

五極子熱パルス法を用いた砂質土壌における間隙流速ベクトルの同定  
 Identification of Pore Water Velocity Vector in Sand by Using Quintuple-Probe Heat-Pulse Technique

遠藤 明\* 原 道宏\*\*  
 Akira Endo and Michihiro Hara

1. はじめに 近年，農薬や化学肥料の過剰投入による土壌汚染や地下水汚染が顕著に確認されてきている．汚染物質を含んだ流体を検知するためには，はじめに，水自身の輸送量やその方向を把握する必要がある．最近，Ren et al.(2000)は，砂，砂質壤土および粘土ロームの土性において，熱パルス法を適用して鉛直方向一次元の間隙流速を測定した．彼らは，定常流が発生しているカラム土において，熱源ロッドから上流側に 6mm，下流側に 6mm の位置の温度変化と経過時間の関係を測定し，一般解に対して数値積分を行って最大無次元温度差を計算し，この値と間隙流速とを比較することにより土壌中の間隙流速を推定した．筆者らは Hara(未発表)の理論式を適用し，水分飽和した砂の間隙流速ベクトルを同定し，熱パルス発生時間とカラム内を流れる水フラックス密度の大小が，間隙流速ベクトル同定に与える影響を評価したのでここに報告する．

2. 材料および方法

**実験装置の概要と実験材料** Fig.1 に製作した五極子熱パルス(Quintuple-Probe Heat-Pulse)センサー(以下，QPHP センサーと呼ぶ)の形状図を示す．プローブは，中央の熱源ロッド( $\{x, y\}=\{0,0\}$ の原点)から上下左右に間隔  $r$  1cm に固定した 4 本のステンレス製皮下注射針(長さ  $L$  5cm，ロッド外径  $d$  1.25mm)と，これらを取り付けるエポキシ樹脂製ハンドル部分から構成される．熱源ロッドを取り巻く 4 本のロッドの中に E 型熱電対(直径 0.1mm)を，中央のロッドにはコンスタンタン線をそれぞれ埋設した．熱電対はロッドの中央部( $z=L/2$ )に埋設し，針内部の空洞をエポキシ樹脂系接着剤で充填させた．ロッドからの発熱量を制御し，1 秒間隔で温度を測定するために，データロガー(CR10X, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA)を使用した．試料は，いもの砂(日瓢珪砂 8 号)を使用した．

**理論** Melville et al.(1985)によると，熱源線伝播

速度  $u(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ と間隙流速  $V_w(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ との関係は次式で表される．

$$u = qV_w \frac{(cr)_w}{cr} = J_w \frac{(cr)_w}{cr} \quad [1]$$

ここに， $q$ : 体積含水率( $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ )， $(cr)_w$ : 間隙水の体積熱容量， $cr$ : 土壌の体積熱容量( $\text{J}\cdot\text{m}^3\cdot\text{K}^{-1}$ )， $J_w$ : 水流束密度( $\text{m}^3\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )である． $x-y$  平面上の各熱電対ロッド位置に  $x$  軸となす角度  $f(\text{rad})$  で  $u$  が作用した条件において，原点に瞬間熱源  $q(\text{J}\cdot\text{m}^{-1})$  が存在する場合， $(x, y)$  の温度変化  $DT(\text{K})$  は次式で表現される．

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi cr k} \cdot \exp\left[-\frac{(x-ut \cos f)^2 + (y-ut \sin f)^2}{4kt}\right] \quad [2]$$

ここに， $k$ : 温度拡散係数( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )， $t$ : 時間(s)である．また，各ロッドの座標は次式で与えられる．

$$\left. \begin{aligned} TC1(x, y) &= (r(1+e_1), 0) \\ TC2(x, y) &= (0, r(1+e_2)) \\ TC3(x, y) &= (-r(1+e_3), 0) \\ TC4(x, y) &= (0, -r(1+e_4)) \end{aligned} \right\} \quad [3]$$

ただし，
$$r = \frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{4} \quad [4]$$

$$e_1 + e_2 + e_3 + e_4 = 0 \quad [5]$$

ここに， $r$ : 熱源ロッドと各 TC ロッドとの平均距離(m)， $r_n(n=1,2,3,4)$ : 熱源ロッドと  $n$  本目の TC ロッドとの距離(m)， $e_n(n=1,2,3,4)$ :  $r_n$  の  $r$  に対する誤差(%)である．理論式は[3]を[2]に代入し，各位置の温度変化の差や和を表現したものであるが，要旨余白の関係上，記述を省略する．

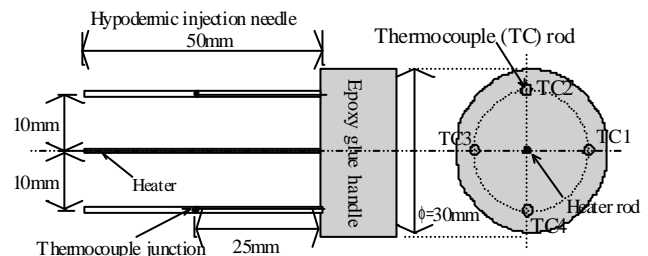


Fig.1 Schematic view of the QPHP sensor.

\*岩手大学大学院連合農学研究科 The United Graduate School of Agricultural Science, Iwate University, \*\*岩手大学農学部 Faculty of Agriculture, Iwate University 五極子熱パルスセンサー，間隙流速ベクトル，温度拡散係数，体積熱容量

**実験方法** 直径 6.3cm, 長さ 34cm のアクリル製透明カラムのセンサー挿入孔 (直径 3.3cm) に QPHP センサーを挿入した後, カラムの中にいもを乾燥密度  $1.5\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  で充填し, カラム底面より水道水を供給し, 毛管上昇飽和でカラム内試料を水分飽和した. その後, 熱源ロッドから熱パルスを生じさせ, TC1, TC2 の温度変化の経時変化と, 向かい合う熱電対ロッド位置の温度の差, すなわち, TC1 と TC3 の温度差の経時変化と TC2 と TC4 温度差の経時変化を 7 分間測定した. 最後に, カラムを分解してセンサー挿入部付近の砂の含水比を測定した. Table1 に, カラム内を流れる 5 種類の水束強度  $q_w(\text{g}\cdot\text{min}^{-1})$  と 5 種類の熱パルス発生時間  $t_0(\text{s})$  を示す.

### 3. 実験結果および考察

Fig.2(A) に,  $f=0(\text{rad})$  における間隙流速(PWV)の実測値と同定値の関係を示す. 低流速条件下における Case-3( $t_0=20\text{s}$ )の一部を除き,  $\pm 20\%$  の誤差範囲で実測値と同定値が一致した. また, 比較的大きな流速の条件下 ( $\text{PWV}>4.0\times 10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) における Case-4( $t_0=25\text{s}$ )を除いては  $\pm 10\%$  の誤差範囲内で実測値と同定値が一致した. 同図(B)に, 間隙流速が  $x$  軸となす角度  $f$  の間隙流速依存性を示す. 間隙流速が増加するに伴い,  $f$  が実測値の  $0(\text{rad})$  に漸近する傾向にあった. また, 熱パルス発生時間が短いほど, すなわち瞬間熱源が存在する場合の熱的条件に近いほど,  $f$  が正確に同定されやすい傾向にあった. 低流速条件下においては, 間隙流速の絶対量を把握することが可能であったとしても, その作用する方向は正確には定まらない. いも砂において,  $f$  を  $\pm 5(\text{deg})$  以下の誤差に収束させるためには, およそ

Table1 Water flux  $q_w$  and for five cases of heat pulse duration  $t_0$  under  $\phi=0(\text{rad})$ . †Heat pulse duration for Case-1, 2, 3, 4 and 5 are  $t_0=10\text{s}, 15\text{s}, 20\text{s}, 25\text{s}$  and  $30\text{s}$ , respectively.

| Flux level | Water flux $q_w (\text{g}\cdot\text{min}^{-1})$ |         |         |         |         |
|------------|---|---------|---------|---------|---------|
|            | †Case-1   | †Case-2 | †Case-3 | †Case-4 | †Case-5 |
| LV-1       | 1.07  | 1.04    | 0.98    | 1.00    | 1.00    |
| LV-2       | 1.99  | 2.04    | 2.05    | 2.05    | 2.07    |
| LV-3       | 3.01  | 3.25    | 2.94    | 3.08    | 3.17    |
| LV-4       | 3.90  | 3.92    | 4.06    | 4.00    | 3.98    |
| LV-5       | 4.71  | 4.94    |         | 4.78    | 5.04    |

$5.0\times 10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上の間隙流速が要求される.

同図(C)に, 温度拡散係数  $k$  と体積熱容量  $cr$  との積で表した熱伝導率  $I$  の間隙流速依存性を示す. なお, 流れが存在しない条件( $\text{PVW}=0$ )における  $I$  の測定結果は, 双極熱パルス(dual-probe heat-pulse)法 (以下, DPHP 法と呼ぶ) を適用したものであり, 流速発生状態( $\text{PVW}>0$ )における  $I$  の値は理論式から得た. 理論式から得た  $I$  は, DPHP 法を適用して得た測定値の  $\pm 10\%$  以内の範囲にあった. また, 理論式から得られた  $k$  と  $cr$  は, DPHP 法を適用して得た測定値の  $\pm 8\%$  の範囲にあった.

### 4. おわりに

本報は, Hara(未発表)の理論式を適用し, 水分飽和と砂層中の間隙流速ベクトルと土壌の熱的性質を同時に同定し, 熱パルス発生時間と水束密度の大小が間隙流速同定結果に及ぼす影響を検討した. 以後は, 様々な土性の土壌を適用して, 間隙流速ベクトルを同定する必要がある.

#### 【引用文献】

- Melville, J.G., F.J. Molz, and O. Given. 1985. Laboratory investigation and analysis of a ground-water flowmeter. *Ground Water* 23:486-495.
- Ren, T., G.J. Kluitenberg, and R. Horton. 2000. Determining soil water flux and pore water velocity by a heat pulse technique. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:552-560.

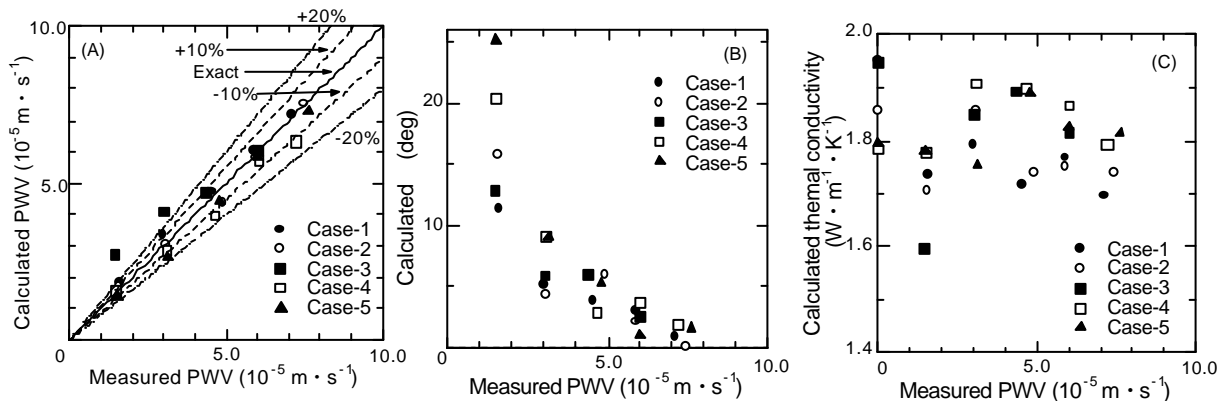


Fig.2 Relationship between measured PWV vector and identified PWV vector(A and B) under  $\phi=0\text{rad}$  and five cases of  $t_0$  were considered. Relationship between measured thermal conductivity and identified thermal conductivity(C). Thermal conductivity was measured by using DPHP technique. —, - - and - · - shows exact (1:1 line), 10% error from exact and 20% error from exact, respectively.