

NAPL 吸収多孔体径が Partitioning Interwell Tracer Test (PITT) に与える影響

西脇淳子¹・宮崎 毅²・溝口 勝²

Effects of NAPL entrapped porous material diameters on Partitioning Interwell Tracer Test (PITT)

Junko NISHIWAKI¹, Tsuyoshi MIYAZAKI² and Masaru MIZOGUCHI²

Abstract : Partitioning Interwell Tracer Test (PITT) is a useful tool for quantifying the volume of Non-Aqueous Phase Liquids (NAPL) present in aquifer. The volume is estimated by the retardation factor of a partitioning tracer relative to the transport of the non-partitioning tracer that was determined from the tracer breakthrough curves (BTCs). However, the equilibrium partitioning would not be completed during every PITT in the actual field, where high saturation NAPL areas such as free-phase pools and macro-scale entrapment zones are existed. In this study, we made five laboratory experiments focused on the diameters of NAPL entrapped porous material. Experiments revealed that, the accuracy of estimated NAPL volume by PITT was not affected by the diameter. In contrast, the tailings of the BTCs were affected by the diameter. Tracer diffusion distance would be longer in the NAPL entrapped porous material that has a large diameter, and therefore, the tailing of the BTCs might become more prominent.

Key Words : Partitioning Interwell Traer Test (PITT), NAPL entrapped porous material diameters, Trichloroethylene (TCE), laboratory column experiment

1. はじめに

近年、地下水や土壌の汚染による人体へのリスクが問題視され、早急な浄化対策が重要となっている。地下水・土壌汚染物質には、ガソリン、油、および有機溶剤などの難水溶性溶液 (Non-Aqueous Phase Liquids, NAPL) や、重金属、硝酸態窒素などのさまざまな化学物質が挙げられる。平成 14 年に土壌汚染対策法が制定され、平成 22 年 4 月 1 日には改正土壌汚染対策法が施行された。この法律では、土壌の汚染状況を把握するための制度の充実、健康被害防止の措置、汚染土壌の処理の適正化、および汚染土壌の運搬・搬出に関する規定が盛り込まれ

た。したがって、今後は現位置での土壌汚染対策がさらに重要性を増すと予測される。それに伴い、簡便な調査手法が必要と考えられる。

Partitioning Interwell Tracer Test (PITT) は、広範囲の NAPL 汚染状況を現位置で把握することのできる調査手法である (例えば, Jin et al., 1995; 西脇ら, 2004, 2007)。PITT の原型は、1970 年代の石油工業分野で用いられた埋蔵石油量の推定手法にさかのぼる。この手法では、クロマトグラムの原理を用いている。NAPL に分配せずに水相のみを移動するトレーサー (非分配トレーサー) と NAPL に分配しながら移動するトレーサー (分配トレーサー) の混合水溶液を同時に地下に流し込み、観測地点における両トレーサーの到達時間差から埋蔵石油量を推定する。現在、この推定手法が、油や有機溶剤などの NAPL 汚染現場に広く適用されてきている (例えば, Nelson and Brusseau, 1996; Annable et al., 1998; Schubert et al., 2007)。

PITT で得られる各トレーサーの到達時間差から、重要な情報となる NAPL 飽和度 S_N が算出される。NAPL 飽和度は土壌中の全空隙のうち、NAPL が占める割合と定義される。飽和帯における NAPL 飽和度は、NAPL 量を水と NAPL を足した量で除したものである ($S_N = \text{NAPL 量} / (\text{NAPL 量} + \text{水量}) = V_N / V_p$; V_N は NAPL 量, V_p は空隙量)。この S_N は、PITT における非分配トレーサーに対する分配トレーサーの遅延から算出される。また、トレーサーの遅延係数 R と S_N の関係は以下の式で与えられる (Jin et al., 1995)。

$$R = 1 + \frac{K_{N,w} S_N}{(1 - S_N)} = \frac{\bar{t}_p}{\bar{t}_n} \quad (1)$$

ここで、 \bar{t}_p は分配トレーサーの平均滞留時間、 \bar{t}_n は非分配トレーサーの平均滞留時間、 $K_{N,w}$ はトレーサーの NAPL-水分配係数である。各トレーサーの平均滞留時間は、PITT より得られる破過曲線の 1 次モーメント解析で求められる (Jin et al., 1995; Young et al., 1999)。米国ではこの手法の価値が認められ、1999 年までに 40 以上のフィールドに適用されており (Dwarakanath et al., 1999; Meinardus et al., 2002)、現在はさらに適用件

¹ Ibaraki University, College of Agriculture, 3-21-1, Chuo, Ami, Inashiki, Ibaraki, 300-0393, Japan. Corresponding author: 西脇淳子, ¹茨城大学農学部

² Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan. 2012 年 10 月 18 日受稿, 2013 年 1 月 8 日受理
土壌の物理性 123 号, 73-79 (2013)

数は増えている。日本では、使用するトレーサー類の安全性の面で環境中での拡散が制限されているため、実際の汚染現場での適用はなされていない。しかし、安全性の高いトレーサー類を使用すること、地中への投入トレーサーの回収を確実にすることができれば、日本での適用も期待できると考えられる。

PITTがNAPL量の推定に有効であるとはいえ、問題点もいくつか指摘される。具体的には、i) PITT期間中のNAPL量の減少、ii) PITT期間中のNAPL構成成分の変化、iii) 土壌中有機物や鉱物によるトレーサーの吸着 (Jin et al., 1997)、iv) 不均一なNAPLの存在形態や不適切なトレーサー流速の設定により生じる分配トレーサーのNAPLへの非平衡分配などが挙げられる。したがって、PITTでのNAPL量の推定精度を向上させるには、こうした問題を解決する必要がある。

PITTでのNAPL量推定では(1)式が用いられる。ここで、 $K_{N,w}$ はバッチ試験で求められる平衡時の分配係数である。しかし、実際の現場ではトレーサーのNAPLへの分配が平衡に達しないこともあり得る。したがって、トレーサーのNAPLへの非平衡分配が、PITTでのNAPL量の推定精度を低下させる恐れがある。非平衡分配を引き起こす要因としては、現場の地質の違い (Meinardus et al., 2002)、高トレーサー流速 (西脇ら, 2007)、温度、汚染物質の存在位置や形状などの不均質性によるトレーサーとの不完全接触などが挙げられる。

西脇ら (2004) は、水で満たしたガラス管内への投入量 (mL) の等しいNAPLに対して、NAPLを一か所にまとめて水中に存在させた場合と2分割して存在させたPITTの実験系を作成し、投入NAPLの表面積を可視化させて計測することで、NAPLの比表面積がトレーサーのNAPLへの分配現象と関係することを示した。しかし、この実験はモデル性が強く、土壌媒体の存在しない地下水中にNAPLが存在する条件下で行われた。Jalbertら (2003) は、およそ100×160 cmの室内実験装置を用いて、DNAPL (Dは水よりも重いことを表す: Denser than water) の比表面積が小さいためにDNAPL-水相間でのトレーサー交換に律速が生じたと報告した。しかし、PITTでの非平衡なトレーサー分配を生じさせるメカニズムに関しては、十分な知見は得られていない。

本研究では、NAPLの高濃度汚染領域 (NAPLプール) の大きさがPITTに与える影響を明らかにすることを目的として室内カラム実験を行った。とくに、PITTで得られる破過曲線の形状とNAPLプールのサイズとの関係から、トレーサーのNAPLへの分配過程を推察し、PITTに及ぼす影響を調べた。

2. 実験試料と方法

2.1 供試試料およびトレーサー物質

汚染物質としてトリクロロエチレン (TCE) を用いた。TCEは発がん性が懸念され、土壤汚染対策法で第二種

特定化学物質に指定されている。非分配トレーサーとしてイソプロピルアルコール (IPA)、分配トレーサーとして4-メチル-2-ペンタノール (4M2P) と5-メチル-2-ヘキサノール (5M2H) を用いた。TCE、およびトレーサー類の物性値は西脇ら (2007) に詳しい。供試土壌は豊浦砂 (真比重2.64) である。本実験では、現場で土壌間隙中に微粒子状で散在するのではなく、連続体として偏在するNAPLプールを模擬した。そのために、カオリナイト製の多孔質体の間隙中にTCEを吸収させたNAPL吸収多孔体を模擬NAPLプールとした。

カオリナイト製の多孔質体は、カオリナイトの多孔質板を砕いたもので、2 mm以下、2~5 mm、5~15 mmの3種類の径にふるいを通して分類した (Photo. 1)。それぞれの径の多孔質体をTCE入りのビーカー内に投入し、真空ポンプで吸引して多孔質体間隙中の空気をTCEに置換した。2 mm以下のNAPLを用いた実験をNo.2、2~5 mm径のNAPLを用いて2反復で行った実験をNo.3、およびNo.4、5~15 mm径のNAPLを用いた実験をNo.5とする。ここでNo.3とNo.4ではそれぞれ、実験中の平均フラックスを $0.009 \text{ cm min}^{-1}$ 、および $0.017 \text{ cm min}^{-1}$ とした。また、比較として非汚染状態でのPITTのモデル実験を行った (No.1)。実験No.1では、2~5 mm径のカオリナイト多孔質体の間隙中にTCEではなく純水を吸収させた。

トレーサー類のTCE-水、および豊浦砂-水分分配係数は、別途バッチ試験で測定した。IPA、4M2P、および5M2HのTCE-水分分配係数はそれぞれ0、6.51、および27.51であった。また、各トレーサーの豊浦砂への吸着は無視できることを確認した。

2.2 汚染カラムの作成手順

内径2 cm、長さ13 cmのpolytetrafluoroethylene (PTFE) 製の円筒カラムを垂直に設置し、下方からペリスタポンプで純水を供給しながら豊浦砂を水中充填した。豊浦砂中にNAPL吸収多孔体がランダムに存在するように汚染カラムを作成した。個々のNAPL吸収多孔体の間は豊浦砂が充填された状態である。また、豊浦

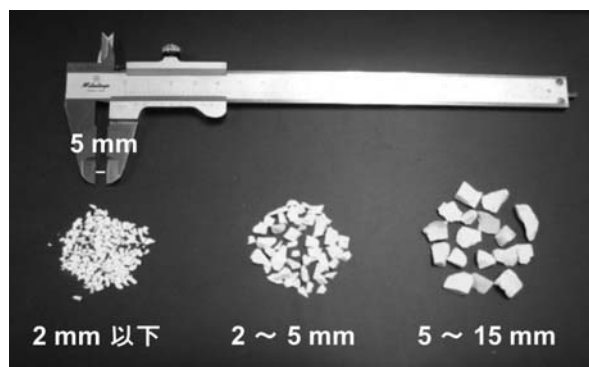


Photo. 1 トリクロロエチレンを吸収させて模擬NAPLプールとして使用した3種類の径のカオリナイト多孔質体。Trichloroethylene entrapped kaolinite porous materials divided into three groups on the basis of their diameters to simulate a NAPL pool.

砂の間隙は水で満たして、カラム内は飽和帯を模擬した。乾燥密度はおよそ 1.63 Mg m^{-3} とした。実験はドラフト内に装置を設置して行った。豊浦砂の流出を防ぐためにカラムの上下両端にスチールウール、およびステンレス製のフィルターをストッパーとして封入した。実験装置の模式図を Fig. 1 に示す。

2.3 実験手順

カラム上端からトレーサー混合水溶液をおよそ 0.2 ポア・ボリューム流した後に、三方コックを切り替えて純水を連続供給した。純水への TCE の溶出は無視できると仮定した。実験中、カラム下端からの排出水をフラク

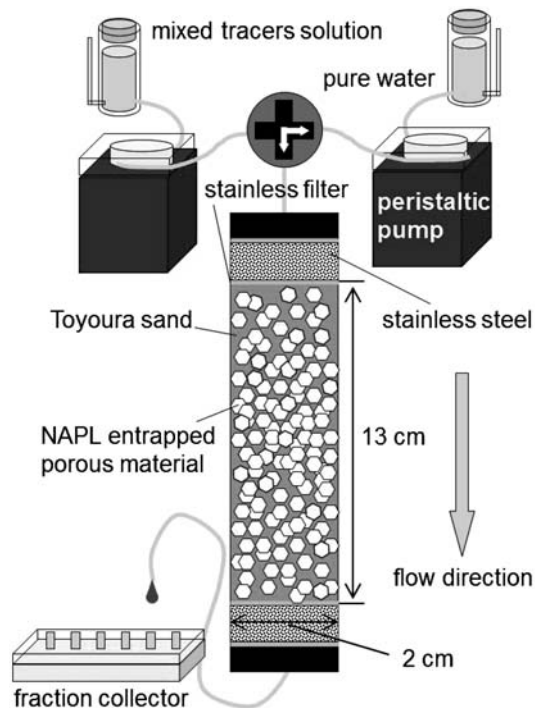


Fig. 1 実験装置模式図。

Schematic diagram of experimental setup for studying the effects of NAPL entrapped porous material diameters on tracer transport during PITT.

ションコレクターで一定時間ごとに採水し、重量測定によりフラックスを算出した。実験は、採水試料中のトレーサーの検出濃度が分析装置の検出限界値以下になるまで継続した。採水試料は濃度分析まで密閉して冷蔵保存した。各実験の投入トレーサー濃度 (mg kg^{-1} ; 土壌 1 kg に対するトレーサー量 mg), 投入トレーサー水溶液量 (g), TCE 飽和度 (-), 実験期間を通しての平均的なフラックス (cm min^{-1}), およびそれぞれの実験で用いた NAPL 径 (mm) を Table 1 に示す。

トレーサーの定量分析にはガスクロマトグラフ GC-FID (島津 GC-17A) を用いた。温度プログラム、分析条件等は西脇ら (2007) と同様である。

2.4 NAPL 量推定方法

式 (1) を変形させた以下の式 (2) に実験結果を代入することで NAPL 量を推定する。

$$S_N = \frac{R - 1}{K_{N,w} + R - 1} \quad (2)$$

ここで、 R は先述の遅延係数であり、式 (3) により算出される。

$$R = \frac{\bar{t}_p}{\bar{t}_n} \quad (3)$$

\bar{t}_p , \bar{t}_n はそれぞれ、PITT で得られる破過曲線から算出された、分配トレーサー、および非分配トレーサーの平均滞留時間である。具体的には、以下の式であらわされる (Jin et al., 1995; Young et al., 1999) :

$$\bar{t}_i = \left(\frac{\int_0^\infty C_d \cdot t dt}{\int_0^\infty C_d dt} \right) - \frac{t_{in}}{2} \quad (4)$$

添え字 i は分配 (partitioning) を意味する p , または非分配 (non-partitioning) を意味する n である。 C_d は抽出井で観測された濃度を無次元化した値 $(C - C_0) / (C_{in} - C_0)$ であり、 C_0 , C_{in} はそれぞれ、バックグラウンドと

Table 1 実験名および実験条件。

Summary of laboratory column experiments for studying the effects of NAPL entrapped porous material diameters on tracer transport during PITT.

No.	投入濃度 (mg L^{-1})			投入 トレーサー 水溶液量 (g)	間隙 体積 (cm^3)	TCE 飽和度 $S_{N\text{-real}}$ (-)	平均 フラックス (cm min^{-1})	NAPL 吸収 多孔体径 (mm)
	IPA	4M2P	5M2H					
1	1516	921	1509	3.731	28.68	0.00	0.019	2 ~ 5
2	1434	1348	1554	4.207	29.50	0.35	0.020	< 2
3	1501	1421	1353	3.908	27.89	0.43	0.009	2 ~ 5
4	1476	1436	1484	3.551	29.87	0.41	0.017	2 ~ 5
5	1163	1404	1521	4.284	27.40	0.32	0.015	5 ~ 15

なる地下水中のトレーサーの初期濃度 $[ML^{-3}]$, および投入トレーサー濃度 $[ML^{-3}]$, また C は抽出井で観測されたトレーサー濃度 $[ML^{-3}]$ である. さらに, t は時間 $[T]$, t_{in} はトレーサーの投入時間 $[T]$ である.

本研究では, NAPL 量の推定精度, 実験期間中のトレーサー回収率を議論するため, 以下の式を定義する.

$$\text{NAPL 量推定精度} = \frac{S_N}{S_{N-real}} \quad (5)$$

$$\text{トレーサー回収率} = \frac{\text{トレーサー回収容量}}{\text{トレーサー注入容量}} \quad (6)$$

S_{N-real} は実 TCE 飽和度であり, 実験カラムの作成時に投入した TCE 容量から算出した. また NAPL 量推定精度とは, PITT での TCE 量の推定精度を議論するために本研究で定義した値で, PITT の精度を示す指標となる.

3. 結果

3.1 破過曲線の形状差

実験 No.1 ~ No.5 で得られた破過曲線を Fig. 2 に示す. 縦軸は観測されたトレーサー濃度 (C) を初期投入トレーサー濃度 (C_0) で除したトレーサーの相対濃度 (C/C_0), 横軸はポア・ボリュームである. 図中には, NAPL 吸収多孔体径, および実験中の平均フラックスを示す.

これらのグラフから, 汚染の有無, および径の違いにより, 各トレーサーの破過曲線に形状差が生じることが

わかる. とくに, ピーク点以降の濃度減少部分の傾きに差異が確認された.

汚染の有無による破過曲線の形状に関して, 非汚染実験である No.1 と汚染実験である No.2 ~ No.5 を比較する. No.2 ~ No.5 の実験ではピーク点以降の濃度減少部分で, 非分配トレーサーと比べて分配トレーサーの傾きが緩やかであった. 傾きは 4M2P よりも 5M2H で緩やかであった.

径の違いによる破過曲線の形状差について, 汚染実験である No.2 ~ No.5 を比較する. 分配トレーサーの濃度減少部分の傾きは, NAPL 径の増加とともに緩やかとなった. その傾向はとくに 5M2H で大きかった.

3.2 トレーサー回収率と NAPL 量推定精度

各実験結果から算出した遅延係数 (R), 推定 TCE 飽和度 (S_N), NAPL 量推定精度, およびトレーサーの回収率を Table 2 に示す. トレーサー回収率は $IPA > 4M2P > 5M2H$ の順で減少し, 投入量に対して 4M2P は最高で 51%, 5M2H は 34% であった. 分配トレーサー, とくに 5M2H の回収率が低かった.

NAPL 量推定精度は, 分配トレーサーとして 4M2P を用いた場合に最高で 0.27, 5M2H を用いた場合に 0.24 であった. 本研究で設定した NAPL 吸収多孔体径の差異では, 径と NAPL 量推定精度との関係は認められなかった.

4. 考察

4.1 破過曲線の形状差

No.2 ~ No.5 で分配トレーサーの濃度減少部分の傾きが緩やかであった. また, 5M2H では No.2, No.4,

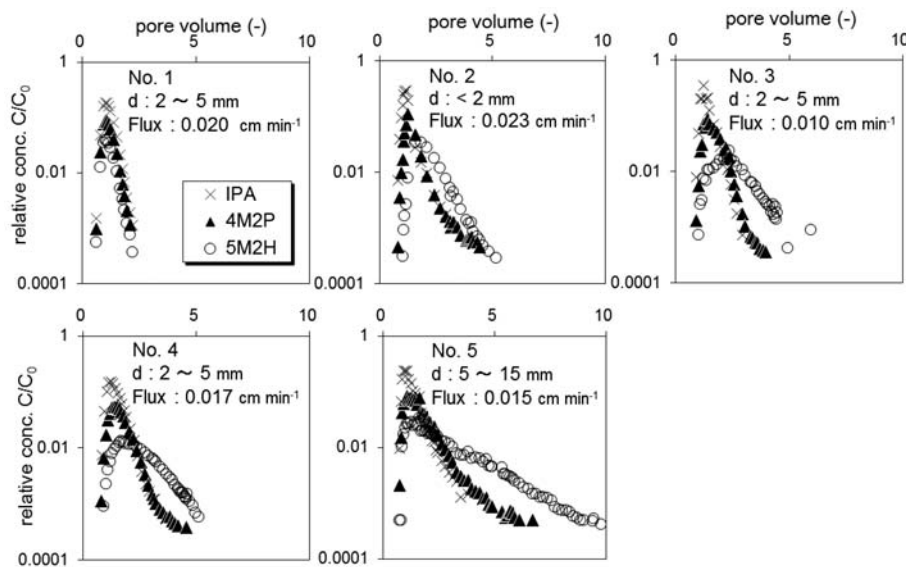


Fig. 2 PITT 中のイソプロピルアルコール (IPA), 4-メチル-2-ペンタノール (4M2P), および 5-メチル-2-ヘキサノール (5M2H) の破過曲線. グラフ上の No. は実験 No. を意味する. "d" は NAPL 吸収多孔体径 (mm), "Flux" は実験中の平均的なフラックス ($cm\ min^{-1}$) である. Breakthrough curves of isopropyl alcohol (IPA), 4-Methyl-2-pentanol (4M2P) and 5-Methyl-2-hexanol (5M2H) during PITT. Each number on the graph shows experimental No. "d" is a NAPL entrapped porous material diameter (mm) and "Flux" is a mean flux ($cm\ min^{-1}$) during each experiment.

Table 2 NAPL 吸収多孔体径が PITT に与える影響を調べる実験での各実験結果.

Summary of the results from the experiments for studying the effects of NAPL entrapped porous material diameters on PITT.

No.	遅延係数 (R)		推定飽和度 (S_N)		NAPL 量推定精度		トレーサー回収率		
	4M2P	5M2H	4M2P	5M2H	4M2P	5M2H	IPA	4M2P	5M2H
1	1.00	1.01	0.00	0.00	-	-	0.60	0.29	0.13
2	1.18	1.66	0.03	0.02	0.18	0.17	0.78	0.37	0.18
3	1.30	1.96	0.04	0.03	0.27	0.20	0.90	0.41	0.19
4	1.17	1.66	0.03	0.02	0.16	0.15	0.71	0.36	0.25
5	1.32	2.20	0.05	0.04	0.27	0.24	0.80	0.51	0.34

No.5 の順, すなわち NAPL 吸収多孔体径が大きくなるほど濃度減少部分の傾きが緩やかになった. ここで, NAPL に分配したトレーサーは, NAPL 内部で濃度勾配によって拡散移動すると考えられる. したがって, NAPL 吸収多孔体の径が大きくなり内部での拡散距離が増加するにつれ, NAPL 内部に分配したトレーサー濃度が均一になるまでの時間, その後水相に再分配されるための時間が長くなる. そのため, 緩やかな濃度減少を示したと考えられる. 慣例に従い, このような破過曲線の非対称性をテーリングと呼ぶ (van Genuchten and Wierenga, 1976; Giddings, 1963).

これに関連して, Dai ら (2001) は汚染の浄化後に土壌間隙中に散在する残留 NAPL ではなく, NAPL 高濃度領域を再現するために, 広がりをもって存在する NAPL を模擬した室内実験を行った. 彼らは, 実験でテーリングが観測されたことから, NAPL へのトレーサー分配において拡散律速が生じたと推測した. また, Nelson and Brusseau (1996) はフィールドで PITT を行った. 得られた破過曲線においてテーリングが顕著で, かつトレーサーの回収が少なかった理由として, NAPL 相が厚さを持つためと推測した. 本研究で設定した実験系では NAPL が間隙中に散在するのではなく, NAPL プールとして広がりをもち偏在する汚染状況を模擬しているため, 観測されたテーリングは, 拡散律速された NAPL へのトレーサー分配によるものと推察される.

4.2 トレーサー回収率と NAPL 量推定精度

NAPL への分配係数の大きな 5M2H の回収率が低かったことから, カラムに投入した 5M2H のうちのかなりの割合が NAPL 相に残ったまま流出しなかったことが示唆される. 実際にすべての分配トレーサーがカラム外へ流出していれば, 破過曲線の重心の位置が時間経過方向, すなわちポア・ボリュームの増加方向へずれるため, 推定される NAPL 量が増大するはずである. したがって, 分配トレーサーの回収率が低いことが, NAPL 量推定精度の低さの一要因と考えられる.

本研究では NAPL 吸収多孔体径と NAPL 量推定精度の間に関係は見られなかった. この原因として, NAPL 吸収多孔体との接触が十分ではなかった分配トレーサー

が早い段階でカラム外へ流出するのと並行して, 多孔体内へ分配したトレーサーは NAPL 内部で拡散移動するために再び水相に戻るまでの時間が長くなったことが考えられる. その結果が破過曲線上に表れており, とくに, 多孔体径の大きな場合に分配トレーサーのピーク点は非分配トレーサーのピーク点とほぼ同じポア・ボリュームで観測される一方で, テーリングが長くなるという形状が観察されたと推察される. したがって, (2) 式を用いて NAPL 量を推定すると, NAPL 吸収多孔体との接触が不十分であったトレーサー成分と, NAPL への分配後に排出された成分の組み合わせとして NAPL 量を推定することになり, 径と NAPL 量推定精度との間には関係が見られなかったと考えられる. また, 同一径での実験 (No.3, No.4) の比較では, 実験中の平均的なフラックスが小さい場合に NAPL 量推定精度が高い結果を示した.

現場で不均質に存在する NAPL の影響を除去することはできないため, 実際の汚染現場で PITT を行う際にはトレーサーのテーリングが生じる可能性がある. 顕著なテーリングは, PITT の期間を延長させるのみならず, NAPL 量の推定精度を低下させる危険性がある. その理由は, トレーサーテストを途中で打ち切った場合のトレーサーの回収率の低下, 長いテーリングのために分析装置の検出限界値を下回った濃度でのトレーサー流出の継続 (Imhoff and Pirestani, 2004) などである. したがって, 適切に PITT を利用するためには, 低濃度の分析も可能な精度のよい分析装置の導入 (Imhoff and Pirestani, 2004) や, データの外挿, さらには投入トレーサー量を増加させるなどの工夫が必要と考えられる. ここで, 投入トレーサー量に関しては, 競合トレーサーによる各トレーサーの分配係数への影響 (Imhoff et al., 2003) が懸念されるため, トレーサーの組み合わせを考慮する必要がある.

5. おわりに

本研究では, PITT のモデル実験を行い, 現場で偏在する NAPL プールのサイズに着目し, NAPL 吸収多孔体径の違いが PITT, および NAPL へのトレーサーの

分配現象へ与える影響を調べた。その結果、1) 本実験における NAPL 吸収多孔体径と PITT による NAPL 量の推定精度には関係は見られなかった。また、2) NAPL 吸収多孔体径の増加とともに、分配トレーサー、とくに 5M2H の濃度減少部分の傾きが緩やかになり、3) その原因として、NAPL 吸収多孔体径が大きな場合に NAPL 内部での拡散移動距離が長くなり、内部での濃度勾配が一定になるまでの時間、および水相への再分配に必要な時間が増加したことが考えられた。さらに、4) 5M2H が NAPL 相に残留しやすいために、PITT による推定 NAPL 量が低下することが示唆された。このことから、分配係数の大きな分配トレーサーを利用することで NAPL 量を過小評価する危険性はあるが、得られた破過曲線のテーリング形状を調べることで、NAPL の偏在状況がある程度予測できると考えられる。NAPL が散在する場合にはトレーサーテストを行った全領域を浄化しなければならない。しかし、観測井を増やすなどして NAPL の偏在領域を特定することができれば浄化コストの節約につながることが期待される。PITT は現位置で行え、もともと存在する井戸などを利用すれば非破壊で行える有効な NAPL 量の推定手法である。しかし、実際の汚染現場では環境条件や地質条件などがさまざまであるため、精度のよい汚染調査を行うには、ボーリング調査など他の調査と組み合わせたクロスチェックが重要である。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京大学の西村拓准教授には研究全般において、同大学の技術専門職員である井本博美氏には実験全般において一方ならぬご指導をいただきました。深く感謝致します。

引用文献

- Annable, M. D., Jawitz, J. W., Rao, P. S. C., Dai, D. P., Kim, H. and Wood, A. L. (1998) : Field Evaluation of Interfacial and Partitioning Tracers for Characterization of Effective NAPL-Water Contact Areas. *GROUND WATER*, 36 (3) : 495-502.
- Dai, D., Barranco, F. T., Jr., Illangasekare, T. H. (2001) : Partitioning and Interfacial Tracers for Differentiating NAPL Entrapment Configuration : Column-Scale Investigation. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, 35 (24) : 4894-4899.
- Dwarakanath, V., Deeds, N. and Pope, G. A. (1999) : Analysis of Partitioning Tracer Tests. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, 33 (21) : 3829-3836.
- Giddings, J. C. (1963) : Kinetic origin of tailing in chromatography. *Anal. Chem.*, 35 : 1999-2002.
- Imhoff, P. T. and Pirestani, K. (2004) : Influence of mass transfer resistance on detection of nonaqueous phase liquids with partitioning tracer tests. *Advances in Water Resources*, 27 (4) : 429-444.
- Imhoff, P. T., Pirestani, K., Jafarpour Y. and Spivey, K. M. (2003) : Tracer Interaction Effects during Partitioning Tracer Tests for NAPL Detection. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, 37 (7) : 1441-1447.
- Jalbert, M., Dane, J. H. and Bahaminyakamwe L. (2003) : Influence of porous medium and NAPL distribution heterogeneities on partitioning inter-well tracer tests : a laboratory investigation. *Journal of Hydrology*, 272 : 79-94.
- Jin, M., Butler, G. W., Jackson, R. E., Mariner, P. E., Pickens, J. F., Pope, G. A., Brown, C. L. and McKinney, D. C. (1997) : Sensitivity Models and Design Protocol for Partitioning Tracer Test in Alluvial Aquifers. *GROUND WATER*, 35 (6) : 964-972.
- Jin, M., Mode D., Varadarajan D., Daene C. M., Gary A., Kamy S. and Charles E. T. (1995) : Partitioning Tracer Test for Detection, Estimation and Remediation Performance Assessment of Subsurface Nonaqueous Phase Liquids. *WATER RESOURCES RESEARCH*, 31 (5) : 1201-1211.
- Meinardus, H.W., Dwarakanath, V., Ewing, J., Hirasaki, G.J., Jackson, R.E., Jin, M., Ginn, J.S., Londergan, J.T., Miller, C.A. and Pope, G.A. (2002) : Performance assessment of NAPL remediation in heterogeneous alluvium. *Journal of Contaminant Hydrology*, 54 : 173-193.
- Nelson, N. T. and Brusseau M. L. (1996) : Field Study of the Partitioning Tracer Method for Detection of Dense Nonaqueous Phase Liquid in a Trichloroethene-Contaminated Aquifer. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, 30 (9) : 2859-2863.
- Schubert, M., Paschke, A., Lau, S., Geyer, W. and Knöller, K. (2007) : Radon as a naturally occurring tracer for the assessment of residual NAPL contamination of aquifers. *Environmental Pollution*, 145 : 920-927.
- van Genuchten, M. Th. and Wierenga, P. J. (1976) : Mass Transport Studies in Sorbing Porous Media I . Analytical Solutions. *SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA JOURNAL*, 40 (4) : 473-480.
- Young, C. M., Jackson, R. E., Jin, M., Londergan, J. T., Mariner, P. E., Pope, G. A., Anderson, F. J. and Houk, T. (1999) : Characterization of a TCE DNAPL Zone in Alluvium by Partitioning Tracers. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 19 (1) : 84-94.
- 西脇淳子, 唐常源, 佐倉保夫, 溝口勝, 宮崎毅 (2004) : 滞留 NAPL 量推定のための分配トレーサー試験 (PITT) の適用性について. *土壌の物理性*, 97 : 13-24.
- 西脇淳子, 宮崎毅, 溝口勝, 駒井武 (2007) : トレーサー流速が Partitioning Interwell Tracer Test (PITT) による NAPL 体積推定精度に与える影響. *土壌の物理性*, 107 : 27-36.

要 旨

Partitioning Interwell Tracer Test (PITT) は、帯水層に存在する Non-Aqueous Phase Liquids (NAPL) 量を推定するための有効な手法である。NAPL 量は、トレーサーの破過曲線 (BTCs) から決定される非分配トレーサーの移動に対する分配トレーサーの遅延係数によって推定される。しかしながら、NAPL が可動性のプール状で存在するような、もしくは汚染が広範囲にわたるような NAPL の高濃度領域がある実際の現場では、すべての PITT において平衡分配が成り立つとは限らない。本研究では、NAPL を吸収させた多孔体の直径に着目して 5 種類の実験を行った。その結果、PITT による NAPL 量の推定精度はその直径に影響されないことが確認された。一方、BTCs のテーリングは直径に影響されることがわかった。NAPL を吸収した多孔体の直径が大きくなると、トレーサーの多孔体内部での拡散距離が長くなり、それによって BTCs のテーリングが顕著になったと推察された。

キーワード：Partitioning Interwell Tracer Test (PITT), NAPL 吸収多孔体径, トリクロロエチレン, カラム実験