

# 砂柱の3次元間隙流速ベクトルと熱物性の同時計測

Simultaneous measurement of three-dimensional pore water velocity vector and thermal properties in the sand column

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

## 1. はじめに

化学肥料や農薬使用による土壌と地下水の汚染が世界中で深刻な問題になっている。土壌中の汚染流体の速度ベクトルを知るためには、まず、水移動ベクトルの情報を取得する必要がある。最近になって、遠藤(2003)は Hara(未発表)の理論を用い、五極子熱線パルス(Quintuple-Probe Heat-Pulse, QPHP)センサーを用いて水分飽和状態の砂質土の2次元水流場における流体移動速度ベクトルと熱物性の同時計測を行った。しかし、実際の現場は三次元であるため、今回、三次元速度ベクトルと熱物性の同時計測に関する検討を行ったのでここに報告する。

## 2. 材料および方法

### (1) 実験装置および実験材料の概要

Fig. 1 に試作した3次元流速ベクトル・熱物性計測用のQPHPセンサーの概略図を示す。本センサーは、原点( $\{x,y,z\}=\{0,0,0\}$ )配置した球熱源(半径  $a=2.9\text{mm}$ )の周囲に、原点から  $x, y, z$  軸方向に約  $1\text{cm}$  の間隔で直径  $0.1\text{mm}$  E型熱電対(TC4L, TC2U, TC2L, TC4U, TC1, TC3)を計6個配置した構造のものである。なお、各熱電対はRod 1~Rod 4のステンレス製皮下注射針(外径  $1.25\text{mm}$ )内部に埋設し、エポキシ樹脂系接着剤を用い針空洞を充填した。また、球熱源からの発熱制御および熱電対位置における温度を計測するため、CR23X(Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA)を用いた。試料は、炉乾~水分飽和までの任意の含水比で調整した鑄物砂(日瓢珪砂8号)を用いた。

### (2) 実験方法

#### i) 発熱強度および熱源 熱電対位置の較正

寒天溶液( $2\text{g Agar}\cdot\text{L}^{-1}$  Water)中にQPHPセンサーを挿入し、熱源から $t_0=20\text{s}$ の矩形熱パルスを印加し、各熱電対位置における温度変化の経時変化 $\Delta T(t)$ を計測した。次に、既知である寒天溶液の温度拡散係数と体積熱容量の値をもとに、瞬間点熱源を印加した時における温度上昇の経時変化を表す(1)式(Carslaw and Jaeger, 1959)に $\Delta T(t)$ データを曲線適合し、曲線パラメータであ

る発熱強度 $Q(\text{W})$ および熱源 - 熱電対間距離 $r(\text{m})$ をカーブフィッティングにより求め、これらの値を較正值とした。次に、寒天溶液の既知の熱物性、較正值 $Q, r$ を用い、カーブフィッティングにより各熱電対座標 $\{x,y,z\}$ を求めた。

$$\Delta T(t) = \frac{Q}{4\pi \rho c \kappa r} \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{\sqrt{4\kappa t}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{\sqrt{4\kappa(t-t_0)}}\right) \right] \quad (1)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2)$$

ここに、 $\Delta T$ : 温度上昇(K),  $t$ : 経過時間(s),  $Q$ : 発熱強度(W),  $r$ : 熱源からの距離(m),  $\rho c$ : 体積熱容量( $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  $\kappa$ : 温度拡散係数( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $t_0$ : 矩形熱パルス発生期間( $\approx 20\text{s}$ ),  $\operatorname{erfc}(x)$ : 補誤差関数である。

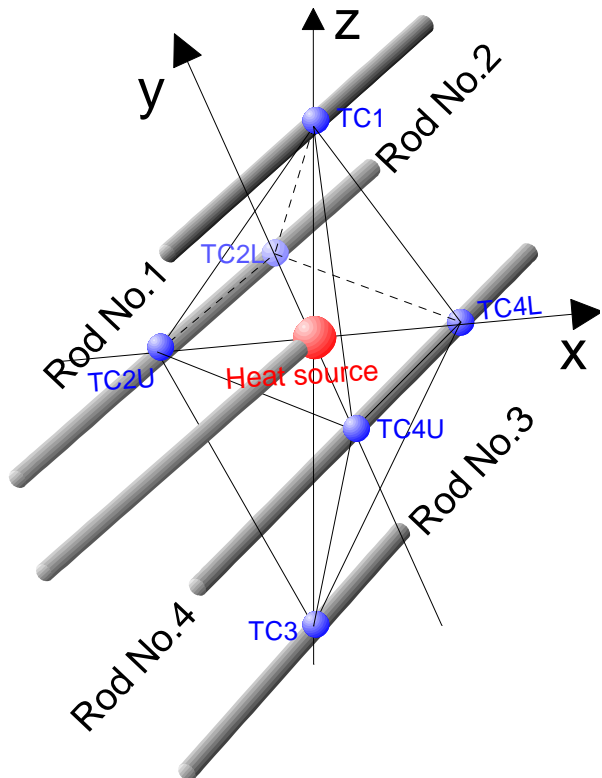


Fig. 1 Schematic view of the QPHP sensor. Six thermocouples (TC4L ~ TC3) is equidistance from the heat source. Thermocouple junction is fixed into the rod (Rod No.1 ~ Rod No.4) indicated by small sphere.

ii) 流れの無い状態における鑄物砂の熱物性計測

炉乾～水分飽和状態の任意の含水比に調整した鑄物砂を、乾燥密度  $1.5\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  になるよう 100ml ステンレス製円筒カラムに充填した。次に、QPHP センサーを円筒カラムに挿入し、寒天溶液を用いた時と同様の方法により、各体積含水率の鑄物砂の  $\Delta T(t)$  を計測した。その後、QPHP 理論を用いて同定した熱物性と、(1) 式に示した瞬間点熱源理論を用いて同定した熱物性を比較した。

iii) 流れの場合における鑄物砂の間隙流速ベクトル熱物性の同時計測

内径 15cm、高さ 50cm のアクリル製円筒カラムの側面に QPHP センサーを挿入した後、乾燥密度が  $1.5\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$  になるよう鑄物砂を充填し、蒸留水を毛管上昇浸潤することにより砂柱を水分飽和状態に調整した。次に、水流が無い状態および定常水流状態において、熱源から  $t_0=20\text{s}$  の矩形熱パルスを印加し、温度上昇  $\Delta T$  と電位差  $\Delta E$  を 300s 間測定した。温度上昇  $\Delta T$  は TC4L, TC2L および TC3 において、それぞれ  $\Delta T_{4L}$ ,  $\Delta T_{2L}$  および  $\Delta T_3$  として測定した。また、熱電対位置 TC4L, TC2U 間の電位差  $\Delta E_{4L-2U}$ , TC2L, TC4U 間の電位差  $\Delta E_{2L-4U}$  および TC1, TC3 間の電位差  $\Delta E_{1-3}$  を測定した。 $\Delta E$  を  $\Delta T$  に変換するため、 $\Delta E$  を E 型熱電対の熱電能  $S=0.0605\text{mV}\cdot\text{K}^{-1}$  (佐々木, 1977) で除し、 $\Delta T_{4L-2U}$ ,  $\Delta T_{2L-4U}$  および  $\Delta T_{1-3}$  をそれぞれ  $\Delta E_{4L-2U}/S$ ,  $\Delta E_{2L-4U}/S$  および  $\Delta E_{1-3}/S$  として求めた。これにより、差温が  $\Delta T_{4L}(t)-\Delta T_{2U}(t)=\Delta T_{4L-2U}$ ,  $\Delta T_{2L}(t)-\Delta T_{4U}(t)=\Delta T_{2L-4U}$  および  $\Delta T_1(t)-\Delta T_3(t)=\Delta T_{1-3}$  と、直接精度良く求められる。和温の経時変化は次式から求めた。

$$\Delta T_{4L}(t) + \Delta T_{2U}(t) = 2 \Delta T_{4L}(t) - \Delta T_{4L-2U}(t) \quad (3)$$

$$\Delta T_{2L}(t) + \Delta T_{4U}(t) = 2 \Delta T_{2L}(t) - \Delta T_{2L-4U}(t) \quad (4)$$

$$\Delta T_1(t) + \Delta T_3(t) = 2 \Delta T_1(t) - \Delta T_{1-3}(t) \quad (5)$$

次に、差温および和温の経時変化の比を算出し、Hara (未発表) の QPHP 理論により 3 次元流体移動速度ベクトルおよび熱物性を同定した。

3. 実験結果および考察

Fig. 2(A) ~ (C) に瞬間点熱源理論を用いて同定した熱物性と QPHP 理論を用いて同定した、水流無しの場合における体積含水率毎の鑄物砂熱物性の比較図を示す。体積熱容量  $\rho c$  は  $\pm 20\%$ 、温度拡散係数  $\kappa$  は  $\pm 10\%$  の誤差範囲で、瞬間熱源理論による熱物性と QPHP 法による熱物性とが合致した。なお、熱伝導率  $\lambda$  は  $\rho c$  と  $\kappa$  の積により求めた。QPHP 理論による熱伝導率  $\lambda$  は、瞬間熱源理論による  $\lambda$  の  $\pm 15\%$  以内の誤差範囲で一致した。アクリル円筒カラムを用いた、定常水流状態および、水流が無い状態における間隙流速ベクトルおよび熱物性の計測結果については後日報告する。

4. おわりに

本報では、QPHP 法を用いた 3 次元間隙流速ベクトルおよび熱物性の同時計測を行い、流速の大小が間隙流速ベクトルと熱物性の同定結果に及ぼす影響を報告した。今後は、代表的な土性や不飽和流への適用性について検討する必要があると考えられる。

【引用文献】

Carlsaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1959. Conduction of heat in solids, 2nd ed. Oxford Univ. Press, London, p.261  
 Hara, M., NYP. Theory of heat tracer type fluid-flux probes for multi dimensional flow fields in porous materials  
 遠藤明, 原道宏, 2003. 五極子熱線パルス法を用いた 2 次元流れの場合における砂質土壌の熱前線伝播速度ベクトルおよび熱特性の同時計測法およびその応用, 計測自動制御学会産業論文集 Vol.2 No.12, 88-95  
 佐々木正治, 1977. 実用温度測定, (財)省エネルギーセンター, 97

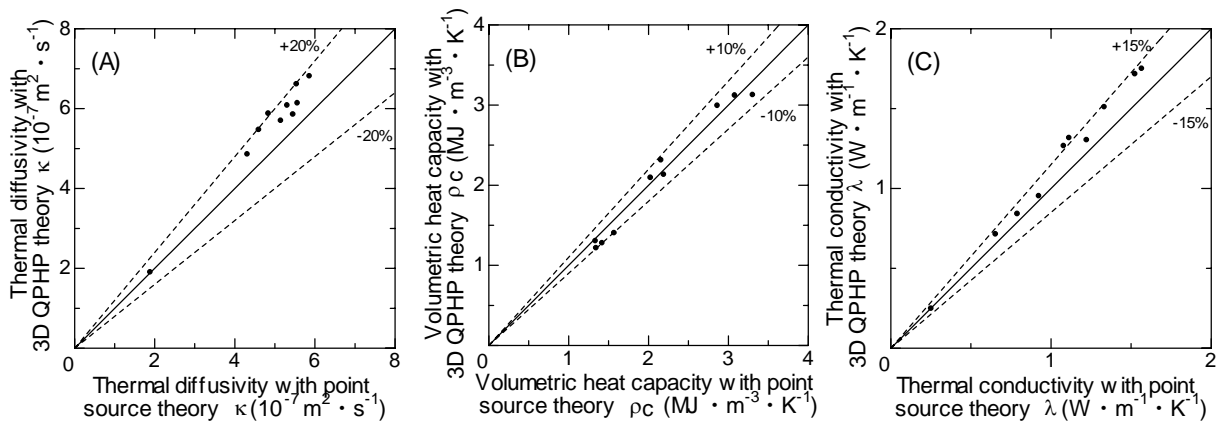


Fig. 2 Comparison of thermal properties identified by an instantaneous point heat source theory and the QPHP theory. (A), (B) and (C) are thermal diffusivity, volumetric heat capacity and thermal conductivity of moisture controlled Imono sand, respectively. The solid and broken lines are exacted (1:1 line) and error % from 1:1 line, respectively.