ペーパーディスク型地下水流向流速計を用いた海岸砂州地下水の挙動の観測

小野 文也¹・山本 浩一²・対馬 幸太朗³・大石 正行⁴
神野 有生⁵・関根 雅彦⁶

¹ 学生会員 山口大学理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

Email: u009vn@yamaguchi-u.ac.jp

² 正会員 山口大学理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

Email: k_yama@yamaguchi-u.ac.jp

³ 宮崎県県土整備部河川課(〒880-8501 宮崎市橋通東 2 丁目 10 番 1 号)

Email: tsushima-kotaro@pref.miyazaki.lg.jp

⁴ 大起理化工業株式会社(〒365-0001 埼玉県鴻巣市赤城台 212-8)

Email: ohishi@daiki.co.jp

⁵ 正会員 山口大学理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

Email: kanno@yamaguchi-u.ac.jp

⁶ 正会員 山口大学理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

Email: ms@yamaguchi-u.ac.jp

安価で測定時に電源を必要としないペーパーディスク型地下水流向流速計の現地適用を行った。本装置は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により輸送された軌跡(テーリング)が表れることを利用したものである。市販のインクジェットプリントを用いて染料インクで円形のパターンを印刷し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から流向とし、室内実験で作成した検定曲線から流速を推定した。平成 25 年 9 月 19 日に山口県山口市秋穂町地先に位置する海岸砂州で現地適用実験を行った。計測された地下水流向は現地の地下水位から推定した結果と概ね一致したが、潮位変動による急激な流向の変化を伴った場合、本装置では流速の計測は困難であった。

Key Words: groundwater velocimeter, paper disc, groundwater, dye ink, no electricity

1. はじめに

近年、建設工事に伴う流動阻害や井戸枯れ、産業廃棄物などによる地下水・土壌汚染が問題となっており地下水流動調査の需要が高まってきている。2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災により深刻な損害を被った福島第一原発では、高濃度放射能汚

染された冷却水の海洋や地下への流出が問題になったことは記憶に新しい。地下水の汚染源の特定には地下水の挙動の把握が必要不可欠であり、これまで数多くの地下水流向流速計が開発されてきた。

既存の単孔式地下水の流向流速測定方法には CCD カメラによる浮遊物追跡法¹⁾、熱量法²⁾、電位差法³⁾などがあげられる。その他、超音波のエコーを利用

した孔内地下水 3 次元流向流速計⁴⁾がある。

しかしながら、既存の計測方法においては装置を作動させるために電源が必要であり、装置自体も高価である。また、多地点での測定においては測定器具自体が高価なことから 1 か所ずつ測定を数時間行うことが多く、観測地点が多いほど膨大な計測時間を費やすことになる。

したがって多地点での測定を行う際に同時性を確保することが困難であるという問題点がある。このような現状から、装置として簡易である事と共に安価であり、動作に重量の大きな蓄電池や電源を必要としない地下水の流向流速を測定する技術開発が求められてきた。

そこで、野田らは装置自体が安価で測定時に電源を必要しないペーパーディスク地下水流向流速計の開発を行った⁵⁾。しかし 2010 年度までの装置では流向の客観的な算出まで至っておらず、円形の管を中心構造に用いていたので、ディスクが回転することで流向の測定に問題があった。そこで本研究では、ペーパーディスク型地下水流向流速計の流向流速解析方法の再検討を行うとともに海岸砂洲への適用実験を行った。

2. 計測原理および使用器具

ペーパーディスク型地下水流向流速計は染料インクが印刷した用紙から溶出し、水の挙動によって輸送されることに着目し、画用紙に印刷したインクの軌跡を解析し地下水の流速、流向を求めるものである⁵⁾。円形の画用紙(図-1)に染料インクでドットを印刷したものの上下を透水性スポンジで挟みそれをセンサ(図-2)として、地下水観測井のストレーナ付近に一定時間静置する。流速のある水中にペーパーディスクを静置するとインクがドットから溶け出して流向および流速に応じた軌跡(テーリング)が現れる。このテーリングを利用して測定時間範囲内の平均的な流向、流速を測定するものである。

ペーパーディスク上のインクの溶出とテーリングの発生に関する概念図を図-3 に示す。

2010 年の野田らの研究段階では流向の算出が自動化されていない、また、ペーパーディスクの汚れによって発生するノイズが解析の障害になるという問題があった。さらに、ペーパーディスクの支持部が円形であるためペーパーディスクが回転する可能性があった。そこで、ペーパーディスクとドットの形状、センサ部分の形状の変更、解析方法の検討を行

った。2010 年度からの変更点を表-1 に示す。

表-1 本装置および解析方法の変更点

	2010 年	2013 年
ドット数	48 個	12 個
ドット直径	2 mm	3 mm
内径	20 mm	29 mm
内径の形状	円形	8 角形
閾値設定	輝度	RGB カラーモデル

ペーパーディスク型地下水流向流速計のセンサ部分の構造を図-4 に示す。

本研究で用いたペーパーディスクの大きさは外径 65 mm、内径 29 mm である。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、厚さ 0.1 mm)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 PixusP950i)によってパターンを印刷した。インクは黒色の染料インクで、このパターンの個々のドットは直径 3 mm の円であり、これをペーパーディスクの中心から半径 23.5 mm の円周上に等間隔に 12 個(中心角 30 度)となるように配置した。インクのテーリングが相互に干渉せず、かつ流向を算出するのに十分な数として 12 個を採用している。本研究で用いたペーパーディスクを図-1 に示す。

図-1 ペーパーディスク概要

図-2 ペーパーディスク型地下水流向流速計センサ部分

図-3 ペーパーディスク上のインクの溶出とテーリングの発生に関する概念図

図-4 本体センサ部分構造

3. 研究方法

(1) 検定曲線作成と流速の算出方法

ダルシー流速とテーリング長の関係から検定曲線を作成するために室内実験を行った。室内実験に用いた実験水槽の概要を図-5 に示す。ダルシー流速は流量を横方向の水の断面積で除して算出したものである。流速はペリスタリックポンプ(Iuchi 製 CTP-100)で水道水を循環させることにより発生させた。室内実験ではパイプ中に本体を挿入し、ダルシー流速を 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.64 cm/min とし流速ごとに 4 回、計 28 回測定を行った。測定時間は 30 分とした。

測定終了後のペーパーを取り出し乾燥後、フラットヘッドスキャナ(EPSON 製 GT-7000U)でスキャンし電子化を行った。スキャンは、解像度 300 dpi で行い電子化した画像をオープンソースの画像解析ソフト image-J を用いて測定前のドットと測定後のテーリングごとに RGB カラーモデルを用いて 2 値化を行った。1 画素は $8.5 \mu\text{m}$ 程度である。2 値化後のペーパーディスクを図-6 に示す。

2 値化を行う際の閾値は、初期ドットの閾値を R255, G255, B150, 測定後のテーリングを R255, G255, B200 とした。

側面図

立面図

図-5 実内実験水槽

図-6 (a)測定後のペーパーの生画像、(b)2 値化処理後の初期ドットの抽出結果(R:255,G:255,B:150)、(c)2 値化処理後のテーリングの抽出結(R:255,G:255,B:200)

表-2 室内実験水槽の諸元

砂充填部(cm)	H38×B38×L100
ストレーナ形状	8 mm 円孔
ストレーナ開口率	29.90 %
砂の種類	珪砂 5 号
砂の透水係数	0.11 cm/s
スポンジの透水係数	1.2 cm/s
ペーパーディスクの材料	画用紙

2 値化した画像に対しての粒子解析を行いドット群の重心とテーリング群の重心を得た。重心の移動距離からテーリング長、テーリングの向きから流向算出した。

テーリング長の算出式を式(1)に示す。

$$L = \sqrt{(X' - X)^2 + (Y' - Y)^2} \quad (1)$$

ここで、 L : テーリングの長さ、 (X, Y) : ドットの重心、 (X', Y') : テーリングの重心

印刷したドットから溶出するインクの濃度は移流拡散方程式の拡散項が十分に小さいと仮定した場合、拡散項を無視して考えると式(2)であらわせられる。

$$C = \frac{rd}{V} \quad (2)$$

ここで、 C : ドット下流端におけるテーリングの濃度、 r : ドットからのインクの溶出速度、 d : ドット直径、 V : 流速

式(2)から、流速が早いほどテーリングの濃度が低

くなる事が分かる。つまり流速が早いほどテーリングの濃度が高い部分が短くなる。そのため、一定の閾値で2 値化した際、テーリング長は流速が早くなるほど短くなる。

そこで、この流速とテーリング長変化のパターンに着目し検定曲線を作成を行った。

2 値化する際のテーリングの閾値を R255, G255 に固定し B を 160~230 の範囲で 10 ずつ増加させ、テーリング長の逆数とダルシー流速の関係を求めた。

この中でもっとも決定係数の高かったテーリングの閾値 R255, G255, B200 の時を検定曲線とした。

図-7 ダルシー流速とテーリング長の逆数の関係

図-7 から得られた流速の算出式を(3)式に示す。

$$v = \frac{I^{-1} - 20.834}{252.01} \quad (3)$$

ここで、 v : ダルシー流速(cm/min)、 I : テーリング長(cm)である。

図-7 は、近似曲線に対して約±50 %程度以上の誤差が発生する可能性があることを示しており、流速の測定精度の向上は今後の課題であるといえる。しかしながら従来の熱量法式流速計の計測下限である、0.01 cm/min 程度の測定は可能であるといえる。

流速の算出の際は現地での測定後、ペーパーディスクを乾燥させ同様の閾値でドットのテーリングをそれぞれ2 値化し画像解析を行った。式(1)から算出したテーリング長の逆数を式(3)に代入し、流速の推定をおこなった。流速が遅い時は、インクの拡散がドット周辺で発生し、移流によりドット周辺から流去するインクの量が減少するため、方向がランダムかつ濃厚なインクのテーリングが発生する。従ってドット周辺における計算されるテーリング長が大きくなると考えられる。

(2) 流向の推定方法

センサー周りで発生する流向については、地下水の流線に対して線対称に歪んだ形をとるため、これらのテーリングの平均的な移動方向は原理的に流向に一致する。流向の推定の際はペーパーディスクを乾燥後、電子化までは流速の推定と同様の手順で行った。テーリングは閾値を R255, G255, B200 として 2 値化を行った。その後、全ドット重心の平均と全テーリング重心の平均から以下の(4)式(5)式を用いて、テーリングの磁方位を求めた。その後(6)式のように、西偏(山口では 7.0 度)を用いて真北基準データに換算した。差し引いた結果がマイナスになる場合は、(7)式のように 360 度を加えた。

$x'-x \geq 0$ のとき

$$\theta = 90 - \frac{180}{\pi} \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'-y}{x'-x} \right) \right) \quad (4)$$

$x'-x < 0$ のとき

$$\theta = 270 - \frac{180}{\pi} \left(\tan^{-1} \left(\frac{y'-y}{x'-x} \right) \right) \quad (5)$$

$\theta_{mag} \geq \theta_w$ のとき

$$\theta_{TN} = \theta - \theta_w \quad (6)$$

$\theta < \theta_w$ のとき

$$\theta_{TN} = 360 + \theta - \theta_w \quad (7)$$

ここで、 (x', y') : 全テーリング重心の平均値の座標、 (x, y) : 全ドット重心の平均値の座標 θ_{TN} : 真北基準の流向(度)、 θ : 磁北基準の流向(度)、 θ_w : 西偏(度)

図-8 流向の解析方法の概要図 (●: ドット重心 ○: テーリング重心 ×: 全ドット重心の平均値 ⊗: 全テーリング重心の平均値 θ: 磁北基準の流向(度))

(3) 測定対象地

平成 25 年 9 月 19 日に山口県山口市秋穂町地先に位置する干潟で測定を行った。砂洲と泥干潟の境界線は図-9 における標高 0 m 付近にあり、今回計測を行った地点は全地点砂洲上の点となっている。海岸から沖合方向に 7 m 間隔に地下水位計測用観測井を設置し、岸から 5 番目の地点にペーパーディスク型地下水流速計用観測井を設置した。干潮時の 10:00 から 18:30 まで 30 分毎の地下水位の測定から得られる測定値と、ペーパーディスク型地下水流向流速計から算出された測定値の比較を行った。

また、ペーパーディスク型地下水流向流速計から算出する際に必要な土壌の透水係数を求めるために定水位透水試験を現場にて行った。

現地適用実験の現場図を図-9、2013 年 9 月 19 日山口県宇部市における潮位変動を図-10 に示す。

図-9 現地適用実験海岸砂州 (X,Y; 直交座標系第Ⅲ系) における座標、数字は標高(m)

図-10 2013 年 9 月 19 日山口県宇部市における予報潮位 (気象庁 HP による)

(4) 現地観測方法

現地においては、ペーパーディスク型地下水流向流速計の測定に加えて周辺の水位測定を行った。水位測定には直径 25 mm の塩ビパイプ、測定は電気伝導度計のプロープを筒内に挿入し、水に到達したことを確認し、筒内のプロープ長を定規で測定した。ペーパーディスク流速計の計測には内径 67 mm の塩ビパイプの観測井を用いた。ストレーナの部分は海砂が観測井内に入らないように寒冷紗を巻いてフィルターとした。

測定は、磁北をコンパスを使って特定し、その方向にペーパーディスクの磁北方向の目印を合わせて観測井に挿入した。観測井の所定位置に装置を固定してから 30 分間静置し周辺の水位は手動の水位計を用いて、本装置の測定開始と同時に測定を行った。

測定終了後、本装置が回転しないようゆっくりと引き上げ、ペーパーディスクを取り出し画用紙に挟み乾燥、その後電子化を行った。

本装置の測定は測定時間を 30 分とし 1 時間ごとに測定、水位は 30 分毎に測定を行った。

現地の砂層の透水係数を求めるため、定水位透水試験を行った。現地砂州の底質を内径 8.2 cm のコラムに密に詰めてペリスタリックポンプ (Solinst 製) を使用し一定水頭差で水を供給し、コラム底部から流出した流量をストップウォッチで計測した。透水係数 k (m/s) は流量を Q (m³/s)、コラム断面積を A (m²)、動水勾配を i として下式により算出した。

$$k = \frac{Q}{Ai} \quad (8)$$

定水位透水試験の結果、現地定水透水係数は 1×10^{-1} cm/sec と測定された。

(5) 動水勾配からの流向・流速算出方法

ペーパーディスク型地下水流向流速計の測定結果と現地の流向流速の比較のために現地水位の測定結果から動水勾配を算出した。No.5, No.6e, No.6w における地下水位から流速測定地点における勾配を計算し、勾配の最大傾斜線の方角から流向を算出した。

4. 研究結果

(1) 現地海岸における地下水位の縦断分布の変動

観測井周辺の水位測定の結果を図-11 に示す。10 時台は観測井の地表が水没するほど潮位が高く、沖合の水位が高かったが地表が露出している間は沖合の方が水位が低くなり、かつ緩慢に水位が低下した。18:00 には上げ潮に伴って No.6 ラインの観測井は水

没したが、測定開始時には流速測定点の No.5 地点はまだ水没していなかった。

(2) 現地海岸における地下水位の平面分布

現地海岸における地下水の平面分布の例を図-12 に示す。11:00~17:30 の間では水位の変化は局所的な変化はみられたが大きな変動はなかった。しかし、18:00 における水位の平面分布はその他の時間帯に比べ大きく変化していた。特に、ペーパーディスク型地下水流向流速計の測定を行った観測井の水位が周辺より低くなっている。これは、潮位が上がってきたことにより沖合方向の地下水位が高くなったためと考えられる。

このため、18:00 における最大傾斜線から求めた流向はその他の時間帯と逆の方向であった。18:00 においては短時間に流向が変化したとみられる。

図-11 流速計周辺の水位の時系列変化

図-12 現地海岸における水位変化の平面分布 (X,Y; 直交座標系第Ⅲ系における座標)

図-12 (つづき) 現地海岸における水位変化の平面分布 (X,Y; 直交座標系第Ⅲ系における座標)

(3) 現地で取得されたペーパーディスクの画像

測定後のペーパーの画像を図-13に示す。ペーパーディスク型地下水流向流速計の測定は全部で9回行った。

図-13 現地測定を行ったペーパーディスク (画像における上が磁北, 測定時間 30 分) 測定時刻: a)10:00, b)11:00, c)12:00, d)13:00, e)14:00, f)15:00, g)16:00, h)17:00, i)18:00

図-14 ペーパーディスクより推定した流速と現地水頭差から算出した流速の時系列変化

図-15 ペーパーディスクを用いて推定した流向と動水勾配の最大傾斜線から推定した流向の関係

(4) ペーパーディスクによる流向流速と動水勾配

から算出した流向流速の比較

図-14 に ペーパーディスクより推定した流速と現地水頭差から算出した流速の関係を示す。図-11 より計測開始時 (10:00) にはまだ観測井の地盤が水没した状態にあり、水頭を基準とすると沖から岸に向けて地下水が流れていると推定された。砂州が干出して以降は水位変動が緩慢であった。本装置は測定時間内の平均的な流速を計測するため、水没する直前直後では流速測定結果が動水勾配から算出した結果と大きく異なった。しかし干潮時の安定した状態においては流速はほぼ一致した。砂州には満潮時に浸透した海水が地下水として貯留されており⁹⁾、徐々にこれが干潮時に流出すると考えられる。徐々に流速が減少するのは貯留量の減少に依存すると考えられる。砂浜からは満潮時に貯留された海水が流出する⁹⁾が、砂浜における上げ潮時の流速について直接測定した例はこれまでのところ存在しない。

図-15 にペーパーディスクを用いて推定した流向と動水勾配の最大傾斜線から推定した流向の関係を示す。流向に関しては、13:00 における結果が動水勾配の最大傾斜とペーパーディスクの測定結果と最も離れた値となった。これは測定を行ったペーパーディスクに汚れの付着が多く解析に影響したと考えられる。本装置の測定結果と地下水位の最大傾斜線から推定した流向は最大で 36° の差があった。2 つの値の RMSE は 19.8° となった。

流向、流速ともに測定結果と現地の水頭と透水係数からの推定結果が近い値を取らない時刻があった。これは、本装置の特徴として測定時間内の平均の流向流速を測定するものであるため、測定中に地下水の挙動が変化し計測結果が推定結果と離れた値をとったと考えられる。

5. 結論

電源を用いない安価な流向流速計であるペーパーディスク型地下水流向流速計を用いて海岸砂州の地下水流向流速を測定した。測定結果と動水勾配と透水係数から算出した流速には乖離した観測値が見られた。その原因として、海岸砂州では水没前後に短時間に水位が下降あるいは上昇するため、測定中に急速に動水勾配が変化したこと、およびペーパーへの汚れの付着が挙げられる。本装置は測定時間内の平均流速を測定するものであるため、そのような急速な流向の変化を伴う流速の変化に追従できず、流速測定結果は一致しなかった。また、現地観測により干潮時には砂州から常に地下水が沖合の方向に流動していることが明らかになった。

参考文献

- 1) 小林薫, 近久博志, 松本和伸, 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) 大成基礎建設株式会社: 単孔による地下水の「流向流速計」, 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) 齋藤宏則, 大江俊昭, 新屋敷直木, 八木原晋, 海野裕哉, 戸井田克, 田中真弓, 佐藤光吉, 鈴木健彦, 永井敏, 西垣誠: 超音波反射エコーを用いた地下水 3 次元流向・流速測定のための安定浮遊固体トレーサーの開発, 原子力バックエンド研究会, 13(1), 23-30, 2006
- 5) 野田敏雄: ペーパーディスク型地下水流向流速計の開発, 環境工学研究論文集 vol.47, 685-690, 2010
- 6) 浅野敏之, 川上弘次, 北出徹也, 田中信夫: 指宿海岸における砂浜浸透流に関する現地計測, 土木学会論文集 2(海岸工学), Vol.68, No.2, 2012, I_486-I_490

(2014.5.23 受付)

GROUNDWATER VELOCIMETER USING PAPER DISK AND ITS APPLICATION TO THE GROUNDWATER MOVEMENT IN THE COASTAL SAND BAR

Fumiya ONO, Koichi YAMAMOTO, Kotaro TSUSHIMA,
Masayuki OHISHI,
Ariyo KANNO and Masahiko SEKINE

The newly developed groundwater velocimeter which uses paper and ink was applied to the observation of the movement of the groundwater in the coastal sand bar on September, 2013. This measurement method uses tailings of the eluted dots on the paper. As a result of revising the analytical methods of the tailings of the paper, we could measure groundwater velocity and its direction successfully. We clarified that the groundwater in the coastal sand bar discharges while sand bar exposes in low tide.