

界面活性剤を用いた油汚染地盤の原位置洗浄法の研究(その3)

岡田正明^{*1} 仲沢武志
磯村渉^{*1} 近藤敏仁^{*1}
野口俊太郎^{*1}

概 要

近年の土壌汚染状況対策実態調査¹⁾において、油汚染の調査件数は、増加の傾向にある。筆者らは、高濃度の油汚染地盤を修復する手段として原位置洗浄法の開発を研究している。

原位置洗浄技術は、サイトの油、土の特性に合わせた洗浄剤の配合、浄化井戸の配置、の制御、回収した排水の処理などの技術により構成される。中でも、注入・揚水および地下水位の制御は、原位置洗浄において重要な地位を占める技術である。

本研究では、大規模の実験用土槽を用いて、注入井戸と揚水井戸の間における油の動きを視覚的に捉えると共に、回収排水および浄化前後の土壌の油分分析を行い、油の収支を計算し、洗浄性能を評価した。軽油による汚染地盤を想定した。

A study on in-situ soil flushing method using surfactant for oil-contaminated grounds

Abstract

According to records of groundwater and soil pollution investigation¹⁾, the number of soil investigations for oil-contaminated sites has continued to climb in recent years.

Authors have studied the in situ flushing, as a means to remediate high concentrations of oil in soil. Surfactant flushing consists of several technological components, the custom-made surfactant formulation, the layout of remediation wells, the control of injection/recovery water volumes and groundwater levels, and the treatment of recovery water. In particular, the control of groundwater levels by injection and pumping is important in order to conduct the remediation.

In this study, by using an actual-size soil tank and simulated diesel fuel contaminated ground, we looked at oil removal between an injection well and a recovery well, and evaluated the performance of the surfactant flushing method according to recovery water and soil sample analysis of oil concentration, and oil mass balance.

キーワード: 軽油 土壌浄化 原位置
界面活性剤 土槽試験

^{*1} 都市再生推進本部 土壌環境部

§1. はじめに

1.1 背景

土壤汚染対策法の一部を改正する法律が平成 21 年 4 月 17 日に成立した。施行後には、一定規模以上の土地の形質変更に対する調査が必要になる。油汚染は、土壤汚染対策法の規制対象ではないが、製造・加工業をはじめとする多業種の事業所敷地で報告されており、有害物質と同様に調査の拡大が予想される。また、平成 19 年度の油類による土壤汚染調査の件数は 587 件(前年比(前年比 1.18 倍)¹⁾で、増加の傾向にあることから、油汚染浄化に対するニーズは、今後高まっていくと考えられる。

1.2 原位置洗浄技術の概要

油汚染地盤に対する原位置洗浄技術は、界面活性剤を汚染地盤中に注入し、汚染物質(油)と土壤粒子との吸着面に作用して、土壤の浄化を促進する浄化工法である²⁾。

筆者らは、高濃度油汚染に対する効果的な浄化方法として原位置洗浄技術の研究を行ってきた。使用する洗浄液を構成する界面活性剤の配合は、対象油種に合わせて最適化する。これまで、実サイト燃料油、市販の軽油、ガソリン、エンジンオイルについてラボレベルでの洗浄試験結果を報告した^{2)、3)、4)}。80%~99%の除去率を得ている。地盤中の油溜まりの除去や燃料油を対象に 1,000mg/kg 以下まで浄化することを検討中である。

一方、原位置洗浄技術は、実地盤での施工方法の開発が必要である。浄化井戸の設置、注入と揚水および地下水位の制御、そのための設備、排水のモニタリングおよび浄化完了確認、揚水井戸から回収した排水の処理などが上げられる。中でも対象とする汚染層に洗浄剤を供給し、油と界面活性剤を的確に回収する方法、すなわち注入・揚水と地下水位の制御方法が重要である。

§2. 本試験の目的

軽油による地盤汚染を想定し、軽油洗浄用に最適化した洗浄剤を用いて実験土槽による洗浄試験を行った。原位置洗浄によって残留油分濃度 1,000mg/kg 以下に浄化することを浄化目標とした。また、洗浄の過程で土槽側面に現れる油の移動状況を観察し、水量・水位と油の動きとの関係について知見を得ること、揚水井戸からの排水と浄化前後の

土壤試料の油分分析を行い、洗浄性能を総合的に評価することを目的とした。

§3. 試験概要

原位置洗浄法の手順を図1に示す。本研究では約 0.6m³容量(0.39×1.8×0.9(m))の鋼製土槽を用いた。浜岡砂を槽底部から高さ 30cm の位置まで充填し、水で飽和させた。ズダンIVで染色した軽油を約 60,000mg/kg となるようにパレット上で混合し、10cm の厚みで充填した後、浜岡砂で覆土して 90cm 厚の層を作成した。土槽の長辺方向(1.8m)の両端にφ50mm の塩ビパイプを洗浄剤の注入井戸と回収のための揚水井戸として設置した。

事前に、実験室内で行った試験³⁾により洗浄剤の使用量を決め、注入井戸より供給した。その後、水道水を注入しリンスを行った。揚水井戸では、連続的な吸引により油を含む排水を回収した。

約1ヶ月の工程で洗浄を行った後、土槽中の供試土を層状に掘削・回収して残留油分濃度の分析を行った。

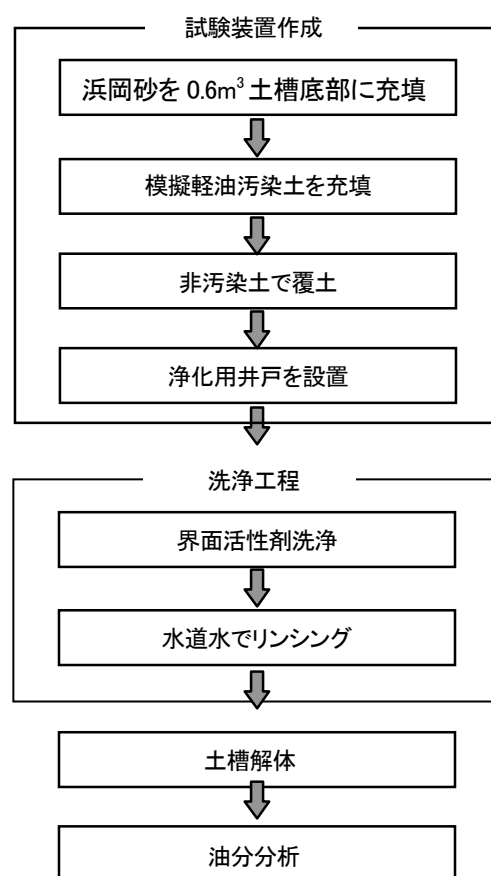


図1 試験の手順

§4. 土槽試験

4.1 方法

1) 供試軽油

市販軽油をズダンIVで染色したもの(以下、染色軽油と記す)を用いた。

2) 供試砂および模擬汚染土

浜岡砂を用いた。模擬汚染土の調製は、染色軽油8Lを浜岡砂70Lに加えた。分量を3回に分け、80L練り皿内で攪拌混合した。

3) 界面活性剤

市販されている国産界面活性剤の中から洗浄性、生分解性が高いものを選択し、軽油用の洗浄液を調製した。

4) 土槽試験装置

土槽は、 $0.39 \times 1.8 \times 0.9$ (m)の鋼製槽で、観察用に両側面をアクリル板(1.8×0.9 (m))とし、鋼製枠との接触面を防水加工したものを用いた。事前に水張り試験を行い、1晩放置しても水位の低下がないことを確認した。

供試砂の充填方法を以下に記す。軽油を添加していない浜岡砂を槽底部から高さ 30cm の位置まで充填し、水で飽和させた。染色軽油を混合した模擬汚染土を、図2に示す $0.39 \times 1.8 \times 0.1$ (m)の範囲に充填した後、軽油を添加していない浜岡砂で槽上部を覆土して締め固めを行い、90cm 厚の土槽を作成した。図2に示すように帯状に濃い赤色の汚染範囲(以下、汚染層と記す)は、目視で識別できる。土槽の長辺方向(1.8m)の両端より 5cm の位置にハンドオーガーで削孔し、 $\phi 50$ mm の塩ビパイプを洗浄液の注入井戸及び回収のための揚水井戸として設置した。

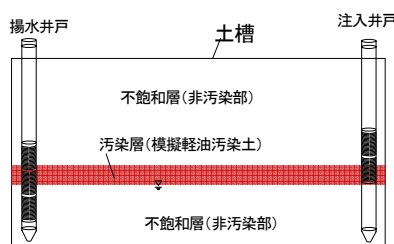


図2 井戸及び汚染層配置図

5) 浄化装置

浄化装置は、洗浄液調製槽、洗浄剤注入装置、吸引揚水装置及び排水処理槽より構成した。平面配置を図3に示す。

洗浄液調製槽は、攪拌器を付けた樹脂製タンクで、洗浄液の調製を行うと共に洗浄期間において洗浄液の貯留を行った。

注入装置は、ダイヤフラム式の薬液注入ポンプおよび

注入配管、フローメーターより構成した。ポンプにより送られた洗浄液は、注入井戸の孔口より土槽に供給される。

吸引装置は、ポンプにより耐圧ガラスビン内を減圧し、その耐圧ガラスビンから吸引管を揚水井戸内に装填して既定水位にて吸引揚水する装置とした。揚水された排水は耐圧ガラスビンに溜まり、随時サンプリングおよび排水処理槽への排出を行う手順とした。

表1 土槽充填条件

項目	内容
土槽容積	0.6m^3 ($0.39 \times 1.8 \times 0.9$ (m))
供試土	浜岡砂
汚染層体積	70L
非汚染部体積	500L
軽油添加量	8L (浜岡砂 70L に混合)

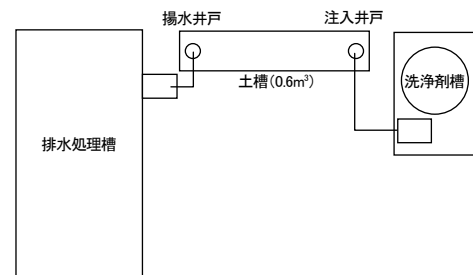


図3 試験装置平面配置図

6) 洗浄操作

始めに通水試験を行った。水道水の注入と吸引揚水を開始し、注入井戸の水位および揚水井戸の水位の安定を確認し、排水に油の混入が認められなくなってから、洗浄液の注入を開始した。

洗浄液の使用量は、事前のラボレベル試験³⁾結果から汚染層が洗浄液で満たされる量とした。洗浄にともなって進行する土槽側面のアクリル板面における染色軽油の移動状況を記録し、揚水井戸から排出される排水のサンプリングを行った。

所定量の洗浄液を注入した後、水道水でリンスを行った。アクリル板面で汚染層の赤色が認められなくなり、揚水井戸からの排水が清澄になった時点で洗浄を終了とした。

7) 供試土の回収

洗浄終了後、土槽内の供試土の回収を行った。注入井戸から揚水井戸までの間を6層 $\times$ 8区=48試料に区分して土壌試料を採取した。

8) 分析

採取した土壌試料は、1試料ずつ均質化し、10.0g を採取して高速溶媒抽出器で油分を抽出し、ノルマルヘキ

サン抽出物質 (JIS K 0102 24) の測定を行った。また、回収した排水についてもノルマルヘキサン抽出物質の測定を行い、排水として回収された油分量を算定した。

4.2 結果

1) 洗浄の工程

① 通水試験

約 30L の水道水を通水し、揚水井戸の水位を孔口-0.6m に保って吸引揚水した。一部染色軽油が回収されたが、その後水だけが回収されるようになった。

揚水井戸、注入井戸間の水位差を一定に保ち、定常状態に達したときの水位差、流量から透水係数は、 $1.4 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ と算出した。

② 洗浄液注入およびリンシング

洗浄液の注入を24時間連続で4日間行い、その後は昼間のみの運転とした。注入開始直後は、140mL/min 以上の注入が可能であったが、徐々に孔内水位が上昇した。リンシングに切り替えて孔内水位の低下後再び洗浄液を注入することで洗浄を継続した。洗浄作業状況を図4に示す。



図4 洗浄作業状況

2) 洗浄過程における土槽アクリル板面の染色軽油移動状況

洗浄の進行に伴って、汚染層の赤色部分が揚水井戸側に移動していく経過が観察された。記録写真を図5に示す。アクリル板面で視認された汚染層の濃い赤色部分の面積は、3日目にはほぼ 85% が消失した。これは界面活性剤が通過したことを示している。一方、汚染層上部の非汚染層に薄いピンク色の範囲が界面活性剤の通過後に認められた。これは、界面活性剤と染色軽油が混合した乳化物の拡散を示している。その後の洗浄によって、汚染層の範囲は10日目に 95% 以下となり、乳化物の拡散範囲も揚水井戸側に移動して 17 日目にはわずかに筋状に認められる程度となった。

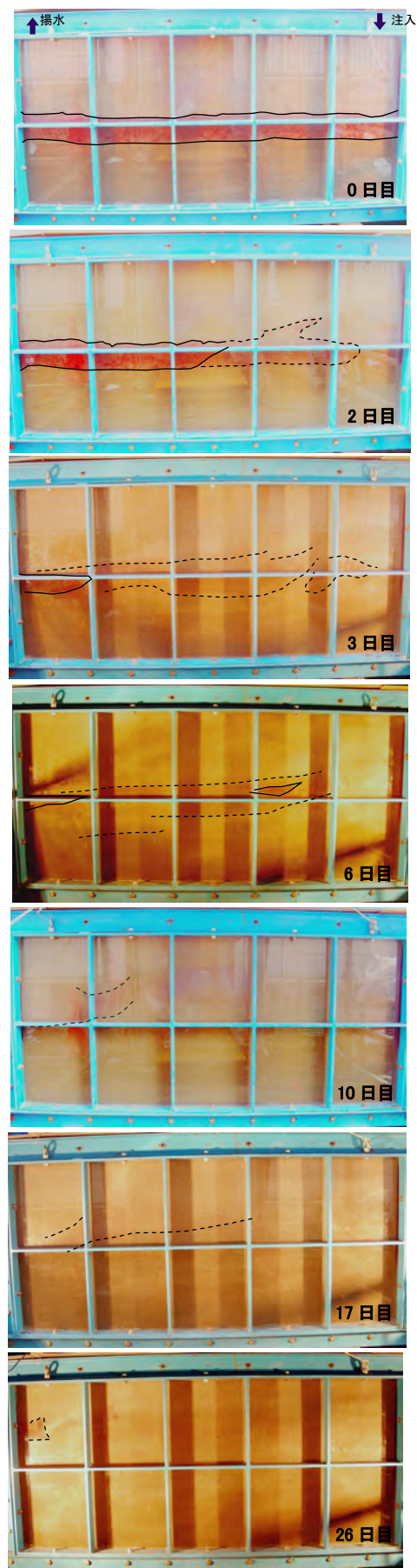


図5 土槽側面における染色軽油分布の変化
土槽面の実線は、汚染層の残留部分を、点線は乳化油分の拡散範囲を示す。

水道水によるリンシングの結果、26 日目には、乳化物の拡散範囲も縮小したが、揚水井戸の裏側のデッドスペースには残った。

3) 排水の排出状況

排水のサンプリング状況を図6に示す。回収された排水中に含まれるフリープロダクトは、静置することで浮上分離した。油の回収量が比較的多かったのは図6に示すように2～4日目、3日目にピークを認めた。この傾向は、土槽の亚克力板面での汚染層の濃い赤色部分が消失していく過程（図5）と一致している。



図6 排水のサンプリング状況

4) 供試土の回収

供試土の回収状況を図7に示す。表層では油膜は認められなかったが、非汚染層においては、一部油膜油臭が認められた。当初の汚染層においては油膜、油臭は軽微であった。

5) 土壌試料の分析

分析結果による浄化前、浄化後の油の分布を図8に示す。また、浄化前後の汚染層のノルマルヘキサン抽出物質質量（平均値）および非汚染層のノルマルヘキサン抽出物質質量（平均値）を表2に示す。汚染層濃度は浄化後には平均440mg/kgまで低下した。一方、乳化が拡散した非汚染層は、平均3,700mg/kgであった。汚染層および非汚染層を含む土槽中平均値は、浄化前11,800mg/kg、浄化後1,870mg/kg、除去率84%であった。



図7 供試土回収状況

表2 土壌試料の分析結果

項目	ノルマルヘキサン抽出物質 (mg/kg)※ ¹		除去率 (%)
	初期濃度	洗浄後	
油汚染層(平均)	59,000※ ²	440	99
非汚染部(平均)	(<100)※ ³	3,700	—
土槽中平均値	11800※ ⁴	1,870	84

※¹: 湿潤土当たりの濃度

※²: 土槽の充填前に採取した模擬汚染土の分析結果

※³: 非汚染土の分析結果

※⁴: ※²の値による計算値

6) 排水試料の分析による油回収量の算定

排水試料のノルマルヘキサン抽出物質濃度は、28,000～1,200mg/Lであった。排水分析結果による染色軽油の回収量（（排水中油分濃度×排水量）の累計）を表3に示す。

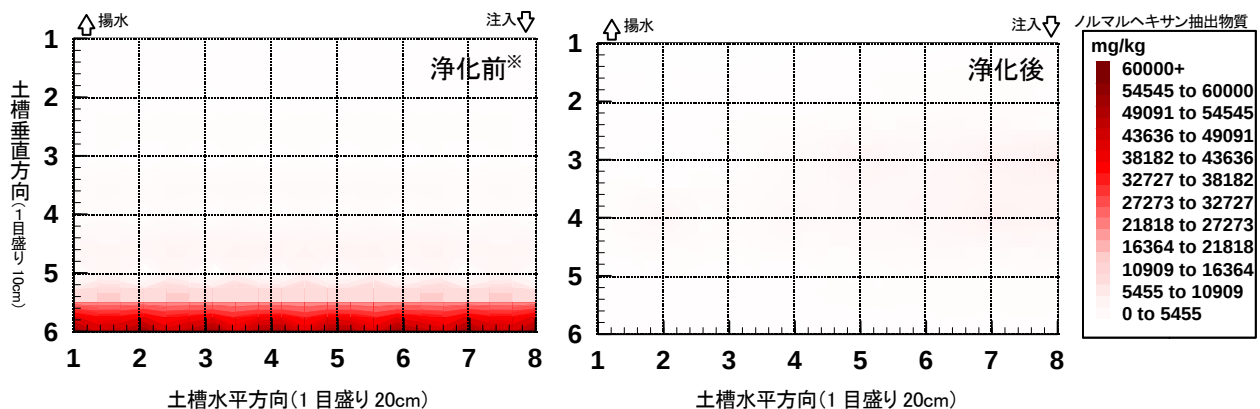


図8 浄化前後の油分濃度分布（ノルマルヘキサン抽出物質）

※: 浄化前は非汚染層および汚染層の各々代表サンプルを採取し分析した結果を入力

浄化3日目までで総油量(排水で回収された油量と土槽内に残留する油量の合計。添加した油量 8L と一致。)の 55%が回収された。排水で回収された油分の比率は、総油量に対し 87%となった。

表3 回収油量算定結果

項目	油量(L)	比率(%)※1	累積回収率(%)※2
回収量(0～3日目)	4.4	55	55
回収量(～17日目)	1.4	18	73
回収量(～26日目)	1.1	14	87
土槽内残留量	1.1	14	—
計	8.0	—	—

※1: 浄化期間において排水として回収された油量および土槽内残留油量の合計を 100%としたときの割合

※2: ※1の比率を洗浄日数の経過にともない累積した数値

§5. 評価

除去率は、浄化前後の土壌分析結果から 84%、排水での回収量も含めた油分収支から 87%の結果となり、原位置洗浄技術が実用レベルの性能を示したものと評価する。しかし、汚染層での浄化後の残留油分濃度が 1,000mg/kg 以下に達しており、当初汚染土部分の除去率が 99%であったことや、非汚染層への乳化油分の拡散が認められたことから、本研究で用いた洗浄剤には、高い除去率を得る性能があるが、土壌間隙より引き剥がされた後の油分の回収に一段の工夫の余地が残されていることも示唆している。

また、洗浄開始後に注入井戸の水位が土槽表層付近まで上昇したことは、洗浄液の成分が土壌間隙中に徐々に蓄積し、その結果、注入性が悪化したことを示している。洗浄液の地盤への浸透によって招来される透水性の低下に合わせて、注入・揚水をコントロールすることが必要である。

§6. まとめ

土槽試験により界面活性剤を用いた原位置洗浄プロセスの性能評価を行った。

- ① 界面活性剤は、2日目には油を随伴しながら揚水井戸に到達し、充填した模擬汚染層に含まれる高濃度の軽油を除去した。
- ② 当初汚染層の油分濃度は 59,000mg/kg から 440mg/kg となり、除去率は 99%に達した。一方、非汚染層に乳化した油分の拡散が生じた。当初非汚染層の二次汚染を勘案した地層全体の除去率は 84%となった。

- ③ 排水分析、土壌分析結果から算定した油の回収率は、87%であった。

以上の結果より、界面活性剤を用いた原位置洗浄プロセスによって、一般に言われている油汚染地盤の浄化目標 1,000mg/kg を達成することは十分に可能であると考ええる。サイトでの浄化においては、洗浄液成分の土壌間隙への蓄積によってもたらされる注入性の変化に合わせた、洗浄液の注入が必要である。

参考文献

- 1) (社)土壌環境センター, 平成 19 年度土壌汚染状況調査・対策に関する実態調査結果, 2008 年 10 月 14 日
- 2) 岡田正明 ら: 界面活性剤を用いた油汚染地盤の原位置洗浄法の研究, フジタ技術研究報告, 43, p.41-46, 2007
- 3) 岡田正明 ら: 界面活性剤を用いた油汚染地盤の原位置洗浄法の研究(その2), フジタ技術研究報告, 44, p.43-48, 2008
- 4) 岡田正明 ら: S5-29 界面活性剤を用いた油汚染地盤の原位置洗浄技術に関する検討ー潤滑油に対する浄化性能評価ー, 第15回地下水・土壌汚染とその防止策に関する研究集会要旨集, p.146, 2009

ひとこと



岡田 正明

原位置洗浄は、お客様の敷地に装置を設置して浄化を進める技術です。サイトに赴く前に行う、オーダーメイド洗浄剤の配合や設備の設計などの作業が施工の段階で生きてくると思っています。多くの場所で導入していただけるよう性能を高めていきたいと思っています。