

5 線熱パルスセンサーを用いた砂中の水分フラックスの推定 Estimation of Water Flux in Variably Saturated Soil with a Penta-needle Heat Pulse Probe

○坂井 勝* 加藤薫** Scott B. Jones***
Masaru Sakai Kaoru Kato Scott B. Jones

はじめに 近年、ヒーターから放出された熱を上・下流に位置する温度センサーで感知し、水分フラックスや熱特性を推定する熱パルスセンサーが注目されている。特に、1本のヒーター線と4本の温度センサーから成る5線熱パルスセンサー(Penta-needle Heat Pulse Probe: 以下PHPP, Fig. 1)は、直交する2方向のフラックスを推定できるため有用性が高い。しかし、飽和土中水分フラックスへの適用例は報告されている一方で、不飽和土に対する検討に課題が残されている。そこで本研究では、室内カラム実験で不飽和定常流を作成し、PHPPを用いて水分フラックスの推定を行なった。

試料と方法 Fig. 1に実験装置の概要を示す。PHPPを2本挿入した全長45 cm、内径5 cmのアクリル鉛直カラムに、鳥取砂丘砂を乾燥密度1.62 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30°と45°の角度で挿入した。カラム上端から定量ポンプと降雨装置を使用して給水し、下端の吸引圧を調節することで、飽和・不飽和定常流を作成した。水分フラックスは飽和流(430-180 cm d⁻¹)から不飽和流(130-1.9 cm d⁻¹)へ徐々に小さくし、カラム下端からの排水速度を電子天秤で測定することで、実水分フラックスとした。この時、テンシオメータ(土中水圧力)と四極センサー(土中水分量)を用いて水分分布が一定であることを確認した。PHPP測定では、熱パルス(約165 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 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、 λ は熱伝導率、 κ 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、 λ , κ , 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の大きさ $\|J\|$ とy軸に対する流れの角度 ϕ が求められる。

$$\|J\| = \sqrt{J_x^2 + J_y^2} \quad \phi = \tan^{-1}(J_x/J_y)$$

結果と考察 Fig. 2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。また、Fig. 3に J_x と J_y から求めた水分フラックスの大きさ $\|J\|$ と流れの角度 ϕ を示す。飽和状態の時、挿入角度30°では J_x は相対誤差20%以内、 J_y は±5%以内に収まった。また、挿入角度45°では J_x と J_y の差がほとんどなく、いずれも相対誤差25%以内に収まった。どちらの挿入角度でも、

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

** 名古屋市 Nagoya City

*** 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 不飽和水分フラックス 熱特性

PHPP は精度よく 2 方向のフラックスを推定でき、その結果、フラックスの大きさと方向を精度よく推定できた。不飽和状態の時、挿入角度 30° では J_x の推定値は 15 cm d^{-1} 程度一定に過大評価し、 J_y の推定値は 10 cm d^{-1} 程度一定に過小評価した。この時、 $\|\mathbf{J}\|$ の相対誤差は 30 cm d^{-1} 以上のフラックスで $\pm 10\%$ 以内に収まり、精度よく推定された。一方、 30 cm d^{-1} 以下のフラックスでも J_x と J_y の推定値は一定のずれを示したため、誤差は相対的に大きくなった。これにより、流れの角度の推定値は大きな誤差を示した。挿入角度 45° では、 J_y は精度よく推定できたが、 J_x は実フラックスの変化をとらえるものの、常に 55 cm d^{-1} の過小評価を示した。この要因として、飽和(含水率 $\theta = 0.38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)から不飽和($\theta = 0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)に変化することで、センサーと土粒子の接触が変化することや、固相・液相・気相の不均一性が変化すること、

測定部位の不飽和流の不均一性が挙げられる。不飽和状態での測定では、このような潜在的な誤差要因があることが示唆され、PHPP を不飽和流に適用する上での今後の課題である。

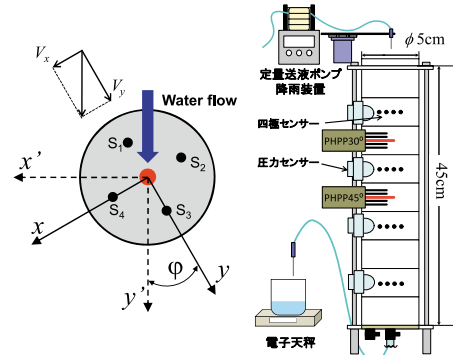


Fig. 1 Schematic illustration of PHPP and experimental setup for steady-state unsaturated flow experiment.

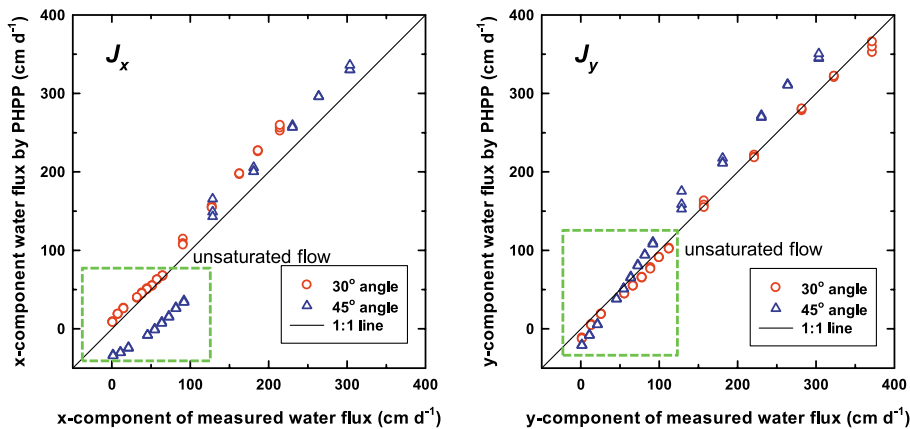


Fig. 2 x- and y-components of water flux estimated by PHPP.

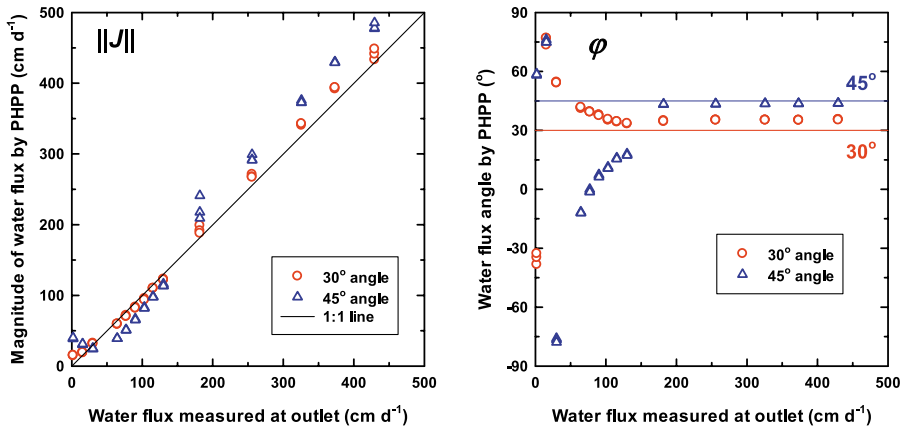


Fig. 3 Magnitude of water flux and flow angle estimated by PHPP.