

画像計測による孔内流向流速測定の実践と今後の課題

Study on Measurement of Groundwater Flow in Single Borehole by Image Processing Technique

小林 薫 (こばやし かおる)

飛鳥建設防災 R & D センター技術研究所 副所長

松元 和伸 (まつもと かずのぶ)

飛鳥建設防災 R & D センター技術研究所 室長

近久 博志 (ちかひさ ひろし)

山口大学教授 地域共同研究開発センター
(元 飛鳥建設 防災 R & D センター 副センター長)

松田 浩朗 (まつだ ひろあき)

飛鳥建設防災 R & D センター技術研究所 研究員

1. はじめに

地下水の流向流速測定は、環境保全・環境修復の分野においては透水試験とともに重要視されている¹⁾。

原位置においてボーリング孔を用いて地下水の流向流速を測定する方法は、大きく分けて多孔式と単孔式がある。従来、地下水流動を把握する目的で各種同位体や染料、塩水を用いた多孔式による測定が数多く実施されてきた。しかし、本測定は測定期間が長く、かつ、多額の費用を要した。一方、単孔式は局所的であることに留意した測定を実施すれば、測定期間も短く経済的な調査が可能であることから、近年では多く実施されている。この単一のボーリング孔を利用して地下水の流向と流速を測定する方法は、地下水が豊富で複雑な地層構成である我が国の独自技術として発達した方法である²⁾。

本論文は、現状における単孔式で地下水の流向流速を測定する方法について整理するとともに、画像処理技術や超音波を用いて3次元流向流速測定や極低流速場での流向流速測定を可能にする技術に関する最近の取り組みと今後の課題について述べる。

2. 孔内流向流速測定の実状

2.1 孔内流向流速測定の種類と概要

図1に原位置における地下水に関する各種流向流速測定方法を示す。また、図2には単孔式の孔内流向流速測定方法の種類を示す。本測定法は、大きく分けて固体粒子追跡型と溶液濃度追跡型に分類される。

代表的な単孔式の孔内流向流速測定方法は6種類であり、そのうち中性子検出法、電位差法および熱量法の三つの測定方法(図2の着色部の測定方法)については、建設技術評価制度(旧 建設省)による技術評価を昭和58年度に得ている。前記の3種類の測定方法は、トレーサの希釈濃度を計測するポイントダイリューション法を応用したホウ素をトレーサとして用いる中性子検出法⁵⁾、注水した蒸留水の希釈程度を計測して流向流速を求める電位差法⁶⁾、地下水に熱を与えて流向流速を求める熱量法^{7),8)}がある。

表1に建設技術評価制度(旧 建設省)による技術評価を取得している孔内流向流速測定方法の概要と測定

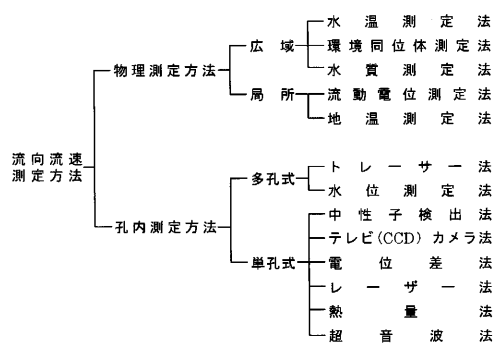


図1 地下水の流向流速測定方法³⁾ (一部加筆)

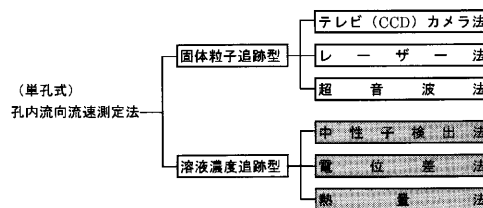


図2 単孔式の孔内流向流速測定方法の分類⁴⁾

表1 代表的な孔内流向流速測定方法の概要

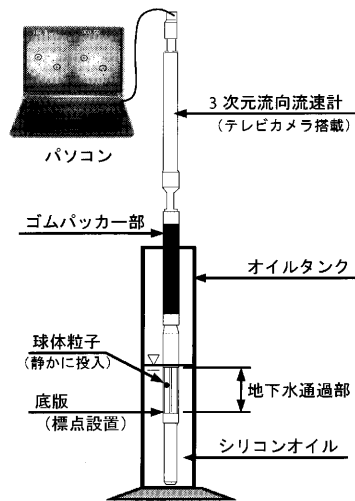
測定方法 (単孔式)	概 要	流速測定範囲* (m/s)
中性子検出法	ホウ素をトレーサとし、指向性(8方向)を持たせた中性子検出器で各方向のホウ素濃度の希釈状況の変化より求める方法	3×10^{-7} $\sim 1 \times 10^{-3}$
電位差法	地下水と比抵抗の異なる溶液をトレーサとし、電極間の電気抵抗(周囲12本)を測定することで、トレーサの希釈状況の変化より求める方法	3×10^{-7} $\sim 1 \times 10^{-4}$
熱量法	ヒーターによって加熱された地下水をトレーサとし、温度センサー(8個)を用いてその移動を検出して求める方法	1×10^{-5} $\sim 4 \times 10^{-3}$

*: 流速測定範囲はカタログ値である。

可能とされている地下水の流速測定範囲をまとめて示す。

2.2 画像計測による孔内流向流速測定方法

テレビ(CCD)カメラ(以下、テレビカメラと記す)を用いてトレーサ粒子の軌跡を追跡する最も直接的な測定方法である。テレビカメラを用いて液体中の浮遊粒子を直接追跡する固体粒子追跡法^{9),10)}は、孔内水の濁りに関する課題が残されているが、測定時間が短い、中間処理・解析を必要としない他、地下水流動の可視化という視覚的な観点から、有望な手法の一つであるとされている¹¹⁾。しかし、低流速場($< 10^{-6}$ m/s)への適用は難しい。



図—3 室内沈降実験の概要図

近年では、原位置における地下水流向流速を正確に把握する測定方法の確立を目指した研究開発が進められている。ある特定の固体トレーサに着目し、液体中での軌跡を追う固体粒子追跡型と溶液の移動を追跡する溶液濃度追跡型のうち、流速がきわめて遅い場合には、溶液濃度追跡型は水中での拡散現象が避けられないため、最近では固体粒子追跡型に関する研究開発が盛んである。以下には、固体粒子追跡型の孔内流向流速測定に関する最近の取組みについて述べる。

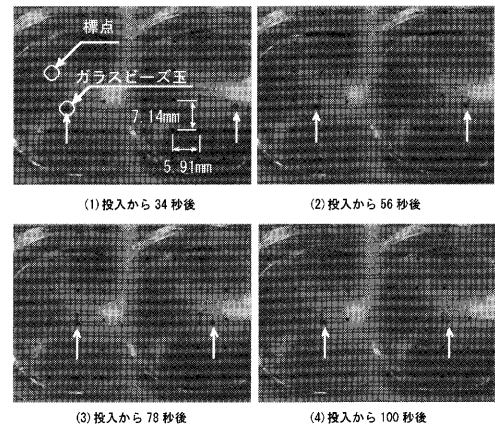
3. 孔内流向流速測定に関する最近の取組み

3.1 3次元流向流速測定への取組み

現状における単孔式による孔内流向流速測定は、技術的に水平流のみしか測定不可能である。この課題を解決するため3次元流向流速計が開発されている¹²⁾。単孔式により3次元の地下水流動の流向流速を測定する方法は、ステレオビジョンを応用したもので、テレビカメラとプリズムを組み合わせることで撮影した視差の異なるステレオ画像を処理することにより、対象とする液体中を移動する固体トレーサの3次元座標を求め、流向と流速を同時に算定するものである。

従来の孔内流向流速計では、鉛直方向成分の地下水流動を測定できなかったため、ここでは液体中を沈降する球体粒子の沈降速度を測定し、理論値と比較することにより鉛直方向成分の測定精度の検証を行った。

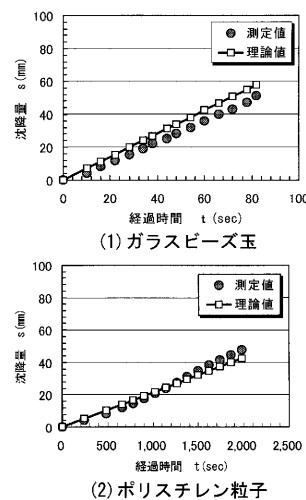
液体中の球体粒子の沈降速度測定は、室温一定（20℃）の部屋で図—3に示すように底版に標点群を配置した3次元流向流速計をシリコンオイルを入れた容器内に挿入する。その後、球体粒子をシリコンオイル上部より静かに投入し沈降させる。この球体粒子（写真—1の↑印）の沈降状況は、時刻（経過時間）と共にプリズムを通して視差の異なる2方向からの画像として同時に撮影し、テレビカメラに接続したパソコンに順次取り込み保存する。取り込んだ画像を用いてSelf Calibration法¹³⁾で画像解析を行い、球体粒子の沈降量と経過時間の関係から沈降速度（＝沈降量／経過時間）を算出する。解析により得られた沈降速度は、沈降速度が十分小



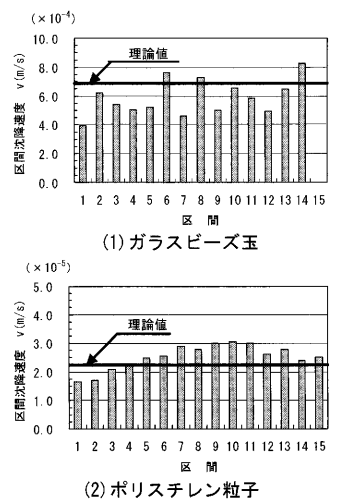
写真—1 球体粒子沈降時に取得した画像例（球体粒子；ガラスビーズ玉）

表—2 Self Calibration 法における¹³⁾解析条件

解 析 条 件	
①標点数	21 点
②基準点数	3 点
③基準尺	2 本
④画像枚数	2 枚
⑤焦点距離	15mm
⑥撮影スケール	16.667
⑦画像尺度	0.1667mm／ピクセル



図—4 経過時間と沈降量の関係



図—5 区間沈降速度

さいことから、Stokes（ストークス）が理論的に導いた式¹⁴⁾により求まる沈降速度と比較検討し、測定精度の検証を行った。

画像処理を行う際の解析時に用いた標点数は、左右の両画像に共通して撮影されている21点（球体粒子1点を含む）を用いた。表—2にSelf Calibration法における解析条件を示す。なお、各標点間の相対距離はすべて既知である。

室内実験に用いた球体粒子は、直径と密度の異なるガラスビーズ玉（直径 $d=1.02$ mm、密度 $\rho'=2.4$ t/m³）とポリスチレン粒子（直径 $d=0.88$ mm、密度 $\rho'=1.03$ t/m³）の2種類を用いた。また、実験に使用した液体は、パソコンへ取り込む画像取得時間を考慮し、球体粒

論 文

子の沈降速度の調整が図りやすいシリコンオイル（粘性係数 $\mu = 1.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (20°C), 密度 $\rho = 0.974 \text{ t/m}^3$ (20°C)) を用いた。

本測定法を用いて得られたシリコンオイル中を沈降する各球体粒子の経過時間と沈降量の関係を図-4に示す。今回の室内実験では、沈降速度の速い ($< 10^{-4} \text{ m/s}$ レベル) ガラスビーズ玉は、測定された沈降量が Stokes の理論式から求まる沈降量に比較していくぶん小さい傾向にあるものの比較的良く一致している。また、ポリスチレン粒子のように沈降速度が比較的に遅い ($< 10^{-5} \text{ m/s}$ レベル) ものは理論値と良く一致していることがわかる。沈降速度が速い場合には、画像をパソコンに取り込む際（画像取得時）の記録・保存時刻とのタイムラグにより、理論値より多少小さい傾向になったものと考えられる。

図-5は、図-4の実験結果を基に取得画像間隔ごとに算出した各球体粒子の沈降速度（以下、区間沈降速度と記す）と Stokes の理論式から求まる理論沈降速度（以下、理論値と記す）を示す。区間沈降速度は、各球体粒子ともバラツキながらも理論値と比較的良く一致している。この結果より、3次元流向流速計を用いることで、これまで困難であった鉛直方向成分を含む地下水流動の流向と流速を十分な精度で測定可能であることを確認した。本測定技術については、現場実証実験による検証も既に完了している¹²⁾。

また、測定時のテレビカメラの発熱による孔内水の熱対流による影響を防止するための熱対流防止型3次元流向流速計も開発されており、低流速場 ($< 10^{-6} \text{ m/s}$ レベル) においても地下水の流向流速を精度良く測定可能である¹⁵⁾。

3.2 極低流速場での孔内流向流速測定への取り組み

高レベル放射性廃棄物の地層処分場の安全性評価において、必要とされる天然バリアの極低流速（従来に比べ2~3桁程度精度の良い $10^{-10} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$ ）の地下水流動を測定するための技術開発が進められ、拡散の影響が無く地下水の流れにのる密度調整型固体トレーサの開発とともに、孔内の固体トレーサの挙動を3次元的にリアルタイムに測定できる超音波・光学的可視化技術を開発中である¹⁶⁾。なお、地下水流速が、 10^{-10} m/s レベルの計測技術を確立するための精度検証は非常に難しい問題であるが、今後の研究成果に期待するところが大きい。

4. 今後の課題

画像計測による孔内流向流速測定は、数多くのメリットを有しているが、原位置での測定法等に関しては大小課題が残されている。以下に主な課題を挙げる。

- ① 測定法と評価法に関する基準化等の遅れ
- ② 低流速場における測定精度(固体トレーサの課題)
- ③ 井戸掘削と井戸洗浄（地下水の濁り）

単孔式の地下水流向流速測定については、地盤工学会「地盤調査の方法とその解説」⁴⁾においても基準化することが困難な状況にあることから、概略の解説と留意点

のみしか触れられておらず、地下水の流向流速測定に必要な条件を満足していないまま測定されている事例も見られる。このことから、特に前記①については、調査技術の進歩とともに測定精度が向上した機器類も開発されており、地下水調査法としての孔内流向流速測定に関して、出来る限り早い時期に地盤工学会等でガイドライン（案）や基準化されることが望まれる。

5. おわりに

単孔式による孔内流向流速測定は、処分施設から漏出する汚染物質の地下水流動に伴う移行範囲の予測・評価などの土壌・地下水汚染問題やトンネル、ダム、開削工事等の構造物の建設に伴う各種地下水調査など、市民生活の安全性確保や供用時の長期的な維持管理等から、今後ますますその重要性が高まるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 張 銘・遠藤秀典・高橋 学：原位置浸透流測定法について（その2）、応用地質、Vol. 42, No. 1, pp. 52~59, 2001.
- 2) 西垣 誠：技術手帳 地下水の流向・流速、土と基礎、Vol. 39, No. 8, pp. 56~58, 1991.
- 3) 地盤工学会：地盤調査法—地下水流速流向測定—, pp. 334~337, 1995.
- 4) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説—第13章 孔内流向流速測定—, pp. 473~476, 2004.
- 5) 山本毅史・石谷伊利・土弘道夫：ほう素トレーサ法を利用した単一井による地下水流動調査、土質工学会論文報告集、Vol. 25, No. 3, pp. 187~196, 1985.
- 6) 河西 基・小松田精吉・平田洋一：電位差方式連続型地下水流向流速計の開発、土木学会第30回水理講演会論文集、pp. 337~342, 1986.
- 7) 梅田美彦・西垣 誠：地下水流向・流速計の試作、第23回土質工学研究発表会講演集、pp. 135~136, 1988.
- 8) 竹内篤雄：温度測定による流動地下水調査法、古今書院、pp. 349~366, 1996.
- 9) 安藤義久・斎藤秀晴・長塚正樹：テレビカメラを応用した地下水流向流速計の開発とその適用性、土木学会第42回年次学術講演会、pp. 200~201, 1987.
- 10) 山田啓一：CCD カメラを用いた孔内流向流速測定の検討、基礎工、Vol. 21, No. 11, pp. 31~33, 2001.
- 11) 亀井健史・中村嘉博：テレビカメラを用いた地下水流動調査と実地盤への適用性、土と基礎、Vol. 40, No. 4, pp. 17~22, 1992.
- 12) 小林 薫・近久博志・松元和伸・熊谷幸樹・筒井雅行・阿保寿郎：画像計測によるボーリング孔を過ぎる地下水流動の3次元流向流速測定、土と基礎、Vol. 52, No. 6, pp. 16~18, 2004.
- 13) A. Okamoto: The Model Construction Problem Using the Collinearity Condition, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 50, No. 6, pp. 705~711, 1984.
- 14) 土木学会：水理公式集—昭和60年版—, pp. 76~77, pp. 416~417, 1985.
- 15) 小林 薫・近久博志・松元和伸・熊谷幸樹：発熱に伴う孔内水温変化の影響を低減した光学式流向流速計の開発、第40回地盤工学研究発表会、C-04, pp. 1261~1262, 2005.
- 16) 戸井田克・塩釜幸弘・田中真弓ほか：流向流速計測装置の設計に資するための数値解析について、日本地下水学会2002年秋季講演会講演要旨、pp. 236~239, 2002.

(原稿受理 2005.12.22)