

## 多重傾斜成層砂中の 2 次元間隙流速ベクトルと熱物性の同時計測

### Simultaneous Measurement of Two-Dimensional Pore Water Velocity Vector and Thermal Properties of the Inclined Multiply Stratified Sand

遠藤 明\*, 原 道宏\*\*

Akira Endo, Michihiro Hara

\*岩手大学大学院連合農学研究科, \*\*岩手大学農学部

\*United Graduate School of Agricultural Sciences, Iwate University

\*\*Faculty of Agriculture, Iwate University

**キーワード:** 同時計測(simultaneous measurement), 間隙流速ベクトル(pore water velocity vector), 温度差測定 (measurement of differences of temperature), 熱物性(thermal properties)

**連絡先:** 〒020-8550 盛岡市上田 3-18-8 岩手大学農学部農林環境科学科 環境制御工学研究室  
原 道宏, Tel. & Fax.: (019)621-6125, E-mail: [mrhara@iwate-u.ac.jp](mailto:mrhara@iwate-u.ac.jp)

#### 1. はじめに

農業生産活動において, 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。また, ハイテク産業と呼ばれる半導体製造においては, トリクロロエチレンやテトラクロロエチレンといった発ガン性物質が地下水に混入し, 地下水汚染を引き起こしている事例が報告されている<sup>12)</sup>。最近, 岩手 青森県境の草地土壌中に大量に不法投棄された廃棄物が確認された。これらの産廃は土壌や地下水の汚染源となり, 周辺住民の安全・健康な生活を脅かしている<sup>13)</sup>。モニタリングを通じ, このような汚染浸出水の流れを検出し, 汚染予測を正確に行なうことは, 環境保全上, 大変意義深い。上層に細粒土壌, 下層に粗粒土壌が成層している土層条件において, 上層を降下浸透する水が上下層境界面に到達しても, すぐには下層に浸入しない現象が観測される。これは毛管力(capillary force)に由来する水の吸引力が細粒層において勝るために下側の粗粒層に水が到達しないという水移動障壁(barrier)現象であり, この現象はキャピラリーバリアと呼ばれる。Fig. 1 にキャピラリーバリアによる選択流発生モードを示す。層境界面が傾斜している土層条件では, 一般に上層からの降下浸透水が下層との傾斜境界面を流下するような流れが生じる。この流れは集積型選択流 (funnel type preferential flow) と呼ばれる。しかし, 層境界面の水圧が正圧に近くなると, 上層から下層へ水が一気に浸透する。この流れはその形状からフィンガー流 (finger flow) と呼ばれる。

傾斜成層土中における水移動に関する研究は古くか

ら行なわれている<sup>1), 2)</sup>。最近になって, キャピラリーバリアによる深部土壌環境の保全が注目されている<sup>3), 4)</sup>。これは, 地中に埋められた廃棄物に浸潤水が接触しないようにするなどの目的で導入されたものであり, 汚染浸出水の捕捉を狙うものである。傾斜成層土層における水移動の様態を観測するためには, 透明な箱の中に土壌を充填し, 色素を用いて浸潤の様子を観察し, 水移動の方向を確認しているのが現状である<sup>4), 5)</sup>。しかし, 現場土壌においてはこのような手段を適用することはできない。遠藤・原(2003)<sup>6)</sup>は, 水分飽和した砂柱における定常水流実験において, 五極子熱パルス(Quintuple-Probe Heat-Pulse, QPHP)法を用いて熱前線伝播速度ベクトルと熱物性の同時計測を行なった。その結果, 設定値と計測値がかなり良い精度で合致した。しかし, 非定常流に対しての本法の適用については, まだ実験による検証がなされていない。都市土壌, 畑, 山地, 丘陵地といった地盤のベイドゾーン(vadose zone)は土壌間隙がすべて水で満たされていない水分不飽和状態である。本法は体積熱容量を計測することが可能である。この熱容量の値から体積含水率を把握することができる。このように土壌水分量を経時的に把握することができれば, 農地土壌への灌漑・施肥管理に役に立つ。また, 乾燥から湿潤への水分変遷過程を把握することで, 最終処分場における遮水壁からの浸出水の検出, 傾斜地における浸食性土壌の流亡予測, そして崖崩れや地すべりの予測といった斜面崩壊の安全性を評価することが期待される。また, 本法は流体輸送速度ベクトルと熱特性を同時に測定することが可能である。地下燃料タンクの埋設場所や

最終処分場遮水工の下部に本センサを埋設しておけば、万一、タンクからの流体の漏出や浸出が発生した場合、流体の移動方向や流量を検出することができるので、早期に汚染拡散予測を行うことが可能である。不飽和傾斜成層土中の水移動の様態を把握することができれば、最終処分場の遮水工下部の地盤や工場周辺土壌だけでなく、水田・畑土壌における水移動のモニタリングに応用することが期待されるため、近い将来本法を現場に適用することが期待される。

本研究は、キャピラリーバリアによる深部土壌の環境保全をめざして、汚染流出水の挙動を QPHP 法により把握し、土層内の物質移動モニタリングシステムを構築することを将来的な目標として行った研究の一部である。本報では、細粒土壌と粗粒土壌が多重に傾斜成層している場(多重傾斜成層土)を想定し、当該土層において集積型選択流やフィンガー流の流れの形態や流向を QPHP 法により検出することができたので報告する。本研究は、QPHP 法を用いて多重傾斜成層砂の水分移動制御効果を確認することを目的に、i) QPHP センサを用い多重傾斜成層砂における非常流の間隙流速ベクトルと当該砂の熱物性を同時計測し、ii) 多重傾斜成層砂における水移動の特徴と QPHP 法を用いて計測した間隙流速ベクトルおよび熱物性の特徴を比較し、当該土層における流れの形態や、土層内部において生じている水流と土壌水分の挙動を評価すること、および iii) 非常状態の流れにおける QPHP 計測の実用可能性を実験により検証することにある。

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 五極子熱パルスセンサの概要

Fig. 2 に五極子熱パルスセンサの概要を示す。本センサは、5 本平行に配置したステンレススチール管(SUS304 皮下注射針、テルモ社製)から構成され、中央ロッド内にヒーター(直径 0.1mm のコンスタンタン線)を挿入し、他の 4 本のロッド内に E 型熱電対(直径 0.1mm のクロメル - コンスタンタン線)を挿入したものである(遠藤・原, 2003)<sup>6)</sup>。ロッド長は 50mm、ロッド外径は 1.25mm である。E 型熱電対は接点部がロッドの中央部に位置するように配置した。今回、8 個の QPHP センサを製作した。寒天溶液を用いて較正した各センサのロッド間距離  $r$  と単位ロッド長さ当たりのヒーター抵抗値  $R/L$  を Table 1 に示す。

### 2.2 実験装置の概要

Fig. 3 に実験装置の概要を示す。実験装置システムは次の 3 つのサブシステムから構成されている。

#### i) 充填槽

Fig. 3(A) は充填槽の概略図である。充填槽は、厚さ 8mm の透明硬質塩化ビニール製であり、幅 150cm、高さ 85cm、奥行 5cm(すべて内法寸法)の、上蓋の無い直方体容器であり、一方の側板には QPHP センサを挿入するための孔(直径 33mm)49 個が開けられている。

#### ii) マリオット給水装置

Fig. 3(B) はマリオット給水装置の概略図である。本装置は水を砂層表面に供給するための透明アクリル製円筒形容器であり、一定水量の水を供給する装置である。内部パイプの空気流出面の高さを調整することにより、さまざまな流量を設定することが可能である。

#### iii) 直流安定化電源、データロガー、マルチプレクサおよび PC

Fig. 3(C) は QPHP 計測システムの概略図である。直流安定化電源(836-3D, Leader Electronics 製)は、QPHP センサのヒーターに電力を供給し、熱源ロッドを発熱させるための装置である。データロガー(CR10X, Campbell Scientific Inc. 製)およびマルチプレクサ(AM416, Campbell Scientific Inc. 製)は、QPHP センサの対向熱電対の電位差およびロッド温度を多チャンネルで計測する装置である。また、PC はデータロガーの制御、電位差と温度変化のモニタリングを行なうために使用した。

### 2.3 供試材料の概要

Smesrud and Selker(2001)<sup>7)</sup> は、上下層の土粒子径の差異によってキャピラリーバリア性能が異なることを示した。キャピラリーバリア性能を向上させ、この効果を永続的に維持させるためには、2 層の土粒子径の比が 5 以下(すなわち、上層細粒土径 1 に対して、下層粗粒土径が 5 以下)であると報告している。上層の細粒土に相当する砂は鑄物砂(日瓢珪砂 8 号、木谷社製)であり、粒径は 0.106 ~ 0.21mm が 37%、0.075 ~ 0.106mm が 40% を占める。一方、下層の粗粒土に相当する砂は石英砂(鹿 1 級、関東化学株式会社製)であり、粒径は 0.25 ~ 0.425mm が 91% を占める。鑄物砂と石英砂の平均粒径は、それぞれ 0.218mm、0.588mm であり、その比は 1:2.7 であるので Smesrud and Selker(2001)の条件を満たしている。また、鑄物砂と石英砂の土粒子平均密度  $\rho_s$  は、JGS T 101<sup>10)</sup> に準じて測定し、それぞれ  $2.71\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $2.51\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  を得た。

供試材料は多孔質であり透水する性質を持つ。鑄物砂と石英砂の飽和透水係数  $K_s$  は、試料の乾燥密度が  $1.5\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$  になるように密度調整を施した後、JIS A 1218<sup>10)</sup> に準じて測定し、それぞれ  $7.24 \times 10^{-4}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $1.16 \times 10^{-2}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$  を得た。

### 2.4 実験方法

#### 1) 充填槽への砂の充填と QPHP センサの挿入

充填槽に砂を充填した模式図を Fig. 4(A), 4(B) に示す。Fig. 4(A) は、粗材料層が 1 層挿入された単一傾斜成層砂であり、Fig. 4(B) は、粗材料層が 3 層挿入された三重傾斜成層砂である。

はじめに、鑄物砂と石英砂の初期含水率  $w_i$  を 2% になるよう水分調整し、この砂をビニールバッグに入れ、室温 20 の部屋に 12 時間放置した。次に、Fig. 3(A) に示すように充填槽の片側を持ち上げ傾斜勾配  $\text{deg}$  を付け、乾燥密度が  $1.5\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$  になるように充填槽に砂を充填した(Fig. 4)。傾斜勾配は、 $=0, 3.8, 7.6$  および  $11.3\text{deg}$  の 4 種類を設定した。次に、QPHP センサを充填槽裏側の

挿入孔に挿入した。その際、Fig. 2 に示したx軸が粗材料層と平行になるよう挿入した。最後に、砂層表面からの水分蒸発を防ぐため、充填槽上面をサランラップで覆った。そして、砂層の温度が平衡になるよう、室温 20 の部屋に一晩放置した。

## 2) 浸潤前線の観察

浸潤前線(乾燥領域と湿潤領域の境界線)の観察は、QPHPセンサを用いて計測した流体移動速度ベクトルが、浸潤前線の移動速度ベクトルと等しくなるかを比較するために行なう観測項目である。はじめに、砂層表面の青色矢印の箇所一点(単一傾斜成層では槽中央から右に40cm離れた位置、三重傾斜成層では槽中央から右に20cm離れた位置)にマリオットからの水道水を約 1300 ~ 2000cm<sup>3</sup>・hr<sup>-1</sup>の流量で約 3 ~ 6 時間の期間供給した。浸潤前線は5 ~ 15 分おきに充填槽前面の透明パネルに記入した。

## 3) QPHP センサを用いた速度ベクトルと熱特性の同時計測

砂層への浸潤が行なわれている状態において、15 ~ 30 分おきに熱パルスを 20s間発生し、温度上昇 $\Delta T$ と電位差 $\Delta E$ を測定した。温度上昇 $\Delta T$ はTC1 とTC2 において、それぞれ $\Delta T_1$ と $\Delta T_2$ として測定した。また、位置TC1, TC3 間の熱電対電位差 $\Delta E_{1-3}$ とTC2, TC4 間の電位差 $\Delta E_{2-4}$ 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 ~ 40 の温度範囲において $S=0.0605\text{mV}\cdot\text{K}^{-1}$ , 佐々木(1977)<sup>8)</sup>)で除し、 $\Delta T_{1-3}$ と $\Delta T_{2-4}$ をそれぞれ $\Delta E_{1-3}/S$ と $\Delta E_{2-4}/S$ として求めた。これにより、差温が $\Delta T_1(t)-\Delta T_3(t)=\Delta T_{1-3}$ および $\Delta T_2(t)-\Delta T_4(t)=\Delta T_{2-4}$ と、直接精度良く求められる。和温の経時変化を次式により求めた。

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

$$\Delta T_2(t) + \Delta T_4(t) = 2 \Delta T_2(t) - \Delta T_{2-4}(t) \quad (2)$$

## 3) 速度ベクトルと熱特性の計算

QPHP法における速度ベクトルと熱特性はHara(投稿中)<sup>9)</sup>の理論を用いて計算した。以下に計算手順は前報(遠藤・原,2003)<sup>6)</sup>に従い、次のようにした。

- ロッド位置および位置の相対誤差算出
- 無次元数  $H$  と正規化ベクトル( $\cos\phi, \sin\phi$ )の算出
- 瞬間発熱を想定したピーク時刻およびピーク昇温の推定
- 熱前線伝播速度  $u$  および熱物性の算出
- 水流束密度 $J_w$ および間隙流速 $V_w$ の算出

## 4) 浸潤終了後における含水比 $w$ の測定

砂表面への水道水の供給を停止した後、自然排水(人為的なサクション等は加えず、重力のみによる排水)を行なった。次に、充填槽裏面のQPHPセンサを抜き取り、センサ挿入孔から、湿潤砂試料(単一傾斜成層では35個、三重傾斜成層では49個)を採取した。その後、JIS A 1203 およびJGS T 121<sup>10)</sup>の重量法により含水比

( $w$ =水重/乾重)を測定し、実験終了後の多重傾斜成層砂の体積含水率 $\theta$ (= $w \times$  充填密度  $1.5\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$  / 水の密度  $1.00\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$ )分布を求めた。

## 5) 浸潤前線速度 $V_f$ の算出とQPHPセンサを用いて計測した速度ベクトルの比較

一般に流線は等ポテンシャル線に直交する。したがって、QPHPセンサを用いて計測した流向 $\phi$ は、浸潤前線法線の方向を検出すると考えられる。また、浸潤前線速度 $V_f$ は、QPHPセンサを用いて同定される間隙流速にほぼ等しいと考えられる。本実験項目は、QPHPセンサを用いて計測した不飽和浸潤中の間隙流速ベクトルが、浸潤前線が進行する速度と方向を正確に表しているかどうかを確認するために設定した。流線における浸潤前線速度 $V_f(m)$ は次式を用いて算出した。

$$V_f = \Delta L / \Delta t \quad (3)$$

ここに、 $\Delta L$ : 流線に沿った浸潤距離(m),  $\Delta t$ : 距離 $\Delta L$ を移動するに要する時間(min)である。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 浸潤前線法線と間隙流速ベクトルの関係

Fig. 5 に QPHP センサが間隙流速ベクトルを検出する模式図を示す。QPHP センサは、熱電対ロッド TC1 と TC3 を通る直線が、傾斜境界面と平行になるように埋設した。傾斜層境界面近傍の集積型選択流については、QPHP センサは Fig. 5A のような $\phi=0\text{deg}$ を検出すると予想される。また、そのときの流向と水平面がなす角 $\eta$ は $\zeta$ となる。一方、QPHP センサの下部においてフィンガー流があるもとは、Fig. 5B のような $\phi$ を検出すると予想される。また、そのときの流向と水平面がなす角は $\eta=\phi+\zeta$ で表すことができる。なお、TC3 ~ TC2 ( $180<\phi<270^\circ$ )を第象限、TC2 ~ TC1 ( $270<\phi<360^\circ$ )を第象限、TC1 ~ TC4 ( $0<\phi<90^\circ$ )を第象限、TC4 ~ TC3 ( $90<\phi<180^\circ$ )を第象限とする。

Fig. 6A ~ 6D に浸潤前線の経時変化を示す。A ~ D はそれぞれ次の傾斜成層砂の形態である。

- A : 単一傾斜成層砂,  $\zeta=0\text{deg}$
- B : 三重傾斜成層砂,  $\zeta=0\text{deg}$
- C : 単一傾斜成層砂,  $\zeta=11.3\text{deg}$
- D : 三重傾斜成層砂,  $\zeta=11.3\text{deg}$

以降、これらをシリーズ A ~ D として引用する。なお、色付けした中塗りの円は、QPHP センサの挿入箇所を示している。

Fig. 7A ~ 7D に、QPHP センサを用いて測定した間隙流速ベクトル $\times$ 計測インターバルの総和、すなわち、

$$\vec{L}_n = \sum_{i=1}^n \vec{V}_{w,i} \cdot \Delta t_i \quad (4)$$

の軌跡を示す。ここに、 $\vec{V}_w$ : 間隙流速ベクトル,  $\Delta t$ : QPHP 計測を行う時間間隔である。 $\vec{L}_n$ は、各時刻にお

る間隙流の方向と距離の総和を示すものである。Fig. 7のA, B, C, DはFig. 6のA, B, C, Dに対応している。また、データポイントの色は、QPHPセンサの位置を示す色に対応している。なお、データポイントに付されている数値は経過時刻を示し、Aは30分間隔、Bは15分間隔である。

#### 1) 傾斜角度 $\zeta=0\text{deg}$ の場合について

##### 単一傾斜成層 (Fig. 7A)

QPHPセンサNo.2およびNo.5は、水源供給位置の真下に位置する。したがって、これらの位置における水移動は鉛直下向きに起こると予想される。No.5においては、流向がほぼ $90\text{deg}$ で推移し浸潤前線法線と合致したが、No.2においては図中の円A-3(0時間40分に相当)を境にして、第象限方向に変化した。これは、降下浸透流の一部が粗材料層上面を左方向に流れる集積型選択流に分かれたためと考えられる。図中の円A-4は砂表面への給水を停止したときのデータポイント(3時間10分に相当)である。このときを境に、No.2における流向が逆転し楕円A-4に示したような左上向きの流れが生じた。水の供給を停止すると、重力排水により上層の水分が減少する。しかし、層境界面上側においては、集積型選択流によって貯留された水が存在するため、この付近の水分は多いと考えられる。このため、比較的水分の多い層境界面から、水分の少ない上部へと上向きの水分拡散が生じたと考えられる。

QPHPセンサNo.1およびNo.3は、水源のそれぞれ右と左下に位置する。No.1では、浸潤前線が充填槽右端に到達する図中の円A-1(1時間45分に相当)まで、流速ベクトルは右を向いた。しかし、この時刻を過ぎると図中の円A-2に示すような、データポイントの密集領域が確認される。データポイントが密集しているということは、流れが停滞していることを示す。よって、当該時間においては、充填槽壁面の影響によりNo.1では流れが止まったのだと考えられる。一方、No.3の間隙流速ベクトルは左を向く傾向にあり、これは浸潤前線法線の方向とほぼ合致している。しかし、図中の円A-6(3時間00分)からは、流向が鉛直上向きに変化した。このことは、センサNo.2において起きた現象と同様の理由によるものと考えられる。

QPHPセンサNo.7は充填槽中央付近の上下層境界面上側に位置する。当該位置付近における浸潤前線は、時間の経過に伴い、上下層境界面に沿って左方向ないし若干左上方向に移動する傾向にあった。この位置の間隙流速ベクトルは、経過時間によらずいずれも第象限を向いた。このことは、境界面近傍に集積した水分が上方の乾燥領域に拡散していることを示唆しており、これは浸潤前線法線の方向とほぼ一致した。

##### 三重傾斜成層 (Fig. 79B)

QPHPセンサNo.1およびNo.4は、水源の真下に位置する。これらの位置における水移動は鉛直下向きに起こ

ると考えられる。No.4における流れは、経過時間によらず鉛直下向きに生じていた。これは、降下浸透するフィンガー流によるものと考えられる。図中の円B-2(6時間30分以降に相当)は、砂表面への水給水を停止した時刻以後のデータポイントであり、この円の中には3つのデータポイントが密集している。このことから、給水停止後、水は層境界面近傍に滞留したままの状態であり、当該位置では重力排水されないと考えられる。一方、位置No.1では、図中の円B-1(1時間05分に相当)を境に、鉛直下向きの流れから、第象限方向の流れに変化した。この円B-1は、第1粗材料層にフィンガー流が形成されたときに対応するデータポイントである。したがって、これは、フィンガー流が鉛直下向きではなく、鉛直下向きに対して若干右向きに生じたことを示している。

No.5における浸潤前線到達時刻は約3時間40分であった。当該位置の $\phi$ は約 $45^\circ$ で推移しており、これは第象限方向を示す浸潤前線法線ベクトルと良く一致した。図中B-3(6時間30分に相当)は砂表面への水供給を停止したときのデータポイントである。これ以降のデータポイントをたどると、間隙流速の鉛直下向き成分が増加した。これは、層境界面上面を流れていた集積型選択流が粗材料層に浸入しはじめたことを示している。

QPHPセンサNo.6の位置における浸潤前線到達時刻は約4時間35分であった。第3粗材料層へのフィンガー流発生時刻は約5時間50分であった。図中B-4がフィンガー流が形成されたときのデータポイントである。フィンガー流が形成されるまでの間はデータポイントが密集していることから、当該位置の間隙水は、フィンガー流が形成されるまでは非常に遅い速度で水平左方向に流れていたと考えられる。しかし、フィンガー流が形成された後の間隙流速ベクトルは鉛直下向き成分が増加し、第象限方向に向く傾向にあった。このことは、キャピラリーバリアによって浸潤水が層境界面で一時的に貯留した後、その水が一気に降下浸透したことを示している。

#### 2) 傾斜角度 $\zeta=11.3\text{deg}$

##### 単一傾斜成層 (Fig. 7C)

QPHPセンサNo.2およびNo.5は、水源の真下に位置する。No.2の間隙流速ベクトルは鉛直下向き方向よりも、若干左側に向かって推移する傾向にあった。これは、傾斜境界面の上面を左側に向かって移動する集積型選択流と降下浸透流の2つの流れによるものと考えられる。図中の円C-3(時刻4時間30分に相当)は砂表面への給水を停止したときに対応するデータポイントである。この付近のデータポイントが密集していることから、このとき流れは停滞していると考えられる。その後、流れの向きは逆転し上向きになった。このことは、シリーズA (Fig. 9A)のセンサNo.2において確認されたことと同じ理由によるものと考えられる。一方、No.5においては、図中の円C-4(時刻2時間20分に相当)を境にして、間隙流速ベクトルが第象限から第象限方向に変化しており、この付近のデータポイントはフィンガー流が形成されたことを示している。

QPHPセンサNo.1およびNo.3は、それぞれ水源の右

下と左下に位置する.No.1 においては浸潤前線法線と間隙流速ベクトルの方向が良く合致しており、水は第象限方向に流れる傾向にあった。図中の円 C-1(4 時間 30 分に相当)は砂表面への水供給を停止したときに対応するデータポイントである。この付近のデータポイントが密集していることから、このときの当該位置での水の流れは停滞していると考えられる。その後、間隙流速ベクトルの鉛直下向き成分が増加し、水流が鉛直下向きを示した。これは、当該位置に貯留した水が重力排水により降下浸透したことによるものと考えられる。一方、No.3 の間隙流速ベクトルは、常に第象限方向に向いていた。

QPHP センサ No.6 は、充填槽中央付近の上下層境界面の直上に位置する。間隙流速ベクトルは水平左方向よりも若干左向きの第象限方向を指した。この方向は浸潤前線法線方向とほぼ合致している。

### 三重傾斜成層 (Fig. 7D)

センサ No.1 は第 1 粗材料層の直上に位置する。1 時間 26 分にフィンガー流が形成されてから、間隙流速ベクトルは第象限方向に移動した。これは、粗材料層が傾斜していることにより、降下浸透流の一部が集積型選択流に分かれたためと考えられる。一方、QPHP センサ No.4 は第 2 粗材料層の上に位置する。当該位置の浸潤前線法線は第象限方向を示しており、これは計測した間隙流速ベクトルの向きと合致する。図中の円 D-2(3 時間 43 分に相当)は第 2 粗材料層にフィンガー流が形成されたときに対応するデータポイントである。フィンガー流発生後、第象限から第象限方向に流向が変化した。また、D-2 以降の  $\bar{L}_n$  と、No.1 の  $\bar{L}_n$  が平行関係にあることから、両者の浸透流は同一方向に流れていると考えられる。

一方、センサ No.6 は、第 3 粗材料層の直上に位置する。当該位置の浸潤前線法線と間隙流速ベクトルは同一方向を示した。図中の円 D-3(6 時間 30 分に相当)は、砂表面への給水を停止したときに対応するデータポイントである。当該位置では給水停止後、鉛直下向き方向の成分が増加し、降下浸透する傾向を示した。これは重力排水に起因するものと考えられる。

センサ No.2 は、充填槽中央付近の第 1 粗材料層の直上に位置する。当該位置の浸潤前線法線は間隙流速ベクトルが作用する方向と非常に良く一致した。しかし、当該位置の間隙流速は、図中の円 D-1(4 時間 45 分に相当)を境にして、鉛直下向きの成分が増加し、境界面に沿う向きから第象限方向へと変化した。これは、層境界面を左方向に移動する集積型選択流が下部の粗材料層に浸入したことを示している。

### 3.2 体積熱容量 $\rho_c$ の経時変化

Fig. 8A ~ 8D に、QPHP センサを用いて測定した体積熱容量 $\rho_c$ の経時変化を示す。A, B, C, D は Fig. 6 の A, B, C, D に対応している。

全てのセンサ位置において、浸潤前線がセンサ位置に到達すると、水分率の増加を反映し、体積熱容量が増

加した。ここで、重要なことは、飽和度の違いが、体積熱容量の測定値にどのように効いてくるのかということである。Fig. 8AのセンサNo.7 は粗材料層の直上に位置する。右方からの浸潤水が、上下層境界面に集積しながら左に移動する。したがって、当該位置の水分飽和度は非常に高いと考えられる。一方、センサNo.8 においては、上方からの浸透水が乾燥領域に拡散していくので、位置No.7 に比べると飽和度は小さいと考えられる。センサ No.7 では、 $t=0$  と  $t=3$  時間における体積熱容量の差が  $2.5-1.0=1.5\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  と大きな値であったのに対し、No.8 においては、その差が  $2.0-1.0=1.0\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  と小さな値を示した。以上のことより、QPHP法を用いた体積熱容量の計測は、砂層水分の大小や増減を正確に反映していたと考えられる。

### 3.3 測定終了後の体積熱容量 $\rho_c$ と体積含水率の対応関係

Fig. 9A ~ 9Dに、体積含水率 (VWC) 分布を示す。A (水供給停止から 3 時間後)、B (同、1 時間 20 分後)、C (同、1 時間 20 分後)およびD (同、1 時間 20 分後)は Fig. 8 の A, B, C, D に対応している。これらはいずれも、上方からの水分供給が無い状態(水分の再分布が起きている状態)において測定した体積含水率の値であり、白い部分が乾燥、青い部分が湿潤を表している。それぞれの VWC 分布図の下側にあるスケールは  $\text{VWC}(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$  を表している。

体積熱容量  $\rho_c$  は VWC の関数として表される (Campbell et al, 1991)<sup>11)</sup>。Fig. 8BのセンサNo.1 は水源の真下に位置する。7 時間 45 分における当該位置の体積熱容量は約  $2.70\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  と大きく、VWCの値と良く対応していた。一方、センサNo.2 は、水供給源位置よりも 40cm 左に離れて位置する。このため、位置No.1 よりも水分飽和度が小さくなり体積熱容量が、 $2.20\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$  の中程度の値を示したと考えられる。

Fig. 10 に、微弱な水流のある状態で計測した体積熱容量 $\rho_c$ (Fig. 8 中に示した計測終期の楕円内のデータポイント)と浸潤実験終了後にセンサ位置の砂試料をサンプルして重量法により測定したVWCの関係を示す。ここで、 $\theta=0.03$ におけるデータポイントはFig. 8 中に示した計測初期の楕円のデータポイントを示している。なお、Fig. 10 の A, B, C, D は Fig. 6 の A, B, C, D に対応している。 $\theta=0.03$ における $\rho_c$ は多少のばらつきがあるものの、 $1\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ 付近に分布した。このばらつきは、浸潤実験前に充填槽内に砂を詰めた際、各センサ位置の充填密度が均一にならなかったため、 $(\rho_c)_0$ 値( $\theta=0$ における $\rho_c$ であり、砂の充填密度に左右される)がセンサ位置により異なったためと考えられる。しかしながら、計測により得られた $\rho_c$ は高水分域で大きく、中水分域で中間的な値を示した。また、 $\rho_c$ と $\theta$ は $r^2=0.900$ の強い正の相関関係にあった。以上のことから、データの性格から対応のずれが生ずることはやむを得ないものの、いずれのセンサ位置においても、VWC測定直前の体積熱容量の計測値と、VWCは比較的良く対応していることがいえる。よって、QPHPセ

ンサを用いた水分不飽和状態における体積熱容量の経時計測は有用であることから、QPHP法は土壌水分の時間的変化を把握する方法として適切な計測法といえる。

### 3.4 浸潤前線速度 $V_f$ と間隙流速 $V_w$ の比較

#### 1) 流線長 $L$ の経時変化

Fig. 11 A, 11B に、それぞれ傾斜角度 $\zeta=11.3\text{deg}$ における単一傾斜成層および三重傾斜成層の流線長 $L$ の経過 $L(t)$ を示す。ここでいう流線とは、浸潤前線を等ポテンシャル線として考え、この法線のことである。これらは、それぞれ Fig. 6C, 6D に示した水色の曲線 Flow line に相当する。

単一傾斜成層(Fig. 11A)においては、浸潤開始後 2 時間 30 分を境にして $L(t)$ の傾き $(dL/dt)$ が減少する傾向にあった。これは、2 時間 20 分においてフィンガー流が発生したことにより、集積型選択流よりも降下浸透流の方が卓越したことによるものと考えられる。一方、三重傾斜成層(Fig. 11B)における Flow line 1 は、浸潤開始後 2 時間 30 分を境にして $L$ の傾きが減少傾向にあった。Flow line 2 では、3 時間 15 分～4 時間 30 分にかけて傾きが一時的に増加したが、4 時間 30 分を過ぎると傾きが減少し、元に戻った。これは粗粒材料層におけるフィンガー流の発生に影響されて生じた変化と考えられる。

#### 2) 浸潤前線速度 $V_f$ と間隙流速 $V_w$ の対応関係

Fig. 12 に傾斜角度 $\zeta=11.3\text{deg}$ における任意のセンサ位置の浸潤前線速度 $V_f$ と間隙流速 $V_w$ の関係を示す。A, Bは単一成層, C, Dは三重成層である。間隙流速 $V_w$ は砂層間隙中を移動する気液境界面の先端部における「見かけの流速」のことである。ここで注意することは、 $V_w$ が定点測定により得られる値であるのに対し、 $V_f$ は常に移動している浸潤前線間距離を測定することにより得られる値だということである。Fig. 12 中に示した赤線楕円内のデータポイントは、浸潤前線が当該センサ位置を通過した直後の $V_w$ 値である。間隙流速 $V_w$ は次式を用いて表される<sup>14)</sup>。

$$V_w = \frac{u \cdot \rho c}{\theta \cdot (\rho c)_w} \quad (5)$$

ここに、 $V_w$ : 間隙流速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、 $u$ : 熱前線伝播速度( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、 $\theta$ : 体積含水率( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )、 $\rho c$ : 体積熱容量( $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ )、 $(\rho c)_w$ : 水の体積熱容量( $=4.18\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>14)</sup>である。

浸潤前線が当該センサ位置を通過した後に計測される $V_w$ 値は $V_f$ よりも遅くなると考えられる。これは、浸潤前線がセンサ位置を通過する際、当該位置の水分率 $\theta$ は急激に増加するが、 $\theta$ の増加が水分率上昇に伴う $\rho c$ の増加を相対的に上回るため、間隙流速 $V_w$ は水分率の増加とともに減少すると考えられるからである。浸潤前線がセンサ位置を通過した後(センサ位置は湿潤領域に存在する)の $V_w$ は浸潤前線後方の流速であるが、目視による $V_f$ と当該センサ位置を浸潤前線が通過した直後の $V_w$ を比較することは、QPHP法による $V_w$ 計測の妥当性を評

価する上で適切な測定項目と考え、本考察項目を設定した。

Fig. 12A, 12Bにおける赤線楕円のデータポイント $V_w$ および $V_f$ は良く一致した。これは、浸潤前線が当該センサ位置を通過した直後の $V_w$ 値が妥当な計測値であることを示すものである。 $V_w$ の同定値は $1 \sim 8 \times 10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ の範囲にあり、時間の経過とともに減少し、 $V_f$ においても減少傾向を示した。また、浸潤前線が当該センサ位置を通過してからの時間経過に伴い、 $V_w$ と $V_f$ の差異が増加する傾向にあった。

Fig. 12Cにおける $V_w$ は $1 \sim 6 \times 10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ の範囲で推移し、明確な減少傾向は認められなかった。しかし、赤線楕円のデータポイント $V_w$ と $V_f$ が良く一致した。ここで確認された $V_w$ と $V_f$ の若干のばらつきは、湿潤領域において測定された $V_w$ が必ずしも非湿潤領域の気液境界面の移動速度 $V_f$ とは合致しないことを示しており、これは当該センサ位置の流速 $V_w$ が大きな幅をもって変化していることを示すものである。

ここで、Fig. 12Dにおける $V_w$ 、 $V_f$ および流線長 $L$ について注目する。Fig. 12DはセンサNo.5の位置の $V_f$ と $V_w$ を示しており、当該位置はFig. 6Dに示したFlow line 2に沿う。Fig. 11 Bに示したように当該流線長 $L(t)$ は4時間30分まで傾き $V_f$ が増加傾向にあった。 $V_w$ においても、4時間30分まで増加傾向を示し、 $V_w$ 、 $V_f$ の値と増減の傾向が非常に良く一致した。一方、4時間30分を過ぎると、流線長 $L(t)$ の傾きは減少傾向を示し、 $V_w$ も同様に減少する傾向にあった。以上のように、赤線楕円内の浸潤前線速度 $V_f$ と間隙流速 $V_w$ のデータポイントがほぼ一致していることから、砂中の非定常間隙流速を計測する目的でQPHP法を使用する意義は大きいと考えられる。

## 4. まとめ

本研究は、QPHP法を用いて多重傾斜成層砂の水分移動制御効果を確認することを目的に、i) QPHP センサを用い多重傾斜成層砂における非定常流の間隙流速ベクトルと当該砂の熱物性を同時計測し、ii) 多重傾斜成層砂における水移動の特徴と QPHP 法を用いて計測した間隙流速ベクトルおよび熱物性の特徴を比較し、当該土層における流れの形態や、土層内部において生じている水流と土壌水分の挙動を評価すること、および iii) 非定常状態の流れにおける QPHP 計測の実用可能性を実験により検証することにある。多重傾斜成層砂の断面に QPHP センサを挿入し、浸潤条件下において速度ベクトルと熱特性を計測したところ、次の良好な結果が得られ、従来計測できなかった量が計測できたことの意義はきわめて大きい。

1) 間隙流速ベクトルの計測値は、集積型選択流や降下浸透の流れを正確に反映し、浸潤前線法線ベクトルと良く一致する傾向にあった。また、横向き流れの集積型選択流から鉛直下向き流れのフィンガー流に変遷(あるいは、フィンガー流から集積型選択流への変遷)が、 $\phi$ の

増加として本法を用いて検出することができた。

## 参 考 文 献

2) 体積熱容量 $\rho_c$ は、全てのセンサ位置において、浸潤前線がセンサ位置に到達すると、水分率の増加を反映し増加した。また、水分飽和度が大きい砂層上層部における $\rho_c$ が大きく、水分飽和度が小さい下層部の $\rho_c$ が小さいという、砂層の水分状態の差を正確に反映していた。

浸潤試験終了後、多重傾斜成層砂断面のセンサ埋設位置から試料を採取し、体積含水率を測定した。その結果、各センサ位置における試料採取直前(砂層上面への水供給は停止しているが、砂層内部では自然排水に伴う水分再分配が起き、微弱な水流がある状態)に計測した体積熱容量 $\rho_c$ は、砂層の水分率を正確に反映し、実測体積含水率と良く対応する関係にあった。

3) 流線長の経過 $L(t)$ の傾き( $dL/dt$ )の増減は、浸潤前線速度の増減を表すものである。Lの傾き $V_f$ が減少傾向にあるときは $V_w$ が減少傾向にあり、一方、傾きが増加傾向にあるときは $V_w$ が増加傾向にあった。また、浸潤前線が当該センサ位置を通過した直後の $V_w$ が $V_f$ と良く一致しており、時間経過に伴う $V_w$ の減少傾向が $V_f$ の減少傾向と良く対応していたことから、土壌等多孔質体中の非定常間隙流速ベクトルを計測する本法は有用であると考えられる。

以上のように、本法により多重傾斜成層砂の湿潤領域における任意の位置における流れの状態と熱物性を同時計測することにより、多重傾斜成層砂中の水移動の様態や水分の変化を検出することができた意義は大きい。従来、浸潤前線の位置およびその移動速度は目視により容易に観測される場合についての考究は進んでいたが、浸潤前線の後方、すなわち浸潤領域内における水流ベクトルの値が計測不可能であったため、浸潤域における水流の詳細が不明なまま議論されてきた。従来不明であった浸潤域内における流れの場を明らかにする上で、QPHP計測の意義は大きく、QPHP法を用いた流速ベクトル計測・熱物性計測の実用性が今後期待される。

本研究の結果は、現場におけるQPHP計測を実施する上で、その基礎的知見を提供するものである。現場へ適用し実用化するためには、今後、(i)三次元計測、(ii)不飽和水分状態に対するQPHP法の流速・熱物性検出可能範囲の特定、(iii)さまざまな土質(シルト質土壌、粘質土壌および特殊土壌)のもとでの検討を行なう必要があると考えられる。

- 1) K.-J. S. Kung: Laboratory observation of funneled flow mechanism and its influence on solute transport. *J. Environ. Qual.* **22**, 91/102 (1993)
- 2) S.-H. Ju and K.-J. S. Kung: Impact of funnel flow on contaminant transport in sandy soil: Numerical simulation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **61**, 409/415 (1997)
- 3) H. Bonin and M. Barres: Disposal of special waste in "Dry structures" application of the "Capillary barrier" principle. 2nd International Landfill Symposium, **XV-1/10** (1989)
- 4) M.T. Walter, J.-S. Kim, T.S. Steenhuis, J.-Y. Parlange, A. Heilig, R.D. Braddock, J.S. Selker and J. Boll: Funneled flow mechanisms in a sloping layered soil: Laboratory investigation. *Water Resour. Res.* **36**(4), 841/849 (2000)
- 5) W.J. Zhi, L.W. Lu, H. Thomas and A.J. William: Visualizing preferential flow path using ammonium carbonate and a pH indicator, *Soil Sci. Soc. Am. J.* **66**: 347/351 (2002)
- 6) 遠藤, 原: 五極子熱線パルス法を用いた2次元流れの場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 **2-12**, 88/95 (2003)
- 7) J. K. Smesrud and J. S. Selker: Effect of soil-particle size contrast on capillary barrier performance, *J. Geotech. and Geoenvironment. Eng.* **127**(10), 885/888, (2001)
- 8) 佐々木正治: 実用温度測定, (財)省エネルギーセンター, 東京, 97 (1977)
- 9) M. Hara: Theory of heat tracer type fluid-flux probes for multi dimensional flow fields in porous materials, (投稿中)
- 10) 土の試験実習書編集委員会: 土の試験実習書 第2回改訂版, (社)地盤工学会, 東京, 21/24 (1991)
- 11) G.S. Campbell, C. Calissendorff and J.H. Williams: Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method, *Soil Sci. Soc. Am. J.* **55**, 291/293 (1991)
- 12) 吉田文和: ハイテク汚染, 岩波新書 (1989)
- 13) 岩手県環境生活部: 青森・岩手県境不法
- 14) 投棄現場の現状回復対策協議会の会議結果, <http://www.pref.iwate.jp/~hp0315/haikibutu/tokubetu/iinkai/No2/iinkaikekka2.htm#shiryou> (2003)
- 15) T. Ren, G.J. Kluitenberg and R. Horton: Determining soil water flux and pore water velocity by a heat pulse technique, *Soil Sci. Soc. Am. J.* **64**, 552/560 (2000)

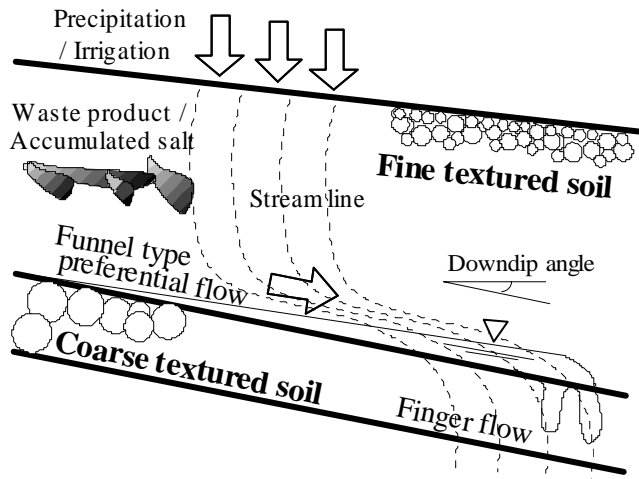


Fig. 1 Schematic view of the funneled type preferential flow by capillary barrier effect

Table 1 Calibrated rod-to-rod spacings and heater resistances per unit length

Sensor No.	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	R/L
	mm	mm	mm	mm	$\Omega \cdot m^{-1}$
1	10.33	9.39	8.76	10.30	315.8
2	9.23	9.64	10.43	10.31	531.4
3	9.23	9.83	9.51	10.28	434.5
4	9.41	9.51	9.96	10.28	395.2
5	9.86	9.52	9.80	9.43	550.1
6	9.73	10.26	10.25	8.67	431.3
7	9.68	9.02	9.39	10.12	406.5
8	9.82	9.72	9.24	9.64	415.9

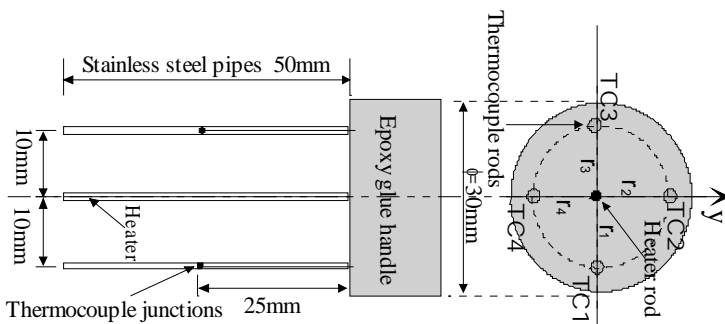


Fig. 2 Schematic view of the QPHP sensor

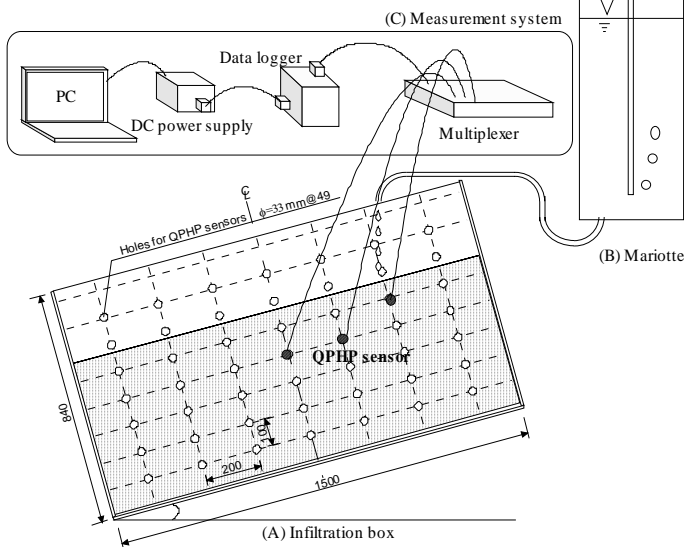


Fig. 3 Schematic view of the experimental setup.

Consist of Infiltration box (A), Mariotte (B) and Measurement system (C)

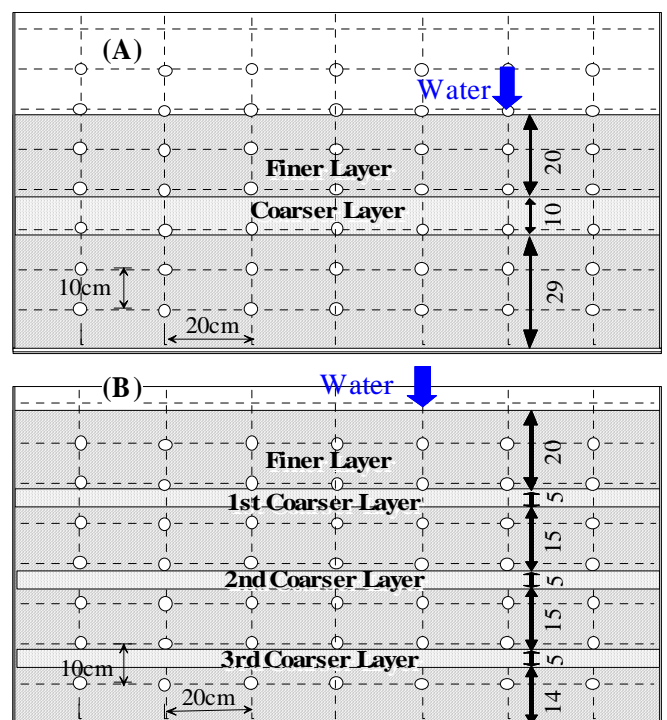


Fig.4 Thickness of finer layer and coarser layer in layered sand are the single-layered and triple-layered ones, as (A) and (B), respectively. Unit is cm

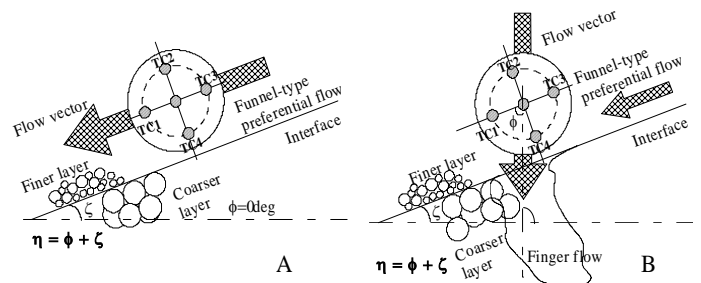


Fig. 5 Schematic view of the flow-direction  $\phi$  detected with QPHP sensor. A: Flow vector parallel to the layer boundary, B: Flow vector which detects gravitational direction



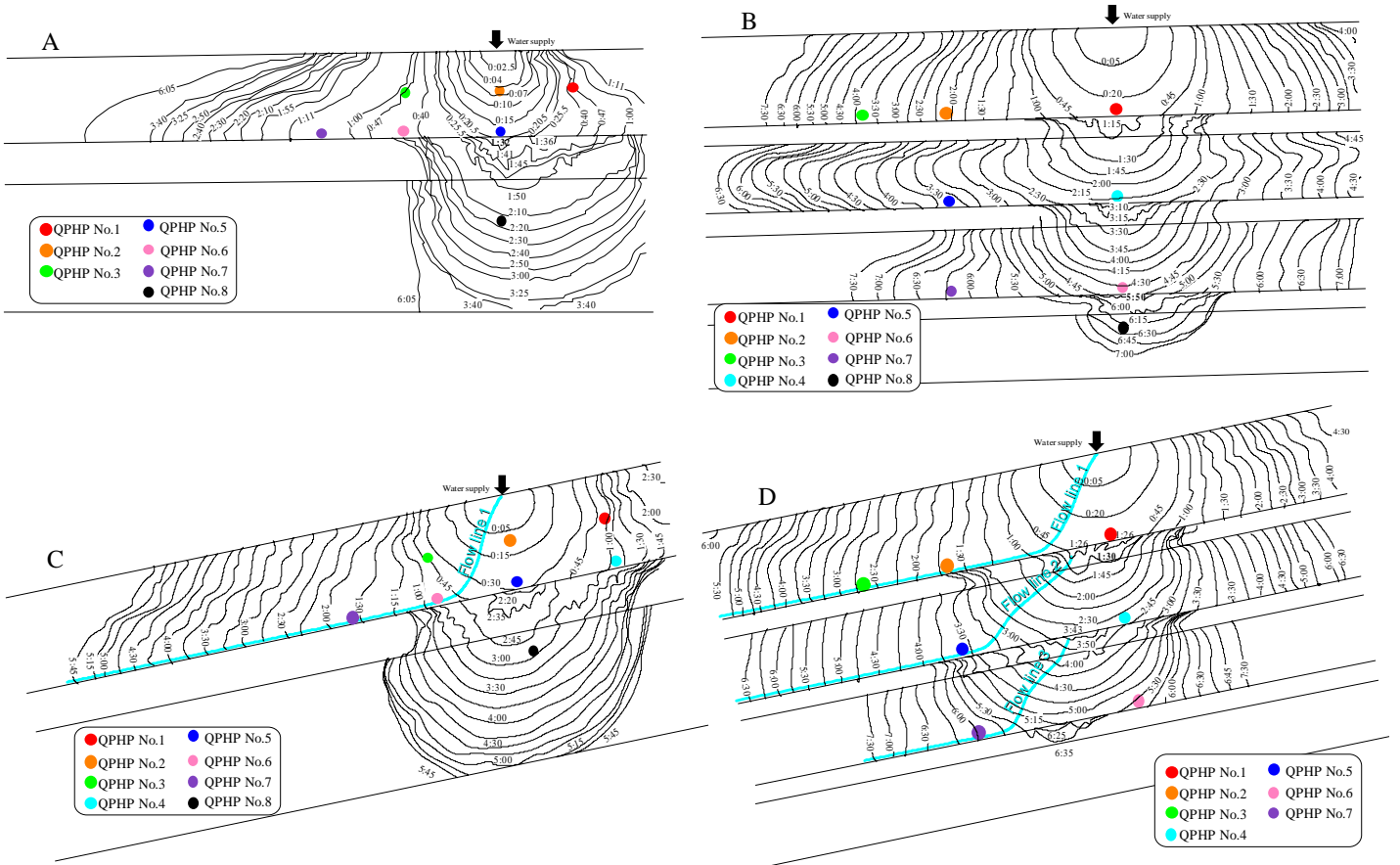


Fig.6 Temporal change of wetting front. A, B, C and D show single layered sand with  $\zeta=0\text{deg}$ , triple layered sand with  $\zeta=0\text{deg}$ , single layered sand with  $\zeta=11.3\text{deg}$  and triple layered sand with  $\zeta=11.3\text{deg}$ , respectively. The colored circles indicate the QPHP sensors. Sensor No.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, and 8 are expressed as red, orange, green, sky-blue, blue, pink, purple, and black, respectively

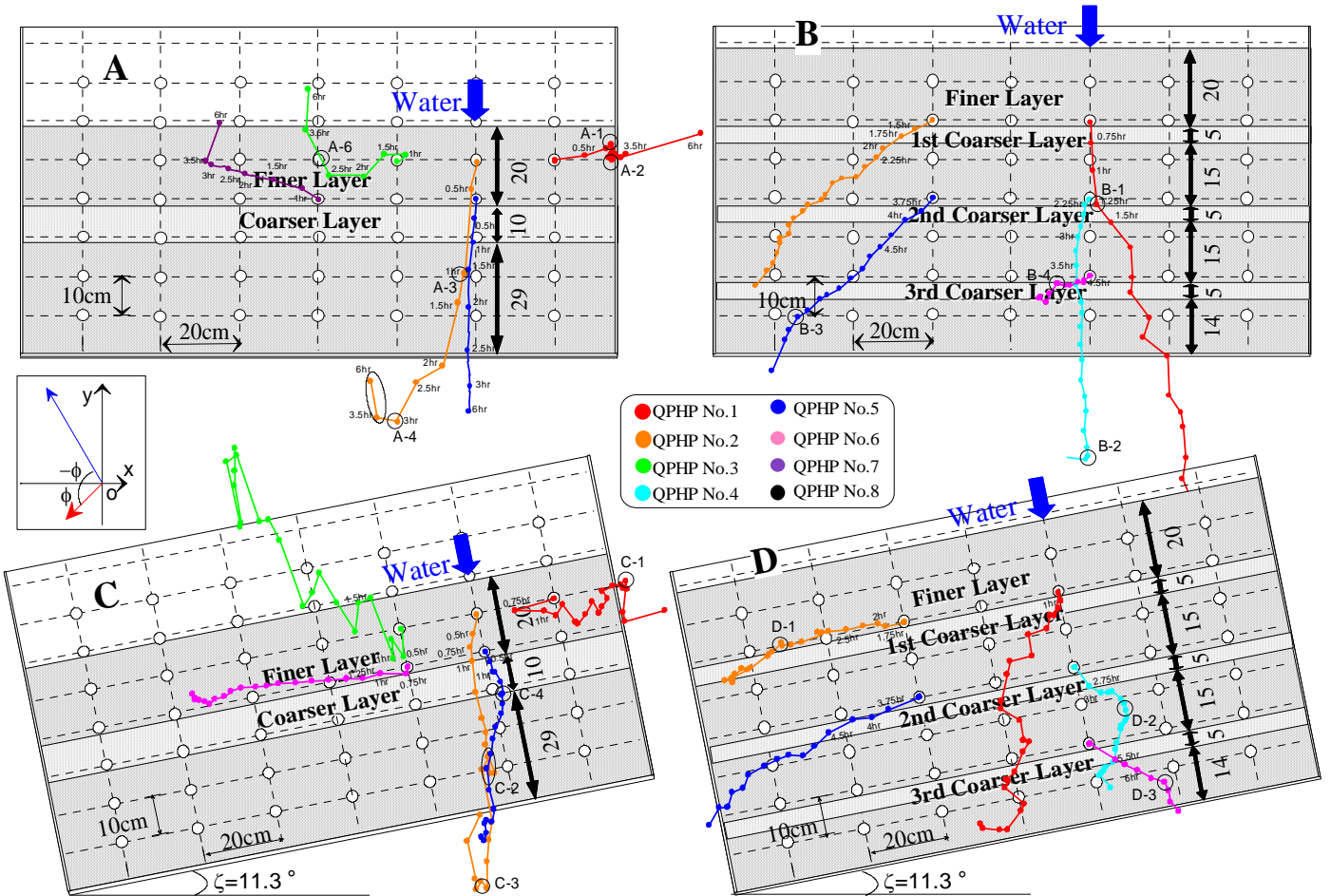


Fig. 7 Temporal changes of cumulative pore water velocity vectors  $\vec{L}_n$ . See the caption of Fig. 6 for the meaning if A, B, C and D

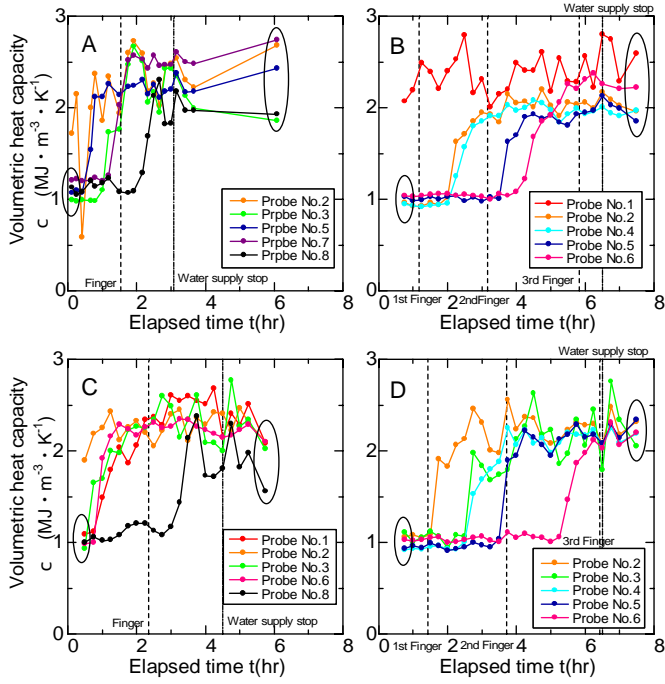


Fig. 8 Temporal changes of volumetric heat capacity  $\rho c$ . See the caption of Fig. 6 for the meaning if A, B, C and D

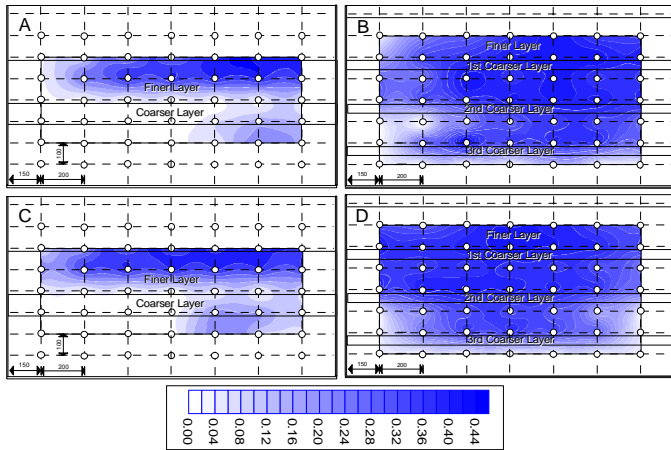


Fig. 9 Measured volumetric water content distribution. A, B, C and D show single layered sand with  $\zeta=0\text{deg}$  (3hr elapsed after stop the water supply), triple layered sand with  $\zeta=0\text{deg}$  (1hr20min elapsed after stop the water supply), single layered sand with  $\zeta=11.3\text{deg}$  (1hr20min elapsed after stop the water supply), and triple layered sand with  $\zeta=11.3\text{deg}$  (1hr20min elapsed after stop the water supply), respectively

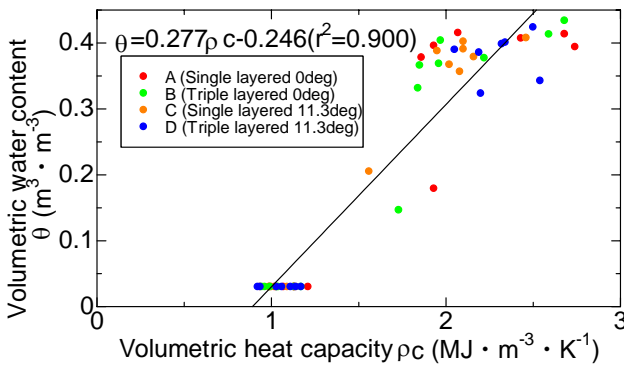


Fig. 10 Relationship between volumetric water content  $\theta$  and volumetric heat capacity  $\rho c$  under no flow condition. See the caption of Fig. 6 for the meaning if A, B, C and D

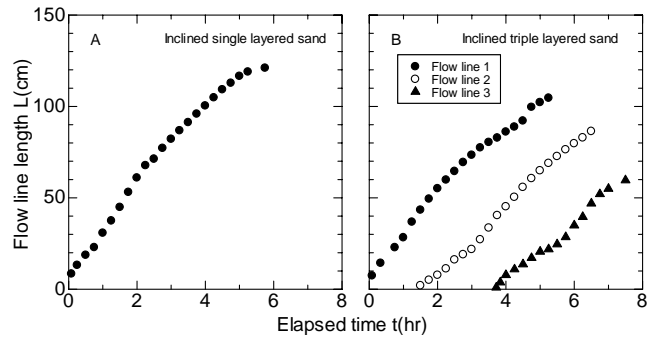


Fig. 11 Temporal changes of cumulative length of flow line. A and B are single layered sand and triple layered sand for  $\zeta=11.3\text{deg}$ , respectively

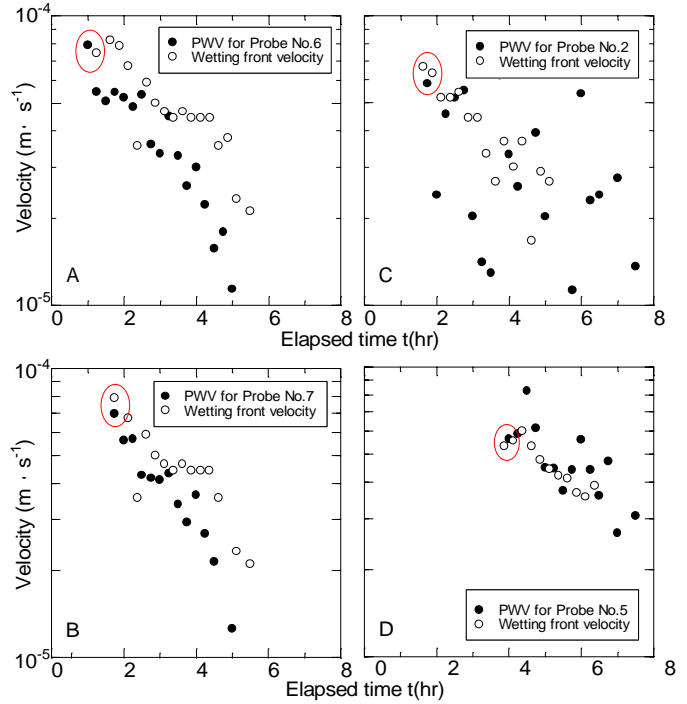


Fig. 12 Relationship between the pore water velocity  $V_w$  with QPHP sensors and the wetting front velocity  $V_f$  for  $\zeta=11.3\text{deg}$ . A and B are single layered sand. C and D are triple layered sand