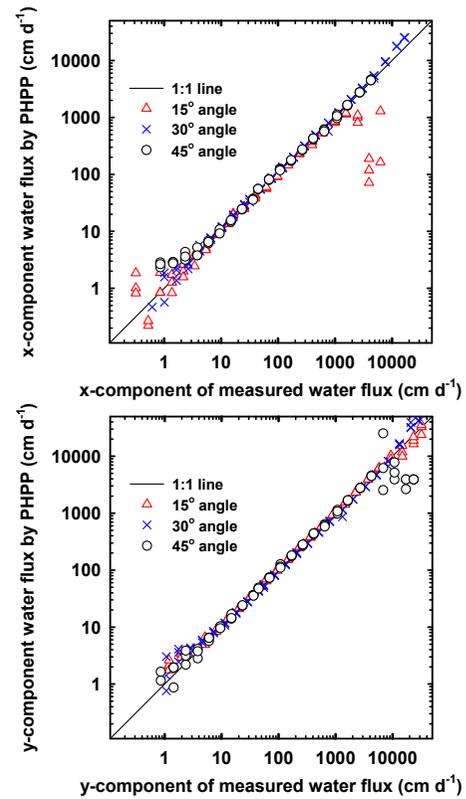


Fig. 4  $x$ - and  $y$ -components of water flux estimated by PHPP.

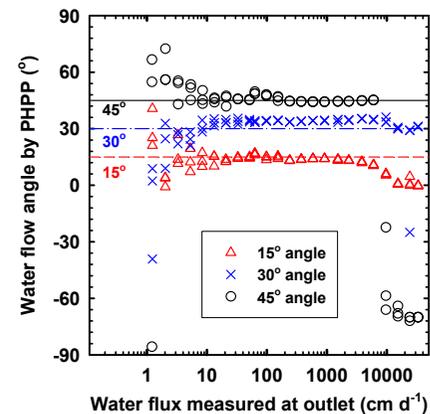


Fig. 5 Water flow angles estimated by PHPP.