

ボーリング孔を利用した地下水流動場の 流向流速測定技術の現状と連続流向流速測定装置 (T-COGMOSS)

Present of Technology for Identifying Flow Direction and Velocity in the Groundwater Flow Field Using Boreholes and a System for Continuously Identifying Flow Direction and Velocity (T-COGMOSS)

小林 薫^{※1} 熊谷 幸樹^{※2} 松田 浩朗^{※1}
Kaoru Kobayashi Koki Kumagai Hiroaki Matsuda
松元 和伸^{※1} 近久 博志^{※3}
Kazunobu Matsumoto Hiroshi Chikahisa

【要旨】

地下水流動は、降水、気圧や周辺の井戸利用状況による時間変動、沿岸部の潮汐による日変動、融雪期の季節変動ならびに建設工事に伴う地下水流動阻害などにより変化している。現地の正確な地下水流動特性を把握するには、地下水流動に影響を及ぼす前述の各種外的要因の定量的データや地盤の間隙水圧などとともに、連続的な地下水流向流速の変化を同時に把握できれば有効なデータになる。

本論文では、従来の単孔式による流向流速測定方法の概要とともに、下端部ヒンジ構造を有する浮きセンサを搭載した連続式流向流速計を新たに開発し、大型水槽を用いた室内実験で低流速域における適用性について検証した。その結果、開発した連続式流向流速計を用いることで、ボーリング孔内で地下水流向流速を間隙水圧などの連続データと同時に簡易かつ連続的にモニタリングできることを明らかにした。

【キーワード】 地下水流動 流向流速計 画像解析 モニタリング ボーリング孔

1. はじめに

原位置においてボーリング孔を用いて地下水流動の流向流速を測定する方法は、多孔式と単孔式がある¹⁾。近年では、経済的であるとともに、測定時間が短く、測定精度も向上した単孔式による測定方法を用いることが多い。単孔式による代表的な測定方法としては、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²⁾、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³⁾、熱を用いて流向流速を求める熱量法⁴⁾や溶存酸素の減少量の計測から流速を求める方法⁵⁾などが挙げられる。また、CCDカメラ (Charge Coupled Device Camera) を用いた地下水流の中の浮遊粒子を直接追跡する浮遊物追跡法^{6,7)}は、孔内水の濁りに関する課題⁸⁾も残されているが、測定時間が短い、中間処理や複雑な解析を必要とせずに地下水流動の可視化という視覚的な観点から、今後有望な方法の一つであるとされている⁹⁾。

しかしながら、現状の上記測定方法は、地下水流動の流向流速を連続的に測定することが困難である。また、浮遊物追跡法以外の単孔式による地下水流動の流向・流速の測定方法は、データ収集と整理・分析に熟練した技術者と時間を要するなどの課題がある。さらに、現状では地下水流動の流向流速測定は、地盤調査法⁸⁾ (地盤工学会, 1995) においても基準化することが困難な状況に

あるとのことから、概略の解説と留意点のみしか触れられておらず、流向流速測定に必要な条件すら満足していないままで測定されている例も散見される。今後、地下水流向流速測定法に関するガイドライン、さらには基準化されていくことが望まれる。

筆者らは、地下水流動に関する影響予測の精度向上や原位置におけるモニタリング技術の高度化を図るため、これまでに画像解析手法を用いて、従来の地下水流向流速計の機能を格段に向上させた1本のボーリング孔内で地下水の流向流速を精度良く3次元評価可能な流向流速測定システムを開発してきた¹⁰⁾。しかし、外的要因 (潮汐などの影響による日変動、融雪期の季節変動、気圧変動、降水、海水準変動および隆起・浸食など) の影響により、短～長期的に逐次変化する地下水流向流速について、任意時刻の測定結果をそのまま数年、数十年～数百年先の長期予測や評価に用いる場合、時間依存性に大きな課題が残されている。このことから、これまで不可能であった地下水流向流速を比較的長時間・長期間にわたり、連続的に把握することができれば、前記の外的要因等を考慮した将来の地下水流動予測や影響評価の信頼性を格段に向上させることが可能であると考えられる。

以上より、筆者らは地下水流により作用する水圧で傾斜する下端部ヒンジ構造を有する浮きセンサを、その上部に配置したCCDカメラ (以下、テレビカメラと記す)

1. 技術研究所 2. 土木事業本部 土木技術部 3. 山口大学 産学公連携・イノベーション推進機構

で連続的に撮影し、取得画像を基に画像解析手法を用いて連続的な流向流速をモニタリングできる装置（以下、連続式流向流速システムと記す）の実用化を目指した研究開発を実施してきた。

本論文は、従来の電気伝導度(EC)、水温や水圧（間隙水圧）などの連続した計測データとともに、画像解析技術を用いて連続的に地下水流向流速を測定する連続式流向流速測定システム（Tobishima's Continuous Groundwater Flow Monitoring Smart System）の概要と室内試験による測定精度の検証結果等について論ずる。

2. 単孔式（孔内）流向流速測定技術の現状¹¹⁾

単孔式で地下水流向流速を測定する方法は、大きく分けて固体粒子追跡型の3種類と溶液濃度追跡型の3種類がある（図-1参照）。このうち、溶液濃度追跡型の中性子検出法²⁾（ホウ素をトレーサとして用いる方法）、電位差法³⁾（蒸留水の希釈程度を測定して流向流速を求める方法）および熱量法⁴⁾（熱を用いて流向流速を求める方法）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年度に取得している。また、固体粒子追跡型のテレビカメラを用いて固体粒子の軌跡を追跡する最も直接的なテレビカメラ法^{6)、12)}は、地下水に濁りがある場合にはトレーサ粒子が見にくいという課題はあるが、多孔式に比較して測定時間が短い、中間処理を必要としない、その場で地下水の流向流速を評価しやすい点などが大きな特徴である。

表-1には、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3種類の測定方法とテレビカメラ法（表-1の着色部）に関する概要と地下水流速の測定可能範囲をまとめて示す。

現状における単孔式地下水流向流速測定方法は、地下水流速の測定可能範囲に違いがあるものの、全て水平流のみしか評価できないという課題がある。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。最近では、地下水流速がきわめて遅い場合、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、固体粒子追跡型に関する3次元流向流速測定に関する研究開発が進められている¹³⁾。

戸井田ら¹⁴⁾は、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桁精度の良い $10^{-10} \sim 10^{-7}$ 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、拡散の影響がな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、固体トレーサの挙動を3次元で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。地下水流速が 10^{-10} m/sレベルの測定技術を確立するための精度検証は、非常に難しく時間を要するもの

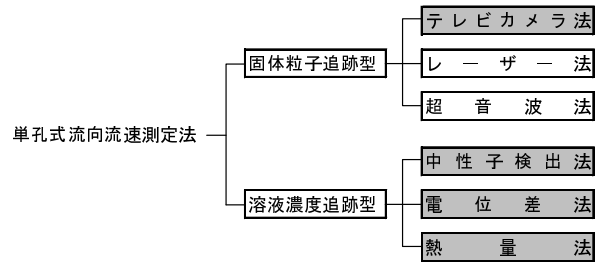


図-1 単孔式地下水流向流速の測定方法

表-1 測定方法の概要

測定方法 (単孔式)	概要	流速測定範囲* (m/s)
テレビカメラ法	テレビカメラ(CCDカメラ)を用いて浮遊粒子の軌跡を追跡する最も直接的な方法で、浮遊物追跡法とも呼ばれる。	1×10^{-5} $\sim 2 \times 10^{-3}$
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(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。

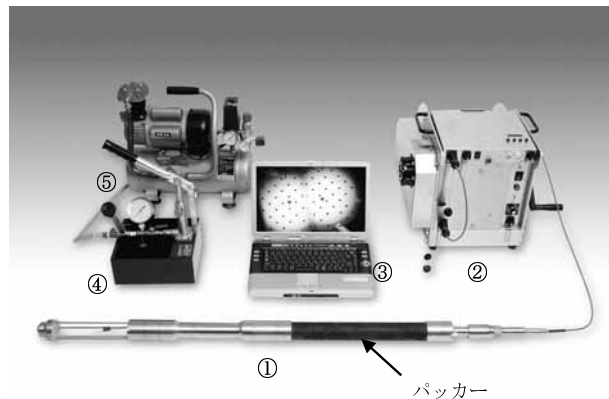


写真-1 3次元流向流速測定システムの全体構成

と考えられるが、次世代型の単孔式流向流速測定方法として今後の研究成果に期待するところが大きい。

一方、小林ら¹⁵⁾は、テレビカメラとプリズムを組み合わせることで1本のボーリング孔内で視差の異なるステレオ画像を効率良く同時取得、逐次解析することにより、対象とする液体中を移動する密度調整された固体トレーサなどの3次元座標を経時的に求めて、地下水流向流速を3次元評価できる画像計測技術を用いた新しい単孔式地下水流向流速測定システムを開発した。写真-1に3次元流向流速測定システムの全体構成（写真中の①~⑤）を示す。

- ①テレビカメラ（1台）とプリズム（1個）を組み合わせた方位計内蔵の単孔式地下水流向流速計本体部
- ②地下水流向流速計本体部の上下移動を機械的に行うためのケーブル巻き取り装置（深度表示機能あり）
- ③取得画像表示、画像保存および画像解析用パソコン（解析用ソフトおよび方位・深度表示ソフト内蔵）

- ④ネジ込み式微量押し調整機能を有した（清水用の）密度調整した固体トレーサ投入装置
- ⑤地下水流向流速計本体部を井戸内の所定深度に固定するパッカー用のコンプレッサー（内圧表示機能付き）

3. 連続式流向流速計の概要¹⁶⁾

写真-2は、連続式流向流速計の外観と主な構成を示す。主な構成は、①連続式流向流速計の本体部（ステンレス製）、②本体部をボーリング孔内に固定するために装着したゴムパッカー（コンプレッサーは別途）、③電力および画像伝送ケーブル、④AC/DCコンバーターおよび⑤取得画像を保存・表示する装置（パソコン等）や長時間の連続動画の取得・保存用デジタルビデオカメラとの接続ケーブル類である。

3.1 連続式流向流速計の本体部

連続式流向流速計の本体部（標準型：全長L= 約900mm、径φ=50mm）は、浮きセンサ（接続治具や固定治具類含む）、支柱（ステンレス製、φ=5mm）、固定用ゴムパッカーと本体部に内蔵している方位計、温度計、間隙水圧計、電気伝導度計、テレビカメラ、LED照明および制御回路などから構成され、取得画像は接続ケーブル類を介して、パソコンとデジタルビデオカメラに測定時・モニタリング時の静止および動画を同時に保存できる。

3.2 浮きセンサとの接続部（球体ヒンジ構造）

本体部先端に取り付けている浮きセンサは、写真-3に示す球体を用いたヒンジ構造を有する接続治具で本体

部と接続している。なお、浮きセンサは、地下水流速によって使い分けることを想定しているため、長さや径を自由に変更できるようにした。そのため、浮きセンサの長さを変更する場合には、本体部と連結しているステンレス製の支柱（120°ピッチで3本）も適宜長さを変更する必要があり、標準支柱（径=5mm、長さ=175mm）にネジ込み式連結支柱を追加していくことで、支柱長さ（地下水通過部の間隔）を容易に変更可能とした（写真-4）。

3.3 浮きセンサの断面形状

連続式流向流速計については、低流速域の流水中において下端部ヒンジ構造を介した浮きセンサの挙動が、地下水流動場の流速変化に適宜追従し、安定した傾斜挙動を示すことが重要である。このため、浮きセンサの断面形状は、二次元非定常流体シミュレーション¹⁷⁾による各種解析結果を参考に、任意方向からの地下水流に対して（図-2）、浮きセンサ周辺の地下水流に乱れが生じにくく、挙動が安定している円形断面を最終的に採用した。

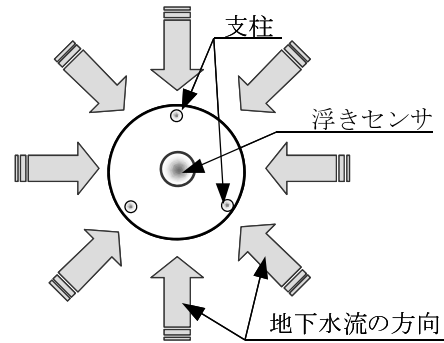


図-2 測定機器と地下水流の平面的な関係

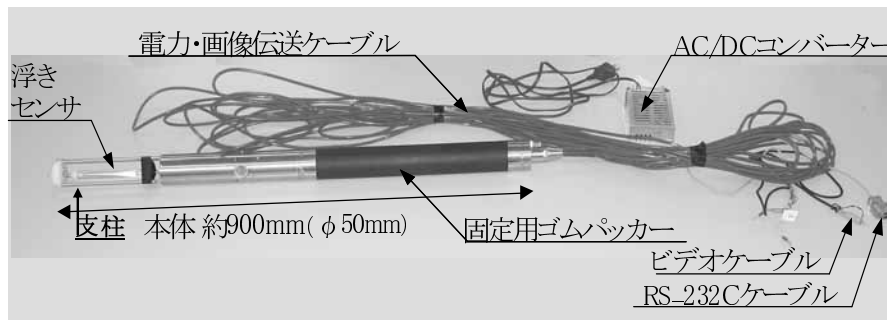


写真-2 試作した連続式流向流速計の本体部および接続ケーブル類の外観

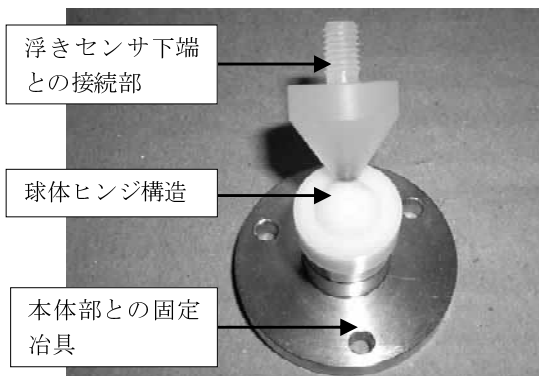


写真-3 浮きセンサとの接続治具の外観

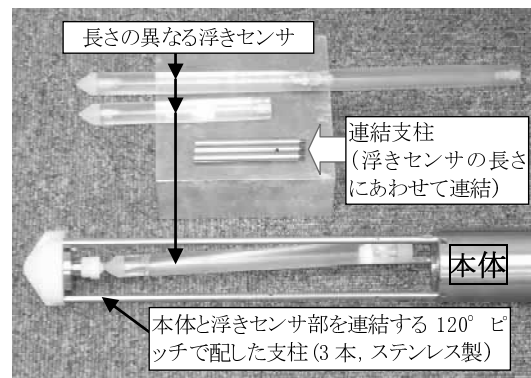


写真-4 各種浮きセンサと支柱

4. 連続的な流向流速測定の実理

写真-5(1)に示すように、静水中では浮きセンサは鉛直に立っており、浮きセンサ頭部は取得画像の中心に位置している(写真-6(1))。また、流水中においては、写真-5(2)に示すように浮きセンサは地下水流の下流側に傾斜し、浮きセンサ頭部が画像中心から移動する(写真-6(2)参照)。浮きセンサの頭部移動量が大きいほど流速が速いことになる。しかし、流速が速すぎると、浮きセンサ周辺に渦が出来ることなどから、浮きセンサの挙動が常に安定せず、浮きセンサの頭部移動量(ピクセル数)を正確に算定することができない場合がある。

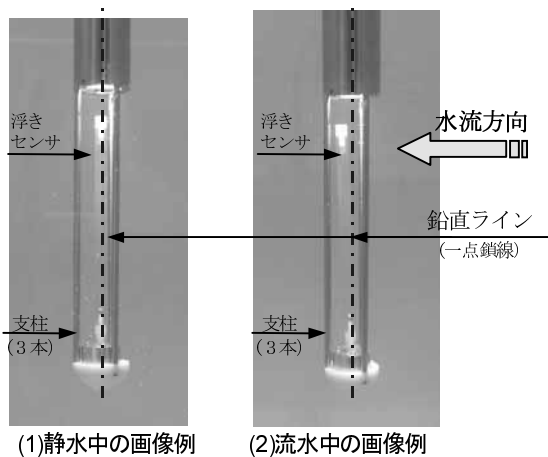
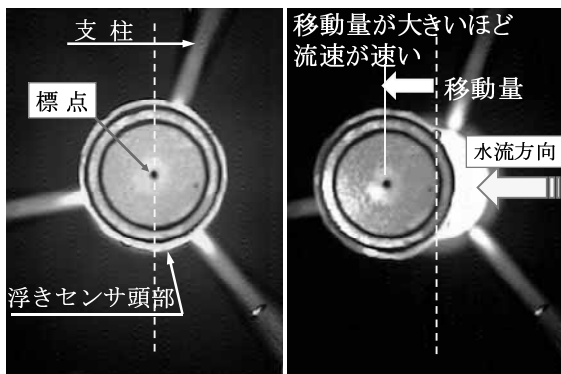


写真-5 下端部ヒンジ構造の浮きセンサ側面画像



(1) 静水中の取得画像例 (2) 流水中の取得画像例
写真-6 浮きセンサ頭部の取得画像例

測定時に取得した画像を基に、算出した頭部移動量(ピクセル数)から、事前に求めておいた図-3の関係図を用いて、原位置のボーリング孔内の地下水流速を算定する。例えば、浮きセンサの頭部移動量が125ピクセルとすると、関係曲線との交点を下にのぼした点がボーリング孔内の地下水流速($v=3.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$)が算定される(図-3の①→②の手順)。

また、地下水流向は、地下水流によって傾斜した浮きセンサの方向を本体部に内蔵した方位計を基に方位角として算定する。なお、ボーリング孔内が空隙時の場合、

地下水流の流線は図-4に示す様にきわめて複雑な挙動を示す¹⁸⁾。しかし、試作した連続式流向流速計の浮きセンサは、ボーリング孔の中心に位置するため、周辺地盤の地下水流と同じ流向を示すことになる。

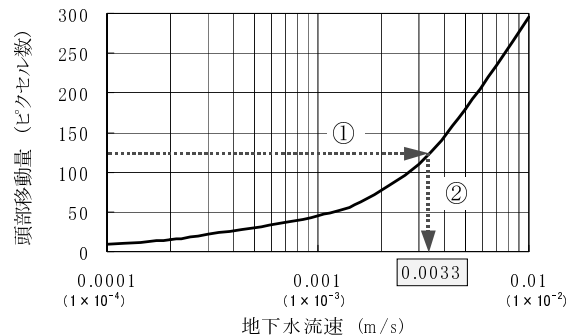


図-3 頭部移動量と地下水流速の関係図イメージ

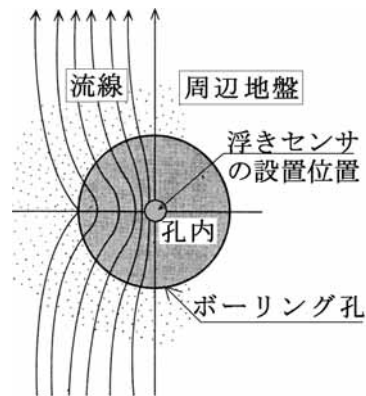


図-4 ボーリング孔内の地下水流の挙動

5. 測定手順および画像解析の概要

5.1 測定手順

連続式流向流速計を用いた場合の事前準備および原位置における測定手順を図-5および以下に示す。

①事前準備：室内実験により、浮きセンサの径や長さを変えて、各浮きセンサの頭部移動量(ピクセル数)と地下水流速の関係を正確に把握しておく。

②現地測定：地下水流向流速を測定するための開孔率(30%程度以上が望ましい⁸⁾)の大きなスクリーンを組み込んだケーシングパイプを設置後、ボーリング孔内に開発した連続式流向流速計を挿入し、ゴムパッカーを用いて所定の深度に固定する。静置後、連続的に浮きセンサの頭部画像を順次取得する。

したがって、現地における測定機器類の設置、操作および測定作業は特に熟練工を必要としない。

③画像解析：取得画像を基に、地下水流によって浮きセンサが傾斜することにより、浮きセンサ頭部画像の中心位置が画像中心から移動する。この頭部移動量を画像解析¹⁵⁾によりピクセル数として定量的に算出する。なお、画像解析の概要は5.2に示す。

- ④流速算定：上記で算出した頭部移動量（ピクセル数）を基にして、事前に求めておいた図-3の関係図を用いて、原位置のボーリング孔内の地下水流速を算定する。
- ⑤流向算定：取得した画像を用いて、地下水流によって傾斜した浮きセンサの方向を内蔵方位計を基にして、方位角に変換して地下水流向を算定する。

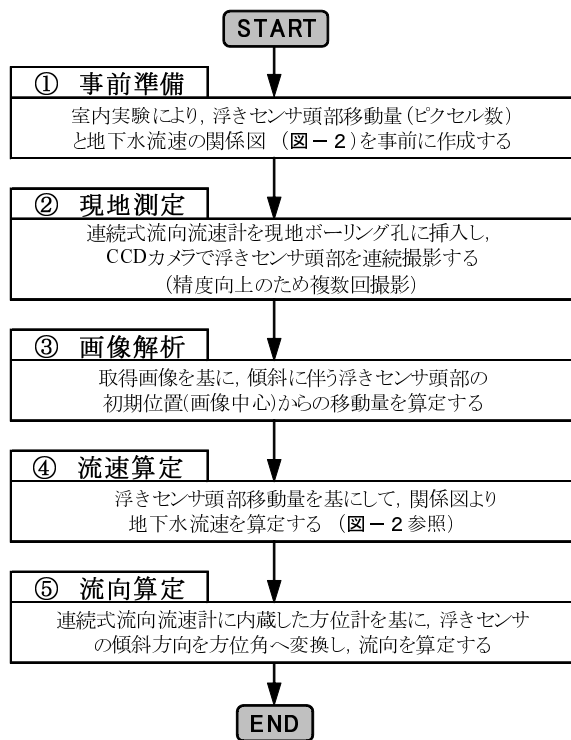


図-5 測定手順のフロー

5.2 頭部移動量の算出における画像解析¹⁹⁾

テレビカメラで取得したデジタル画像を用いて浮きセンサ頭部の中心位置の移動量（ピクセル数）を画像解析により算定する場合、写真座標の読み取り誤差が流向流速の測定精度に影響を及ぼす。このことから、浮きセンサ頭部の中心位置の写真座標を精度良く読み取るために、浮きセンサ頭部の中心位置に小さな黒い丸点（写真-6参照。以下、標点と記す）を配置して、標点の明度(黒:0～白:255の256階調)による重み付き重心の値を写真座標として取得した。また、ボーリング孔内の濁り等で撮影条件が異なり、標点の明度に違いが生じた場合、標点ごとにしきい値を順次修正し重み付き重心の値を正確に算出できるようにしている。

6. 大型土槽を用いた室内実験による検証

連続式流向流速計の精度検証を含めた適用性については、低流速かつ均一な地下水流動場を室内で再現することが非常に難しく、本室内実験では実験水槽を用いて連

続式流向流速計本体部を低速度（ $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ ）で水中移動させる方法で実施した。なお、ボーリング孔内に地下水流向流速計を設置して測定した場合、周辺地盤内の地下水流速に比べて測定値が約10倍²⁰⁾大きな値が得られる。

本室内実験で設定した $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ の移動速度（流速）は、周辺地盤内の地下水流速に換算した場合には $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 程度になる。このことから、本室内実験で設定した移動速度は、画像を用いた従来の地下水流向流速計と同等の 10^{-5}m/s レベルのオーダーまで測定できることになる。また、連続式流向流速計を水中移動させた直後は、慣性力等の影響で浮きセンサの挙動が安定しないため、挙動安定後に画像を取得した。

6.1 室内実験装置の概要

室内実験で使用した実験水槽（幅2m×高さ1m×奥行き1m）を写真-7に示す。

本実験では、まず実験水槽に水深が0.90mになるまで水道水を入れ、写真-8に示す回転固定できる治具で連続式流向流速計をリニアアクチュエータに固定する。回転固定できる治具は、連続式流向流速計の方向を 22.5° 毎に正確に固定することが可能である。その後、写真-9に示すベルト方式のリニアアクチュエータにより、連続式流向流速計の移動速度をPCで正確に制御（ $1 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 単位の精度で移動速度を制御可能）しながら移動速度一定の基で検証実験を行った。



写真-7 実験水槽（幅2m×高さ1m×奥行き1m）

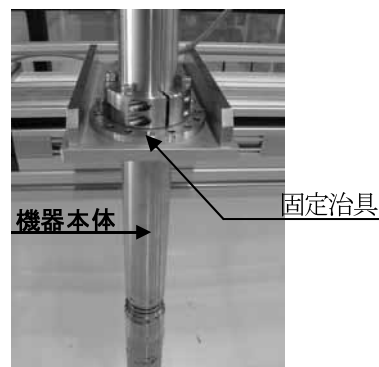


写真-8 機器本体を回転固定可能な治具

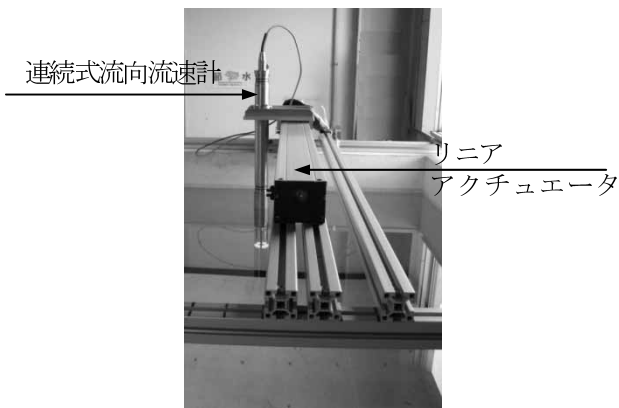


写真-9 低流速調整機能付きリニアアクチュエータ

6.2 実験ケース

実験は、大きく分けて2つの技術的な観点から実施した。1つ目は、低流速域において地下水流速を正確に測定できることを検証する。2つ目は、図-2に示すように360°任意方向からの地下水流に対して、浮きセンサが下端部ヒンジ構造を介して正確な方向に傾斜挙動を示すことを検証する。

(1) 流速測定に関する実験ケース

低流速域での流速測定の検証は、表-2に示す径と長さを変化させた浮きセンサ3種類について、移動速度を $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^2 \text{ m/s}$ の範囲内で適宜変化させたケースについて実施した。

表-2 流速測定検証時の実験ケース

ケース名	浮きセンサ			移動速度 (m/s)
	断面形状	径 (mm)	長さ (mm)	
A-10-140	円形	10.0	140.0	1×10^{-4}
A-10-210		10.0	210.0	~
A-15-210		15.0	210.0	1×10^{-2}

(2) 流向測定に関する実験ケース

流向測定の検証実験は、連続式流向流速計の設置方向を順次22.5°ずつ回転固定させながら行った。実験時の連続式流向流速計の移動速度は、 $3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ と $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ の2種類で、浮きセンサは径10mm、長さ140mmを用いて行った。ここでは、実験時の浮きセンサの傾斜方向が、リニアアクチュエータによる連続式流向流速計本体部の移動方向と180°逆方向に精度良く傾斜（浮きセンサ頭部が移動）することを検証した。

6.3 実験結果と考察

図-6は、表-2に示した各ケースの移動速度に対する浮きセンサ頭部の移動量（ピクセル数）を示す。

図より、移動速度が $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ より速くなると、各ケースとも徐々に移動量が急増することがわかる。本室内実験においては、移動速度が $1 \times 10^3 \text{ m/s}$ 以上では速度変化に

伴う移動変化量が比較的大きくなることから、 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^2 \text{ m/s}$ 程度の範囲では地下水流速を精度良く測定可能と考えられる。

一方、移動速度が $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 未満の範囲については、速度変化に伴う浮きセンサ頭部の移動変化量が小さく、今回用いた浮きセンサの大きさの範囲では、浮きセンサ頭部の移動量の算定誤差が流速測定の精度に大きな影響を及ぼすことが確認できた。このことから、 $1 \times 10^3 \text{ m/s}$ 未満の地下水流速にあわせて浮きセンサの径を太く、かつ、長さを長くすることで低流速域でも浮きセンサ頭部の移動量を大きくすることで測定精度の確保は可能であると考えられる。

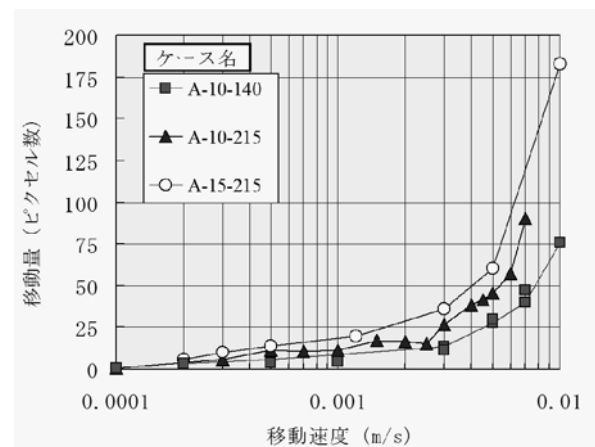


図-6 移動速度と移動量（ピクセル数）の関係

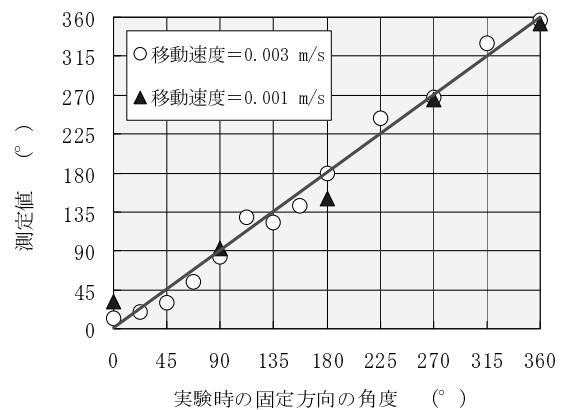


図-7 検証実験時の固定方向の角度と測定値の関係

図-7には、2種類の移動速度の基で、連続式流向流速計の固定方向を順次回転させた場合の浮きセンサ頭部の移動方向を画像解析により算定した結果を示す。図中の実線は、実験時に設定した固定角度と傾斜方向の測定値が一致していることを示す線である。つまり、連続式流向流速計の移動方向と180°逆方向に浮きセンサが傾斜したことを示している。図より、浮きセンサの傾斜方向は、連続式流向流速計の移動速度の違いによる差はなく、

全方向ともほぼ正確な方向に浮きセンサが傾斜していることがわかる。これは、本室内実験において採用した下端部ヒンジ構造が、任意方向の地下水流の流向測定に対して十分な機能を発揮したものと考えられる。

以上より、開発した連続式流向流速計を用いることで、従来の中性子検出法²⁾や電位差法³⁾のような複雑な後処理計算や設置・操作・測定時に熟練工を必要とせず、浮きセンサ頭部の画像取得だけで、原位置の地下水流向流速を可視化しながら、簡易かつ連続的にモニタリングできることが検証できた。

7. まとめ

本論文では、画像解析手法を用いて地下水流の流向流速を連続的にモニタリングできる連続式流向流速計を新たに開発し、大型水槽で3種類の浮きセンサ(①径=10mm, 長さ=140mm, ②径=10mm, 長さ=215mmおよび③径=15mm, 長さ=215mm)を用いた室内実験を基に、その適用性と測定精度について検証した。その結果、次のことが明らかになった。

- 1) 従来の単孔式による測定法は、原位置の地下水流動の流向流速を簡易かつ連続的に測定することは困難である。
- 2) 浮きセンサ頭部の移動量は、移動速度が $1 \times 10^3 \text{ m/s}$ より速くなると、各ケースとも徐々に移動量が急増することがわかる。この傾向は、浮きセンサの径が太く、長さが長くなるほど顕著である。
- 3) 移動速度が $1 \times 10^3 \text{ m/s}$ 以上では、速度変化に伴う浮きセンサ頭部の移動変化量が大きく、 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^2 \text{ m/s}$ 程度の範囲では地下水流速を比較的精度良く測定することが可能である。
- 4) 移動速度が $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^3 \text{ m/s}$ 未満の範囲については、速度変化に伴う浮きセンサ頭部の移動変化量が小さく、今回用いた浮きセンサの大きさの範囲では、浮きセンサ頭部の移動量の算定誤差が流速算定時の精度に大きな影響を及ぼすことがわかった。このことから、 $1 \times 10^3 \text{ m/s}$ 未満については、地下水流速にあわせて適切な浮きセンサを選定し測定することが必要であることがわかった。
- 5) 連続式流向流速計の浮きセンサの傾斜方向は、本実験では移動速度の違いによる差はなく、全方向ともほぼ正確な方向に浮きセンサが傾斜することを確認した。このことは、実験時に採用した下端部ヒンジ構造が任意方向の地下水流の流向測定に対して十分な機能を発揮したものと考えられる。
- 6) 新たに開発した連続式流向流速計を用いた測定により、ボーリング孔内で地下水流向流速を複雑な後処理計算等も必要とせず、簡易かつ連続的にモニタリング

できることを示した。

以上より、これまでにはない適用性・実用性の高い新しい連続式流向流速測定システムを完成させることができた。現在は、地下水流向および流速測定レベルを更に低流速域まで改善中²³⁾であり、従来の単孔式流向流速計と同レベルまで改善を図り、今後は実現場へ活用していく予定である。

8. おわりに

21世紀は、水の世紀と呼ばれている。持続可能な地下水利用を実現するための地下水の適正管理は、水辺地の管理、水質管理の他に水量管理が必要かつ重要である²¹⁾。また、環境保全上の健全な水循環に向けた取組み²²⁾では、信頼性の高い安全・安心な地下水資源マネジメントに向けた実態把握や効果的な観測網・モニタリング技術の高度化が求められている。また、地下水資源の1つである海底地下水湧出の機構解明など、地下水資源の有効活用を図るために、ボーリング孔を用いた局所的な原位置調査・測定技術に加えて、広域的な「グローバルな地下水の動き」を把握する原位置調査・測定技術の更なる高度化に取り組んで行く所存である。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤研究(C)課題番号：19560506)の援助を受けて行った。

【参考文献】

- 1) 山海堂：地下水調査および観測指針(案)，pp.231-238，1996。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 柳原幸希，綱木亮介，吉田克美：溶存酸素をトレーサとした地下水流動調査，土木技術資料，Vol.41，No.6，pp.48-53，1999。
- 6) 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回年次学術講演会講演概要集，pp.200-201，1987。
- 7) 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3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，pp.41-48，2003。
- 8) 地盤工学会編：地盤調査の方法と解説—第13章 孔

- 内流向流速測定 一, pp.473-476, 2004.
- 9) 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.
 - 10) 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.
 - 11) 小林 薫, 松元和伸, 熊谷幸樹: CCD カメラを利用した単孔式による地下水流動の3次元流向流速測定の試み, 地下水技術 (地下水技術協会誌), Vol.45, No.11, pp.3-10, 2003.
 - 12) 山田啓一: テレビカメラを用いた単孔式流向流速測定の検討, 基礎工, Vol.21, No.11, pp.31-33, 2001.
 - 13) 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, p.473, 2004.
 - 14) 戸井田克, 田中真弓, 岩野圭太, 西垣 誠 他: 固体トレーサを用いた流向流速測定の数値解析的シミュレーションについて, 日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨, pp.40-45, 2003.
 - 15) 小林 薫, 熊谷幸樹, 日野宣隆, 近久博志, 芥川真一: 画像計測による新しい地下水流向流速測定システム, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム論文集, 地盤工学会関西支部, pp.47-52, 2006.
 - 16) 小林 薫, 熊谷幸樹, 松田浩朗, 金内昌直: 画像解析手法を用いた地下水流動場の連続的な流向流速モニタリング, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.117-124, 2009.
 - 17) 小林 薫, 熊谷幸樹, 藤間律子, 近久博志: 地下水流動場の連続的な流向流速測定技術の確立に向けた流体シミュレーション, 地下水学会誌, 第51巻, 第4号, pp.349-360, 2009.
 - 18) 小松田 清吉: 流速・流向の測り方, 地質と調査, No.45, pp.21-27, 1990.
 - 19) 小林 薫, 近久博志, 松元和伸, 熊谷幸樹, 水谷大輔: CCD カメラを用いた単孔式流向流速計の試作と室内基礎実験, 日本地下水学会 2002 年秋季講演会講演要旨, pp.248-251, 2002.
 - 20) 安藤義久, 田村孝廣, 斉藤秀晴, 野沢篤志: CCD カメラを利用した地下水流向流速計の適用性, 水文・水資源学会 1990 年研究発表会要旨集, pp.196-199, 1990.
 - 21) 国土交通省: 今後の地下水利用のあり方に関する懇談会, 2007.
 - 22) 環境省: 第三次環境基本計画一重点分野政策プログラム, 2006.
 - 23) 小林 薫, 松田浩朗, 松元和伸, 阿保寿郎, 近久博志: 画像解析技術を用いた連続式流向流速計の低流速域測定レベルの検証, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, 2010.

Summary Groundwater flow varies due to hourly changes owing to precipitation, pressure or use of wells in the vicinity, daily changes owing to coastal tides, seasonal changes in snow-melting periods and the inhibition of groundwater flow caused by construction work. In order to identify the characteristics of groundwater flow at the site accurately, identifying the continuous changes in groundwater flow velocity and direction as well as the quantitative data on the aforementioned external factors affecting groundwater flow and pore-water pressure in the ground is effective.

In this study, the applicability of a continuous flow direction and velocity meter equipped with a floating sensor with a hinge at the bottom end in low-velocity areas was verified in laboratory tests using a large water tank. As a result, it was revealed that using the continuous flow direction and velocity meter that we developed enables easy and continuous monitoring of the direction and velocity of groundwater in boreholes at the same time as the monitoring of continuous data such as pore-water pressure.

Key Words : *Groundwater Flow, Flow Direction and Velocity Measurement Device, Image Data Processing Technique, Monitoring, Borehole*