

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 4 月 11 日現在

機関番号：33907

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01535

研究課題名(和文) 非掘削浄化における課題解決のための新しい地盤環境修復技術

研究課題名(英文) New Ground Environment Remediation method for Solving Issues in Non-Excavation Remediation

研究代表者

棚橋 秀行 (Tanahashi, Hideyuki)

大同大学・工学部・教授

研究者番号：00283234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,500,000円

研究成果の概要(和文)：機械油汚染地盤に対して界面活性剤を用いて非掘削浄化する方法を開発することが本研究の主眼である。得られた主な成果を、以下にまとめる。重曹と酒石酸による反応発泡を活用する方法では、細かい時間ピッチで少量ずつ、多ポイントで発生させる送液パターンのほうがムラを残さず浄化できた。油層の上から押さえつけるような界面活性剤の流れ成分と、横からの流れ成分が併存するケースでは浄化の確実性が高かった。動水勾配による浄化においては、HLB値の異なる2種類の界面活性剤を配合することにより、乳化性能を保ちつつ界面活性剤成分の濃縮・停滞を起こさずに浄化完了できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械油による地盤汚染は浄化技術の確立が最も遅れているもののひとつである。界面活性剤により機械油を乳化・可動化し非掘削で回収する方法(SEAR)は、工場操業中に行えるメリットがあるが、終盤になると効率が低下し長期化するというデメリットがある。本研究の学術的意義はこの問題を解決する技術の開発にある。

機械油汚染にとどまらず、地盤環境汚染が問題になっているが、環境修復工事が不調に終わった際の補償や訴訟などのリスクを恐れ着手されないまま放置されている土地(ブラウンフィールド)が多く存在している。本研究は、こうした問題を解決し、我が国の地盤環境の改善に貢献する社会的意義もある。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of this research is developing a non-excavation remediation method using surfactants for machine oil contaminated ground. The main results obtained are summarized below.(1) In the method using reaction foaming with sodium bicarbonate and tartaric acid, purification was more evenly achieved with a liquid feeding pattern that generated small amounts at multiple points at a fine time pitch.(2) Purification reliability was high in the case where the flow component of the surfactant that pressed down on the oil layer and the flow component from the side coexisted.(3) In purification by hydraulic gradient, by blending two types of surfactants with different HLB values, purification was completed without causing concentration or stagnation of surfactant components while maintaining emulsification performance.

研究分野：地盤工学関連

キーワード：地盤汚染 非掘削浄化 油汚染 環境修復

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

工場などからの機械油による地盤汚染が問題となっている。機械油は、浄化技術の確立が最も遅れているもののひとつである。界面活性剤により機械油を乳化・可動化し非掘削で回収する方法 (SEAR) は、工場操業中に行えるメリットがあるが、序盤に対して終盤になると効率が低下し長期化するというデメリットがある。そのため掘削除去できる機会まで油汚染が放置され地盤内で拡大しているのが現状である。機械油汚染にとどまらず、地盤環境汚染が問題になっているが、環境修復のための工事が不調に終わった際の補償や訴訟などのリスクを恐れるあまり、着手されないまま放置されている土地 (ブラウンフィールド) が多く存在している。本研究は、こうした社会的背景に対して問題を解決し、我が国の地盤環境の改善に貢献するためのものである。

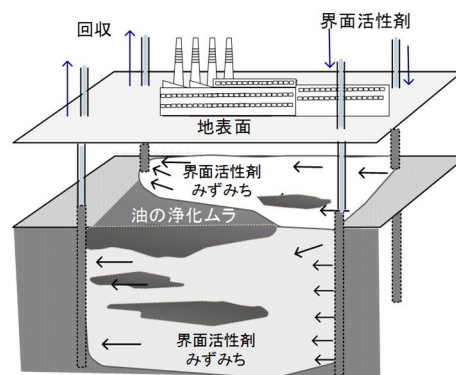


図-1 浄化終盤における残留油のムラ

2. 研究の目的

終盤になると効率が低下し長期化する主な原因として、図-1 のように終盤になると油の浄化が進んだ領域を通過し回収されるだけの界面活性剤の量が膨大になり効率が低下すること、それに伴い浄化ムラの除去が長期化を引起こすこと、があげられる。本研究の目的は室内土槽実験を行い、この課題の解決策を探ることにある。

3. 研究の方法

機械油として自動車用のエンジンオイルを用いた模擬油汚染地盤を作成し、SEAR による浄化の進行を記録する様々な条件での実験を 5 年間にわたって行った。主な実験装置は大型二次元土槽 (内寸幅 72.0cm × 高さ 62.0cm × 奥行き 5.0cm) を用いた。充填土試料はズダン によって赤く着色したエンジンオイルで汚染させた豊浦砂および珪砂 6 号を使用した。油汚染試料土における汚染濃度は質量比 10% とした。浄化液は主として HLB10.5 の界面活性剤 3% に水を加えて作成した水溶液を用い、増粘剤として CMC (カルボキシメチルセルロース) の粉末を水で溶いたものにより実験を行った。また、重曹添加界面活性剤と酢酸添加界面活性剤を交互に圧入し、発泡反応を模擬地盤内で起こすことで、ムラの無い浄化を期待する実験も実施した。

4. 研究成果

(1) 2018 年度の成果

2018 年度の室内土槽実験の結果、界面活性剤の圧入送液と真空吸引による回収ではうまくゆが、動水勾配のみによる浸透流では地盤間隙内での濃縮が卓越し、界面活性剤が停滞してしまうという新たな事実を見出すに至った。またこの現象は、大型 3 次元土槽では界面活性剤の圧入送液と真空吸引による回収でも発生したことから、ある一定の流下距離を浸透した際にも発生することが分かった。この界面活性剤の濃縮・停滞は、本研究で当初抽出した終盤での浄化効率の低下よりも、早い段階で浄化が進まなくなるという点で、実際の現場でさらに重要な現象を室内実験で見出すことができたと考えられる。

この界面活性剤の地盤間隙内での濃縮・停滞について着目し、カラム実験を中心に観察・分析を行ったところ、次の結果が得られた。汚染油が初期に存在しない清浄土に通液しても界面活性剤の停滞は発生する。この停滞の有無には界面活性剤 (厳密には水溶液) の粘性は関係がなく、界面活性剤の HLB 値が影響している。HLB 値の小さい (親油性の高い) 界面活性剤ほど濃縮・停滞が起きやすい。HLB 値の大きい (親水性の高い) 界面活性剤では濃縮・停滞がほぼ起きない。これらのことより、HLB 値の小さい (親油性の高い) 界面活性剤は、容器内では水溶液として存在しているが地盤の間隙内を通過してゆく際に自分自身が『油滴状』になりやすくこれが濃縮・停滞を引き起こしていることがわかった。この解決策として、HLB 値の異なる界面活性剤を配合するという、全く新しい視点での油汚染地盤の浄化実験を行った。その結果、汚染油の乳化性能を保ちつつ、濃縮・停滞を起こさずに動水勾配流で浄化完了することに成功した。HLB 値の小さい (親油性の高い) 親油性の界面活性剤がまず汚染油の乳化を行い、これを HLB 値の大きい (親水性の高い) 界面活性剤がすすぐように輸送することで、この問題をクリアすることができたと考えられる。

(2) 2019 年度の成果

浄化範囲を3つのエリアに分け、それぞれの浄化の際の課題に着目して実験を行った。浄化範囲Ⅰ：建物直下の油汚染の漏洩源であり、鉛直下方向へ油が浸透しているエリアである。油分量は多いが地中埋設物があり、その隙間に入り込んだ油を回収するのは難しく、課題A「地下埋設物による油分移動の阻害」が浄化の長期化を引き起こすこと、が懸念される浄化範囲である。浄化範囲Ⅱ：浄化範囲Ⅰの周辺、汚染源近傍の比較的狭い範囲に油層が厚みをもって存在しているエリアである。これを乳化・移動させるには埋設されたストレーナー管より界面活性剤を圧入し、乳化油を真空圧で回収する方法が適している。しかしこの方法では、課題Bとして、「終盤になると残留油に接触するよりも、素通りするだけの界面活性剤の量が膨大になり効率が低下すること」、が問題になる。浄化範囲Ⅲ：浄化範囲Ⅰのさらに外側の広い範囲に薄く油膜が広がっているエリアである。ここでは注入井戸・揚水井戸の水頭差（動水勾配）による浄化が主に行われるが、流下距離が長くなり、かつ圧力がかかりにくいいため、課題C「界面活性剤の地盤間隙内での濃縮・停滞が発生しやすい」という点が問題となる。

2019年度の研究より得られた知見は以下のとおりである。浄化範囲Ⅰの課題A「地下埋設物による油分移動の阻害」について：地下埋設物を再現した実験装置を作成した。この装置により、界面活性剤の流向・流速、発泡効果の有無などのケースを行い、実験結果を多角的に比較した。これにより、埋設管の間を流れる界面活性剤が低流速（低浸透圧）であっても、よどみ領域を作らずに汚染油をムラなく乳化・輸送するうえで、間隙内二液反応発泡法が有効であることが確認できた。浄化範囲Ⅱの課題B「終盤になると残留油に接触するよりも、素通りするだけの界面活性剤の量が膨大になり効率が低下すること」について：新たに製作した深い土槽（幅190cm×高さ140cm×奥行き5cm）を用いた室内実験を実施した。その結果、昨年までの実験で見出した「界面活性剤を油層の上から押さえつける流れ成分と、横からの流れ成分の併用」で行ったケースのすべてを通じ、安定した浄化成果が得られることが確認できた。浄化範囲Ⅲの課題C「界面活性剤の地盤間隙内での濃縮・停滞が発生しやすい」について：HLB値の異なる界面活性剤を配合するという新しい視点での油汚染地盤の浄化実験を行った。その結果、汚染油の乳化性能を保ちつつ、濃縮・停滞を起こさずに動水勾配流で浄化完了することに成功した。HLB値の小さい（親油性の高い）親油性の界面活性剤がまず汚染油の乳化を行い、これをHLB値の大きい（親水性の高い）界面活性剤がすすぐように輸送することで、この問題をクリアすることができた。2019年度は界面活性剤の配合比に加え、特に送液の手順・配置について有益な知見が得られた。

（3）2020年度の成果

2020年度も浄化範囲を3つのエリアに分け、それぞれの浄化の際の課題に着目して実験を行った。2020年度の研究より得られた知見は以下のとおりである。

浄化範囲Ⅰの課題A「地下埋設物による油分移動の阻害」について：地下埋設物を再現した実験装置を作成した。この装置により、界面活性剤の流向・流速、発泡効果の有無などのケースを行い、実験結果を多角的に比較した。2019年度までは真空圧による吸引を行う関係で地表面を被覆していたが、2020年度は空気の侵入をあえて活用してみた。その結果、間隙内二液反応発泡との組み合わせによって、これまでの方法を大きく上回る回収率となり、埋設管の間によどみ領域を作らず汚染油をムラなく乳化・輸送することが新たに確認できた。

浄化範囲Ⅱの課題B「終盤になると残留油に接触するよりも、素通りするだけの界面活性剤の量が膨大になり効率が低下すること」について：2019年度に製作した土槽（幅190cm×高さ140cm×奥行き5cm）を用いた室内実験を実施した。その結果、これまでの実験で見出した「界面活性剤を油層の上から押さえつける流れ成分と、横からの流れ成分の併用」で行うことで安定した浄化成果が得られた。ただし実際の現場を想定すると、浄化のための地下埋設管の数が若干多いことや、複数のデバイスを併用することで浄化プロセスが煩雑であることが今後の課題であると思われる。浄化範囲Ⅲの課題C「界面活性剤の地盤間隙内での濃縮・停滞が発生しやすい」について：昨年度までにこれまでにHLB値の異なる2種類の界面活性剤を配合するという新しい視点での油汚染地盤の浄化実験を行い、汚染油の乳化性能を保ちつつ、濃縮・停滞を起こさずに動水勾配流で浄化完了することに成功した。2020年度は、さらにHLB値の異なる3つめの親油性の高い界面活性剤を導入し、乳化性というより油溶性を主眼とした多くの実験を実施した。その結果、複数の界面活性剤の配合比だけでなく、流れ場の生成方法・回収の仕方の組み合わせによって、浄化効果が大きく異なることが確認できた。

（4）2021年度の成果

2021年度も浄化範囲を3つのエリアに分け、それぞれの浄化の際の課題に着目して実験を行った。2021年度の研究より得られた知見は以下のとおりである。

浄化範囲Ⅰの課題A「地下埋設物による油分移動の阻害」について：地下埋設物を再現した実験装置を新たに作成した。これまでうまく検討できなかった3次元、とくに土槽奥行き方向の残留油分の分布を測定することが可能となった。この装置により、界面活性剤の流向・流速、発泡

効果の有無などのケースを行い、実験結果を多角的に比較した。その結果、間隙内二液反応発泡における二酸化炭素の絶対量が同じであれば、細かい時間ピッチで少量ずつ、多ポイントで発生させる送液パターンのほうがムラを残さず浄化できることを見出した。また、2020年度と同じく空気の侵入を活用してみた結果、これまでの方法を大きく上回る回収率となり、埋設管の間によどみ領域を作らず汚染油をムラなく乳化・輸送することが新たに確認できた。

浄化範囲の課題B「終盤になると残留油に接触するよりも、素通りするだけの界面活性剤の量が膨大になり効率が低下すること」について：2021年度はこれを回収ノズルの改良という新たな視点から取り組んだ。これまでの実験から、土槽の最下流に設置する油の回収デバイス（ノズル・井戸）の形状が、浄化効率に大きく影響することがわかってきたため、これに着目し最適な回収デバイスの開発を行った。その結果、円柱形の回収ノズルの外縁に油膜を洗浄するパイプを巻き付けることによって回収効率が向上することが見いだされた。浄化範囲の課題C「界面活性剤の地盤間隙内での濃縮・停滞が発生しやすい」について：2021年度は、浄化範囲の実験においてこれまでに見出した成功パターンである「界面活性剤を油層の上から押さえつける流れ成分と、横からの流れ成分の併用」の浄化工程として、地表からの鉛直散布を行ったところ、これまでで最も高い浄化効率の実験結果を得ることができた。この課題Cについてはおおよその解決に至ったと考えられた。

(5)2022年度の成果

3つのエリアのうち、浄化範囲と課題BとCについては2021年度までの実験で解決のめどがついたため、2022年度は浄化範囲の課題A「地下埋設物による油分移動の阻害」に着目して実験を行った。2022年度の研究より得られた知見は以下のとおりである。

2021年度に引き続き、地下埋設物を再現した実験装置を用いて、埋設管間の油分を移動させるために間隙内二液反応発泡法におけるのぞましい送液パターン（酒石酸と重曹溶液の割合など）と空気流の組み合わせを最適化することに取り組んだ。その結果、これまで継続的に稼働させていた真空圧吸引を、あるピッチで間欠的に停止させることで発泡効果が促進され浄化範囲が拡大できることを見出した。また新たな試みとして食用油を地中に浸透させることで汚染鉱物油を溶解・輸送する実験も実施した。写真-1の初期状態に示すように油汚染土を充填し、左上部から洗浄液を投与し、右下より回収する実験であるが、黒く写っているように逆L字型の埋設物が設置されていることで右上部の浄化が阻害される。これに対して洗浄剤を変更するだけで流速などは変えず、どの洗浄剤がもっとも隅々まで浄化できるかの比較を行った。写真-2は界面活性剤のみ、写真-3はそれに間隙内二液反応発泡法を加えたもの、写真-4はさらにそれに食用油の送液を追加した実験の最終結果である。写真-2の界面活性剤のみに比べれば、間隙内二液反応発泡法を加えた写真-3はある程度浄化範囲が広がってはいるが、食用油を追加した写真-4はほとんど油が残留しておらず、明らかに浄化効果が最も高いことがわかる。本科研費の5年間の研究でここまで浄化が達成できたことは初めてであり、最終年度に最も良い成果を得ることができた。今後はこの「間隙内二液反応発泡法と食用油の併用」について、適用範囲の拡大やノウハウの蓄積に向けさらに研究を推進してゆきたいと考えている。



写真-1 実験初期状態



写真-2 界面活性剤のみの結果



写真-3 間隙内二液反応発泡法を加えた結果



写真-4 はさらに食用油を加えた結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 安部友規・棚橋秀行	4. 巻 14
2. 論文標題 油汚染地盤の浄化に界面活性剤のHLB値と送液・回収方法が及ぼす影響に関する室内土槽実験	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第14回環境地盤工学シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 85-92
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Puligadda, L.K.P. and Kikumoto, M.	4. 巻 9(8)
2. 論文標題 Modeling hysteresis of water-NAPL-air suction-saturation relationship in porous media	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JGS Special Publication	6. 最初と最後の頁 387-393
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小室りさ, 菊本統	4. 巻 14
2. 論文標題 土壌からの重金属の溶出特性に及ぼす粒度の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第14回環境地盤工学シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 35-38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 棚橋 秀行・古田 淳士・野村 凌平	4. 巻 -
2. 論文標題 界面活性剤の動水勾配流による油汚染地盤の非掘削浄化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第13回環境地盤工学シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 pp.65-70
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 棚橋 秀行・古田 淳士・野村 凌平	4. 巻 -
2. 論文標題 界面活性剤の浸透制御による油汚染地盤の非掘削浄化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Kansai Geo-Symposium 2019 -地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム-」論文集	6. 最初と最後の頁 pp.39-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Puligadda, L. K. V. and Kikumoto, M.	4. 巻 63
2. 論文標題 Concept of effective suction for describing hysteresis of multiphase pressure-saturation relationship in porous media	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 安部友規・古田淳士・棚橋秀行
2. 発表標題 地下埋設物を有する建物直下の油汚染地盤の浄化(その1)
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古田淳士・野村凌平・棚橋 秀行
2. 発表標題 界面活性剤の動水勾配流による油汚染地盤の非掘削浄化(その1)
3. 学会等名 地盤工学会 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安部友規・古田淳士・棚橋秀行
2. 発表標題 地下埋設物を有する建物直下の油汚染地盤の浄化(その2)
3. 学会等名 土木学会 令和2年度 第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古田淳士・野村凌平・棚橋秀行
2. 発表標題 界面活性剤の動水勾配流による油汚染地盤の非掘削浄化(その2)
3. 学会等名 土木学会 令和2年度 第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安部友規・棚橋秀行
2. 発表標題 界面活性剤の配合比が油汚染地盤の浄化に与える影響に関する室内実験
3. 学会等名 令和2年度 土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 棚橋秀行・古田淳士・野村凌平
2. 発表標題 機械油汚染の非掘削浄化に関する室内土槽実験
3. 学会等名 第25回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 棚橋秀行・古田淳士・野村凌平
2. 発表標題 室内大型土槽を用いた油汚染地盤の非掘削浄化
3. 学会等名 第24回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古田 淳士・野村 凌平・ 棚橋 秀行
2. 発表標題 間隙内二液反応発泡法を用いた油汚染地盤の非掘削浄化
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古田 淳士・野村 凌平・ 棚橋 秀行
2. 発表標題 界面活性剤の物性値と浸透制御に着目した油汚染地盤の非掘削浄化
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Komuro, R. and Kikumoto, M.
2. 発表標題 Mechanism of delayed leaching of heavy metals from naturally contaminated soils
3. 学会等名 Proc. 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	菊本 統 (Kikumoto Mamoru) (90508342)	横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・教授 (12701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------