

マイクロ X 線 CT を用いた高温空気圧入による 間隙内油汚染流体の浄化機構の解明

熊本大学大学院 学生会員 塚本 直己
熊本大学大学院 正会員 椋木 俊文
熊本大学 非会員 吉永 徹

1. 背景

エアースパーキング法は軽比重難水溶性液体(LNAPL)による地盤汚染の修復技術の一つとして知られている¹⁾。エアースパーキング法は LNAPL 汚染地盤に対し、空気を圧入することで強制的に間隙内から LNAPL を排出させる事、および圧入された空気への揮発を促し浄化する事を目的とした手法である。近年ではマイクロ X 線 CT スキャナを用いた研究では孔隙スケールにおける現象の観察に対し、その有効性が報告されている²⁾。

本研究の目的は、エアースパーキング法の浄化効率を高めるため、圧入空気の温度に着目しており、高温空気の圧入による LNAPL 浄化機構の解明することである。本報では、温度を制御した空気圧入実験を行い、マイクロ X 線 CT スキャナを用いて供試体内部での現象の定量的な観察、評価を試みたので報告する。

2. 実験概要

高温空気圧入実験装置の概略図を図 1 に示す。流動実験中はシリンジポンプによって流量を制御することで、一定流量条件を与えている。試料手前には小型圧力計を設置し注入流体の圧力を測定しており、出口は大気圧になっている。回収した流体の質量は精密天秤で測定している。シリンジポンプから圧力容器の注入口までは温度制御槽によっておおわれており、槽内部の温度を調整することが可能である。試料には豊浦標準砂を使用し、アルミ製の小型圧力容器に絶乾状態の試料を 1.60t/m^3 の乾燥密度で充填した。圧力容器は長さ 18.6cm、外径 2.0cm、内径 1.0cm であり、圧力容器内の体積は 14.61cm^3 である。したがって、試料の孔隙体積(Pore Volume: PV)は、5.74ml となる。実験ケースを表 1 に示す。圧入空気の温度が LNAPL 浄化に与える影響を比較するため、圧入空気の温度を 25°C、60°C の 2 ケースを設定した。表 2 に今回使用した流体の物性を示す。

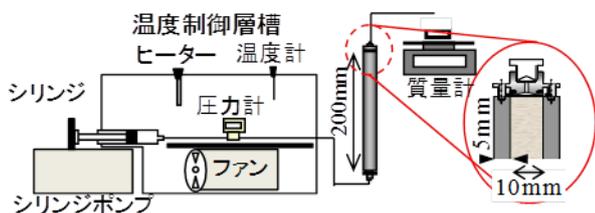


図 1. 高温空気圧入実験装置の概要

表 3 は実験ステップを示している。実験は供試体作成

表 1. 実験ケース

	Injection rate	Air temperature
Case1	50(ml/h)	25°C
Case2		60°C

表 2. LNAPL の物性

	LNAPL	Water
Density(t/m^3)	0.75	1
Viscosity($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	1.29	1.002
Surface tension(mN/m)	24.68	72.94
Contact Angle($^\circ$)	7.2	53.7

表 3. 実験ステップ

	Injection fluid	Injection rate(m/h)	Fluid temperature($^\circ$)		Injection Amount (PV)
Step1	LNAPL	50	25		2
Step2	Air	50	25	60	5

後、LNAPL(2PV)を圧入し、その後、各ケースで設定された温度の空気(5PV)の圧入を行った。流体の圧入は 50ml/h の流速で行い、流体の圧入後にマイクロ X 線 CT を用いて CT 撮影を行い、空気圧入に伴う LNAPL の浄化機構の評価を行った。X 線 CT 撮影の領域は供試体中央部の $6.1\times 6.1\times 6.1\text{mm}^3$ であり、 $3\times 3\times 3\text{mm}^3$ の領域を画像解析の対象とした。

3. 結果および考察

図 2 に空気圧入時における LNAPL 回収量を示す。圧入終了後の LNAPL 回収量は Case1 では 0.94g、Case2 では 1.1g であり、Case2 の方が回収量は 1.2 倍程度多くなった。これは Case2 の圧入空気温度が高いため LNAPL の粘性が低下し、LNAPL の流動性が高まったためと考えられる。図 3 に空気圧入時における圧力の経時変化を示す。Case1 における最大圧力は 4.4kPa、Case2 は 4.1kPa である。Case2 の方が注入時の圧力が 0.3kPa 低下しており、回収量の結果と同様に LNAPL の流動性が高まったためと考えられる。

図 4 にマイクロ X 線 CT 撮影によって得られた Case1、Case2 の Step1 における CT 画像(水平断面)と多値化処理後の画像を示す。Step1 と同様に、Step2 の CT 画像に対しても Marker-Controlled-Watershed 法を用いた多値化処理を行った³⁾。得られた多値化処理画像を用いて画像解析を行った。

図 5 に画像解析で得られた LNAPL 飽和度の変化を示す。Step1 において、Case1 の LNAPL 飽和度は 79%、Case2 では 84%であった。Step2 ではそれぞれ 54%、49%となり、Step3 においては 57%、46%となった。LNAPL 飽和度は

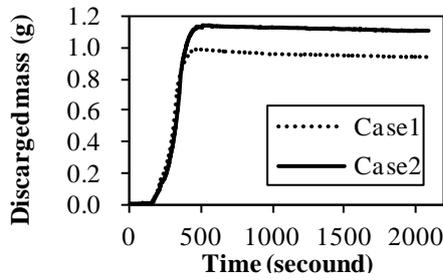


図2. 空気圧入に伴う LNAPL 回収量

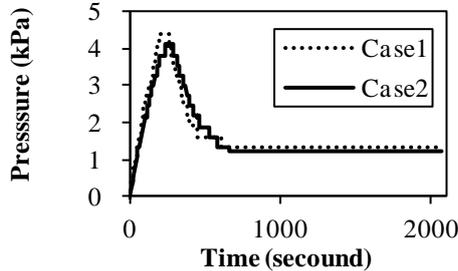


図3. 空気圧入に伴う注入圧力の経時変化

Case1 では27%の低下したのに対し、Case2 では35%低下している。温度を上げたことでLNAPLの流動性が上昇し、間隙内からより多くのLNAPLの排出やLNAPL揮発が促されたためと推察される。

図6は間隙内のLNAPLがどのような大きさの間隙径に存在しているかを示したLNAPLの孔隙径分布の画像解析結果である。Case2では、ほぼすべての間隙径においてLNAPLの割合が低下している。一方で、Case1では30 μ m以下の間隙径ではLNAPLの割合が1.8%増加している。これはLNAPLが流動する過程で、小さな間隙径に新たに捕まったことが考えられる。Case2においてほとんどの間隙径のLNAPLの分布が低下したことから、高い温度の空気を圧入することでLNAPLの粘性が低下し、小さな間隙径におけるLNAPLの流動が促されたと考えられる。

4. 結論

高い温度の空気を圧入することで、LNAPLの流動性が高まり、LNAPLの浄化効率が増加することが確認された。毛管圧力が高い小さな間隙において、より高い温度の空気圧入によりLNAPLの浄化が促進することが期待される。

5. 参考文献

- 1) Johnson, R.L., Johnson, P.C. and McWhorter, D.B. (1993): An Overview of In Situ Air Sparging, Ground Water Monitoring & Remediation, Vol.13, Issue.4, pp.127-135.
- 2) T.Mukunoki, N.Tsukamoto, K.Sugimura, Y.Obara (2013): Visualization of LNAPL in sandy soil due to air injection using micro X-ray CT, Proc.of the 7th International Joint symposium on Problematic Soils and geoenvironment in Asia program,pp67-70
- 3) Soille, P. : Morphological Image Analysis: Principals and Applications, Springer-Vellag Berlin Heidelberg New York, 2002.

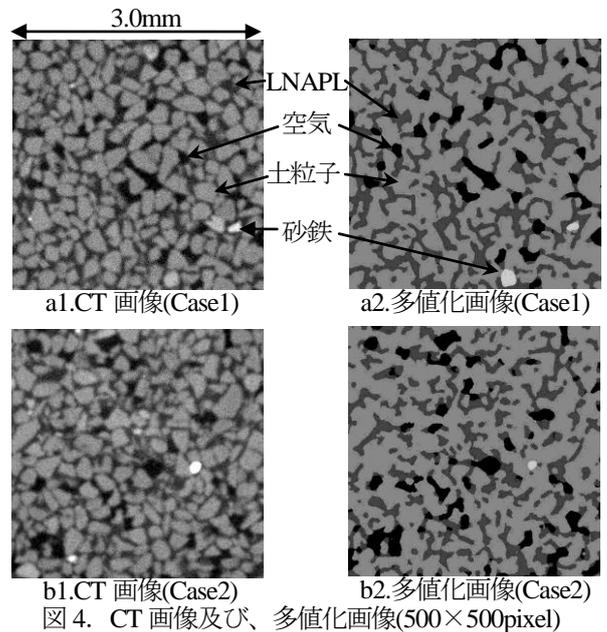


図4. CT画像及び、多値化画像(500 \times 500pixel)

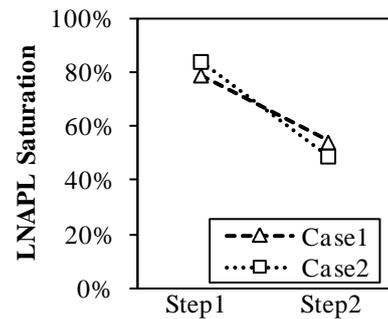


図5. 画像解析から得られたLNAPL飽和度

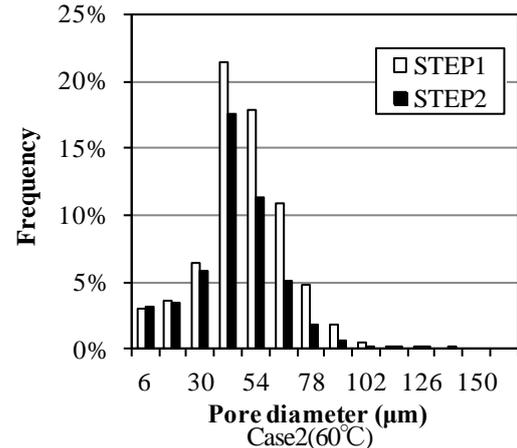
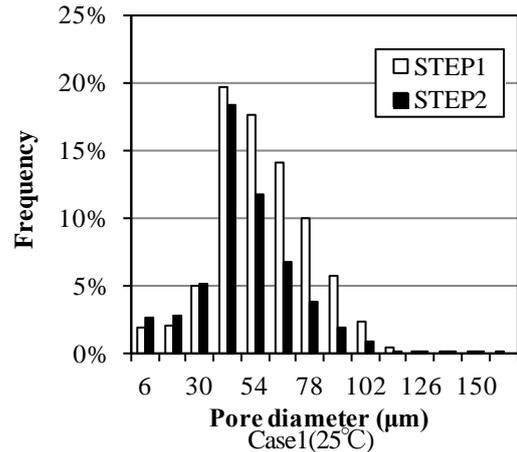


図6. LNAPLの孔隙径分布