

## 熱パルスセンサーを用いた飽和・不飽和水分フラックスの推定

### Application of Heat Pulse Probe for Variably Saturated Water Flux Estimation

坂井 勝<sup>1</sup>・S.B. Jones<sup>2</sup>

<sup>1</sup>三重大学大学院生物資源学研究科・<sup>2</sup>ユタ州立大学

#### 要旨

鳥取砂丘砂と黒ボク土に5線式熱パルスセンサーを適用し、飽和定常流・不飽和重力流実験中の水分フラックスの推定を行なった。飽和流については精度よく推定でき、地下水流速測定への適用が期待される。不飽和流については、水分減少時に生じる気相・液相のバラつきが原因と考えられるズレが見られた。

テーマ：土壌物理研究の最前線 Trend in Soil Physics

キーワード：土中水分フラックス、熱特性、5線熱パルスセンサー、飽和・不飽和流

**Key words:** Soil water flux, thermal property, penta-needle heat pulse probe, saturated/unsaturated flow

#### 1. はじめに

熱パルスセンサーは、土の熱特性の測定のみならず、同時に土中水分フラックスを推定できることから、現場への適用が期待されている<sup>1)</sup>。しかし、飽和流への適用事例はあるが、不飽和流への適用は少ない。そこで本研究では、飽和・不飽和流れにPHPP測定を行ない、水分フラックス推定の適用性について明らかにすることを目的とした。

#### 2. 方法

##### (1) 5線熱パルスセンサー

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: PHPP)は、熱特性と2方向のフラックスを推定できる。熱パルス(約 $160 \text{ Wm}^{-1}$ )を8秒間出力し、上昇温度を1秒間隔で120秒間測定する。得られた測定値に、次の無限長線源を中心とする $x$ - $y$ 平面上の解析解を適合することで、熱拡散係数 $\kappa$ 、熱伝導率 $\lambda$ 、熱フラックスの $x$ 、 $y$ 成分 $V_x$ と $V_y$ を最適化する。

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

熱フラックス  $V$  は次式を用いて、水分フラックスの  $x$ 、 $y$  成分  $J_x$  と  $J_y$ 、フラックスの大きさ  $|J|$  に変換する。

$$J_x = \frac{C}{C_w} V_x, J_y = \frac{C}{C_w} V_y, |J| = \sqrt{J_x^2 + J_y^2}$$

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。

##### (2) 飽和定常流・不飽和重力流実験

試料には鳥取砂丘砂(乾燥密度  $1.62 \text{ gcm}^{-3}$ )と過酸化水素水を用いて団粒を壊した三重の黒ボク土 ( $0.98 \text{ gcm}^{-3}$ ) を用い、内径  $5 \text{ cm}$ 、高さ  $37 \text{ cm}$  のアクリルカラムに充填した。試料中の封入空気を避けるため、砂丘砂については水中充填を行ない、黒ボク土では下端から毛管飽和を行なった。カラム各深さに、流れの向きに対して  $30^\circ$ 、または  $45^\circ$  に回転した PHPP を挿入した(図-1)。試料上端からぜん動式ポンプと降雨装置を用いて一定フラックスでの浸透を行ない、下端からの排水速度を電子天秤で測定した。まず、カラム下端に吸引圧をかけず、比較的速い流速の飽和定常流を作成した。その後、ポンプの流速を下げいき、さらに下端の吸引圧を調整することで、水分量が均一な不飽和重力流を作成した。それぞれの設定流速において PHPP 測定を行なった。また、実験開始前

の飽和で水分静止状態においても 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。

### 3. 結果

図-2 に、鳥取砂丘砂における PHPP の  $J_x$  と  $J_y$  推定値と、排水速度に基づく実水分フラックスの比較を示す。ここで、Run1、2 とは一連のカラム実験の 1 回目、2 回目を意味し、括弧の数字は流れに対する設置角度を意味している。水分飽和時については、全ての実験、PHPP で安定して実水分フラックスを再現した。一方で、水分不飽和時には（プロット白抜き）、正確に実水分フラックスを再現できる場合と、大きく過小評価する場合が現れた。特に、Run2 については、 $J_x$ 、 $J_y$  ともに  $100 \text{ cm day}^{-3}$  以上の過小評価が見られた。図-3 に、団粒を崩した三重黒ボク土における  $J_x$  と  $J_y$  の推定結果を示す。飽和流については、鳥取砂丘砂に比べてバラつきが見られた。一方で不飽和流については、飽和流でバラつきが見られた場合でも、正確に実フラックスを推定できた。

### 4. 考察

鳥取砂丘砂の推定において、飽和流から不飽和流に切り替わるのを境に、大きなズレが見られる場合があった。この理由の一つとして、間隙水が排水される過程で、4つのヒーター・サーミスター間において、気相と液相の配置にバラつきが現れたことが挙げられる。本研究では、ヒーター・サーミスター間距離  $r$  は、センサーと固相との接触や、固相と液相の配置の不均一性を考慮した見かけの距離として、飽和時の水分静止状態で検量している。飽和 ( $\theta = 0.4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) から不飽和（本実験では  $\theta < 0.2 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ）に水分量が低下することで、見かけの距離  $r$  に変化が生じたと考えられる。一方で、本研究で用いた団粒を崩した黒ボク土では、砂丘砂に比べ粒径が小さいため、比較的均一に水分が排水さ

れたため、不飽和流で正確にフラックスが推定できたと考えられる。

### 4. おわりに

PHPP は飽和水分フラックスについては、安定して精度よく推定でき、地下水流速への適用が期待できる。一方で、不飽和流へ適用には、間隙の液相と気相のバラつきが原因とみられるズレが現れた。今後より多くの土への適用性の検証が必要である。

参考文献：Yang, C., M. Sakai, S.B. Jones, Water Resour. Res. 2013.

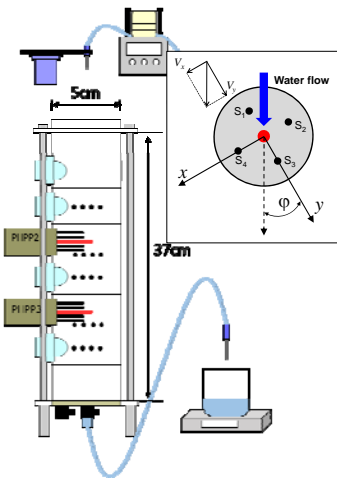


図-1 PHPP と実験装置の概略図

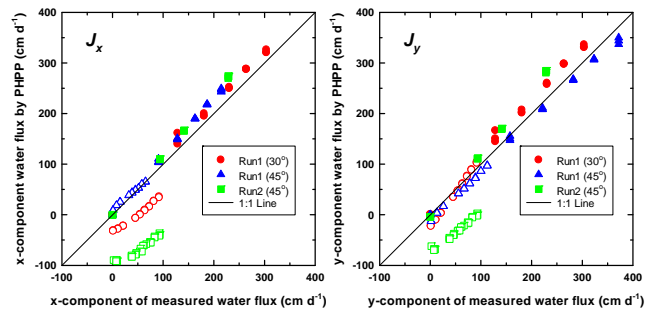


図-2 鳥取砂丘砂の水分フラックス推定値

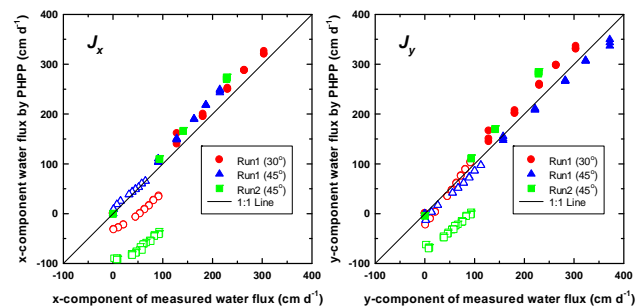


図-3 三重黒ボク土の水分フラックス推定値