

機関番号：17401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760375

研究課題名(和文) 油の地盤汚染および原位置浄化機構の解明に関する研究

研究課題名(英文) Study on mechanism of Oil contamination and remediation in the ground

研究代表者

椋木 俊文 (MUKUNOKI TOSHIFUMI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：30423651

研究成果の概要(和文)：

水よりも密度が小さい有機溶剤は LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquid) が、地下水面の上部に滞留し、地下水の動きに影響されながら汚染域を拡大する問題が顕在化してきた。汚染過程において LNAPL が不飽和帯にどのように浸透し、また浄化過程においてどの程度浄化され、そして残留するのかを把握することは重要課題であり、模型実験による可視化や数値解析による現象解明の研究が進められている。本研究では、まず LNAPL の地盤汚染機構を解明することを目的として、LNAPL の三次元浸透挙動 X 線 CT を用いて非破壊で可視化し、その定量的評価を試みた。本研究では、X 線 CT 撮影によって CT 値を求める一方で、X 線 CT 撮影後に地盤内の LNAPL 飽和度の測定を行い、CT 値と LNAPL 飽和度の関係を求めた。それにより、X 線 CT 画像上の CT 値の分布から LNAPL 飽和度の分布を求めることを可能とした。その結果、地盤内での LNAPL の浸透挙動は水飽和度の影響を受け、特に水飽和度 20%以上の深さへの浸透は抑制され、水飽和度が小さい地盤浅部で水平方向への浸透が発達することが分かった。また、高飽和度の LNAPL の浸透領域も地盤浅部に形成されることが分かった。

研究成果の概要(英文)：

The migration of Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) in dry/wet sandy soils was visualized by the model tests in plane strain condition and using X-ray Computed Tomography (CT) method. To evaluate the saturation degree of water or LNAPL in the sandy soil, new method to decide the threshold value in X-ray CT image was proposed in this paper. It was concluded that saturation degree and grain property of sandy soil changed the migration mechanism of LNAPL, and the distribution form of liquids differed by $S-p$ relation of liquids. Sandy soil layer with saturation degree at least more than 20 % inhibited the vertical infiltration of LNAPL. More amount of water than LNAPL was retained in near-surface. LNAPL permeation developed around injection point in well graded materials.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：土壌汚染防止・浄化、X線、土壌圏現象、可視化、環境技術

1. 研究開始当初の背景

近年、有機溶剤の輸送や貯蔵施設における地盤汚染問題が顕在化している。有機溶剤は、複数の炭化水素分子から構成される人工的に作られた有害物質である。さまざまな地盤汚染物質の中でも、石油製品の流通量は、他の汚染物質の製造量に比べて極端に多く、海外では油の輸送や貯蔵施設における地盤・地下水汚染事故が多発している。土壌・地下水中に油を含有することにより、基準値を超えた濃度の有害物質が公共用水域に溶出することや人間の健康被害が懸念されるため、その浄化対策が急務となっている。

油は、常温で液体かつ水に不溶であり、また水より高粘性かつ軽比重という特徴を有する難水溶性有機溶剤（または揮発性有機溶剤）に分類される。その地盤内輸送機構は、油は地下水層まで到達の後、ほぼ地下水表面に貯留し、やがて地下水の挙動に影響を受けて、地盤内を輸送する。地下水周辺の地盤は飽和度が高いため、油と水の二流体間の密度差、粘性差、水と油の境界面に働く界面張力、間隙水中への拡散と土粒子への吸着、そして微生物による分解作用を伴いながら油の原液が輸送すると推測される。油による地盤汚染を効率的に浄化する手法を開発するためには、これらの二相流体の水理特性を把握することが重要である。しかしながら現状として、地盤内の油の輸送機構を把握しないまま浄化剤を地盤に注入しており、地盤浄化がどの程度地盤内で行われているのかという点については未解明という現状がある。油の地盤内挙動においては、空気間隙内に油が侵入するケース、間隙水を押し出しながら侵入するケースが想定できるが、いずれにおいてはその領域において土の湿潤密度が変化する。地盤内の密度分布を非破壊で評価する技術として、近年X線CT法の適用が注目されつつある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、油汚染地盤問題を対象として、地盤材料内部における油と油の汚染地盤中の浄化剤の3次元輸送挙動をX線CT法を用いて可視化し、多相流数値解析による定量的評価を行うとともに、工学的用途に応じて、原位置油浄化・修復技術を創生することである。本研究期間では、特に産業用X線CTスキャナを用いて、LNAPL漏洩模型実験を実施し、地盤材料内部の残留状態を定量評価する手法の開発とその評価を試みた。

3. 研究の方法

以下に、本研究の流れを記す。

(1) X線CT用油浸透実験装置の開発およびその性能評価

(2) X線CT用水分特性評価試験装置の開発およびその性能評価

(3) (1), (2)で開発した装置を用いた油の浸透実験の実施および模型地盤のX線CT撮影

(4) X線CT画像解析による油の浸透領域の定量化

研究期間中では、(1) - (4)について取り組んだ。X線CT室内域で実施可能なあらゆる実験は、1) X線の物理特性、2) 撮影領域内の空間的制限および3) 被検体テーブルの積載重量の制限によって影響を受ける。これらの点をすべてクリアしたX線CT用油注入実験装置を開発し、まず装置としての機能性を確認・評価した。以下に具体的な実験方法について説明する。

図-1は実験装置の概略図である。本実験



写真-1 CT室内に設置された模型実験装置

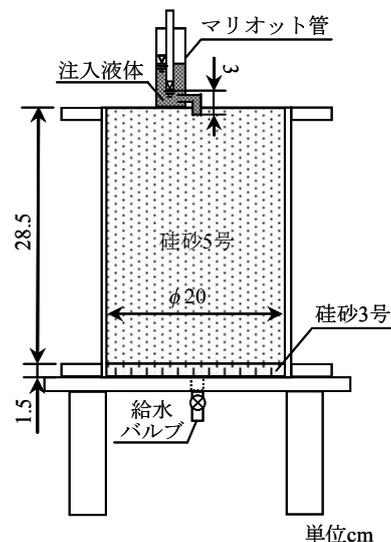


図-1 実験概要図

に用いた土槽は高さ 30.0 cm、直径 20.0 cm の円筒形透明アクリル製である。土槽底部から 1.5 cm の高さに帯水層として硅砂 3 号の層を突き固めによって作製し、その上部の 28.5 cm の高さに硅砂 5 号の層を空中落下法によって作製した。実験ケースは表 - 1 に示すとおりである。絶乾状態に LNAPL と水がそれぞれ注入される条件 (Case 1, Case2), 毛管水帯に LNAPL が注入される条件 (Case 3) で実験を実施した。実験手順として、最初に初期地盤の X 線 CT 撮影を地盤表面から底部まで 1.0 cm 間隔で行った。その後、マリOTT管を用いて LNAPL または水を位置水頭 3 cm で 50 mL 注入し、地盤内の注入液体の挙動が定常状態になるまで地盤を 1 時間放置した。そして、地盤表面から LNAPL の浸透領域が確認されない深さまで、液体注入後の地盤の X 線 CT 撮影を行った。液体の注入とその後の X 線 CT 撮影はもう一巡繰り返す、累積 100 mL の液体を注入した。表 - 2 は実験に用いた液体の物性を示したものである。

X 線 CT 撮影では、撮影地盤断面上の湿潤密度に比例する CT 値というパラメータが得られる²⁾。本研究では、図 - 2 のように、CT 値と飽和度の関係を示す検量線を定義し、X 線 CT 画像上の CT 値の分布から注入液体の飽和度の分布を求めることを可能とした。

4. 研究成果

(1) 実験結果

図 - 3 は LNAPL および水の累積 100 mL 注入時における X 線 CT 画像である。図 - 3 (a) より Case 1 では地盤浅部から深部にかけて LNAPL の浸透領域に大きな変化はないが、地盤浅部より深部で LNAPL 飽和度が広く分布している。また図 - 3 (b) より水を注入した際には、飽和度が 25%以上の領域が Case 1 に比べて広く確認される。しかし、深さ 10.0 cm には浸透領域が確認されず、Case 1 より浅部にしか水が浸透していないことが分かる。一方、図 - 3 (c) より Case 2 では地盤浅部で LNAPL の浸透面積と飽和度が共に大きく分布しており、地盤深部の深さ 10.0 cm では LNAPL の浸透領域が減少している。

図 - 4 は LNAPL および水累積 100 mL 注入時における X 線 CT 画像から求めた注入液体の浸透領域の面積分布である。浸透面積は注入液体の飽和度毎の面積と飽和度全体における面積を示している。また、図 - 4 (c) には Case 3 の湿潤地盤の初期の水飽和度分布も併記している。図 - 4 (a) の Case 1 の乾燥地盤条件では、LNAPL 飽和度 25%以上の領域が深さ 6.0cm より深部で形成されている。図 - 4 (b) の Case 2 の水を注入した際には、水飽和度 25%以上の領域が、同じ乾燥地盤に LNAPL を注入した Case 1 よりも、地盤浅部で広く形成している。これは、LNAPL-空気間

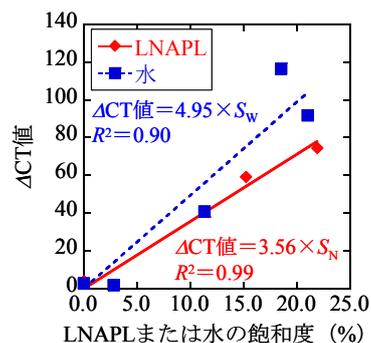


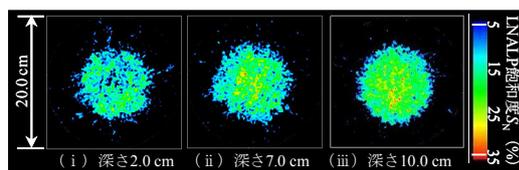
図 - 2 CT 値と飽和度の関係

表 - 1 実験ケース

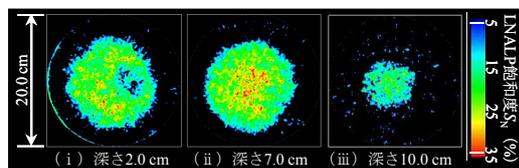
	地盤材料	乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	初期地盤の含水状態	注入液体
Case 1	硅砂 5号	1.54	乾燥	LNAPL
Case 2				水
Case 3			湿潤	LNAPL

表 - 2 実験に用いた液体の物性 (温度 15°C)

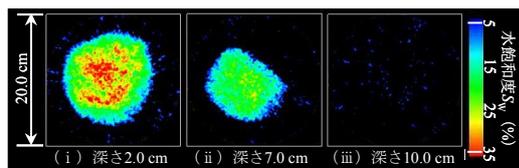
	水	LNAPL
密度 ρ (Mg/m ³)	0.999	0.750
粘性係数 μ (mPa·s)	1.138	1.40
表面張力 σ (mN/m)	73.48	22.17
界面張力 σ_{nw} (mN/m)		36.76



(a) Case 1: 乾燥地盤, LNAPL 注入



(b) Case 2: 乾燥地盤, 水注入



(c) Case 3: 湿潤地盤, LNAPL 注入

図 - 3 LNAPL および水累積 100 mL 注入時における X 線 CT 画像

と水-空気間の毛管圧力の違いが影響すると考えられる。表-2より温度15°CでのLNAPLの表面張力は22.17 mN/mであり、また同温度での水の表面張力は73.48 mN/mである。水の表面張力はLNAPLより3.3倍大きいため、空気との毛管圧力も水の方が大きく発揮されたと考えられる。そのため、浸透経路に保持される液体の量も水の方が多く、Case 2では地盤浅部で高飽和度の領域が広く形成されたと考えられる。

次に図-4(c)のCase 3の湿潤地盤では、深さ2.0~8.0 cmでLNAPLの浸透面積が広く分布しており、LNAPL飽和度25%以上の領域もこの範囲で形成されている。しかし、深さ8.0 cmより深部では浸透面積が著しく減少している。Case 3では深さ8.0 cmより深部は初期地盤の水飽和度が20%以上で分布している。これは、水飽和度が20%以上の範囲ではLNAPLの浸透に作用する間隙水との界面張力の影響が大きくなるため、深さ方向への浸透が抑制され、水飽和度が20%以下の地盤浅部でLNAPLの水平方向への浸透が発達したと考えられる。また、Case 3では地盤深部への浸透を抑制されたLNAPLが地盤浅部に多く滞留したため、Case 1よりも浅い範囲でLNAPL飽和度25%以上の領域が形成されたと考えられる。

(2) まとめ

本研究では、砂質系地盤におけるLNAPLの浸透機構を二次元断面浸透実験とX線CT法を用いた実験の2通りの方法で可視化することにより、定性的かつ定量的評価を行った。以下に本研究によって得られた結論を列挙する。

① X線CT法では適切な画像処理を行うことによって、X線CT画像からLNAPLの浸透面積や飽和度分布を求めることが可能なため、LNAPLの三次元浸透機構を解明する上で有効な手法である。

② 乾燥地盤と湿潤地盤におけるLNAPLの浸透挙動は大きく異なる。水飽和度が20%程度の不飽和帯においても、LNAPLの浸透挙動はその領域に含まれる間隙水の影響により、それより深さ方向への浸透を抑制され、水飽和度が20%以下の領域で水平方向への浸透を卓越させる。

③ 乾燥地盤において、LNAPLは深さ方向への浸透を卓越させ、地盤深部で浸透面積を発達させる。一方、水は地盤の浅い部分で浸透を卓越させ、その領域で浸透面積を発達させる。また、水はLNAPLよりも高飽和度の領域を広く形成する。

④ 地盤の粒度分布によってLNAPLの浸透挙動は大きく異なる。分級された土である硅砂5号を用いた地盤では、比水分容量が大きいいため、LNAPL飽和度の変化が大きい方向である注入点から離れた深さ方向へのLNAPLの浸透が発達する。一方、粒度分布が広い山砂を材料とする地盤では、比水分容量が小さいため、注入点付近の地盤の浅い部分でLNAPLの浸透が発達する。

今後の課題としては、以下のことが挙げられる。まず、X線CT画像上に表示されたLNAPLの浸透領域と実際のLNAPLの浸透領域の整合性の確認を行い、X線CT法による可視化の精度を検証する必要がある。また、X線CT画像を三次元再構成することによって、LNAPLの三次元の浸透形状や体積などの情報を取得することが可能となる。そして、多相流現象について既存のモデルを用いた数値解析を行い、その結果と本研究によって得られた実験結果を比較・検討することにより、既存のモデルの妥当性の検証に応用することが期待される。

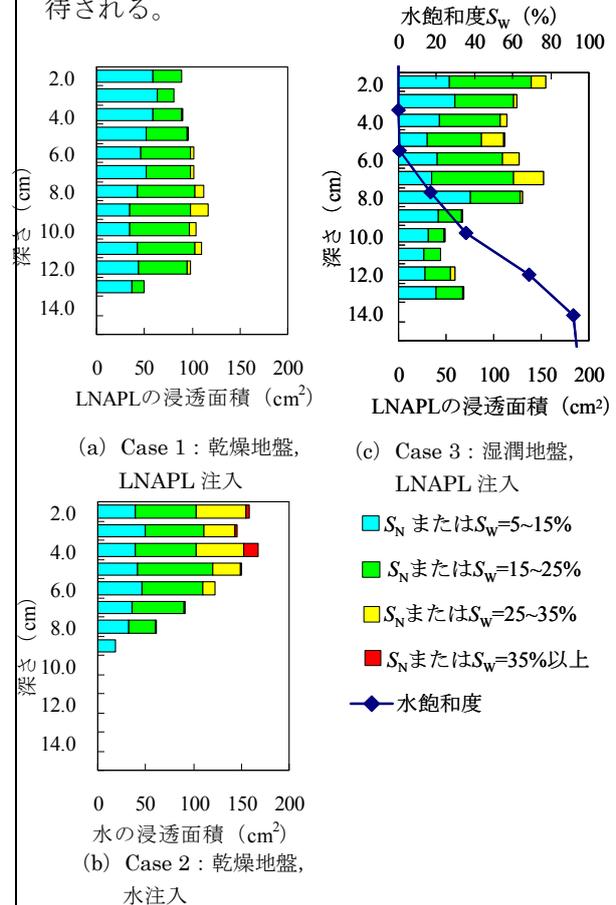


図-4 LNAPLおよび水累積100 mL注入時における液体の浸透面積分布

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2件)

- 1) 椋木俊文, 三上和昭, 佐藤宇紘 (2011), “X線CTデータによる間隙構造の定量化と地盤内多相流汚染問題への適用性”, 第9回環境地盤工学シンポジウム論文集 (掲載予定). 査読有.
- 2) T. Mukunoki, K. Sugimura and K. Mikami (2010), Visualization of LNAPL contamination in sandy soil using X-ray CT scanner, Proc. of International Symposium on Earth Science and Technology 2010, pp.153-158. 査読有.

[学会発表] (計6件)

- 1) K. Sugimura, T. Mukunoki, D. Takano, C. Viggiani, Visualization of LNAPLs distribution in sandy soil using micro-CT scanner, 平成22年度土木学会西部支部研究発表会, pp.347-348, 九州工業大学2011/3/5.
- 2) 椋木俊文, 植田貴俊, X線CTを用いた砂地盤中を輸送するLNAPLの可視化実験, 2010年度日本機械学会年次大会 Vol.7, pp.129-130, 名古屋工業大学2010, 9/6.
- 3) 杉村賢一, 椋木俊文, 砂質土の粒度特性がLNAPLの浸透・保持容量に与える影響評価について, 第65回土木学会全国大会, 第三部門, pp.264-265, 北海道大学2010, 9/3.
- 4) 椋木俊文, 植田貴俊, 杉村賢一: X線CTを用いた砂地盤中におけるLNAPLの輸送現象の可視化, 第45回地盤工学研究発表会, pp.1943-1944, 愛媛大学2010.8/16.
- 5) 三上和昭, 椋木俊文, 植田貴俊, 通気帯におけるLNAPL原液浸透挙動の数値解析, 平成21年度土木学会西部支部研究発表会, pp.533-534, 崇城大学2010/3/5.
- 6) 杉村賢一, 椋木俊文, 松本英敏, 植田貴俊, 不飽和地盤におけるLNAPLの湿潤特性の評価に関する基礎的研究, 平成21年度土木学会西部支部研究発表会, pp.531-532, 崇城大学2010/3/5.

6. 研究組織

(1)研究代表者

椋木 俊文 (MUKUNOKI TOSHIFUMI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号: 30423651