

地下水観測孔の状態とストレーナータイプが与える流向流速測定結果への影響

日本物理探査株式会社 正会員○都築 孝之
自然地下水研究所 竹内 篤雄
芙蓉地質株式会社 正会員 宮崎 基浩, 原澤 剛史
キタイ設計株式会社 正会員 岩瀬 信行, 五十嵐 慎久

1. はじめに

単孔式流向流速測定においては、裸孔状態で測定する場合を除き、孔壁と測定用パイプとの間に間詰材（または「フィルター材」）を充填することが必要であるが、これを基準化したものはなく、その重要性について詳しく述べられているものは少ない。また、ストレーナー（または「スクリーン」）については必要な開孔率についての記述はあるが、その形状（丸穴やスリットなど）については明記されていないのが現状である。筆者らが 2000 年に地すべり関係の技術者にアンケートを行ったところ、地下水観測孔の仕上げ方において間詰材を利用していない事例が回答者全体の 3 割弱もあり、ストレーナーの形状については丸穴 7 割に対して、スリットが 2 割程度という結果を得ている¹⁾。アンケートからすでに 25 年が経過しており、当時は丸穴タイプのストレーナーが主流であったが、市販され入手しやすいことから、近年では横スリットタイプの使用例が多くなっている可能性が考えられる。

筆者らは近年、横スリットタイプのストレーナーを用いた流向流速測定の結果、複数の箇所までとは異なる流向解析図が得られたことをきっかけに、観測孔の状態やストレーナーの違いによる観測孔内の水の流れを調べる目的で小型～大型水槽を用いた実験を行った^{2) 3) 4)}。

ここではこれまでに行った複数回におよぶ実験結果についてあらためて整理し、間詰材の重要性ならびにストレーナーの使用上の留意点について報告する。

2. 単孔式加熱型流向流速計の原理と測定方法

単孔式流向流速測定は、固体粒子追跡型と溶液濃度追跡型の二つに大別される⁵⁾。それらの例として、前者は地下水中に浮遊する微細粒子の移動をテレビカメラなどで追跡する「テレビ法」が、後者にはヒーターによって加熱された地下水をトレーサーに温度センサを用いてその移動を検出する「熱量法」がそれぞれ挙げられる。いずれの方法も観測孔内を流れる地下水の速さを求めるもので、地盤内を流れている地下水の流速を直接測っているわけではない。このため、各方法において測定結果からダルシー流速（見掛けの流速）または真の流速への変換が行われており、その変換方法は測定装置によって異なっている⁵⁾。

筆者らが扱う単孔式加熱型流向流速計（以降「FDV」）は、竹内篤雄らにより開発された測定器⁶⁾で、大型水槽を使った実験により開孔率1%、5%、8%、10%、13%、15%、20%に対してダルシー流速に変換する回帰式が得られている。なお、実験に使用したストレーナーの形状はφ5mm～φ6mmの丸穴である。

FDVは、ヒーターの外殻に沿って8個の測温体を等間隔に配置しており、またセンサ上部には磁気計測モジュール（方位計）がセットされている（図-1）。

測定は、センサ挿入による孔内水の乱れが収まったのを確認してから開始する。まず自然状態の孔内水温度を200秒間計測する。その後ヒーターの電源を入れ、電圧を一定の状態を保ちながらその800秒後にヒーターの電源を切る。そしてさらに200秒程度計測を続けた後終了としている。なお、測定データは10秒ごとに記

録されるようにプログラムされている。

図-2に測定データを整理した各測温体の温度変化図を示す。測定開始200秒後のヒーター加電により、各測温体の温度差（自然状態時の温度との差）が急激に上昇するが、孔内に流入する地下水温とヒーター熱とが均衡することで上昇が止み、断電まで安定した温度差を示す。

測温体のヒーター加電前の温度と加電中の安定区間の温度との差は、地下水の流速が遅いほど大きく、速いほど小さくなることが実験から判明している。このことを利用して、各測温体のヒーター加電前後の温度差と地下水流速との関係をストレナー管の開孔率毎に予め求めておくことで、測定で得られた温度差から地下水流速を求めることが可能となる。図-3にFDV測定による開孔率15%の丸穴ストレナーに対する温度差と流速（ダルシー流速）との相関図を示す。

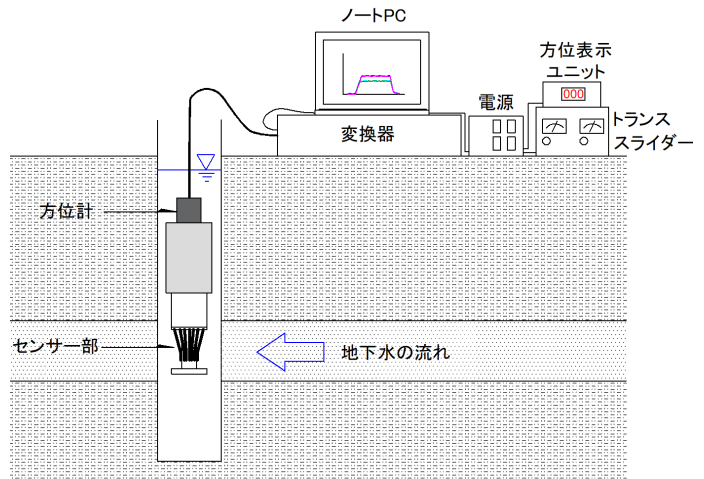


図-1 FDV のシステム構成⁶⁾

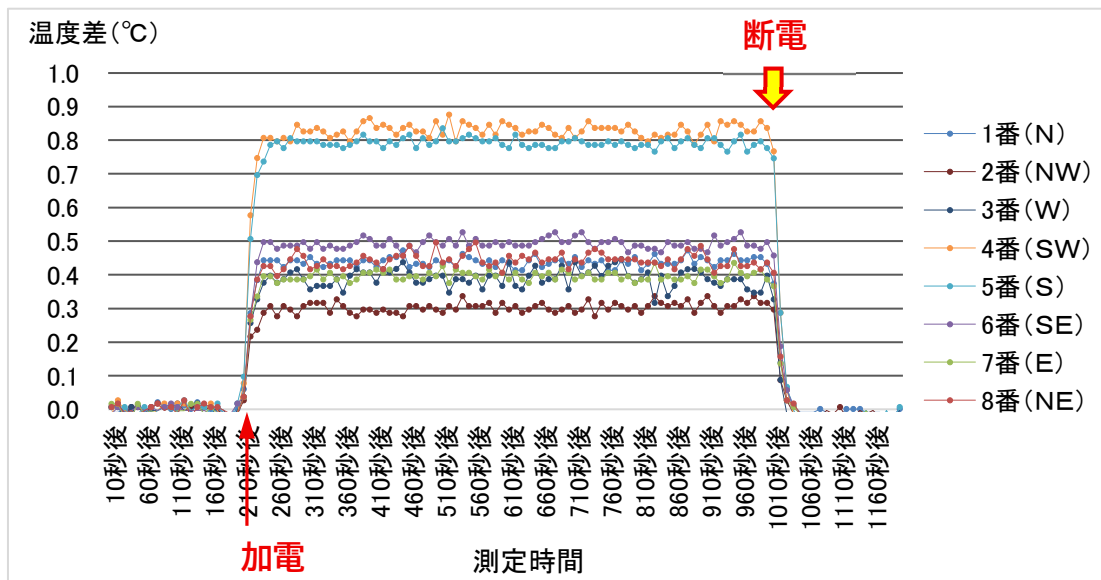


図-2 各測温体（1～8番）の温度差変化図

流入する地下水の流速が一定の場合は、加電後ある程度まで温度差が上昇すると、以降はほぼ安定した温度差分布が得られる。

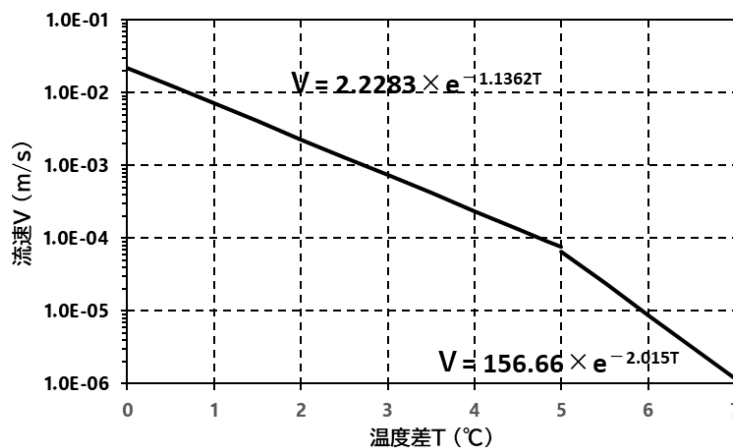


図-3 FDV による丸穴ストレナー開孔率 15%における温度差－流速相関図⁶⁾

一方、流向については上述した安定区間の任意の時刻における各测温体の温度差分布から流向を推定している。図-4に流向判定の原理図を示す。

地下水の流れがない場合、センサ中心部のヒーターを加電することで発生した熱は周囲に均等に拡散し中心部から外側へ同心円状に温度分布が形成される（図-4左）。地下水の流れがある場合、発生した熱は地下水の流れに乗って下流方向に移流する（図-4右）。そのために上流側は低温域を、下流側は高温域をそれぞれ示すことになり、この温度分布から流向を推定することが可能となる。

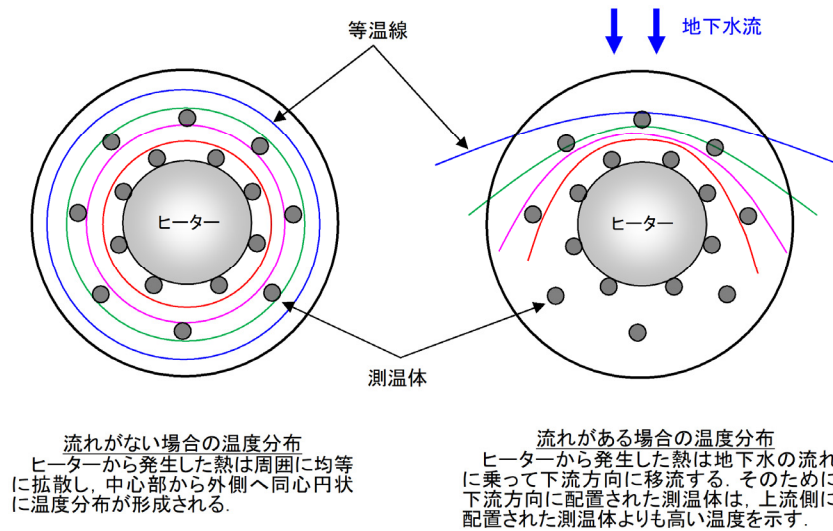


図-4 FDV型流向流速計の流向判定の原理⁶⁾

次に、流向を求めるための一般的な流向解析図を図-5の左に、異常な流向解析図を図-5の右側にそれぞれ示す。図-5の各図はセンサ部を上から見たように表現しており、視覚的に流向がわかるように工夫されている。すなわち、図の中心から左回りに等間隔で各测温体の温度軸が配置され、測定時にセンサに取り付けた磁気方位計で1番测温体を北に向くようセットすることで、図の最上部が北方向を示すようになっている。図の中心から同心円状に描かれているのは等温軸で、外側ほど温度が高い配列としている。この座標図に、ヒーター加電時において温度差が一定となる安定区間の任意時刻の各测温体の温度差値をプロットし、それぞれを線分で繋げたものが流向解析図（同時刻温度差分布図）である。

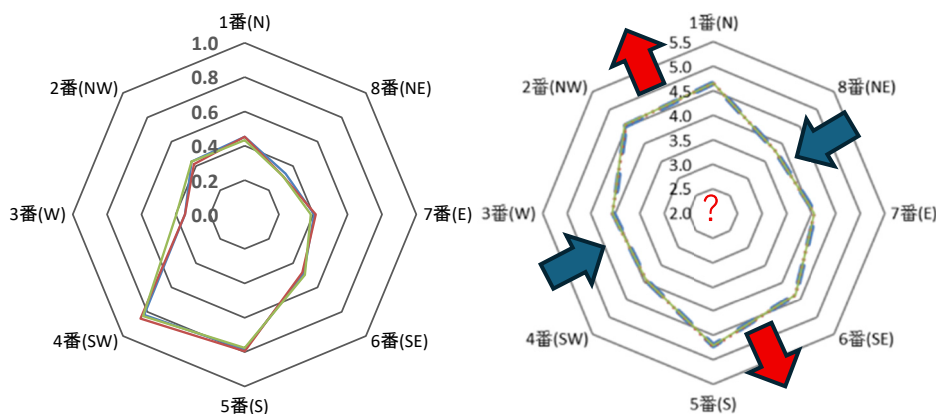


図-5 正常な流向解析図（左）と異常な流向解析図（右）

矢印は地下水の流れの方向を示す。

通常であれば、図-5の左図に示したように、地下水流の上流方向を示す低温域と下流方向を示す高温域とが明瞭に描出され、この図から地下水の流動方向を推定することができる。

一方、図-5の右図では、2つの高温域と2つの低温域とがそれぞれ向かい合って分布する「紡錘型（“算盤型現象”と呼んでいる）」の温度差分布図が描かれているが、これでは地下水の流動方向を正しく推定することができない。そしてこのような異常な流向解析図が、横スリットタイプのストレーナーを使用したいくつかのサイトで同じ観測孔の複数の深度で得られた。なぜこのような現象が生じたのかについて、まず小型水槽による実験を行った。

3. 小型水槽による地下水流動の可視化実験

実験用水槽はアクリル樹脂を使い、長さ1.0m、幅0.13mおよび0.30m、深さ0.1mおよび0.15mの2種類の箱型に作製した。そこに地盤材として目地材（φ3～7mmの角礫）または2号珪砂（平均φ3mmの垂角～角礫）を詰め、水槽の中央に20#のステンレス網で作成した円筒（φ95mm）を設置し、これをボーリング孔と見立て、その中に測定用パイプとしてのストレーナー管（VP50）を入れた。ストレーナー管は、比較のために開孔率10%および13%の丸穴タイプと開孔率12.06%および20.00%の横スリットタイプ（スリット幅はそれぞれ0.5mmおよび1.0mm）の4種を用意した。また、間詰材は地盤材と同じものを使用し、間詰材を入れた場合と入れない場合とで行った。

表-1に実験の内容を整理して示すとともに、図-6には小型水槽の実験風景と使用したストレーナー管をそれぞれ示す。実験は、水槽の上流側から水を入れ、下流側でその排水量と水深から水槽（地盤に相当）内を流れる水の流速（ダルシー流速）を求めた。与えたダルシー流速は $4.9 \times 10^{-4} \sim 1.7 \times 10^{-3} \text{m/s}$ の範囲である。水の流れは蛍光試薬（Fluorescein Sodium）で可視化した。

表-1 小型水槽による実験の内容

地盤材および間詰材	間詰材	ストレーナータイプ	開孔率(%)	備考
地盤材と間詰材は同じ材料とし、 ①目地材（φ3～7mmの角礫） ②2号珪砂（平均φ3mmの垂角～角礫） の2ケースで実施	①間詰材を入れた場合 ②間詰材を入れない場合 の2ケースで実施	丸穴	10	穴の直径は5mm, 手作り
			13	穴の直径は6mm, 手作り
		横スリット	12.06	スリットの幅は0.5mm, 市販品
			20.00	スリットの幅は1.0mm, 市販品

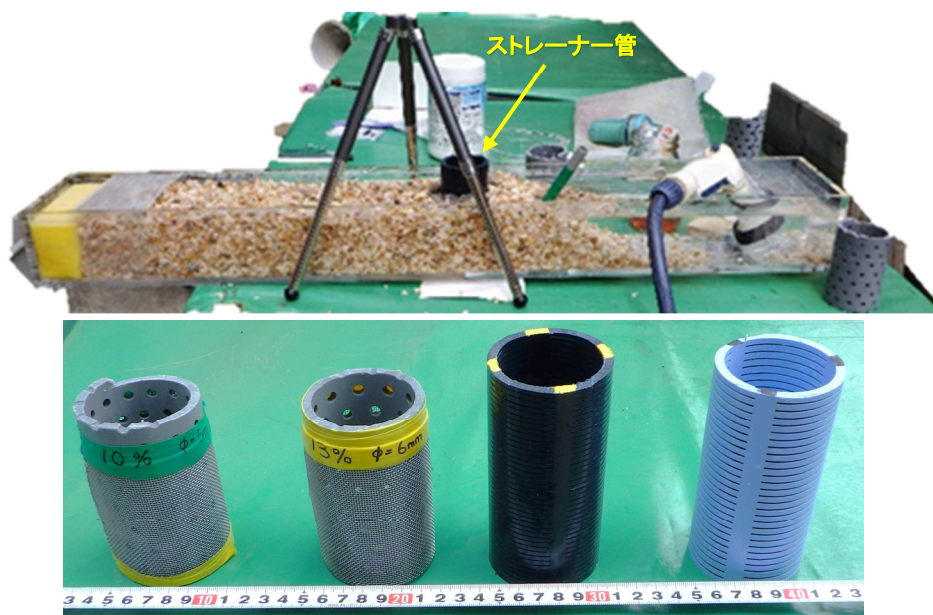


図-6 小型水槽による実験風景（上段）と使用したストレーナー管（下段）

実験に使用したストレーナー管は、左から丸穴タイプ（開孔率10%および13%）、横スリットタイプ（開孔率12.06%および20.00%）の4種類である。

実験にあたり、横スリットの無孔部分が上流側で地下水の流動阻害を起し、本来低温域である上流側も高温域となり、それが図-5の右図に示した2つの高温域を生じさせた可能性を考えた(図-7)。そこでストレーナー管の中心にヒーターと似たサイズの円柱管(疑似ヒーター)を配置し、横スリットの無孔部分を上流に対していくつかの方向に配置して蛍光試薬でストレーナー管内の地下水の流れを観察した。実験の結果を以下に示す。

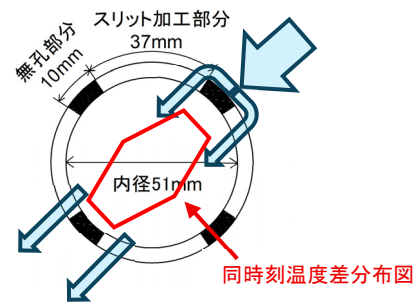


図-7 無孔部の配列と算盤玉現象との関係の想像図

(1) 間詰材を入れない場合は、ストレーナーのタイプに関係なく、水はストレーナー管の外周をまわって下流へ流れ、管内に水はほとんど入ってこないことが確認された(図-8左)。それは横スリットの方が顕著であった。

(2) 間詰材を入れた場合は、管内に水が速やかに浸入し下流へと流れることが確認された(図-8右)。また、管内を流れる水の速度は、丸穴タイプに比べて横スリットタイプでは1/2前後遅いことが確認された。



図-8 可視化した観測孔内の水の流れ

(左:間詰材無し,右:間詰材あり,写真上が上流側)

(3) 流向流速計をイメージして疑似ヒーターをストレーナー管中央に配置した結果、横スリットタイプのストレーナーでは、上流側無孔部付近では水の流れが非常に遅いか滞留することが判明した(図-9)。この現象は具体的には、蛍光試薬で染色された水が管内に入ってきてすぐは無孔部付近に試薬の入らない影(水の停滞域)ができ、やがてゆっくりと拡散侵入によって試薬が影部に入ると影は消失するが、水の流れで管内の試薬が下流側へすべて流出した後も上流側の無孔部分に試薬が残留することで確認した。この時、疑似ヒーター下流側にも同様の現象が確認されている。図-9はその際の状況を示したものである。

(4) 追加実験として、ストレーナー管を入れない裸孔状態で水の流れを可視化した結果、試薬は孔中心から上流へ120度の範囲から孔中心へ向かって流入し、中心付近からは平行に下流へ流れることが確認された(図-10)。

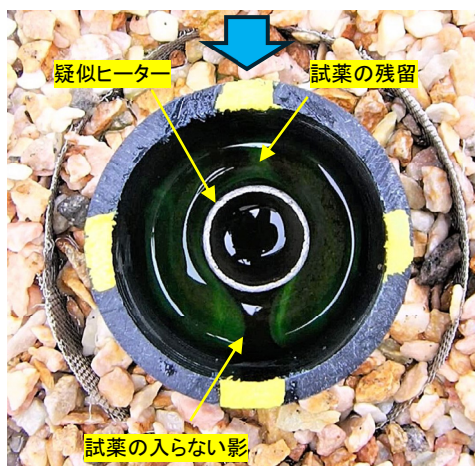


図-9 疑似ヒーター挿入後の様子
(ストレーナー管の黄色印は無孔部)

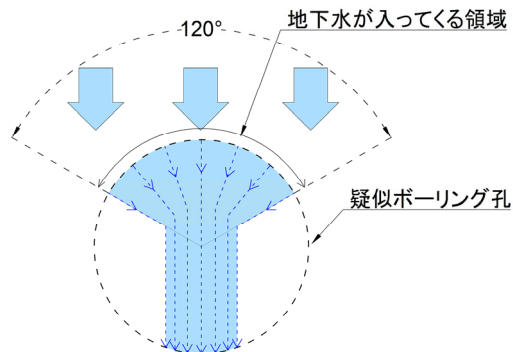


図-10 裸孔状態での孔内への水の流れ
(図-8右の水の流れもこの実験で確かめられた)

実験結果 (1) から、間詰材を入れない観測孔では正確な地下水流動が計測されないことが判明した。これはストレーナー管の無孔部の抵抗が原因と考えられる。

実験結果 (2) から、横スリットタイプのストレーナー管を使用した場合、丸穴タイプのストレーナー管で回帰式を得ているFDVでは流速の算出値に誤差が生じる可能性が高いことが予想された。

実験結果 (3) から、横スリットタイプのストレーナー管では上流側の無孔部付近で水の流れが周りに比べて遅いか滞留するため、本来であれば低温域となるとところが高温域となり、下流側の高温域を合わせて“算盤玉現象”が生じるものと推察された。

実験結果 (4) から、無孔部が上流直方向に向いていなくても、上流方向に対し左右60度までの範囲にあれば流動障害が起こり算盤玉現象が生じる可能性があることが解った。

実験結果 (2) から予想されたストレーナータイプの違いによる流速算出式の違いを確認するために、大型水槽による実験を行った。

4. 大型水槽による横スリットストレーナー実験

実験水槽はアクリル樹脂と鋼製枠からなる、長さ1.5m、幅0.6m、深さ0.6mの箱型で、上下流側に受水槽と排水槽が設置されている (図-11)。受水量は流量計または定量器で、排水量は定量器でそれぞれ測り、ストレーナー管位置で水深を測ることで水槽内の水の流速 (ダルシー流速) を算出した。与えたダルシー流速は $3.787 \times 10^{-6} \text{m/s} \sim 1.800 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 間の19種 (各2~3回測定) で、地盤材と間詰材には $\phi 2 \sim 5 \text{mm}$ の豆砂利を使用した。



図-11 大型水槽による実験風景

図-12 に実験の結果得られた平均温度差と流速との関係を示す。図から以下のことが読み取れる。

- ①温度差 4.15°C 以下は、流速と温度差に明瞭な相関がある。
- ②その傾向は温度差 4.86°C まで最大速度値として得ることができる。
- ③ただし、 4.36°C 以上になると、温度差に対して流速にばらつきが生じる。換言すると、同じ流速に対して複数の異なる温度差が得られる。
- ④さらに 4.71°C 以上になるとそのばらつきの幅が2オーダー以上に広がる。
- ⑤回帰式は類似開孔率の丸穴タイプと比べて0.5~1オーダー近い差がある。

これらのことから、FDVをはじめとする熱量法では、同じ開孔率でもストレーナーの形状によって得られる回帰式は異なることが判明した。

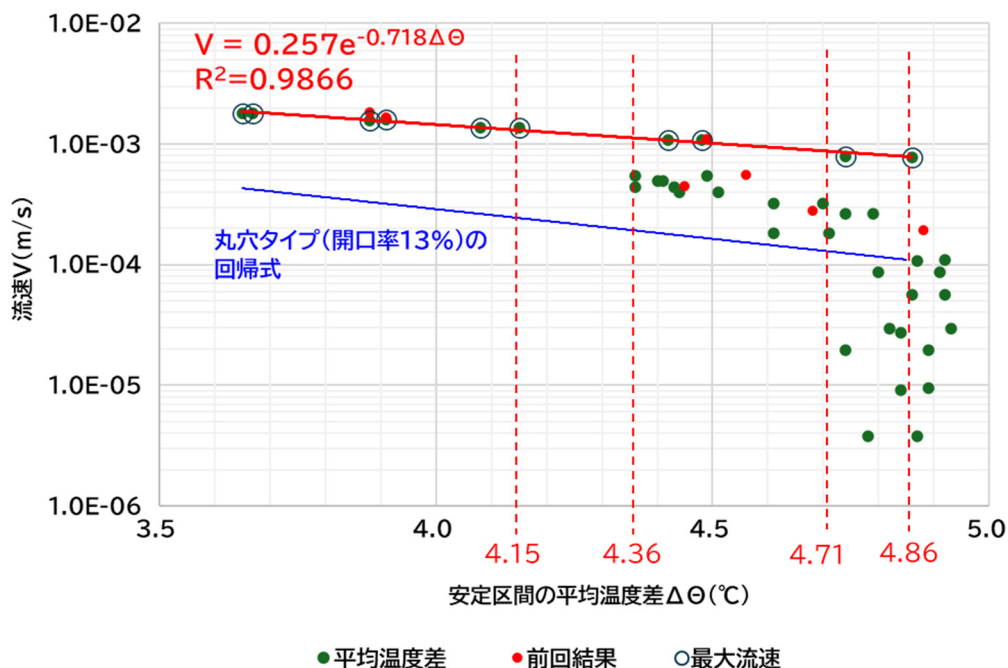


図-12 実験で得られた平均温度差とダルシー流速との関係

赤線が本実験で得られた横スリットタイプの回帰線で、青線が丸穴タイプの既知の回帰線。実験データを示す緑の丸印を黒抜き丸で重ねたデータは、各平均温度差における最大流速を示す。また、赤丸は前回結果とあるが、本実験の10ヶ月前に先行して行ったデータである。

5. 間詰材の必要性

地下水観測孔の仕上げにおいて、施工上などの理由でストレーナー管の残置ができず回収にも手間がかかるために、間詰材を入れないケースが少なくない。今回の実験結果から、間詰材が無いケースではストレーナー管内に地下水はほとんど入ってこないことが判明した。

なお、間詰材を使わない場合で地下水がストレーナー管内に入るのは、ストレーナー管がボーリング孔の上流側の孔壁に接触している場合のみであることも小型水槽実験の際に確認できている。また、ボーリング孔内の一部が孔壁の崩壊により間詰材を入れた時と同じ状況になっているケースも少なくはないであろうが、このようなケースを除けば、間詰材を使っていないストレーナー管での流向流速測定で得られたデータの精度および信頼性はほとんど期待できないであろう。

6. まとめ

いろいろなシーンで使われている流向流速測定装置だが、その多くはストレーナーの開孔率についての条件はあるものの、間詰材の有無やストレーナーの形状（丸穴、横スリット、縦スリットなど）についてはほとんど触れていないのが現状である。今回実施した小型水槽および大型水槽による実験結果は、間詰材の重要性を示すとともに、FDVのように実験水槽に与えたダルシー流速とヒーター加電による测温体の温度差との相関から流向流速を求める方法では、開孔率だけでなくストレーナーの形状に応じた回帰式を得る必要があることを示すものである。

なお、観測孔の仕上げ方については、全地連のホームページに資料¹⁾が掲載されているので、それを参考に観測孔を仕上げ、精度の高い流向流速測定を行うことが望まれる。

参考文献

- 1) 全地連ホームページ内資料「地下水調査のための観測孔の仕上げ方マニュアル（案）」，（最終閲覧日2026年3月10日）. <https://www.zenchiren.or.jp/geocenter/zenchi/docs/manual.pdf>
- 2) 都築孝之，竹内篤雄，山西正朗，宮崎基浩，五十嵐慎久（2023）：地下水観測孔内部の流動状況の可視化実験報告（その1），日本応用地質学会，令和5年度 研究発表会講演論文集,論文 No.67.
- 3) 五十嵐慎久，竹内篤雄，都築孝之，岩瀬信行，近藤恵太（2023）：地下水観測孔内部の流動状況の可視化実験報告（その2），日本応用地質学会，令和5年度 研究発表会講演論文集,論文 No.68.
- 4) 都築孝之，竹内篤雄，宮崎基浩，原澤剛史，岩瀬信行，五十嵐慎久（2025）：地下水観測孔の仕上げ方が与える流向流速測定結果への影響,全国地質調査業協会連合会，技術フォーラム2025，論文 No.CM60.
- 5) 地盤調査の方法と解説（2013）：公益社団法人地盤工学会,pp.629-633.
- 6) 竹内篤雄（1996）：温度測定による流動地下水調査法，p.480，古今書院