

ペーパーディスク型地下水流向流速計の官能試験方法に関する研究

山口大学大学院 創成科学研究科	学生会員	○水俣勝基
山口大学大学院 創成科学研究科	正会員	山本浩一
山口大学大学院 創成科学研究科	正会員	小野文也
山口大学大学院 創成科学研究科	正会員	神野有生
山口大学大学院 創成科学研究科	正会員	関根雅彦
西松建設株式会社		黒瀬幸那

1. はじめに

近年、土壌・地下水汚染の対策として、地下水の動きを監視する事例が増えている。汚染の拡散を防止するため、その経路となる地下水の流向や流速を把握する必要がある。しかし既往の地下水流向流速計は、現地測定の際に電源が必要であり、また装置が高価である。そこで、安価で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(PDV)の開発を行っている¹⁾。

PDVは、インクの輸送を紙面で捉えることで地下水流向流速の計測を行う装置である。染料インクでドットを印刷した画用紙(ペーパーディスク)の上下を透水性スポンジで挟み、地下水流動場に一定時間静置することによって、スポンジ内にインクが溶出する。また溶出したインクが地下水の流れによって輸送され、紙面上へ再定着する。その輸送されたインクの軌跡(テーリング)の定着方向と距離より、地下水流向流速の計測を行う。

PDVはこれまで計測後のペーパーディスクを、スキャナで電子化後に画像解析を行うことで、テーリングの定着方向と距離を取得し、地下水の流向流速に変換していた。しかしPDVを用いて現地試験を行う際は、計測後のペーパーディスクを一度持ち帰って画像解析を行う必要があり、現地ですぐに測定結果が得られないといった問題があった。本研究では、PDVを用いて現地で迅速に地下水流向流速の測定結果を得る手法の開発を目的とし、目視によるPDVの官能試験方法に関する検討を行った。



図1 ペーパーディスクの概要図
(左：測定前、右：測定後)

2. 研究方法

2.1 装置概要

本装置はVP50パイプ(内径52 mm)用に作成した。またペーパーディスクは、画用紙(マルマン社製、126.5 g/m²)の中心に直径3 mmのドットを配置した。ペーパーディスクの概要図を図1に示す。図に示すように、流速や流向に応じてドットから溶出したインクの尾引き(テーリング)が紙面上に現れる。

2.2 サンプル取得方法及び画像解析方法

実験水槽内に流速を発生させ、ペーパーディスクのサンプルを取得した。また水流方向を90°の方位に設定し、各測定時間の流速につきサンプルを3回取得した。表1に各測定時間の設定流速を示す。

画像解析で取得したテーリングから流向を測定するため、初期ドットの重心の座標 $g(x, y)$ を起点とし、テーリングの重心の座標を $g'(x', y')$ を終点とするベクトル G の方位 θ を取得した。また流速の測定に使用するパラメータとして、テーリング長を(1)式で定義した。

キーワード 地下水流向流速計, 地下水, 簡易計測法

連絡先 〒755-0097 山口県宇部市常盤台2丁目16-1 山口大学創成科学研究科 TEL 0836-85-9005

$$L_s = L_G - \frac{R}{2} + \frac{D}{2} \quad \cdots \quad (1)$$

ここで、 L_s :解析テーリング長(cm)、 L_G :重心移動距離(cm)、 R :ドット直径(cm)、 D :楕円体長径(cm)である。図2にテーリング長のイメージ図を示す。また図3に、画像解析によって得られた、測定時間60分における流速と解析テーリング長の関係を示す。

表1 各測定時間における設定流速

測定時間(min)	設定流速(cm/min)
5	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0
30	0.02, 0.03, 0.04, 0.06, 0.07, 0.08, 0.10, 0.12
60	0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06

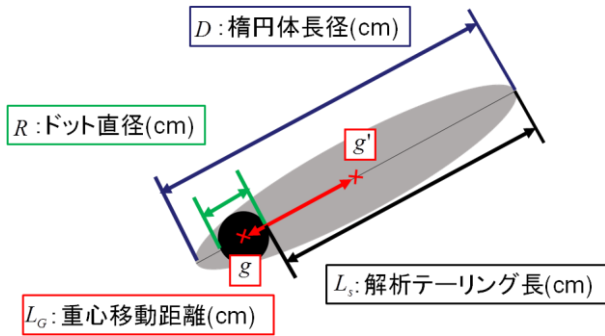


図2 テーリング長のイメージ図

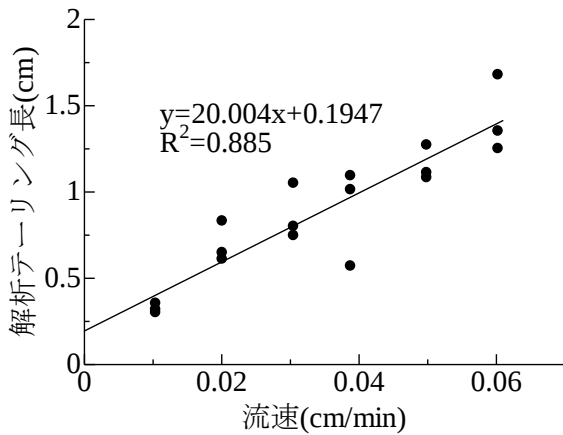


図3 流速と解析テーリング長の関係
（測定時間60分）

2.3 官能試験方法

測定時間5分、30分、60分で取得したサンプル63枚を使用し、18名のパネルで流向流速の推定を行った。

2.3.1 流向推定方法

a) 目視測定方法

時計回りを正とし、コンパスを用いてテーリングの発生方位を1°の目盛りまで目視で読み取った。

b) 目視測定の精度検証方法

目視で読み取った流向の個人の読み取り差を評価するため、標準偏差(SD)を(2)式より導出した。

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta - \bar{\theta})^2} \quad \cdots \quad (2)$$

ここで、 n :サンプル数、 θ :目視測定流向(°)、 $\bar{\theta}$: θ の平均値である。

また目視で読み取った流向と、画像解析で取得した流向の差から、二乗根平均誤差(RMSE)を(3)式より導出した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta - \Theta)^2} \quad \cdots \quad (3)$$

ここで、 Θ :画像解析で取得した流向(°)である。

2.3.2 流速推定方法

a) 目視測定方法

始めに、目視による流速推定を行う際のテーリング終端の判別精度の向上のために、基準紙を作成した。テーリング終端のRGBのMode値(最頻値)を取得し、テーリング終端を目視で読み取る際の基準色とした。

次に、定めた基準色を使用し、流速を目視で推定するための定規を作成した。図3に示す流速と解析テーリング長の関係から作成した検定直線より、目視で流速を直読する定規を作成した。作成した定規を図4に示す。

作成した定規のドット外径をペーパーディスクの初期ドットに合わせ、目視で色が違うと判断できる部分まで読み取った。測定時間5分では最小目盛り0.1 cm/minまで、測定時間30分、60分では0.01 cm/minまで読み取った。図5に定規を用いたテーリングの読み取りのイメージ図を示す。

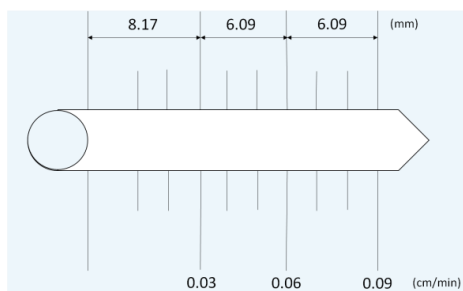


図4 流速の目視測定に用いる定規
(測定時間 60 分)

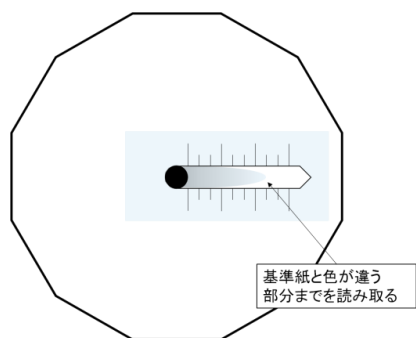


図5 定規を用いたテーリング読み取りのイメージ

b) 目視測定の精度検証方法

目視で読み取った流速の個人の読み取り差を評価するため、SD を(4)式より導出した。

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_e - \bar{v})^2} \quad \dots \quad (4)$$

ここで、 v_e : 目視測定流速 (cm/min), $\bar{v}$: v_e の平均値である。

また目視で読み取った流速と、画像解析で取得した流速の差から、RMSE を(5)式より導出した。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_e - V)^2} \quad \dots \quad (5)$$

ここで、 V : 画像解析で取得した流速 (cm/min) である。

また画像解析で取得した流速を基準とした、目視による流速測定の精度を(6)式より求めた。

$$A = \frac{RMSE}{V} \times 100 \quad \dots \quad (6)$$

ここで、 A : 測定精度 (%) である。

3. 研究結果

3.1 流向

図6に、測定時間 60 分における、流向の目視測定結果の SD, 及び画像解析結果を基準とした RMSE を示す。流速 0.01 cm/min では、SD と RMSE とともに値が大きくなった。以上の流速域では、インクの輸送において移流よりも拡散が卓越し、読み取りが困難であったと考えられる。0.02 cm/min 以上の、目視による流向測定結果の SD 値は $\pm 10^\circ$ 以下となり、個人によるばらつきが極めて小さい結果となった。

また流速 0.04 cm/min 付近で、RMSE 値が $\pm 34^\circ$ となったサンプルがあった。このサンプルでは、インクの拡散によってテーリングの幅が大きく出現し、加えて拡散したテーリングの範囲内にもインクの濃淡が確認された。画像解析において、一定閾値を満たすテーリングはインクの濃淡に関わらず 2 値化処理される。しかしパネルは、出現したテーリングのうち濃部のみを水流方向と判断し流向を読み取ったため、画像解析と目視測定者の間に計測方法の齟齬があったと考えられる。

表2に、各測定時間における流向の測定可能範囲と測定精度を示す。

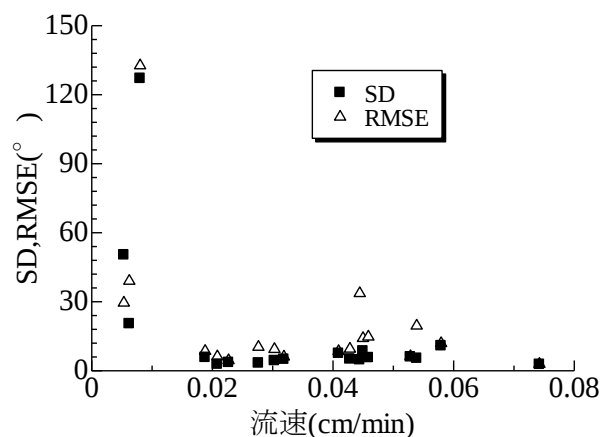


図6 目視測定による流向の SD, RMSE

表2 流向の測定可能範囲と測定精度

測定時間(min)	流速帯(cm/min)	測定精度(°)
5	0.4～1.0	± 20
30	0.04～0.12	± 25
60	0.02～0.06	± 15

3.2 流速

図7に、測定時間60分における、流速の目視測定結果のSD、及び画像解析結果を基準としたRMSEを示す。設定流速0.01 cm/minではテーリングが小さく、測定不可能と回答したパネルが多くを占めたため、データから除外した。流速0.02 cm/min以上ではSD値が ± 0.01 cm/min以下となり、個人によるばらつきが極めて小さい結果となった。

流速0.06 cm/min以降では、RMSE値が ± 0.02 cm/min付近をとったサンプルがあった。テーリングの長さは流速の大きさに比例して出現するが、流速が大きい場合はテーリング終端の色が、広範囲で基準紙に近い色を取ってしまう。画像解析で一定の閾値で判別されたテーリング長と比較し、パネルが全体的にテーリング長を小さく判別した傾向にあったため、高流速域においてRMSE値が上昇したと考えられる。

図8に、測定時間60分における、画像解析で取得した流速を基準とした、目視による流速の測定精度を示す。目視測定では0.02 cm/min～0.06 cm/minの流速域において40%以内の精度で測定可能であることが分かった。

表3に、各測定時間における流速の測定可能範囲と測定精度を示す。

4. まとめ

目視によるPDVの官能試験方法の検討を行った。また本研究では、測定後のペーパーディスクの画像解析結果を基準とし、目視判別による流向流速の精度検証を行った。

測定時間60分での計測において流向は、判別の個人差は小さく、SD値が $\pm 10^\circ$ 以下、RMSE値が0.02 cm/min～0.06 cm/min内で $\pm 15^\circ$ 以下であった。また流速は同範囲で、40%以内の精度で測定可能であることが分かった。

画像解析と比較して精度自体は劣るものの、現地計測を行う際にPDVを用いる場合に、現地にて迅速に地下水流向流速の実測値を把握する手法を確立した。今後現地試験を行い、インクと地下水の成分による化学反応や泥炭の付着といった、目視測定を阻害する外的要因に対し対策を講じていくことが求められる。

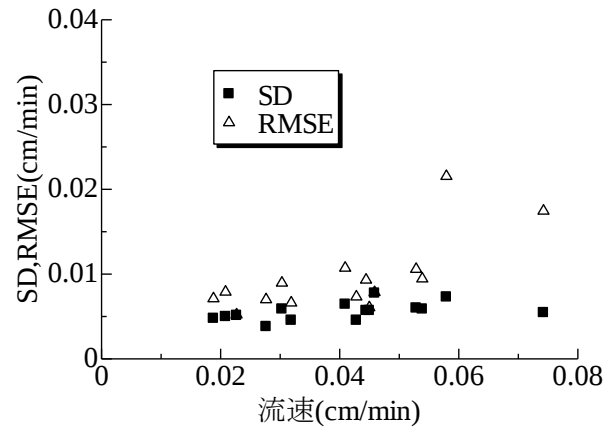


図7 目視測定による流速のSD, RMSE

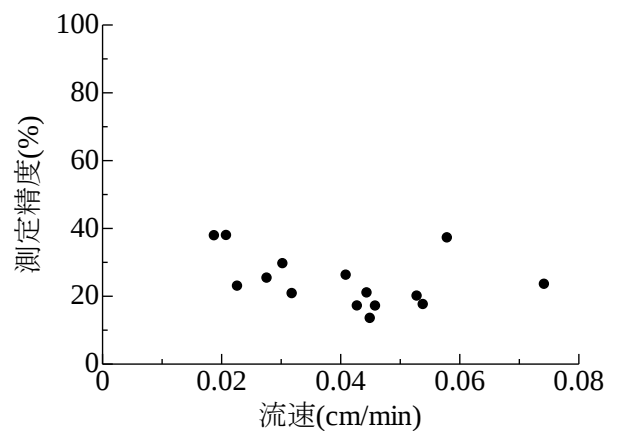


図8 目視測定による流速の測定精度

表3 流速の測定可能範囲と測定精度

測定時間(min)	流速帯(cm/min)	測定精度(%)
5	0.4～1.0	45
30	0.04～0.12	23
60	0.02～0.06	40

謝辞

本研究は大起理化工業株式会社との共同研究により行われた。

参考文献

- 1) 野田敏雄・山本浩一: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.
- 2) 小野文也, 山本浩一, 明石卓也, 神野有生, 関根雅彦:電源不要かつ迅速な地下水流向流速計測方法の開発, 土木学会論文集 C(地圏工学) Vol72(4), p. 377-384, 2016