

熱トレーサー法による多孔質物体中の2次元流体移動 速度ベクトルおよび熱的性質の同時計測法について

Simultaneous Measurement of Velocity Vector and Thermal Properties of Two-Dimensional Flowing Fluid in Porous Materials

○ 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

*The United Graduate School of Agricultural Sciences, Iwate University

**Faculty of Agriculture, Iwate University

キーワード: 計測(measurement), 間隙流速ベクトル(pore water velocity vector), 温度差測定(measurement of differences of temperature), 熱的性質(thermal properties), 鋳物砂(Imono sand)

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 リサイクル生物生産工学講座
環境制御工学研究室 原 道宏, Tel.&Fax.:(019)621-6125, E-mail: mrhara@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

化学肥料や農薬使用による土壌・地下水汚染が、世界中で非常に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、水分移動ベクトル情報を取得する必要がある。多くの研究者が水分フラックス密度の測定や間隙流速(PWV)の推定を行なっている。Dirksen(1972, 1974)は土壌水フラックスメーターを開発した。この装置は、バルブを横切る損失水頭とバルク土壌の損失水頭を測定することにより、土壌水フラックス密度を把握するものである。Byrneら(1967, 1968)は、熱トレーサー法を用いて地下水流を測定するための点熱源および線熱源プローブを開発した。Melville ら(1985)は、実験室において地下水流計を用いることにより水分輸送の解析を行なった。Sisodia ら(1998)もまた、

実験室の砂タンクにおいて、熱感知式フローメーターを使用することにより、水分移動の測定と解析を行なった。最近になって、砂だけでなく、砂質埴壌土や粘土ロームにおける水流の測定と解析が Renら(2000)によって行なわれた。上記研究で適用されている原理は、多孔質体内で発生しているダルシー流を熱の伝導対流分散輸送(heat CCD)に変換することにより、流体輸送特性を把握することにある。多くの研究者が熱トレーサーの実験や、差分法(Sisodia ら, 1998), 数値積分(Ren ら, 2000)を使った水流移動のモデリングを実施してきているが、解析解を使用しての水流移動の測定・解析については知られていない。最近になって、Hara(投稿中)は、Carslaw and Jaeger(1959)の瞬間線熱源における二次元熱 CCD の解をもとに、新しい理論を構築した。

この理論を使用すると、温度上昇の経時変化($\Delta T(t)$)データから、二次元方向の熱前線伝播速度(2-D TFAV)と、流れがある状態の熱的性質を同時に同定することが可能になる。

本測定方法を用い、土壤中を移動する水流の量や輸送方向を定量する測定場面は多岐にわたる。乾燥地域や半乾燥地域においては、蒸発量が降雨量よりも多く、土壤中の水分は総じて下から上へと移動する。もしも、土壤水や地下水中に可溶性塩類が溶存し、それらが上方へと輸送するならば、土壤表面に塩類を集積させ塩類土壌化を引き起こす。適切な土壤管理を行なうため、この測定方法を用いて土壤中の水流を監視することは、土壤管理上重要なモニタリングといえる。また、水稻栽培において、湛水した水田の畦畔や地盤から流出する田面水や、水田付近から流入する湧水の動態を監視することは、水稻の生育管理や適切な施肥量の指標を把握する上で重要なことであり、営農中における農地周辺土壤や地下水の環境評価を行なう点においても意義が大きい。また、山間および中山間地域において、豪雨発生等の災害時に山腹を流下する水流を監視したり、土壤水の間隙水圧を把握したりすることは、当該地域における崖崩れや地すべり等に見られる斜面崩壊の安全性を評価するに際し、重要な水流監視項目となる。また、シラス、ヨナ、アカホヤ等の特殊土壌地帯において、表層付近を流下する水流を監視することは、土壤流亡量を予測し、適切な営農方法を選定するにあたり、農地保全上意義が大きい。

近年から急増している産業廃棄物や一般廃棄物の不法投棄は、廃棄物に接触した水が浸出液となって土壤へと浸潤し土壤汚染を引き起こし、最終的に地下水汚染を引き起こす。また、地下燃料貯蔵タンクに生じた亀裂により、ガソリンなどの揮発性有機

化合物や発ガン性のトリクロロエチレンといった難水溶性有機化合物が地下へと浸出し、広域にわたって地下水が汚染されている実態が明らかになっている。有機塩素化合物等の有機溶剤はその利便性ゆえに金属や衣服などの洗浄用に大量に使用されてきた。特に、トリクロロエチレンやテトラクロロエチレンは、ハイテク産業と呼ばれる半導体製造施設周辺での地下水汚染物質として注意が払われている。さらに、近年になって、最終処分場における遮水工の安全性・信頼性や浸出水処理能力の問題が浮上し、水道水源の汚染が懸念されている事例がある。大気や地表水が汚染される場合、汚染物質が拡散する速度は非常に速い。一方、地圏における地下水の流れは非常に遅いので、汚染物質が移流・拡散する速度も格段に小さくなる。しかし、地下水が一度汚染されると、希釈されるまでに膨大な時間が要求される。このため、地下水汚染に対する抜本的対策が遅れると汚染物質の処理がますます困難になり、処理を必要とする汚染水塊の量も膨大になる。この汚染をいち早く検出するためには、下層土汚染については地下水汚染が予想される層位に、汚染度を測定するためのモニタリングシステムを導入することが必要であり、本測定方法を用いてこれらの水流を監視する意義は極めて大きい。

本研究の目的は、(i)温度上昇の経時変化($\Delta T(t)$)データを取得するための五極子熱パルス(QPHP)センサーを開発すること、(ii)データ $\Delta T(t)$ を TFAV ベクトル(あるいは PWV ベクトル)に変換するために、速度ベクトルの測定方法を開発し、多孔質体中の速度ベクトルおよび流れが存在する状況のもとでの当該多孔質体の熱的性質を同定すること、そして(iii)この測定方法の実験的評価を行なうことである。なお、ここで注意すべき点は、TFAV ベクトルは、水フラックスの強度と水フラックスが作用する方向を含

んでいるということである。

2. 材料および方法

2.1 プローブの設計

QPHPセンサーの基本設計はRenら(2000)のセンサーとは異なり、熱電対ロッドを x 軸方向のみに配置しただけではなく、 y 軸方向にも配置するよう拡張したものである。本センサーは、5本平行に配置した円管ステンレススチール(テルモ社製 SUS304 皮下注射針)から構成され、図 2 に示したように中央ロッドにヒーター(コンスタンタン線)を挿入し、他の 4 本のロッドにクロメル-コンスタンタン熱電対(E 型)を挿入したものである。また、ロッド長は 50mm、ロッド外径は 1.25mm である。E 型熱電対は周囲のロッド内部の空洞に挿入し、熱電対接点部がロッドの中央部に位置するよう配置した(遠藤, 2002a, 2002b)。ヒーターは中央ロッド内部の空洞に挿入し、ロッド全長をヒーター線で埋めた。熱電対とヒーターを適切な位置に配置した後、電気的絶縁、熱伝導性確保およびロッド内部素子の固定を行なうことを目的に、エポキシ樹脂系接着剤(AP-242, セメダイン社製)をロッド内部の空洞に注入した。最後に、外周 4 本の熱電対ロッドと中央の熱源ロッドをハンドル部に接合した。

2.2 ロッド間距離とヒーターの発熱量の較正

プローブのロッド間距離の較正は、室温 20℃のもとで寒天溶液を用いて行なった(Ren ら, 2000)。表 1 に、寒天溶液を用いて較正したロッド間距離とノギスを用いて測定したロッド間距離を示す。単位ロッド長さ当たりのヒーター抵抗値 R/L の較正も寒天溶液中で行い $R/L=315.8\Omega\text{ m}^{-1}$ を得た。

2.3 砂カラムにおける水流実験

図 3 に、カラム砂内の水流の温度上昇を測定するための実験装置概要図を示す。この装置は、砂を充填するためのアクリル製円筒カラム、カラムに水を供給するためのマリOTT給水装置、カラム底部からの総排水量を測定するための重量計から構成される。はじめに、QPHP センサーを直流安定化電源(836-3D, Leader Electronics 社製)とデータロガー(Model 10X, Campbell Scientific 社製)に接続し、QPHP センサーをカラムに挿入した。センサーが ϕ (rad)の角度の流向を検出するためには、QPHP センサーを回転させ角度 ϕ (rad)を設定することにより対応することができる。

1) カラムの準備

風乾した鑄物砂(日瓢珪砂 8 号, 木谷社製)を乾燥密度 1.5kg L^{-1} でカラム内に充填した後、気温が 20℃一定の実験室内において水道水をカラム底面から毛管上昇浸潤をさせた。その後、カラム内の砂が水分飽和状態に達したことを確認した。

2) DPHP 法による熱的性質の比較測定

まず、水流のない状態において、ヒーターロッドから 20s の期間($-10\text{s}<t<10\text{s}$)、熱パルスを発生させ、データ $\Delta T(t)$ を 1s 間隔で 300s 測定した。熱電対位置 TC1 および TC2 におけるこの $\Delta T(t)$ のデータから、カラム内の砂の熱的性質を双極熱パルス(DPHP)法により推定した。測定により取得した $\Delta T(t)$ のデータは Bristow ら(1995)によって提案された重みつき非線形回帰(WNMF)を使用して解析し、水分飽和状態における砂の温度拡散係数と体積熱容量を求め、QPHP 法による測定との比較に用いることとした。

3) QPHP 法による間隙流速ベクトルと熱的性質の測定

マリOTTの水をカラム上面に供給し、カラム底部からの排出水流量を測定し、流れが定常であることを確かめた(水流は鉛直下向きである)。水フラックス強度 q_w のレベルは $1 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ の範囲で $1 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ おきに測定しそれを LV-1~5 と名づけた。また、矩形熱おある巢の時間幅は $10 \sim 30 \text{ s}$ の範囲で 5 秒間隔で測定し PW-1~5 と名づけた。詳細な設定値は表 2 に示した。定常状態のもとで熱パルスを発生した後、温度上昇 ΔT と電圧差 ΔE を 300 s 測定した。温度上昇 ΔT は TC1 と TC2 において、それぞれ ΔT_1 と ΔT_2 として測定した。また、熱電対位置 TC1 および熱電対位置 TC3 間の電位差 $\Delta E_{1-3} (\Delta E_1 - \Delta E_3)$ と、熱電対位置 TC2 および熱電対位置 TC4 間の電位差 $\Delta E_{2-4} (\Delta E_2 - \Delta E_4)$ を測定した。 ΔE を ΔT に変換するためには、 ΔE を E 型熱電対の熱電能 ($0 \sim 40^\circ \text{C}$ の温度範囲において $S = 0.0605 \text{ mV}$, 佐々木(1977))で除すことにより、 ΔT_{1-3} と ΔT_{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 $\Delta T_2(t) - \Delta T_4(t) = \Delta T_{2-4}$ と求められる。和温の経時変化 ($\Delta T_1(t) + \Delta T_3(t)$ および $\Delta T_2(t) + \Delta T_4(t)$) は次式から求めた。

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

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

この測定方法で重要なことは、計算に用いる $\Delta T_1 - \Delta T_3$ を精度良く測定することであり、そのため、 $\Delta T_1 - \Delta T_3 = T_1 - T_3$ であることに着目し、 $\Delta T_{1-3} = T_1 - T_3$ を、上述のような差動式回路を用いて ΔE を精度良く測定することにより、精度の高い ΔT_{1-3} のデータを得た。また、 ΔT_{2-4} についても同様である。

次に、上述した実験方法の手順に従い、 $t_0 = 20 \text{ s}$ のもとで $\phi = 0 \text{ rad}(0^\circ)$, $\pi/8 \text{ rad}(22.5^\circ)$, $\pi/4 \text{ rad}(45^\circ)$, $3\pi/8 \text{ rad}(67.5^\circ)$ および $\pi/2 \text{ rad}(90^\circ)$ における $\Delta T(t)$ を測定した。カラム内水分飽和砂の体積含水率 θ は、水流実験終了後、重量法を用いて

測定した。熱前線伝播速度 (TFAV) u は、カラム内流量 q_w , 体積含水率 θ および体積熱容量 ρc を使うことにより計算により求めた。表 3 に、DHPH 法を用いて測定した熱的性質 (TFAV=0 (水流なし), $\phi = 0 \text{ rad}(0^\circ)$ の条件) を示す。

2.4 QPHP法における間隙流速ベクトルおよび熱的性質の計算手順

測定すべき速度ベクトル U を次のようにおく。

$$U = (u_x, u_y), \quad u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}, \quad [3]$$

$$u_x = u \cdot \cos \phi, \quad u_y = u \cdot \sin \phi$$

z 軸に置かれた瞬間線熱源から単位長さ当たりの熱量 q が発生したときに形成される温度分布は次式で表される。

$$\Delta T(x, y, t) = \frac{q}{4\pi \rho c k t} \exp \left[-\frac{(x - u_x \cdot t)^2 + (y - u_y \cdot t)^2}{4\kappa t} \right] \quad [4]$$

ここに、 ΔT : 初期温度からの温度上昇(K), (x, y) : 座標(m), t : 経過時間(s), q : 単位長さ当たりの発生熱量(J m^{-1}), ρc : 多相系における土壌の体積熱容量($\text{J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$), κ : 温度拡散係数($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)である。

計算手順1 ロッド位置の相対誤差の算出

図1に示した TC1 (x, y)~TC4 (x, y)の各ロッド位置の座標を次のように表す。

$$\left. \begin{aligned} TC1(x, y) &= (r_1, 0) \\ TC2(x, y) &= (0, r_2) \\ TC3(x, y) &= (-r_3, 0) \\ TC4(x, y) &= (0, -r_4) \end{aligned} \right\} \quad [5]$$

式[6]により平均ロッド間距離 r を計算し、相対誤差 $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_4$ を式[7]のように求めると、これらは式[8]の関係を満たす。

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

$$\varepsilon_1 = \frac{r_1}{r} - 1, \quad \varepsilon_2 = \frac{r_2}{r} - 1, \quad [7]$$

$$\varepsilon_3 = \frac{r_3}{r} - 1, \quad \varepsilon_4 = \frac{r_4}{r} - 1$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 = 1 \quad [8]$$

計算手順2 無次元数 H と正規化ベクトル($\cos\phi$, $\sin\phi$)の算出

測定により得られた $\Delta T_1(t) \pm \Delta T_3(t)$, $\Delta T_2(t) \pm \Delta T_4(t)$ を用いて無次元数 $H = r \cdot u / 2\kappa$ の x, y 成分 H_x, H_y を次のように計算する。

$$H_x = \lim_{1/t \rightarrow 0} \left[\tanh^{-1} \left(\frac{\Delta T_1(t) - \Delta T_3(t)}{\Delta T_1(t) + \Delta T_3(t)} \right) \right] / \left(1 + \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \right) \quad [9]$$

$$H_y = \lim_{1/t \rightarrow 0} \left[\tanh^{-1} \left(\frac{\Delta T_2(t) - \Delta T_4(t)}{\Delta T_2(t) + \Delta T_4(t)} \right) \right] / \left(1 + \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_4}{2} \right) \quad [10]$$

これより, $H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$ を求め, 正規化速度ベクトルを次式により求める。

$$(\cos\phi, \sin\phi) = \left(\frac{H_x}{H}, \frac{H_y}{H} \right) \quad [11]$$

計算手順3 瞬間発熱を想定した諸量の推定値の算出

温度拡散係数 κ を次の方法により求める。強さ $q(W \cdot m^{-1})$ の矩形熱パルスを $-t_0/2 < t < t_0/2(s)$ の期間発生したときに得られる温度上昇の相乗平均 $\Delta T(t) = \sqrt[4]{\Delta T_1(t) \cdot \Delta T_2(t) \cdot \Delta T_3(t) \cdot \Delta T_4(t)}$ のピーク出現時刻 $t_m(s)$ を求める。矩形熱パルスの $1/2$ 幅に対する t_m の比を m とし, これを用いて n を式[13]により求める。

$$m = \frac{t_0/2}{t_m} \quad [12]$$

$$n = \frac{(1-m^2) \ln \left(\frac{1+m}{1-m} \right) \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2m}{\sqrt{1-m^2} \ln \left(\frac{1+m}{1-m} \right)} \right)^2 \left(1 + \frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2}{4} \right) H^2} \right)}{2m \left(1 + \sqrt{1 + \left(1 + \frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2}{4} \right) H^2} \right)} \quad [13]$$

$t=0$ において強度 $Q=q \cdot t_0(J \cdot m^{-1})$ の瞬間発熱をしたときに得られるであろう $\Delta T(t)$ のピーク出現時刻 t_m' およびそのピーク値 $\Delta T_m'$ をそれぞれ式[14], [15]により推定する。

$$t_m' = n \cdot t_m \quad [14]$$

$$\frac{\Delta T_m'}{\Delta T_m} = \frac{t_m'}{t_0} \exp \left(\sqrt{1 + \left(1 + \frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2}{4} \right) H^2} \right) \int_{t_m' - \frac{t_0}{2}}^{t_m' + \frac{t_0}{2}} \frac{1}{t} \exp \left[-\frac{1}{2} \left[\frac{t}{t_m'} \left(\sqrt{1 + \left(1 + \frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2}{4} \right) H^2} - 1 \right) + \frac{t_m'}{t} \left(\sqrt{1 + \left(1 + \frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2}{4} \right) H^2} + 1 \right) \right] \right] dt \quad [15]$$

計算手順4 $\kappa, \rho c, u$ および V_w の算出

t_m' と H から温度拡散係数 κ は

$$\kappa = \frac{r^2 \left(1 + \frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2}{4} \right)}{2 t_m' \left(1 + \sqrt{1 + \left(1 + \frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2}{4} \right) H^2} \right)} \quad [16]$$

と求められる。

体積熱容量 ρc を次式により求める。

$$\rho c = \frac{q}{4 \pi \kappa \Delta T_m' t_m'} \cdot \frac{\exp \left(\frac{1}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) H \cos\phi + \frac{1}{4} (\varepsilon_2 - \varepsilon_4) H \sin\phi \right)}{\exp \left(\sqrt{1 + \left(1 + \frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2}{4} \right) H^2} \right)} \quad [17]$$

熱前線伝播速度(TFAV) u を式(18)により求める。

$$u = \frac{2 H \kappa}{r} \quad [18]$$

TFAV の x, y 成分(u_x, u_y)は先に示した定義式[3]から求められる。

最後に, TFAV と PWV の関係式 (Melville ら (1985); Ren ら(2000))を用い, PWV を式[19]により求める。

$$V_w = \frac{u \cdot \rho c}{\theta \cdot (\rho c)_w} \quad [19]$$

ここに, θ :体積含水率($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), V_w :間隙流速(m s^{-1}), $(\rho c)_w$:間隙水の体積熱容量である。

3. 結果および考察

3.1 温度の経時変化の特徴

図 4-1 と 4-2 にそれぞれ, 温度上昇の差 $\Delta T_{1-3}(t)$ (以下, 差温と呼ぶ)の経時変化と温度上昇の和 $\Delta T_{1+3}(t)$ (以下, 和温と呼ぶ)の経時変化を示す。この図 4 は, 発熱量 $q=400 \text{ W m}^{-1}$, 熱パルス発生時間 $t_0=10 \text{ s}$ の条件において, TC1 および TC3 の計測データを用いた $\Delta T(t)$ の間隙流速依存性を表したグラフである。差温の経時変化においては, 最大温度差出現時刻 t_m および最大温度変化 ΔT_m は間隙流速の大小に依存したが, 和温の経時変化の t_m や ΔT_m は間隙流速の大きさ依存しなかった。 $\Delta T_{1-3}(t)$ のグラフから, もしも $\text{PWV}=0$ かつ $r_1=r_3$ の条件が与えられているならば, 差温の経時変化の値は時間に依存することなく, 常にゼロになると考えられる。 $\text{PWV}=0$ の条件において, 差温の絶対値の最大値が負の値を示す理由は, ロッド間距離 r_1 が r_3 よりも大きいからである。この差温の経時変化は, 熱パルス発生後, 急激に減少して最小値に達した。このことは, 熱源ロッドから放出された熱が水流に乗り, TC3 側へ熱が多く輸送されたためであると考えられる。その後 ΔT_{1-3} は, 急激に増加して最大値へと到達する(あるいは, そのままゼロへと収束する)傾向にあった。このことは, TC3 側の温度が低下し, TC3 側の温度が TC1 側の温度に近くなったためである。一方, 和温の経時変化は差温のそれとは異なり, 熱パルスを発生したあと急激に増加して最大値に到達した後, 緩慢に減少しゼロへと収束していく傾向にあった。

3.2 無次元数(差温と和温の比の双曲型逆正接)と経過時間の逆数($1/t$)の関係

図 5 に, 発熱量 $q=400 \text{ W m}^{-1}$, 熱パルス発生時間 $t_0=10 \text{ s}$ の条件($\phi=0 \text{ rad}$)のもとで測定した(差温/和温)の双曲型逆正接と経過時間の逆数の関係を示す。●は ΔT_{1-3} の計測データを用いたデータポイントであり, ○は ΔT_{2-4} の計測データを用いたデータポイントである。これらのデータ群は, 図 4-2 に示した和温の最大値付近に出現する連続データを抽出したものである。最大値のデータから ± 15 個の連続データ(すなわち最大値のデータを含み 31 個のデータ)を抽出したものであり, x 軸に $1/t$ をとると, これらのデータはほぼ直線で表された。直線の切片(すなわち, H_x と H_y)を求めるため, これらのデータを $1/t$ でフィッティングし, $H_x=0.2902$, $H_y=-4.75 \times 10^{-3}$ を得た。これらの無次元数より H および正規化速度ベクトルを計算により求めた。

3.3 熱パルス発生時間が速度ベクトルと熱的性質の測定値に及ぼす影響

図 6A-1 および同図 A-2 に, $\phi=0(\text{rad})$ における流下水総量の増加速さから求めた間隙流速(PWV)ベクトルと, QPHP センサーにより求めた間隙流速ベクトルの比較図を示す。同図 A-1 は, 流下水総量の増加速さから求めた間隙流速(以下, 実測値と呼ぶ)と, 今回採用した QPHP センサーにより測定した間隙流速(以下, 同定値と呼ぶ)の比較図であり, 同図 A-2 は, 流向 ϕ の間隙流速依存性を示している。ここで, 図 6A-1 に示した熱パルス発生時間ごとの PWV の同定値と実測値との比較を行なう。 $t_0=20 \text{ s}$ における小 PWV 範囲を除く全てのデータポイントは $\pm 20\%$ の誤差範囲以内であった。 $\text{PWV}>4.0 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ の範囲では, $\pm 20\%$ の誤差範囲で実測

PWV が同定 PWV と非常に良く一致した。[13]で求めたパラメータ n は、 t_0 の熱パルス発生時間のもとで出現する t_m を、 $t_0=0$ (すなわち瞬間熱源)のもとで出現する t_m に相当させるために導入したパラメータである。以上の結果のように、PWV が t_0 の大小に依らず、実測値≒同定値になった原因は、このパラメータ n を導入したからだと考えられる。図 A-2 は流向の間隙流速依存性を示したグラフである。同定した ϕ はゼロになると予想したが、低 PWV (例えば $PWV \approx 1.5 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$) において実際に同定した ϕ はゼロを大きく上回った。同定した ϕ は PWV の増加とともに減少する傾向にあった。この結果で重要なことは、 ϕ が PWV の大小による影響を受け、正確な流向を同定しやすい PWV の大きさが存在するということである。鋳物砂の場合においては、 ϕ を 5(deg)以内の誤差に収束させるためには、 $PWV > 5.0 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ のもとで $\Delta T(t)$ を測定することが必要である。したがって、比較的大きな PWV の条件においては、本方法を使用することにより、PWV を精度良く同定することが可能である。

図 6A-3, A-4 および A-5 にそれぞれ、温度拡散係数、体積熱容量および熱伝導率の間隙流速依存性を示す。PWV=0 (すなわちゼロフラックス)における熱的性質は DPHP 法を用いて測定した。一方、PWV>0 における熱的性質は QPHP センサーを用いて $\Delta T(t)$ を測定し、[16], [17]を使って計算により求めたものである。ここで、PWV=0 のもとで測定した熱的性質と、QPHP 法を用いて求めた熱的性質の同定値を比較する。温度拡散係数 κ において、PW-1, PW-2 および PW-3 は $\pm 5\%$ 誤差範囲で PWV=0 の条件で測定した κ と良く一致し、PW-4 および PW-5 は $\pm 10\%$ 誤差範囲で PWV=0 の条件で測定した κ と一致した。一方、体積熱容量 cp において、PW-1, および PW-2 は $\pm 5\%$ 誤差範囲で

PWV=0 の条件で測定した cp と非常に良く一致し、PW-3 ($PWV=1.46 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ を除く)、PW-4 および PW-5 は $\pm 10\%$ 誤差範囲で PWV=0 の条件で測定した cp と一致した。

3.4 流向の種類が流速ベクトルと熱的性質の測定値に及ぼす影響

PWV ベクトルの実測値と PWV ベクトルの同定値をそれぞれ、図 7B-1 と B-2 に示す。また、同図 B-3, B-4 および B-5 に、DPHP 法を用いて測定した熱的性質と、QPHP 法を用いて測定した熱的性質の比較図を示す。小 PWV 範囲を除くほとんどのデータポイントは、 $\pm 20\%$ 誤差範囲に存在した。いくつかのデータポイントが $\pm 20\%$ の範囲外にあったことから、低流速範囲において PWV を正確に同定することは難しいと考えられる。しかし、 $\pm 20\%$ 誤差範囲にあったデータポイントは、PWV の実測値の増加 (特に、 $PWV > 5.0 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$) とともに PWV の同定値が $\pm 10\%$ の誤差範囲に存在する傾向にあった。ここで重要なことは、QPHP 法を用いて PWV を同定する本方法は、5 つの種類の流向 ϕ によって影響を受けることはなく、比較的大きな流速が作用する状況において、PWV を正確に同定することができるということである。図 7B-2 に流向 ϕ の同定値の PWV 依存性を表した比較図を示す。小～中程度の PWV において、 ϕ の同定値は ϕ の設定値と良く一致しなかった。特に、22.5(deg)の ϕ の同定値は、 ϕ の実測値の二倍近い値を示した。しかし、大きい PWV の範囲における ϕ の同定値は、 ϕ の実測値と比較的良く一致した。したがって、この測定方法は、比較的大きな流速が発生しているもとで PWV ベクトルを正確に同定することができると考えられる。

図 7B-3, B-4 および B-5 にそれぞれ、温度拡散係数、体積熱容量および熱伝導率の実測値と同定値

の比較図を示す。同定した熱的性質は、 $\pm 10\%$ 誤差範囲にあったことから、同定値の熱的性質を信頼することができる。温度拡散係数のデータポイントは $\phi=90(\text{deg})$ を除き $\pm 5\%$ 誤差範囲にあり、体積熱容量は $\phi=0(\text{deg})$ を除き $\pm 5\%$ 誤差範囲にあった。体積熱容量は体積含水率の一次関数で表すことができる。流れの場合において、QPHP 法を用い熱的性質を測定すれば、 $\theta(\text{pc})$ より体積含水率の値を推定することができる。すなわち、本測定方法と QPHP センサーを用いることにより、TDR センサーを使用せずとも体積含水率を知ることができる。以上の結果から、本方法は、多孔質体中に速度ベクトルが作用している状況下においても、多相系の熱的性質を正確に同定することができる画期的な方法であると言える。

4. おわりに

筆者らは、Hara(投稿中)の理論をもとに、流れの場のカラム砂において、間隙流速(PWV)ベクトルと熱的性質を同時に同定することを目的に、QPHP センサーを開発し、本センサーの熱電対ロッドで温度上昇(差温の経時変化と和温の経時変化)を測定し、PWV ベクトルを測定する方法を考案し、PWV ベクトルと熱的性質の同時測定を行なった。[11]および[18]に表した PWV ベクトル情報と、[16]および[17]に表した土壌の熱的性質は、一次元方向の砂カラムにおける水流実験を遂行することにより、比較的容易に、そして正確に同定することができた。PWV ベクトルの同定値は、 $\pm 20\%$ 誤差範囲において PWV ベクトルの実測値と良く一致した。また、本方法を用い、多孔質体中に流体が流れている状況において、当該多孔質体の熱的性質を非常に良い精度で測定することができた。以上のことから、化学肥料や農薬のような土壌中を流下する汚染流体の輸送状況を把握することは、本方法を用いることにより

可能になると考えられる。将来的には、QPHP センサーと TDR センサー(みかけの比誘電率とインピーダンスを同時に測定することが可能)との併用により、汚染流体における物質の同定や、その濃度を定量することが可能になると期待される。

引用文献

- Bristow, K.L., J.R. Bilskie, G.J. Kluitenberg, and R. Horton 1995. Comparison of techniques for extracting soil thermal properties from dual-probe heat-pulse data. *Soil Sci.* 160:1-7.
- Byrne, G.F., J.E. Drummond, and C.W. Rose. 1967. A sensor for water flux in soil. "Point source" instrument. *Water Resour. Res.* 3:1073-1078.
- Byrne, G.F., J.E. Drummond, and C.W. Rose. 1968. A sensor for water flux in soil. 2. "Line source" instrument. *Water Resour. Res.* 4:607-611.
- Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. 1959. *Conduction of heat in solids*. 2nd ed. Oxford Univ. Press, London
- Dirksen, C. 1972. A versatile soil water flux meter, p.425-442. *In Proc.2nd Symp. on Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*, Vol.2. IAHR, ISSS, Guelph, Ontario, Canada
- Dirksen, C. 1974. Field test of soil water flux meters. *Trans. ASAE* 17:1038-1042.
- Melville, J.G., F.J. Molz, and O. Güven. 1985. Laboratory investigation and analysis of a ground-water flowmeter. *Ground Water* 23:486-495.
- Ren T., K. Noborio, R. Horton. 1999. Measuring soil water content, electrical conductivity, and thermal properties with a thermo-time domain reflectometry probe. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:450-457.
- 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.

Sisodia, S., O.J. Helweg, and Fellow, ASCE. 1998. Modeling the heat sense flowmeter. J. of Irrigation and Drainage. Engineering. 124-3:148-151.

遠藤明 2002 サーモ TDR プローブを用いた土壌の熱的性質の測定 -プローブの熱電対位置の相違が熱的性質の測定値に及ぼす影響- 農業土木学会論文集 222:653-658

遠藤明 2002 双極熱パルス法を適用した土壌熱特性の測定に関する研究 -プローブのロッド長および熱電対位置の相違が熱的性質の測定値に及ぼす影響- 農業土木学会論文集 222:659-664

佐々木正治 1977 実用温度測定 (財)省エネルギーセンター p.97

Figure and Table

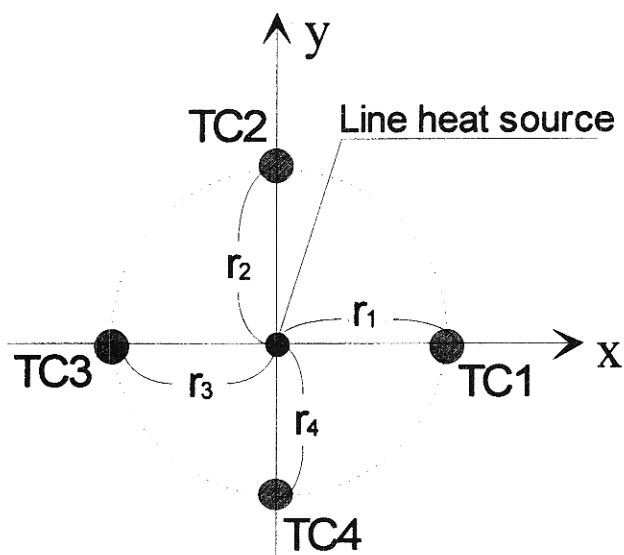


Fig. 1. Location of rod positions (TC1, TC2, TC3 and TC4) and spacing (r_1 , r_2 , r_3 and r_4) between heater rod (origin at $\{x, y\} = \{0, 0\}$) and outer rods.

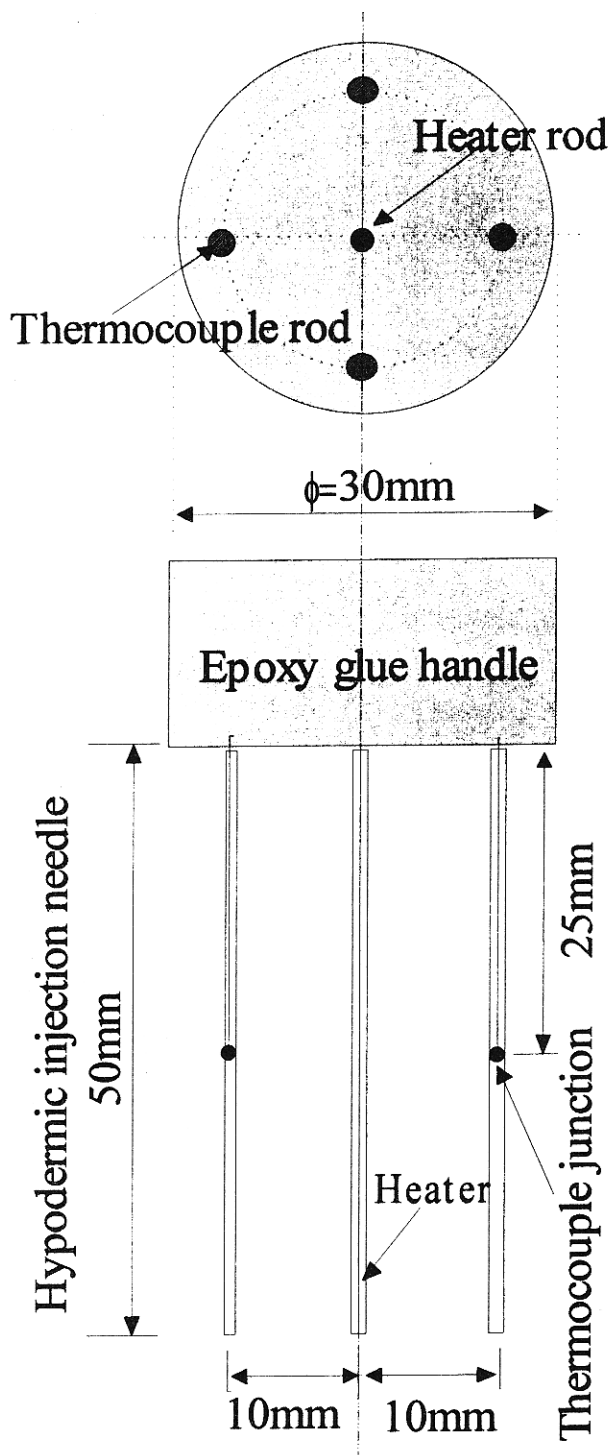


Fig. 2. Schematic view of the QPHP Probe. Heater exist in the center rod in 50mm length. Thermocouple junction was located at half of rod length. Heater rod-to-thermocouple rod spacing (10mm) was averaged from r_1 , r_2 , r_3 and r_4 expressed in **Fig. 1**.

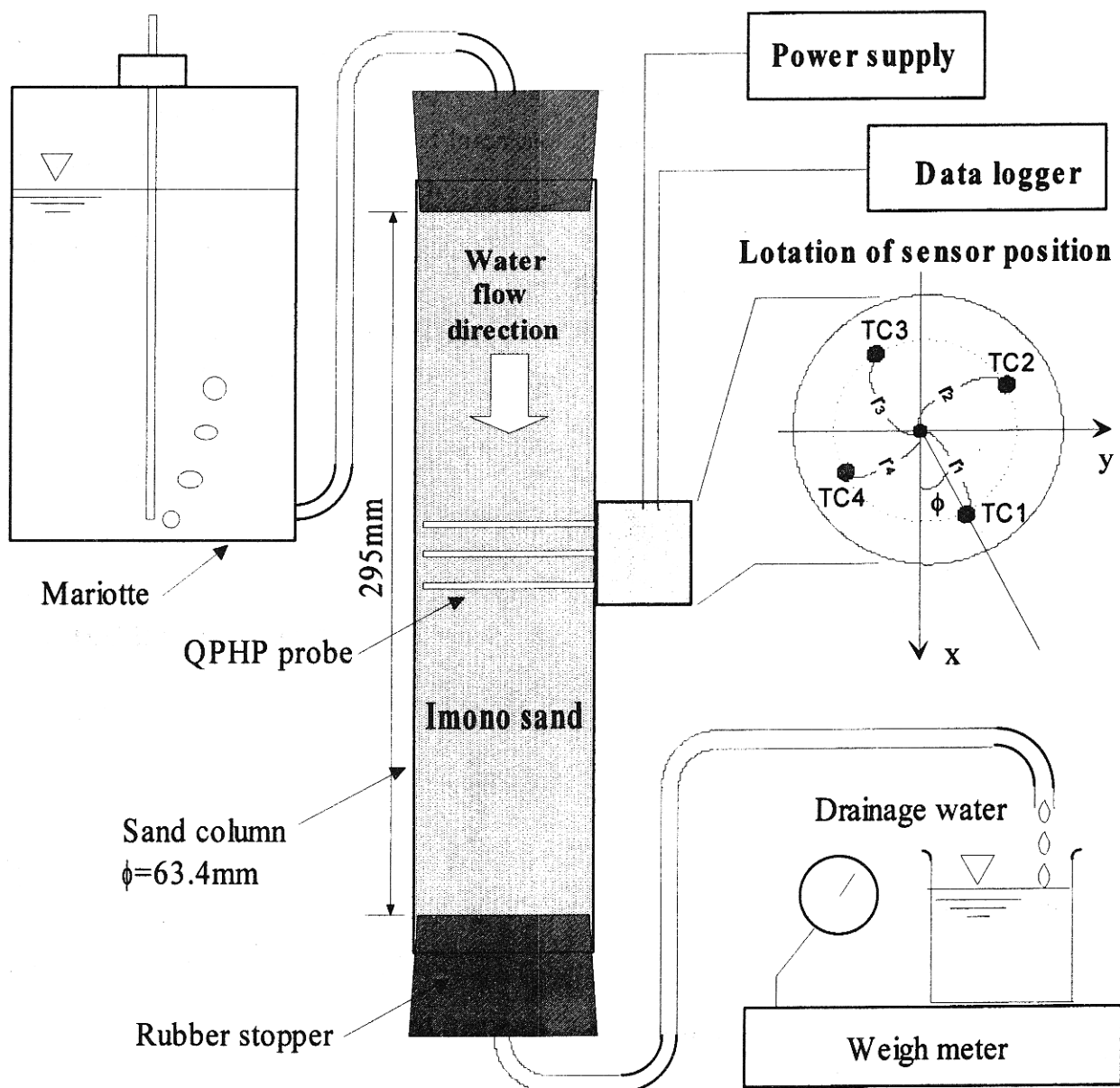


Fig. 3. Schematic view of the experimental setup (not drawn to scale) for measurement of temperature change with time.

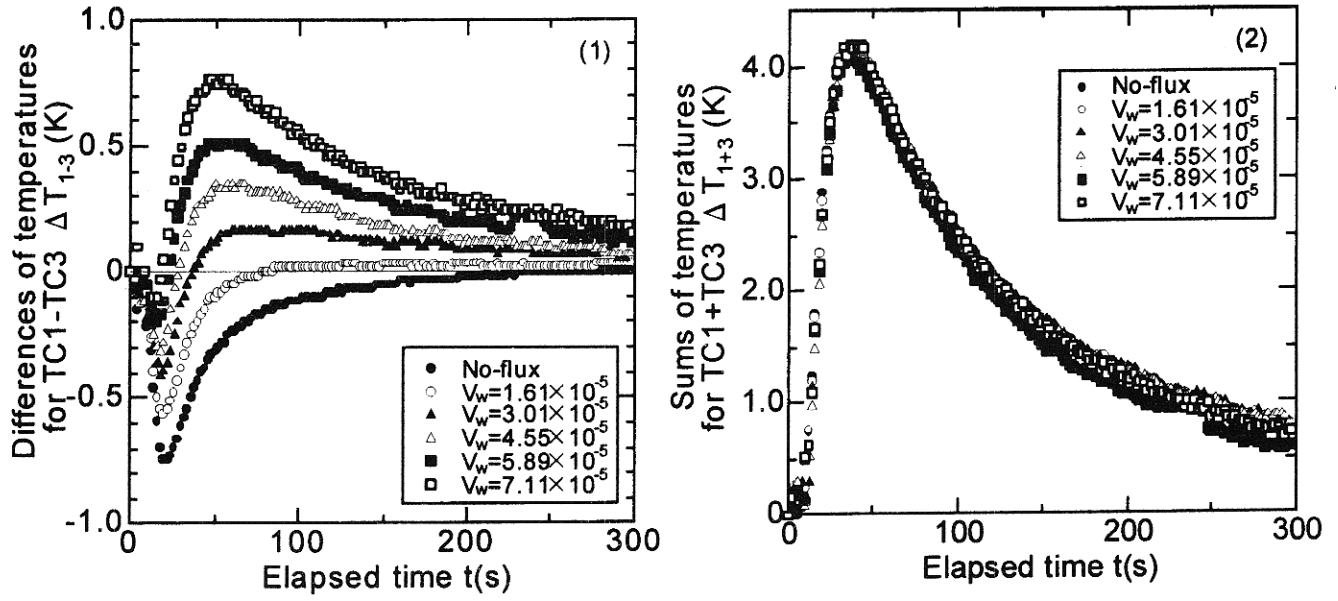


Fig. 4. Temporal change for differences of temperature change measured between TC1 and TC3 (ΔT_{1-3}) under $\phi=0$ (1). Temporal change for sums of temperature change measured at same position (ΔT_{1+3}) under $\phi=0$ (2). No-flux and five cases of PWV were imposed on measurement.

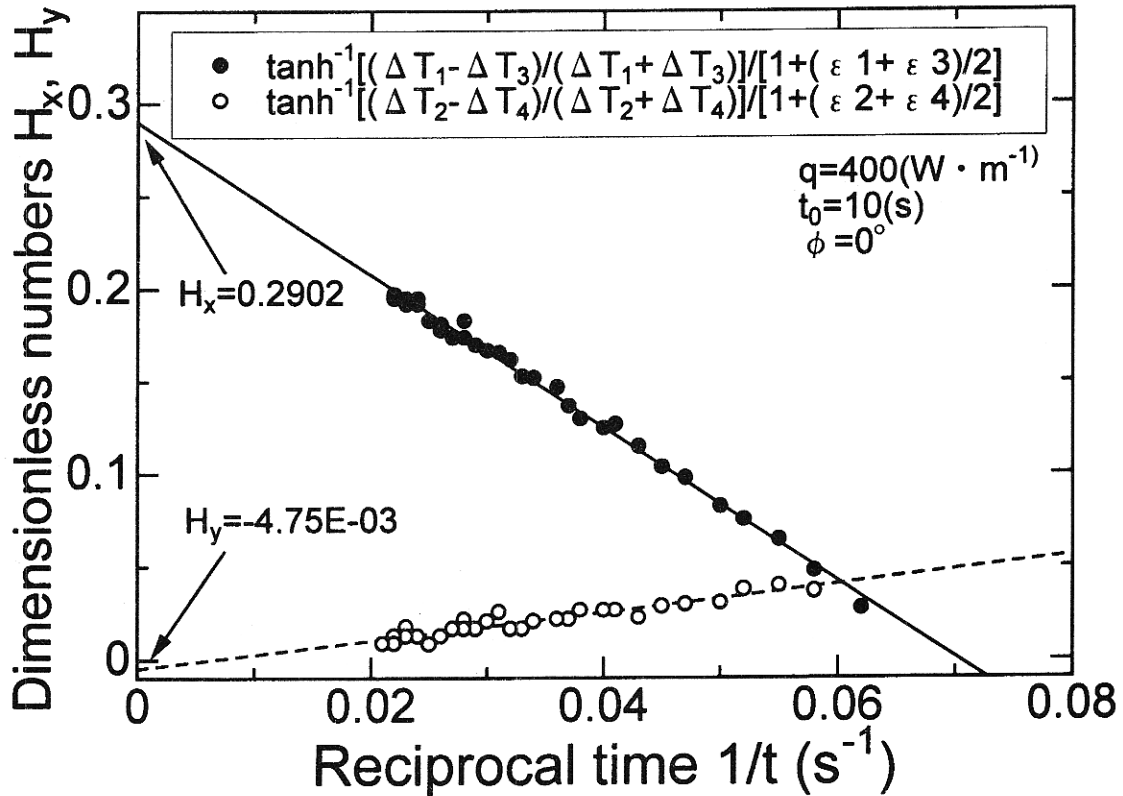


Fig. 5. Relationship between reciprocal time $1/t$ and dimensionless numbers H_x , H_y . The closed circle and opened circle are ΔT_{1+3} data and ΔT_{1-3} data, respectively.

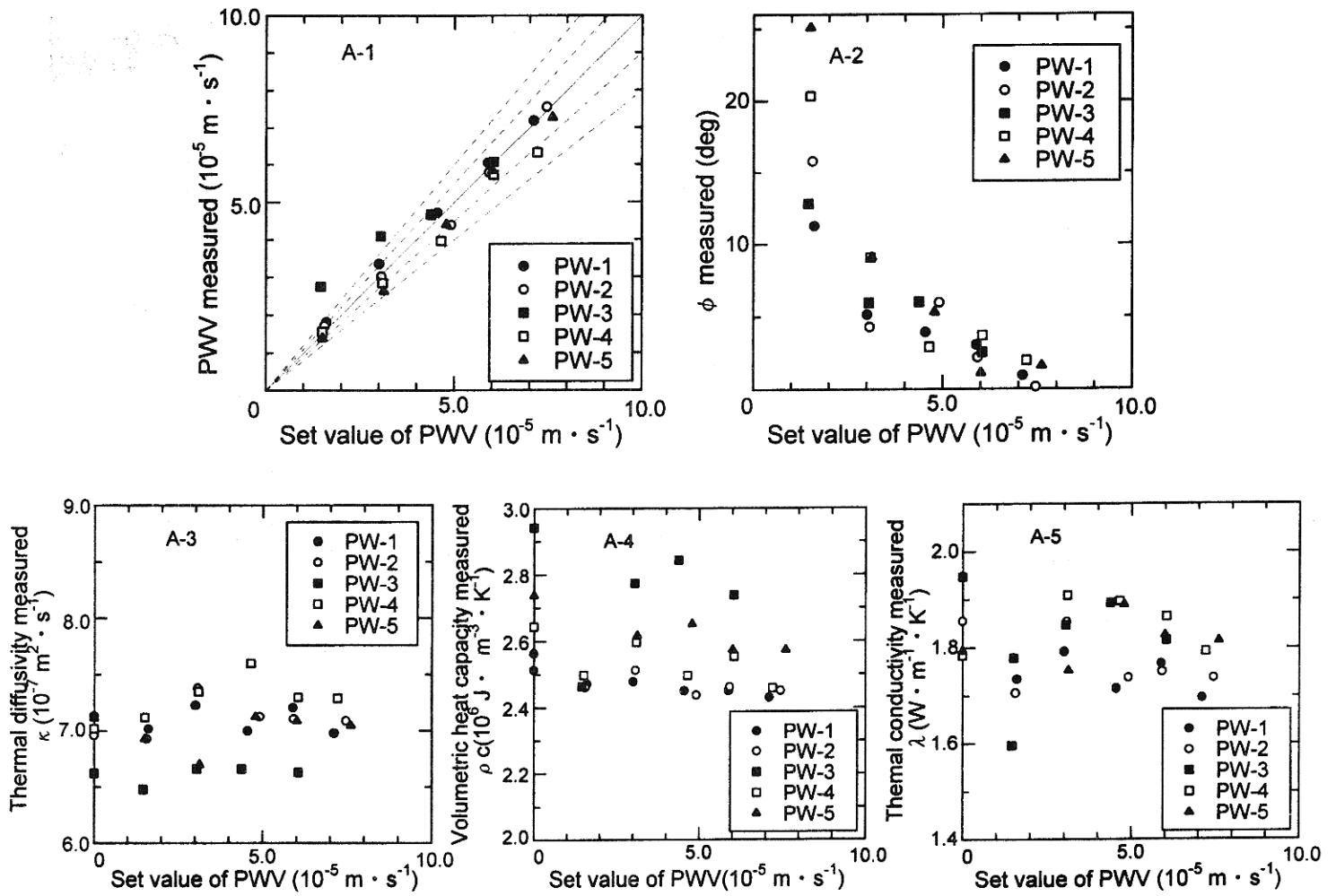


Fig. 6. Relationship between measured PWV vector and identified PWV vector under $\phi=0(\text{rad})$ (A-1, A-2). Relationship between measured thermal properties and identified thermal properties (A-3, A-4, A-5). Thermal properties under PWV=0 were measured by using DPHP technique.—, ---- and represented the exact (1:1 line), $\pm 10\%$ error from exact and $\pm 20\%$ error from 1:1 line, respectively.

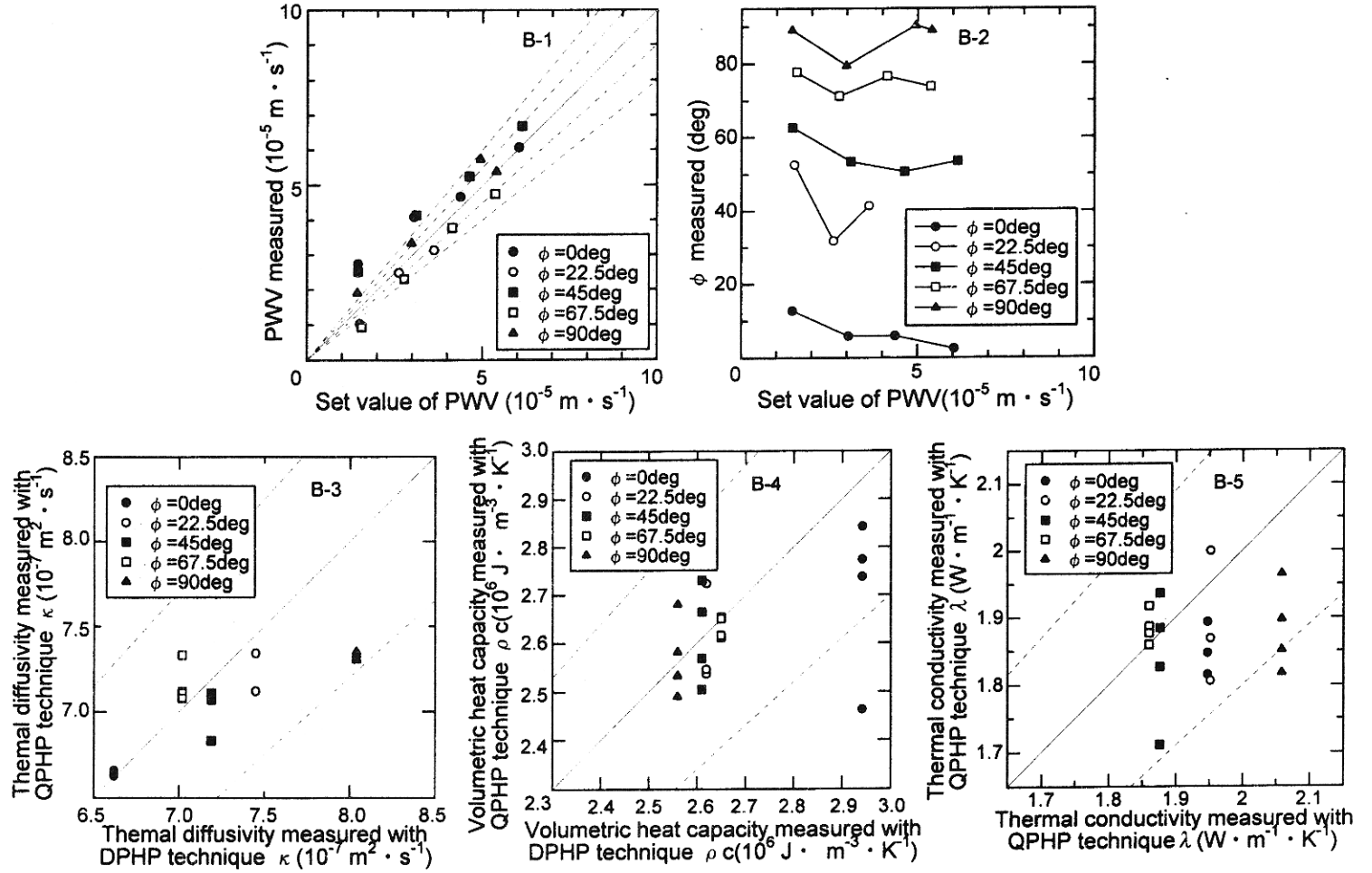


Fig. 7. Relationship between measured PWV vector and identified PWV vector under $0 < \phi < \pi/2$ (rad) at $t_0 = 20\text{s}$ (B-1, B-2). B-3, B-4 and B-5 represented the relationship between measured thermal properties and identified thermal properties. Thermal properties under PWV=0 were measured by using DPHP technique. —, - - - - and - · - · - represented exact (1:1 line), $\pm 10\%$ error from exact and $\pm 20\%$ error from 1:1 line, respectively.

Table 1 Calibrated rod-to-rod spacing and that of measured by using micrometer.

Calibration/Measurement	r_1	r_2	r_3	r_4
	mm	mm	mm	mm
†By calibration	10.33 ± 0.19	9.39 ± 0.04	8.76 ± 0.05	10.30 ± 0.33
By using micrometer	10.90	10.10	9.00	10.35

†Means average $\pm$ SD

Table 2 Set values of water flux q_w and TFAV for five cases of heat pulse duration t_0 under $\phi=0(\text{rad})$

Flux	Set values of water flux q_w (g min^{-1})					Set values of TFAV ($\times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$)				
level	†PW-1	†PW-2	†PW-3	†PW-4	†PW-5	†PW-1	†PW-2	†PW-3	†PW-4	†PW-5
LV-1	1.07	1.04	0.98	1.00	1.00	0.904	0.879	0.739	0.847	0.845
LV-2	1.99	2.04	2.05	2.05	2.07	1.689	1.726	1.544	1.741	1.758
LV-3	3.01	3.25	2.94	3.08	3.17	2.554	2.757	2.215	2.610	2.686
LV-4	3.90	3.92	4.06	4.00	3.98	3.306	3.324	3.059	3.395	3.373
LV-5	4.71	4.94		4.78	5.04	3.991	4.185		4.048	4.270

†Heat pulse duration for PW-1, 2, 3, 4 and 5 are $t_0=10\text{s}$, 15s , 20s , 25s and 30s , respectively.

Table 3 Thermal properties for Imono sand measured by DPHP technique under no flux condition

	Unit	PW-1	PW-2	PW-3	PW-4	PW-5
κ	$\times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	7.138	6.962	6.620	7.018	7.118
c_p	$\text{MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$	2.514	2.563	2.942	2.644	2.738
† λ	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	1.795	1.784	1.948	1.856	1.949

†Thermal conductivity λ is calculated by $\kappa \times c_p$