

熱パルスセンサーによる土壌水流动の直接測定

森 也寸志, 石井将幸

Direct Measurement of Soil Water Flux by Multi Functional Heat Pulse Probe

Yasushi Mori and Masayuki Ishii

はじめに

土壌フラックスの計測には一般に2点のポテンシャル測定と透水係数データが必要となるが、埋設の労力と、何より空間変動性の高い透水係数データの不確実性のために十分な精度が得られない。土壌水フラックスを1点で測定できる技術があれば非常に利点が大きく、このために多機能熱パルスセンサーを開発した。

理論

熱容量・熱拡散測定, 土壌水分の推定

無限長線源から時間 t_0 の間に放出される熱パルスを距離 r の所で測定する時の解析解は、

$$\Delta T(r, t) = \frac{q'}{4\pi C_h x_h} \left[Ei\left(\frac{-r^2}{4x_h(t-t_0)}\right) - Ei\left(\frac{-r^2}{4x_h t}\right) \right]$$

である。ここで T : 温度上昇, t : 時間, t_0 : パルス時間, r : ヒータからの距離, $-Ei(x)$: 指数積分, x : 熱拡散係数, C : 体積熱容量。添え字 h は流れに対して垂直方向の特性値を示す。以下の目的関数によって熱容量と熱拡散係数を最適化同定した。

$$OF_I(b) = \sum_{i=1}^{N_h} [\Delta T_{h,m}(t_i) - \Delta T_{h,0}(t_i, b)]^2$$

土壌水分は、体積熱容量が土壌構成成分の熱容量の和で表されることから推定する。つまり、

$$C = \rho_b c_s + C_w \theta$$

ρ : 物質の密度, c : 比熱, θ : 体積含水率, b, s, w はバルク土壌, 土壌, 水を表す。

熱フラックスの推定

ヒータの上・下流に位置するサーミスターは移流の影響を受けて応答が変わるため、これより土壌水フラックスが推定できる。ヒータの上下流での熱応答の解析解は、

$$T_d = \frac{q'}{4\pi C x} \left[\int_{t_w-t_0}^{t_w} s^{-1} \exp\left\{-\frac{(x_d - V_s)^2}{4xs}\right\} ds \right]$$

$$T_u = \frac{q'}{4\pi C x} \left[\int_{t_w-t_0}^{t_w} s^{-1} \exp\left\{-\frac{(x_u - V_s)^2}{4xs}\right\} ds \right]$$

ここに添え字 d, u はヒータに対して上流, 下流側の意、

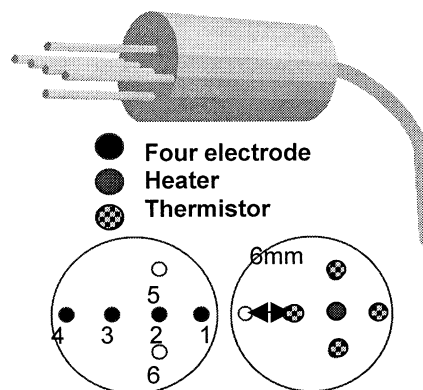


Fig 1 Multi-Functional Heat Pulse Probe

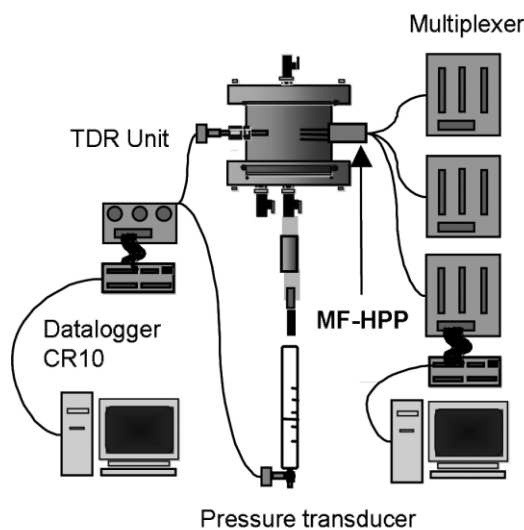


Fig 2 Experimental setup

V は熱フラックス。以下の目的関数によって最適化同定を行い、熱フラックスを推定した。

$$OF_{II}(b) = \sum_{i=1}^{N_e} [\Delta T_{d,m}(t_i) - \Delta T_{d,0}(t_i, b)]^2 + \sum_{i=1}^{N_e} [\Delta T_{u,m}(t_i) - \Delta T_{u,0}(t_i, b)]^2$$

また、熱フラックス V は以下の式に従って水フラックスに変換した。

$$J = \frac{\rho_s c_s + \rho_w c_w \theta}{\rho_w c_w} V$$

なお、略号は前述のものに準ずる。

実験の方法

Fig. 1 に示すデザインのセンサーを自作し、4つの温度センサーについて、体積熱容量が既知である飽和土壌を使ってヒータ・温度センサ間有効距離 r_{eff} を求めた。

フィルターの目詰まりを防ぐため洗浄した鳥取砂丘砂を Fig 2 に示すカラムに乾燥密度 1.63Mgm^{-3} で充填し、5層に分けて水締めをして、完全飽和した。20 の恒温室で飽和透水試験とマルチステップ流出法試験を行い、同時に熱パルスを与えながらフラックスの推定を行った。なお、鳥取砂丘砂の比熱は Differential Scanning Calorimetry によって計測し、 $0.795 \text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$ @20 とした。

結果と考察

Fig 3 より土壌水分の推定はフラックスの存在下でも可能で非常に精度が良かった。Fig 4 より、極端に速いフラックスでなければ土壌水分、熱拡散係数は精度良く推定できた。これらの値を基礎方程式に代入して土壌水フラックスを推定したところ Fig 5 のとおりであり、飽和流については広い範囲において精度良く推定可能であることがわかった。また水平方向のサーミスタが機能しなくても鉛直方向のサーミスタでフラックスと熱拡散係数を変数にすることでフラックスを精度良く求められている (Fig 6 の水平と鉛直の比較)。一方、不飽和流では高水分領域では問題ないものの、低水分になるほど一定の傾向を持って予想されるフラックスから外れていった。解決すべき問題であるが、いずれにしるプローブサイズの中で必要とされるすべての値を計測し、フラックスを推定することができた。

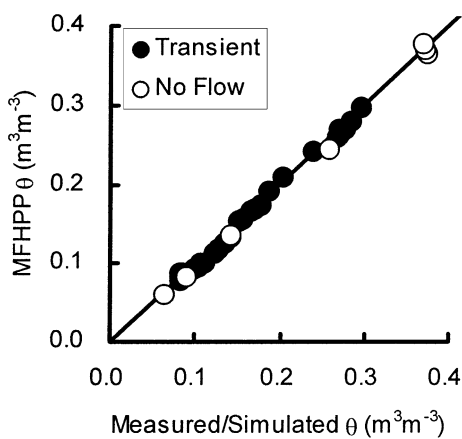


Fig 3 Water content measurement under convective water flow and equilibrium points.

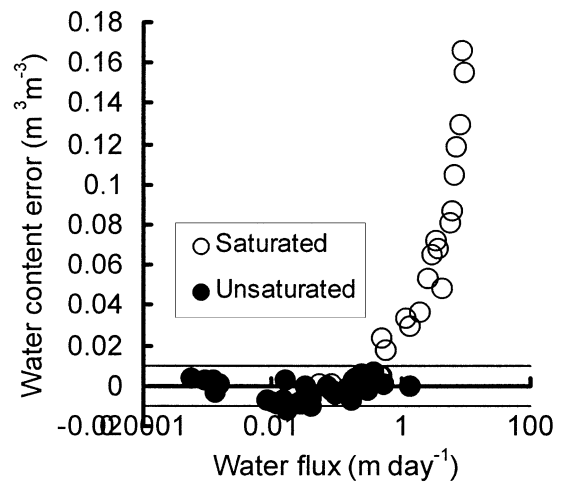


Fig 4 Accuracy of water content estimation in terms of flow velocity

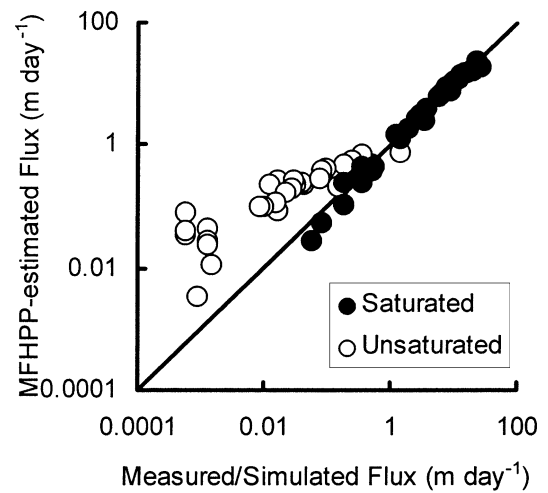


Fig 5 Flux estimation by MFHPP.

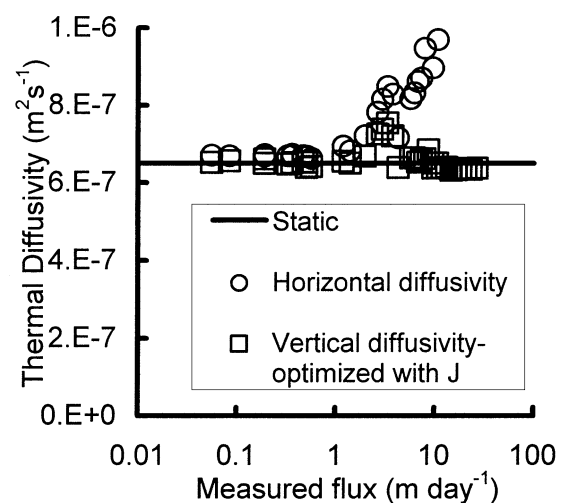


Fig 6 Optimized thermal diffusivity for both horizontal and vertical thermisors.