

平成 22 年 6 月 28 日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007 ～ 2009
 課題番号：19560506
 研究課題名(和文) 画像解析手法を用いた地下水流動場の連続流向流速測定技術の確立と測定システムの開発
 研究課題名(英文) Establishment of continuous flow measurement technology and development of measurement system for groundwater flow using image processing method
 研究代表者
 小林 薫 (KOBAYASHI KAORU)
 飛鳥建設株式会社技術研究所・副所長
 研究者番号：80443638

研究成果の概要(和文)：

現状の単孔式地下水流向流速計は、地下水流動場の連続的な地下水流向流速の変化を測定することは極めて難しい。本研究では、連続式流向流速計の下端部にヒンジ構造を有する浮きセンサを取り付け、その上部に配置したテレビカメラで浮きセンサの頭部を動画像として連続撮影し、地盤内の水温や間隙水圧などと共に、画像解析手法を用いて簡易かつ連続的に地下水流向流速を測定できる独創的な測定技術の確立と連続式流向流速測定システムを開発した。

研究成果の概要(英文)：

With the currently available in a borehole measurement device, continuous measurement for groundwater flow is extremely difficult. To solve this, a unique floating sensor with a hinge was attached to the bottom of the newly-developed instrument. On its upper part, a video camera was installed to capture video of movement of the floating sensor head to measure the groundwater flow. In this study establishment of continuous flow measurement technology and developed an instrument that enables simple, continuous and simultaneous measurements for groundwater flow using image processing method and other criteria including groundwater temperature and pore water pressure etc..

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：地下水工学、水循環、地下水流動調査

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：(1) 地下水工学 (2) 画像解析 (3) 地下水流動 (4) 流向流速測定 (5) 地下水モニタリング (6) モニタリングシステム (7) 連続測定 (8) 地下水変動

1. 研究開始当初の背景

21世紀は水の世紀と呼ばれている。地下水

流況阻害、井戸枯れなどの建設分野のみならず、環境保全・環境修復分野においては、特

に放射性廃棄物処分場を含む廃棄物地層処分サイト選定やその安定性の評価に関して、処分場を構成する天然バリアおよび人工バリアの性能を検証する超低流速場においても精度の高い3次元地下水流向流速測定システムが必要とされている（(財)エネルギー総合工学研究所「高レベル放射性廃棄物処分場の性能検証用測定システムの開発」）。しかし、地盤調査の方法と解説（地盤工学会編、2004）に示されているボーリング孔を用いた地下水流向流速測定法は、適用限界が低流速場で、しかも2次元水平流しか測定できないのが現状である。なお、ボーリング孔を用いた地下水流向流速測定法は、地下水が豊富で複雑な地層構成であるわが国の独自技術として発達した測定方法である（西垣、1991）。申請者はこれまでに、地下水流動の可視化という視覚的な観点から、将来有望な測定手法として注目されている画像解析手法を用いて、ボーリング孔内で地下水流動を精度良くリアルタイムに3次元評価可能な光学式流向流速測定システムを開発してきた。国内外唯一の光学式流向流速測定システムは、1台のテレビカメラ（CCDカメラ）とプリズムを組み合わせることで、ボーリング孔内（周辺地盤）を通過する地下水流動と共に浮遊して移動する密度調整型固体トレーサをプリズムを介して視差の異なる2方向からのステレオデジタル画像として経時的に取得し、このデジタル画像を解析することにより固体トレーサの挙動を3次元評価するものである。

一方、沿岸域では、海水が「塩水くさび」として帯水層に塩水が侵入し、地下深部の淡水が塩淡水界面に沿って上昇し、何らかの汚染物質が地層処分サイトなどから予想外に漏出した場合、最終的には海底湧水（SGD：Submarine Groundwater Discharge）として海洋に流出することになる。このため、陸域水や陸域起源物質の沿岸域への供給経路のひとつとして重要視されているとともに、海岸付近から内陸にかけての地下深部の帯水層への海水の侵入域を把握することが要求されている（経済産業省「海底地下水湧出探査技術の高度化調査」）。これまでの研究は、海底地盤中の間隙水圧や電気伝導度等の長期連続測定から水理特性を評価する手法や光ファイバケーブルによる海底面温度測定による面的な調査を基に海底地下水湧出量評価を試みている。また、Taniguchi et al. (2006)らは、世界10カ国97地点の地下水流出量の実測値を基に全地球規模の評価を試みている。しかし、塩淡水界面付近の複雑な挙動を示す地下水流動（地下水の流向流速）を現地でも直接的に測定・評価したものはない。更に、最近の測定プローブOcean7（イドロノート社製）では、ボーリング孔内で地科学検層（水圧、水温、電気伝導度、溶存酸

素、pH、酸化還元電位など）を連続的に測定可能であるが、測定可能ボーリング孔の径が大きく、地下水の流向流速については測定不可能である。このことから、外的要因（潮汐などの影響による日変動、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基に数年～数十年～数百年の予測・評価に用いる際の時間依存性に大きな課題がある。このことから、これまで不可能であった地下水流向流速測定を簡易に長期間かつ連続的に把握することができれば、外的要因を考慮した将来の地下水流動評価、地下水流動予測の信頼性を格段に向上させることが可能である。ここでは、特に海岸付近から内陸にかけての比較的浅層部の地下水流動を対象に、簡易かつ連続的に流向流速が測定可能な技術を確立することは、沿岸海底地盤内の地下水流動を精度良く評価・予測できるだけでなく、地下水資源開発や地球規模の水循環を構成する地下水の1つである海底地下水の湧出現象解明にも貢献するものと考えられる。

2. 研究の目的

画像解析手法による地下水流向流速測定において長期連続測定への適用に関する問題点は、如何に固体トレーサを地下水中に連続的に投入できるかということである。しかし、従来の各種測定手法では地下水中に初速を与えずに固体トレーサを連続的に投入することは極めて困難である。したがって、本研究では、これまでの地下水の流れにのることのできる密度調整型固体トレーサを用いるのではなく、地下水流動によって傾く下端部がヒンジになった「浮きセンサ」を用いて、その「浮きセンサ」の上部に配置した高精細テレビカメラで浮きセンサの挙動（移動）を動画として連続取得し、そのデジタル画像を画像解析手法によって超低流速場における微少な浮き頭部の移動量およびその方向（方位）を算出し、事前の室内実験で明らかにした浮き頭部の移動量と地下水流速の関係から原位置における地下水流速を、方向（方位）から地下水流向を連続的に測定する画期的な技術を確立することを研究目的とする。そして、原位置で簡易に長期間にわたり大容量デジタル画像データを確実に保存可能な経済的かつ信頼性の高い長期連続測定システムの開発を最終目的としている。

3. 研究の方法

(1) 低流速場でも敏感に反応する「下端部ヒンジ構造の浮きセンサ」を用いた連続流向流速測定技術の確立する。

① 下端部ヒンジ構造の検討・選定

低流速場に適用するための抵抗が極めて

小さいヒンジ構造について室内実験を行い明らかにする。

②最適な浮きセンサの検討・選定

解析的検討により、連続測定に重要な「浮きセンサ」の開発にあたり、解析による予備検討を行う。解析は、現有している3次元熱流体解析(解析コード;STREAM、ソフトウェア・クレイドル社製)を用いて、浮きセンサの断面形状、横断形状および長さ、径をパラメータとして検討を行う。この解析結果を基に、低流速場でも敏感に反応する実用性の高い適切な形状等の浮きを選定した上で、以下に示す室内実験による実証を行う。

また、実験的検討では、選定した「下端部ヒンジ構造」、解析的検討結果で最適として選定した「浮きセンサ」と高精細テレビカメラを組み込んだ測定装置を製作し、室内実験により低流速場での測定装置(下端部ヒンジ構造、浮きセンサ)の作動確認による検証を実施する。

③浮きセンサ頭部の移動量(ピクセル数)と地下水流速の関係を実験的に把握

測定装置に組み込まれた下端部ヒンジ構造の浮きセンサの頭部移動量ー地下水流速の正確な関係を大型水槽を用いて実験的に明らかにする。この実験による精度と感度の検証により、測定装置の超低流速場への適用限界を明らかにする。また、実験では再現が難しい地下水流速域(10^{-1}m/s 以上や 10^{-7}m/s 以下)については、解析的な検討を加えて浮きセンサ頭部移動量ー地下水流速の正確な関係を明らかにする。なお、前記の浮きセンサ頭部移動量ー地下水流速の関係を基に、原位置で測定された浮きセンサ頭部移動量から原位置の地下水流速を算定する。

④連続流向流速測定装置の適用性検討

現場における現有のボーリング孔内で地下水流動を精度良くリアルタイムに3次元評価可能な光学式流向流速測定システムを併用し、原位置の地下水流向流速について測定精度検証を行う。

(2)原位置における実用性の高い防水・防塵型長期連続測定システムの開発

①長期間連続データの効率的な自動画像解析プログラムの開発

デジタル画像(静止画と動画の両方)の取得および画像解析して浮きセンサ頭部の移動量を厳密に算出するプログラムは既に開発済みである。したがって、長期間の連続したデジタル動画を効率的に自動処理し、連続画像データを画像解析して、テキストデータ(浮きセンサ頭部移動量とその方位データ)に自動変換するための画像解析プログラムのcode開発を行う。

②屋外使用に耐える実用的な低消費電力型長期連続データ保存装置の開発

デジタル動画を長時間にわたって長期間保存するには非常に大きな容量の保存装置が必要になる。このため、通常のビデオテープ、DVDテープでは容量が大幅に不足するため、大容量HDDを利用した長期連続計測データ保存装置の開発を行う。なお、使用するテレビカメラや電子回路等は省電力型を採用する。

③汎用性のある視覚的に確認しやすいモニタリング用処理プログラムの開発

連続画像データを画像解析してテキストデータ(浮きセンサ頭部移動量とその方位データ)に自動変換する自動画像解析プログラムのcode開発を基に、その場で連続したテキストデータ(浮きセンサ頭部移動量とその方位)の経時変化をディスプレイ上でリアルタイム・自動に図表化し、視覚的に確認しやすいモニタリング用処理プログラムの開発を行う。

4. 研究成果

本研究は、画像解析手法を用いて地下水流動場の連続流向流速測定技術を確立すると共に、流向流速測定システムの開発である。

以下に、研究期間(平成19年度~平成21年度)内に興味深い研究成果を得た。

(1)連続式流向流速測定システムの開発

写真1は、連続式流向流速測定システム全体(写真1の①~⑦)の構成を示す。①連続式流向流速計の本体(ステンレス製)、②電力および画像伝送ケーブル、③大容量HDD内蔵の取得画像保存・表示装置、④長時間の連続動画の取得・保存用ビデオカメラ(大容量のHDD)、⑤AC/DCコンバーター等を内蔵した各種接続ケーブル類および測定装置保管・搬送用ボックス、⑥本体に装着するゴムパッカー、⑦本体をボーリング孔内の所定深度に固定するゴムパッカー用のコンプレッサーとホースである。連続式流向流速計の本体部は、全長約1,000mm(標準)、直径50mmで、浮きセンサ(固定治具類含む)、支柱、テレビカメラ、LED照明、制御回路、固定用ゴムパッカー、各種計測器(間隙水圧計、温度計およびEC計)などから構成されている。測定・モニタリング時の取得画像は、接続しているPC(パーソナルコンピュータ)に保

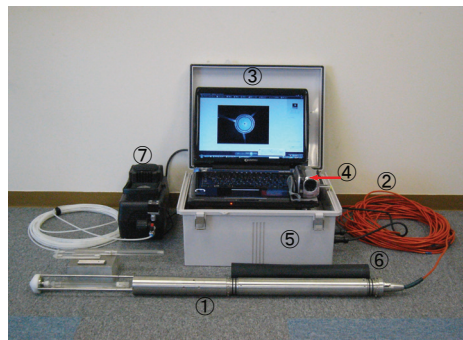


写真1 連続式流向流速測定システムの外観

存・表示するとともに、HDD 内蔵のビデオカメラに動画像を同時に保存できる。

連続式流向流速計を用いた場合の測定手順を図1に示す。

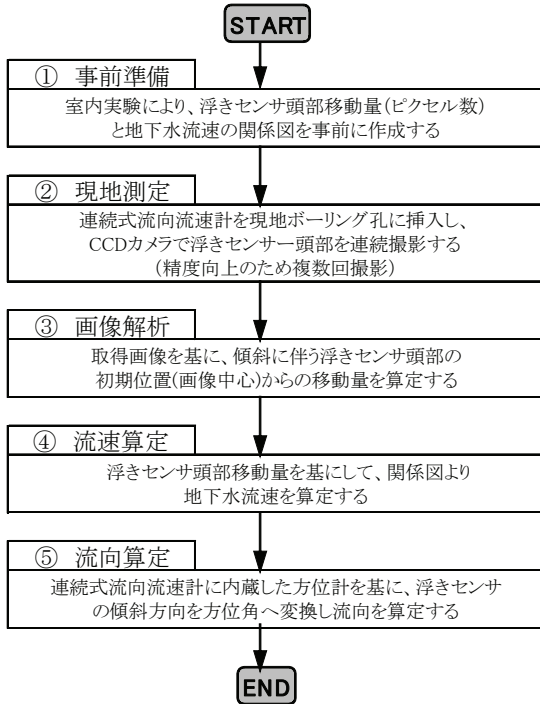


図1 連続流向流速測定フロー

(2) 浮きセンサー接続部の機構

本体部先端に取り付けている浮きセンサーは、写真2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、浮きセンサーは、地下水流速によって使い分けることも想定しているため、長さ(140mm、215mmおよび290mm)や径(10mmと15mm)を自由に変更できるようにした。そのため、浮きセンサー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)も順次長さを変更する必要がある。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)を容易に変更可能である。

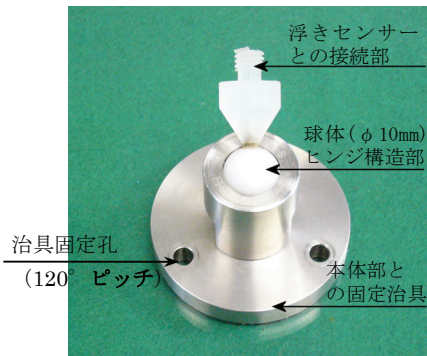


写真2 浮きセンサーとの接続治具の外観

(3) 最適な浮きセンサーの検討・選定

二次元非定常流体シミュレーションでは、流水中に浮きセンサーを設置した状態をモデル化し、解析領域内の流速および圧力分布を求めた。なお、浮きセンサー周辺の基本的な特性(流速と圧力)を把握することを目的としているため、一様流の中に浮きセンサーを設置した解析モデルで検討した。表1には、解析モデルと解析ケース一覧を示す。

Table1 Analysis model and analysis cases

解析モデル	流体シミュレーションの解析ケース				
	流体の種類	初期流速 × 10 ⁻² m/s	流水に対する浮き配置角度	浮き断面形状	浮き表面応力
要素数 130 × 125 =16,250(メッシュ)	ケース 1-1	5	→	円形 (φ10mm)	滑り面 (フリースリップ)
	ケース 1-2	1			
	ケース 1-3	0.5			
	ケース 1-4	0.1			
	ケース 1-5	0.01			
ケース 2-1	淡水	0.5	→	正方形 (10 × 10mm)	
ケース 2-2			→	正方形 (10 × 10mm) 角度=30°	
ケース 3-1	塩水	0.5	→	円形+羽根 (φ10mm +5mm羽根)	
ケース 3-2			→	円形+羽根 (φ10mm +5mm羽根) 角度=30°	
ケース 4-1	塩水	5	→	円形 (φ10mm)	
ケース 4-2		2			
ケース 4-3		1			
ケース 4-4		0.5			
ケース 4-5		0.1			
ケース 4-6		0.01			

連続式流向流速計の測定精度を上げるためには、地下水流動場が低流速域であっても浮きセンサーが敏感で、浮きセンサーの傾斜を大きくさせることが重要である。このため、浮きセンサーに作用する圧力を少しでも大きくする断面形状が望ましいと考えられる。今回解析した断面形状における作用圧力の大きさは、円形+羽根>正方形>円形の順となった。しかしながら、浮きセンサーの断面形状が正方形や円形+羽根では、同じ流速でも円形断面に比較して浮きセンサー後方の流れに乱れ(渦)が生じやすい。また、浮きセンサーに作用する圧力は、地下水流との角度によっても異なることから、円形断面以外は地下水流の中で安定した挙動を得ることが非常に難しいことが明らかになった(図2参照)。

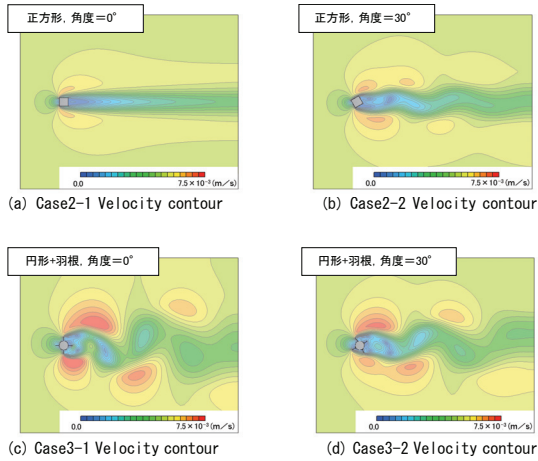


Fig.2 Results of analysis Case2-1~3-2
(Velocity= 5×10^{-3} m/s)

また、図3に示すように、流体シミュレーションより浮きセンサの断面形状が円形である場合、適用流速範囲は浮きセンサ周辺に乱れない流速の上限値 1×10^{-2} m/s 未満である。下限値については、下端部ヒンジ構造の摩擦の影響が不確定であり、実験により明らかにする。

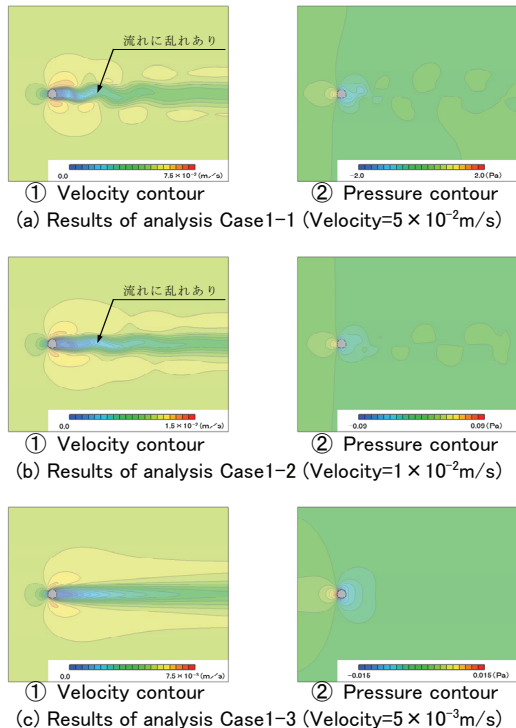


Fig.3 Results of analysis

(4) 浮きセンサ頭部の移動量 (ピクセル数) と地下水流速の関係などを実験的に把握

図4に示すように、浮きセンサの径が太く、長さが長くなるほど低流速域の地下水流速を測定可能となり、径15mm、長さ290mm (○ B-15-290) の浮きセンサを用いれば、 3×10^{-5} m/s 程度までの低流速域 (下限値) まで測定可能である。

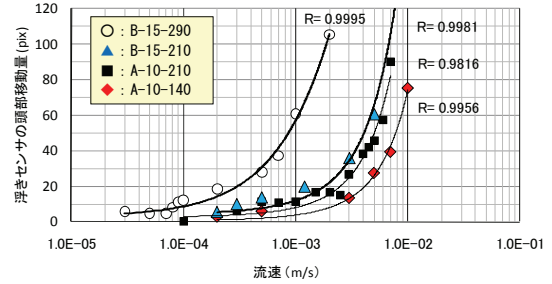


図4 各浮きセンサの流速と頭部移動量の関係

また、室内実験では、浮きセンサはほぼ正確に地下水流の下流方向に傾斜し、設定した角度と測定値の最大誤差は約 19° 、平均誤差は 8° 程度の結果であった。これは、従来の単孔式流向流速計における測定精度と同等以上であり、実用的な測定精度までシステムを向上することができた。また、 3×10^{-3} m/s の流速一定の基で、固定した角度ごとの浮きセンサ頭部の移動量 (ピクセル数) は、角度によって多少バラツキがあるものの標準偏差 $\sigma=5.5$ ピクセルであった。この $\sigma=5.5$ ピクセルは、事前に求めた浮きセンサ頭部移動量と流速の関係図を基にした流速値の算定誤差は非常に小さく、室内実験時の流速レベルではほとんど影響がないことが明らかになった (図5参照のこと)。

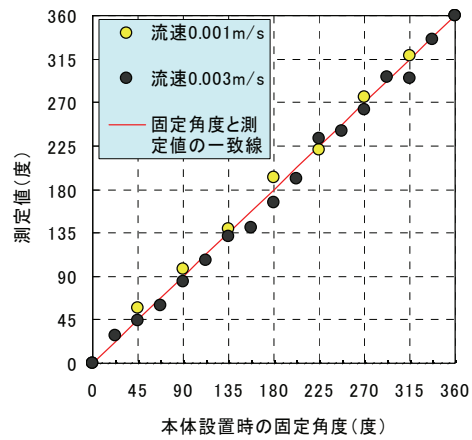


図5 実験時の固定方向の角度と測定値の関係

(5) 現場における測定システムの適用性検討

開発した連続式流向流速測定システムを原位置における地盤内の水みち調査に適用し、ボーリング孔を用いて所定深度の地下水流向流速を連続的かつ容易に測定できるとともに、ゆっくりとボーリング孔内を上下させて順次流向流速を測定することで、地質構成など深度によって変化する地下水流動場の水みち (流速が速い深度) を比較的容易に特定できることを確認した (図6参照のこと)。

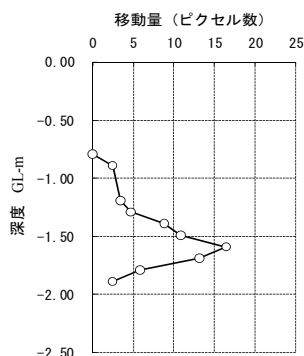


図6 各深度における浮きセンサ頭部の移動量

(6)前記の適用現場をはじめ、連続式流向流速測定システムを現場実験に適用し、防水・防塵等による影響をほとんど受けず現場の長時間使用に対する安定性についても問題ないことを確認した。

以上より、室内実験及び現場検証実験を行い連続流向流速測定技術を確認すると共に、連続式流向流速測定システムを完成させた。

最後に、地球温暖化に伴う海面上昇や海岸地下水の塩水化などに加えて、内陸部の地下水についても地下水資源に及ぼす影響やその進行程度を把握・評価することが重要視されている。安心・安全な地下水を提供するため、地下水資源の健全かつ持続可能な水循環を図るための“地下水の動き”を把握するため、開発した連続式流向流速測定システムを実装し、地下水資源としての海底地下水流動の解明などに寄与できるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6件)

- ① 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、査読有、第51巻、第4号、2009、pp. 349-360
- ② 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、査読有、Vol. 4、No. 1、2009、pp. 117-124
http://www.jstage.jst.go.jp/article/jgs/4/1/117/_pdf/-char/ja/
- ③ 小林 薫、熊谷幸樹、松田浩朗、松元和伸、テレビカメラを用いた地下水流動場の連続的な流向流速の可視化、地盤工学会誌、査読有、Vol. 57、No. 5、2009、pp. 16-19
- ④ 小林 薫、松田浩朗、本山 寛、松元和伸、河野俊樹、他3名、連続計測を目的とした地下水流向流速計の試作と現場基礎実験、

とびしま技報、査読有、No. 56、2007、pp. 85-90
http://www.tobi-tech.com/tech/gihou/56/gihou_56-2007-12.pdf

[学会発表] (計 8件)

- ① 小林 薫、松元和伸、松田浩朗、塩谷智基、動画像を用いた地下水の連続的な流向流速測定技術の開発と現場適用、地盤工学会、2009年12月1日、建設交流会館(大阪府)
- ② 小林 薫、松元和伸、松田浩朗、金内昌直、近久博志、画像解析手法を用いた連続式流向流速測定システムの水みち調査への適用、日本地下水学会、2009年10月16日、北海道立道民活動センター
- ③ 小林 薫、熊谷幸樹、松田浩朗、松元和伸、近久博志、画像解析手法を用いた地下水流向流速計による連続的な流向測定精度、土木学会、2009年9月2日、福岡大学七隈キャンパス
- ④ 小林 薫、松田浩朗、熊谷幸樹、松元和伸、阿保寿郎、金内昌直、大型水槽を用いた室内実験による連続式流向流速計の適用性検証、日本地下水学会、2008年11月20日、九州大学医学部百年講堂(福岡市)

[図書] (計 2件)

- ① 小林 薫、(財)全国建設研修センター、掘削と地下水－掘削における地下水問題－、2009、98ページ

[産業財産権]

○出願状況 (計 1件)

名称：地下水流動測定装置
発明者：小林 薫、熊谷幸樹
権利者：飛鳥建設株式会社
種類：特許
番号：特願 2009-020217 号
出願年月日：2009年1月30日
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等
http://www.tobi-tech.com/lab/person/kao ru_kobayashi.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 薫 (KOBAYASHI KAORU)
飛鳥建設株式会社技術研究所・副所長
研究者番号：80443638

(2) 研究協力者

金内 昌直 (KANAUCHI MASANA O)
株式会社レアックス技術研究室・部長
研究者番号：－