

マトリクス超音波センサを用いたボーリング孔内の 3次元地下水流向・流速計測におけるトレーサ軌跡の自動抽出について

鹿島建設(株) 正会員 ○瀬尾 昭治, 同 戸井田 克, 同 田中 真弓

(株)東芝 非会員 長井 敏, 同 鈴木 健彦, 同 佐藤 光吉, 同 小舞 正文

東海大学 非会員 大江 俊昭, 岡山大学 正会員 西垣 誠

1. はじめに

地下深部における地下水流速は $10^{-9} \sim 10^{-6} \text{m/s}$ 程度と考えられているが、ボーリング孔を利用した既存の流向・流速計測機器では、 10^{-9}m/s 以下の極低流速の計測は困難である。そこで、地下深部で $10^{-10} \sim 10^{-5} \text{m/s}$ までの3次元地下水流動が計測可能な地下水流向・流速計測システムの開発を目標として、単一のボーリング孔内地下水に浮遊させた固体粒子(トレーサ)の軌跡を超音波センサで追尾する新しい計測手法について検討を行った¹⁾。今回は、取得データからトレーサ軌跡を自動抽出するための解析手法について報告する。

2. マトリクス超音波センサ計測システム

2.1 マトリクス超音波センサと超音波計測ユニット

本手法での原位置計測では、深度 300~1,000m、孔径 $\phi 100\text{mm}$ 程度のボーリング孔内の深部地下水を対象とし、最深部では水圧 10MPa 程度、水温は 50℃程度まで、水質が淡水から海水並みの地下水環境を想定している。水温については、地表温度 20℃、地中の温度勾配 3℃/100m と仮定し、深度 1,000m で 50℃相当と考えた。この環境下での地下水流向・流速を3次元的に計測可能とするマトリクス超音波センサを用いた計測システムを検討した。図1はマトリクス超音波センサによる固体トレーサ位置計測と孔内装置の概要を示したものであり、本手法ではボーリング孔内地下水に浮遊させた固体トレーサの位置を超音波により計測することで、地下水の流れに沿って移動する固体トレーサの軌跡から3次元の流向・流速を求める。

マトリクス超音波センサの計測可能範囲内に浮遊する固体トレーサの位置決定手順は以下の通りである。
①複数の圧電素子を格子状に配置したマトリクス超音波センサの1つの圧電素子から水中に浮遊している固体トレーサに向けて広指向角の超音波を発信する。
②固体トレーサから反射した超音波のエコーをすべての圧電素子で受信し、その波形信号を記録する。
③超音波を発信する圧電素子を切り替えて①、②を繰り返し、発信と受信のすべての組合せによる反射波信号を取得する。
④得られた反射波信号を開口合成処理して、固体トレーサの3次元位置を決定する。

2.2 データ取得・解析手法

マトリクス超音波センサを用いて、ボーリング孔内水中に浮遊する固体トレーサの位置を経時的に計測し、流動状況を把握するため、既存の超音波センサを用いたナトリウム中目視検査手法^{2,3)}を改良して適用した(図2参照)。

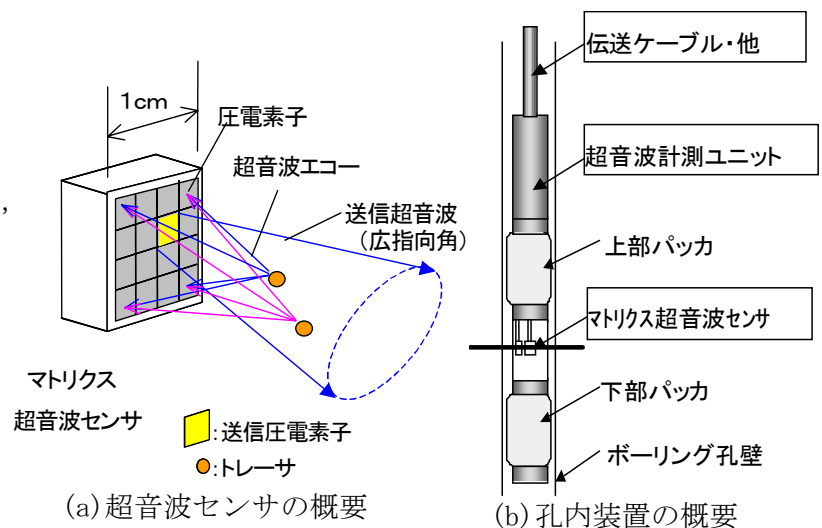


図1 計測装置の概要

2.3 ハフ変換によるトレーサ軌跡の抽出

上記のソフトを用いた処理を行った後、超音波マトリクスセンサによる計測データから抽出したトレーサの移動軌跡を比較し、ハフ変換アルゴリズムを用いたプログラムを用いて、同一トレーサ移動軌跡の抽出を

キーワード 地下水流動, 3次元流動場検出, マトリクス超音波センサ, 固体粒子トレーサ

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL:042-489-7081

行った。ハフ変換とは、線分を抽出する手法であり、直線だけでなく円や楕円にも適用されている⁴⁾。図3(a)に示すように、x-y直交座標系における一つの直線(式1)は、 ρ - θ 極座標系により式2のように一点(ρ_c , θ_c)で表すことが可能である。

$$y = ax + b \dots\dots\dots (式1)$$

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \dots\dots\dots (式2)$$

また、直交座標系で点(x_0 , y_0)を通る直線群は、極座標系では、式3で表される一つの曲線に対応する。

$$\rho = x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta \dots\dots\dots (式3)$$

したがって、同一直線上に並ぶ複数の点は、極座標系では曲線となり、これらの曲線は図3(b)に示すように一点で交わるので、この交点の座標より点列を通る線分を求める。本システムのハフ変換アルゴリズムを用いたトレーサ抽出アプリケーションでは、超音波流向・流速計測装置の測定結果からトレーサと思われるデータ群を抽出し、トレーサ軌跡を直線としてグラフに表示する(図4参照)。

3. 原位置試験における検出システムの性能確認

整備した検出システムの前位置における計測性能を検証するため、堆積岩中に深度550mまで削孔されたボーリング孔内の深度490~506mで、原位置試験を実施した。原位置試験では、直交に配置された2つのマトリクス超音波センサの交軸点(センサ面から35mm)を中心に1cm³(1cm×1cm×1cm)の計測領域を設定し、この領域に入ってくるトレーサの位置を検出した。この計測領域内に設置した基準ターゲット先端を原点として水平面をX軸-Z軸に、鉛直方向(孔底)をY軸とした座標系でトレーサの移動軌跡を解析して流向・流速を求めた。図4は流速計測例であり、検出したトレーサの移動軌跡の勾配から流向・流速を求め、計測地点における地下水の流動状況と整合的な10⁻¹⁰~10⁻⁴m/s程度の流速を計測できた。

4. おわりに

単一ボーリング孔内の計測区間内に固体粒子をトレーサとして浮遊させ、マトリクス超音波センサで軌跡を追尾することで孔内流動状況を検出するためにデータ取得・解析手順について検討し、ハフ変換アルゴリズムを用いたトレーサ移動軌跡抽出法で、複雑な処理を効率よく実施するシステムを構築することができた。

本研究は、経済産業省、財団法人エネルギー総合工学研究所：革新的実用原子力技術開発費補助事業「高レベル放射性廃棄物処分場の性能検証用計測システムの開発」(平成13~17年度)の成果の一部である。

＜参考文献＞ 1)戸井田ほか(2006):高レベル放射性廃棄物処分場の性能検証用計測システムの開発,土木学会第61回年次学術講演会,CS05-025~028. 2)Shioyama, T. and Ara, K. (1996): The Simulation of Ultrasonic Propagation in Inhomogeneous Liquid Sodium. Proc. 14th Int. Conf. on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, pp.491~497. 3)Karasawa, H. et al. (2000): Development of Under-Sodium Three-dimensional Visual Inspection Technique using Matrix-arrayed Ultrasonic Transducer. Jour. of Nucl. Sci. Technol., 37 (9), pp.767~779. 4)尾崎弘・谷口慶治・小川秀夫(1983):『画像処理ーその基礎から応用まで』共立出版, p.247.

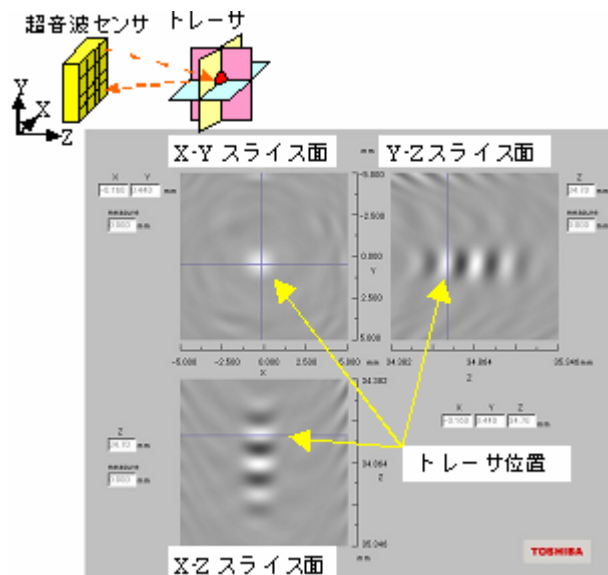


図2 トレーサ検出の概要

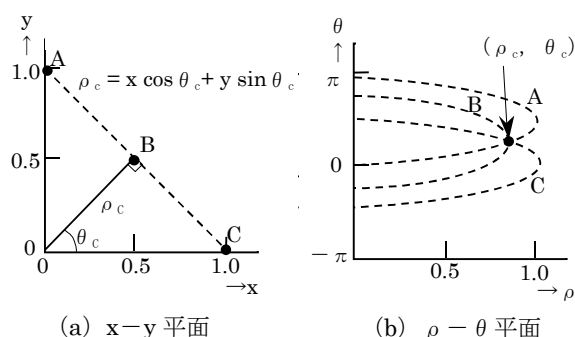


図3 ハフ変換の概要

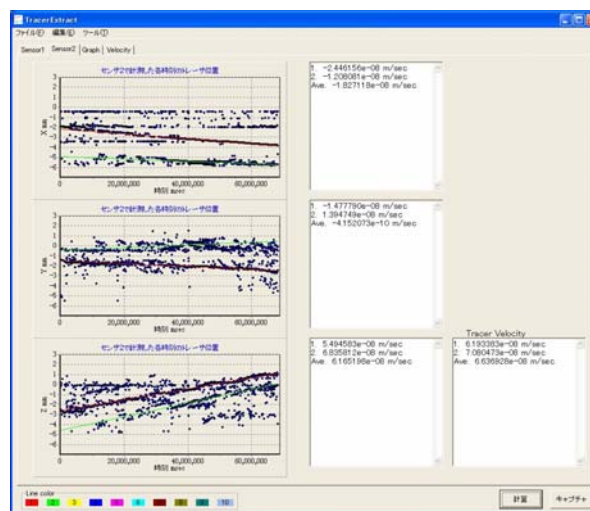


図4 解析結果例