

土壌中の3次元水フラックス密度ベクトルと熱物性の同時計測

Simultaneous measurement of three-dimensional water flux density vector and thermal properties in the various soils

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。今回、3種類の土性を用い、3次元流体移動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. 実験材料および方法

実験装置の概要 水流ベクトル・熱物性同時計測には五極子熱パルス(Quintuple-Probe Heat-Pulse)センサー(以下、QPHP センサーと呼ぶ)を用いた。これは中央の熱源ロッド($\{x, z\}=\{y, z\}=\{0,0\}$ 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した。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(CR23X, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA)を用いた。

理論 Melville et al.(1985)によると、熱前線伝播速度 u ($m\ s^{-1}$)と水フラックス密度 J_w ($m^3\ m^{-2}\ s^{-1}$)との関係は次式で表される。

$$u = J_w \frac{(c\rho)_w}{c\rho} \quad [1]$$

ここに、 $(c\rho)_w$: 間隙水の体積熱容量, $c\rho$: 土壌の体積熱容量($J\ m^{-3}\ K^{-1}$)である。 x - z および y - z 平面上のセンサー面において、 u がそれぞれ x 軸となす角度 ϕ (deg), y 軸となす角度 ζ (deg)にある条件において、原点に瞬間熱源 q ($J\ m^{-1}$)が存在する場合、温度上昇 $\Delta T_{(x,z)}$ (K) および $\Delta T_{(y,z)}$ (K)はそれぞれ次式で表現される。

$$\Delta T_{(x,z)} = \frac{q}{4\pi c\rho k t} \cdot \exp\left[-\frac{(x-ut\cos\phi)^2 + (z-ut\sin\phi)^2}{4\kappa t}\right] \quad [2]$$

$$\Delta T_{(y,z)} = \frac{q}{4\pi c\rho k t} \cdot \exp\left[-\frac{(y-ut\cos\zeta)^2 + (z-ut\sin\zeta)^2}{4\kappa t}\right] \quad [3]$$

ここに、 κ : 温度拡散係数($m^2\ s^{-1}$), 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。

$$\left. \begin{aligned} TC1(x,z) &= (r(1+\varepsilon_1), 0) \\ TC2(x,z) &= (0, r(1+\varepsilon_2)) \\ TC3(x,z) &= (-r(1+\varepsilon_3), 0) \\ TC4(x,z) &= (0, -r(1+\varepsilon_4)) \end{aligned} \right\} [4] \quad \left. \begin{aligned} TC1(y,z) &= (r(1+\varepsilon_1), 0) \\ TC2(y,z) &= (0, r(1+\varepsilon_2)) \\ TC3(y,z) &= (-r(1+\varepsilon_3), 0) \\ TC4(y,z) &= (0, -r(1+\varepsilon_4)) \end{aligned} \right\} [5]$$

$$\text{ただし, } r = \frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{4} \quad [6]$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 = 0 \quad [7]$$

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), ε_n ($n=1,2,3,4$): r_n の r に対する誤差(%)である。理論式は[4]を[2]に代入し、各位置の温度上昇の経時変化の差および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。

実験方法 直径10cm, 長さ21cmの亚克力製透明カラムの3次元直交座標系において、Fig. 1に示すような x - z 平面(上流側)および y - z 平面(下流側)に開けたセンサー挿入孔(直径3.3cm)に QPHP センサーをそれぞれ1本ずつ挿入し、その後カラムの中に土壌試料を充填したのち試料を毛管上昇浸潤により水分飽和した。なお、試料には2mm篩通過分の炉乾状態における砂土($K_s=7.24 \times 10^{-4}\ cm\ s^{-1}$), 砂質埴壤土($K_s=1.45 \times 10^{-4}\ cm\ s^{-1}$), 埴壤土($K_s=6.33 \times 10^{-5}\ cm\ s^{-1}$)の3種類を用い、それぞれ $1.5(Mg\ m^3)$, $1.0(Mg\ m^3)$, $0.9(Mg\ m^3)$ の密度で充填した。

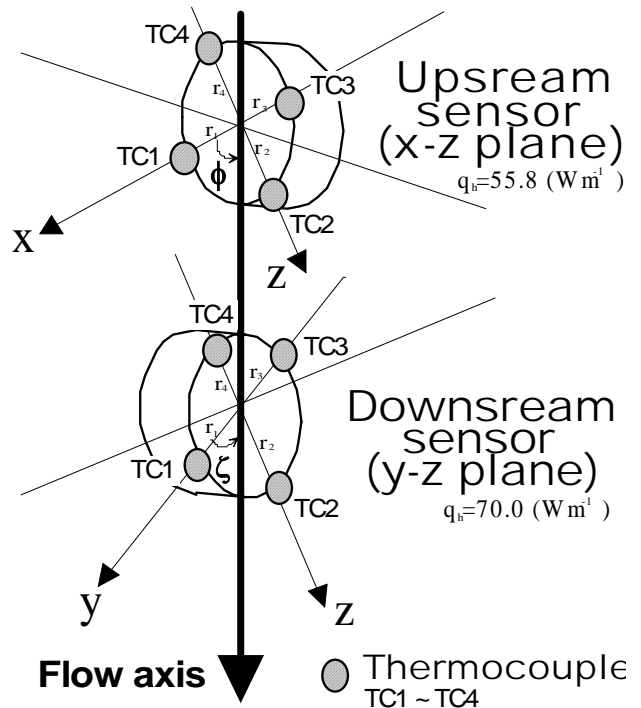


Fig. 1 Schematic view of the experimental setup. The upstream and downstream QPHP sensor were inserted at x - z and y - z plane, respectively.

*独立行政法人 日本学術振興会 Japan Society for the Promotion of Science, **岩手大学農学部 Faculty of Agriculture, Iwate University 五極子熱パルス(QPHP)法, 3次元水フラックス密度ベクトル, 熱物性, 同時計測

次に、定常状態において、9段階 ($J_w=1.14 \times 10^{-6}$ [LV-1] ~ $J_w=2.55 \times 10^{-5}$ [LV-9])の水フラックス強度 q_w を設定し、熱源ロッドから 20s の期間 ($-10s < t < 10s$)、熱パルスを印加し、温度上昇の経時変化 $\Delta T(t)$ および対向熱電対の電位差の経時変化 $\Delta E(t)$ を 1s 間隔で 300s 間測定した。なお、流向は $\phi = \zeta = 0(\text{deg})$, $\phi = \zeta = 45(\text{deg})$, $\phi = \zeta = 90(\text{deg})$ の 3 種類を設定した。

3. 結果および考察 砂質土の $\phi = \zeta = 0(\text{deg})$ における水フラックス密度 J_w の設定値と計測値の比較図を Fig.2 に示す。この条件では、 J_w の 3 次元方向の成分は、 $J_x = J_y = 0$, $J_z = J_w$ となる。凡例の \blacktriangle , \bullet はそれぞれ上流側、下流側を表している。なお、他の 2 種類の土性についての結果は当日発表する。 J_x および J_y における傾きは、設定 J_w の増減によらず、ほぼゼロ ($\epsilon = \pm 2\%$) の値を検出したことから、 x, y 方向には流れが無いことが示されたといえる。また、 J_z の傾きは 0.83 ないし 0.87 と、厳密値よりも 13~17% 小さい値を示したものの、計測値 J_w が設定 J_w の増加を正確に反映しており、QPHP センサーを 2 本併用しての 3 次元流速ベクトルの計測は可能と考えられる。Fig. 3 に温度拡散係数 (凡例 \blacktriangle , \circ) および体積熱容量 (凡例 \triangle , \circ) の計測値と設定 J_w の関係を示す。各種熱物性値は、 J_w に依存することなくほぼ一定の値を示した。また、流れがない状態において DPHP 法を用いて計測した熱物性値とほぼ合致した。流れのある状態で計測した熱物性は、土壌の種類を問わず J_w の大きさには依存せずほぼ一定の値を示した。Fig. 4 に検出した流向の水フラックス強度 (LV-1 ~ LV-9) 依存性の関係を示す。横軸は上流側センサーを用いて検出した $x-z$ 平面上における流束と x 軸がなす角 ϕ (deg), 縦軸は下流側センサーを用いて検出した $y-z$ 平面上における流束と y 軸がなす角 ζ (deg) である。同図は、検出した流向が設定流向からどの程度外れているかということを評価する際に用いたもので、実線の内側および破線の内側は、それぞれ設定値から $\pm 45(\text{deg})$, $\pm 22.5(\text{deg})$ の範囲を表す。検出した流向は、 J_w の増加に伴い設定流向に近づく傾向にあった。また、砂土以外の 2 種類の土性についても検討し、同様の結果を得た。砂土における LV-6 以上の流束 ($J_w > 1.10 \times 10^{-5}$) のもとでは、検出流向が設定流向の $\pm 22.5(\text{deg})$ の範囲にあったが、埴壤土では最大設定流束の条件のもとでも $\pm 22.5(\text{deg})$ の範囲に入らなかったことから、透水性の小さな土性の流向を検出することは難しいと考えられる。

4. おわりに 3次元水フラックス速度ベクトルと熱物性の同時計測法が各種土性に適用できるかどうか検討するため、QPHP センサーを 2 本併用した計測実験により、 J_w の方向成分、熱物性および流向を評価した。今後は、透水性の小さい土性において、 J_w の方向成分と流向の計測精度を向上することが課題である。

【引用文献】

遠藤明, 原道宏(2004): QPHP センサーを用いた多重傾斜成層砂中の流体速度ベクトルと熱物性の同時計測 - 農地土壌・都市地盤中における汚染物質の移動制御・モニタリングをめざして - , 計測自動制御学会産業論文集 Vol.3 No.2: 12-2

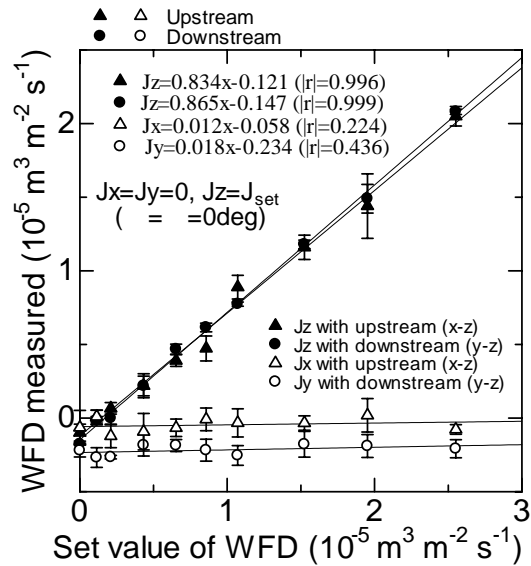


Fig. 2 Relationship between set value of water flux density (WFD) and WFD measured.

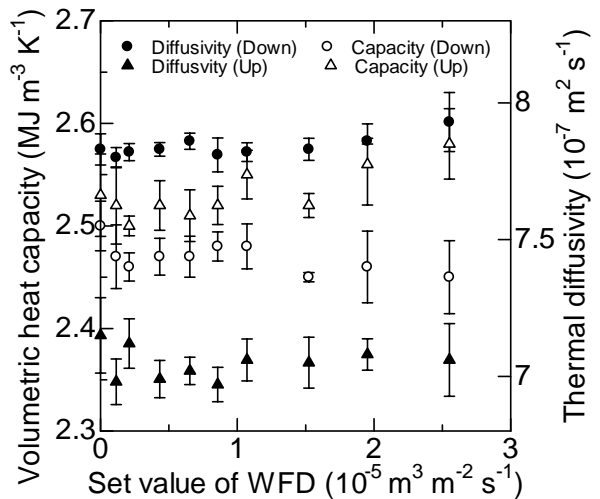


Fig. 3 Relationship between set value of water flux density (WFD) and thermal properties.

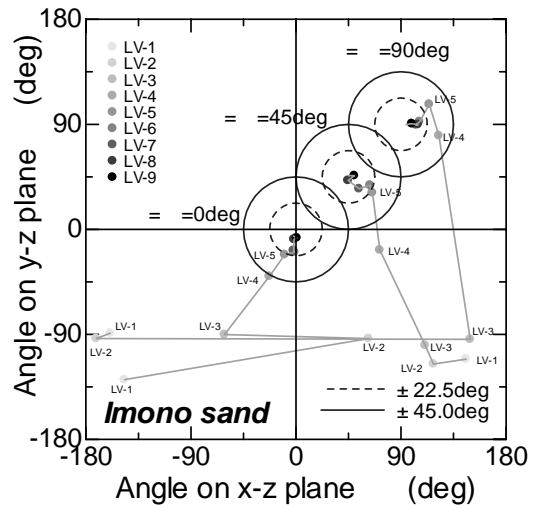


Fig. 4 Influence of water flux intensity (LV-1 ~ LV-9) upon detection of water flow direction (ϕ, ζ). The gray scale expresses water flux intensity.