

(82) ペーパーディスク型地下水流向流速計の開発

野田 敏雄^{1*}・山本 浩一¹

¹山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口市常盤台2-16-1)

* E-mail: p027vf@yamaguchi-u.ac.jp

測定時に電源を必要としない地下水流向流速計を開発した。紙の上に印刷された染料インクが紙の中を浸透する水の流れ等によって輸送されて尾ひき(テーリング)を起こすことを利用したものである。あらかじめ市販のインクジェットプリンタを用い水性染料インクで円形パターンを印刷しておいた画用紙を透水性スポンジで挟み、地下水観測井のストレーナ付近に一定時間静置する。染料インクの流れた方向を流向とし、静置した時間とインクのテーリング長を解析し地下水の流速を測定するものである。室内実験によりインクの移動速度とダルシー流速を比較したところ、透水係数0.30 cm/sの砂層において、0.02 ~ 0.15 cm/minの地下水流速を測定することができた。

Key Words : groundwater velocimeter, paper disc, groundwater velocity, dye ink, non electric

1. 序論

(1) 研究背景・目的

近年、建設工事に伴う流動阻害や、井戸枯れの問題の他、産業廃棄物などによる地下水・土壌汚染が深刻な社会問題となっており、地下水流動調査の需要が高まっている。これまで、複雑な挙動を示す地下水流動を観測するために数多くの地下水流向流速計が開発されてきた。従来の測定において、ヒーターやビデオカメラを用いるものでは、これらの装置を駆動、動作させるために電源を必要とし、装置としても高価なものになる。トレーサ方式によるものは、地下水流の動向をかなりの精度で測定することができ、現在多く用いられているが、水流の動きが非常に遅く水が自由に動き得る状態の場合に、トレーサを水中に注入することによっても、水が不安定に移動するため、高精度の地下水流の測定になり難い問題があるとともに、この手法でも電源を必要とするものであった。

このような現状から、測定装置として簡易であるとともに安価であり、基本的動作として電源を使用することを必要としない形態で地下水の流向流速を測定する技術開発が求められていた。また、多地点での地下水流向流速の測定に関しては、測定器具のコストの関係から、一カ所ずつ、数時間の測定となることが多く、数多くの地点を測定する場合においては、膨大な時間を費やすこと

になる。そして、地点ごとの測定時刻のずれから同時性が確保し難い。

そこで本研究では、電源を使用せずに、地下水の流向流速を測定することができる、低コストの装置を開発することを目的とした。

(2) 既往の流速測定装置との比較

地下水の流向流速の測定には単一の井戸を必要とする方法(単孔式)が多用されてきた。単孔式地下水流向流速計には、CCDカメラによる浮遊物追跡法¹⁾、電位差法²⁾、熱量法³⁾などがある。CCDカメラによる浮遊物追跡法は、CCDカメラを井戸の所定の深度に固定し、地下水中の浮遊物の動きを観察し流向流速を算出する方法、電位差法はプローブ中心部から純水を投入し、周囲に配置されたセンサによって水の電気伝導度を計測し流向流速を算出する方法、熱量法は、中心部にヒータを配置し、その周囲の温度分布から流向流速を算出する方法であり、現在広く用いられている方法である。

今回開発した地下水流向流速計の材料は、塩ビパイプ、円形塩ビ板、透水性スポンジ、方向指示器、方位磁針からなり、低コストで製作することができる。現場に持ち込むのは、地下水流向流速計と、測定用に使用するペーパーディスクの2点のみであり、パソコンやその他の電源を必要とする機器は不要であるため、簡易に調査を行う事が出来る。

2. 研究方法

(1) 計測原理および使用器具

本研究で開発した地下水流向流速計（図-1）は、ペーパークロマトグラフィーのように、水に溶解して輸送されるインクの動きに着目したものであり、あらかじめ水性染料インクでドットを印刷しておいた円形の画用紙（ペーパーディスク、図-2）を透水性スポンジに挟み、地下水観測井のストレナ付近に一定時間静止することで測定するものである。この、透水性スポンジで挟んだペーパーディスクを流速のある水中におくと、ペーパーディスク上のドットから、染料が溶出し、ペーパー上に流向、流速に応じた尾引き（テールリング）が出現する（図-3）。本研究では明確に区別していないが、このテールリングは、インク粒子が直接ペーパーディスク内を移動したものと、ドットから溶出したインク粒子が一旦スポンジ表面に拡散し、スポンジ内で下流方向に移流拡散しながらペーパーディスクにも拡散したものであると考えられる。本研究では、上記のようなプロセスで、ペーパーに付着したテールリングを用いて流速の推定に用いた。

梶井⁴⁾によると、地下水観測孔内の流速分布は流軸方向に対して、線対称に歪んだ形をする。このような傾向は本研究のペーパーディスク上のテールリングにも見ることができ、上流側のドットのテールリングは、中心軸から離れるにつれ、流軸よりも中心にテールリングの方向が偏っている。逆に、下流側では、ドットのテールリングは、中心軸から離れるように偏る。このような問題があるものの、中心軸付近では、地下水の流向とインクの流向が一致するものとして解析することは可能である。

本測定装置は、測定にペーパーディスクを用いることからペーパーディスク型地下水流向流速計と呼ぶことにする。本研究で用いたペーパーディスクの大きさは、外径65 mmであり、塩ビパイプを通すため内径20 mmの穴を開けてある。素材は水に対する耐久性、インクの移動の適性から画用紙（マルマン製、126.5 g/m²）を用いた。

ペーパーディスクにはインクジェットプリンタ（CANON 製Pixus P950i）によってパターンを印刷した。インクは黒色染料インクであり、印刷はグレースケールに設定して行った。このパターンの個々のドットは直径2 mmの円であり、これをペーパーディスクの中心から半径20 mmの円周上に等間隔に48個（中心角7.5°）となるように配した。ドットの格子状配列等も試したが、図-2のパターンが最もよく流向を再現し、プロット同士の干渉が少なかった。

透水性スポンジは市販のメラミンフォームを円筒状に加工したものをを用いた。

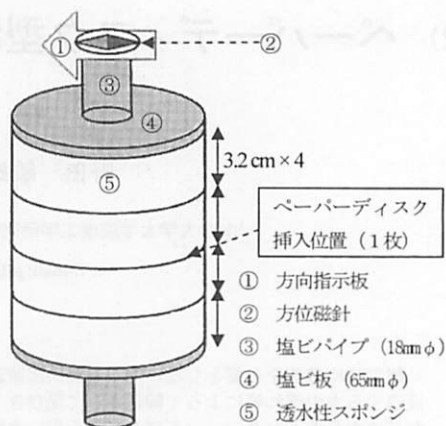


図-1 地下水流向流速計

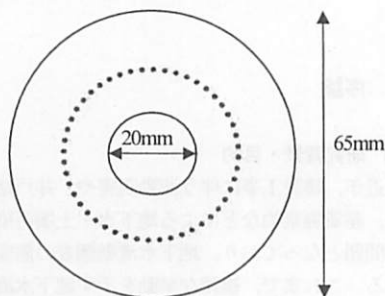


図-2 測定前のペーパーディスク

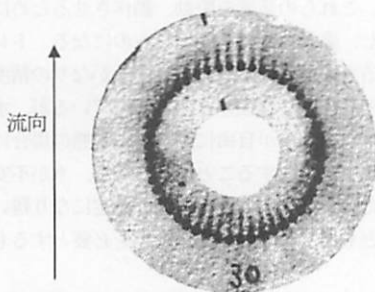


図-3 測定後のペーパーディスク

(2) 画像解析方法

実験終了後、ペーパーディスクを取り出して乾燥し、フラットベッドスキャナ（EPSON 製 GT-7000U）でスキャンして電子化した。スキャンは、解像度 300 pixels/inch のモノクロカラー画像で行った。スキャン時の取得条件は露出補正 0、ガンマ値 1 の初期設定の状態で行った。電子化後、オープンソースの画像処理ソフト Image-J によってもとのインクのドットが判明した状態でインクのテーリングのみを強調できるような画像処理条件（輝度 139～229 を着色）を設定し、2 値化した（図-4）。

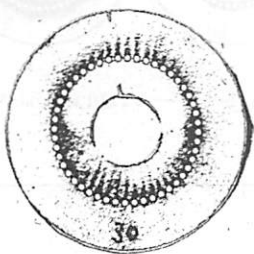


図-4 ペーパーディスクのテーリングを2値化した状況

流速の解析においては初期のドット群のなす半径 $R+r$ の円の中心を $O(0,0)$ とする。ここで R は O からドット中央部までの距離、 r はドットの半径である。また、実験後の下流側ドットのテーリングの流下方向の前縁部に半径 r の円を一致させたときの円の中心を $A(x_1, y_1)$ とすると、インクの移動距離 Δx は、(1)式で表される。また、流向は OA の方位で求めることができる。

$$\Delta x = OA = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \quad (1)$$

図-5 にテーリングの解析方法を示した。ここで実線の円は初期のドット群を囲む円、破線の円は下流側ドットのテーリングの下流前縁に合わせた円を示している。 O は初期のドット群を囲む円の中心、 A は下流前縁に合わせた円の中心を示す。図-5 上部にはテーリング長に関する定義を示している。ここで、インク粒子の移動に関しては、流速によらない、ペーパー内への浸透や拡散に関する項（これを拡散項ということにする） $f(\Delta t)$ と、地下水流速による移流項があると考えられ、(2)式で表すことができると仮定する。

$$\Delta x = f(\Delta t) + u\Delta t / k_r \quad (2)$$

ここで Δx : テーリング長 (cm) , $f(\Delta t)$: 拡散項

(cm) , k_r : 遅延係数 (—) , u : スポンジ内のダルシー流速 (cm/min) , Δt : 静置時間 (min) である。

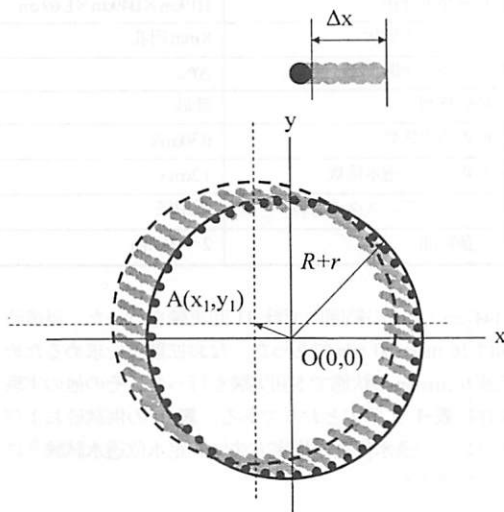


図-5 テーリングの解析方法(上:テーリング長の定義, 下:黒点:初期のドットの位置, 灰色のライン:テーリング)

(4) 室内実験方法

ペーパーディスク内のインクの移動速度とダルシー流速を比較するために、室内実験を行った。本研究で用いた砂槽を図-6 に示す。ダルシー流速は流量を横断方向の水の断面積で除して算出したものである。しかし、本実験水槽は上面が開放されており不飽和層があるため流下方向に水頭の変化がある。そこで観測孔における水位を基準に断面を決め、砂槽のダルシー流速とした。砂槽は、ペリスタポンプ (luchi 製 CTP-100) で水道水を循環させた。なお、ペリスタポンプの流量は $0.03 \text{ cm}^3/\text{s} \sim 4.00 \text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲で変化させることができる。砂層には内径 67mm、開口率 20% のストレーナ付塩ビパイプ (VP65) をあらかじめ挿入した。室内実験ではそのパイプ中に流向流速計本体を挿入し、ダルシー流速が 0.05 cm/min 程度

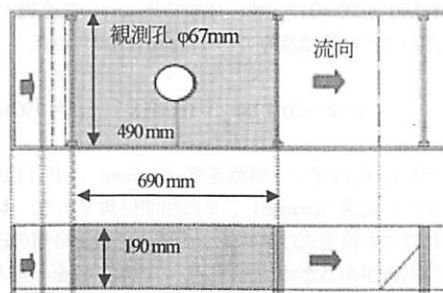


図-6 本実験で用いた地下水実験用砂層

表-1 室内実験条件

砂充填部寸法	H19cm×B49cm×L69cm
ストレーナ形状	8mm円孔
ストレーナ開口率	20%
砂の種類	珪砂
砂の透水係数	0.30cm/s
スポンジの透水係数	1.2cm/s
ペーパーディスクの材料	画用紙
浸漬時間	2～90 min

0.144 cm / min の範囲内で計 11 回実験を行った。浸漬時間は 16 min～90 min であった。なお拡散項を求めるため、流速 0 cm/min の状態で 5 回実験を行った。その他の実験条件は表-1 に示すとおりである。表-1 の供試砂およびスポンジの透水係数の推定方法は、定水位透水試験⁹⁾によって求めた。

3. 研究結果および考察

(1) 流速推定結果

流速 0 cm/min において 2 分、20 分、30 分、90 分間浸漬した後のペーパーディスクの 2 値化結果を図-7 に示す。その条件での画像解析結果を図-8 に示す。これより得た拡散項 $f(\Delta t)$ (cm) は、(3)式のようになった。

$$f(\Delta t) = 0.00241\Delta t + 0.0654 \quad (R^2 = 0.969) \quad (3)$$

ここで、(3)式の y 切片であるが、これはペーパーが乾燥状態から湿润状態に移行する際の短い時間でのインクの溶出・拡散が現れたものと考えられた。

砂層における実験によって得られたペーパーディスクのテーリングを図-9 に示す。図中には流速を求めるための推定円(点線)を記入している。テーリング長より求めたペーパー内のインク移動速度 u/k_r と砂層のダルシー流速の比較結果を図-10 に示す。比較結果について直線で近似したところ結果は良好であり、(4)式が得られた。

$$u/k_r = 0.128V_d - 0.0018 \quad (R^2 = 0.904) \quad (4)$$

ただし u/k_r はインク移動速度 (cm/min) , V_d は砂層のダルシー流速 (cm/min) , R は相関係数である。本来であればこの推定式はスポンジの透水係数と砂層の透水係数の影響があるため、スポンジの透水係数を一定としても砂層の透水係数がパラメーターのひとつになるべきで

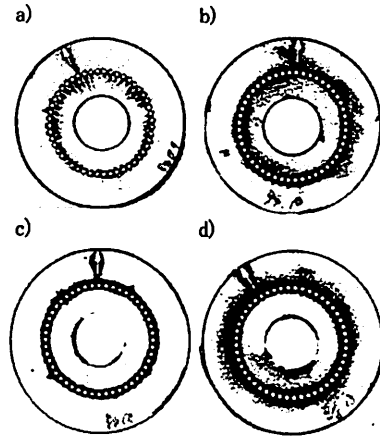


図-7 流速 0 におけるペーパーの 2 値化結果, a):2min, b):20min, c):30min, d):90min

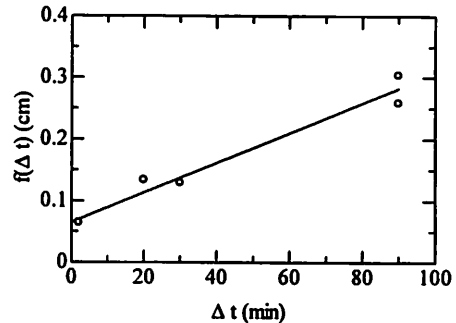


図-8 流速 0 におけるペーパーの画像解析から得られた浸漬時間 Δt と拡散項 $f(\Delta t)$ の関係

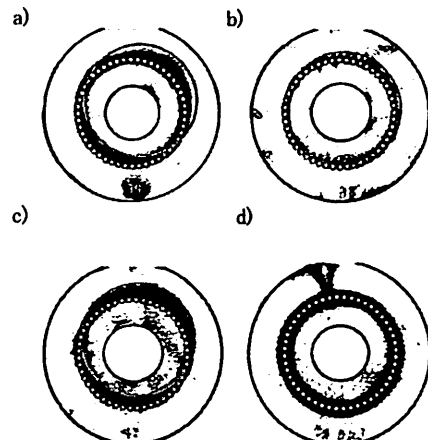


図-9 様々な条件におけるペーパーディスク, a) : $\Delta t=90$ min, $V_d=0.05$ cm/min, b) : $\Delta t=25$ min, $V_d=0.096$ cm/min, c) : $\Delta t=21$ min, $V_d=0.144$ cm/min, d) : $\Delta t=90$ min, $V_d=0$ cm/min

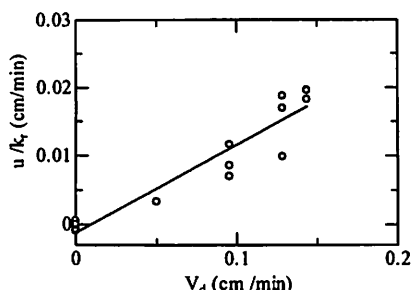


図-10 砂層のダルシー流速 V_d (cm/min)とペーパーのインク移動速度 u/k_r (cm/min)の関係

あるが、今回は透水係数を変化させた実験を行っていないため、今回の実験条件での式を表示するにとどめた。

(2) 本流速測定装置の測定限界について

今回の実験条件において本装置が有する検出限界と定量限界を計算した。JISによる、検出限界と定量限界の定義⁹⁾を参考にし、流速 0 cm/min におけるインク移動速度の標準偏差 σ (測定回数 5 回)を検定曲線の傾きで除することによって推定した。検出限界 DL, 定量限界 QL はそれぞれ式(5), 式(6)で表すことができる。

$$DL = \frac{4.26 \times \sigma}{\text{slope}} \quad (5)$$

$$QL = \frac{10 \times \sigma}{\text{slope}} \quad (6)$$

ここで、DL: 検出限界(cm/min), QL: 定量限界(cm/min), σ : 流速 0 cm/min におけるインク移動速度の標準偏差, slope: 検定曲線の傾きである。

流速 0 cm/min における実験結果からインク粒子移動速度を推定したところ u/k_r の標準偏差 $\sigma = 5.87 \times 10^{-4}$ cm/min であった。以上より、検出限界 DL と定量限界 QL は、DL = 0.0195 cm/min, QL = 0.0459 cm/min となった。

検出限界に関しては、熱量式流速計 (0.005 cm/min) よりは劣るが、ペーパーディスクに使用する紙を精選することにより、今後精度が高くなる可能性がある。また、現在室内実験で使用している流速測定部の構造では、流速計と観測孔の間の若干の隙間による流速の乱れの可能性も考えられる。流向流速計の挿入方法と流向流速計の

構造のさらなる検討が必要である。

4. まとめ

測定原理に電源を用いずに地下水の流向流速を測定することができる器具を開発した。室内実験を行ったところ、 $\phi 67$ mm 観測孔、スポンジ透水係数 1.2 cm/s, 砂層透水係数 0.30 cm/s の条件では 0.05 cm/min 以上 0.15 cm/min 以下の流速については砂層のダルシー流速とペーパーディスクのインク移動速度との関係は直線的であった。しかしながら測定精度はまだ十分に高いとはいえず、現地の多様な流速に対応するためには室内実験を繰り返し、使用する紙材やインクを精選することで、今回の実験よりさらに広い流速域の測定を可能にしたい。

今回開発した流向流速計は測定装置が非常に低コストであるため、実用化が可能となれば、今後電源が利用しにくい地域における地下水流速の測定が簡易に行われるであろう。なお、本装置は 2010 年 5 月 1 日現在特許出願中である (出願番号: 特願 2010-050441)。

謝辞: 本研究を行うにあたり有益な助言を頂いた山口大学大学院 関根雅彦教授、今井剛教授、樋口隆哉准教授、北海学園大学工学部 山本裕子准教授、北海道水文気候研究所 橋治国博士に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 小林薫, 近久博志, 松元和伸, 熊谷幸樹: CCD カメラを利用した単孔法による三次元流向流速測定に関する基礎的研究, 地下水学会誌 Vol 45, No 1, 41-48, 2003.
- 2) 大成基礎設計株式会社: 単孔による地下水の「流速流向計」, 日本地下水学会創立 25 周年記念誌, 174-178, 1984.
- 3) 経澤正和: 地下水の流向流速測定「熱量法」による「単孔式」地下水流向流速計 GFD3 による測定, 環境浄化技術, Vol. 3, No. 9, 36-39, 2004.
- 4) 梶井和朗, 神野健二, 上田年比古, 本村浩志, 平野文昭, 本田保: ボーリング孔内の地下水流れに関する実験的研究, 地下水学会誌, Vol 31, No 1, 13-08, 1989.
- 5) 日本工業規格協会: 土の透水試験方法, JIS A 1218
- 6) 日本工業規格協会: JIS ハンドブック 環境測定 II 水質, 1023-1024, 2007.

(2010.5.21 受付)

Development of the groundwater velocimeter using paper disc and dye ink

Toshio NODA¹ and Koichi YAMAMOTO¹

¹ Department of Science and Engineering, Graduate School of Yamaguchi University

Brand new groundwater velocimeter, which needs no electricity has been developed. The velocimeter uses the paper disc with the printed circle pattern of dots. The dye ink from printed dots gradually elute in the water and moves through the paper with the water movement in the paper disc. These dots were printed by the ordinary ink jet printer which uses dye ink. To measure the velocity of the groundwater, the paper disc which placed between permeable sponges is set beside the strainer of the groundwater well. The directions of the tailings from dots shows water flow directions, and their length depends on elapsed time and water velocity. From the comparison of the length of the tailing and Darcy groundwater velocity, we successfully could measure the ground water velocity of 0.02 cm/min ~ 0.15 cm/min.