

連続計測を目的にした地下水流向流速計の試作と現場基礎実験

A Study on a Continuous Measuring Device for Groundwater Velocity and Direction through a Single Borehole by Image Processing Technique

小林 薫^{*1} 松田 浩朗^{*2} 本山 寛^{*3} 松元 和伸^{*2}
Kaoru Kobayashi Hiroaki Matsuda Hiroshi Motoyama Kazunobu Matsumoto
河野 俊樹^{*4} 藤間 律子^{*5} 蛭牟田 修^{*6} 竹内 明文^{*6}
Toshiki Kohno Ritsuko Fujima Osamu Hirimuta Akifumi Takeuchi

【要旨】

建設工事に伴う地下水流動の正確な把握は、揚水量の算出、地下水流動阻害や土壌・地下水汚染の環境影響評価など、精度の高い影響予測や効果的な対策工を実施するためにはきわめて重要である。筆者らは、これまでに地下水の流向流速を1本のボーリング孔内で精度良く計測可能な光学式3次元流向流速計を開発してきた。しかし、地盤内の地下水流動は、潮汐などによる日変動、気圧変動、周辺の井戸利用状況の影響および季節変動などにより絶えず変動しており、ある任意時間の地下水流向流速計測だけでは将来の正確な影響予測などはきわめて難しいため、長期的かつ連続的に地下水流動調査を行うことが必要になる。

このことから、本論文では、地下水の流向流速を長期的かつ連続的に計測が可能であるかを検討するため、下端部ヒンジ構造の浮きセンサーを用いた地下水流向流速計を試作し現場基礎実験を行った。その結果、国内初となる画期的な長期的かつ連続的な地下水流向流速計の開発・実用化は十分可能であることを確認した。

【キーワード】 地盤工学, 地下水, 原位置調査, CCD, 画像処理技術, ボーリング孔

1. はじめに

近年、地下水調査は、建設工事に伴う地下水流動阻害や井戸枯れ問題などに加え、海岸域での塩淡水境界面の把握や土壌・地下水汚染問題などの環境問題でも注目されている。土壌・地下水汚染問題においては、汚染物質の地下水流動による移行範囲を予測・評価することが重要であり、地下水流向流速計測は環境保全、環境修復の分野においては透水試験より重要視されており、必要不可欠な調査の1つである¹⁾。また、土壌・地下水環境における塩淡水境界面調査を含めた精度の高い予測や効果的な対策工を実施するためには、原位置の地下水流向流速を正確に計測できる機器の開発が重要であり、これまでに多くの機器が開発されている²⁾。

最近では、小林ら³⁾は地下水流向流速を1本のボーリング孔内で精度良く計測するための光学式3次元流向流速計 (NETIS 登録番号:KT-070022⁴⁾) を開発している。しかし、地下水流動は、地盤調査と異なり、潮汐などの影響による日変動、季節変動、気圧変動および周辺の井戸利用状況など、調査する時期、時刻によって短時間で

大きく異なることがあり、正確な地下水流動を把握するためには、できる限り地下水変動 (流向, 流速, 水位など) に影響を及ぼしているであろう外的要因とともに、長期的かつ連続的に原位置地下水調査が重要である。

従来の地下水に関する各種原位置調査・計測では、地下水位, 間隙水圧, 電気伝導度, 塩分濃度 (EC) および水温などを長期的かつ連続的に計測できるものの、地下水の流向流速計測については、限られた任意時刻 (計測時) のみの計測結果であって、経時的に変化するような地下水流動に対する流向流速計測はきわめて困難である。このことから、筆者らは地下水流向流速を長期的かつ連続的に計測することができる連続計測を目的にした地下水流向流速計の開発・実用化を目指した画期的な研究開発を実施している。

本論文では、現在開発中である連続計測を目的にした地下水流向流速計の実用化の可能性判断を行うための、数値解析による基礎データの把握および計測装置を試作し海岸に近い開削現場で実施した長期的かつ連続的な地下水流向流速の計測結果について報告するものである。

1. 技術研究所 2. 技術研究所 第一研究室 3. 技術研究所 防災監視プロジェクト 4. 技術研究所 第二研究室
5. 技術研究所 企画知財室 6. 関東土木支店 高エネ研作業所

2. 連続式地下水流向流速計の概要

2.1 計測原理

試作した連続計測を目的にした地下水流向流速計の本体部を図-1に示す⁵⁾。本計測装置は、本体部（LED照明、CCDカメラと制御回路を内蔵した部分、固定用パッカー、地下水通過部および通過部に配置した下端ヒンジ構造の浮きなど）、電力・画像伝送用ケーブル、孔内の上下流を抑制するために設ける後付け先端部整流板から構成され、各種計測データと取得画像は地上部に連結しているパソコンとビデオ（動画）に順次保存する。

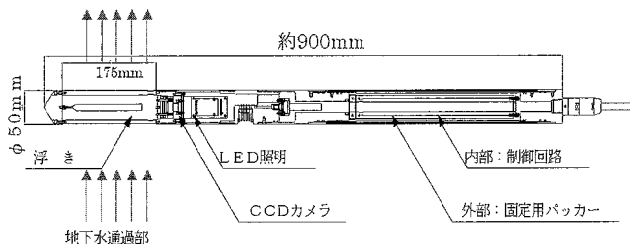


図-1 試作した計測装置の本体部概要図

写真-1には、地下水通過部に配置した下端部ヒンジ構造の浮きセンサー一部（以下、浮きと記す）を示す。また、写真-2は計測時の取得画像例を示す。写真-2に示すように静水中では浮きは鉛直に立っており、CCDカメラで撮影した浮き頭部は画像中心位置に見えるが、地下水に流れが生じた場合には、下端ヒンジ構造の浮きは傾くことにより浮き頭部が下流方向に移動する。地下水流に伴い浮きが傾いている様子の一例を写真-3に示す。

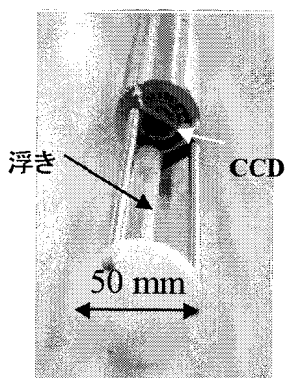
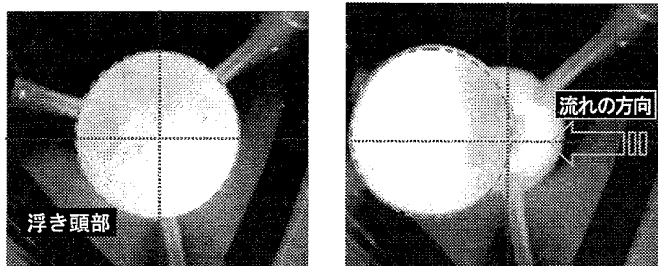


写真-1 装置先端部の浮き配置状況



(1) 初期画像

(2) 計測時画像

写真-2 CCDカメラによる計測時の取得画像例

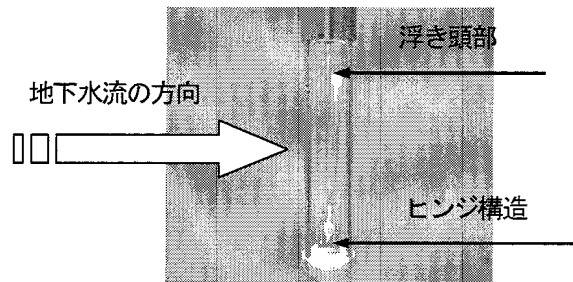


写真-3 下端部ヒンジ構造の浮きの傾斜した様子

表-1 数値解析の諸元

解析コード	STREAM for Windows ((株)ソフトウェアイトル製品)
解析手法	有限体積法による2次元流体シミュレーション
乱流モデル	代数応力方程式モデル(ASM)
解析対象	解析領域内の速度場および圧力場

表-2 解析条件

解析モデル			
解析格子数	130(X) × 125(Y) = 16,250(メッシュ)		
適用限界流速確認解析case			
	初期流速	浮き略図	浮き表面応力
case①	5.0cm/s		滑り面 (フリースリップ)
case②	1.0cm/s		
case③	0.1cm/s		
case④	0.01cm/s		
浮き断面形状影響確認解析case			
	断面形状	浮き略図	初期流速
caseA (case②と同)	円形 (直径1cm)		1.0cm/s
caseB	円形+羽根付き (直径1cm+羽0.5cm4枚)		
caseC	四角 (一辺1cm)		

2.2 適用限界流速に関する流体シミュレーション

ここで、試作した連続式流向流速計について、低流速域の地下水において下端部ヒンジ構造とした浮きの挙動が流速に追従し安定した変化を見せるかを確認することが重要な課題である。よって、浮き表面に掛かる流水速度と流水圧力を把握し、低流速域での適用性を確認するための解析的検討を行った。検討にあたっては、低流速域での流速および圧力計測が実測では極めて困難であるため、数値解析による2次元流体シミュレーションにて流速と浮き表面に作用する圧力との相対的な変化を把握した。表-1に数値解析の諸元を示す。

流体シミュレーションは、初期設定した流速中に浮きを設置した状態をモデル化し、解析範囲内の流速および圧力を解析した。低流速域の適用限界については、初期

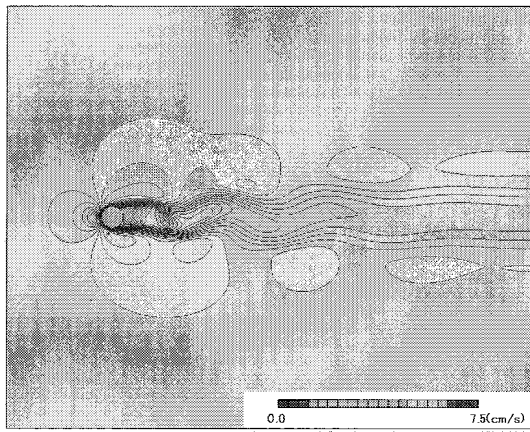


図-2 case①解析結果 (初期流速 5.0cm/s : 流速分布)

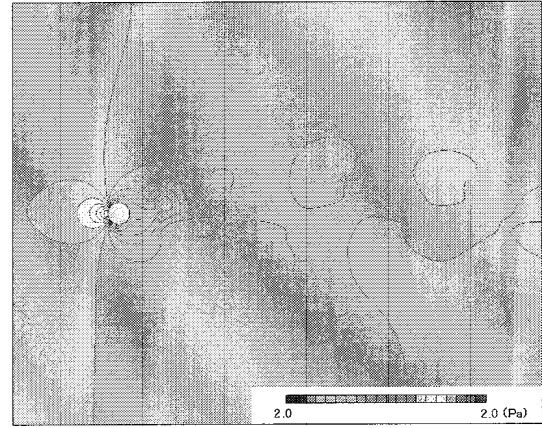


図-3 case①解析結果 (初期流速 5.0cm/s : 圧力分布)

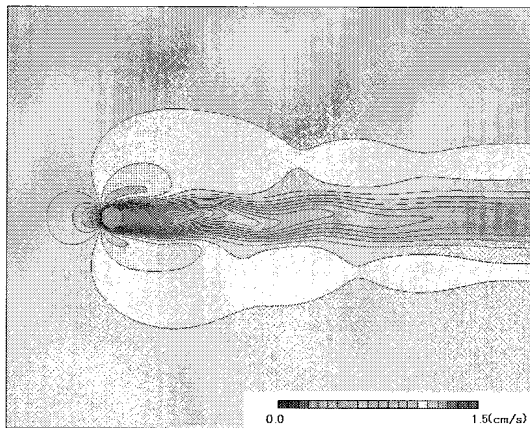


図-4 case②解析結果 (初期流速 1.0cm/s : 流速分布)

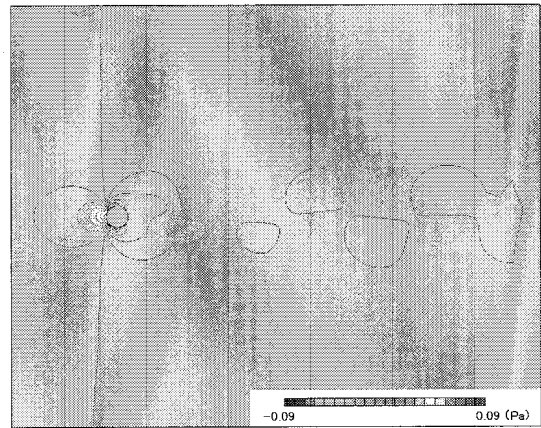


図-5 case②解析結果 (初期流速 1.0cm/s : 圧力分布)

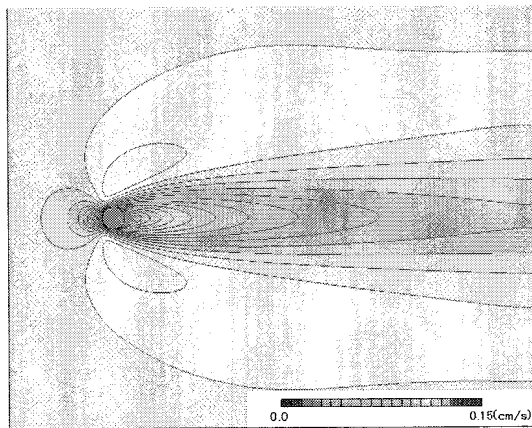


図-6 case③解析結果 (初期流速 0.1cm/s : 流速分布)

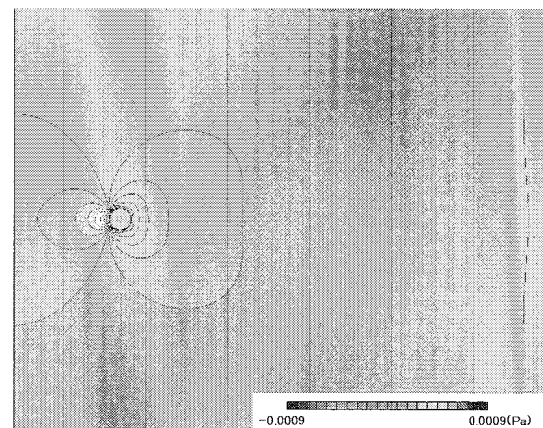


図-7 case③解析結果 (初期流速 0.1cm/s : 圧力分布)

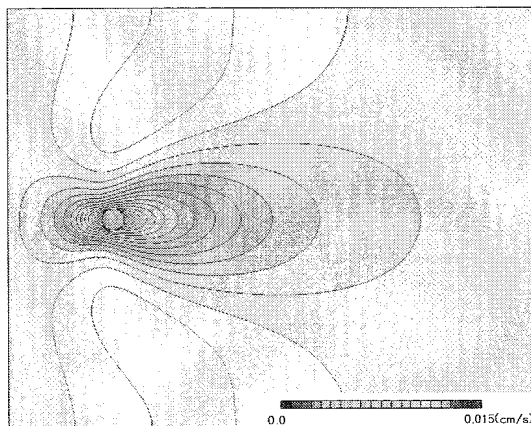


図-8 case④解析結果 (初期流速 0.01cm/s : 流速分布)

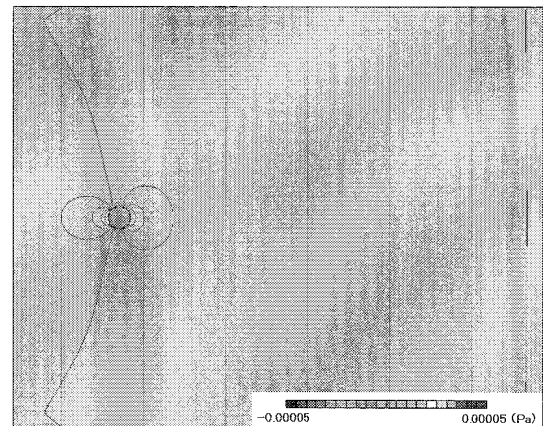


図-9 case④解析結果 (初期流速 0.01cm/s : 圧力分布)

設定した流速を任意に変化させ、各流速での解析結果から浮き周辺の流れの乱れ具合を速度分布、圧力分布および浮き表面作用圧力の時間変動により確認した。また、浮きが効率よく圧力を受けるための形状を検討するために、浮きの断面形状を変更した場合の速度分布・圧力分布についても解析を行った。解析条件を表-2に示す。なお、数値解析で求めた浮き表面の圧力値は、基準圧力に対する相対圧力である。

図-2～図-9に円形断面形状の浮き設置600秒後の速度分布と圧力分布の解析結果を初期流速毎に示す。

図-2～図-9に示した解析結果では、初期流速5.0cm/s、1.0cm/sで浮き後方に渦の発生が見られる結果となった。この結果から、渦が発生する流速域では、浮きの挙動が不安定になる可能性がある。一方、0.1cm/s以下の初期流速であれば、浮き周辺の流れは層流状態となり、安定した浮き挙動を示すと判断することができる。よって、流体シミュレーション結果から判断した適用限界流速については、0.1cm/s (10^{-4} m/s)以下であれば安定した挙動を示す浮き傾斜(頭部移動量)を計測可能と考えられる。

図-10と図-11には、初期流速1.0cm/sでの円形+羽根付きおよび四角の断面形状の浮き設置600秒後の流速分布の解析結果を示す(円形断面の解析結果については図-4参照)。また、図-12と図-13には、初期流速1.0cm/sでの各断面形状の浮き表面(流入面に正対する頂点)の流速と作用圧力の経時変化を示す。解析結果より、円形+羽根付きの断面形状では、流れに大きな乱れが生じ、浮きの挙動が不安定になる可能性があると考えられる。四角の断面形状は、円形断面形状との差異が少なく見えるが、羽根付き同様に流れの作用方向が変わった場合の影響が懸念される。従って、円形断面形状は、表面の作用圧力(抵抗)は最も小さいものの、流速の乱れが他の形状に比べて極めて小さく、浮き自体が周辺流れに与える影響を最小にできる形状である。これらの解析結果から判断して、最も適切な浮き断面形状(乱れが少ない断面形状)は円形断面形状であると考えられる。

2.3 計測手順

計測手順は、まずボーリング孔にケーブルで連結した計測装置本体部を挿入(降下)し、固定用パッカーで所定深度にしっかり固定する。そして、計測装置挿入前の自然状態の地下水流を乱しているため、定常状態に落ち着くまでそのまま静置する。その後、計測を開始し長期的かつ連続的に地下水流に伴い挙動する浮き頭部画像を動画並びに静止画として取得・保存する。

地下水流速の算出に関しては、事前の室内実験結果を基にした浮き頭部の移動量(移動ピクセル量)と地下水流速の関係を基に求めることになる。しかし、浮き頭部の移動量と地下水流速の関係は、浮きの形状、長さ及び

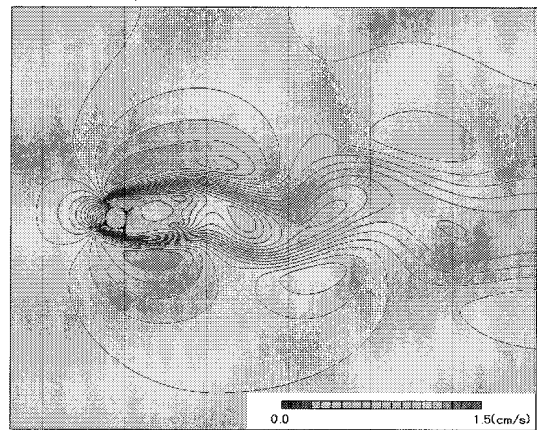


図-10 case B解析結果(初期流速1.0cm/s:流速分布)

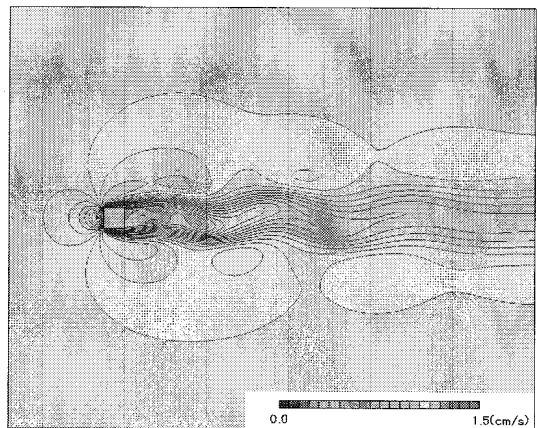


図-11 case C解析結果(初期流速1.0cm/s:流速分布)

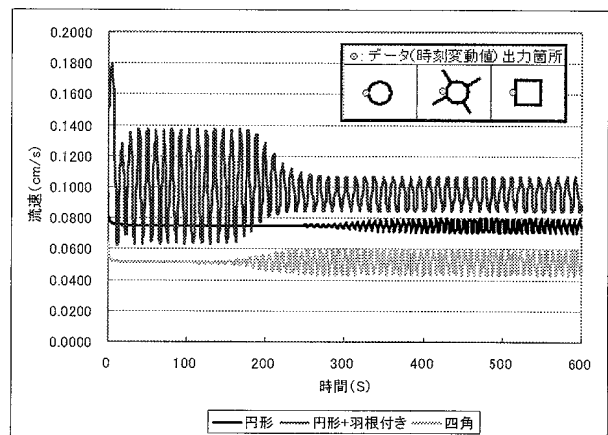


図-12 断面形状別時間変動(初期流速1.0cm/s:流速分布)

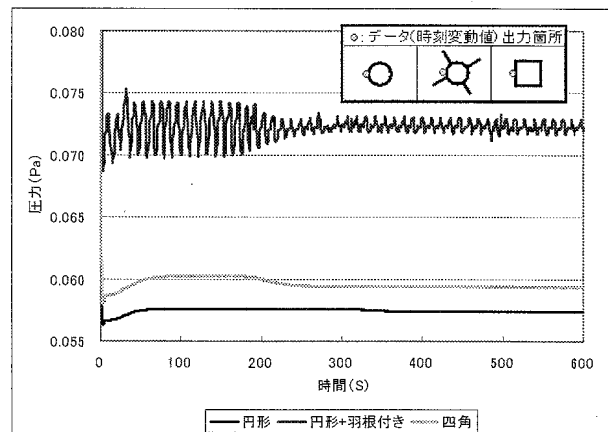


図-13 断面形状別時間変動(初期流速1.0cm/s:圧力分布)

浮き固定部の機構（ヒンジ構造）ごとに異なるため、必要に応じて事前のキャリブレーションが必要になる。

また、移動方向については、計測装置内の内蔵方位計を基に方位（地下水流向）を算出する。

3. 現場基礎実験の概要と計測結果

3.1 地質概要

本計測地点付近の地質構成は、表層部が砂層（As）、その下部にはかなり厚い（層厚は20～30m）砂礫層（Dg）が分布している（図-14参照）。また、現場基礎実験時の対象砂礫層の水温はほぼ16℃であった。なお、砂礫層（Dg）については、砂分やシルト分を介在する部分もあるため、地下水流動調査時には層区分に留意した位置（深度）で実施することが重要である。

3.2 計測概要

試作した地下水流向流速計による現場計測は、地下水流動が比較的大きいGL-24.0m付近の砂礫層（Dg）を対象に実施した。また、海岸からの距離が比較的近いこと、図-15に示すような潮汐の影響による地下水流動方向の変化を把握できるかを確認するため、計測期間は2006/7/25(15:28)～7/26(13:12)の昼夜間で長期的かつ連続的に実施した。なお、計測期間における満潮と干潮時刻は、7/25の17:31（満潮）と22:22（干潮）であった。

以下に、現場基礎実験における地下水流向流速の計測結果を前述した満潮と干潮時刻に着目して示す。

3.3 現場計測結果

写真-4に計測時の取得画像例を示す。両画像は、数多く取得した画像中から、7/25 17:31（満潮時刻）と7/25 22:22（干潮時刻）の画像を抽出したものである。

両画像上の点線交点は、静水時における浮き頭部の中心を示し、実線の交点は各計測時における浮き頭部の中心を示す。現場実験時の地下水流速がかなり遅いため、浮き頭部中心の移動量は小さいものの、満潮時刻には画像左側方向に移動したのに対し、干潮時刻は満潮時刻と異なる逆方向の画像右側方向に浮き頭部中心が移動していることがわかる。

このことより、現場計測地点では満潮時と干潮時で地下水流動方向が異なる可能性があることが確認された。また、地下水流速については、現状では流速が遅い場合（ $10^{-4}m/s$ 以下）の浮き頭部の移動量と地下水流速の厳密な関係が得られておらず、現状データからは地下水流速は $10^{-4}m/s$ 以下であることが把握できた。

今後、正確な室内実験や数値解析等により地下水流動の低流速場における厳密な浮き頭部移動量と地下水流速の関係を確認することで、連続式地下水流向流速計を開発・実用化することは可能であることが確認できた。

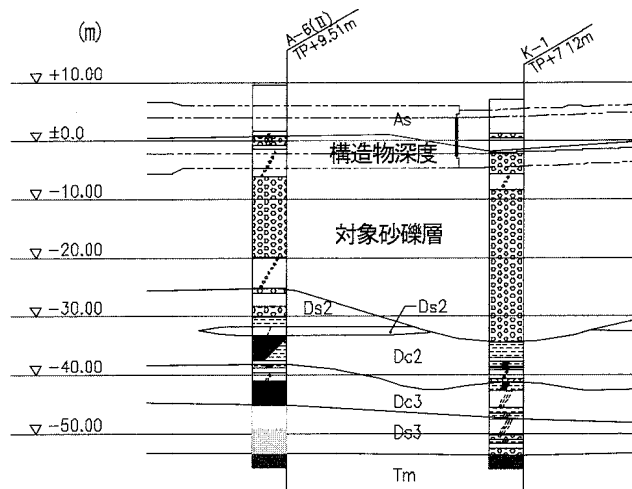


図-14 現場基礎実験場所における地質概要図

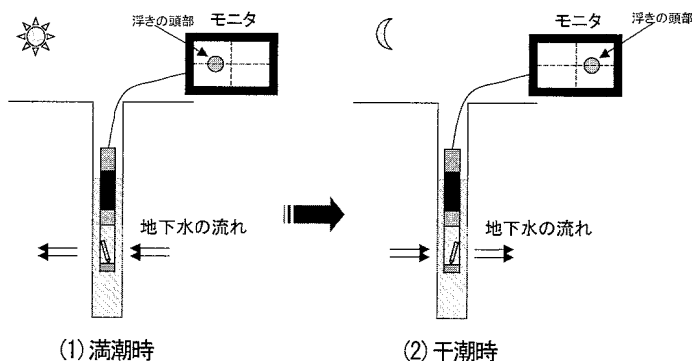
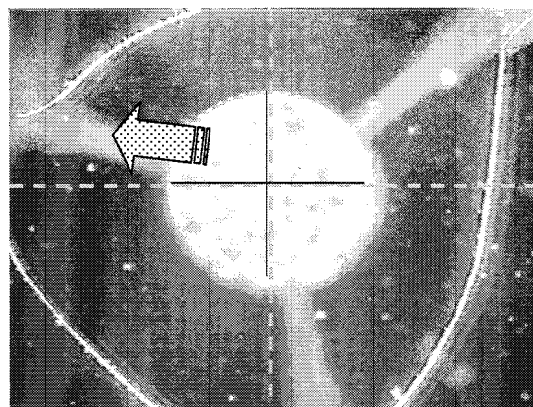
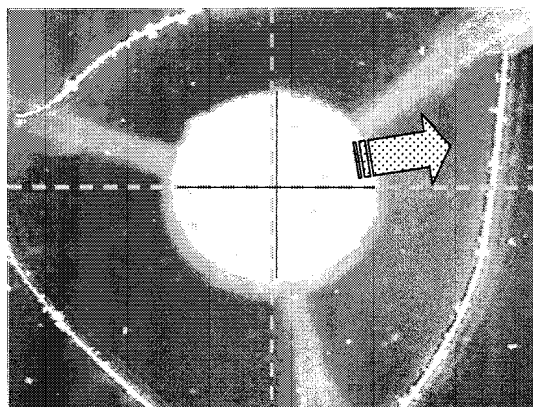


図-15 潮汐の影響による地下水流動方向の変化イメージ



(1) 満潮時刻に取得した画像 (7月25日 17:31)



(2) 干潮時刻に取得した画像 (7月25日 22:22)

写真-4 満潮・干潮時刻に着目した現場実験時の取得画像

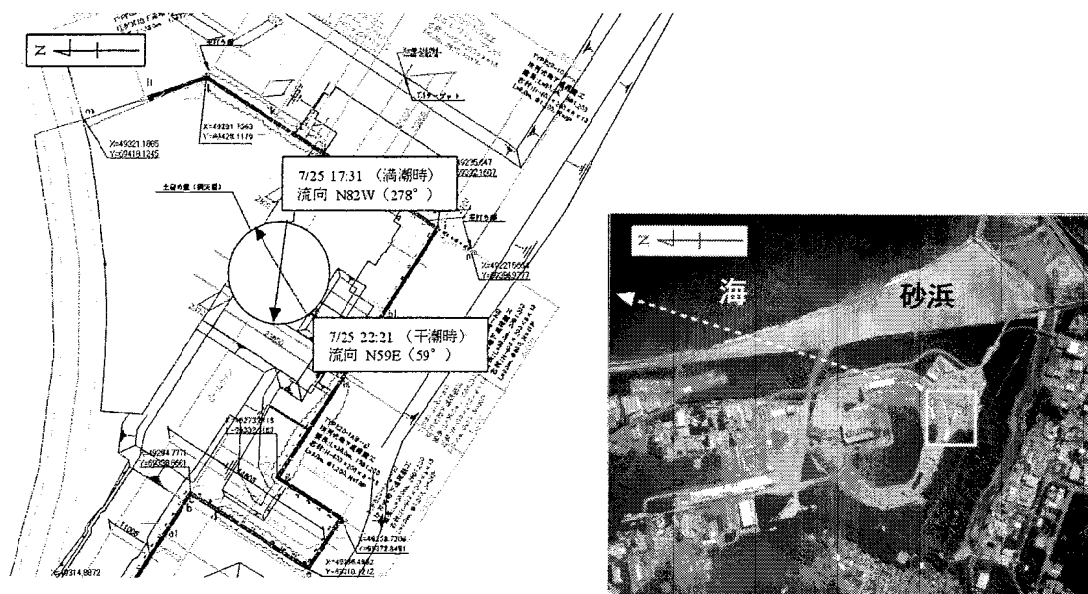


図-16 現位置の地下水流向の計測結果 (満潮時と干潮時)

図-16は、計測された満潮時と干潮時の地下水流向の計測結果を、現地の平面図上に重ね書きしたものである。この図より、満潮時は孔内の地下水流向はほぼ西側方向へ、干潮時は孔内の地下水流向は北東側方向への流れを計測した。満潮時と干潮時で180°異なる計測結果ではないが、地下水流動の方向は逆方向になることが確認することができた。なお、現地は各種構造物を構築するための止水壁が地盤内に施工されていることなどから、厳密な評価については止水壁施工の影響を考慮した考察が必要と考えられる。

4. おわりに

本現場基礎実験において、開発中の連続計測を目的とした地下水流向流速計は、長期的かつ連続的に地下水流動(流速と方向)を経済的に計測できる可能性を示した。

今後は、地下水流速が 10^{-4} m/s未満の低流速域での流速変化に対する感度の良い浮き仕様(密度、形状、長さなど)および下端部ヒンジ構造を検討し、各種現場の地下水流動調査に対して長期的かつ連続的な計測に適用し、安全・安心を与える精度の高い地下水流動予測および環境影響評価などに有効活用していく所存である。

謝辞:本研究の一部は、平成19年度科学研究費補助金(基盤研究(C) 課題番号:19560506)の援助を受けて行ったものであり、ここに記して謝意を表す次第です。また、連続式流向流速計の試作に際してご協力を頂きました(株)レアックス 金内 昌直氏に謝意を表します。

【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) 地盤工学会編: 地盤調査の方法と解説 一第 13 章 孔内流向流速測定一, pp. 473-476, 2004.
- 3) 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.
- 4) <http://www.kangi.ktr.mlit.go.jp/EvalNetis/newindex.asp>
- 5) 小林薫, 松元和伸, 熊谷幸樹, 松田浩朗, 本山寛, 金内昌直: 連続的観測を目的とした流向流速計開発に関する基礎実験, 日本地下水学会, 2006年秋季講演会講演要旨, pp. 316-319, 2006.

Summary : Amid the increasing consciousness of geo-environmental issues, various problems related to groundwater have been attracting attention. The velocity and direction of groundwater flow are considered to be one of the key factors of long-term monitoring plans for various purposes including the detection of groundwater contamination. However, conventional single borehole methods have caused difficulties in long-term and continuous in-situ investigation of groundwater flow. This paper reports on the results of investigation into the applicability of an innovative technique, a single borehole method that can measure the direction and velocity of groundwater flow continuously and accurately with a prototype device comprising a CCD camera and a float.

Keywords : geotechnical engineering, groundwater, in-situ measurement, CCD, image processing technique, borehole