

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

齋藤宏則*¹ 大江俊昭*² 新屋敷直木*³ 八木原晋*³ 海野裕哉*⁴ 戸井田克*⁵ 田中真弓*⁵
佐藤光吉*⁶ 鈴木健彦*⁶ 長井敏*⁶ 西垣誠*⁷

放射性廃棄物処分の長期的安全性を評価する上で、地下水の3次元流向・流速は不可欠な情報である。しかし、深部地下で想定される流速は現存技術の測定下限を下回る可能性があり、実際の処分場性能を過小評価する事が懸念される。そこで、筆者らは地下水に浮遊する固体トレーサの移動軌跡を超音波反射波で追跡することによって、これまで測定出来なかった極低流速を含む 10^{-10} ~ 10^{-5} m/sの範囲の流向・流速の測定を可能とする計測方法を提案している。しかし、この手法を実環境に適用する上ではターゲットとなる固体トレーサが最低でも2日間浮遊することが必要条件となるので、粒子の沈降やブラウン運動などの見かけ上の影響を排除し、安定な浮遊を確保するための具体的なトレーサ作成方法を検討した。その結果、密度調整が可能な二重構造の有機固体トレーサを開発し、500m深度のボーリング孔を用いた試験によって目標とする地下水流速を実際に計測することに成功した。

Keywords : 地下水, 3次元流向・流速, 固体トレーサ, 超音波マトリクスセンサ

The flow rate of underground-water in deep geologic environment is a key parameter to evaluate the performance of the repository for high-level radioactive waste disposal. The preliminary estimation however suggested the flow rate is much lower than the detection limit using conventional measurement techniques. This situation may underestimate the repository function because of the lack of the actual measured data. Thus the authors developed a new technique for the three-dimensional flow measurement by using the ultrasonic echo reflected from solid particle tracers suspended in groundwater. The moving track is traced by the matrix arrayed sensor and this technique enables us to measure the wide range of flow rates of 10^{-10} ~ 10^{-5} m/s. The preliminary experiments hence suggested the tracer must be stably suspended for a period not shorter than two days. To realize this requirement, the disturbance of sedimentation due to density difference between the solid particle and groundwater and Brownian motion of the particle must be estimated and eliminated. We designed and fabricated the solid particle tracer having a core covered with a shell of different density and the resulting density is easily adjustable. The stability of the tracer was examined by in-situ experiment carried out in 500m depth bore hole and successfully measured the flow rates of 10^{-10} ~ 10^{-5} m/s.

Keywords: underground water, flow velocity, solid particle tracer, ultrasonic matrix sensor

1 はじめに

放射性廃棄物処分における環境影響評価では、含有される放射性物質が処分施設から漏洩した場合を想定し、地下水との接触によって浸出後、地下水中や河川中をどのように輸送されて人間生活圏を含む生態系に到達するのかを評価する必要がある。そのため、処分場の長期安全性確保の観点からは地下水の流向・流速を測定することは不可欠な事と考えられる。我が国の代表的な検討結果[1]からは地下深部における地下水流速は 10^{-9} ~ 10^{-6} m/sの範

囲にあると想定されるものの、既存技術[2-4]では 10^{-9} m/sのような極低流速を測定することができないのが現状である。一方、国内外における処分の影響評価の感度解析によると[5,6]、いずれも地下水流速と被ばく線量とは正の相関があり、流速の設定値が評価結果に多大な影響をもたらすことがわかる。しかし、処分地における地下水流速が極めて低い場合であっても、その値を測定することができなければ天然バリアの性能を過小評価せざるを得ない事態も想定される。また、地下水の流向を正確に求めることは既存の単孔法では困難であることが知られており[7]、地下水流動解析によって補完的に推測されるケースが殆どであるため、解析結果を実証する手段が欠如したままでは、解析結果の信頼性も揺らぎかねない。

このような背景から、著者らは極低流速の地下水流速とその流向を単一孔を用いて測定可能な方法について検討を進めており[8,9]、地下水中に浮遊させた固体トレーサの移動軌跡を超音波反射波によって追尾する方法を提案し、基本的な測定原理とその成立性について確認済みである。現在、我が国は処分場を選定する第一段階の概要調査地区選定段階[10]にあり、その後、概要調査、精密調査と段階を経るにつれてボーリング孔を用いたより詳細な水理調査が行なわれるもの[11]と予想される。そして本手法はこれまでの計測下限を数桁下回る画期的な地下水流速計測手段を与えるものと考えられる。

本研究は、この方法を原位置計測に適用した場合に、長期間地下水に浮遊可能な固体トレーサの作成につい

Stability of solid particle tracer suspended in groundwater as a marker for determining three dimensional flow using ultrasonic reflection echo by Hironori Saito*¹, Toshiaki Ohe*² (ohe@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp), Naoki Shinyashiki*³, Shin Yagihara*³, Yuya Umino*⁴, Masaru Toida*⁵, Mayumi Tanaka*⁵, Mitsuyoshi Sato*⁶, Takehiko Suzuki*⁶, Satoshi Nagai*⁶, Makoto Nishigaki*⁷

*1 東海大学工学研究科応用理学専攻(現三菱マテリアル株)
Course of Applied Science Graduate School of Engineering, Tokai University (currently Mitsubishi Materials Co.Ld)

*2 東海大学工学部
School of Engineering, Tokai University

*3 東海大学理学部
School of Science, Tokai University

*4 東海大学理学研究科物理学専攻
Course of Physics, Graduate School of Science, Tokai University
〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117

*5 鹿島建設機技術研究所
Kajima Corporation, Kajima Technical Research Institute
〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1

*6 株式会社
Toshiba
〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8

*7 岡山大学環境理工学部
Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University
〒700-8530 岡山県岡山市津島中 3-1-1

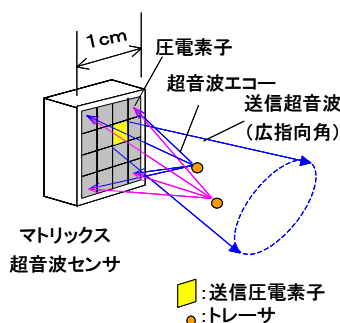


Fig.1 Schematic representation of ultrasonic matrix sensor and transmission - reception of echo reflected from particle tracers

て検討し、実際のボーリング孔を用いた試験により適用性を確認した結果を取りまとめたものである。

2 測定原理

本研究の地下水流向・流速システムで用いた測定原理は、医療分野でも使われる超音波エコーを応用した超音波マトリクスセンサ技術の応用である。検出部となるセンサは Fig. 1 にあるように約 1cm 角で、その中に縦 4 個、横 4 個の 16 個の圧電素子が平面状に配置されている。測定時には地下水に浮遊可能な固体トレーサを投入し、地下水と共に移行する固体トレーサの挙動をこのセンサで検知することでトレーサ位置の測定を行う。測定概要は以下のとおりである。

①1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固体トレーサに反射された超音波のエコーを 16 個全ての圧電素子で受信する。

③超音波を発信する圧電素子を切り替えて①、②を繰り返す。

④得られた信号を開口合成処理して、固体トレーサの位置を決定する。

実際の測定システムでは超音波マトリクスセンサを直交するように 2 つ配置する事でトレーサの 3 次元流向測定も可能にしている。

以上の測定手順を考慮すると、被写体となる固体トレーサが水中で安定浮遊することが、本測定システムが成立する必須の条件となる。

極低速域の流速を測定する上で問題になるのがトレーサの熱振動によるブラウン運動である。流速が遅くなると、地下水の移流速度と粒子の熱振動による見かけの移動速度の区別がつかなくなってしまう。

移流・分散方程式[12]の解析から一例を示すと、Fig.2 のように、流速 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ m/s 程度で移流による移動のみを分離することが困難となり、事実上の測定限界に達することがわかる。このことが、イオンや染料などの拡散型トレーサを用いる従来法の限界となる。固体トレーサも同様にブラウン運動するが、元々ランダムな運動であるから地下

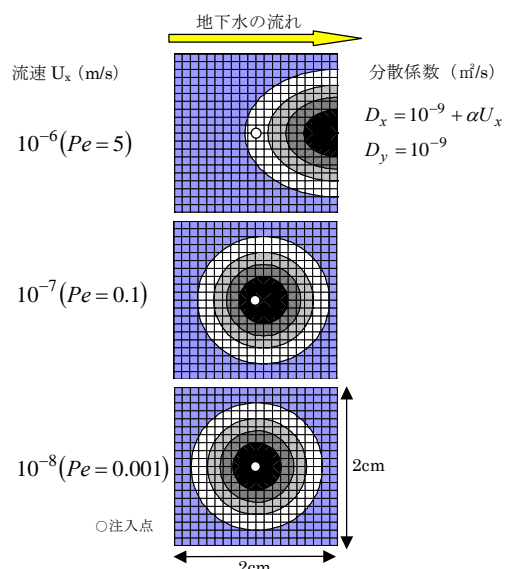


Fig.2 Two-dimensional solute distribution after 10000 seconds from discharge calculated by the convection-dispersion equation (dispersion length α is assumed 1/10 of migration distance)

水流れとは逆方向にも移動するので、複数のトレーサを追跡しながら多数回の測定を行い、その平均をとることでブラウン運動による見かけの移動成分はノイズとしてキャンセルされ、移流成分のみが残る。これが拡散型トレーサとは異なる本計測方法の最大の特徴であるといえる。

3 トレーサ径

本計測システムのもつ波動の AD 変換にかかわる計測精度は $7.5 \mu\text{m}$ であり、余裕をもって倍の $15 \mu\text{m}$ を移動距離の計測下限とすると、これは目標とする 10^{-10} m/s の流速下では 1.7 日の移動距離に相当する。このことはトレーサが 2 日間安定に浮遊することが本計測システムの成立上の必要条件となることを示している。

粒子が流体中に安定浮遊する上では、トレーサ粒子と流体との密度差による沈降（浮遊）および熱振動によるブラウン運動が問題になる。前者は(1)式の Stokes 式[13]から、後者はランジュバン方程式から得られる平均自乗変位[14]を示す式から(2)式によって、各々を要因とする見かけの移動速度を見積もることができる。

$$U_{sed} = g(\rho_p - \rho) \frac{d_p^2}{18\mu} \quad (1)$$

ただし、 U_{sed} : 沈降（浮遊）速度 (m/s)

g : 重力加速度 (m/s²)

ρ_p : 粒子密度 (kg/m³)

ρ : 流体密度 (kg/m³)

d_p : 粒径 (m)

μ : 流体の動粘性係数 (mPa · s)

$$U_{Brow} = \sqrt{\langle |x(t)|^2 \rangle} / t \quad (2)$$

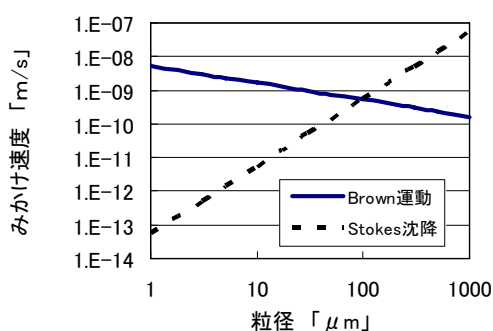


Fig.3 Particle sedimentation rate and apparent velocity due to Brownian motion as functions of particle diameter

ただし, U_{Brow} : みかけのブラウン運動速度 (m/s)

$$\langle |x(t)|^2 \rangle : \text{平均自乗変位 (m}^2\text{)} = \frac{6k_B T}{m\gamma^2} (\gamma t + e^{-\gamma t} - 1)$$

k_B : ボルツマン定数 (J/K)

T : 絶対温度 (K)

m : 粒子質量 (kg)

t : 経過時間 (s)

μ : 流体の動粘性係数 (kg/m s)

γ : 摩擦係数 $= 6\pi\mu d_p / m$

簡単のために水温 20°Cにおける純水の密度および粘度を用い, 計測時間を2日間, 流体とトレーサの密度差を固有振動周期測定方式の密度計(京都電子工業株DA-130N型)の感度である 10^{-4} g/cm^3 として計算すると Fig.3 のようになる. この図は粒径をパラメータとして見かけの移動速度を示したが, 粒径に対して沈降とブラウン運動の両者が相反する効果を示し, 図中の2つの曲線の交点である粒径約 $100 \mu\text{m}$ よりも大きな粒径はブラウン運動の観点からは有利であるが, 逆に沈降速度は大きくなって不利となる.

一方, 本システムにおける超音波の発信周波数は 5 MHz であり, 20°C, 1atm での水中の音速 1483 m/s [15]から計算すると波長 λ は $300 \mu\text{m}$ となる. 超音波探傷技術では, 球形傷の半径を R としたとき, Stenzel の反射係数[16] ($2\pi/\lambda$) $\times R$ の値が 0.7 より小さくなると超音波の反射率が急激に減衰することが知られており, このときの臨界直径が $66 \mu\text{m}$ であることから, 本検討では, 超音波の反射を確実にするために, 図中の交点の粒径よりもやや大きい $150 \mu\text{m}$ をトレーサ直径とした. それにより, 2日間で計測精度 $15 \mu\text{m}$ 以内の沈降速度に抑えるには, 流体とトレーサの密度差を $5 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ 程度で一致させるという厳しい条件が課せられることとなる.

4 安定浮遊固体トレーサの開発

本研究の実施上最も重要な開発項目は, 超音波マトリクスセンサの被写体となる固体トレーサの密度を地下水密度に精密に合致させ安定浮遊を確保する事にある. そのため, 以下の検討を行った.

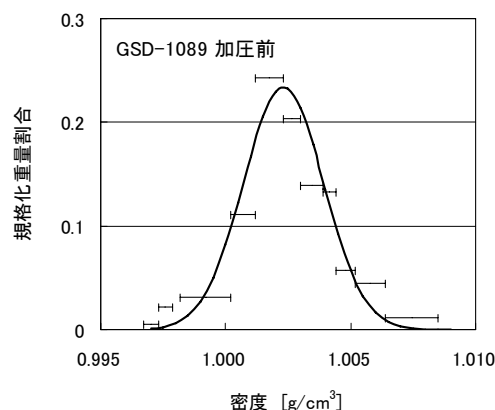


Fig.4 Density distribution of solid particle tracer (GSD-1089H before addition of pressure)

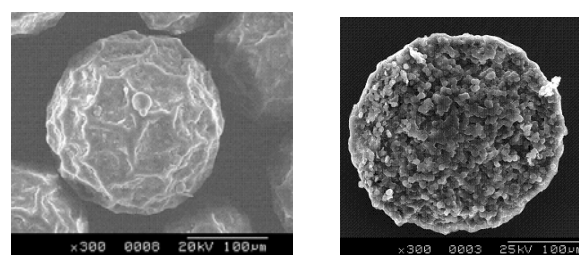


Fig.5 Secondary electron microscope images of a tracer (GSD-104H)
left:overview, right:cross-section cut by knife

4.1 密度測定法

一般に密度の測定に用いられるアルキメデス法は測定が簡便であるが, 固体の浮遊や沈降の状態を区別できないため, 水中に安定浮遊する成分だけのトレーサ密度を測定することができない. そこで, 次のように密度分級を行った. まず, 蒸留水中に固体トレーサを分散させ, その中に濃度既知の濃塩化ナトリウム水溶液を微量量滴下することで濃度を段階ごとに徐々に上げていき, その都度浮上するトレーサを塩化ナトリウム溶液と共に回収し, 重量と溶液密度を測定した. また, 純水よりも軽い密度は, 希薄エタノール水溶液を用いて同様の測定を行なった. そして, この2つの値から密度分布図を作成した. 作成した密度分布は正規分布を示すことがわかった. (Fig.4 参照)

4.2 密度可変固体トレーサ

地下水は淡水や海水などの様々な起源を持つため, その密度にも大きな幅が見込まれる. そこで, どのような地下水密度にも対応できるように, トレーサは低密度のイソプレノゴムを高密度のポリスチレンで被覆した二重構造の球形粒子とし, 密度の小さいコア部と密度の大きいシェル部の配合比と, それぞれの部位の材料組成を変化させる事で幅広い密度分布をカバーできるトレーサを懸濁重合法により作成した. Table 1 には試作したトレーサの組成の一覧を示す.

Table1 Chemical compositions of density adjustable tracers

トレーサ名	原料密度	スチレン(%)	イソブレン(%)	DVB(%)	2EHA(%)	2HEMA(%)	設計密度 (g/cm ³)	実測密度 (g/cm ³)
GSD-104H	コア	22.5	7.5	5	15	0	1.0198	1.0211
	シェル	17	0	6	24	3		
GSD-1086H	コア	5	2.7	3	59.3	0	1.0179	1.0171
	シェル	20	0	7	0	3		
GSD-1087H	コア	25	17	3	25	0	1.0130	1.0141
	シェル	20	0	7	0	3		
GSD-1088H	コア	1	12	3	54	0	1.0079	1.0077
	シェル	20	0	7	0	3		
GSD-1089H	コア	15	7	3	45	0	1.0180	1.0151
	シェル	20	0	7	0	3		

表中の設計密度とは原材料の組成からの計算値、実測密度は密度分布曲線の平均値であり両者はほぼ一致する。また、製作過程においてスチレンの配合比を多くすると表面に「しわ」のようなものが生成される事、イソブレン配合を少なくするほど内部空隙体積が少なくなる傾向がある事が判った。(Fig. 7 参照) なお、表面の「しわ」は計測上支障を生じないことは確認した。また、高感度ガスクロマトグラフにより[17]地下水への原料物質の溶出が殆ど無いことも確認した。

4.3 凝集防止

試作段階においてトレーサ同士が水中で凝集し粒径変化を起こすことが観測された。そこでトレーサを均一分散させるために、トレーサ表面に2-ヒドロキシ・エチルメタクリレートを導入する事で水和型に加工した。この処理によってトレーサ表面にOH基が付加され、水中で水酸基が解離して負電荷を帯びる事になる。その結果、トレーサ同士に静電反発力が生じて、水中での分散性を確保できるようにした。負電荷が実際に発現したことは、トレーサのゼータ電位を顕微鏡電気泳動法[18]および流動電位法[19]によって測定して確認した。

4.4 被圧状態での密度変化

深度 500 m の地下水中にはトレーサは静水圧により約 5 MPa の被圧状態になるので密度変化を起こす可能性がある。Fig.5 にあるように、トレーサをカッターナイフで切断して断面を走査型電子顕微鏡によって観察すると空隙の存在が確認できることから、被圧下で密度変化を起こす可能性として、①体積収縮、②空隙への水の浸透、の2つの原因が考えられる。

4.4.1 体積収縮による密度変化

加圧装置を用いて、2, 5, 10 MPa の各圧力下でトレーサを 24 時間保持し、除圧後にそれぞれの密度測定を行った。Fig.6 に示すように、加圧によって密度は変化するものの 2 MPa 以上の圧力では密度変化がない事がわかった。また、Fig.7 の断面画像に示すように、空隙体積の多いトレーサほど密度変化率が大きいことも判った。

4.4.2 水浸透による密度変化

インピーダンスアナライザ(Agilent4294A)を用いてトレーサの誘電率測定[20]を行い、浸透水の有無の確認を行っ

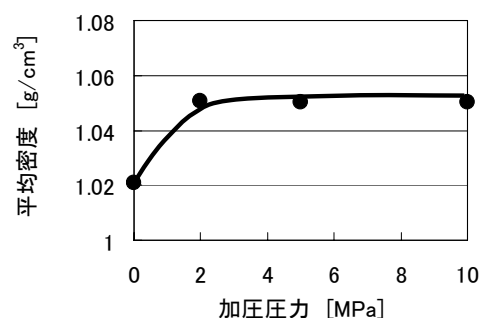


Fig.6 Density change of a tracer (GSD-104H) after addition of pressure

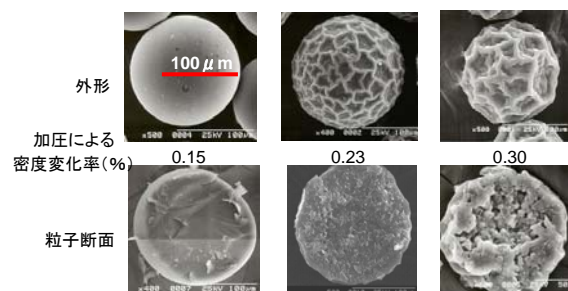


Fig.7 Cross-sectional view of several tracers with showing the density change(%) (left: GSD-1088H, middle: GSD-1089H, right: GSD-1086H)

た。トレーサそのものの複素誘電率が 1.3 程度であるのに対し水の複素誘電率が約 80 であるので、トレーサ内に僅かな水分が侵入しても、複素誘電率は大幅に増加すると考えられる。

トレーサは生成後に乾燥工程があるので、付着気泡による浮上を避けるため事前に水中で減圧脱気処理される。このことからトレーサ空隙に水が入る経路は、減圧脱気する際に加圧水処理する際の二つの過程が考えられる。

(1) 減圧脱気での水浸入

Fig.8 (左図) に示すように、全く誘電率の変化は確認できなかった。このことから脱気処理による水の浸透は無視してよいと考えられる。

(2) 加圧水中での水浸入

Fig.8 (右図) にあるように加圧前後で 0.4 程度の誘電率の上昇が観測された。これは簡単な体積比計算から全体積

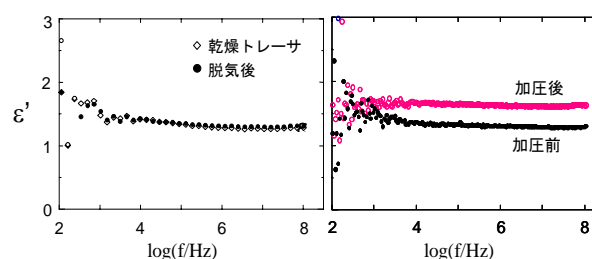


Fig.8 Dielectric constant of tracers measured by impedance analyzer

中の0.5%に水が浸透した可能性があることを示唆しており、トレーサ密度の0.01%程度の変化量に当たる。ただし、Fig.6の変化からみると無視できる程度の密度変化に過ぎない。よって、脱気前後および加圧前後において浸透する水によって顕著な密度変化を起こすことは無いと考えられ、密度変化の原因は体積収縮であることがわかった。さらに、加圧したトレーサは自然圧力下に戻しても密度が元に戻らないことから、加圧により塑性変形していると考えられる。

5 原位置試験への適用

実際に作成したトレーサを地下水中に投入して流向・流速測定を行った。測定は(独)日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センター内のボーリング孔(計測深度約500m)を利用して行った。

5.1 密度推算式

密度の文献値[21, 22]を基に、温度 T (°C)、塩分濃度 S (%), 深度 L (m) の3つのパラメータに関する密度の推算式を、重回帰分析によって次のように得た。

$$\rho = -2.382 \times 10^{-4} T + 7.55525 \times 10^{-4} S + 4.4141 \times 10^{-6} L + 1.002863875 \quad (3)$$

海水(塩分濃度35%)および純水の圧縮係数は小さく、圧力に対する密度の感度は塩分濃度や温度に対するそれよりもはるかに小さいため、実際上は深度500m程度の静水圧下ではほとんど影響がない。ここでは、純水に対する圧力依存性がどの塩分濃度に対しても同じに成り立つと仮定した。そして、静水圧を深度に換算して深度をパラメータとした。

5.2 相関式による密度の推測

トレーサを作成する際の密度範囲を設定するために、あらかじめ試験区間孔内で採取した地下水の組成を定量分析した。地下水の採水は封圧採水装置[23]を用いて行った。採取水量は500cm³で、採取試料には超音波の反射に障害となるような浮遊物は観察されず、採取後ろ過を行わずに実験室に持ち帰った。その後、炭酸イオン、重炭酸イオンおよび塩素イオン等のイオン成分をイオンクロマトグラフにより、また、ナトリウム等の溶存金属成分を原子吸光度計により定量し、塩分濃度を各採水深度において求めた。また、温度検層により水温も取得した。この水質データ(温度、塩分濃度、深度)を上記の密度相関式に代入して各深度の地下水密度を推測した。Fig.9に結果を示すが、深度が深くなるほど塩分が上昇するため密度が大きくなる傾向があるが、地点ごとの地下水組成の変動が大きく、密度にも変動がでることが予測される。この変動幅を踏まえて目標に見合ったトレーサを用意しなければならない。

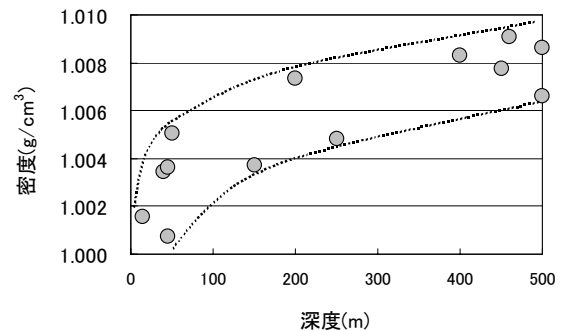


Fig.9 Water densities in measuring zones speculated by Eq.(3)

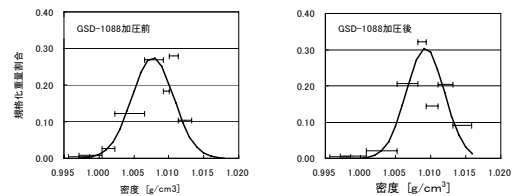


Fig.10 Density distributions before and after the addition of pressure (GSD-1088H left : before, right : after)

5.3 加圧による密度変化

今回の原位置計測では、トレーサの受ける圧力は5MPa程度と予想されるため、トレーサを事前に静水中で5MPaに加圧し、塑性変形させることとした。加圧前後の密度分布の例をFig.10に示す。いずれも正規分布型であることがわかる。

5.4 原位置用トレーサの調査

Fig.8に示す密度はあくまでも重回帰式からの推定値であり、単一のトレーサのもつ密度の分布でその地点の実密度を包含できる保証はない。そこで、複数のトレーサのブレンドにより、ある密度範囲にわたってフラットな重量分布を持たせたトレーサを作成した。

調査後の密度分布の例をFig.11に示す。同図中の調査ト

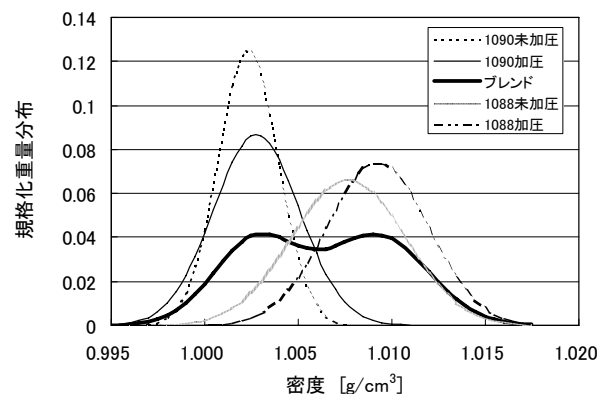


Fig.11 Density distribution of mixed tracer (mixed with weight ratio GDS-1088H:GDS-1090H=0.55 : 0.45)

レーサの分布は、Fig.9にある深度 250m 以深の密度 (1.004 ~ 1.009 g/cm³) に合致する範囲に存在することが判る。このように、分布の異なる複数のトレーサをブレンドすることでフラットな重量分布を持つトレーサが調整できる。

6 原位置地下水流速の測定結果

6.1 流向・流速測定

本研究で用いた流向・流速計の概要を Fig.12 に示す。ダブルパッカーに挟まれた領域に、約 1cm 角の大きさの超音波マトリクスセンサが 2 個、互いに直交するよう配置されている。計測対象は、この 2 つのセンサの真ん中に存在する 1 cm³ の領域である。この装置を用いて深度 506m で流速を測定した結果を Fig.13 に示す。これは裸孔部での計測結果であり、トレーサ投入後 6 時間程度は投入時の圧力変動で流速に乱れがあるが、その後数値は安定する。そして、壁面から斜め下方に向かう下向きの流れがあり、その流速は凡そ 10⁻⁶ ~ 10⁻⁵ m/s の範囲にあることがわかった。なお、この計測部位の孔壁には亀裂は存在しないが、より深部の孔壁に亀裂が存在し、そこからの逸水が確認されているので、これが下向き流速の発生要因と判断される。

Fig.14 は計測区間内、及び、その上下での間隙水圧の計測結果であり、深部での計測に前述の逸水亀裂の影響が大きく表われ、計測区間よりも、その下部の方が間隙水圧が低くなる傾向を示している。このことから、地下深部の計測

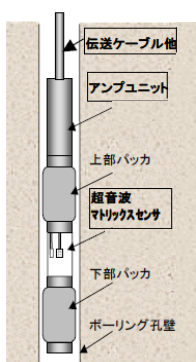


Fig.12 Schematic view of measurement probe

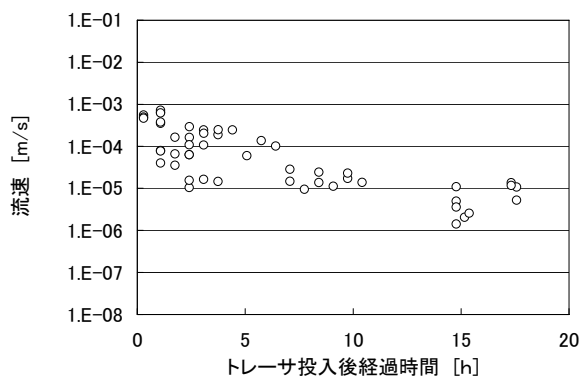


Fig.13 Flow velocity as a function of time after tracer injection

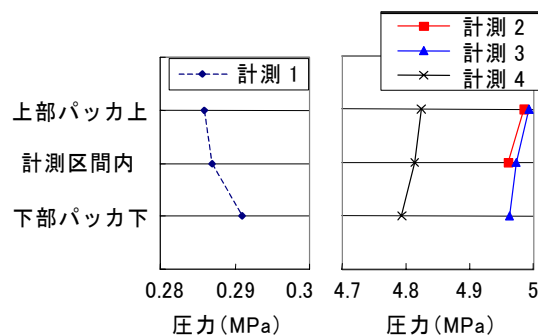


Fig.14 Pore water pressures in different zones

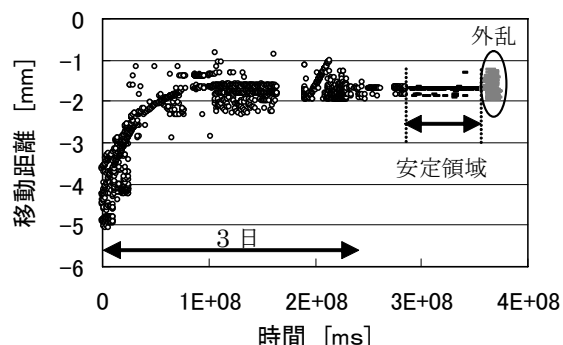


Fig.15 Extremely low flow velocity measured in casing zone

では計測区間内で鉛直下向きの流れが発生すると予想される。なお、計測 1 は深度 30m ケーシング部でのダブルパッカシステムでの計測、計測 2 は深度 506m 裸孔部でのシングルパッカ計測、計測 3, 4 はそれぞれ深度 506m 裸孔部、490m ケーシング部での計測である。

Fig.15 はボーリング孔の壁面崩落を防ぐために耐食性に優れた鋼製のケーシングを設置した部位での計測結果であり、ケーシングが壁面を蓋うために極めて低い流速が想定される部分である。図から判るように流速が安定するには 3 日程度を要したが、安定領域の傾きから算定すると 2.7×10^{-10} m/s の極低流速が計測できた。安定に至るまでの期間は、トレーサ投入時の圧力変動が元の状態に回復するための時間と考えられる。また、温度変動に伴うと思われる外乱が発生したため、試験期間の制約もあって、それ以降の計測を断念せざるを得なかった。従って、今後、圧力や温度の変動を極力抑えるための更なる改良が必要である。

6.2 トレーサの浮遊状況

全ての計測が終了した時点でトレーサの浮遊状態を確認するため、トレーサ投入約 10 日経過後に計測地点の孔内地下水を採取し、実験室に輸送後 (トレーサ採取 2 日後) に定性濾紙でろ過し、濾紙上の粒子数を光学顕微鏡で計数した。ろ過と計数を 3 回繰り返して行った結果、1cm³ あたりに約 7.1 ± 0.2 個のトレーサが浮遊していることが確認された。これは、約 700 個/cm³ の濃度で投入したトレーサが均一に計測区間内空間 (約 0.06m³) に分散したと仮

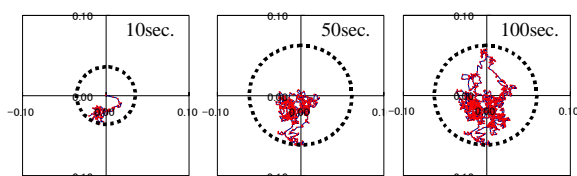


Fig.16 Simulated moving track by Brownian motion (27°C, in 5%NaCl solution, distance shown in μm unit)

定すると、投入量の約 1/3 のトレーサが 1 週間程度安定に浮遊していたことになる。また、超音波計測上互いに干渉しない浮遊密度とした目標値の 10 個/cm³にごく近い良好な浮遊状態であり、トレーサと地下水密度のズレによる沈降（浮遊）を回避する上で、複数のトレーサのブレンドにより広い密度範囲にフラットな分布をもつトレーサを調整する方法は非常に有効であることがわかった。

6.3 ブラウン運動の影響

Fig.3 にあるように、直径 150 μm の粒子では 10⁻¹⁰ m/s という極低流速の計測値に対するブラウン運動の影響は無視できない可能性がある。そこで、簡易な 2 次元解析から影響の程度を見積もった。Fig.16 は原点から 1 個のトレーサ粒子を放出した場合に、ブラウン運動による移動軌跡を 0.1 秒ステップで計算して 10 ステップごとの位置をトレースしたものである。解析の詳細は文献[24]に譲るが、温度は計測地点と同じ水温 27°C とし、計測地点の塩分濃度に合致した粘性係数が無かったため、5%NaCl 水溶液の値[15]を内挿補間して解析した。みかけのブラウン運動速度を示す (2)式が平均自乗変位で示されているので、移動距離の自乗は時間 t とともに増大するが、Fig.16 にあるように方向を考慮すると移動距離そのものはそれほど増大しないことが判る。そして、本計測システムでは 1 回の測定に 2~10 秒を要するため、その間のブラウン運動による移動は半径 0.1 μm の同心円内に収まっていることがわかる。今回の解析が 2 次元であるために実際の体系を議論するには十分とは言えないが、前述のように計測精度が 7.4 μm であることからブラウン運動による影響は無視できる程度であると考えられる。

7 まとめ

深部地下における極低流速の地下水流を計測するために、流体中に浮遊した固体トレーサの軌跡を超音波で追尾する新しい方式の計測システムに対応可能な固体トレーサの安定浮遊性に関する検討を行い、以下の結果が得られた。

1. 密度の異なる材質を組み合わせた二重構造を有する固体トレーサを採用することで、多様な起源を持つ地下水密度に対応可能な密度調整型の固体トレーサの作成方法を確立した。

2. 原位置測定では事前に正確な密度を知ることができないため、多種類のトレーサをブレンドすることで、事前に予測した密度を中心にフラットな分布を持つトレーサを作成する方法を提案した。

3. 目標とする流速範囲を原位置において計測することができ、固体浮遊トレーサを用いた計測システムの成立性を確認した。

4. 原位置測定においてトレーサが 7 日間安定に浮遊していたことが確認され、当初目標としていた安定浮遊トレーサの開発に成功した。

なお、装置の改良とともに、今後も計測実績を積み上げる必要があると認識している。

謝辞

本研究は経済産業省および(財)エネルギー総合工学研究所の革新的実用原子力技術開発費補助事業で得た成果の一部である。また、原位置試験の実施にあたっては(独)日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センターの武田精悦氏、國丸貴紀氏、濱克宏氏および瀬尾昭治氏にご尽力を頂いた。また、トレーサの合成にはガンツ化成(株)のご協力を得た。ここに改めて感謝申します。

参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル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 次とりまとめ—, 平成 11 年 11 月。
- [2] 上田敏雄：地下水流動調査, 地質と調査, **2**,19(1996)。
- [3] 小松田精吉：流速・流向, 地質と調査, **1**,30(1993)。
- [4] Öhberg, A. and Rouhiainen, P.: Posiva groundwater flow measuring techniques. Posiva Report., pp. 15-60, Posiva. Finland, (2000)。
- [5] 動力炉・核燃料開発事業団：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成 3 年度—, PNC TN1410 92-081, pp 4-153, 平成 4 年 9 月。
- [6] Chambré, P. L., Pigford, T. H.: Prediction of Waste Performance in a Geologic Repository, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **26**, 985(1984)。
- [7] 小林薫, 近久博, 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形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, **66**, (2002)。
- [8] 戸井田克, 田中真弓, 中嶋誠門, 西垣誠, 大江俊昭, 佐藤光吉：高レベル放射性廃棄物処分場性能検証用計測システムの開発 1. プロトタイプの性能検証原位置試験, 日本原子力学会 2006 年春の大会, **B07**, (2006)。
- [9] 田中真弓, 戸井田克, 岩野圭太, 長井敏, 鈴木健彦：

密度可変固体トレーサを用い流向・流速計の開発
2. プロトタイプの室内性能試験, 土木学会全国大会第 60 回年次学術講演会, 3-438, (2005).

- [10] 通商産業省: 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針を定めた件, 通商産業省告示第 591 号 (2000).
- [11] 原子力土木委員会地下環境部会編: 精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方, 社団法人土木学会, p110, 2006 年 1 月.
- [12] キンツェルバッハ: パソコンによる地下水解析, p182, 森北出版, (1990).
- [13] 久保輝一郎, 他編: 粉体—理論と応用—改訂二版, p318, 丸善, (昭和 54 年).
- [14] 北原和夫: 非平衡系の統計力学, p94, 岩波書店 (1999).
- [15] 日本化学会編: 化学便覧 (改訂 4 版) 基礎編 II, pII-27, 丸善, (平成 13 年).
- [16] 日本学術振興会製鋼第 19 委員会編: 超音波探傷法 (改訂新版), p45, 日刊工業新聞社, (昭和 55 年).
- [17] Sato, Y. et al.: Determination of organic compounds in underground-water by solid-phase micro-extraction for verification of the high-level radioactive waste repository measurement system, *Analytica Chimica Acta*, (submitted).
- [18] Hunter, R.O.: *Zeta Potential in Colloid Science*, p150, Academic Press. (1981).
- [19] 寺島泰, 尾崎博明: ろ材の界面動電位の測定とそのろ材に及ぼす影響の評価, 土木学会論文報告集, **324**, 61 (1982).
- [20] 花井哲也: 不均質構造と誘電率, p120, 吉岡書店 (2000).
- [21] Lide, D.R., ed.: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 2002-2003, 83rd edition, p14-46, CRC Press, Washington.
- [22] 日本機械学会編: 技術資料 流体の熱物性表, p210, Table II 303-01, 昭和 58 年.
- [23] 國丸貴紀, 竹内竜史, 瀬尾昭治, 平田洋一, 小川賢: 幌延新地層研究計画における原位置計測装置の概念と現状の計画, 2004 年秋季講演会講演要, 71, (2004)
- [24] 神山新一, 佐藤明: 流体マイクロシミュレーション, 朝倉書店 (1997 年).