

超音波反射・追尾方式流向流速計の計測データ 信頼性向上に関する検討

田中 真弓^{1*}・戸井田 克¹・竹延 千良²・西垣 誠³・大江 俊昭⁴

¹鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)

²大成基礎設計株式会社 技術研究所 (〒409-0112 山梨県上野原市上野原8154-59)

³岡山大学大学院 環境学研究科資源循環学専攻 (〒700-8530 岡山県岡山市津島中三丁目1-1)

⁴東海大学 工学部エネルギー工学科エネルギー工学専攻 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117)

*E-mail: tanakmay@kajima.com

深度数百m以深に建設される予定である、高レベル放射性廃棄物の地層処分場近傍の岩盤中における地下水の流動状況は、核種移行評価の際に重要である。筆者らは、深度1000m程度までの地下水流動を直接的に計測できる超音波反射・追尾方式流向流速計を開発した。本計測技術は、岩盤中に削孔された単一のボーリング孔内に投入された拡散の影響を受けない固体のトレーサが、地下水の流れの影響を受けたボーリング孔内水流に対応して動く軌跡を、マトリクス超音波センサで検出する。本稿では、データの信頼性を向上させるための手法として、波形データの平均化処理と、トレーサ反射波形抽出ソフトを整備したので、室内模擬地盤試験および原位置試験での計測結果にそれらを適用した効果について報告する。

Key Words : *radioactive waste, geological disposal, vector seepage device, solid particle tracer, ultrasonic wave*

1. はじめに

地層処分などの対象となるような地下深部においては、岩盤中の地下水流速が $10^{10} \sim 10^8 \text{ m/sec}$ 程度と予測されている¹⁾。しかし、既存のボーリング孔を利用した流向・流速計測機器は、 10^9 m/sec 以下の極低流速の計測には、必ずしも十分な精度・能力を有しているとはいえない。そこで、深度1000mの環境下で $10^{10} \sim 10^5 \text{ m/sec}$ 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水中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の検討を行っている²⁾。

これまでに、開発中の超音波反射・追尾方式流向流速計を用いて、深度550mのボーリング孔内での原位置試験³⁾や、地盤の透水係数や水位を制御した模擬地盤を用いた室内性能検証試験を実施した⁴⁾。しかし、これらの試験ではランダムな、あるいは、周期的な電氣的ノイズ（以下、ノイズと表記）が波形上に現れ、トレーサの移動軌跡を抽出する段階で、トレーサからの反射波かノイズによる偽像かを判定できず、本来トレーサ軌跡として抽出すべきデータがノイズによる偽像の中に隠れてしまうケースも見られた。そのため、ノイズを含んだ計測

データからでも、信頼性の高いトレーサ軌跡抽出を行う手法を検討し、室内で実施した模擬地盤を用いた試験結果に対して適用した例とその効果について報告する。また、計測結果の品質確認を目的に、取得した波形に遡り、トレーサからの反射波形を確認可能なツールを用いて、原位置試験で得られたトレーサからの反射波形の確認を行ったので、その結果も示す。

2. 計測システムの概要

開発中の流向・流速計測装置（図-1）では、岩盤中に削孔された単一のボーリング孔内に設けた計測区間に、拡散の影響を受けない固体のトレーサ⁵⁾を投入し、このトレーサがボーリング孔内水流に対応して動く軌跡をマトリクス超音波センサで検出する（図-1(a)）。さらに、数値解析を援用して孔内での計測結果からボーリング孔掘削やパッカー閉塞により発生する乱れの影響を受けていない地盤・岩盤中の流向・流速を評価する。

(1) 超音波センサ

本システムでは、超音波圧電素子を縦横に 4×4 個配

置した、1辺 1cm 程度の小型マトリクス超音波センサを使用している。図-2 はボーリング孔内計測部の構成であり、計測位置に 90 度直交するようにマトリクス超音波センサを 2 個配置している。二つのマトリクス超音波センサの交軸点（センサ面から 35 mm）を中心に 1cm³ を計測領域に設定し、センサから発信した波動の反射状況からトレーサを検出する。計測結果となる 3 次元の流向・流速は、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、図-2 に示すように水平面を X 軸-Z 軸に、鉛直方向を Y 軸とした座標系でトレーサの移動軌跡を解析して求めた。

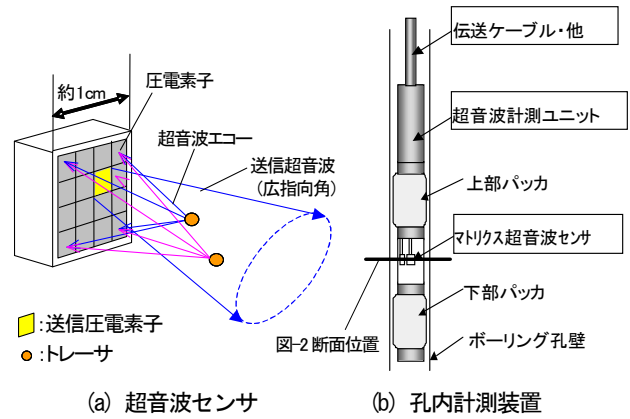


図-1 計測装置の概要

(2) 固体トレーサ

孔内水中に浮遊させる固体トレーサは、直径 150 μ m 程度の有機系材料で作製された球体である。また、地下水密度に応じて設計密度を変化させることができ、地下 1000m 程度の高圧下でも変形しない固体トレーサとするため、密度の小さい材料でできたコアと、剛性を保持できる材料でできたシェル（二重構造）としている。上記のコア・シェルの配分を変えることにより密度の異なる固体トレーサを作製し、それらを数種類混合させてトレーサ水を製作することにより、広範囲の密度分布を有したトレーサカクテルを準備することができる。このような幅広い密度分布を持たせたトレーサカクテルを用いることによって、計測区間内の孔内水密度が予想値と一致しない場合でも、分布内にあるいずれかの粒子が浮遊する可能性が高く、その粒子に着目すれば計測可能である。

3. 性能確認試験の概要および試験データの評価

(1) 室内模擬地盤試験の概要および試験データの評価

数値解析的検討⁶⁾により、ボーリング孔内で観測される流速は周辺地盤の流速の 2~3 倍になることが予想されている。そのため、この数値解析的検討による、周辺地盤とボーリング孔内水の流動状況の差異を実際に確認することを目的として、ボーリング孔を模擬したモデル地盤での試験を行った。図-3 は、製作した模擬地盤土槽であり、地盤部分には珪砂を充填し、中央には内径約 100mm の模擬ボーリング孔を設け、図-1 で示した計測装置を設置した。試験では、地盤の動水勾配（水位差）を変化させ、流速のオーダーを 10⁷ m/sec、10⁶ m/sec、10⁵ m/sec の 3 ケースを設定した。その結果、すべてのケースにおいて、計測区間内へのトレーサ投入によるボーリング孔内水の乱れが収まった状態での水平方向の流速は、周辺地盤に比べて 3 倍程度となっており、数値解析結果と整合的であった。ただし、この試験で得られた波形にはノイズも多く含まれており、トレーサ軌跡抽出に寄与

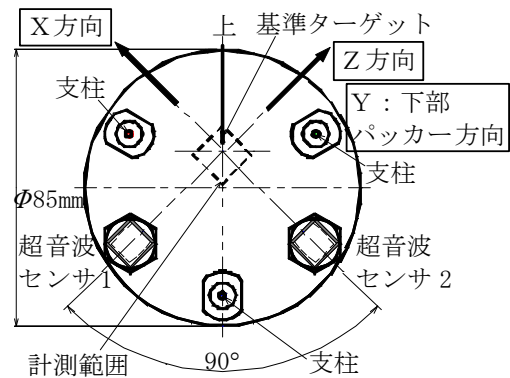


図-2 計測部概要（下部パッカー側から上部パッカー側を仰視）

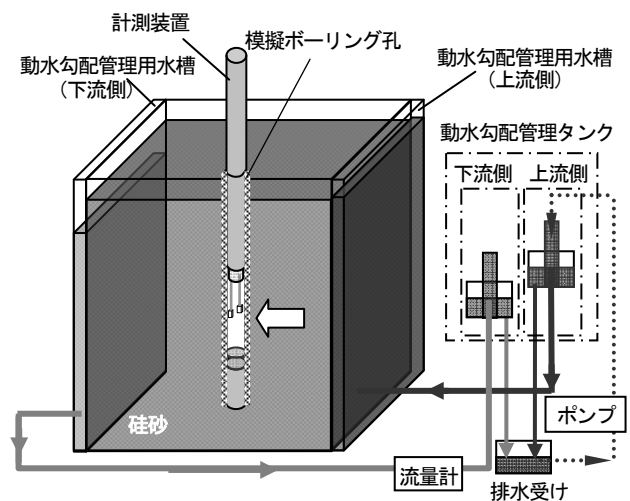


図-3 模擬地盤中での孔内流動状況計測試験概要

しないプロットも存在した。

(2) 原位置試験の概要および試験データの評価

本試験装置が適用できる地下環境としては、水圧 10MPa (102.04 kgf/cm²)、水温 50°C で、淡水~海水までの水質を目標としている。原位置試験は、上記に近い環境での計測性能を確認することを目的として、新第三紀堆積岩分布域である北海道幌延町の深度約 550m で溶存イオン濃度が高いボーリング孔中で実施した⁸⁾。その結果のうち、裸孔部の深度 506m に超音波センサを設置

して、ダブルパッカーで仕切られた約 60cm 区間での計測では、大局的な地下水流動の傾向と整合的な山（東）から海（西）への流れが捉えられた。また、ケーシング部の深度 490m に超音波センサを設置し、ダブルパッカーシステムによる計測を行った結果、約 6 日間にわたって非常に移動量の小さなトレーサからの反射が捉えられ、鉛直方向より高精度に計測可能な水平方向の一つの軸だけではあるが 2.7×10^{-10} m/sec の流速を計測した。ただし、本試験で得られた流向流速データのトレーサからの反射波形について、十分な確認まではできていない。

4. 計測データの信頼性向上ツールの概要

本装置で得られたデータは以下の手順で処理を行っている。

- ① マトリクス超音波センサの各素子で計測された波形データを開口合成によって重ね合わせ、各時刻における波形のピークとして検出されるトレーサの位置を、基準ターゲットを原点とした3次元座標上にプロットする。
- ② その後、ハフ変換アルゴリズムを用いたプログラムによって、自動的に同一トレーサ移動軌跡の抽出を行う⁷⁾。

ハフ変換とは、関連性を持った点の位置データから、これらのデータをつなぐ線分を抽出する手法である。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し、各軸および三つの軸での値を合成した流速を算出する（図-4）。しかし、上記の①の段階において、ノイズが多く含まれたデータでは、①②の作業がトレーサを対象にしたものなのか、ノイズを偽像として読み取ってしまっているのかの判別が難しい。

(1) 波形データの平均化処理

上記の課題を解決するために、上記①の前に、波形データを平均化処理することによって、ノイズの影響をできるだけ除くことが必要と考えた。すなわち、波形データの平均化処理を行うプログラムを作成し、①の前段階において、隣接する時間軸上の波形データを足し合わせ平均化する。これによって、ランダムにピーク位置の変わるノイズの影響は小さくなり、S/N比の良いデータだけが、開口合成後の3次元座標上にプロットされる。

(2) トレーサ反射波形の抽出

マトリクス超音波センサの各素子で計測された波形データ上に現れるピーク（振幅の大きい部分）が、本当にトレーサからの反射によるものなのかどうかは、個々の波形データに遡らなくては判断ができない。トレーサからの反射によるピークであれば、約 1cm^2 のセンサ面全体に同じように反射するのではなく、トレーサに近い素子ほど強いピークが観測されるはずである。また、センサ前方に存在する物体からの反射波であれば、超音波センサから発信した超音波の周波数（原位置試験では 5MHz）と同じ周波数のものが検出されると判断される。一方、計測システム内部で発生したノイズの場合には、どの素子の波形上にも同様の周期的なピークが存在すると考えられる。ピーク波形の周波数が超音波の発信周波数と異なっていれば、反射波ではなくノイズであるという判別が付きやすい。したがって、抽出されたトレーサの軌跡が、ノイズをトレーサと読み違えてしまっていないかどうかを判断する際に、上記のトレーサからの反射波のピークを記録波形上で直接確認することは重要である。

ただし、波形データ上に現れたピークを、トレーサからの反射によるものと判断できるのは、図-4のようにハフ変換アルゴリズムを用いたプログラムによってトレーサ軌跡を抽出した後である。したがって、トレーサ反射波形の抽出のために、まず、トレーサ軌跡の特定に寄与したプロットが得られた波形データの取得時刻に基づいて、トレーサからの反射波が記録されていると判断される素子の波形データを出力する。次に、該当する波形データ画像をメモリーから呼び出し、トレーサからの反射波位置を特定する。以上の手順でトレーサ軌跡として抽出された波形を簡便に確認することが可能なツールを整備した。

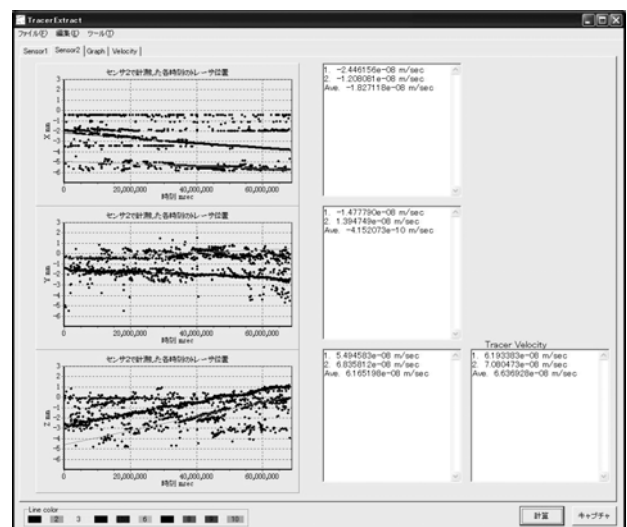


図-4 トレーサ軌跡抽出例

5. 信頼性向上ツールの適用結果と効果

(1) 波形データの平均化処理

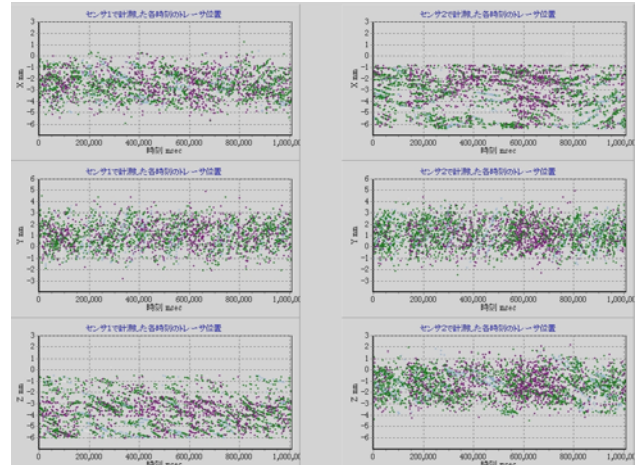
ノイズによって開口合成後のプロットが多数検出された模擬地盤試験の結果の一つを例にとり、波形データの平均化処理0回、3回、5回の結果を図-5に示す。図中のプロットの色の違いは反射強度レベルの違いを示しており、白>水色>緑>紫の順に反射強度が大きいことを示している。この図から、平均化処理を多く行った方が、トレーサの軌跡らしいデータ群のみが抽出される、ということが判る。また、このプロットのうち、経験的にトレーサからの最小の反射強度と考えられる反射強度以上のものを対象にトレーサ軌跡を抽出させた結果、平均化処理をしなかった場合と比較して、表-1のように検出数が2~3倍となった。さらに、平均化処理を0回、3回、5回行ったデータから、個々のトレーサ軌跡抽出によって算出された3次元方向の流速を図-6にXYZ流速として示した。また、抽出された複数の軌跡におけるXYZ流速から平均値を算出した結果を表-1に示すが、算出された3次元流速はいずれもほぼ同じオーダーであった。以上の結果から、波形データの平均化処理を、波形の開口合成処理の前に実施することで、ノイズの影響を小さくし、トレーサからの反射波をより確実に抽出することが可能になると判断される。

(2) トレーサ反射波形の抽出

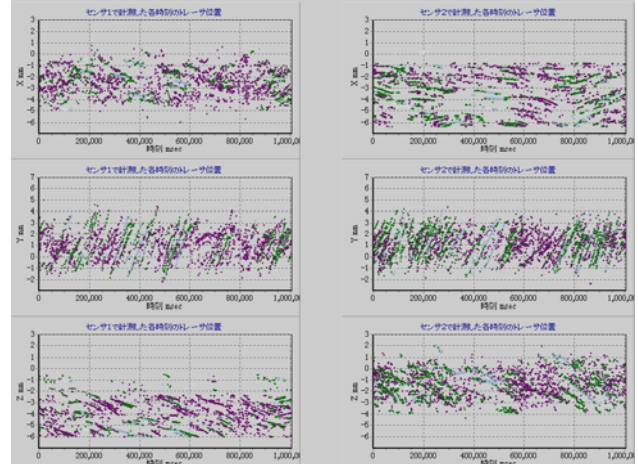
前述の原位置試験の各計測のうち、本開発装置の低流速計測性能の検証を目的としたダブルパッカーシステムによる深度490mのケーシング部での計測結果を対象に、トレーサ反射波形の抽出を行った例を図-7に示す。この計測結果例では、ハフ変換アルゴリズムによるトレーサ軌跡の算出に寄与したプロット数は212点であった。この中から5点を無作為に抽出し、トレーサ波形の位置を出力させた後、素子2、素子4、素子5、素子7、素子10、素子12、素子13(図-7)の同一素子で発受信した波形データを呼び出して、該当するピーク部分を楕円で囲った。センサ面からの距離を比較するため、基準ターゲットからの反射波も破線の楕円で示した。なお、超音波センサ最下段の素子15の波形も確認したが、センサ性能の低下が認められたので、今回の比較検討の材料としなかった。以下では、波形抽出の対象とした5点のうちの1点である183番目のプロットの波形を例として、上記の7つの素子の波形を比較・検討する。基準ターゲットからの反射波は全ての波形でほぼ同じ位置に認められた。トレーサからの反射波は、素子12で最も大きく、素子4でも比較的判別のつきやすいピークが認められた。また、この2つの素子で認められたトレーサからの反射波の波長は、基準ターゲットからの反射波の波長とほぼ同じ長さである

ことから、両者の周波数は同程度であることが判る。したがって、トレーサ軌跡として抽出したプロットは、トレーサからの反射波によるものであると考えてよいと判断される。

(1) 平均化処理 0回



(2) 平均化処理 3回



(3) 平均化処理 5回

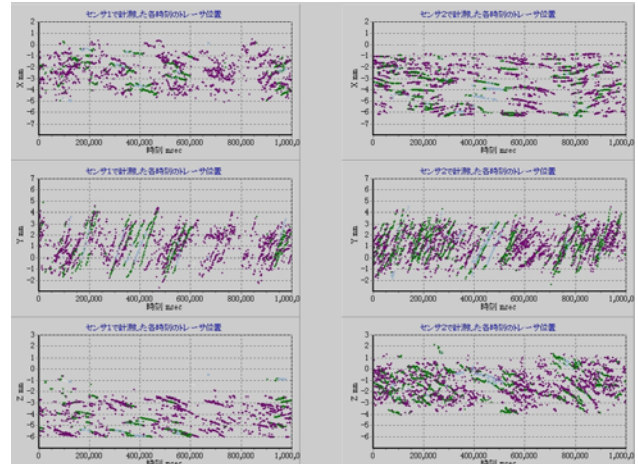


図-5 波形データの平均化処理実施例

表-1 平均化処理回数ごとのトレーサ軌跡抽出結果

| 平均化処理 | 0回 | 3回 | 5回 |
|--------------|--------|--------|--------|
| トレーサ軌跡検出数 | 40 | 82 | 96 |
| 平均流速 (m/sec) | 6.4E-5 | 5.7E-5 | 5.3E-5 |

6. おわりに

開発中の超音波反射・追尾方式流向流速計の計測データの信頼性を向上するため、(1) 波形データの平均化処理、(2) トレーサ反射波形の抽出 の2つのツールを整備し、その結果、以下の知見が得られた。

(1) 波形データの平均化処理は、開口合成に供するデータの前処理として実施する。これにより、人工あるいは自然由来のノイズを捨ってしまう条件の場合にも、波形データの平均化処理を行った方が、波形上のピークのプロットをトレーサからの反射によるものであると評価する際の信頼性が向上した。

(2) トレーサ反射波形の抽出ツールを整備したことにより、トレーサ軌跡として抽出するのに寄与した開口合成データのプロットが、正しくトレーサからの反射を反映したものであるかを波形上で直接確認することができるようになった。

以上の2つの信頼性向上のためのツールは、計測条件や計測データへのノイズ混入状況に合わせて効果的に適用し、計測データの品質の向上に貢献させていきたい。

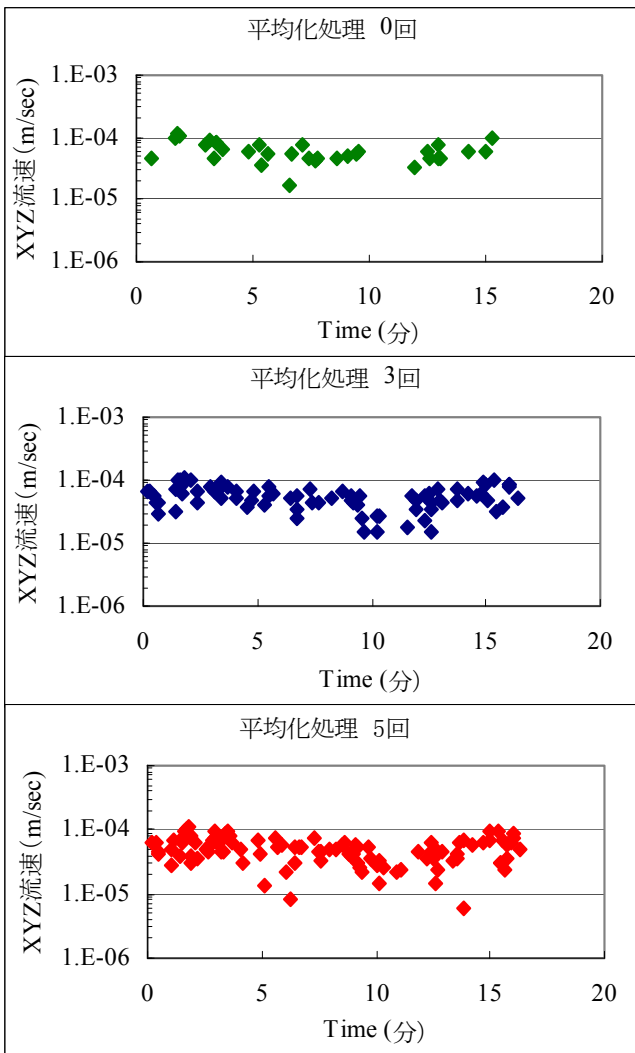
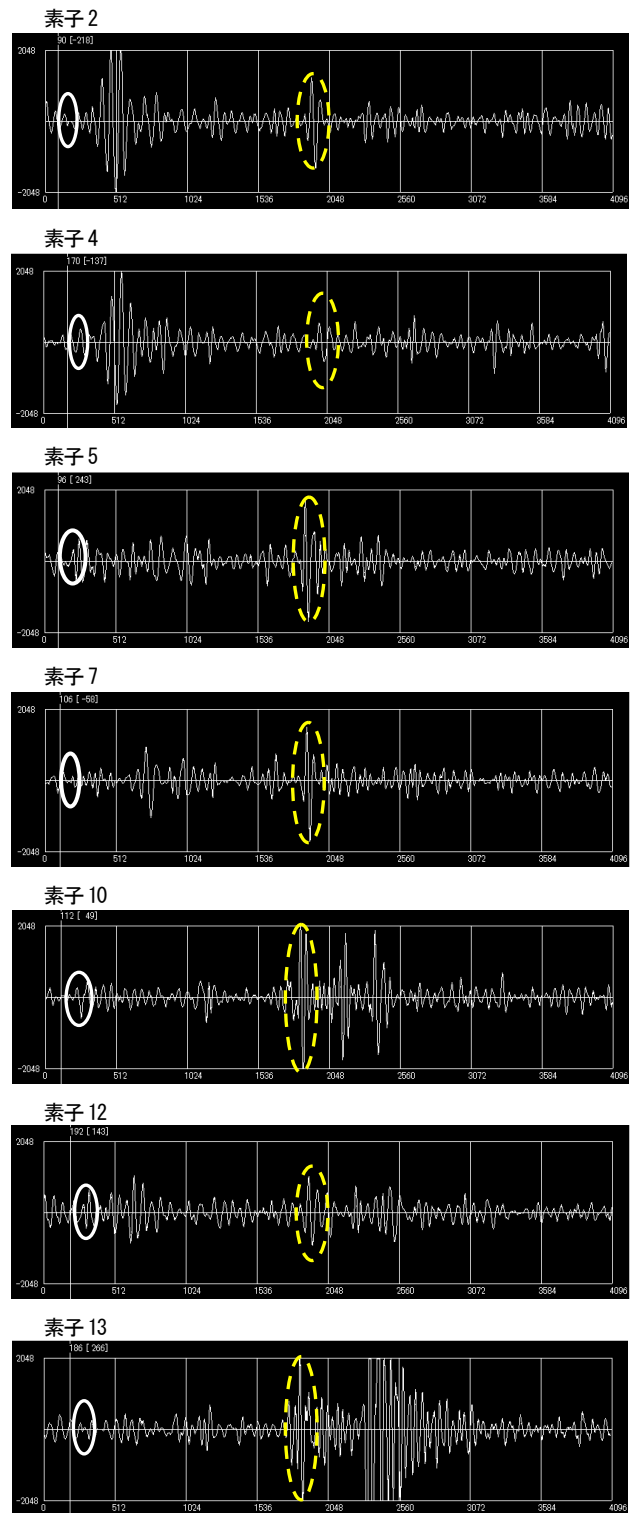


図-6 平均化処理後の流速データ



(a) トレーサと基準ターゲットからの反射波形
楕円：トレーサ、破線の楕円：基準ターゲット

| | | | |
|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 5 | 6 | 7 | 8 |
| 9 | 10 | 11 | 12 |
| 13 | 14 | 15 | 16 |

(b) マトリクス超音波センサ裏面からみた各素子の配置
(網掛けは、波形データを抽出した素子)

図-7 トレーサ波形抽出例

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊 1, サイクル機構技術資料, JNC TN1410 99-021, 1999.
- 2) 戸井田克, 田中真弓, 長井 敏, 鈴木健彦, 佐藤光吉, 小舞正文, 大江俊昭, 西垣 誠：超音波反射エコーを利用した孔内地下水 3次元流向・流速計測手法について, 地下水学会誌, 49(4), pp.291-307, 2007.
- 3) 日本原子力研究開発機構 幌延地層研究センター：幌延深地層研究計画 平成 17 年度調査研究成果報告, pp.34-35, 2006.
- 4) 戸井田克, 田中真弓, 瀬尾昭治, 中嶋誠門, 武政祐一, 太田雅子, 竹延千良, 平田洋一：超音波反射・追尾方式流向流速計の性能検証 ー土槽実験による孔内流速評価ー, 日本地下水学会 2007 年秋季講演会, 58, 2007.
- 5) 齋藤宏則, 大江俊昭, 新屋敷直木, 八木原晋, 海野裕哉, 戸井田克, 田中真弓, 佐藤光吉, 鈴木健彦, 長井 敏, 西垣 誠：超音波反射エコーを用いた地下水 3次元流向・流速測定のための安定浮遊固体トレーサの開発, 原子力バックエンド研究, 13(1), pp.23-30, 2006.
- 6) 戸井田克, 田中真弓, 杉本映湖, 菱谷智幸, 西垣 誠, 大江俊昭, 佐藤光吉, 小舞正文：孔内 3次元流向・流速測定における計測区間内の地下水流動状況評価について, 地下水学会誌, 49(4), pp.309-326, 2007.
- 7) 戸井田克, 田中真弓, 瀬尾昭治, 中嶋誠門, 武政祐一, 太田雅子, 竹延千良, 平田洋一：超音波反射・追尾方式流向流速計の性能検証 ー土槽実験による孔内流速評価ー, 日本地下水学会秋季講演会講演要旨集, pp.252-257, 2007.
- 8) 西垣 誠, 戸井田克, 田中真弓, 大江俊昭, 佐藤光吉：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 3.流向流速計測結果について, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, C05-027, pp.259-260, 2006.

A STUDY ON IMPROVEMENT OF RELIABILITY FOR MEASUREMENT DATA BY FLOW VELOCITY MEASUREMENT SYSTEM USING ULTRASONIC WAVE

Mayumi TANAKA, Masaru TOIDA, Kazuyoshi TAKENOBU, Makoto NISHIGAKI and Toshiaki OHE

Groundwater flow in rock matrix around geological disposal facility is of concern for evaluation of nuclide migration. The authors have developed a flow velocity measurement technique using ultrasonic wave of which. System is enable to measure directly very low flow of groundwater under the depth about G.L.-1000 m in a single borehole. In this newly developed technique, the movements of solid particle tracers are detecting the reflection echo but noise reaction is a key issue for more precise analysis. This paper describes two procedure: one is for averaging of ultrasonic wave data and the other extracting of reflecting wave from the tracer. By applying the procedures, more reliable measurement can be expected.