

遠心模型実験のための小型 QPHP センサの試作と性能評価

Development of the micro-Quintuple-Probe Heat-Pulse sensor and its Performance Evaluation for the Centrifuge Model Test

○遠藤 明*, 玉手 聡*, 原 道宏**, 齊藤 雅英***

○Akira ENDO*; Satoshi TAMATE*; Michihiro HARA**; and Masahide SAITO***

1. はじめに 近年、豪雨による斜面災害が多発し、その被害が深刻な状況にある。従来、斜面崩壊の前兆現象を把握するためには、各種変位計や加速度計等を用いてその動態観測が行われているが、地盤内部の水分量や水フラックス密度ベクトルには着目されていないのが現状である。遠心場では重力場のn倍もの遠心加速度(=ng)が地盤内に作用するため、浸潤現象・地盤/構造物スケール・応力レベル等が重力場と整合しない。一般的に両者の場の関係には諸物理量の相似則が成立する。例えば、既報により開発した五極子熱パルス(Quintuple-Probe Heat-Pulse, QPHP)センサ(プローブ長 7cm, ヘッド部直径 3cm)を、50g場の模型地盤内に埋設して実験を行う場合、これをプロトタイプに換算すると50倍もの大きさの物体が実在地盤内に埋設している状況と等価になる。このため、センサ自身が斜面崩壊の不安定化要因になりかねないので、従来のQPHPセンサを小型化した。また、土壌の熱物性・流束の同時計測を行い、本装置の遠心模型実験への適用可能性を検討した。

昇の経時変化($\Delta T_1(t)$, $\Delta T_2(t)$)と対向熱電対の電位差の経時変化($\Delta E_1(t)-\Delta E_3(t)$, $\Delta E_2(t)-\Delta E_4(t)$)を1分間隔で5分間計測した。最後に、遠藤ら(2003)の計算手順に従い諸量を算出した。

【任意の水分率における熱物性計測方法】 はじめに、任意の含水比に調整した豊浦標準砂を、直径 5cm, 長さ 2cmの亚克力リングに $\rho_d=1.5\text{Mg m}^{-3}$ の密度で充填した。次に、QPHPセンサを試料面に対し垂直に挿入し、流束ベクトルの計測と同様の方法で測定を行った。

4. 水流束密度・間隙流速の算出方法 QPHP法を用いて計測した熱前線伝播速度 $u(\text{m s}^{-1})$ および体積熱容量 $\rho c (\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1})$ から、水流束密度 J と間隙流速 V を(2)式より算出した(Melville et al., 1985)。

$$J = u \rho c / (\rho c)_w = V \theta \quad (2)$$

ここに、 $(\rho c)_w$:間隙水の体積熱容量, θ :体積含水率である。

2. 実験材料および方法

1. 実験装置の概要 小型 QPHP センサの写真を Photo 1 に示す。本センサは中央に配置した(i)熱源ロッド($\{x, y\}=(0,0)$), その周囲に 4 本配置した(ii)熱電対ロッド, およびロッドを固定するための(iii)エポキシ樹脂製ヘッド部から構成される。ロッドは外径 $d=0.9\text{mm}$ のステンレス製皮下注射針(20G ノンベベル針, TERUMO 社製)を長さ 9mm に切断したものを用いた。なお、熱源にはニクロム線(鶴田商会社製)を、熱電対(アンペ SMT 社製)には線径 0.05mm の E 型を、熱源ロッドと周囲ロッドにそれぞれ埋設した。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、データロガー(CR23X, Campbell 社製)を用いた。

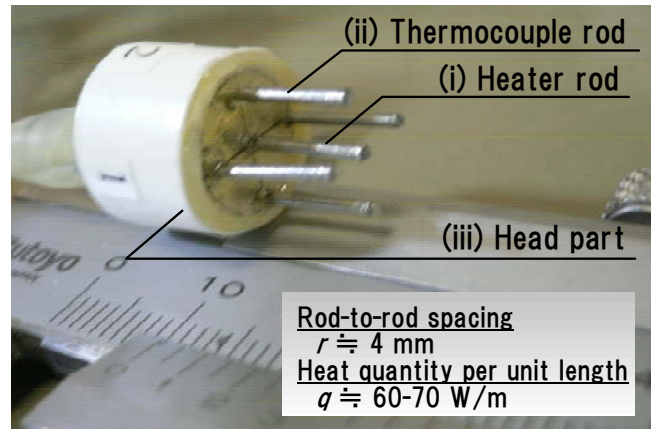


Photo 1 View of the micro-QPHP sensor.

2. ロッド間距離 r と発熱量 q の較正 センサのロッド間距離 $r(\text{m})$ および単位長さあたりヒーター発熱量 $q(\text{W m}^{-1})$ を較正するため、QPHPセンサを 2g L^{-1} 寒天溶液の中に挿入し(Campbell et al., 1991), 熱源ロッドから熱パルスを $t_0=3\text{s}$ 間印加し、温度上昇の経時変化($\Delta T(t)$)を計測した。その後、既知である水の体積熱容量 ρc と温度拡散係数 κ のもとで計測した $\Delta T(t)$ を(1)式(Kluitenberg et al., 1993)に対してフィッティングし諸量を算出した。

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi\rho c\kappa} \left[\text{Ei} \left(\frac{-r^2}{4\kappa(t-t_0)} \right) - \text{Ei} \left(\frac{-r^2}{4\kappa t} \right) \right] \quad (1)$$

ここに、 ΔT : 温度上昇(K), r : 円柱座標系距離(m), t : 経過時間(s), $-\text{Ei}(-x)$: 指数積分である。

3. 実験方法【流束ベクトルの計測方法】 Fig. 1 に計測系の概要を示す。はじめに、直径 2cm, 長さ 6cmの透明カラムにQPHPセンサを挿入した後、関東ローム(2mm 篩通過分)を $\rho_d=0.6\text{Mg m}^{-3}$ の密度で充填し、試料の脱気および水分飽和を行った。次に、マリョットと土カラムとを連結し、所定のヘッド差(8 ケース)を設定して土カラムの流束を定常状態に保持した。次に、熱源ロッドから $t_0=3\text{s}$ 間の熱パルスを印加し、温度上

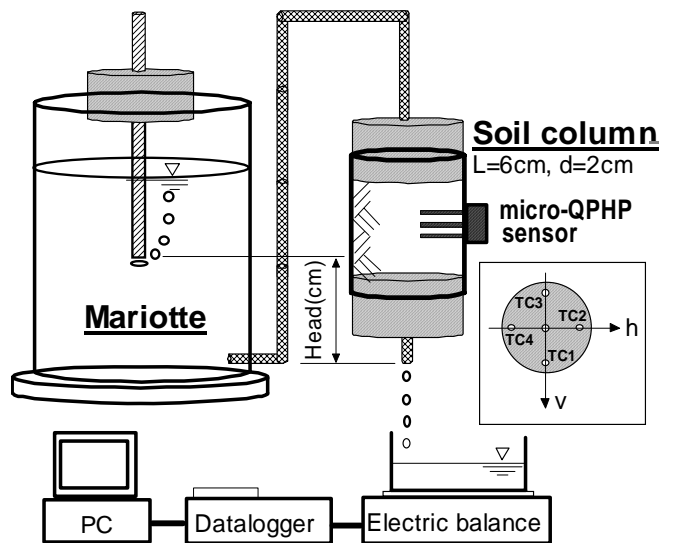


Fig.1 Schematic view of the experimental setup.

*独立行政法人 労働安全衛生総合研究所 Japan National Institute of Occupational Safety and Health, **国立大学法人 岩手大学農学部 Faculty of Agriculture, Iwate University ***武蔵工業大学工学部 Faculty of Engineering, Musashi Institute of Technology 小型 QPHP センサ, 水分移動, 熱物性

5. 間隙流速ベクトルの軌跡の算出方法 任意の時刻に計測された流速ベクトルが将来的に、どの方向に、どれだけの距離を動いたかということを瞬時に把握するため、任意の計測時刻における間隙流速の方向成分 $\{V_x, V_y\}$ と計測インターバル Δt_i との積を(3)式より算出し、間隙流速ベクトルの軌跡 L_n とした。

$$L_n = \sum_{i=1}^n J_i \theta^{-1} \Delta t_i = \sum_{i=1}^n V_i \Delta t_i \quad (3)$$

ここに、 J_i :水流束密度ベクトル、 θ :体積含水率である。

3. 実験結果および考察

1. 熱物性の計測結果 QPHPセンサを用いて計測した豊浦砂の温度拡散係数および体積熱容量の体積含水率依存性をそれぞれFigs.2(A),(B)に示す。温度拡散係数は $\theta=0.2$ 付近のピークを境に、乾燥・湿潤側に減少する傾向にあった。また、体積熱容量と体積含水率の関係には強い正の相関($r^2=0.988$)が確認された。回帰直線の傾きは $3.68 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ であり、純粋の体積熱容量 $4.18 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ とほぼ合致した。このことから、小型化したQPHPセンサを用いて体積含水率を推定することは可能と考えられる。

2. 水フラックス密度の計測結果 Fig.3にQPHP法により計測した、関東ロームカラム内の水流束密度(鉛直成分 J_v 、水平成分 J_h 、鉛直成分と水平成分の合成 $J'=[J_v^2+J_h^2]^{1/2}$)と、カラム内に発生させた定常状態の水流束密度の比較図を示す。流れ無しの状態($J_s=0$)で計測した水流束密度は、ほぼゼロを示した。設定流速 $J_s=2\text{E-}05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のもとで計測した流速密度も同様にゼロ付近を示したことから、この付近の流速が小型QPHPセンサの低流速側の計測限界と考えられる。しかしながら、遠心模型実験の相似則の下では、遠心場(ng場)における流速は、プロトタイプのn倍となるため、比較的速い流れを計測することになるので、このことは差ほど問題ないと考えられる。一方、設定流速 $J_s > 2\text{E-}05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の流れ場では、 J_s と実測流速 J の間に強い正の相関($r^2 > 0.95$)が認められた。 J_s の増加量に対する J_v の増加量の比に着目すると、回帰直線の傾きは約0.8であった。このことから流速がほぼ鉛直v方向に流れていることが示された。 J_h については傾きが約0.34であったことから、水平方向にも若干の流れが認められた。これは、センサをカラムに挿入した際、v軸の鉛直精度が小さかったためであり(第1・第3象限にv軸が存在)、見かけ上の水平方向の流れが検出されたと考えられる。

3. 間隙流速ベクトルの軌跡 (3)式により算出した関東ロームカラムにおける間隙流速ベクトルの経過時間ごとの軌跡を Fig.4に示す。流速の水平成分と鉛直成分の比がほぼ一定であったことから、 L^h と L^v の間に高い相関($r^2=0.998$)が認められた。また、v軸と間隙流速ベクトルの軌跡(L^h と L^v の回帰直線とした)がなす偏角 δ は約 26° であった。このことから、本センサを用いて流向を検出する際には、流速の大小の影響が無いことが示された。

4. まとめ 既報により開発したQPHPセンサを遠心模型実験に導入するため、従来のセンサを小型化し、その性能評価を行った。QPHP法を用いて計測した体積熱容量 ρc と体積含水率 θ の間に強い相関が認められたことから、 ρc (θ)関係が既知の土壌において、 θ の推定が可能であることを示した。また、 J_s と実測流速 J の増加量の比が流速によらず一定であり、かつ、 J' の傾きが約0.86を示したことから、流速ベクトルの設定値と計測値の間に高い整合性が認められた。以上のことから、本装置は従来のセンサと同等の性能が示されたため、遠心場における土壌水の挙動を追跡することにも適用可能であると考えられる。

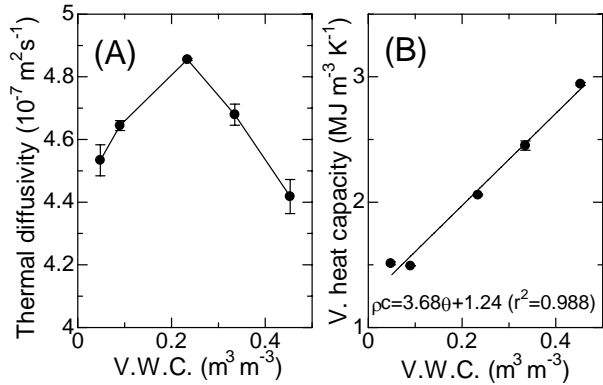


Fig.2 Thermal properties for the Toyoura sand. (A): Thermal diffusivity, and (B): Volumetric heat capacity

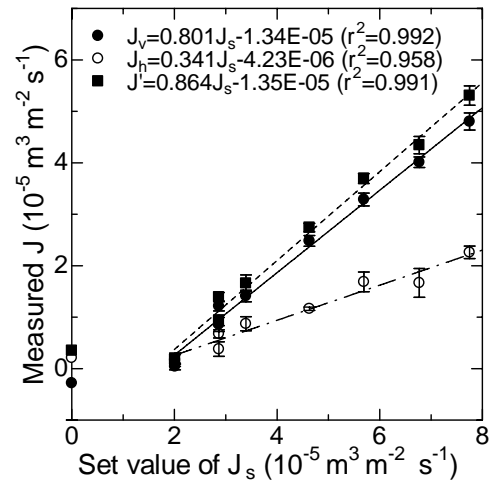


Fig.3 Relationship between the set value of the water flux density J_s and the measured flux J .

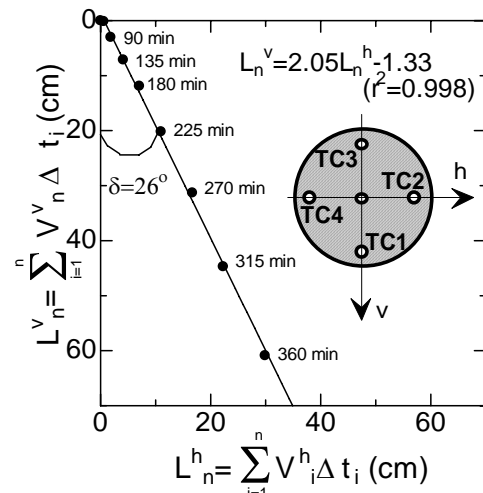


Fig.4 Trajectory of the pore water velocity vector.

引用文献

- Campbell G.S., C. Calissendoref, and J.H Williams. 1991. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. Soil Sci. Soc. Am. J. 55:291-293
- Kluitenberg, G. J., Ham, J. M., and Bristow, K. L., 1993. Error analysis of the heat pulse method for measuring volumetric heat capacity. Soil Sci. Soc. Am. J. 57, 1444-1451
- 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
- Melville J.G., F.J. Molz and O. Guven, 1985. Laboratory investigation and analysis of a ground-water flowmeter, Ground Water 23, 486-495