

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 31 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760382

研究課題名(和文) X線CT法を用いた揮発性有機化合物による汚染地盤の浄化機構の解明に関する研究

研究課題名(英文) Remediation mechanism of contaminated ground by volatile organic compounds using X-ray CT method

研究代表者

椋木 俊文 (Mukunoki, Toshifumi)

熊本大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：30423651

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：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。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。

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浄化機構の解明を目的とすることである。本報告書では、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。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to understand the remediation mechanism of LNAPL contamination by heat fluids such as air and water. In this paper, developed a newly hot air injection device for micro fo-cused X-ray Computed Tomography(MXCT) scanner, and conducted the hot air injection experiment. And, it was evaluated and observed the remediation phenomenon by obtained by the Image analysis. Meanwhile, analyzed about heat transfer in the pore scale due to hot water injection by using the finite element method(FEM). From result of experiment and Image Analysis, Fluidity of LNAPL is increased by hot air injection, but it is trapped by capillary pressure, therefore flow phenomenon is prevented. However, volatilization efficiency of LNAPL was increased by hot air injection, and then remediation was proceeded. Result of Analysis indicates that Heat was spread by transmitting the soil particles in pore scale.

研究分野：土木

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：X線CT画像解析 地盤浄化 油汚染

1. 研究開始当初の背景

地下貯蔵タンクの老朽化に伴う腐食劣化などによる破損はガソリンやディーゼル燃料などの軽比重難水溶性液体(通称: LNAPL)の地盤中への流出をもたらす。LNAPLの地盤中への流出現象は重力と毛管圧力を支配的要因として水平方向、鉛直方向へと浸透していき、最終的にLNAPLは地下水面上に滞留する。浸透過程で不飽和帯中にトラップされた残留LNAPLや地下水面上に滞留したLNAPLは地下水位の変動や地下水流の移流の影響を受け帯水層にまで拡がり、一部では地下水への溶解や揮発性成分が間隙空気に広がる。また、間隙中にトラップされたLNAPLは難水溶性の性質から地下水への溶解現象は起きにくく、原液のまま不飽和帯中にトラップされ長期にわたる汚染拡散の支配的要因となることが認識されている。近年ではLNAPL原液汚染に対し、浄化モデルがいくつか提案されるようになってきている。LNAPL地盤汚染の浄化対策のうち掘削除去法は、汚染土を清浄な土と置き換えること確実かつ比較的短期間で浄化可能であることから多くの実績ある手法である。しかし、汚染が土壌深部まで進行している場合には費用が高騰することや環境負荷が大きいこと、掘削した汚染土壌の処理が困難であることなどの問題がある。一方、掘削除去と比べて浄化費用を抑えられる手法としては、掘削を行わない原位置浄化工法を用いるケースが増えている。

エアースパーキング法はLNAPL浄化技術の一つとして知られており、その浄化効果としては帯水層への通気によりLNAPLを空気流路まで移動させることでLNAPLの揮発効果によるLNAPLの土壌ガスとしての物理的回収を促進することが期待できる。長所としては比較的透水性の低い高濃

度汚染地盤に対しても効果的であることである⁵⁾。最近ではバイオレメディエーションなどと組み合わせられ、より浄化効率を向上させるための工法が開発されている。また加熱によるLNAPLの揮発性及び流動性を高めることに着目し、汚染土壌に対して蒸気や加熱空気を注入する工法も開発、実施されている。加熱によるLNAPLの浄化効率の向上が期待されている一方で、エアースパーキング法は空気注入に伴う汚染領域の拡大や正確な浄化予測が難しいなどそのメカニズムの解明は研究段階にある。より効果的かつ効率的な浄化を行うためには汚染地盤内における複雑な流体挙動を孔隙スケールにおいて把握する必要がある。

近年、ミクロン単位の分解能を有するマイクロフォーカス X 線 CT(Micro focused X-ray Computed Tomography: MXCT)装置を用いた地盤材料内部の可視化に関する研究が行われており、間隙内における流体挙動の把握においても MXCT の有効性が報告されている。MXCT から得られる画像データは物質の X 線吸収量をもとにつくられる。画像データをもとに物質の同定を行うことは困難であるが、地盤材料内に含まれる物質の種類が水、空気、土などに限られていることから、適切な画像処理を施すことによって、地盤材料内部の孔隙構造や粒子構造、流体の残留分布を高精度に 3 次元的な評価が可能となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、MXCT を用いて高温空気圧入に伴う孔隙スケールにおける LNAPL の流動及び揮発現象を可視化し、高温空気圧入に伴う LNAPL 汚染砂地盤の浄化機構を解明することである。著者が所属する研究室では、2011 年度に MXCT 撮影用の一次元流動実験装置と得られた CT 画像を定量的に評価する画像解析手法を開発した。本研究では、一次元流動実験装置

を高温空気の圧入ができるよう改良を行った。この装置を用いて、LNAPL 汚染地盤を想定した供試体に対して異なる温度の空気圧入実験を実施し、その供試体の X 線 CT 撮影を実施し、供試体中に残存する LNAPL の残留分布を定量評価する。また、得られた CT 画像を用いて有限要素法による熱 非圧縮流体の熱流動に関する連成流動解析を実施し、孔隙スケールにおける伝熱特性の評価を行った。

3. 研究の方法

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 1.60kg/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、体積が 14.61cm^3 である。したがって、試料の孔隙体積(Pore Volume: PV)は、5.74ml となっている。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、60 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。

実験は供試体作成後、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、流体の圧入後にそれぞれマイクロ 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。撮影領域は供試体中

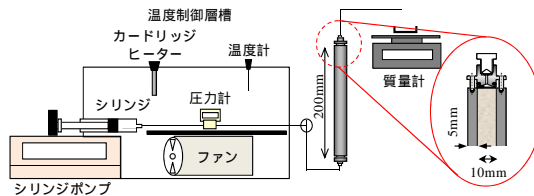


図 1 実験装置

表 1 実験ケース

	Injection rate	Air temperature	logC _a	logM
Case1	50(ml/h)	25()	-7.2	-1.74
Case2		60()		

表 2 使用流体の物性

Component	Isoparaffin
Density (t/m ³)	0.750
Viscosity (mP·s)	1.29
Surface tension (mN/m)	24.68
Interfacial tension with water (mN/m)	54.5
Contact angle (°)	7.2

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。

4. 研究成果

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

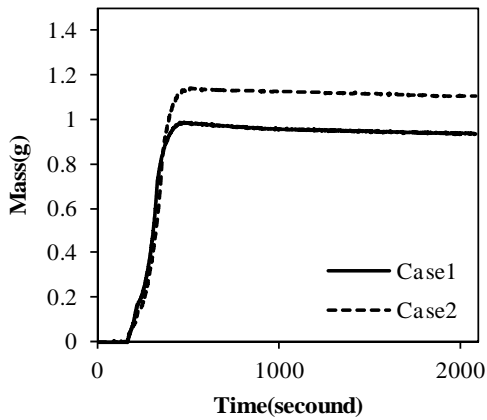


図2 空気圧入時におけるLNAPL回収量

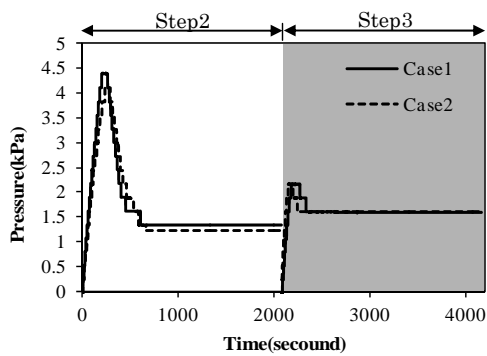
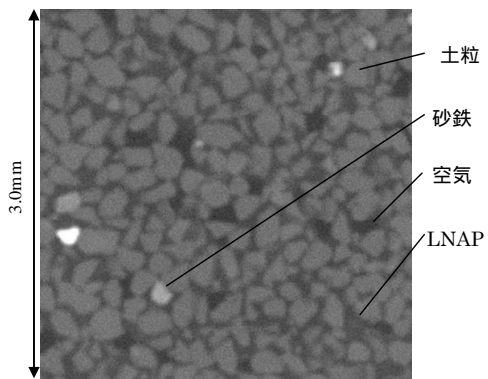
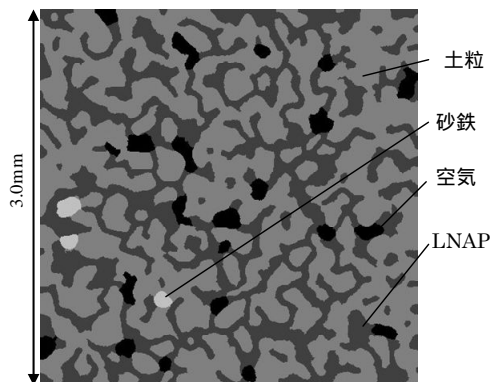


図3 空気圧入時における圧力の経時変化



(a) 原画像



(b) 画像処理後の画像

図4 空気注入後のマイクロCT画像 (Case 1)

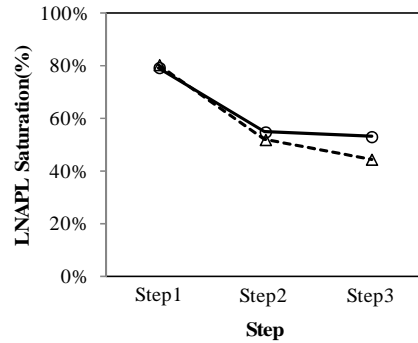
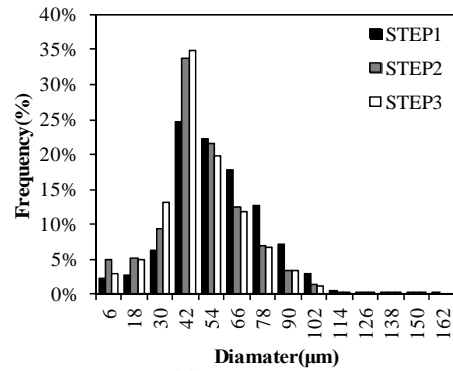
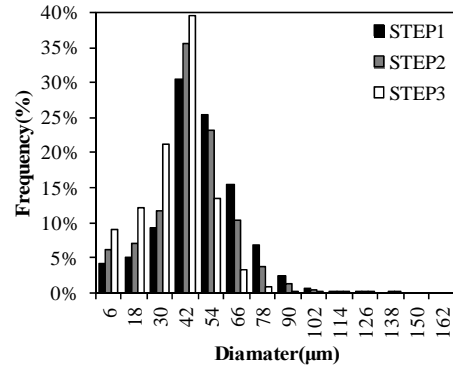


図5 LNAPL飽和度の推移



(a) Case 1



(b) Case 2

図6 LNAPL 3次元孔隙分布

像に対しても Marker-Controlled-Watershed 法を用いた多値化処理を行った。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。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

- 1) Masaji Kato, Manabu Takahashi, Satoru Kawasaki, Toshifumi Mukunoki, Katsuhiko Kaneko (2013), Evaluation of Porosity and Its Variation in Porous Materials Using Microfocus X-ray Computed Tomography Considering the Partial Volume Effect, Vol. 54, No. 9, 1678-1685.(査読有)

[学会発表](計6件)

- 1) 塚本直己, 椋木俊文, 吉永徹, 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, 平成25年度土木学会西部支部年次研究発表会, CD-R, 2014/3/7(福岡大学).
- 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, 2014/11/21-22(沖縄県市町村自治会館).
- 3) T. Mukunoki, C. Nagai, Y. Fujiki, A.J. Tinet and K. Mikami (2013), Evaluation of oil contamination in porous media by X-ray CT image analysis and LBM simulation, Proc. of the 7th International Joint Symposium on Problematic Soils and Geoenvironment in Asia, pp.63-66, 2014/11/21-22(沖縄県市町村自治会館)..
- 4) T. Mukunoki and K. Mikami (2013), Study on mechanism of two-phase flow in porous media using X-ray CT Image Analysis, Proc. of the 18th International Conference of Soil Mechanics and Ge

otechnical Engineering, TC106 selected paper, pp.1163-1166, 2014/9/2-5, Paris in France,.

- 5) T. Mukunoki, N. Tsukamoto, Y. Fujiki and Y. Obara (2013), Visualization of residual LNAPL in sandy soil using X-ray CT scanners, 12th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineer, pp.57-63, Seoul in Korea, 2014/5/31-6/1.
- 6) Y. Fujiki, A.J. Tinet, T. Mukunoki, K. Mikami, and T. Sato(2013), Flow simulation of LNAPL sweeping out due to water injecting in porous material using LBM, 12th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineer, pp.64-70, Seoul in Korea, 2014/5/31-6/1.

[図書](計0件)

[産業財産権]
出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

- (1) 研究代表者 椋木俊文
(Toshifumi Mukunoki)
熊本大学・自然科学研究科・准教授
研究者番号: 30423651
- (2) 研究分担者
()
研究者番号:
- (3) 連携研究者
()
研究者番号: